

Caractérisation préliminaire du glissement sous-marin de la Pointe-du-Fort, Fjord du Saguenay, Québec, Canada.

Pascal Locat¹, Jacques Locat¹, Serge Leroueil¹, Roger Urgeles², Bruce Hart³ et Bernard Long⁴

¹ : Université Laval, Québec, Canada.

² : Universitat de Barcelona, Catalogne, Espagne.

³ : Université McGill, Montréal, Québec, Canada.

⁴ : INRS Géoressources, Québec, Canada.

ABSTRACT

This paper reports the first investigation of the Pointe-du-Fort slide. The slide, located on the Saguenay Fjord's southern shore, near the mouth of the Baie des Ha! Ha!, in the Province of Québec, is one of the sites studied within the COSTA-Canada project. The co-ordinates of the slide are 70° 45' 00" W longitude and 48° 21' 40" N latitude (NAD 27, NTS n° 22 D/7, Bagotville). Marine clay sediments, from the Laflamme Sea, form the bulk of the sediments involved in this mass movement. This tongue shaped slide lies at 160 m below sea level and involves about 2,9 million m³ of fine materials. A pseudostatic analysis shows that the failure could have occurred when horizontal seismic coefficients in excess of 0,22 g are considered.

RÉSUMÉ

Cet article résume les travaux de caractérisation entrepris, dans le cadre du projet COSTA-Canada, sur le glissement sous-marin de la Pointe-du-Fort, localisé sur la rive sud du Fjord du Saguenay près de l'embouchure de la Baie des Ha! Ha!, dans la province de Québec. Les coordonnées du glissement sont de 70° 45' 00" longitude Ouest et de 48° 21' 40" latitude Nord (NAD 27, NTS n° 22 D/7, Bagotville). La majeure partie des sols impliqués dans le mouvement sont des argiles marines de la mer de Laflamme. Ce glissement en forme de langue, repose sous environ 160 m d'eau et a un volume approximatif de 2,9 million de m³. Une analyse pseudo-statique à rebours avec Slope/W montre qu'il y a rupture du talus pour des coefficients d'accélération sismique horizontaux plus grands que 0,22 g.

1. INTRODUCTION

Avant le tremblement de terre de novembre 1988, la région du Saguenay (voir fig. 1) n'était pas considérée comme une zone à forte sismicité. Avant cet événement, la zone sismique de Charlevoix semblait être la principale source de séismes de fortes intensités pouvant toucher la région du Saguenay. Pourtant, plusieurs signatures morphologiques dans la région du Saguenay, tel que des cicatrices de glissements, de coulées ou de liquéfaction de sols ont pu être observées sur la terre ferme (LaSalle et Chagnon 1968; Tavenas *et al.* 1971; LaSalle et Tremblay 1978; Tuttle *et al.* 1990; Law 1990; Lefebvre *et al.* 1992; Locat *et al.* 1997) comme sur le fond du Fjord (Schafer et Smith 1987 et 1988; Bergeron et Locat 1988; Locat et Leroueil 1988; Syvitski et Praeg 1989; Praeg et Syvitski 1991; Locat et Syvitski 1991; Pelletier et Locat 1993; Perret *et al.* 1995; Locat *et al.* 2000; Urgeles *et al.* 2001) venant appuyer l'hypothèse que la région du Saguenay a connu et pourrait connaître des séismes de forte intensité (> 6,5 M_{blg}).

Depuis 1993, une série de cinq levés multifaisceaux ont permis de produire une carte morphologique précise du fond du fjord du Saguenay (fig. 2), donnant une image quasi photographique de ce dernier. Cette image a permis d'identifier clairement plusieurs zones d'instabilités dans les secteurs de la Baie des Ha! Ha! et du Bras Nord (Locat *et al.*, 2000).

De ces zones, le glissement sous-marin de la Pointe-du-Fort a été retenu afin d'étudier les caractéristiques géotechniques et physico-chimiques des matériaux argileux qui pourraient influencer la transition entre les

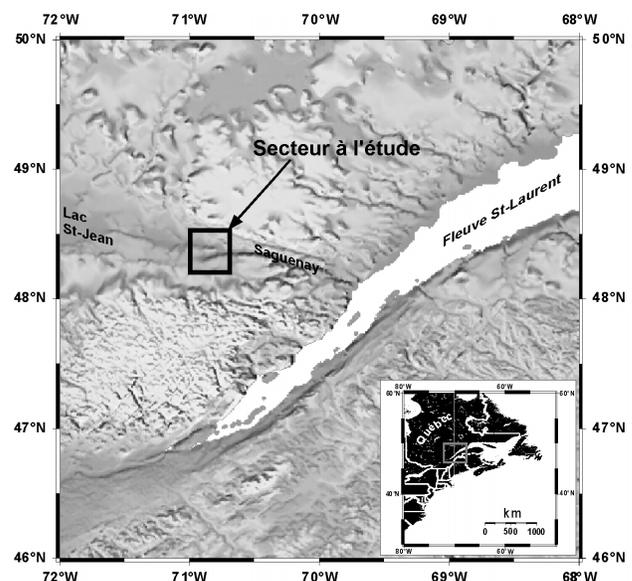


Figure 1. Carte de localisation générale.



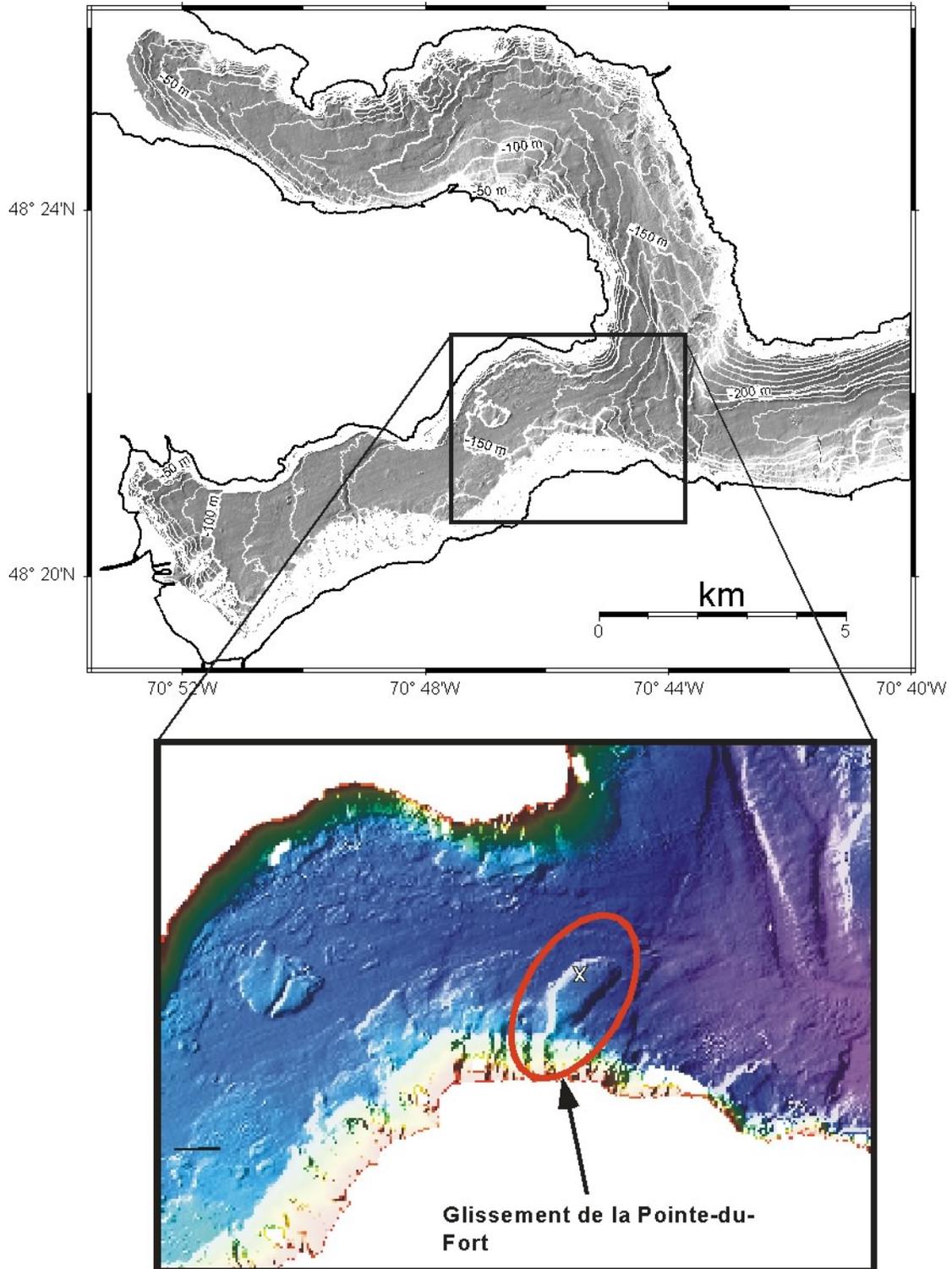


Figure 2. Bathymétrie du secteur étudié et localisation du glissement de la Pointe-du-Fort.

phases de rupture et de post-rupture, en terme d'énergies, pour tenter d'expliquer la mobilité qui y est associée. Ce glissement est situé sur la rive sud de la Baie des Ha! Ha! dans le Fjord du Saguenay (fig. 2). La localisation de ce site est de 70° 45' 00" longitude ouest et de 48° 21' 40" latitude nord (NAD 27, NTS n° 22 D/07, Bagotville).

Dans cet article, nous présenterons en premier lieu les objectifs de l'étude du glissement de la Pointe-du-Fort au Saguenay dans le contexte du projet COSTA-CANADA ainsi qu'en deuxième lieu une analyse préliminaire de ce glissement comportant la description de la géologie et de la morphologie du secteur ainsi que l'étude pseudo-statique du talus observé à cet endroit.

2. OBJECTIFS

L'ensemble de ces travaux puise sa motivation dans les risques associés à la stabilité des marges continentales soulevés par l'exploration et les développements récents des ressources offshore canadiennes, par le transport maritime (développements portuaires) et les communications (câbles sous-marins).

De ce fait, le glissement de la Pointe-du-Fort s'intègre dans le projet COSTA-CANADA portant sur l'étude de la stabilité des pentes continentales. Le but de ce projet est d'évaluer la stabilité des pentes le long des marges continentales canadiennes ainsi que dans les estuaires et les fjords, en tenant compte non seulement des processus naturels mais aussi de l'activité humaine. Le site à l'étude servira au développement d'une approche analytique basée sur des travaux de terrain et des essais en laboratoire venant appuyer la modélisation numérique des glissements sous-marins.

Les objectifs à courts termes visent à comprendre la nature des mécanismes qui ont possiblement provoqué la rupture de ce talus et de déterminer les propriétés physiques, mécaniques et élastiques des sédiments à la rupture et en phase post rupture.

L'objectif à long terme résulte dans l'intégration des relevés géophysiques et des données de laboratoire en un modèle tridimensionnel de terrain. Le tout servira à l'évaluation des secteurs sous-marins exposés aux risques causés par l'instabilité des pentes.

3. GLISSEMENT DE LA POINTE-DU-FORT

3.1 Géologie

Le socle rocheux de part et d'autre de l'embouchure de la Baie des Ha! Ha! est constitué d'un gneiss granulitique déformé affleurant à la Pointe-du-Fort (Hébert et Lacoste 1998). Ce secteur est affecté par une zone de cisaillement régionale appelée Zone de déformation de St-Fulgence (Hébert et Lacoste 1998). La stratigraphie proposée des dépôts meubles près du glissement est présentée à la figure 3. Elle est basée sur des

informations tirées de Lasalle et Tremblay (1978). Un till d'épaisseur variable repose sur le socle rocheux. Les matériaux impliqués dans ce glissement proviennent d'un dépôt argileux de la mer de Laflamme, situé entre la Pointe-du-Fort et la Pointe-à-Bonneau sur la rive sud de la Baie des Ha! Ha!. Ce sont principalement des argiles silteuses grises pouvant contenir des traces de sable, de gravier et de coquillages par endroit (Lasalle et Tremblay 1978). A marée basse, il est possible d'observer un alignement de blocs déposés en tête du talus. Ces derniers peuvent provenir soit du transport glaciaire ou de l'érosion des dépôts meubles situés au droit du site.

3.2 Morphologie

Le glissement sous-marin de la Pointe-du-Fort a été mis en évidence par les levés de sismique réflexion et les levés multifaisceaux réalisés au cours des 10 dernières années (Locat *et al.* 2000). Les débris ont pris la forme d'une langue incurvée vers l'aval du Saguenay (fig. 2 et 4) et reposent à une profondeur d'eau moyenne de 160 m. La différence d'élévation entre le bout des débris et la couronne est de 170 m et la longueur totale du glissement est de 1140 m. L'angle de dépôt des débris (fahrböschung) est d'environ 9°. La topographie de la zone de déposition présente une légère pente faisant en moyenne 1,3°. Les dimensions approximatives de la zone de déposition sont de 270 m de largeur par 15 m de hauteur sur 720 m de longueur (modifié d'après Hoareau 2000). Le volume des débris est d'environ $2,9 \times 10^6 \text{ m}^3$. La pente du talus dans le secteur de la zone de détachement est de 20°. En observant l'estran à marée basse, il est possible de reconnaître une forme en arc à la tête du glissement. Cette forme, semblant être la couronne du glissement, peut également être observée

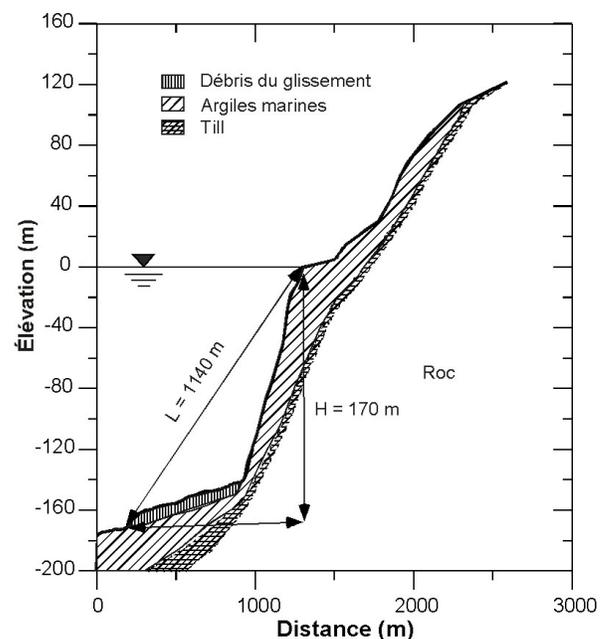


Figure 3. Coupe du glissement de la Pointe-du-Fort.

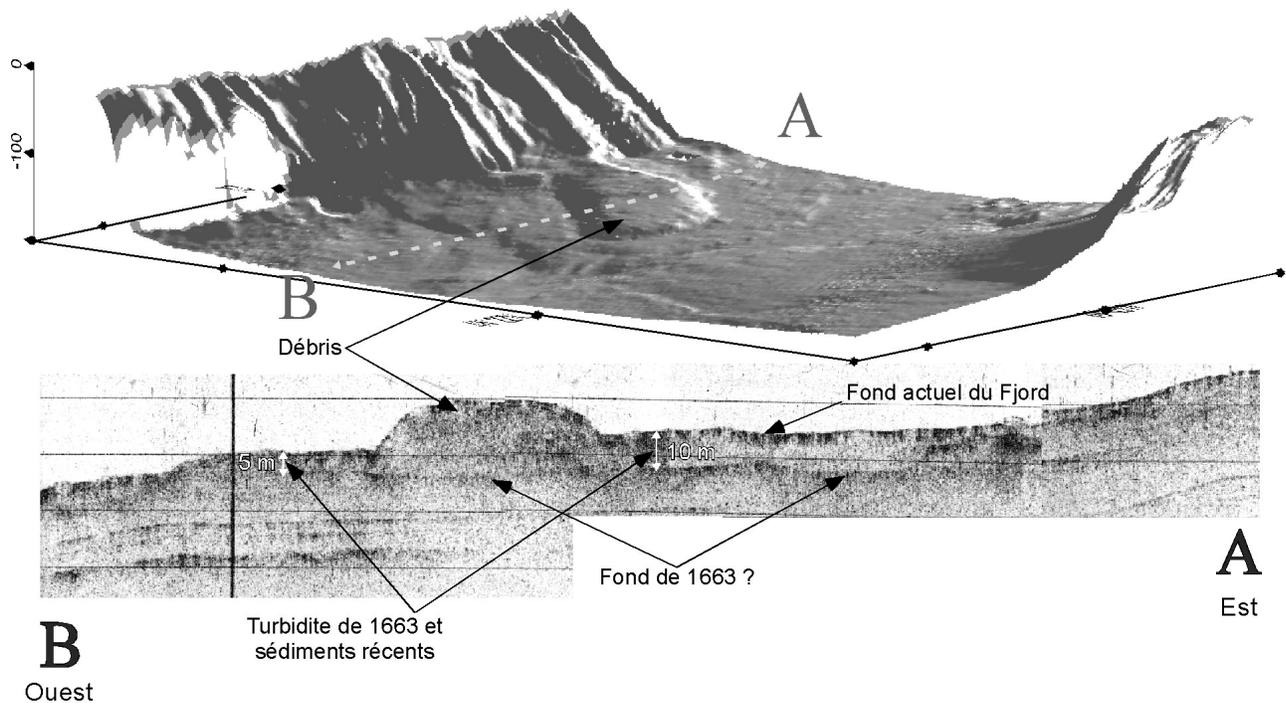


Figure 4. Vue en perspective des débris et levé sismique de 1992 recoupant ces derniers et montrant trois réflecteurs importants: le fond actuel, le fond antérieur à 1663 et le contour des débris.

sur la carte topographique et sur les photographies aériennes du secteur. La surface de rupture, considérée circulaire, possède la même largeur que les débris, soit 270 m, avec une épaisseur moyenne de 25 m et une longueur de 300 m pour un volume approximatif de $2 \times 10^6 \text{ m}^3$. La Figure 4 montre une coupe tirée d'un levé sismique réalisé en 1992. Les débris sont en partie enfouis sur leur hauteur d'environ 10 m sur leur côté est et d'environ 5 m sur leur côté ouest. La surface sur laquelle se sont déposés les débris ressort comme un réflecteur pouvant être le fond du Fjord d'avant 1663. Quant à la masse de débris, elle ne présente pas de réflecteurs internes.

3.3 Propriétés des sols

Les seules données géotechniques disponibles actuellement proviennent des carottes prélevées à l'aide des carottiers embarqués sur le bateau Alcide C. Horth en mai et août 2000. Les profils géotechniques montrés aux Figures 5 et 6 sont tirés des carottes AH0005-BX-22 et AH0005-LE-03. Leur site d'échantillonnage est indiqué par un x sur la figure 2. Elles ont été prélevées à une profondeur de 160 m.

La carotte BX-22, prélevée au carottier à boîte (Box Core), caractérise les premiers 40 cm de sédiments. Sur le profil de la figure 5, entre 0 cm et 10 cm de profondeur, les teneurs en eau passent de 180 % à 60% pour revenir

brusquement à 120%. De plus, l'argile oxydée et très molle en surface et devient plus silteuse et plus raide entre 5 et 10 cm de profondeur. Ces caractéristiques pourraient s'expliquer par la déposition rapide de la couche de sédiments lors du déluge de 1996.

Les 15 premiers cm de carotte LE-03, à la figure 6, montrent un profil des teneurs en eau en dents de scie. Cela s'explique par le remaniement en surface créé par la pénétration du carottier Lehigh dans les sédiments. La figure 6 montre 5 faciès distincts. Le premier faciès, de 0 cm à 10 cm, est identifié comme étant la couche de 1996. Le deuxième faciès, de 10 cm à 60 cm serait l'accumulation normale des sédiments, puisque cette couche est riche en matières organiques et en bioturbation. Le troisième faciès, de 60 cm à 105 cm, présente peu de bioturbation et de matières organiques, pouvant s'expliquer par un événement ponctuel mobilisant beaucoup de sédiments, par exemple un séisme. Le quatrième faciès, de 105 cm à 140 cm, est caractérisé par une résistance au cisaillement non drainée (C_u) passant de 3 kPa à en moyenne 17 kPa vers 1 m de profondeur. Cette couche présente la particularité de n'avoir aucune trace de matières organiques et de bioturbation. Le contact entre ce faciès et le prochain est subhorizontal. Le cinquième faciès, de 140 cm à 150 cm, montre les mêmes caractéristiques que le troisième faciès. À l'exception du quatrième, tous les faciès montrent des traces de sable et de gravier.

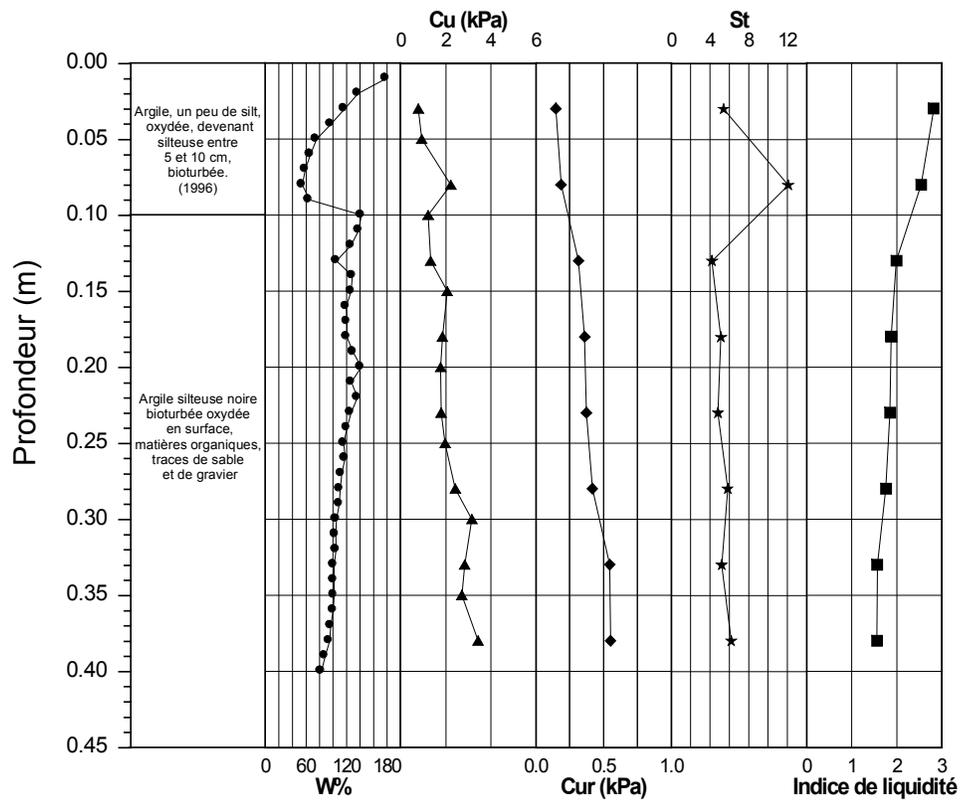


Figure 5. Profil géotechnique de la carotte AH0005-BX-22, prélevée à 160 m de profondeur.

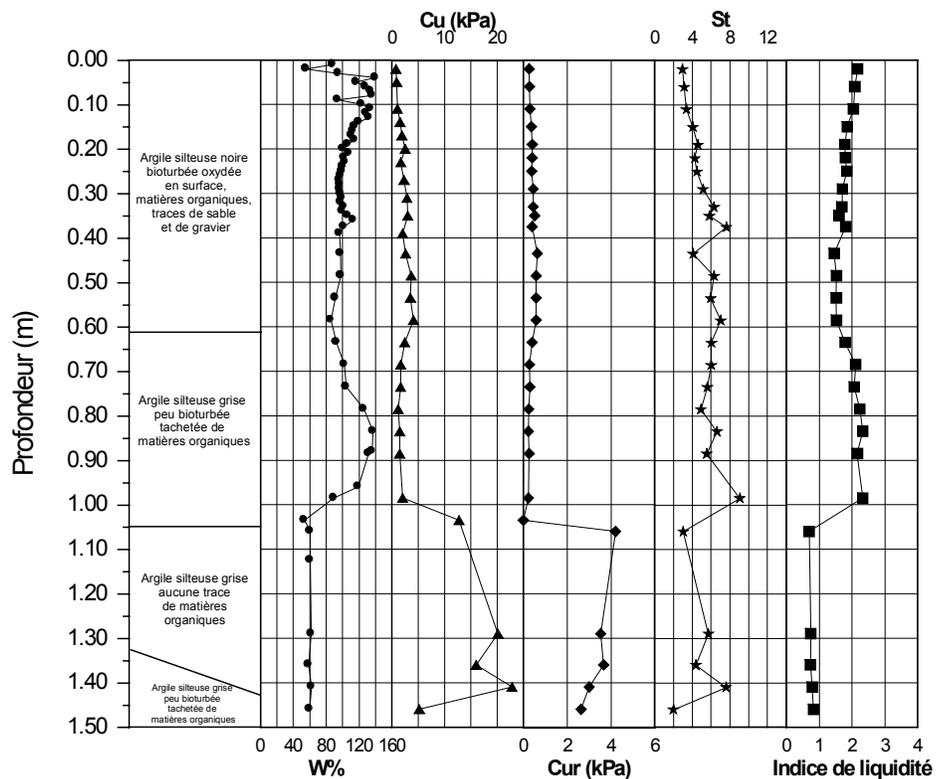


Figure 6. Profil géotechnique de la carotte AH0005-LE-03, prélevée à 160 m de profondeur.

3.4 Comportement à la rupture

Locat et Bergeron (1988) suggèrent qu'une des causes des glissements sous-marins observés dans le Fjord du Saguenay serait la sismicité régionale. Une analyse pseudo-statique à l'équilibre limite dans Slope/W a donc été réalisée afin de voir l'influence de l'accélération sismique sur la stabilité du talus de la Pointe-du-Fort. Cette analyse en non drainé avec le modèle de Mohr-Coulomb, utilise le poids déjaugé du sol (γ' = poids dans l'eau), comme suggéré par Morgenstern (1967) pour les calculs de stabilité en milieu sous-marin, et ne prend pas en compte les surpressions interstitielles.

Les paramètres physiques de l'argile utilisés dans les calculs de stabilité du talus ont été tirés de Locat et Bergeron (1988) et sont : une cohésion de 2 kPa, un poids volumique total de 17 kN/m³ (γ' de 7 kN/m³) et un angle de friction de 35 degrés. Lors d'un séisme, l'accélération verticale est moins importante que l'accélération horizontale. De ce fait, seule cette dernière sera considérée dans les calculs de stabilité comme le font plusieurs auteurs (Locat et Bergeron 1988 ; Hampton et al. 1978; Morgenstern 1967).

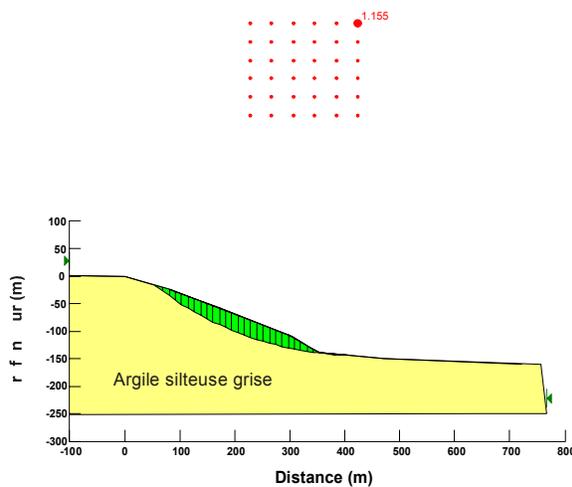


Figure 7. Exemple de résultat obtenu dans Slope/W.

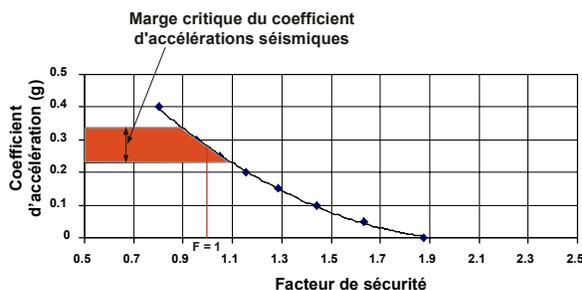


Figure 8. Résultats de l'étude pseudo-statique.

La figure 7 montre le centre du cercle et le cercle de rupture (i.e. celui ayant le plus faible facteur de sécurité) utilisé pour tous les incréments de coefficient d'accélération sismique horizontal lors de l'étude pseudo-statique. À la figure 8, on peut voir que sans charge sismique le talus à une facteur de sécurité d'environ 1,85. En définissant le critère de rupture comme étant $F=1 \pm 0,2$, la marge critique du coefficient d'accélération sismique varie de 0,22 à 0,32 g.

4. DISCUSSION

La stratigraphie des matériaux dans la zone de décrochement n'est qu'une approximation basée sur les cartes de dépôts de surface. Un forage et un levé géophysique permettraient de déterminer la stratigraphie et la profondeur au roc dans l'axe du glissement. L'installation d'un piézomètre ou un sondage au piézocône dans ce secteur pourrait aussi apporter des informations hydrogéologiques utiles à l'analyse de la stabilité du talus.

L'analyse préliminaire des données disponibles sur le glissement sous-marin de la Pointe-du-Fort montre que la géométrie de la zone de déposition de ce glissement peut être caractérisée sommairement par les levés géophysiques réalisés jusqu'à maintenant dans ce secteur. Des levés de sismique réflexion, fait à l'aide du SEISTEK, seront disponibles à la fin de l'été 2001 pour une analyse plus poussée de la zone de déposition.

À la figure 4, la différence d'épaisseur de sédiments, observée de chaque côté des débris, suggère qu'un événement ponctuel, par exemple un courant de turbidité, pourrait avoir eu lieu durant ou après le glissement, puisque les sédiments donnent l'impression d'être venu se buter sur le côté ouest du glissement, laissant moins de sédiments sur le côté est.

L'absence apparente de réflecteurs à l'intérieur de la masse de débris indique que le matériau a été remanié en tout ou en partie. Aussi, le profil de la figure 6 montre une argile grise sans traces de matières organique et de bioturbation (quatrième faciès), dont la résistance au cisaillement est élevée par rapport aux troisième et cinquième faciès. Aussi, l'interface subhorizontal entre les deux derniers faciès ainsi que les précédentes observations suggèrent que les débris du glissement contiennent des morceaux d'argile plus ou moins intacte (troisième faciès) distribués dans une matrice d'argile présentant des traces de matières organiques (troisième et cinquième faciès). Des carottes allant jusqu'à 7 m de profondeur dans les débris, prélevées à l'aide du carottier LCF (Long Coring Facility (Héroux et al, 2001)) monté à bord du NGCC Martha Black en mai 2001, permettront de mieux caractériser ces faciès.

Pour dater de façon approximative ce glissement, le profil de la figure 6 peut être utilisé. Perret et al. (1995) mentionnent que le taux de sédimentation dans ce

secteur du Fjord du Saguenay est d'environ 1 mm par année. En considérant les 10 premiers cm comme étant la couche de 1996 et le troisième faciès comme étant un événement ponctuel mobilisant beaucoup de sédiments, par exemple un séisme, le deuxième faciès, de 10 cm à 60 cm, pourrait être considéré comme l'accumulation normale des sédiments depuis cet événement. Considérant une variation dans le temps du taux de sédimentation, disons entre 1,5 et 0,5 mm par année, cela donne une fourchette de dates variant entre 1666 et 1000 A.D.

D'après Kramer (1996), le critère de Hynes-Griffin et Franklin (1984), où le coefficient d'accélération sismique (K_h) = $0,5 \times$ accélération maximale (A_{max}), est approprié pour les calculs de stabilité des pentes. Selon ce critère, un coefficient d'accélération sismique de 0,25 donnerait donc 0,55 g comme A_{max} à la rupture. Rappelons qu'en 1988, le séisme du Saguenay a généré un A_{max} de 0,16 g au roc à 64 km de l'épicentre (Lefebvre *et al.* 1992). De plus, la forme en U de la vallée du Saguenay et les grandes épaisseurs de sédiments qui s'y trouvent favorisent les effets de site et peuvent amplifier le A_{max} . Ces effets n'ont pas été pris en compte dans cette étude. Il n'est donc pas impossible de croire qu'un séisme plus fort que celui de 1988, localisé près de la baie des Ha!Ha! et combiné aux effets de site pourrait générer des accélérations capables de provoquer la rupture du talus.

Considérant ces faits, il semble plausible que le glissement de la Pointe-du-Fort ait été provoqué par un séisme de forte intensité pouvant être celui de 1663.

Il est à noter que les surpressions interstitielles non pas été prises en compte et que la présence de conditions artésiennes pourraient diminuer la valeur de A_{max} nécessaire pour obtenir la rupture.

5. CONCLUSIONS

Cette analyse préliminaire du glissement de la Pointe-du-Fort a permis de déterminer quelques caractéristiques géométriques de ce dernier à partir des levés géophysiques antérieurs. Plusieurs levés réalisés à l'été 2001 permettent une meilleure définition de la zone d'accumulation des débris. Nous pouvons tout de même avancer les conclusions suivantes :

- Le glissement s'est produit dans des argiles de la mer de Laflamme.
- La seule cause vraisemblable pouvant provoquer un tel glissement est un séisme.
- D'après une première analyse de la sédimentation sur les débris de la coulée, cette dernière pourrait être associée au séisme de 1663.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs voudraient remercier le Conseil national de la recherche en sciences naturelles et en génie du Canada

ainsi que le Fonds F.C.A.R. pour le support financier fourni pour la réalisation des travaux de recherche ainsi que le Ministère de l'Éducation du Québec. Nous remercions aussi les capitaines et équipages des différents bateaux utilisés lors de l'acquisition de données reliées au projet COSTA.

7. BIBLIOGRAPHIE

Hampton, M.A., Bouma, A.H., Carlson, P.R., Molnia, B.F. et E. Clukey, E.C. 1978. Quantitative study of slope instability in the Gulf of Alaska. Proceeding, Offshore Technology Conference, Houston, pp. 2307-2318.

Hébert, C., et Lacoste, P. 1998. Géologie de la région de Bagotville. Service géologique du Québec, rapport géologique # RG 97-06, 1 carte, 22 p.

Héroux, M.-C., Massé, M., et Locat, J., 2001. Expédition océanographique au fjord du Saguenay à bord du Martha L. Black, projet COSTA-Canada. Rapport COSTA-UL-01-01.

Hoareau, L. 2000 Les glissements sous-marins dans la partie amont du Fjord du Saguenay. Projet individuel. Université Laval. 80 p.

Hynes-Griffin, M.E. et Franklin, A.G. 1984. Rationalizing the seismic coefficient method. Miscellaneous paper GL—84-13. U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 21 p.

Kramer, S.L. 1996. Geotechnical earthquake engineering, Prentice Hall, NJ, 653 p.

LaSalle, P. et Chagnon, J.-Y. 1968. An ancient landslide along the Saguenay River, Québec. Revue canadienne des sciences de la terre, **5** : 548-549.

LaSalle, P. et Tremblay, G. 1978. Dépôts meubles au Saguenay-Lac-St-Jean. Rapport géologique 191, Ministère des richesses naturelles du Québec, Québec, Canada, 61p.

Law, K.T. 1990. Analysis of soil liquefaction during the 1988 Saguenay earthquake. Compte rendu de la 43^{ème} conférence canadienne de géotechnique, Prédiction et performance en géotechnique, Québec, pp. 189-196.

Lefebvre, G., Leboeuf, D., Hornych, P. et Tanguay, L. 1992. Slope failures associated with the 1988 Saguenay earthquake, Quebec, 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, E. et Sanfaçon, R. 2000. The morphological signature of natural disasters in the Upper Saguenay Fjord area, Quebec, Canada. Compte rendu de la 53^{ème} conférence canadienne de géotechnique, Montréal, pp. 109-116.



- Locat, J., Dubé, S. et Couture, R. 1997. Analyse de l'éroulement rocheux du Mont Éboulé, Québec. Compte rendu de la 50^{ème} conférence canadienne de géotechnique, Ottawa, pp. 118-126.
- 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. Dans : Bouchard, M.A., Bérard, J., Delisle, C.E (éditeurs), Collection environnement et Géologie, vol 12, Association professionnelle des géologues et des géophysiciens du Québec, pp. 309-318.
- Locat, J. et Bergeron, M., 1988. Étude à rebours de glissements sou-marins, Fjord du Saguenay, Québec, Canada. Compte rendu de la 41^{ème} conférence canadienne de géotechnique, Waterloo, 338-346.
- Locat, J. et Leroueil, S. 1988. Physicochemical and geotechnical characteristics of recent Saguenay Fjord sediments. *Revue canadienne de géotechnique*, **25** : 382-388.
- Morgenstern, N.R., 1967. Submarine Slumping and the Initiation of Turbidity Currents. In "Marine geotechnique", pp. 189-210.
- Pelletier, M. 1993. Les Glissements sous-marins du Bras Nord du Fjord du Saguenay : Aspects géomorphologiques et géotechniques. Mémoire de maîtrise, Université Laval. 124p.
- Perret, D., Locat, J. et Leroueil, S. 1995. Strength development with burial in fine-grained sediments from the Saguenay Fjord, Quebec. *Revue canadienne de géotechnique*, **32** : 247-262.
- Praeg, D.B. et Syvitski, J.P.M. 1991. Marine geology of the Saguenay Fjord. GSC open file # 2395
- Schafer, C.T. et Smith, J.N. 1987. Hypothesis for a submarine landslide and cohesionless sediment flow resulting from a 17th century earthquake-triggered landslide in Quebec, Canada. *Geo-marine Letters*, **7** :31-37.
- Schafer, C.T. et Smith, J.N. 1988. Evidence of the occurrence and magnitude of terrestrial landslide in recent Saguenay Fjord sediments. In "Natural and Man-made Hazards", pp. 137-145.
- Syvitski, J.P.M. et Praeg, D.B. 1989. Quaternary sedimentation in the St-Laurent estuary and adjoining areas, Eastern Canada : an overview based on high-resolution seismo-stratigraphy. *Géographie physique et quaternaire*, **43** : 291-310.
- Tavenas, F., Chagnon, J.-Y. et La Rochelle, P. 1971. The St-Jean-Vianney Landslide : Observations and eyewitness accounts. *Revue canadienne de géotechnique*, **8** : 463-478.
- Tuttle, M., Law, K.T., Seeber, L. et Jacob, K. 1990. Liquefaction and ground failure induced by the 1988 Saguenay, Quebec, earthquake. *Revue canadienne de géotechnique*, **27** : 580-589.
- Urgeles, R., Locat, J., Lee, H. et Martin, F. 2001. The Saguenay Fjord, Quebec, Canada : integrating marine geotechnical and geophysical data for spatial seismic slope stability and hazard assessment. 50 p., sous presse.

