

## Fiche synthétique

Titre du sujet de thèse	Glissements sous-marins dans l'estuaire du Saint-Laurent, Québec, Canada
PhD Title	Submarine landslides in the St. Lawrence Estuary, Québec, Canada
Co-Directeur de thèse ( <i>titulaire d'une HDR</i> ): Structure, laboratoire (Dép/unité/labo pour Ifremer) :	Nabil Sultan REM/GM  Co-encadrant Sébastien Garziglia (REM/GM/LAD)
Directeur.rice de thèse : Structure, laboratoire (Dép/unité/labo pour Ifremer) :	Guillaume St-Onge Chaire de recherche du Canada en géologie marine Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER) Université du Québec à Rimouski (UQAR)
Laboratoire/unité d'accueil, localisation	Ifremer – REM/GM/LAD ISMER-UQAR
Employeur envisagé	ISMER-UQAR/Ifremer
Ecole doctorale de rattachement	EDSML et ISMER-UQAR
Date limite de dépôt du dossier de candidature par le.la candidat.e à l'école doctorale si connue	Mars 2019 - ISMER-UQAR
Co-financement envisagé/obtenu ( <i>indiquer la date de réponses aux appels d'offres ou le projet obtenu</i> ) <sup>1</sup>	-Co-financement de la Chaire de recherche du Canada en géologie marine obtenu

<sup>1</sup> Si d'autres critères d'éligibilité liés aux (co-)financeurs sont connus, merci de les indiquer en bas de cette fiche synthétique.

## Résumé – 1200 caractères

Plusieurs zones sismiques sont connues au Canada dont une importante dans l'est du Canada, la zone sismique de Charlevoix-Kamouraska/Bas-Saint-Laurent - CKBSL. La compréhension de l'aléa sismique représente donc un enjeu majeur pour la réduction des risques associés (victimes, fragilisation des infrastructures, glissements sous-marins, tsunamis). La connaissance actuelle de l'aléa de la région reste cependant trop imprécise, car elle repose sur un nombre de séismes trop restreint, principalement recensés depuis 1663 seulement. Dans ce contexte, la présente thèse de doctorat vise à identifier et dater les glissements sous-marins déjà recensés de l'estuaire du Saint-Laurent et de caractériser les propriétés géotechniques du sédiment intact, non-glissé afin de déterminer l'origine, la cause et la récurrence de ces glissements. L'importante activité sismique de la zone ainsi que la présence de ces nombreux et géographiquement étendus glissements sous-marins permettent de proposer l'hypothèse qu'ils aient possiblement été induits par des séismes. Si cette hypothèse s'avérait vérifiée, les répercussions seraient considérables, car une bonne compréhension des séismes de cette région et de leur impact est essentielle pour déterminer l'aléa et pour établir la période de retour de tels événements. Les nouvelles exigences du code du bâtiment du Canada exigent, pour l'évaluation de l'aléa sismique, de considérer une période de retour de 2500 ans. Ces données n'existent tout simplement pas !

**Mots-clés :** glissements sous-marins, séismes, aléas, carottes sédimentaires, géophysique, géotechnique, Holocène, Québec, Canada

## Summary – 1200 caractères

There are several known seismic zones in Canada including one of considerable size in the east of the country, known as Charlevoix-Kamouraska/Bas-Saint-Laurent – CKBSL. To reduce the risks associated with seismic hazard (loss of human life, deterioration of infrastructure, submarine landslides, tsunamis), we face the major challenge of furthering our comprehension of their behaviour. Current knowledge on the hazard in the area lacks precision as it is based on a restricted number of earthquakes, mainly only those recorded since 1663. This thesis aims at identifying and dating submarine landslides already recorded for the estuary of Saint-Laurent and characterizing the geotechnical properties of intact sediments in order to determine the origin, cause and recurrence of observed landslides. Based on the considerable seismic activity in the area and the great number of submarine landslides and their geographical scope, we put forward the possibility that they are caused by earthquakes. If we are able to verify this hypothesis, the implications would be far-reaching as it is essential we have a clear understanding of the earthquakes in this region and their impact to determine hazard events and their return period. To assess the seismic hazard in accordance with the new requirements of the building codes of Canada, we are required to consider a return period of 2500 years. However, this data is quite simply non-existent.

**Key-words :** submarine landslides, earthquakes, hazards, sediment cores, geophysics, geotechnical analysis, Holocene, Québec, Canada

## Profil de candidature souhaité – 400 caractères

Licence et master (ou baccalauréat et maîtrise pour des candidats étrangers) en sciences de la Terre ou disciplines connexes. Expérience avec l'analyse de carottes sédimentaires, et le traitement et l'interprétation de données géophysiques. Expérience en mer et bonne connaissance de l'anglais seraient un atout. Comme la thèse sera en cotutelle avec l'ISMER-UQAR, en plus de l'Ifremer, l'étudiant (e) sera appelé (e) à passer 50% de son temps à Rimouski (Québec, Canada).

## Expected profile – 400 caractères

Degree and Masters in Earth Science or related disciplines. Experience in sediment core analysis and geophysical data interpretation and processing. Seagoing experience and a solid knowledge of English would be an advantage. As the PhD will be under a joint supervision arrangement with ISMER-UQAR, together with Ifremer, the student will spend 50% of his time in Rimouski (Quebec, Canada).

## Programme de recherche détaillé (3 pages)

### Contexte scientifique ou technologique

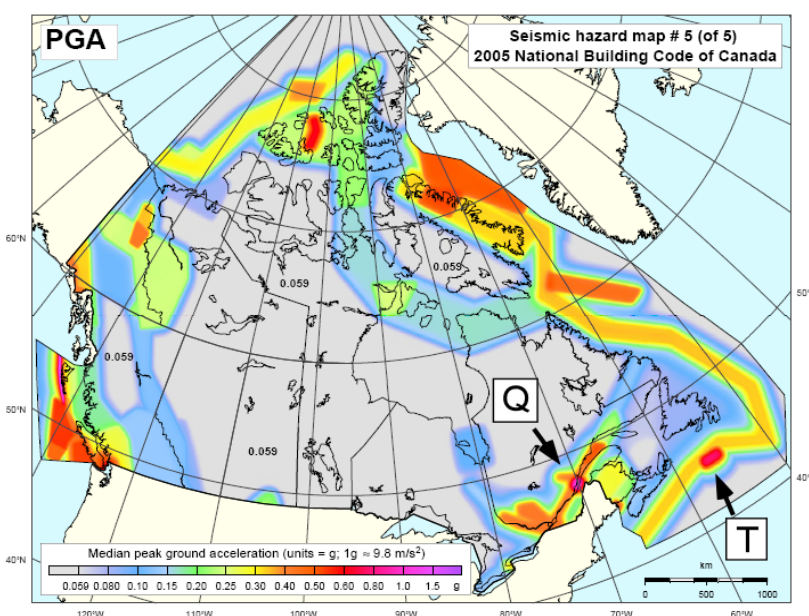
#### Principales références bibliographiques, projet éventuel Ifremer de rattachement...

Au Canada, on reconnaît diverses zones sismiques dont une zone importante dans l'Est du pays (Fig. 1). La carte de zonage sismique (Fig. 1) est cruciale pour le Canada, car elle est un outil important permettant l'atténuation et la prévention des risques liés aux tremblements de terre. La carte d'accélération de pointe extraite du Code national du bâtiment du Canada montre bien que la région de Charlevoix / Kamouraska est au même niveau d'aléa sismique que les zones actives du Pacifique. Le haut niveau d'aléa de Charlevoix dépend grandement du séisme majeur du 5 février 1663 (magnitude estimée à 7 ou plus (Locat, 2011; Gouin 2001; point Q sur la Fig. 1). Ce séisme a ébranlé l'ensemble du nord-est de l'Amérique du Nord et causa d'énormes glissements de terrain tant terrestres (St-Jean Vianney, Shawinigan, Betsiamites, Mont Éboulé) que sub-aquatiques (fjord du Saguenay, estuaire du Saint-Laurent). Aujourd'hui, un tel séisme causerait des dommages considérables et ce tant sur le plan de la stabilité des infrastructures (viaducs, routes, ponts, etc.) que sur la sécurité des populations, comme l'ont fait plusieurs autres séismes de magnitude 6 et plus survenus dans la zone sismique de Charlevoix-Kamouraska/Bas-Saint-Laurent (CKBSL) en 1791, 1860, 1870, 1925 et 1988 au Saguenay (Lamontagne, 2000; Lamontagne et al., 2007).

Par ailleurs, les traces de nombreux glissements sous-marins ont été identifiées dans l'estuaire du Saint-Laurent (e.g., Poncet et al., 2010 ; Locat et al., 2012; Pinet et al., 2015). Les travaux de Poncet et al. (2010) illustrent même que d'importants glissements sous-marins possiblement déclenchés par un séisme à Saint-Siméon auraient pu générer un tsunami d'une hauteur d'environ 5 m sur la rive sud à Kamouraska et Rivière-du-Loup. L'importante activité sismique de la zone, ainsi que la présence de ces nombreux et géographiquement étendus glissements sous-marins permettent de proposer l'hypothèse qu'ils sont possiblement induits par des séismes. Si cette hypothèse s'avérait vérifiée, les répercussions seraient considérables, car une bonne compréhension des séismes de cette région et de leur impact est essentielle pour déterminer l'aléa et pour établir la période de retour de tels événements.

Le milieu sous-aquatique peut préserver les traces des événements catastrophiques. Cette préservation est notamment visible dans la nature et la composition ainsi que dans la stratigraphie et l'architecture des sédiments. Des études dans le fjord du Saguenay ont clairement démontré que les événements catastrophiques de différents types peuvent laisser des signatures spécifiques mises en évidence soit par les caractéristiques des séquences sédimentaires (St-Onge et al., 2004; 2012) et/ou par la morphologie des dépôts mobilisés par des mouvements de terrain initiés par des séismes (e.g., Urgeles et al., 2002, Lévesque et al., 2006). Par exemple, de travaux réalisés dans le fjord du Saguenay et l'estuaire du Saint-Laurent ont permis de mettre en évidence et de discerner des couches sédimentaires et des structures géomorphologiques sous-marines associées à plusieurs catastrophes naturelles majeures dont les séismes de 1663 ( $M > 7$ ) et de 1988 ( $M = 6.0$ ; St-Onge et al., 2003; 2004; Duchesne et al., 2003; Cauchon-Voyer et al., 2008 ; 2011).

L'établissement d'un registre des séismes au-delà des archives historiques a aussi été réalisé en milieu sous-aquatique ailleurs dans le monde. Par exemple, une étude sédimentologique à partir des propriétés physiques de



**Fig. 1.** Accélération maximale du sol dans un terrain ferme pour une probabilité de 2%/50 ans. L'accélération est exprimée en  $g$  (source : RNCAN). Le point Q indique l'emplacement probable de l'épicentre du séisme de 1663.

carottes sédimentaires marines a permis de déterminer la récurrence de séismes de magnitude élevée le long de la faille de San Andreas au cours des derniers 3000 ans (Goldfinger et al., 2007). De façon similaire, l'étude de Blais-Stevens et Clague (2001) a permis d'associer plusieurs coulées de débris à d'importants séismes survenus dans le fjord Saanich Inlet (Canada) au cours des derniers millénaires. En Europe, des travaux de sédimentologie et de géophysique ont permis l'identification de couches accidentelles liées à des séismes (Chapron et al., 1999; Monecke et al., 2004; Schnellmann et al., 2005; Nomade et al., 2005 ; Campos et al., 2013a). L'étude de Chapron et al. (1999) a notamment permis de relier la présence de turbidites, caractérisées par une base sableuse et une unité sus-jacente argileuse déposée à la suite d'une seiche (vague qui va et vient) provoquée par un séisme. De plus, Campos et al. (2013b), à partir de l'anisotropie de la susceptibilité magnétique dans ce type de couche déposées rapidement, a identifié des valeurs élevées de foliation magnétique qui confirment une sédimentation sous l'action de courants oscillatoires associés à l'effet de seiche.

Autant différentes approches ont été développées pour déterminer l'origine sismique de couches de sédiments à des échelles allant du cm aux dizaines de mètres, l'approche conceptuelle la plus importante pour attribuer une origine sismique à de telles couches de sédiments provient certes des travaux de Sims (1973, 1975). Ce chercheur a suggéré que 7 critères devaient être rencontrés pour attribuer une origine sismique à une couche de sédiments. D'autres travaux plus récents (Jones et Omoto, 2000) ont permis de restreindre le nombre de ces critères à 4, soit : 1) le contexte géologique (activité sismique); 2) l'étendue géographique de l'unité perturbée; 3) l'absence d'autres mécanismes déclencheurs potentiels pour remobiliser les sédiments; et 4) des indices de l'activité d'autres mécanismes déclencheurs peuvent être présents dans la séquence sédimentaire, mais sont associés à des sédiments non perturbés ailleurs dans la séquence.

### Positionnement du sujet dans la stratégie du département et de l'institut

Ce sujet de thèse concerne une thématique majeure du laboratoire Aléas Géologiques et Dynamique sédimentaire (LAD) de l'Ifremer. En effet, un des axes de recherche de ce laboratoire porte sur les aléas sismiques et la caractérisation des mécanismes de déformation (liquéfaction, rupture, radoucissement et dégradation du sédiment, ...) associés à la charge cyclique générée par un séisme. La zone d'étude a été intensément explorée ces dernières années, le volume et la qualité de données disponibles ainsi que les perspectives d'acquérir des nouvelles données en 2019 en fait une zone d'étude de premier choix pour l'étude des aléas sismiques.

### Objectifs scientifiques du sujet

La présente thèse de doctorat vise les objectifs suivants :

- Identifier, caractériser et dater les mouvements de masse déjà recensés de l'estuaire du Saint-Laurent ;
- Caractériser en laboratoire les propriétés mécaniques du sédiment intact en place sous différentes charges (statiques et dynamiques) ;
- Définir, par la modélisation numérique, les causes et les conditions mécaniques à l'origine des déstabilisations sédimentaires passées et les conditions nécessaires à des instabilités sédimentaires futures.

Cette approche multidisciplinaire combinant sédimentologie et géotechnique doit permettre la détermination de l'origine, la cause et la récurrence des instabilités sédimentaires au cours de l'Holocène. Les données déjà acquises et la complémentarité des approches et des compétences des deux partenaires du projet devraient permettre des avancées significatives dans le domaine des glissements associés aux séismes.

### Approche(s) méthodologique(s)

L'objectif spécifique principal de cette thèse sera d'analyser des couches déposées rapidement tels que les glissements sous-marins et les turbidites. L'étude de la géométrie, de la stratigraphie, de l'extension et des relations latérales des glissements sera réalisée grâce aux données géophysiques, alors qu'une analyse détaillée des propriétés sédimentologiques, physiques, magnétiques, géochimiques et minéralogiques des couches déposées rapidement sera entreprise afin de les dater et de déterminer le mécanisme responsable de leur dépôt. Ainsi, grâce à la combinaison des données géophysiques, géotechniques et sédimentaires, une corrélation latérale et temporelle des événements sera possible pour déterminer s'ils ont été induits par des séismes ou par d'autres types d'événements catastrophiques. Une mission en mer est financée et planifiée au printemps 2019 pour la récolte de nouvelles carottes sédimentaires et données géophysiques, alors qu'une importante banque de données est également déjà disponible pour la réalisation de la thèse de doctorat.

Par ailleurs, une approche combinée théorique et expérimentale sera mise en place pour définir les probabilités de rupture des pentes les plus critiques sous l'effet des accélérations générées par les séismes les plus probables.

### Moyens mis à disposition pour développer le projet (humains, technologiques...)

Du côté de l'Ifremer, l'étudiant profitera des moyens expérimentaux en géotechnique du LAD et notamment la cellule triaxiale cyclique pour déterminer le potentiel de liquéfaction des sédiments étudiés sous l'effet des charges

cycliques équivalentes aux séismes les plus probables qu'a connu la zone. Il utilisera par ailleurs les logiciels de calcul développés en interne à l'Ifremer (i.e. SAMU-3D – Sultan et al., 2007) ainsi que des logiciels de calcul commerciaux utilisant la méthode des éléments finis (Plaxis) ou différences finies (FLAC2D). Du côté de l'ISMER-UQAR, l'étudiant bénéficiera d'un des laboratoires de géologie marine parmi les plus complets au Canada pour l'analyse des carottes sédimentaires (*Multi Sensor Core Logger* avec micro fluorescence X, CAT-scan et micro CAT-scan, granulométrie, minéralogie, géochimie, laboratoire souterrain pour les analyses de <sup>210</sup>Pb et <sup>137</sup>Cs, paléomagnétisme, instruments de géophysique, logiciels, etc.). L'étudiant bénéficiera de l'expertise complémentaire de deux chercheurs avec une expérience considérable en formation, sans compter l'aide quotidienne du personnel de soutien technique de la Chaire de recherche en géologie marine et du laboratoire des Aléas Géologiques et Dynamique sédimentaires (LAD) de l'Ifremer.

### Résultats attendus et valorisation

Cette thèse de doctorat permettra de définir la récurrence et les aléas associés aux séismes majeurs dans l'est du Québec. Cette meilleure connaissance de l'aléa sismique permettra aux institutions gouvernementales, paragouvernementales et privées d'adapter leurs infrastructures et politiques en fonction de cette réalité. Des événements comme celui de 1663 se reproduiront éventuellement, mais il s'agit ici de mieux définir les probabilités qu'une telle catastrophe se produise à court, moyen et long terme. En fonction de ces probabilités, des politiques du Code canadien du bâtiment et des plans d'urgence pourront être mis en place ou réévalués et, ce, afin de mieux protéger la communauté et d'éviter les dommages majeurs aux infrastructures dus à des constructions mal ou peu adaptées aux événements sismiques importants. Cette thèse pourra aussi jeter la base à d'autres études similaires au Canada et sera complémentaire à des travaux entrepris en milieu lacustre dans le sud du Québec.

### Originalité et caractère innovant des recherches

Une bonne compréhension des séismes de l'est du Québec et de leur impact est essentielle pour déterminer l'aléa et pour établir la période de retour de tels événements. Les nouvelles exigences du code du bâtiment du Canada exigent, pour l'évaluation de l'aléa sismique, de considérer une période de retour de 2500 ans. Ces données n'existent tout simplement pas !

### Collaborations attendues

Cette thèse permettra une nouvelle collaboration entre l'Ifremer et l'ISMER-UQAR. Celle-ci va dans la continuation des démarches de rapprochement entreprises à l'été 2018 lors de la venue du professeur St-Onge à l'Ifremer. Ce projet pourrait aussi être élargi à l'ensemble de l'est du Canada dans le cadre du futur appel à projets conjoint de l'ANR et des Fonds de recherche du Québec qui sera lancé cet automne.

### Echéancier prévisionnel

Étant donné que la grande majorité du matériel à analyser ou des données à traiter est déjà disponible ou le sera après la mission en mer du printemps 2019, le projet pourra débuter rapidement pour l'étudiant(e). De façon générale, la première année servira à l'étude bibliographique, au traitement des données géophysiques (sismique et multifaisceaux) déjà recueillies et au début de l'ensemble des travaux de laboratoire. La deuxième année marquera la poursuite des travaux de laboratoire. La troisième année servira à l'intégration des données, à la modélisation numérique et à la rédaction des articles scientifiques. Au besoin, une nouvelle mission scientifique pourra être réalisée à la deuxième année. Nous aimerions notamment compléter les essais en mer avec l'acquisition des mesures géotechniques in situ (mesures piézométriques).

L'échéancier prévisionnel de l'ensemble des travaux de thèse menés à l'Ifremer est présenté dans le tableau suivant :

Phases	Année 1		Année 2		Année 3	
	t1 - t2	t3 - t4	t5 - t6	t7 - t8	t9-t10	t11-t12
	UQAR	UQAR	UQAR	GM	GM	GM
P.0. Étude bibliographique	X					
P.1. Traitement des données géophysiques	X	X				
P.2a. Travaux de laboratoire - sédimentologie		X	X			
P.2b. Travaux de laboratoire - géotechnique				X	X	
P.3. Modélisation numérique				X	X	
P4. Rédaction d'articles scientifiques et du manuscrit de thèse					X	X

## RÉFÉRENCES

- Blais-Stevens**, A. & Clague, J.J. 2001. Paleoseismic signature in late Holocene sediment cores from Saanich Inlet, British Columbia. *Mar. Geol.* 175, 131–148; **Cauchon-Voyer**, G. et al. 2008. Late-Quaternary morpho-sedimentology and submarine mass movements of the Betsiamites area, Lower St. Lawrence Estuary, Quebec, Canada. *Mar. Geol.* 251, 233–252; **Cauchon-Voyer**, G. et al. 2011. Large-scale subaerial and submarine Holocene and recent mass movements in the Betsiamites area, Canada. *Eng. Geol.* 121, 28–45. **Campos**, C. et al. 2013a. Late Quaternary paleoseismic sedimentary archive from deep central Gulf of Corinth: time distribution of inferred earthquake-induced layers. *Annals of Geophys.* 56, 1–15; **Campos**, C. et al. 2013b. Deciphering hemipelagites from homogenites through anisotropy of magnetic susceptibility. Paleoseismic implications. *Sed. Geol.* 292, 1–14; **Chapron**, E. et al. 1999. 1822 earthquake-triggered homogenite in Lake Le Bourget (NW Alps). *Terra Nova*. 11(2-3), 86–92; **Duchesne**, M. et al. 2003. New evidence of slope instability in the Outardes Bay delta area, Quebec, Canada. *Geo-Marine Lett.* 22, 233–242; **Goldfinger**, C. et al. 2007. Rupture lengths and temporal history of significant earthquakes on the Offshore and North coast segments of the Northern San Andreas Fault based on turbidite stratigraphy. *Earth Planet. Sci. Lett.* 254, 9–27; **Gouin**, P. 2001. Tremblements de terre historiques au Québec. Guérin, Montréal, 1491p; **Jones**, A. P. & Omoto, K. 2000. Towards establishing criteria for identifying trigger mechanisms for soft-sediment deformation: a case study of Late Pleistocene lacustrine sands and clays, northeastern Japan. *Sedimentology*. 47, 1211–1226; **Lamontagne**, M. 2000. Geotechnical impact of Eastern and Northern Canadian earthquakes. 53e Conférence canadienne de géotechnique, Montréal, Québec. *Comptes-rendus*. 145–151; **Lamontagne**, M. et al. 2007. Significant Canadian earthquakes 1600–2006. Geological Survey of Canada. Open File 5539; **Leblanc-Rochette**, P. 2017. Approche intégrée de l'action publique en risque côtier : Le cas des tsunamis dans le Saint-Laurent. Rapport final de stage, Université Laval. 86p; **Lévesque**, C. et al. 2006. Dating submarine mass movements triggered by earthquakes in the Upper Saguenay Fjord, Quebec, Canada. *Norwegian J. of Geol.* 86, 231–242; **Locat**, J. 2011. La localisation et la magnitude du séisme du 5 février 1663 (Charlevoix) revues à l'aide des mouvements de terrain. *Revue canadienne de géotechnique*. 48, 1266–1286; **Locat**, J. et al. 2012. Exploring the contrasting signatures of submarine landslides along the North Channel of the St. Lawrence Middle Estuary (Charlevoix), Québec, Canada. Dans: Eberhardt et al. (Éds.). Taylor & Francis Group, Londres. 1077–1083; **Monecke**, K. et al. 2004. The record of historic earthquakes in lake sediments of central Switzerland. *Tectonophysics*. 394, 21–40; **Nomade**, J. et al. 2005. Reconstructing historical seismicity from lake sediments (Lake Laffrey, western Alps, France). *Terra Nova*. 17, 350–357; **Pinet**, N. et al. 2015. Geomorphological characteristics and variability of Holocene mass-transport complexes, St. Lawrence River Estuary, Canada. *Geomorphology*. 228, 286–302; **Poncet**, R. et al. 2010. A Study of the tsunami effects of two Landslides in the St. Lawrence Estuary. Dans: Mosher D.C. et al. (Éds.) *Submarine Mass Movements and Their Consequences. Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Springer. 28, 755–764; **Schnellmann**, M. et al. 2005. Mass movement-induced fold-and-thrust belt structures in unconsolidated sediment in Lake Lucerne (Switzerland). *Sedimentology*. 52, 271–289; **Sims**, J.D. 1973. Earthquake-induced structures in sediments of Van Norman Lake, San Fernando, California. *Science*. 182, 161–163; **Sims**, J.D. 1975. Determining earthquake recurrence intervals from deformational structures in young lacustrine sediments. *Tectonophysics*. 29, 141–152; **St-Onge**, G. et al. 2003. Physical, magnetic, sedimentological, geochemical, isotopic and micropaleontological tracers of rapidly deposited layers in the Saguenay Fjord, Quebec: from 7200 cal BP to the 1996 AD flood. 2<sup>e</sup> symposium international sur les sédiments contaminés, Québec, *Comptes-rendus*. 103-108; **St-Onge**, G. et al. 2004. Earthquake and flood-induced turbidites in the Saguenay Fjord (Québec): a Holocene paleoseismicity record. *Quat. Sci. Rev.* 23, 283–294; **St-Onge**, G., et al. 2011. Marine geology of the St. Lawrence Estuary. *IOP Conference Series: Earth and Env. Sci.* 14, 012003. **St-Onge**, G. et al. 2012. Comparison of earthquake-triggered turbidites from the Saguenay (Eastern Canada) and Reloncavi (Chilean margin) Fjords: Implications for paleoseismicity and sedimentology. *Sed. Geol.* 243-244, 89–107; **Sultan**, N. et al., 2007. Analysis of slope failures in submarine canyon heads: An example from the Gulf of Lions. *Journal of Geophysical Research - Earth surface*. 112(112-F1). **Urgeles**, R. et al. 2002. The Saguenay Fjord, Quebec, Canada: integrating marine geotechnical and geophysical data for spatial seismic slope stability and hazard assessment. *Mar. Geol.* 185, 319–340.