

# ÉVOLUTION TEMPORELLE DES COUCHES SÉDIMENTAIRES ACCIDENTELLES (CRUES, SÉISMES, GLISSEMENTS DE TERRAIN) DANS LE FJORD DU SAGUENAY (QUÉBEC) D'APRÈS LES TENEURS EN $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ , $^{210}\text{Pb}$ ET $^{137}\text{Cs}$ DES SÉDIMENTS

J. SAVARD<sup>1</sup> et C. HILLAIRE-MARCEL

## Introduction

Les sédiments du fjord du Saguenay recèlent des couches mises en place rapidement au cours d'événements sédimentologiques exceptionnels induits par des séismes, glissements de terrain et crues. Ces couches semblent beaucoup plus fréquentes dans le Saguenay que dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (*e.g.*, Schafer *et al.*, 1980; Syvitski et Praeg, 1989). Smith et Schafer (1987) en ont abordé l'étude sur la base des profils d'activité du  $^{210}\text{Pb}$  et du  $^{137}\text{Cs}$  dans les sédiments de surface du Saguenay. Ils ont noté de faibles teneurs en  $^{210}\text{Pb}$  et  $^{137}\text{Cs}$  à la hauteur des couches accidentelles démontrant les fortes vitesses de sédimentation lors de leur mise en place. Cette approche a été reprise dans la présente étude en complétant toutefois les profils du  $^{210}\text{Pb}$  et du  $^{137}\text{Cs}$  par ceux du couple  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ . L'avantage d'ajouter le  $^{228}\text{Th}$  aux autres traceurs tient à la courte période radioactive du  $^{228}\text{Th}$  (environ 1,9 ans). Son déséquilibre éventuel, par rapport à son ascendant le  $^{232}\text{Th}$ , peut ainsi rendre compte de phénomènes couvrant une dizaine d'années (soit environ 5 périodes) avec une résolution optimale de l'ordre de l'année, donc supérieure à celle qu'autoriserait les autres éléments radioactifs analysés.

Un premier objectif de l'étude était de "visualiser", à partir des traceurs radioactifs retenus, les couches accidentelles mises en place récemment dans le fjord et, dans la mesure du possible, d'estimer des vitesses de sédimentation en régime sédimentaire normal. Ensuite, on visait à évaluer l'intensité du mélange par bioturbation, au sommet des couches accidentelles, lors de la restauration de l'activité benthique postérieurement à l'événement sédimentologique exceptionnel à l'origine de la couche en question. Le lissage relatif éventuel des profils de  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  et  $^{137}\text{Cs}$  pourrait en effet constituer un indice de l'intensité et de la durée du mélange par bioturbation.

Parmi les événements catastrophiques récents qui ont affecté la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, on peut rappeler le glissement de terrain de St-Jean-de-Vianney qui, en 1971, a affecté environ  $7,6 * 10^6 \text{ m}^3$  de sédiment, dont une partie a été entraînée vers le fjord (Schafer *et al.*, 1980). En 1988, la région a aussi été témoin d'un séisme de 6,5 sur l'échelle de Richter, qui semble avoir provoqué quelques glissements sous-aquatiques dans le fjord (Pelletier, 1993). Enfin, les pluies torrentielles de juillet 1996 ont induit une crue responsable de l'entraînement de plus de  $6 * 10^6 \text{ m}^3$  de sédiments par les tributaires du fjord (Pelletier, 1997). Une couche sédimentaire accidentelle de 20 à 50 cm d'épaisseur par endroit s'est ainsi mise en place en quelques jours dans la Baie-des-Ha!Ha! (Locat *et al.*, 1998). Ce sont ces événements récents qui ont particulièrement retenu notre attention.

## Objets et méthodes

---

<sup>1</sup> GEOTOP-UQAM, C.P. 8888, Succursale Centre-ville, Montréal (Québec) H3C 3P8  
e-mail : [m314214@er.uqam.ca](mailto:m314214@er.uqam.ca)

Deux carottes-boîtes ont été prélevées en 1997 lors d'une mission du Martha-Black. Elles proviennent respectivement du Bras Nord du fjord (Sag-5; Fig. 1; 48°25,40N; 70°51,57W; sous 228 m d'eau; longueur: 38 cm) et de l'embouchure de la Baie-des-Ha!Ha! (Sag-15; Fig. 1; 48°21,74N; 70°42,30W; sous 86 m d'eau; longueur: 52 cm). Les carottes ont été par la suite échantillonnées en continu et à pas de 5 mm pour les 15 premiers centimètres, et à pas centimétriques au-dessous. Les sédiments ont été séchés à 40°C, broyés et homogénéisés.

Les rapports d'activité  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  ont été déterminés par spectrométrie alpha. Le Th a été isolé et purifié par des attaques acides et des résines échangeuses d'ions (Lally, 1992), puis plaqué sur un disque d'acier par dépôt électrolytique. Rappelons que la série  $^{232}\text{Th}$ - $^{228}\text{Th}$  inclut un élément intermédiaire, le  $^{228}\text{Ra}$ , dont la période est de 5,75 ans. Advenant un déséquilibre entre celui-ci et son ascendant le  $^{232}\text{Th}$ , le retour à l'équilibre séculaire du couple  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  peut être différé jusqu'au rétablissement de l'équilibre  $^{228}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$ , soit sur un intervalle de temps pouvant atteindre 5 périodes du  $^{228}\text{Ra}$ , soit environ 30 ans (e.g., Ivanovich et Harmon, 1992).

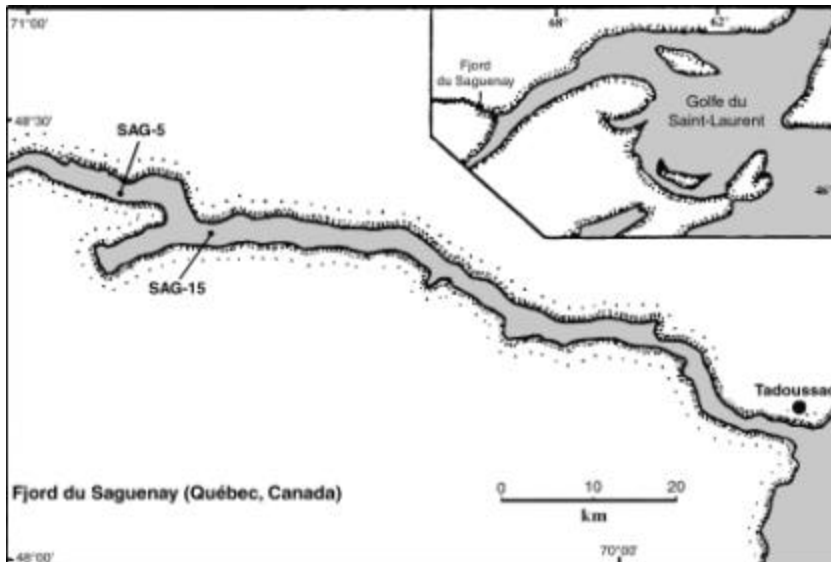


Figure 1: Localisation des stations SAG-5 et SAG-15 dans le fjord du Saguenay.

L'activité du  $^{210}\text{Pb}$  a été déterminée à partir de la mesure du  $^{210}\text{Po}$  descendant par spectrométrie alpha (e.g. Goldberg, 1963). Cependant, afin de s'assurer que ces deux isotopes soient en équilibre séculaire, les analyses n'ont été réalisées que quelques mois après l'échantillonnage, compte tenu de la période du  $^{210}\text{Po}$  (environ 138 jours; Weast et Astle, 1979). Le  $^{210}\text{Pb}$  est le descendant du  $^{222}\text{Rn}$  (gazeux), dans la chaîne de désintégration de  $^{238}\text{U}$ . Le  $^{210}\text{Pb}$  des sédiments peut ainsi provenir de la désintégration du  $^{226}\text{Ra}$  ascendant présent dans la fraction détritique du sédiment (" $^{210}\text{Pb}$  soutenu") ou être issu de la désintégration du  $^{222}\text{Rn}$  atmosphérique. Cette dernière fraction (" $^{210}\text{Pb}$  en excès") est adsorbée par les précipitations sèches et humides de l'atmosphère, puis recueillie dans le bassin de drainage.

L'analyse du  $^{137}\text{Cs}$  a été effectuée par spectrométrie gamma sur des échantillons bruts, broyés et déshydratés. Le  $^{137}\text{Cs}$  a été produit par les essais thermonucléaires en atmosphère réalisés principalement entre 1950 et 1970 avec un maximum en 1963. Son cycle, à l'intérieur des bassins

de drainage, suit à quelques détails près celui du  $^{210}\text{Pb}$  d'origine atmosphérique (e.g., Smith et Schafer, 1987).

## Résultats et discussion

### Station Sag-15

Dans cette station, le profil d'activité  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  (fig. 2) diffère peu du profil observé couramment dans les sédiments de surface des milieux marins et de transition (e.g., Huh *et al.*, 1987). Un excès de  $^{228}\text{Th}$  s'observe en surface (0-1 cm); il est hérité de l'excès de  $^{228}\text{Th}$  dans la matière particulaire en suspension (MPS) de la colonne d'eau; celle-ci adsorbe en effet, au cours de son transit, du  $^{228}\text{Th}$  produit par la désintégration du  $^{228}\text{Ra}$  dissous. On note au contraire, plus bas dans le profil (entre 14 et 22 cm de profondeur), un défaut en  $^{228}\text{Th}$ , par rapport au  $^{232}\text{Th}$ .

Celui-ci est dû au fait que la MPS perd du  $^{228}\text{Ra}$  intermédiaire, au cours de son transit, par désorption du radium dans l'eau (e.g., Deschamps, 1997). On remarque enfin un retour à l'équilibre séculaire  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  vers 30 cm de profondeur.

Se superposant à cette tendance générale du profil  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ , quelques anomalies peuvent être notées. Entre 1 et 7 cm de la surface, on constate un retour à l'équilibre entre les deux isotopes, indiquant l'apport brusque de sédiment (puisque aucun déséquilibre ne s'est instauré); la couche correspondante est attribuée à la crue de 1996. Entre 9 et 14 cm, on remarque une oscillation du profil  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  que l'on associe au glissement sous-aquatique provoqué par le séisme de 1988, en s'appuyant également sur la distribution des autres traceurs. On note finalement une anomalie comparable vers 25 cm de profondeur qui correspondrait au glissement de terrain de Saint-Jean-de-Vianney en 1971. Les profils de  $^{210}\text{Pb}$  et de  $^{137}\text{Cs}$  (Fig. 2) soulignent ces variations sédimentologiques par de moindres excès en  $^{210}\text{Pb}$  et de faibles activités en  $^{137}\text{Cs}$ , à la hauteur de chacune des couches précitées.

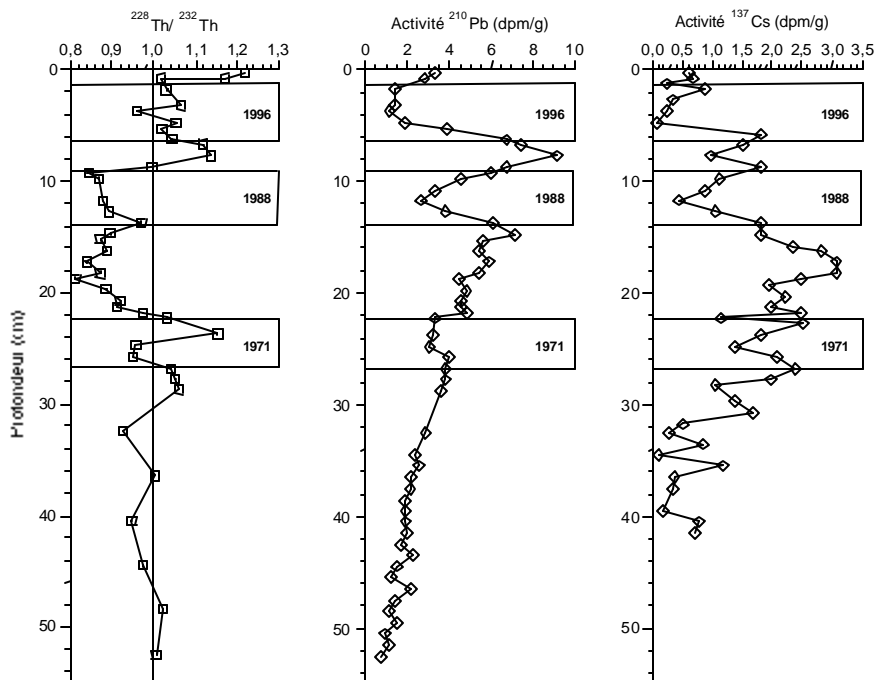


Figure 2: Profils d'activité des radio-isotopes analysés à la station SAG-15

### Station Sag-5

La surface de cette carotte ne présente aucun excès en  $^{228}\text{Th}$  (Fig. 3), contrairement à ce qui s'observe quasi-systématiquement dans les sédiments du Saguenay ou de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent (Zhang, 1999). La perte d'une partie du sédiment de surface, lors du carottage-boîte, pourrait en être responsable. Un défaut important en  $^{228}\text{Th}$  s'observe néanmoins entre 16 et 33 cm; il est interprété, ici encore, comme un effet du défaut en  $^{228}\text{Ra}$  de la MPS, au moment de sa sédimentation. L'équilibre séculaire  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  semble finalement atteint vers la base de la carotte-boîte, au-delà de 30 cm de profondeur. Des anomalies ont également été notées à cette station. On peut constater, sur le profil  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ , un moindre défaut en  $^{228}\text{Th}$  entre 2 et 16 cm de profondeur, qu'au-delà; il marque, selon nous, la couche de crue de juillet 1996. Le profil du  $^{210}\text{Pb}$  souligne également cette couche accidentelle (Fig. 3). Au-delà de 16 cm de profondeur, environ, le profil d'activité du  $^{210}\text{Pb}$  indique une décroissance régulière qui autorise le calcul d'une vitesse de sédimentation de l'ordre de 0,83cm/an (en supposant un flux initial constant). La

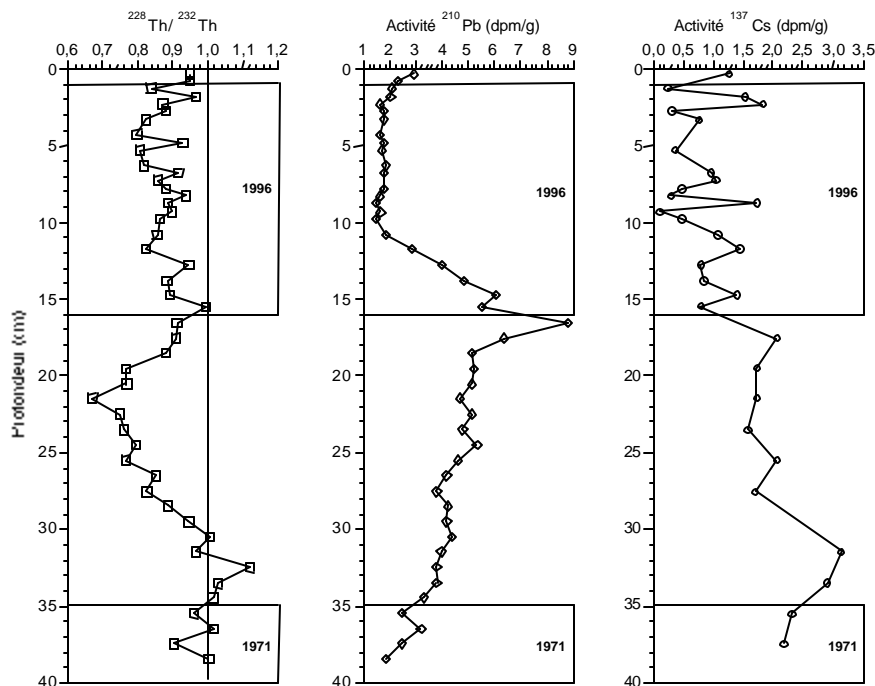


Figure 3: Profils d'activité des radio-isotopes analysés à la station SAG-5

couche mise en place lors du glissement de terrain de 1971 devrait ainsi se situer à la base de la carotte. Le profil du  $^{137}\text{Cs}$  semble en effet indiquer une moindre activité à la hauteur de cette couche, comparativement à la partie sus-jacente, alors que l'on attendrait, en état stationnaire, des teneurs croissantes en  $^{137}\text{Cs}$ , jusqu'à la hauteur des sédiments des années 60.

### Conclusion

En combinant différents isotopes de courte période, tels le  $^{228}\text{Th}$ , le  $^{228}\text{Ra}$  (indirectement), et le  $^{210}\text{Pb}$ , on peut ainsi examiner des anomalies sédimentologiques aux échelles de temps de l'année à environ 100 ans avec une bonne résolution chronologique. Ces isotopes naturels ainsi que le  $^{137}\text{Cs}$  anthropogénique sont d'excellents traceurs des événements sédimentologiques exceptionnels liés aux crues, glissements de terrains et séismes. Dans la poursuite de l'étude, ils

nous permettront d'établir l'efficacité du mélange mécanique des sédiments par les organismes benthiques en examinant avec plus d'attention les gradients de redistribution de ces isotopes à la hauteur des transitions entre les couches accidentelles et le sédiment régulier. Cette étude complémentaire sera réalisée en comparant les résultats ci-dessus, à de nouvelles données, obtenues à partir d'analyses de carottes échantillonnées en 1998, soit deux ans après la crue, éventuellement, en 1999. L'étude sera également étendue à d'autres stations du fjord du Saguenay.

### Remerciements

On remercie le chef de mission, le Pr. Jacques Locat (Univ. Laval, Québec), ainsi que les officiers et membres d'équipage du Martha-Black pour leur concours lors des échantillonnages. En laboratoire, l'aide des Drs. Bassam Ghaleb et Michel Courcelles (GEOTOP-UQAM) a été essentielle. L'étude a été financée par le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG), via une subvention stratégique (Locat *et al.*), et par le Fonds FCAR du Québec, via une subvention d'équipe (Hillaire-Marcel *et al.*) et une bourse d'études avancées (J.S.).

### Références

- Deschamps, P., 1997. Modélisation des profils  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  dans les sédiments estuariens et marins: application au système du Saint-Laurent. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, 80 p.
- Drainville, G., 1968. Le fjord du Saguenay: contribution à l'océanographie. *Le Naturaliste Canadien*, 95: 809-847.
- Goldberg, E.D., 1963. Geochronology with Pb-210, p. 121-131. *In* international Atomic Energy Agency, édit., *Radioactive Dating*. Éd. Internationale Atomic Energy Agency, Vienne, 440 p.
- Weast, R.C. et Astle, M.J., 1979. *Handbook of chemistry and physics*. Cinquante-neuvième édition, CRC Press, Floride.
- Huh, C.A., Zahnle, D.L., Small, L.F. et Noshkin, V.E., 1987. Budgets and behaviors of uranium and thorium series isotopes in Santa Monica Basin sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51: 1743-1754.
- Ivanovich, M. et Harmon, R., 1992. *Uranium-series disequilibrium: applications to the earth, marine and environmental sciences*. Deuxième édition, Clarendon Press, Oxford, 910 p.
- Lally, A.E., 1992. Chemical procedures, p. 95-126. *In* M. Ivanovich et R. Harmon, édit., *Uranium-series disequilibrium; applications to earth, marine, and environmental sciences*. Deuxième édition, Clarendon Press, Oxford, 910 p.
- Locat, J., Desrosiers, G., de Vernal, A., Gagné, J.P., Galvez-Cloutier, R., Gratton, Y., Hill, P., Hillaire-Marcel, C., Long, B., Mucci, A., Pelletier, É., Simpkin, P., Therrien, R., (1998). Performance de la couche de sédiments du déluge de 1996 recouvrant les sédiments contaminés du fjord du Saguenay: une occasion de développement technologique. *Congrès annuel conjoint AGC/AMC, Recueil des résumés*, 23: 111.
- Pelletier, É., 1997. Compte-rendu du mini-colloque sur le fjord du Saguenay post-déluge. Groupe de recherche en environnement côtier, rapport interne, INRS-Océanologie, Rimouski, 11p.
- Pelletier, M., 1993. Les glissements sous-marins du bras nord du fjord du Saguenay: Aspects géomorphologiques et géotechniques. Mémoire de maîtrise, Université Laval, 123 p.
- Schafer, C.T., Smith, J.N. et Loring, D.H., 1980. Recent sedimentation events at the head of Saguenay Fjord, Canada. *Environmental Geology*, 3: 139-150.

- Schafer, C.T., Smith, J.N. et Côté, R., 1990. Evidence of the occurrence and magnitude of terrestrial landslides in recent Saguenay fjord sediments, p.137-145. *In* M.I. El-Sabh et N. Silverberg, édit., *Oceanography of a large scale estuarine system: The St-Lawrence*. Éd. Springer, Berlin, 434 p.
- Smith, J.N. et Ellis, K.M., 1982. Transport mechanism for Pb-210, Cs-137 and Pu fallout radionuclides through fluvial-marine systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46: 941-954.
- Smith, J.N. et Schafer, C.T., 1987. A 20th-Century record of climatologically modulated sediment accumulation rates in a Canadian fjord. *Quaternary Research*, 27: 232-247.
- Syvitski, J.P.M. et Praeg, D.B., 1989. Quaternary sedimentation in the St. Lawrence Estuary and adjoining areas, Eastern Canada; an overview based on high-resolution seismo-stratigraphy. *Géographie Physique et Quaternaire*, 43: 291-310.
- Zhang, D., 1999. Le flux de radio-isotopes à courte période dans les bassins marins marginaux de l'est canadien (en cours). Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal.