

APERÇU DES MOUVEMENTS DE MASSE SOUS-MARINS AU LARGE DE LA RIVIÈRE BETSIAMITES, ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT, QUÉBEC, CANADA

Jacques Locat, Christiane Levesque, Pascal Locat, Geneviève Cauchon-Voyer, Serge Leroueil, Laboratoire d'études sur les risques naturels (LERN), Université Laval, Québec, Québec, Canada
André Godin, CIDCO, Rimouski, Québec, Canada
Richard Sanfaçon, Institut Maurice Lamontagne, Mont-Joli, Québec, Canada

RÉSUMÉ

Le territoire sous-marin au large de la rivière Betsiamites a été l'objet d'une étude détaillée dans le cadre du projet COSTA-Canada (COntinental slope STAbility). Les levés multifaisceaux ont révélé la présence d'un système complexe reflétant divers types de mouvements de masse dont une importante coulée qui pourrait vraisemblablement être reliée à un glissement sub-aérien (côtier) majeur impliquant plus de 300 millions de mètres cubes d'argiles sensibles qui auraient eu lieu suite au séisme de 1663. Il y a aussi plusieurs autres éléments morphologiques qui ne peuvent être directement reliés au glissement sub-aérien et qui pourraient laisser croire que le séisme responsable du glissement sub-aérien aurait pu aussi causer de larges mouvements de masse sous-marins ou encore qu'ils représentent des événements plus anciens. Finalement, la morphologie et les vitesses de déplacement nécessaires au développement des formes observées pointent vers la nécessité d'évaluer la possibilité que ces mouvements aient pu générer un ou des tsunamis lesquels auraient pu laisser des traces dans la région juste au Sud-Est du secteur.

ABSTRACT

The seafloor off the Betsiamites River along the St. Lawrence Estuary is the subject of an intense investigation as part of the COSTA-Canada project (COntinental slope STAbility). A series of multibeam surveys has revealed the presence of a complex morphology including an historical debris flow related the 1663 earthquake which is linked to the sub-aerial Betsiamites slide. In addition, many other mass movements features have been observed which are or not related to this seismic event. The required velocity and morphological setting of some mass movements lead into the necessity to consider tsunami as potential consequences of these events for which traces may be found on the South Shore.

1. INTRODUCTION

Les glissements sous-marins au Québec ont surtout été étudiés dans la région du Fjord du Saguenay (Locat et Lee 2002, Urgeles *et al.* 2002). Dans le cadre du projet COSTA-Canada (Locat et Mienert 2003), l'exploration s'est étendue dans région de l'estuaire du Saint-Laurent située au large des rivières Betsiamites et Manicouagan (figure 1). L'intérêt pour cette région avait déjà été mis en évidence par les travaux de Hart *et al.* (1990) ainsi que ceux de Massé (2001) alors que l'activité des mouvements de terrains sub-aériens avait été soulignée par Allard (1982).

Dans une première phase, qui ne couvrait qu'une portion limitée du territoire identifié à la figure 1 (Urgeles *et al.* 2001), Duchesnes *et al.* (2002) ont rapporté la présence d'importantes cicatrices de glissements sous-marins le long du talus bordant la plate-forme nord du Saint-Laurent. Par la suite, afin de pousser plus à fond l'étude du secteur, une deuxième campagne de levés multifaisceaux (voir figure 1) a été menée en coopération avec le Centre interdisciplinaire sur la cartographie des océans (CIDCO) et cela à l'Ouest du secteur initial. Ces travaux ont révélé la présence de cicatrices de toutes sortes et de grandes ampleurs indiquant la présence d'une série complexe de mouvements sous-marins de diverses natures.

Avec ces informations en main, une campagne de levés sismiques et de carottages a été réalisée afin de préciser la morphologie et la nature des matériaux impliqués dans les divers mouvements. Faute de fonds, les levés multifaisceaux de la deuxième campagne n'avaient pas pu être réalisés dans la zone côtière. Par contre, des levés sismiques y ayant révélé la présence de multiples blocs de diverses dimensions ainsi que des escarpements orientés perpendiculairement à la côte, ces observations nous ont incités à compléter les levés multifaisceaux dans la zone côtière, et cela avec l'appui du Service hydrographique canadien de l'Institut Maurice Lamontagne. Cet effort additionnel a été récompensé par la découverte d'une coulée de débris spectaculaire (e.g. voir la figure 7). En fait, il semblerait que la coulée sous-marine principale (figures 1 et 7) pourrait être le prolongation sous-marine du grand glissement sub-aérien qui se serait produit ici suite au séisme de 1663 (Bernatchez *et al.* 2003, Bernatchez 2003a et b). À ce sujet, lors d'une visite de M. Jean Vézina au LERN (Laboratoire d'études sur les risques naturels), ce dernier nous indiqua que les matériaux de ce glissement sub-aérien devaient bien se trouver juste en face, au fond du Saint-Laurent, ce qui fut confirmé par la suite !

L'objectif du présent article est de présenter les premières observations faites à la suite des diverses investigations et de lancer quelques pistes de discussion à propos de

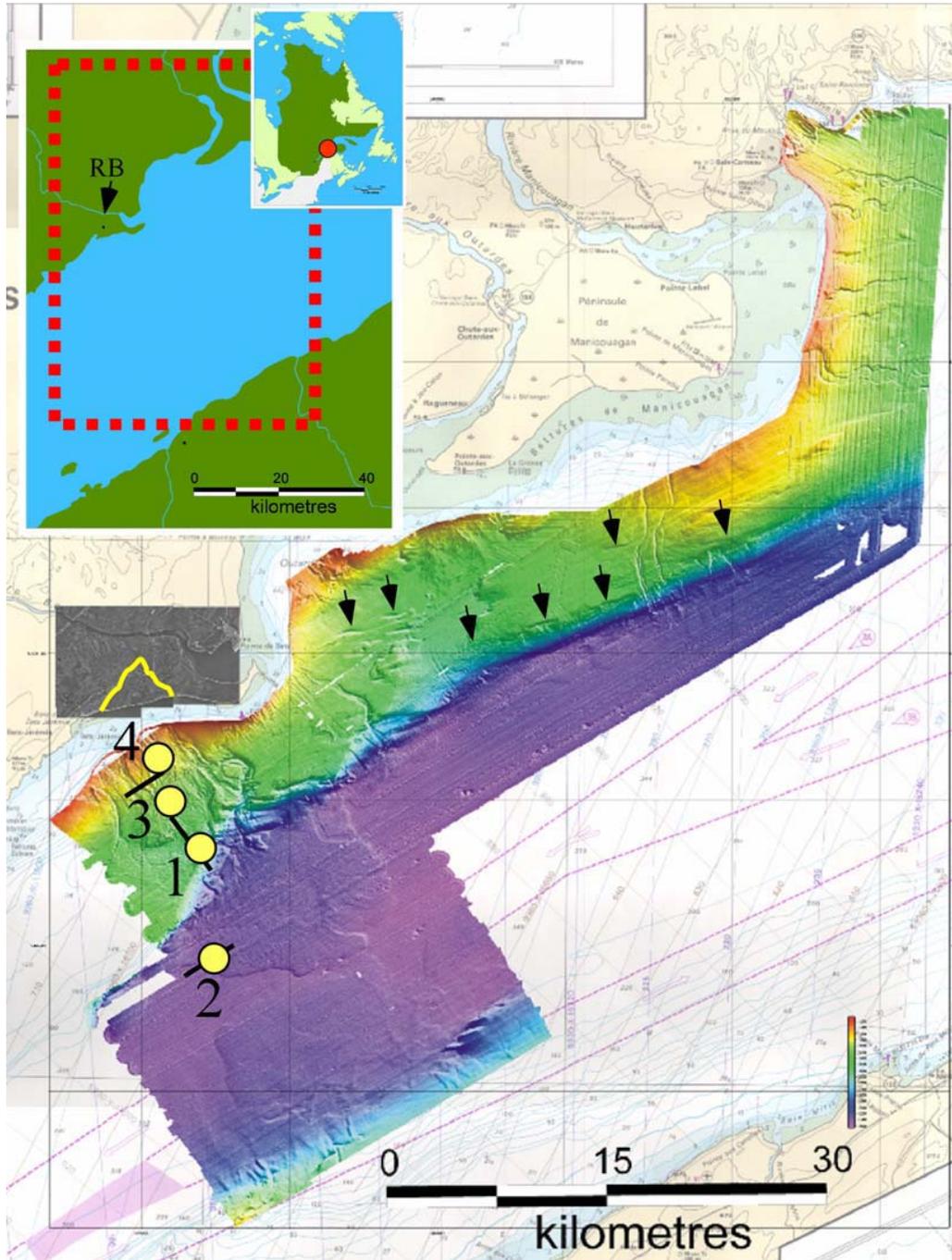


Figure 1. Localisation de la zone d'étude. Sont aussi indiqués : le périmètre terrestre du glissement de Betsiamites, les sites d'échantillonnage ainsi que la position de certains linéaments (carte marine : source Service hydrographique canadien, carte L/C 1236 ; photographie aérienne, source : Gouvernement du Québec, No. Q018171-49)

l'âge de ou des événements, des mécanismes de rupture et de post-rupture possibles et de leur conséquence. Une étude morpho-sédimentologique du secteur par G. Cauchon-Voyer viendra compléter notre étude.

2. CONTEXTE REGIONAL

La région de la rivière Betsiamites se situe sur le versant Nord de l'estuaire du Saint-Laurent où la marée maximale est d'environ 3 mètres. Le substratum rocheux y est principalement constitué de roches pré-cambriennes. Le

socle rocheux est recouvert de dépôts quaternaires récents incluant principalement des sédiments fluvio-glaciaires, fluviatiles et marins occupés par de nombreuses tourbières. La limite marine dans la région est estimée à environ 150 m d'altitude.

L'estuaire, au droit du secteur, est formé par le Chenal laurentien profond d'environ 450 m et large d'environ 15 km lequel est une structure géologique en forme de graben (Tremblay *et al.* 2003). Il est bordé par deux plate-formes dont la morphologie est contrôlée par le substratum rocheux tel que mis en évidence par les divers linéaments (figure 2). Ce relief résulte principalement du passage des glaciations successives qui a vraisemblablement accentué les contrastes structuraux et lithologiques du substratum rocheux. Les plate-formes sont inclinées à moins de 2° alors que les escarpements, qui les bordent, atteignent près de 20°. La roche en place, formant cette portion marine de l'estuaire serait principalement composée de roches sédimentaires cambro-ordoviciennes recoupées par la faille de Logan, et cela, plus ou moins le long de l'escarpement sud. La portion nord de la région couverte par les levés multifaisceaux comprend toute la zone côtière occupée principalement par des dépôts deltaïques des rivières Manicouagan, Outardes et Betsiamites, le delta de Manicouagan étant le plus imposant et pour lequel on observe une série de chenaux sous-marins plus ou moins perpendiculaire au rivage (figure 1). La zone côtière est soumise à une intense érosion (Bernatchez 2003b) avec un taux de recul pouvant atteindre un mètre par an dans certains secteurs.

3. MÉTHODOLOGIE

La réalisation de ces travaux a nécessité l'utilisation de quatre principales méthodes de travail : les levés multifaisceaux, les levés sismiques, le carottage et l'analyse des échantillons par scannographie.

Les levés multifaisceaux ont été réalisés à l'aide d'une sonar SIMRAD EM1000 opérant à une fréquence de 95 kHz. L'acquisition des données bathymétriques est synchronisée avec la prise en compte de la position du navire, de son tangage et de son roulis. Par la suite, les données sont corrigées en tenant compte des données marée-graphiques disponibles pour le secteur.

Les levés sismiques ont été réalisés à l'aide du sondeur EG et G monté sous la coque du Coriolis II. La fréquence utilisée varie de 4 à 7 kHz. Pendant les levés, le système enregistre directement la position du navire.

Les échantillons ont été prélevés à l'aide d'un carottier à boîte (longueur maximale de 0.60 m), un carottier Lehigh (longueur maximale de 2.5 m) ainsi que d'un carottier Benthos d'une longueur maximale de 10m. Les échantillons ont été ramenés aux laboratoires de l'Université Laval et ont par la suite été analysés au scanographe ainsi qu'au profileur de densité et de susceptibilité magnétique. Les échantillons, plus de 30 m de longueur au total, sont actuellement en chambre froide et seront étudiés plus en détails au cours des mois à venir.

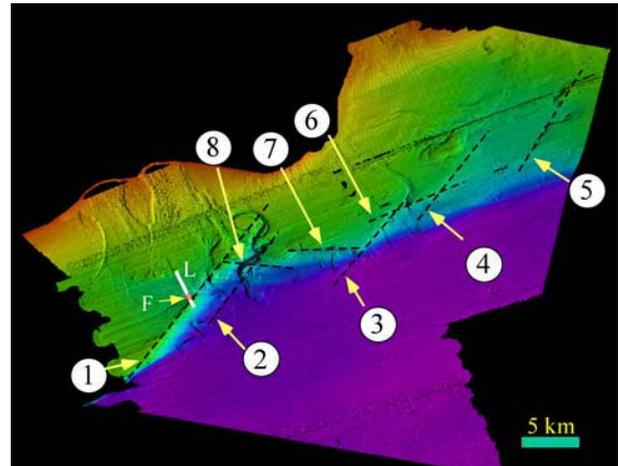


Figure 2. Principaux linéaments dans le secteur du glissement sous-marin de Betsiamites, numérotés de 1 à 8 (d'autres sont aussi indiqués à la figure 1). (La largeur approximative de la fenêtre est de 35 km.)

4. OBSERVATIONS

Les observations qui suivent sont préliminaires et des travaux en cours pourraient en changer l'interprétation. La morphologie associée du substratum rocheux sera d'abord relevée. Par la suite, les diverses formes associées aux mouvements de terrain seront détaillées afin de faire ressortir la complexité du relief et les quelques hypothèses qu'elle permet de soulever.

4.1 Substratum rocheux et canyon

La morphologie générale du secteur est principalement contrôlée par la roche en place. Quelques linéaments répertoriés à la figure 2 illustrent le contrôle de la structure de la roche en place sous-jacente sur le relief sous-marin du secteur. Au total, 8 linéaments y sont soulignés. Il est possible d'observer deux familles principales, *i.e.* celle regroupant les linéaments 1 à 5 et celle regroupant les linéaments 7 et 8. Ce dernier groupe est très présent plus à l'Est, tel illustré par les flèches à la figure 1. Le linéament 6 suit l'orientation générale du talus dans ce secteur. Les orientations des deux principales familles de linéaments du secteur se recoupent à des angles d'environ 120°. Le linéament 1 correspond à l'escarpement principal au droit de la zone d'accumulation de débris lequel s'étire en forme de crête. Cet escarpement est d'ailleurs mis en évidence sur le levé sismique présenté à la figure 3 et y est identifié par la lettre R. Mis en évidence à la figure 4, le linéament 7 est quant à lui associé à une dépression importante à proximité du rebord du talus. Il pourrait correspondre soit à un élément structural majeur ou encore à la limite d'un bloc rocheux légèrement basculé vers l'intérieur (glissement ?).

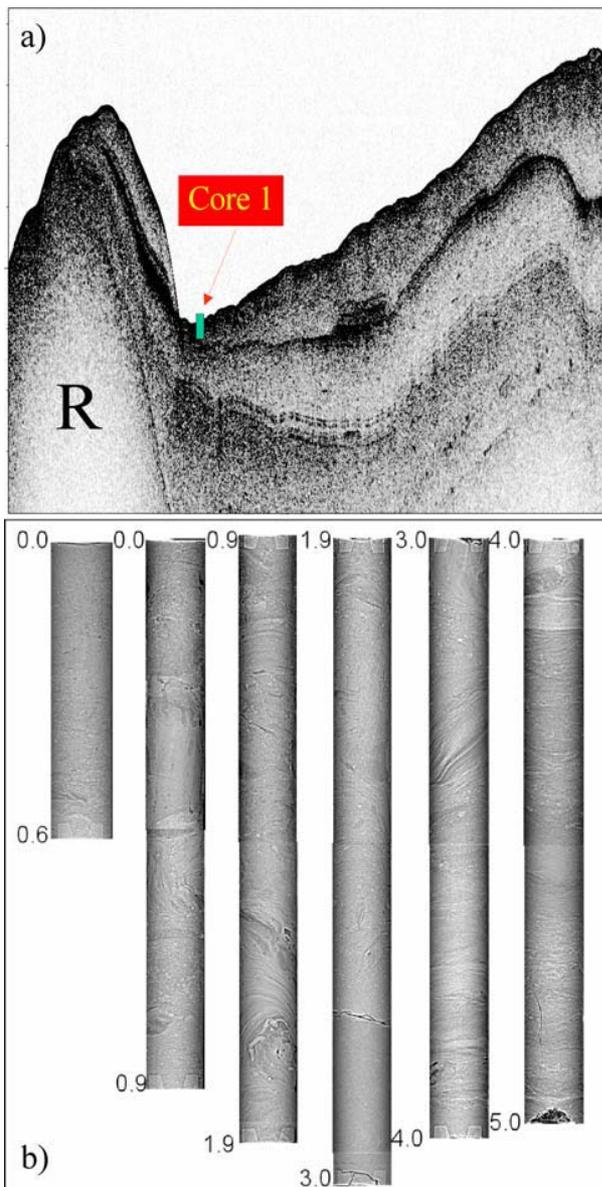


Figure 3. Ligne sismique sur la crête rocheuse (linéament 1) et profil scanographique des échantillons prélevés dans les débris de la coulée sous-marine (zone aval).

Une observation intéressante pour le secteur, est la présence de plusieurs 'pockmarks', *i.e.* des cheminées par lesquelles des gaz s'échappent dans la colonne d'eau sus-jacente. Un analyse détaillée a montré qu'ils pouvaient atteindre un diamètre de 300 m et former une dépression de 10 m de profondeur. Les cheminées perturbent même les dépôts récents ce qui indique qu'elles sont vraisemblablement encore actives. Elles sont particulièrement bien visibles dans la partie Ouest de la crête rocheuse (figure 5b) ainsi qu'au centre du Chenal laurentien (figure 1).

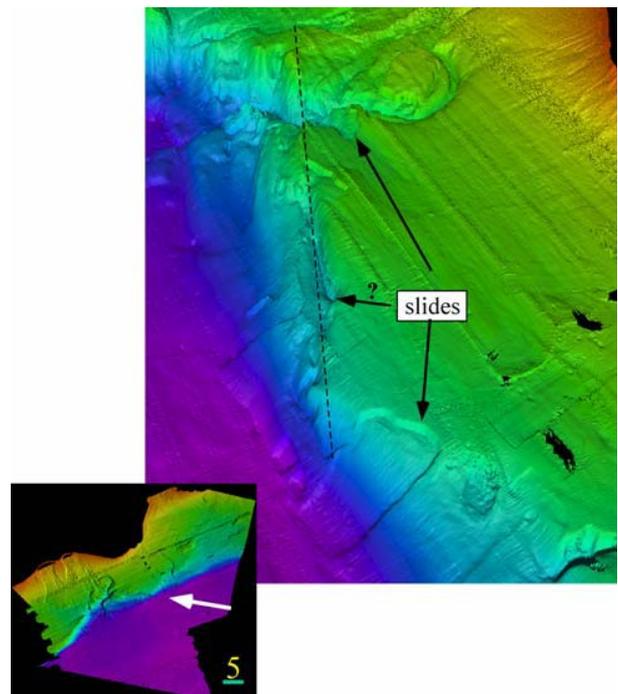


Figure 4. Vue détaillée du linéament 8 montrant un escarpement prononcé juste au rebord du talus. (La largeur approximative de la fenêtre est de 5 km)

Les levés multifaisceaux ont aussi mis en relief la présence d'un canyon sous-marin, partiellement comblé et dont il ne reste plus que le dernier méandre terminal, *i.e.* celui débouchant sur le Chenal laurentien. Il est profond de 20 m, large de 325 m et long de 5 km. Le creusement par étape du canyon est illustré par la présence d'une terrasse résiduelle bordant une partie de sa rive gauche (T à la figure 5a). Le comblement partiel du canyon aurait été accompli principalement par l'accumulation de dépôts quaternaires, mais aussi par la coulée de débris (F sur la figure 5a) provenant du glissement majeur qui sera présenté plus loin (figures 6 et 7).

4.2 Mouvements de terrain

4.2.1 Glissements

Plus à l'Est du secteur présenté ici, Duchesnes *et al.* (2002) ont décrit des cicatrices de mouvements mais dont les levés d'alors ne révélaient que la partie supérieure et centrale de leur morphologie. Les mouvements observés ressemblaient à celui qui est clairement visible au bas de la figure 4 et dont les débris ont été totalement évacués lors du mouvement de masse. L'escarpement, visible sur ce glissement, est d'environ 12 m de hauteur et la pente moyenne de plan de ruptures est d'environ 7 degrés (La pente de l'escarpement est d'environ 10°, la largeur est d'environ 1150 m, la longueur de 1500 m pour un volume d'environ 13,8 millions de m³). Toujours sur la figure 4, on observe, entre autre, une cicatrice de glissement qui borde la rive gauche du canyon et qui est encore mieux

mise en évidence à la figure 5a. Sur cette dernière figure sont localisés de plus petits glissements, en forme de ruptures circulaires, lesquels se retrouvent le long des rives du canyon.

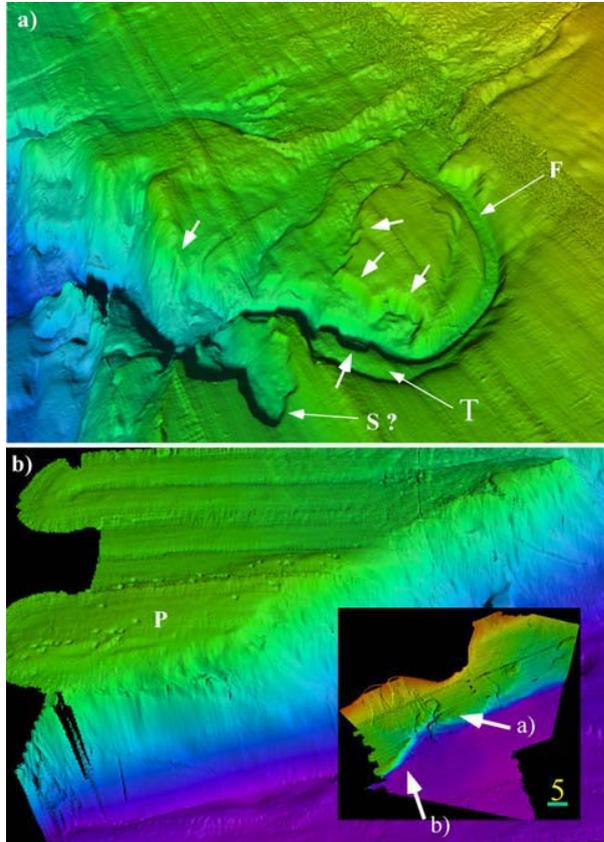


Figure 5. (a) vue rapprochée du canyon illustrant la présence de glissements (indiqués par des flèches) ainsi que d'une terrasse (T) en rive gauche du canyon. (La largeur approximative de la fenêtre est de 4 km) (b) Détails du talus au droit du linéament 1 montrant la présence de plusieurs 'pockmarks'. (La largeur approximative de la fenêtre est de 4 km)

4.2.2 Étalements et coulées

Le secteur le plus impressionnant nous apparaît être celui qui borde la côte située juste au à l'Ouest de l'embouchure de la rivière Betsiamites (figures 1 et 6). La zone d'intérêt s'étend de la côte jusqu'au pied de la crête rocheuse identifiée par le linéament 1 à la figure 2. Ce secteur présente une morphologie complexe contrôlée à la fois par le roche en place (voir la figure 3 et 6) et par des phénomènes d'érosion et d'accumulation de sédiments sur la plate-forme entre la crête rocheuse et la côte. Le secteur est présenté de façon générale à la figure 6, alors que certains détails de la partie amont sont fournis à la figure 7.

Dans son ensemble, le secteur présente des traits morphologiques particuliers. On note d'abord la présence

de deux couloirs Est et Ouest (ou chenaux ?) séparés par un éperon d'une longueur et d'une largeur maximales de 4,5 et 1,6 km, d'une hauteur variant de 10 à 20 m avec des pentes de l'ordre de 5,5° (coté Ouest) et 9,5° (coté Est). L'éperon lui-même a une pente moyenne d'environ 1°. Le couloir Est se situe presque exactement au droit du glissement sub-aérien identifié à la figure 1.

Le couloir situé à l'Est est tapissé de blocs qui ont une hauteur de moins de 15 mètres dont la largeur peut atteindre plus de 100 m (figure 6). D'après les données sismiques et les carottes récupérées, ces blocs seraient constitués de sédiments argileux recouverts d'une couche de sable et de gravier, tout comme les blocs observés le long de la côte (Bernatchez 2003a). On peut aussi noter entre ces blocs des chenaux qui représentent probablement l'écoulement de la partie plus fluide des débris du glissement sub-aérien. Le long de la bordure Est du couloir Est, on note aussi la présence de rides indiquent que cette bordure a été perturbée par des mouvements de masse provenant tant du glissement sub-aérien que de ruptures locales. Certaines rides pourraient représenter des structures d'écoulement de la masse provenant du glissement sub-aérien. Dans le même secteur, on note que la coulée sous-marine s'est répandue dans les divers chenaux et cela jusqu'à la crête rocheuse. Elle a aussi partiellement remblayé le canyon situé en rive gauche (figures 5a, 6 et 7), un peu comme une coulée de laves.

Le couloir situé à l'Ouest présente une morphologie différente avec là aussi des signes de coulées de boues mais avec beaucoup moins de blocs que dans l'autre couloir, et avec chenaux plus étroits. La bordure Ouest de ce couloir présente un relief régulier dont la hauteur est de moins de 20 m et qui s'ouvre graduellement vers les profondeurs en devenant plus ou moins parallèle à la côte.

L'éperon central s'étire de la côte vers le rebord de la plate-forme sur une distance d'environ 5 km avec une pente moyenne de 1°. La surface de l'éperon est aussi partiellement tapissée de blocs dont certains ont glissé pour laisser des levées spectaculaires, typiques de 'out runners' (G à la figure 7). Les levées, produites par la glissades des blocs, ont jusqu'à deux mètres de hauteur.

Un profil sismique orienté plus ou moins est-ouest (figure 7) et recoupant l'éperon central permet de mettre en évidence la stratigraphie locale ainsi que la morphologie des débris et du plan sur lequel la coulée s'est produite. On remarque tout de suite que les escarpements de l'éperon sont taillés dans les dépôts meubles et qu'il ne sont pas reliés à la présence de failles sous-jacentes. Du coté du chenal ouest il est plus facile de voir la surface sur laquelle la coulée s'est produite.

Tel qu'indiqué plus haut, les débris de la coulée se sont rendus jusqu'au pied de la crête rocheuse (figures 2, 3 et 6). La carotte récupérée juste à la limite aval de la coulée révèle la présence de 0,5 m de sédiments hémipélagiques bioturbés recouvrant des sédiments perturbés, typiques de coulées de débris (figure 3).

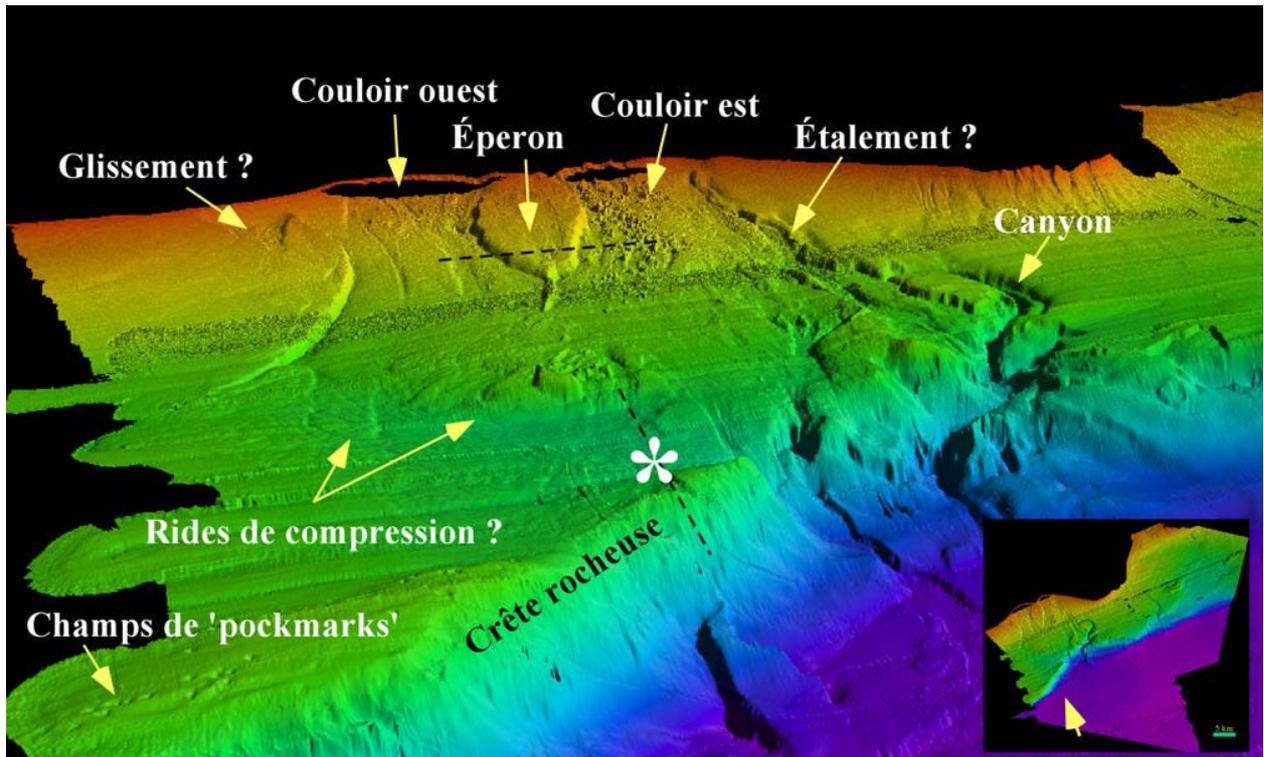


Figure 6. Vue générale du secteur sous-marin situé au droit du glissement sub-aérien de Betsiamites avec une indication des principaux éléments morphologiques. La largeur de la fenêtre est d'environ 20 km. (La largeur approximative de la fenêtre est de 15 km)

À mi-chemin entre la crête et la côte, il y a une zone où les sédiments sont grandement déformés, considérés ici comme des rides de compression, couvrent une bonne partie de la partie ouest du secteur visible à la figure 6.

4.2.3 Coulée de débris anciennes

La morphologie du fond du Chenal laurentien, juste à la sortie du canyon sous-marin, présente un tertre dont la hauteur est de moins de 10 m (figure 8), d'une largeur d'environ 15 km et qui s'étire jusque de l'autre côté du chenal laurentien (voir aussi la figure 1). La régularité de cette forme est brisée en son centre par un petit chenal (érosion ?). Il est intéressant de noter que ce tertre a une forme quasi rectangulaire. Une ligne sismique, présentée à la figure 9, montre le passage de la zone d'accumulation de coulées de débris vers celle constituée uniquement de sédiments hémipélagiques. Les coulées de débris sont mises en évidence par l'irrégularité des réflexions localisées sous environ 15 m de sédiments hémipélagiques, indiquant un fort taux de sédimentation depuis l'événement de la dernière coulée. De plus, l'extension latérale des coulées apparaît comme étant toujours la même, *i.e.* que leur mise en place successive présente une transition quasi verticale entre les débris et les sédiments hémipélagiques.

Une carotte prise à la surface du tertre (figure 9) n'a pas pu rejoindre la couche de débris sous-jacente mais devrait

permettre de dater approximativement l'âge des coulées à partir de la mesure du taux de sédimentation. Des coulées de ce type pourraient représenter des événements catastrophiques en provenance du bassin versant de la région et leur datation permettrait d'apprécier leur récurrence.

5. CAUSES, ÂGE DES RUPTURES, ET MORPHOLOGIE

Un survol rapide du secteur a permis de présenter diverses formes associées à des mouvements de terrain de différents types.

Les travaux de Bernatchez *et al.* (2003) ont permis de relier le grand glissement terrestre au séisme majeur de 1663, dont le volume total est estimé à environ 300 millions de mètres cubes. La question qui se pose est à savoir si ce séisme a aussi causé les autres glissements sous-marins visibles dans le secteur. La présence de nombreuses cheminées de dégazage (*pockmarks*) pourrait aussi suggérer que les gaz (hydrates de gaz ?), pourraient être la cause ou avoir aidé à générer les glissements situés le long du rebord de la plate-forme. Il faut se rappeler que la région a subi l'équivalent d'une abaissement du niveau marin postglaciaire d'environ 150m, ce qui aurait pu causer l'altération des hydrates de gaz et provoquer des glissements sous-marins (Locat et

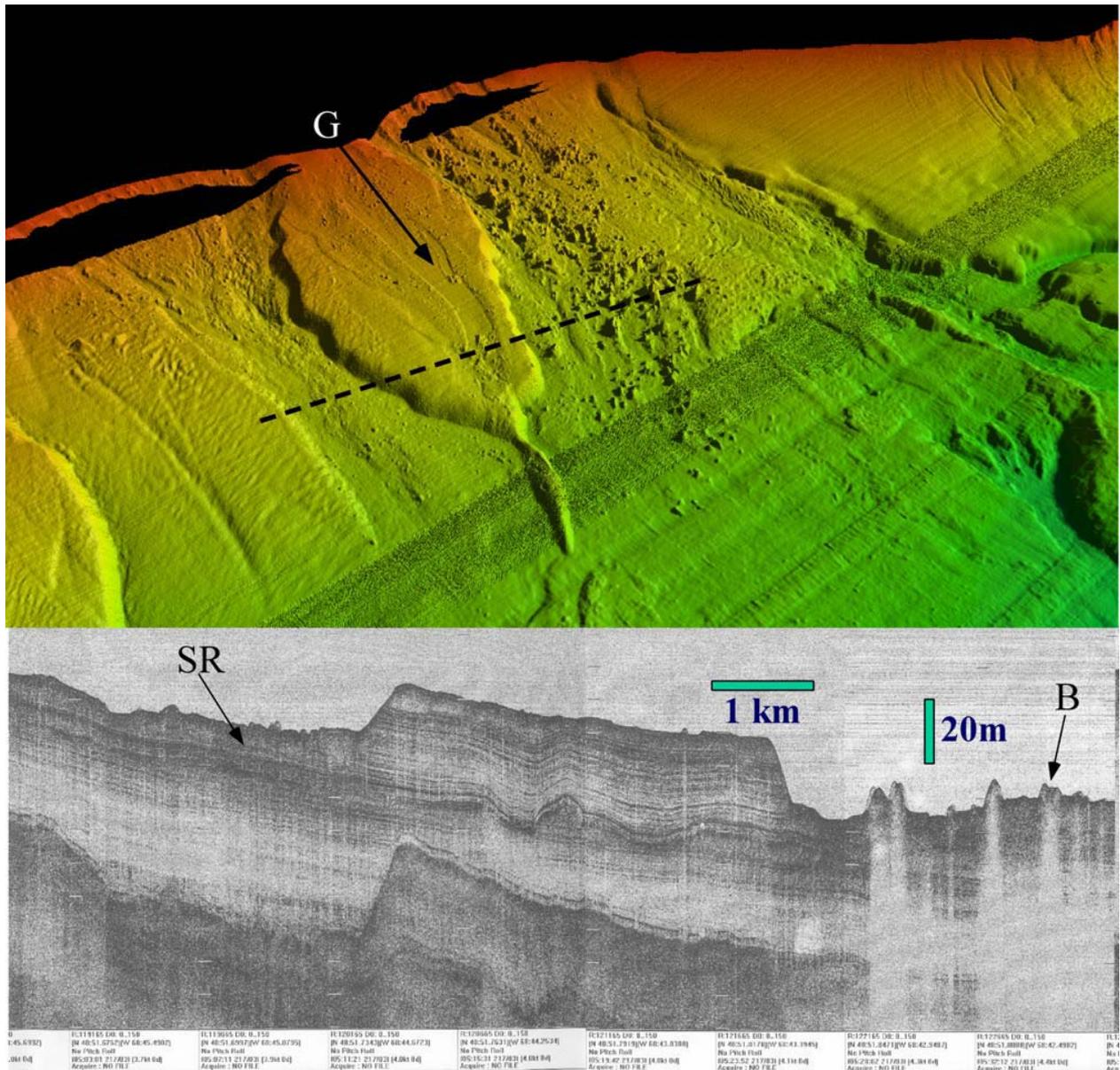


Figure 7. (a) Vue détaillée de la coulée sous-marine de Betsiamites mettant en relief les glissements de blocs sur l'éperon ainsi que le champs de blocs surtout nombreux dans le couloir est. (b) Ligne sismique perpendiculaire à l'éperon montrant les blocs (B) ainsi que le plancher d'écoulement (SR). Les talus sont d'environ 10 à 20 m de hauteur. La pente de l'éperon est d'environ 1°. (La largeur approximative de la fenêtre est de 10 km)

Lee 2002). Le long des rives du canyon, les glissements rotationnels auraient aussi pu être causés soit par l'érosion lors de sa formation ou subséquentement à la suite de séismes.

Une autre question importante à résoudre est à savoir ce que le séisme de 1663 a effectivement causé dans le secteur. Ainsi, est-ce que les couloirs Est et Ouest sont le résultats de mouvements de masse (séisme) ou d'érosion. De tels escarpements ne sont pas visibles

ailleurs sur la plate-forme. De plus, leur orientation, perpendiculaire à la côte, la présence de rides de compression sur de grandes distances, dans la partie aval, nous laissent croire que ce relief pourrait résulter d'un énorme mouvement de masse dont l'âge reste à déterminer. Et qu'en est-il de l'âge des autres glissements ? Autant de question dont il faut connaître la réponse si on veut être en mesure de mieux évaluer l'aléa et la magnitude.

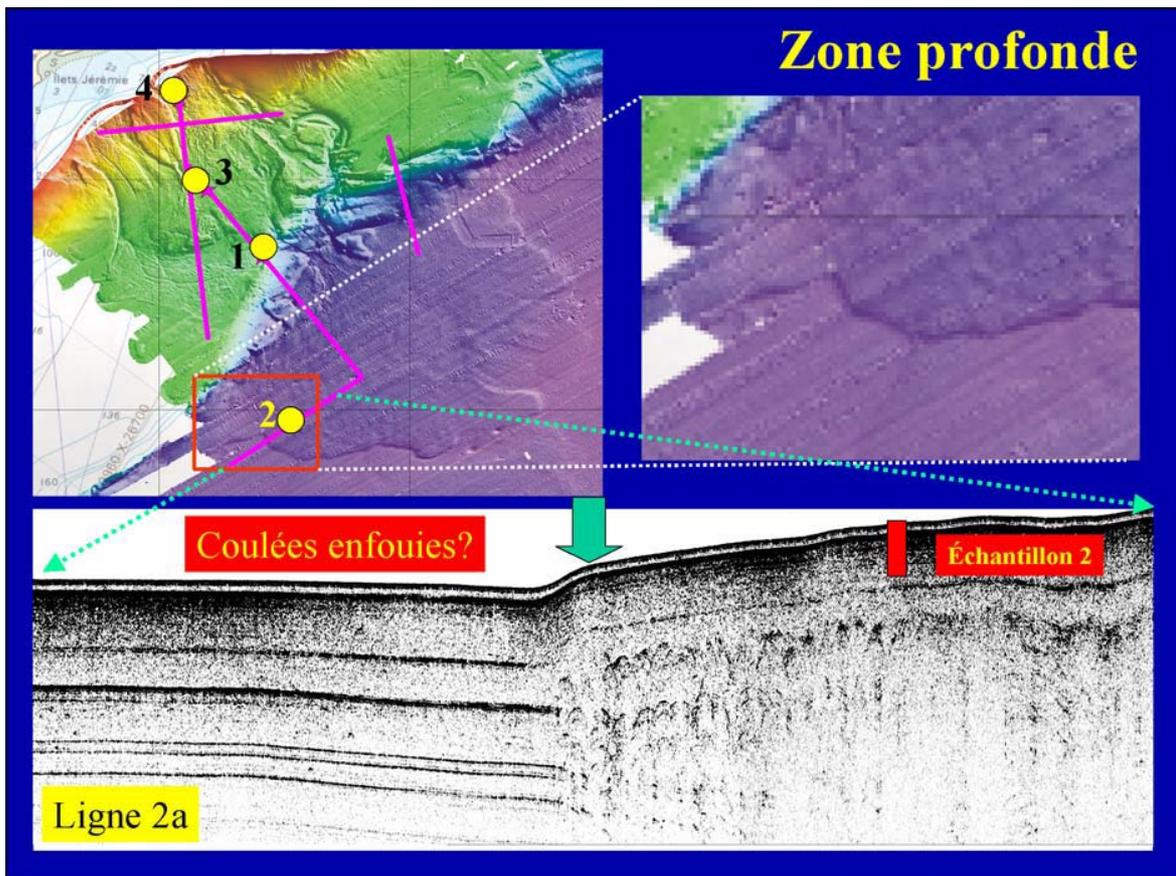


Figure 8. Vue détaillée de la zone profonde au droit de la coulée de Betsiamites. Le faible relief positif observable (tertre) sur le fond correspondrait au recouvrement d'anciennes coulées (structures sinusoïdales) qui auraient été entraînées dans le fond du Saint-Laurent via le canyon. (La largeur approximative de la fenêtre est de 24 km)

6. CONSÉQUENCES: TSUNAMI

Une question qui vient vite à l'esprit quand de tels glissements sont observés le long des côtes est de savoir s'ils peuvent provoquer des tsunamis (Locat *et al.* 2004). Les paramètres principaux qui déterminent la capacité d'un glissement sous-marin à générer un tsunami significatif sont : le type de mouvement, le volume, la profondeur de l'eau et le relief sous-marin au droit du glissement, et l'accélération de la masse en mouvement. Ainsi, une coulée sub-aérienne entrant dans un réservoir sur une pente de moins de 2° ne devrait pas avoir un potentiel élevé pour générer un tsunami significatif. On considère ici un tsunami significatif, celui dont le niveau d'inondation côtière résultant serait supérieur à celui causé par les grandes marées. Par contre une vitesse d'entrée rapide de la coulée dans la mer pourrait avoir un effet significatif. Quant aux mouvements de masse localisés sur le rebord de la plate-forme, ces derniers sont dans une situation plus propice à la génération de tsunamis.

Tel qu'indiqué plus haut, il semble que, dans ces cas, la plupart des matériaux impliqués dans les glissements

aient quitté la surface de rupture. Ceci indique une rupture avec suffisamment d'énergie pour fournir la mobilité nécessaire à une évacuation en masse. Par contre, il faut être en mesure de déterminer si la masse initiale en mouvement est maintenue intègre sur une période assez longue pour entraîner un déplacement significatif de la masse d'eau. Il y a donc lieu de bien connaître les types de ruptures associés aux cicatrices de glissements observés si on veut être en mesure de faire une évaluation juste du potentiel de génération de tsunamis.

Dans l'hypothèse où un tsunami aurait pu être généré par un ou des glissements sous-marins observés de ce côté du Saint-Laurent, il devrait y avoir, sur la rive sud, des évidences de l'arrivée d'une vague supérieure à l'amplitude des marées. Conséquemment, des accumulations de sable et de gravier devraient se retrouver dans les zones marécageuses à l'arrière des crêtes de plage.

Face à de telles possibilités, il devient donc impératif d'évaluer l'aléa et le risque associés aux mouvements de masse sous-marins dans la région. Cet effort implique un inventaire complet des glissements sous-marins, la

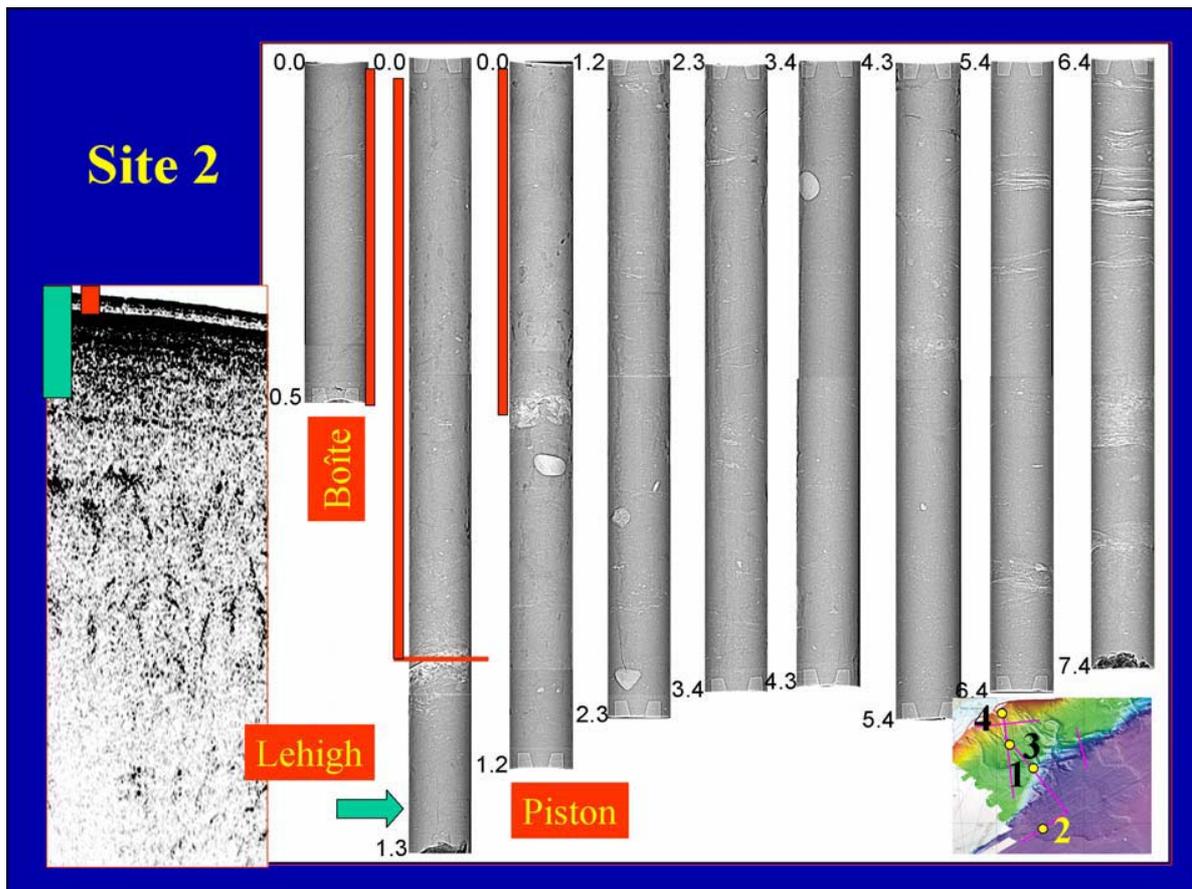


Figure 9. Profil des échantillons recueillis dans la couche de recouvrement des coulées de débris.

détermination de leur âge respectif, ainsi que l'identification du ou des mécanismes de rupture impliqués. Ces informations permettraient de réaliser une modélisation des tsunamis accompagnée d'investigations côtières visant à localiser des dépôts mis en place par ces derniers.

- Étant donné les nombreuses signatures de mouvements de masse sous-marins présentes dans la région, ainsi que la présence de populations et d'infrastructures côtières, il devient impératif de procéder à une étude de l'aléa et du risque qui y sont associés.

7. CONCLUSIONS

Ces premières observations sur les mouvements sous-marins au large de Betsiamites nous permettent déjà quelques conclusions préliminaires :

- Les éléments structuraux de la roche en place sont mis en évidence par de nombreux linéaments et il sert possiblement de conduits pour la remontée d'hydrates de gaz et la formation de cheminées (pockmarks).
- Le séisme de 1663 a provoqué un glissement côtier majeur qui a formé une grande coulée qui a modifié sensiblement la nature et la morphologie du fond marin dans ce secteur.
- D'autres glissements sous-marins ont aussi été observés dans le secteur et leurs causes ainsi que leurs âges sont à déterminer.

8. REMERCIEMENTS

Ce projet est rendu possible par le soutien financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada dans le cadre du projet COSTA-Canada ainsi que du soutien du Centre interdisciplinaire sur le cartographie des océans de Rimouski, ainsi que du Service hydrographique canadien de l'Institut Maurice Lamontagne de Mont-Joli, Québec. Les auteurs veulent aussi remercier les membres des équipages du Creed et du Coriolis II pour leur aide ainsi que tous les assistants qui ont participé aux diverses missions dans le secteur.

9. BIBLIOGRAPHIE

Allard, J.-D., (1982) Zones exposées aux mouvements de terrain, région de Chutes-aux-Outardes. *Service de la*

- géotechnique*, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec.
- Bernatchez, P., 2003a. Évolution littorale holocène et actuelle des complexes deltaïques de Betsiamites et de Manicouagan-Outardes : synthèse, processus, causes, et perspectives. Thèse de doctorat, Département de géographie, Université Laval, Québec, Canada, 459 p.
- Bernatchez, P., 2003b. Les impacts des changements climatiques sur les littoraux de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. *Association canadienne française pour l'avancement des sciences*, Session C-617, résumé.
- Bernatchez, P., Dionne, J.-C., et Dubois, J.-M., 2003 Un méga-glissement de terrain d'origine sismique sur la bordure côtière du delta de Betsiamites sur la Côte-Nord du Saint-Laurent: influence sur la dynamique côtière. *Association canadienne française pour l'avancement des sciences*, Session S-209, résumé.
- Duchesne M.J., Long, B. F., Urgeles, R., et Locat, J. (2003) New evidence of slope instability in the Outardes Bay delta area, Quebec, Canada. *Geo-Marine Letters* 22: 233-242.
- Hart, B.S., et Long, B. (1990) Recent evolution of the Outardes Estuary, Quebec, Canada: consequences of dam construction on the river. *Sedimentology* 37(3): 495–507.
- Locat, J., et Lee, H., 2002. Submarine landslides : advances and challenges. *Revue canadienne de géotechnique*, 39 : 193-212.
- Locat, J., Lee, H., Locat, P., et Imran, J., 2004. Numerical analysis of the mobility of the Palos Verdes debris avalanche, California, and its implication for the generation of tsunamis. *Marine Geology*, 203: 269-280.
- Locat, J., et Mienert, J., 2003. Submarine mass movements and their consequences. *Advances in Natural and Technological Hazards Research, No., 19*, Kluwer Academic Publishers, 540 p.
- Massé, M. (2001) L'évolution des dépôts quaternaires de l'estuaire du Saint-Laurent. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, Rimouski. Québec, Canada.
- Tremblay, A., Long, B., et Glamascher, U., 2003. Supracrustal faults of the St. Lawrence rift system, Québec: kinematics and geometry revealed by field mapping and marine seismic reflection data. *Tectonophysics*, vol. 369 (3-4), 231-252.
- Urgeles, R., Duchesne, M. J., Héroux M.-C. (2001) Levés multifaisceaux au large des rivières Betsiamites et Outardes. *Laboratoire d'études sur les risques naturels*, Département de géologie et de génie géologique, Université Laval, Québec. Rapport interne.
- Urgeles, R., Locat, J., Lee, H., et Martin, F., 2002. The Saguenay Fjord, Québec, Canada: integrating marine geotechnical and geophysical data for spatial seismic slope stability hazard assessment. *Marine Geology*, 185: 318-340.