

CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES ET ANALYSE DU POTENTIEL DE LIQUEFACTION DES SEDIMENTS RECENTS ET POST-GLACIAIRES DU FJORD DU SAGUENAY, QUEBEC (CANADA)

Francis Martin¹, Jean-Marie Konrad², Jacques Locat¹, Pascal Locat², Roger Urgeles³, and Homa Lee⁴

1: Département de Géologie et de Génie Géologique, Université Laval, Québec, Canada

2: Département de Génie Civil, Université Laval, Québec, Canada

3: Departament d'Estratigrafia i Paleontologia, Universitat de Barcelona, Spain

4:USGS, Menlo Park, California, USA

RÉSUMÉ

Suite au déluge du Saguenay en 1996, une couche de sédiments fins s'est mise en place pour former une barrière au-dessus des anciens sédiments contaminés. Étant donné, que la région est reconnue pour ses événements sismiques, la réponse dynamique des sédiments récents et post-glaciaires à un séisme est primordial pour être en mesure de prédire la performance de la couche naturelle de recouvrement. Les résultats proviennent de sédiments reconstitués de la couche de 1996 et d'échantillons d'une carotte prise en 1999 par un carottier Calypso. Les essais de laboratoire comprennent des essais de base en géotechnique, des essais oedométriques, des essais triaxiaux et des essais de cisaillement simple. Une analyse du potentiel de liquéfaction faite à l'aide du logiciel Shake montre bien la susceptibilité des sédiments à se liquéfier sous de grande contrainte.

ABSTRACT

The recent 1996 Saguenay flood, resulted in the deposition of fine-grained sediments on the seafloor and this new layer forms a barrier over the old contaminated sediments. Since the area is well-know for the seismic event, the dynamic response of recent and post-glacial sediments, to seismic shaking, is of prime importance in our capacity to predict the performance of the capping layer. Results are obtained from re-constituted samples of the 1996 flood layer and from samples taken in 1999 with the Calypso Corer. Laboratory tests include basic geotechnical tests, oedometer tests, triaxial tests and simple shear tests. The analyse of the liquefaction potential did with the Shake software show clearly the susceptibility of the sediment to flows under important stress.

1.INTRODUCTION

Le fjord du Saguenay est situé à 200 km au nord-est de la ville de Québec (figure 1). Cette région est bien reconnue pour ses événements catastrophiques tel que les séismes, les glissements de terrain, etc. (Locat et al., 2000) Suite à des précipitations exceptionnelles en juillet 1996, une couche de sédiments fins s'est mise en place au-dessus des anciens sédiments contaminés. Cette événement a donc amené une autre dimension aux problèmes d'instabilités. En effet, est-ce que cette nouvelle barrière pourrait être affecté par un éventuelle séisme et ainsi ré-exposer les anciens sédiments contaminés?

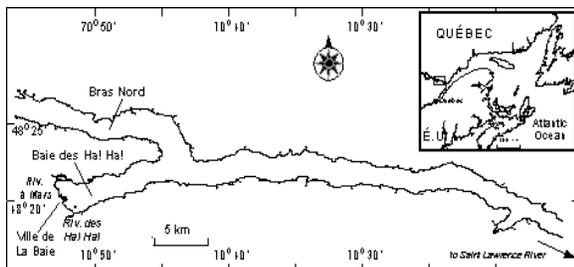


Figure 1 Carte de localisation de la Baie des Ha! Ha!, au Saguenay, Québec.

Des travaux antérieurs ont démontré que la région du Saguenay est un secteur à risque où un tremblement de terre de magnitude 7 à l'échelle de Richter peut-être envisagé. Locat et al.(2000) ont d'ailleurs montré que les événements passés ont laissé différentes signatures morphologiques sur la terre ferme et sur les fonds marins. Seulement pour le séisme de 1988, plusieurs évidences de glissement de terrain, de rupture et de liquéfaction ont été identifiées (Lefebvre et al.,1992) . Lors de ces études, plusieurs autres liquéfactions ont été répertoriées sur le terrain comme antérieurs au séisme de 1988 (Tuttle et al.,1990). De plus, des travaux effectués par Urgeles et al. (2001) et Bergeron et Locat (1989) ont démontré qu'un phénomène de mouvement de masse (coulée, glissement et liquéfaction) ne pouvait se produire dans ce secteur sans un important séisme.

Il devient donc nécessaire d'évaluer la réponse dynamique des sédiments récents et post-glaciaires pour être en mesure de prédire la performance de la couche naturelle de recouvrement. Les travaux pour cette étude comportent divers volets : des campagnes d'échantillonnage en mer, des travaux de laboratoire pour déterminer les caractéristiques



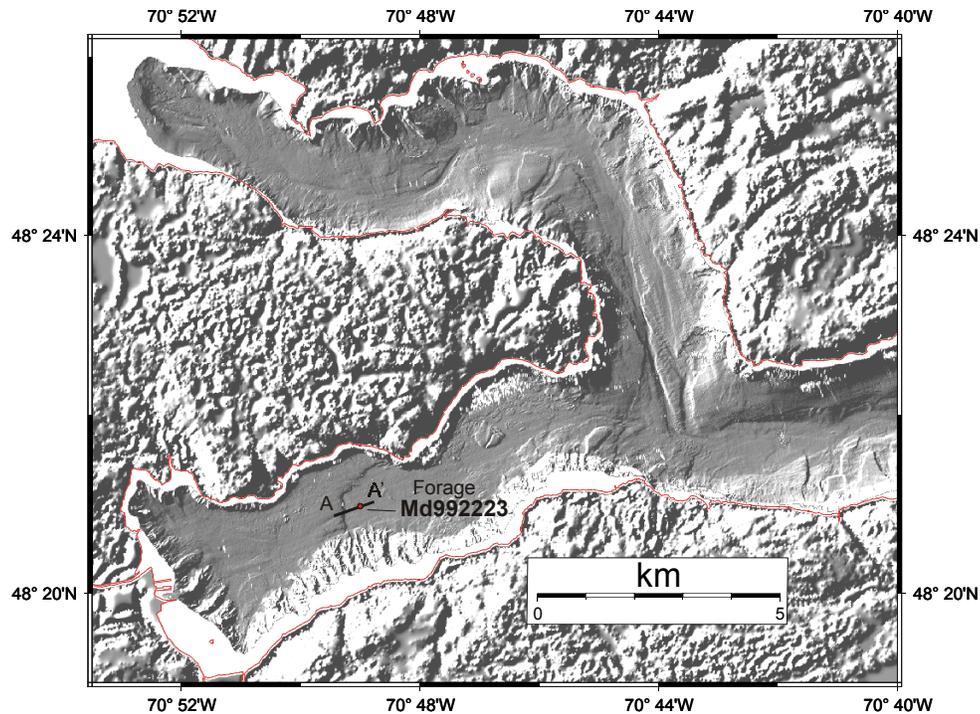


Figure 2 Morphologie du fond du fjord du Saguenay

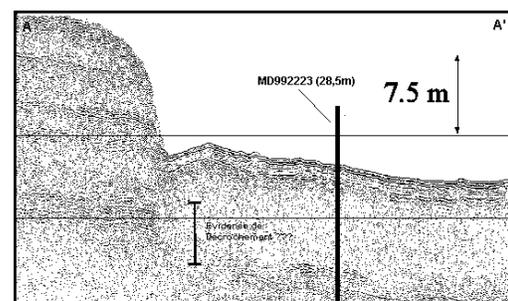
géotechniques statiques et dynamiques des sédiments et finalement une analyse du potentiel de liquéfaction. Puisque les données ne sont pas toutes disponibles jusqu'à maintenant, une analyse du potentiel de liquéfaction simplifiée sera effectuée pour cet article.

2. GÉOLOGIE RÉGIONALE

La région du Saguenay est principalement composée de roches précambriennes d'origine métamorphique. Il y a plusieurs millions d'années, le secteur était tectoniquement actif, ce qui forma la structure du graben du Saguenay. (Hébert et Lacoste, 1998). Au cours du Pléistocène, la région fut recouverte à maintes reprises par les glaciers. L'écoulement glaciaire se fit plus ou moins parallèlement au graben du Saguenay, provoquant ainsi un surcreusement glaciaire important (Lasalle et Tremblay 1978). Le retrait final des glaciers, il y a environ 10 000 ans, fut suivi d'un relèvement isostatique très significatif, de l'ordre de 100 m et d'une forte accumulation de sédiments, pouvant atteindre jusqu'à 1000 m (Locat et Syvitski 1991).

Aujourd'hui, le fjord du Saguenay fait 90 km de long, variant de 1 à 6 km de largeur et avec des parois pouvant atteindre jusqu'à 350 m de hauteur. La région du haut Saguenay (figure 2) est caractérisée par la forme d'un Y et à cet endroit la profondeur d'eau varie entre 0 et 275 m. Le taux de sédimentation se situe entre 1 cm/an à l'embouchure de la rivière saguenay dans le bras nord et 0,2 cm dans la Baie des Ha !Ha ! (Perret et al/ 1995).

Figure 3 Profil sismique de l'escarpement au centre de la Baie des Ha !Ha !



3. MÉTHODOLOGIE

3.1 Travaux en mer

Plusieurs expéditions océanographiques ont été réalisées entre 1998 et 2000 afin de bien définir les différentes couches de sédiments que l'on retrouve dans le fond du fjord du Saguenay. Trois différentes méthodes de forage ont été utilisées pour cette étude : le carottier à boîte permettant de bien recueillir la couche superficielle, de 0 à 0,6 m, un échantillonneur Lehigh prenant jusqu'à 3 m de sédiments et un carottier géant de type Calypso

pouvant récolter jusqu'à 40 m de sédiment. À l'été 1999, sur le navire de recherche scientifique français, le

Marion Dufresne, une carotte (MD992223) de 28,5 m de long a été récupérée au centre de la Baie des Ha !Ha ! (figure 2 et 3).

3.2 Travaux de laboratoire

Afin de bien caractériser les différentes couches, plusieurs essais de laboratoire ont été effectués lors de l'extraction des carottes. Tout d'abord, des limites d'Atterberg, des essais granulométriques et des teneurs en eau ont été faits pour déterminer les caractéristiques de base du sol. Des essais au cône suédois ont permis d'évaluer la résistance au cisaillement intacte et remaniée des sédiments. Le degré consolidation a été déterminé par des essais oedométriques. Les caractéristiques géotechniques statiques (ϕ' et c') ont été évaluées à l'aide des essais triaxiaux. La consolidation et le cisaillement se sont faits en condition isotrope non-drainé (CIU). Éventuellement, des essais de cisaillement simple seront effectués pour définir les propriétés dynamiques des sédiments. Tous ces essais étaient effectués selon les normes du B.N.Q (Bureau de normalisation du Québec), lorsque de telles normes existaient.

3.3 Analyse

Avec les données de laboratoire et le logiciel Shake, une analyse du potentiel de liquéfaction des sédiments sera faite.

4. RÉSULTATS DE LABORATOIRE

4.1 Stratigraphie

La stratigraphie de la carotte MD992223 (figure 4) a été déterminée en combinant les différents essais de laboratoire, la description visuelle et les photos CATSCAN. L'analyse a permis de définir quatre grandes unités, qui ont leurs propres caractéristiques géotechniques. Tout d'abord, au sommet de la colonne stratigraphique, il y a environ un demi-mètre de silt-argile de la turbidite de 1996 (absente sur le profil), reposant sur du silt argileux bioturbé d'une épaisseur d'environ 4 mètres. En dessous, il y a une couche hétérogène d'une dizaine de mètres, composée de sable, de silt et d'argile, correspondant à un empilement de coulée de débris. A partir de 17 m, une unité d'argile grise plutôt homogène et compact déposée en milieu sédimentaire calme constitue la fin de la carotte. Une zone transitoire entre les deux dernières unités est comprise entre 15 et 17 m.

4.2 Profil géotechnique

Le profil géotechnique (figure 4) de la carotte MD992223 obtenu avec les essais de laboratoire montre bien les

propriétés de chaque unité. Il est important de mentionner que les premiers mètres récupérés avec le carottier Calypso sont passablement remaniés et qu'il est préférable de compléter les données avec des échantillonneurs de surface comme le lehigh ou le carottier à boîte.

Turbidite de 1996

Cette couche n'est pas vraiment discernable dans la carotte MD992223, mais elle très visible lors de l'échantillonnage à boîte. Les travaux réalisés sur cette couche par Maurice et *al.* (2000) définissent bien les caractéristiques de cette dernière. Le profil géotechnique montre clairement que cette couche superficielle est de faible résistance. La résistance au cisaillement du sol intact (C_u) est de l'ordre de 1 kPa avec une résistance remanié (C_{ur}) inférieure à 0,1 kPa. La teneur en eau des sédiments varie entre 45 % à la base de l'unité jusqu'à 130 % en surface. Le sol est légèrement plus silteux qu'argileux. Les sédiments de cette couche sont inorganiques et de plasticité faible à moyenne.

Silt argileux bioturbé

Cette couche a aussi été légèrement remaniée lors de l'échantillonnage de la carotte MD992223. Les caractéristiques ont été complétées avec un Lehigh (absent sur le profil). Le sédiment est plus silteux qu'argileux. La teneur en eau dans cette unité varie entre 100% à 45%. C'est un sol mou où le C_u est compris entre 1 et 10 kPa et le C_{ur} est de 1 kPa. Les sédiments sont bioturbés et il y a une plus forte présence de matière organique (entre 3 et 6 %). Les limites liquide et plastique varient ainsi : $w_L(\%)=50$ à 100 et $w_P(\%)=17$ à 35. Plusieurs travaux ont été réalisés par Perret et *al.* (1995) et Bergeron et *al.* (1989) sur ces sédiments.

Couche hétérogène de sable-silt-argile

Cette couche est très hétérogène. Elle est constituée d'un mélange de sable, de silt et d'argile variant beaucoup avec la profondeur. En général, le sable prédomine sur le silt et l'argile en terme de pourcentage, mais il est possible de voir des horizons plus silteux. La fraction argileuse, à 12 m, est inférieure à 10%. La teneur en eau diminue avec la profondeur dans le profil passant de 40% à 20%. La résistance au cisaillement a été faite sur les sections plus argileuses et montre une croissance avec la profondeur, soit de 15 à 40 Kpa. Le pic de résistance visible sur le profil correspond à un horizon de sable dense. La limite de liquidité varie entre de 30 à 38 tandis que la limite plastique se situe autour de 15-20.



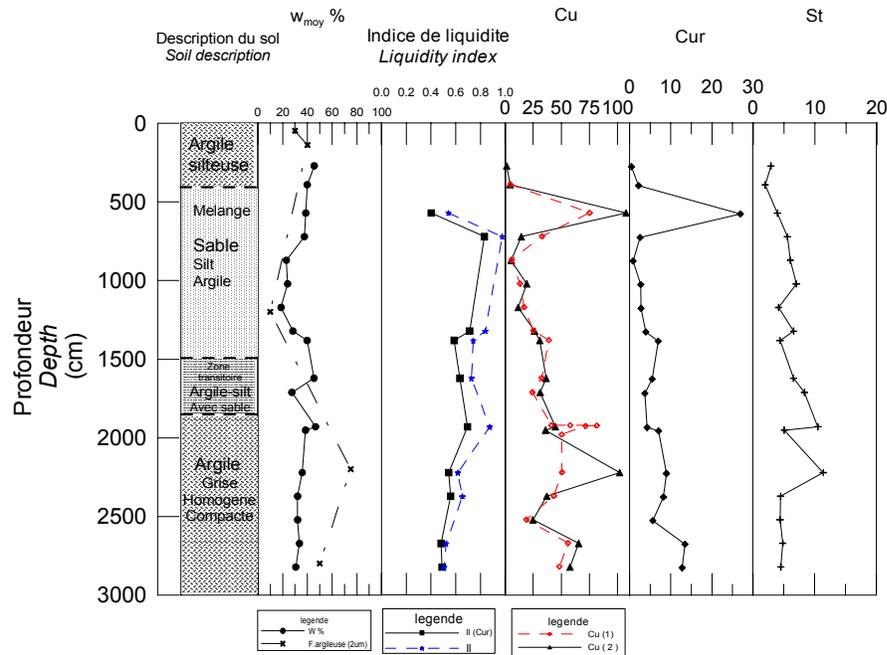


Figure 4 Profil géotechnique de la carotte MD992223

Argile Grise

Cette argile grise pourrait correspondre au début de l'argile de Laflamme. Cette unité d'argile est passablement homogène et elle peut contenir à certaines occasions des petits lits de silt ou de sable. La granulométrie est très fine, généralement, il y a entre 50 et 75 % de fraction argileuse (2 µm). A ce niveau, le matériel commence à être raide. La résistance au cisaillement intact du sol varie entre 45 et 70 kPa, avec une résistance remaniée d'environ 10 kPa. Une anomalie de 100 kPa observable à 23 m correspond à un petit horizon plus sableux. La teneur en eau est stable à 30% avec la profondeur. L'argile est inorganique avec une limite liquide de 45 et une limite plastique de 20.

4.3 Compressibilité

Les essais oedométriques (figure 5) ont permis de constater que le sédiment se retrouve dans un état normalement consolidé ou légèrement surconsolidé s'il ont considéré que l'échantillon est remanié lors de l'échantillonnage. Dans ce cas, les valeurs d'OCR oscillent autour de 1, signifiant que la contrainte de pré-consolidation équivaut à la contrainte verticale. Le rapport de Cu/σ'_p en fonction de la profondeur varie autour de 0,25 confirmant ainsi l'état normalement consolidé du sol.

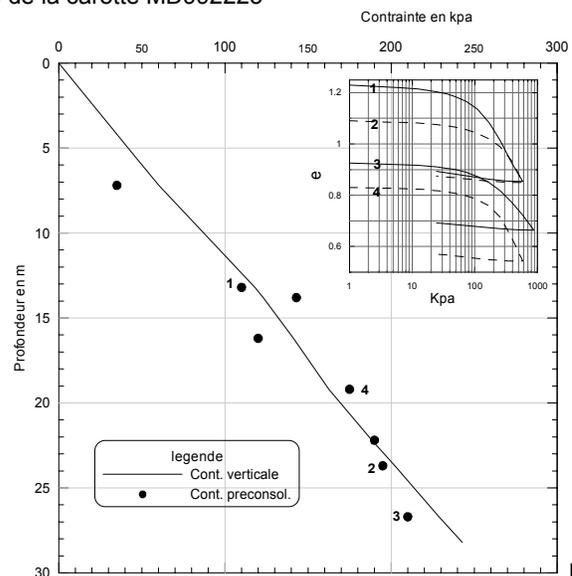


Figure 5 État de consolidation des sédiments du fjord du Saguenay.

4.4 Résistance au cisaillement

Les essais triaxiaux servent à déterminer les paramètres d'état critique de chaque matériel. Les essais (figure 6) ont été réalisés sur les quatre unités principales définies précédemment. Tous les essais ont été réalisés en conditions isotropes et non-drainés (CIU). Ces valeurs permettent de définir les caractéristiques géotechniques statiques et serviront à définir l'enveloppe de rupture théorique lors des essais de cisaillement simple.

Turbidite de 1996

Tout d'abord cette couche étant originellement de trop faible consistance pour faire des essais valables, une couche reconstituée à été faite avec l'essai SedCon. Cet essai consiste à prendre les sédiments de la couche en question et à les faire sédimenter puis à les consolider à la contrainte désirée (90 Kpa dans ce cas). Les résultats (figure 6A) montrent que la couche déposée lors du déluge de 1996 a un comportement dilatant correspondant au type de matériel (silt) et à la forte consolidation (90 Kpa). L'angle de friction (ϕ') est de 30° et la cohésion (c') est d'environ 3-4 kPa.

Silt argileux bioturbé

Le comportement contractant de la couche d'argile bioturbé est typique d'un sédiment normalement consolidé à de faible contrainte. Les résultats (figure 6B) montrent un $\phi'=32^\circ$ et un $c'=4-5$ Kpa. Ces valeurs sont dans le même ordre de grandeur que les données, $\phi'=35^\circ$ et $c'=2$ Kpa, trouvées par M.Bergeron en 1989 sur ces mêmes sédiments (Bergeron et al., 1989).

Couche hétérogène de sable-silt-argile

Le mélange de sable, de silt et d'argile n'a aucune cohésion et a un angle de friction égale 37° . Deux types de comportement sont visibles pour cette unité : un contractant et un dilatant. Ces différences sont dû à l'hétérogénéité du matériel, le sable plus mou a eu un comportement contractant tandis que le sable-argile plus compact a eu un comportement plus dilatant. Une cassure est observable au niveau de la courbe contractante, cette anomalie est causée par un réajustement manuel de l'échantillon dans la cellule. Des difficultés sont parfois rencontrées lorsque les échantillons sont de faible consistance.

Argile Grise

Finalement, l'argile grise a un angle de friction égale à 31° similaire aux deux premières unités, mais avec une cohésion plus élevé (10 Kpa). Le comportement dilatant est attribuable à la forte consolidation des sédiments.

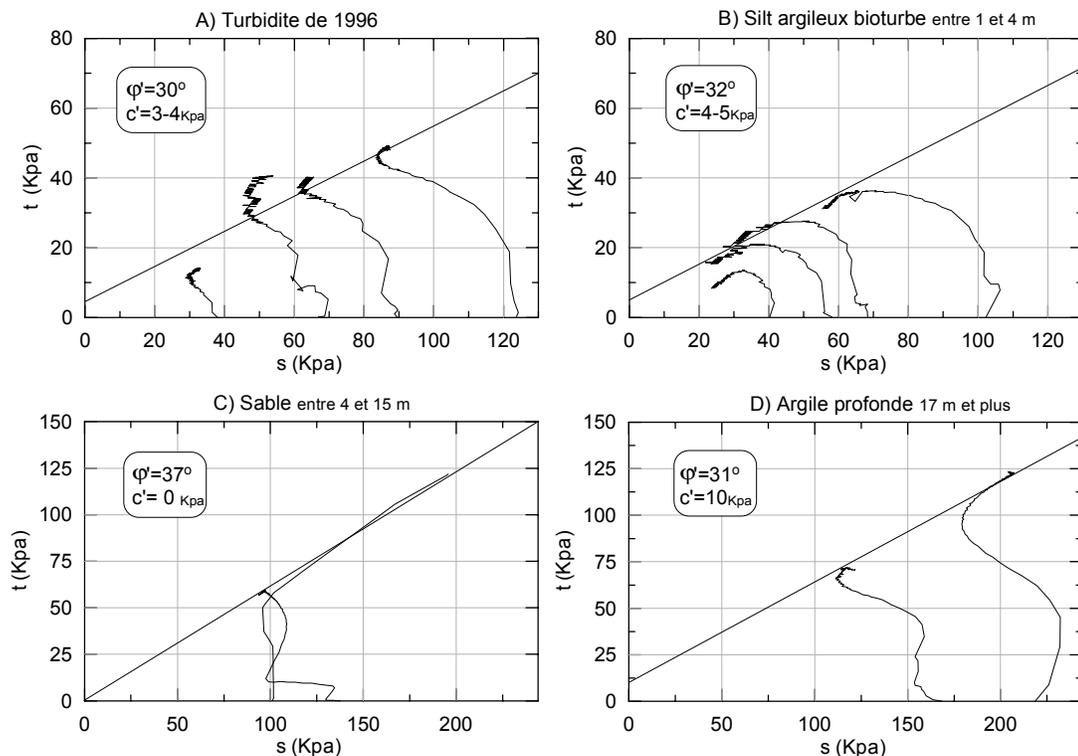


Figure 6 Cheminement des contraintes des essais triaxiaux (CIU) pour les différentes unités retrouvées dans la Baie des Ha Ha, Saguenay, Québec

5. ANALYSE DU POTENTIEL DE LIQUÉFACTION

A ce stade de l'étude, les données ne sont pas toutes disponibles pour faire l'analyse complète du potentiel de liquéfaction des sédiments de la Baie des Ha !Ha!. Une pré-analyse a donc été réalisée dans Shake pour vérifier s'il est plausible de croire que les sédiments du fond du fjord sont liquéfiables. Ces informations vont aider pour la future analyse du potentiel de liquéfaction qui va inclure les données sur le comportement cyclique des sédiments.

La morphologie du fond du fjord (figure 2) laisse supposer qu'une liquéfaction majeure s'est produite au centre de la Baie des Ha !Ha! (Locat et al., 2000). La tête de la coulée traverse perpendiculairement la baie et fait environ de 7 à 8 mètres de hauteur (figure 3). Cette hypothèse sera ainsi vérifiée dans l'analyse faite avec le logiciel Shake.

5.1 Méthode de Newmark

Urgeles et al. (2001) ont utilisé la méthode de Newmark pour vérifier l'amplitude nécessaire d'un séisme pour créer des déplacements critiques dans le fond du fjord. La méthode de Newmark (1965) calcule les déplacements d'un glissement de terrain sous l'action d'une secousse sismique. Dans cette méthode, la pente est modélisée comme un bloc sur un plan incliné sujet à des accélérations. Les déplacements possibles sont calculés selon deux types de données : l'accélération critique (a_c) et des données d'un enregistrement de séismogramme (a_t). Les déplacements sont alors calculés lorsque (a_t) surpasse (a_c). L'accélération critique du site a été calculée selon une méthodologie établie par Lee et Edwards (1986) et Lee et al. (1999) faisant intervenir la lithologie, la consolidation et la contrainte de cisaillement cyclique (Urgeles et al., 2001). L'analyse avec la méthode de Newmark a permis de constater qu'un important séisme est nécessaire pour créer des déplacements considérables dans les sédiments. Un séisme de magnitude inférieur à 6 provoque aucune instabilité. C'est pour une magnitude supérieur à 6 que des déplacements majeurs peuvent survenir (Urgeles et al. 2001)

5.2 Shake

Ce logiciel permet d'observer la réponse unidimensionnelle d'une colonne de sol soumise à une sollicitation dynamique.

5.2.1 Paramètres stratigraphiques

La stratigraphie des 30 premiers mètres du site étudié est la même que celle de la carotte MD992223, par contre, 7 mètres d'argile ont été ajoutés au dessus pour combler le matériel théoriquement liquéfié. Ce matériel a été choisi en fonction des échantillons pris en amont de

l'escarpement. Pour les couches plus profonde et non carottées, la stratigraphie a été établie en fonction d'une coupe géophysique tirée de Locat et Syvitsky (1991), soit environ 300m de sédiments composés d'argile marine sur du till, reposant en discordance sur le roc (figure 7).

5.2.2 Accélérogramme

Pour vérifier l'hypothèse émise par Urgeles (2001) avec la méthode de Newmark, une trace sismique d'un séisme d'une magnitude M de 6,7 produite en 1994 en Californie a été utilisée. Le spectre de réponse montre que la période dominante du contenu fréquentiel au roc se situe entre 0,17 et 0,3 secondes. L'accélération maximale est de 0,328 et la distance de l'enregistrement est d'environ 23,4 Km. Ces données peuvent bien représenter un séisme important dans la région.

5.2.3 Module de cisaillement

Les paramètres du module de cisaillement (G_{max}) et de vitesses des ondes S (V_s) ont été estimés pour un sol normalement consolidé (Kramer, 1996).

$$G_{max} = 700 \times C_u$$

Le C_u provient du profil géotechnique (figure 4) pour les 30 premiers mètres et été extrapolé jusqu'à 75 mètres. Pour les couches plus profondes (comme le till), le G_{max} a été calculé à partir du poids volumique des sédiments (Kramer, 1996).

$$G_{max} = 1000 K_{2,max} (\sigma'_m)^{0,5}$$

Les caractéristiques du roc granitique proviennent de Urgeles et al. (2001) et de Carr et al. (1998) où $V_s = 3500$ m/s, $V_p = 6000$ m/s et $\gamma = 2,7$ g/cm³.

Étant donné qu'aucune information sur la résistance cyclique au cisaillement des sédiments du fjord du Saguenay n'est disponible, le profil (figure 4 et 7c) de résistance non-drainée (C_u) a été utilisé comme alternative pour les 30 premiers mètres.

5.2.4 Analyse

La modélisation de l'accélération en fonction de la profondeur (figure 7a) montre que l'accélération de l'onde provenant du roc est atténuée dans le till et amplifiée par la suite dans l'argile. L'irrégularité de l'accélération proche de la surface est due aux alternances de couche d'argile et de sable. À partir de 15 mètres, la résistance non-drainée devient inférieure aux contraintes de cisaillement (figure 7c), ce qui entraîne des déplacements importants au niveau des sédiments (figure 7b). Il en ressort qu'une liquéfaction est plausible pour les 15 premiers mètres de sédiments, correspondant, grosso modo, à la hauteur de l'escarpement vue à la figure 3.



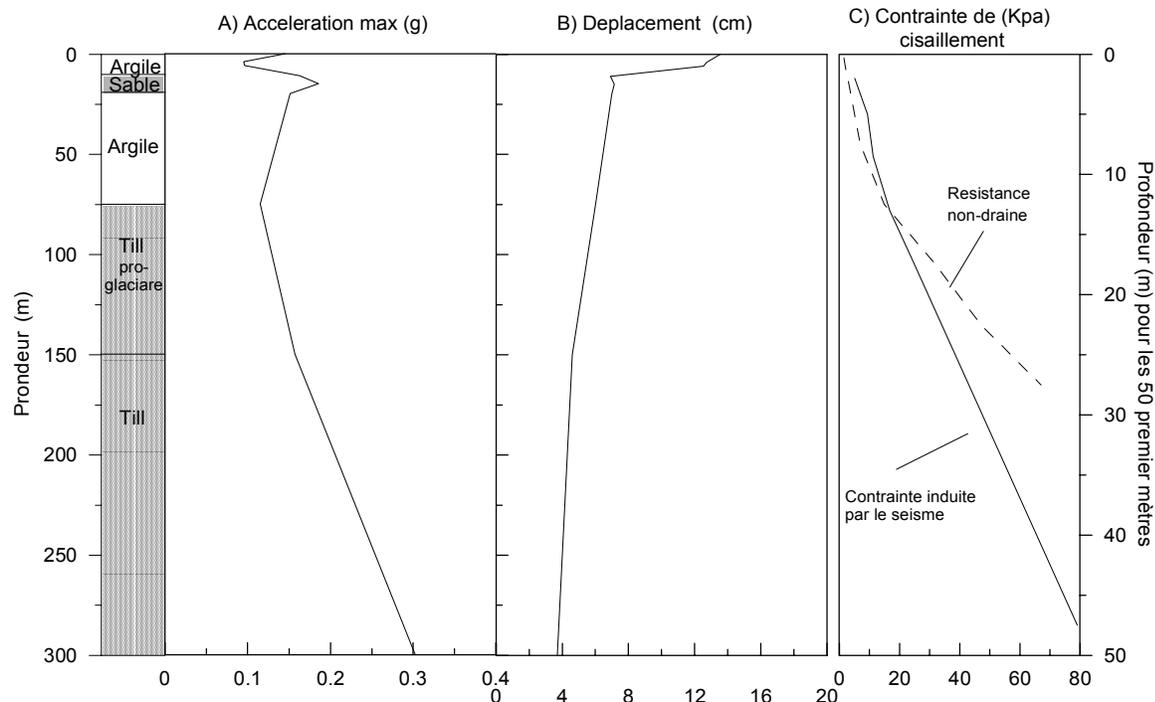


Figure 7 Résultats obtenus lors de l'analyse du potentiel de liquéfaction à l'aide du logiciel shake

6. DISCUSSION

Cette pré-analyse montre bien qu'il est plausible de croire qu'une liquéfaction a pu se produire au centre de la Baie des Ha!Ha!. Les résultats de Shake concordent avec ceux trouvés avec la méthode de Newmark. Les deux montrent qu'un séisme de forte magnitude est nécessaire pour créer une instabilité dans les sédiments du fond du fjord. L'avantage du logiciel Shake comparativement à la méthode de Newmark est qu'il définit la profondeur de la liquéfaction.

Par contre, cette analyse comporte certaines simplifications. Contrairement à la méthode de Newmark, l'analyse dans Shake se fait en une dimension sur une colonne stratigraphique. Elle ne considère pas l'effet de site et l'effet de pente lors du séisme. L'effet de site est un phénomène qui est contrôlé par la topographie régionale et qui peut faire varier les valeurs de la charge sismique appliquée sur un sol dans une région donnée. L'effet de pente, joue un rôle important dans le sens que la contrainte nécessaire pour déplacer un matériel diminue avec l'augmentation de l'angle de la pente. Finalement, les propriétés dynamiques du sol, n'étant pas encore disponibles, n'ont pu être considérées dans ce travail.

7. CONCLUSION

Malgré les simplifications faites pour cette analyse, la modélisation démontre qu'il peut y avoir liquéfaction dans

les sédiments du fjord du Saguenay. Il est possible de croire qu'une liquéfaction majeure s'est déjà produite au centre de la Baie des Ha!Ha! là où une signature morphologique est clairement visible. L'analyse avec le logiciel Shake combinée avec la méthode de Newmark faite par Urgeles et al. montre qu'un séisme de forte magnitude, supérieur à 6, est nécessaire pour qu'un mouvement de masse se produise. Donc, la ré-exposition des anciens sédiments contaminés pourrait survenir dans les secteurs plus à risque advenant qu'il y ait un séisme de grande importance.

REMERCIEMENTS

La réalisation de ces travaux n'aurait pu être possible sans l'appui financier des Fonds du C.R.S.N.G et de l'Alcan. Merci également à toute l'équipe travaillant sur le projet de recherche Saguenay Post-Déluge.

RÉFÉRENCES

- Bergeron, M., et Locat, J., 1989. Analyses géotechniques à rebours de glissement sous-marin, Fjord du Saguenay, Québec, Rapport, GGL-89-40, 50p.
- Bjerrum, L., et Lavanda, A., 1966. Direct simple shear tests on a Norwegian quick clay. Géotechnique, vol.IV, no2, pp.49-69



- Carr, B.J. Hajnal, Z., et Prugger, A., 1998. Shear-wave studies in glacial till. *Geophysics*, 63:1273-1284.
- Hébert, C. et Lacoste, P., 1998. Géologie de la région de Bagotville. Service géologique du Québec, Rapport Géologique # RG97-06, carte, 22p.
- Kramer, S.I., 1996. *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, NJ, 653 p.
- Lasalle, P. et Tremblay, G. 1978. Dépôts meubles au Saguenay-Lac-St-Jean. Rapport Géologique 191, Ministère des richesses naturelles du Québec, Qc, Canada, 61p.
- Lee H.J., et Edwards, B.D., 1986. Regional method to assess offshore slope stability, *Journal of Geotechnical Engineering*, 112 486-509
- Lee H.J., Locat, J., Dartnell, P., Israel, K. Wong, F., 1999. Regional variability of slope stability: application to the Eel margin, California. *Marine Geology*, 154:305-321
- Lefebvre, G., Leboeuf, D., Horny, P., et Tanguay, I., 1992. Slope failures associated with the 1988 Saguenay earthquake, Qc, Canada. *Revue Canadienne de Géotechnique*, 29 :117-130
- Locat, J. Urgeles, R., Schmitt, T., Houareau, L., Martin, F., Hill, P., Long, B., Simpkin, P., Kammerer, et E., Sanfaçon, R., 2000. The morphological signature of natural disasters in the Upper Saguenay Fjord area, Quebec, Canada. *Compte rendu de la 53ème conférence canadienne de géotechnique*, Mtl, pp.109-116
- Locat, J., et Syvitski, J.P. 1991 Le Fjord du Saguenay et le golfe du St-Laurent : Étalons pour l'évaluation des changements globaux au Québec, *Collection environnement et Géologie*, vol. 12, Association professionnelle des géologues et des géophysiciens du Québec, 309-318
- Locat, P., 2001. Étude du comportement des sédiments soumis à une charge sismique : cas de la Baie des Ha!Ha!, Saguenay. Rapport Département de Génie Civil, Université
- Maurice, F., Locat, J. et Leroueil, S., 2000, Caractérisation géotechniques et évolution de la couche de sédiment déposée lors du déluge de 1996 dans la baie des Ha!Ha! (Fjord du Saguenay, Québec), *Compte rendu de la 53ème conférence canadienne de géotechnique*, Mtl, 123-130
- Perret, D., Locat, J., Lerouil, S. 1995. Strength Development with Burial in fine-grained sediment from the Saguenay fjord, Québec. *Revue canadienne de géotechnique*, 32(2), 247-262
- Urgeles, R., Locat, J., Lee, H. and Martin, F. (2001) The Saguenay Fjord, Québec, Canada: Integrating marine geotechnical and geophysical data for spatial seismic slope stability and hazard assessment, *Marine geology*,
- Tuttle, M., Law, K.T., Seeber, L., Jacob K., 1990 Liquefaction and ground failure induced by the 1988 Saguenay Quebec, *Revue Canadienne de géotechnique*, 8:463-478

