

# CONSOLIDATION DE LA COUCHE 1996 RECOUVRANT LES SÉDIMENTS CONTAMINÉS DU SECTEUR DE LA BAIE DES HA ! HA ! (FJORD DU SAGUENAY), QUÉBEC :DONNÉES PRÉLIMINAIRES

F. MAURICE<sup>1</sup>, J. LOCAT<sup>1</sup>, S. LEROUEIL<sup>2</sup>, R. THERRIEN<sup>1</sup> et R. GALVEZ-CLOUTIER<sup>2</sup>

## Résumé :

À l'été 1997, plus de 60 échantillons de surface ont été récoltés dans la Baie des Ha! Ha!, de même que des boîtes (box core), des pistons et des Lehigh. La couche de sédiments de 1996, d'une épaisseur de 28cm au centre de la Baie des Ha ! Ha !, présente un profil d'indice de liquidité typique d'un sédiment normalement consolidé, mais mis en place rapidement et non bioturbé : valeur qui descend régulièrement de 4,0 à 3,0. Le profil *in situ* de la résistance au cisaillement de la couche de 1996 est lui aussi typique d'un sédiment non bioturbé avec une augmentation régulière selon la profondeur. Dès que l'on retrouve la couche bioturbée, les variations sont nettement plus irrégulières. Ces données vont servir de référence pour les changements qui seront observés au cours des années à venir, autant à propos de la consolidation naturelle du sédiment qu'aux variations dues à la bioturbation et aux phénomènes de recolonisation.

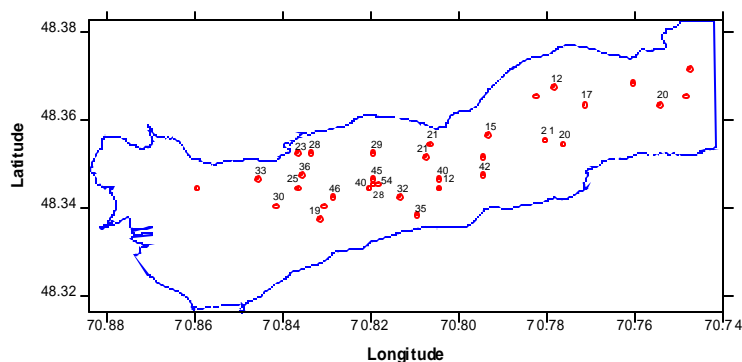
## Mots clés :

Sédiments, turbidités, consolidation, bioturbation, indice de liquidité, résistance au cisaillement, essais SEDCON.

## Problématique

En juillet 1996, les pluies diluviennes tombées dans la région du Saguenay ont provoqué une crue importante des eaux des rivières dans ce secteur. La rivière des Ha! Ha! seule a érodé plus de 6 millions de tonnes de sédiments. Ainsi, plusieurs millions de mètres cube de matériaux de toutes sortes ont été acheminés vers le fjord du Saguenay. Cette couche de matériaux, déposée subitement sous forme de turbidite, a recouvert les sédiments contaminés de la Baie des Ha ! Ha ! d'une épaisseur de 5 à 60 centimètres de nouveaux sédiments "propres". Des événements semblables se sont produits dans le Bras Nord du fjord et à l'Anse St-Jean.

Figure 1 : Épaisseur en centimètres de la couche de 1996



<sup>1</sup> Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Ste-Foy, G1K 7P4

<sup>2</sup> Département de génie civil, Université Laval, Ste-Foy, G1K 7P4

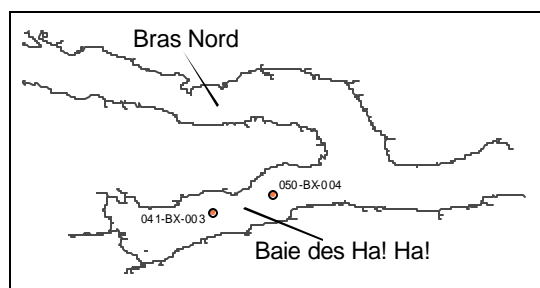
La couche de sédiments de 1996 agit comme une barrière naturelle à la contamination présente dans la Baie des Ha ! Ha !. Le comportement géotechnique de la couche de 1996 doit être analysé afin de prévoir la résistance à l'érosion, aux glissements sous-marins et afin d'évaluer les changements qu'apportera la bioturbation sur les propriétés mécaniques de ce dépôt récent.

Il s'agit donc d'établir une courbe de référence pour déterminer les conditions initiales de la consolidation, c'est-à-dire sans les effets de la bioturbation. La consolidation dans la nature sera aidée par les effets de la bioturbation. Comme celle-ci est impossible à simuler en laboratoire, l'étude de la consolidation de la couche de 1996 présente deux facettes. Un premier aspect consiste au suivi et à la vérification de la progression de la consolidation des sédiments de 1996 *in situ*. La récolte à chaque année d'échantillons provenant de la Baie des Ha ! Ha ! et du fjord sera ainsi nécessaire ([Projet Saguenay](#)). Au cours de l'été de 1997, plus de 60 échantillons de surface ont été recueillis dans la partie amont du fjord du Saguenay, plus particulièrement dans la Baie des Ha ! Ha !. En plus, des échantillons ont aussi été recueillis à l'aide d'un carottier à boîte. Des profils géotechniques détaillés de ces échantillons serviront à la comparaison entre la consolidation *in situ* affectée par la bioturbation et la consolidation simulée en laboratoire. Le deuxième volet de cette étude préliminaire consiste à la simulation de l'enfouissement des sédiments de 1996 pendant une longue période de temps. En effet, comme les sédiments de 1996 recouvrent des sédiments fortement contaminés, il est essentiel de prévoir le comportement mécanique de ceux-ci à long terme. À un taux de sédimentation d'environ 1 à 10mm par an, les essais de laboratoire s'imposent pour simuler et accélérer le phénomène de la sédimentation et de la consolidation. Des essais SEDCON (sédimentation-consolidation) ont donc été effectués pour résoudre ce deuxième aspect et seront comparés aux profils géotechniques des sédiments *in situ*.

### Profils géotechniques *in situ*

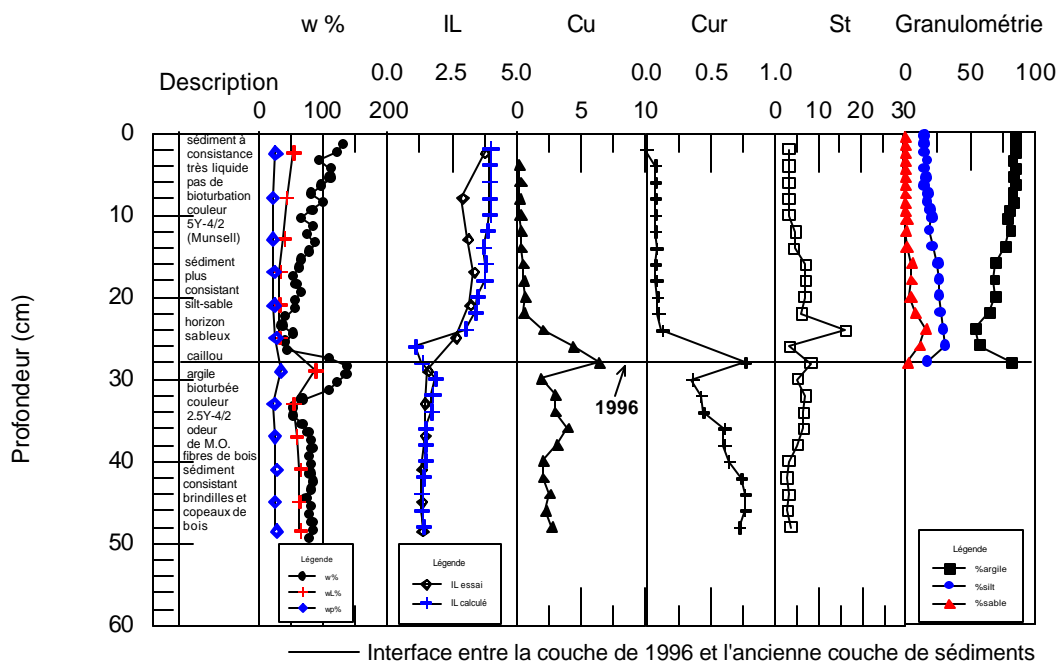
Comme mentionné précédemment, plusieurs échantillons ont été ramassés au cours de l'été 1997 dans le fjord du Saguenay, plus particulièrement dans la Baie des Ha ! Ha !. Les deux principales méthodes d'échantillonnage ont été respectivement l'échantillonnage à la benne et le carottier à boîte. Les essais suivants ont été réalisés sur ces échantillons : granulométrie, limites liquides et plastiques, teneur en eau, résistance au cisaillement intact (cas des échantillons provenant des boîtes), résistance au cisaillement remanié. Ces divers essais ont permis l'élaboration de profils géotechniques détaillés.

Figure 2 : Localisation des boîtes AH9701-040-BX-003 et 050-BX-004



Sur ces profils géotechniques, la couche de 1996 peut facilement être identifiée par la signature typique des turbidites (Perret, 1995). Par exemple, le profil géotechnique du centre de la Baie des Ha ! Ha ! (Figure 3) montre clairement la couche de 1996 qui possède une épaisseur de 28 centimètres. Le profil d'indice de liquidité est caractéristique d'un sédiment normalement consolidé, mais mis en place rapidement et non bioturbé. Cet indice de liquidité a une valeur qui descend régulièrement de 4,0 à 3,0. Le profil *in situ* de la résistance au cisaillement de la couche de 1996 est lui aussi typique d'un sédiment non bioturbé avec une augmentation régulière selon la profondeur. Dès que l'on retrouve la couche bioturbée, les variations sont nettement plus irrégulières.

Figure 3 : Profil géotechnique *in situ* de la boîte AH9701-041-BX-003



Suite à ces diverses analyses, deux échantillons intégrés ont été préparés. Un échantillon provenant d'échantillonnages de surface de la Baie des Ha ! Ha ! et un autre échantillon provenant d'échantillonnages de surface du Bras Nord. Ces deux échantillons intégrés ont été homogénéisés et placés dans des cellules SEDCON, afin de suivre à la fois la phase de sédimentation et celle de la consolidation. De plus, une série d'essais géotechniques usuels a été conduite sur ces échantillons intégrés afin de mieux les caractériser.

## Essais en laboratoire

### Essais géotechniques

Plusieurs essais ont été réalisés sur les deux échantillons intégrés afin de mieux les caractériser. Les résultats de ces essais se retrouvent dans le tableau 1.

Tableau 1 : Propriétés géotechniques des échantillons intégrés

Essais géotechniques	Échantillons intégrés	
	Baie des Ha ! Ha !	Bras Nord
teneur en eau naturelle	61%	70%
limites liquides	32%	39%
limites plastiques	21%	22%
minéralogie aux rayons-X	chlorite, illite, quartz (minéralogie typique des argiles québécoises)	
capacité d'échange cationique	6.4 méq/100g	8.3méq/100g
granulométrie traditionnelle	silt sableux	sable silteux
surface spécifique au bleu de méthylène (g/m <sup>2</sup> )	32	28
résistance au cisaillement remanié (kPa)	≅0.1	≅0.1

### Essais SEDCON

Pour évaluer la consolidation de la couche de 1996, des essais SEDCON ont été effectués. Deux échantillons intégrés ont été préparés et homogénéisés pour ensuite être placés dans des cellules SEDCON (203mm x 280mm), lesquelles permettent à la fois de suivre la sédimentation et la consolidation des sédiments. La phase de sédimentation est suivie initialement, puis les échantillons doivent être chargés périodiquement pour simuler la consolidation naturelle. Le critère de chargement est l'atteinte d'une vitesse de consolidation de  $1,5 \cdot 10^{-7} \text{s}^{-1}$ . Ce critère a été fixé suite à la mesure de la vitesse de consolidation lors d'un essai oedométrique (Perret, 1995).

Les deux essais SEDCON permettent d'obtenir une courbe de référence applicable à un cas de mise en place rapide (c.-à-d. turbidite ou coulée de boue). Les courbes SEDCON sont utilisées pour comparer l'état actuel de la consolidation des sédiments, évalué à partir des divers profils d'indice de liquidité obtenus des échantillons à boîte, et la consolidation simulée en laboratoire.

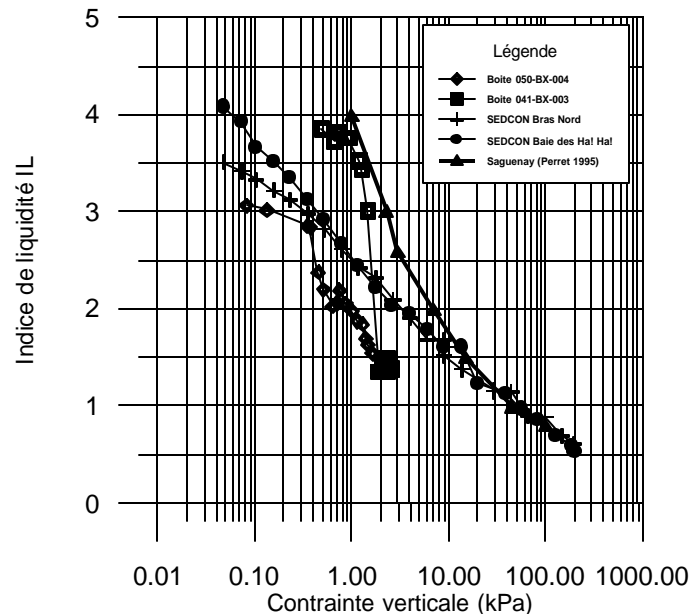
### Interprétation des essais SEDCON

À la figure 4, le profil géotechnique de la boîte 041-BX-003 est au-dessus des courbes SEDCON pour une contrainte de 0,4 à 1,5 kPa, soit pour la couche de 1996. Lorsque la couche de sédiments bioturbés est retrouvée (contrainte supérieure à 1,5 kPa), la courbe du profil de la boîte 041-BX-003 retombe sous les courbes de laboratoire. Ceci montre bien l'effet de la bioturbation sur la consolidation, soit un gain de résistance, la stabilisation et la densification du sédiment. De plus, la courbe du profil de la boîte 041-BX-003 se rapproche de la courbe que Perret avait obtenue suite à des essais SEDCON sur des argiles grises du Bassin central du fjord du Saguenay (Perret, 1995). Ceci indiquerait la similarité de granulométrie pour les deux sédiments en question et un même type de déposition (turbidite, granoclassement).

Le profil de la boîte 050-BX-004 est similaire aux courbes SEDCON, mais légèrement en-dessous de celles-ci dans le graphique, probablement à cause de la présence de bioturbation à cet endroit de la Baie des Ha ! Ha !. Les échantillons intégrés préparés pour les essais SEDCON étaient plutôt grossiers, et la granulométrie des sédiments de la couche de 1996 (boîte 041-BX-003 et 050-BX-004) est beaucoup plus fine. La similarité des courbes SEDCON avec la courbe du profil *in situ* de la boîte 050-BX-004 ne peut donc être

expliquée par la granulométrie. À contrainte élevée, toutes les courbes semblent converger et présentent une même tendance.

Figure 4 : Courbes SEDCON comparées aux profils *in situ*



Des hypothèses concernant la consolidation de la couche de 1996 peuvent être avancées. À court terme, la couche de 1996 va se consolider, donc les courbes des profils *in situ* vont descendre (translation vers le bas) sur la figure 4. L'indice de liquidité va diminuer, mais à contrainte constante. Comme mentionné précédemment, le taux de sédimentation dans le fjord est de 1 à 10mm/année. À court terme la contrainte verticale ne variera pas de façon significative. Cependant, la bioturbation va accélérer le processus de consolidation du sédiment par facilitation du drainage. Les organismes fouisseurs vivant sur le fond marin percent des orifices dans le sédiment, favorisant ainsi l'expulsion de l'eau pendant les tassements.

Comme la couche de 1996 n'est pas très épaisse, la consolidation de celle-ci (soit réduction des pressions interstitielles) devrait se faire assez rapidement. La bioturbation va agir à court et à long terme pour stabiliser, augmenter la résistance au cisaillement et densifier la couche de 1996 (Perret, 1995).

Les données des essais SEDCON vont servir de référence pour les changements qui seront observés au cours des années à venir, autant à propos de la consolidation naturelle du sédiment qu'aux variations dues à la bioturbation et aux phénomènes de recolonisation. Les mêmes courbes SEDCON peuvent aussi être utilisées afin de prédire l'évolution de l'indice des vides suite à l'enfouissement. L'essai de base permet de simuler un enfouissement équivalent à 30 mètres ce qui, à un taux de sédimentation d'environ 1 à 10 mm par an, correspondrait à un temps équivalent à 30 000 ou 3 000 ans.

## Conclusions

Il faut donc vérifier la progression des tassements de la couche de 1996 *in situ*, afin de comparer l'évolution du sédiment dans des conditions naturelles par rapport aux conditions initiales déterminées en laboratoire et mieux prédire à court et à long terme le comportement mécanique de la couche de 1996. Plusieurs boîtes devraient être récoltées dans la Baie des Ha ! Ha ! et dans le Bras Nord, afin de mieux cerner les conditions de consolidation de la couche de 1996 *in situ*. De plus, de nouveaux essais SEDCON devraient être conduits sur des sédiments de 1996 ayant une granulométrie plus fine afin de mieux déterminer les conditions initiales de la consolidation de la couche de 1996. La bioturbation aura donc un effet stabilisateur sur les sédiments de la couche de 1996. Les tassements seront accélérés par ces processus biologiques et l'indice de liquidité va diminuer. La bioturbation va donc augmenter la résistance au cisaillement du matériel et va provoquer la densification des sédiments par les tassements.

## Remerciements

L'auteure principale désire remercier le Fonds pour la formation des chercheurs et l'aide à la recherche, le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, ainsi que l'Alcan.

## Références

- HOLTZ, R.D., KOVACS, W.D. (1991). Introduction à la géotechnique. Éditions de l'école polytechnique de Montréal, Québec, 808 pages.
- LEROUEIL, S., TAVENAS, F., LEBIHAN, J.P. (1983). Propriétés caractéristiques des argiles de l'Est du Canada. *Revue canadienne de géotechnique*, volume 20, pages 681 à 705.
- LOCAT, J., TREMBLAY, H., LEROUÉIL, S. (1996). Mechanical and Hydraulic Behavior of a Soft Inorganic Clay Treated with Lime. *Revue canadienne de géotechnique*, volume 33, pages 654 à 669.
- LOCAT, J., LEFEBVRE, G. (1983). The Compressibility and Sensitivity of an Artificially Sedimented Clay Soil : the Grande-Baleine Marine Clay, Québec, Canada. *Marine Geotechnology*, volume 6, numéro 1, pages 1 à 28.
- LOCAT, J., LEFEBVRE, G. (1986). The Origin of Structuration of the Grande-Baleine Marine Sediments, Québec, Canada. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, London, volume 19, pages 365-374.
- PERRET, Didier (1995). Diagenèse mécanique précoce des sédiments fins du fjord du Saguenay. Thèse présentée pour l'obtention du grade Ph.D., Faculté des Sciences et de Génie de l'Université Laval, Sainte-Foy, Québec, 412 pages.
- PERRET, D., LOCAT, J., LEROUÉIL, S. (1995). Strength Development with Burial in Fine-Grained Sediments from the Saguenay Fjord, Québec. *Revue canadienne de géotechnique*, volume 32, numéro 2, pages 247 à 262.