

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉVOLUTION TEMPORELLE DES COUCHES ACCIDENTELLES  
(CRUES, SÉISMES, GLISSEMENTS DE TERRAIN) RÉCENTES  
DU FJORD DU SAGUENAY D'APRÈS DES PROFILS DE RADIO-ISOTOPES  
DE COURTE PÉRIODE ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ )

MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

PAR  
JOSÉE SAVARD

AOÛT 2000

## REMERCIEMENTS

Je remercie mon directeur M. Claude Hillaire-Marcel pour son support et sa patience qui a parfois été mise à rude épreuve. Je lui en suis grandement reconnaissante. Je tiens également à remercier Mme Anne de Vernal qui, même si le sujet débordait de son champs d'expertise et malgré ses occupations a pris le temps de lire mon mémoire.

Je tiens également à remercier Bassam Ghaleb qui, en plus de m'avoir communiqué ou transmis ses connaissances, m'a aidé, soutenu et encouragé au cours de cette maîtrise. Je remercie également Michel Courcelles, Sylvain Vallières, Louise Cournoyer, Maryse Henry et Guy Bilodeau pour leur aide, leurs petits trucs et les réponses qu'ils m'ont données aux milles et une petites questions que je leur ai posées.

Je remercie également tous mes amis, particulièrement Virginie Loucheur et Martine Lapointe qui m'ont encouragé et remonté le moral lors des moments les plus pénibles, jusqu'au dernier moment, ainsi que tous les autres, André Poirier, Jean-François Hélie, Guillaume Saint-Onge, Julie Leduc, Isabelle Jacob, Céline Hallé-Polèse.

J'aimerais exprimer toute ma gratitude tout particulièrement à ma famille et à ma belle-famille qui ne m'ont jamais laissé tomber et toujours encouragé à aller au bout de mes rêves, de mes désirs, de moi-même. Merci à mon ami et conjoint Éloi qui m'a aidé à surmonter des périodes qui me paraissaient insurmontables et qui a toujours trouvé le moyen de me faire rire même dans les moments pénibles.

Enfin, je tiens également à remercier le Fonds pour la Formation de Chercheurs à l'Aide à la Recherche (Fonds FCAR) pour m'avoir soutenu financièrement au cours de ces études ainsi qu'au Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada qui a subventionné le projet : Performance de la couche de sédiments du déluge de 1996 recouvrant les sédiments contaminés du fjord du Saguenay: une occasion de développement technologique.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS . . . . .	ii
LISTE DES FIGURES . . . . .	v
LISTE DES TABLEAUX . . . . .	vi
RÉSUMÉ . . . . .	vii
INTRODUCTION . . . . .	1
CHAPITRE I	
ÉTAT DE LA QUESTION . . . . .	5
1.1 Contexte physiographique et hydrographique du fjord du Saguenay . . . . .	5
1.2 Contexte sédimentaire du fjord du Saguenay . . . . .	6
1.3 Les radio-isotopes de courte période dans les sédiments de milieux de transition . . . . .	7
1.3.1 Le $^{210}\text{Pb}$ . . . . .	7
1.3.2 Le $^{137}\text{Cs}$ . . . . .	10
1.3.3 Le $^{228}\text{Th}$ . . . . .	11
1.3.4 Le rapport $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ . . . . .	12
CHAPITRE II	
TECHNIQUES D'ÉCHANTILLONNAGE ET D'ANALYSES . . . . .	13
2.1 Échantillonnage . . . . .	13
2.2 Mesures des propriétés physiques . . . . .	14
2.3 Analyses isotopiques et géochimiques . . . . .	15
2.4 Analyse des teneurs en $^{210}\text{Pb}$ et en $^{137}\text{Cs}$ . . . . .	16
2.5 Analyse des rapports d'activité des isotopes du thorium ( $^{228}\text{Th}$ , $^{230}\text{Th}$ et $^{232}\text{Th}$ ) . . . . .	17
CHAPITRE III	
RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS DES PROFILS DE PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET DU CONTENU GÉOCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE . . . . .	18
3.1 Station SAG-5 . . . . .	18
3.1.1 Propriétés physiques du sédiment . . . . .	18
3.1.2 Composition géochimique et isotopique . . . . .	19
3.1.3 Profils radio-isotopiques . . . . .	22
3.2 Station SAG-15 . . . . .	24
3.2.1 Propriétés physiques du sédiment . . . . .	24
3.2.2 Contenu géochimique et isotopique . . . . .	26
3.2.3 Profils radio-isotopiques . . . . .	26

3.3	Station Baie-des-Ha! Ha! . . . . .	29
3.3.1	Propriétés physiques du sédiment. . . . .	29
3.3.2	Contenu géochimique et isotopique. . . . .	31
3.1.2	Profils radio-isotopiques. . . . .	33
CHAPITRE IV		
DISCUSSION. . . . .		
4.1	Identification des accidents sédimentaires enregistrés dans les carottes du fjord du Saguenay. . . . .	35
4.2	Les profils de $^{210}\text{Pb}$ et estimation des flux sédimentaires. . . . .	38
4.3	Le rapport d'activité $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ . . . . .	39
4.4	Le $^{137}\text{Cs}$ . . . . .	41
4.5	Source sédimentaire des couches accidentelles ( $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ ). . . . .	43
4.6	Évaluation des vitesses de sédimentation. . . . .	45
4.6.1	Le modèle "de pente". . . . .	45
4.6.2	Le modèle CIC. . . . .	46
4.6.3	Le modèle CRS. . . . .	48
4.6.4	Comparaison entre les vitesses de sédimentation calculées . . . . .	50
4.7	Effet des biotubations sur les limites des couches accidentelles. . . . .	50
CONCLUSIONS. . . . .		
RÉFÉRENCES. . . . .		
APPENDICE A		
TABLEAUX DES RÉSULTATS. . . . .		
A.1	Données des propriétés physiques. . . . .	61
	Station SAG-5. . . . .	61
	Station SAG-15. . . . .	62
	Station Baie-des-Ha! Ha!. . . . .	64
A.2	Données géochimiques du carbone. . . . .	66
	Station SAG-5. . . . .	66
	Station SAG-15. . . . .	68
	Station Baie-des-Ha! Ha!. . . . .	70
A.3	Données géochimiques des radio-isotopes étudiées. . . . .	71
	Station SAG-5. . . . .	71
	Station SAG-15. . . . .	73
	Station Baie-des-Ha! Ha!. . . . .	76
MANIPULATIONS GÉOCHIMIQUES DU THORIUM, DU PLOMB ET DU CÉSIUM. . . . .		
B.1	Manipulations du thorium. . . . .	78
B.2	Manipulations du plomb. . . . .	83
B.3	Spectrométrie $\alpha$ et acquisition de données. . . . .	86
B.4	Manipulations du césium. . . . .	87
B.5	Références. . . . .	89

## LISTES DES FIGURES

Figure	Page
i.1 Localisation des stations étudiées dans le fjord du Saguenay .....	2
1.1 Cheminement du $^{210}\text{Pb}$ dans les écosystèmes aquatiques .....	8
1.2 Série radioactive du $^{238}\text{U}$ .....	9
3.1 Description lithologique sommaire, la densité, la vitesse de propagation des ondes P, la susceptibilité magnétique dans la carotte SAG-5 .....	20
3.2 Contenu en $\text{C}_{\text{org}}$ , rapport $\text{C}_{\text{org}}/\text{N}$ , $\delta^{13}\text{C}$ de la matière organique et contenu en $\text{CaCO}_3$ ( $\text{C}_{\text{inorg}}$ ) à la station SAG-5 .....	21
3.3 Profils des radio-isotopes dans le sédiment de la station SAG-5 .....	23
3.4 Description lithologique sommaire, la densité, la vitesse de propagation des ondes P, la susceptibilité magnétique dans la carotte SAG-15 .....	25
3.5 Contenu en $\text{C}_{\text{org}}$ , rapport $\text{C}_{\text{org}}/\text{N}$ , $\delta^{13}\text{C}$ de la matière organique et contenu en $\text{CaCO}_3$ ( $\text{C}_{\text{inorg}}$ ) à la station SAG-15 .....	27
3.6 Profils des radio-isotopes dans le sédiment de la station SAG-15 .....	28
3.7 Description lithologique sommaire, la densité, la vitesse de propagation des ondes P, la susceptibilité magnétique dans la carotte Baie-des-Ha! Ha! .....	30
3.8 Contenu en $\text{C}_{\text{org}}$ , rapport $\text{C}_{\text{org}}/\text{N}$ , $\delta^{13}\text{C}$ de la matière organique et contenu en $\text{CaCO}_3$ ( $\text{C}_{\text{inorg}}$ ) à la station Baie-des-Ha! Ha! .....	32
3.9 Profils des radio-isotopes dans le sédiment de la station Baie-des-Ha! Ha! .....	34
4.1 Profils des teneurs en $^{210}\text{Pb}$ et les couches accidentelles retracées aux stations SAG-5, SAG-15 et Baie-des-Ha! Ha! .....	37
4.2 Profils des rapports d'activité $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ et de la porosité .....	40
4.3 Profils des activités en $^{137}\text{Cs}$ et en $^{210}\text{Pb}$ .....	42
4.4 Profils de $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ et du pourcentage de $\text{C}_{\text{inorg}}$ .....	44
4.5 Diagrammes illustrant les activités de $^{210}\text{Pb}$ utilisées pour le calcul des vitesses de sédimentation avec et sans les couches accidentelles .....	47

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
2.1	Localisation des stations étudiées .....	13
4.1	Flux sédimentaires (en dpm/cm <sup>3</sup> /an) de <sup>210</sup> Pb dans le sédiment du fjord du Saguenay .....	39
4.2	Vitesse de sédimentation (cm/an) pour chaque station et selon le modèle utilisé .....	49

## RÉSUMÉ

La présente étude concerne la sédimentation récente dans le fjord du Saguenay. Elle s'appuie sur les propriétés physiques du sédiment et différents traceurs géochimiques ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{C}_{\text{org}}/\text{N}$ ,  $\text{C}_{\text{org}}$ ) et radio-isotopiques ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ ) pour retracer les couches accidentelles, telle celle mise en place lors de la crue exceptionnelle de 1996 et évaluer les vitesses de sédimentation. Une attention particulière est également portée à l'intensité relative du mélange mécanique des sédiments par bioturbation.

Trois carottes-boîte prélevées en 1997 ont été analysées. Elles proviennent respectivement du bras Nord (station SAG-5), de la Baie-des-Ha! Ha! (station Baie-des-Ha! Ha!) et de la confluence de ces deux bassins (station SAG-15). Dans ces carottes, trois couches accidentelles ont été identifiées. Parmi celles-ci, la couche de crue de 1996 est présente aux trois stations étudiées. Une couche détritique associée au séisme de 1988 est retracée aux stations SAG-15 et Baie-des-Ha! Ha!. Enfin, la couche mise en place lors du glissement de terrain de Saint-Jean-Vianney, en 1971, a également été recouverte à la station SAG-15.

Le sédiment englobant et les couches accidentelles sont issus de sources détritiques homogènes. Celles-ci sont principalement silicatées et se caractérisent par des rapports d'activité  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th} < 1$ , peu variables. La couche de crue de 1996 se singularise cependant par des teneurs en carbonates légèrement plus élevées que l'on attribue à un remaniement des matériaux de la mer de Laflamme.

Les vitesses de sédimentation moyennes que l'on a pu établir, sur la base des profils de  $^{210}\text{Pb}$  et  $^{137}\text{Cs}$ , varient selon les modèles et l'épaisseur des couches accidentelles. Elles s'établissent, dans l'ensemble, à quelques millimètres par an et diffèrent peu de celles établies, à partir de carottages antérieurs aux événements sédimentologiques des années 1980 et 1990, par d'autres auteurs.

Les profils  $^{210}\text{Pb}$  et  $^{137}\text{Cs}$  aux stations SAG-15 et Baie-des-Ha! Ha! présentent de fortes analogies démontrant que la distribution de ces radio-isotopes est surtout commandée par des accidents sédimentologiques et la bioturbation. À SAG-5, le  $^{210}\text{Pb}$  et le  $^{137}\text{Cs}$ , sous la couche de crue, sont distribués selon des profils distincts plus proche des distributions attendues dans les milieux sédimentaires moins perturbés.

L'étalement des gradients de  $^{210}\text{Pb}$  à la base de la couche de crue de 1996, aux stations SAG-5 et SAG-15, semble rendre compte d'un mélange avec le sédiment sous-jacent. Ce mélange aurait affecté environ 50% de la couche de crue de 1996 à SAG-15, environ 40% à SAG-5 et moins de 10% à la Baie-des-Ha! Ha!. Il paraît d'autant plus important, que la limite de la couche accidentelle est peu profonde (respectivement  $\sim 6$  cm,  $\sim 13$  cm et  $\sim 27$  cm). Ceci laisse croire que le mélange mécanique par bioturbation est relativement efficace et que les sédiments contaminés sous-jacents pourraient, à long terme, être redistribués partiellement vers la surface. La fréquence et la puissance des couches accidentelles devraient cependant restreindre une telle remobilisation, en particulier aux stations Baie-des-Ha! Ha! et SAG-5.

**Mots clé :** Saguenay,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ , crues, séismes, glissements de terrain, bioturbation.

## INTRODUCTION

Les radio-isotopes de courte période ont abondamment été utilisés à des fins géochronologiques et pour déterminer les vitesses de sédimentation récentes dans les milieux lacustres ou marins. Depuis quelques années, des applications sédimentologiques se sont diversifiées. Ainsi, le  $^{210}\text{Pb}$  et le  $^{137}\text{Cs}$  sont souvent analysés afin d'évaluer le mélange mécanique des sédiments par bioturbation (*e.g.*, Smith et Walton, 1980; Silverberg *et al.*, 1986). Il a par ailleurs été noté que les profils sédimentaires du  $^{210}\text{Pb}$  et du  $^{137}\text{Cs}$  pouvaient être modifiés par des apports brusques de sédiment, par exemple lors de glissements de terrain, de séismes ou de crues (Robbins *et al.*, 1978; Schafer *et al.*, 1980; Smith et Walton, 1980; Smith et Ellis, 1982; Smith et Schafer, 1987). En particulier, des études réalisées dans des carottes sédimentaires du fjord du Saguenay ont permis d'identifier différents horizons reliés à des événements détritiques (Smith et Walton, 1980; Smith et Ellis, 1982). Parmi ces horizons, une couche de plusieurs mètres d'épaisseur a pu être associée au séisme de 1663 (*e.g.*, Schafer et Smith, 1987; Perret *et al.*, 1995; Syvitski et Schafer, 1996) dont l'intensité a atteint X sur l'échelle de Mercalli (Doig, 1986). Les autres couches sédimentaires, identifiées dans des carottes de forage à partir d'anomalies dans les profils de  $^{210}\text{Pb}$ , sont associées aux glissements de terrain de Kénogami en 1924 et de Saint-Jean-Vianney en 1971 ainsi qu'aux crues importantes du 20<sup>e</sup> siècle (Schafer *et al.*, 1980; Smith et Walton, 1980; Smith et Ellis, 1982; Smith et Schafer, 1987). Nous avons abordé, dans le cadre de ce mémoire, une étude radio-isotopique de la couche de la crue de juillet 1996 à la suite de laquelle plus de  $6 \times 10^6 \text{ m}^3$  de sédiment fut entraîné dans la Baie-des-Ha! Ha! (*cf.* Locat *et al.*, 1998). Il s'agit d'une couche faisant l'objet d'un suivi et d'études diverses dans le cadre d'un projet stratégique financé par le CRSNG (Locat *et al.*, 1998). Ce projet vise notamment à modéliser l'évolution de la couche de crue et son comportement géotechnique en tant que scellant éventuel des sédiments sous-jacents qui sont fortement contaminés par l'activité industrielle régionale (Pocklington et Leonard, 1979).

Le présent mémoire discute d'un aspect particulier du projet concernant la couche de crue de 1996. Il vise à déterminer, sur la base de la redistribution des isotopes radiogéniques de courte période, l'efficacité du mélange benthique entre une couche accidentelle et le sédiment englobant. À cette fin, on recourra non seulement au  $^{210}\text{Pb}$  et au  $^{137}\text{Cs}$ , dont les périodes sont respectivement de ~22 ans et de ~30 ans (*In* Ivanovich et Harmon, 1992), mais également au



$^{228}\text{Th}$  qui se singularise par une plus courte période ( $T \cong 1,9$  ans; *In Ivanovich et Harmon, 1992*). La distribution des isotopes de courte période est en effet déterminée par un ensemble de paramètres dont:

- (i) le flux d'entrée;
- (ii) la vitesse de sédimentation;
- (iii) le mélange mécanique et la diffusion moléculaire.

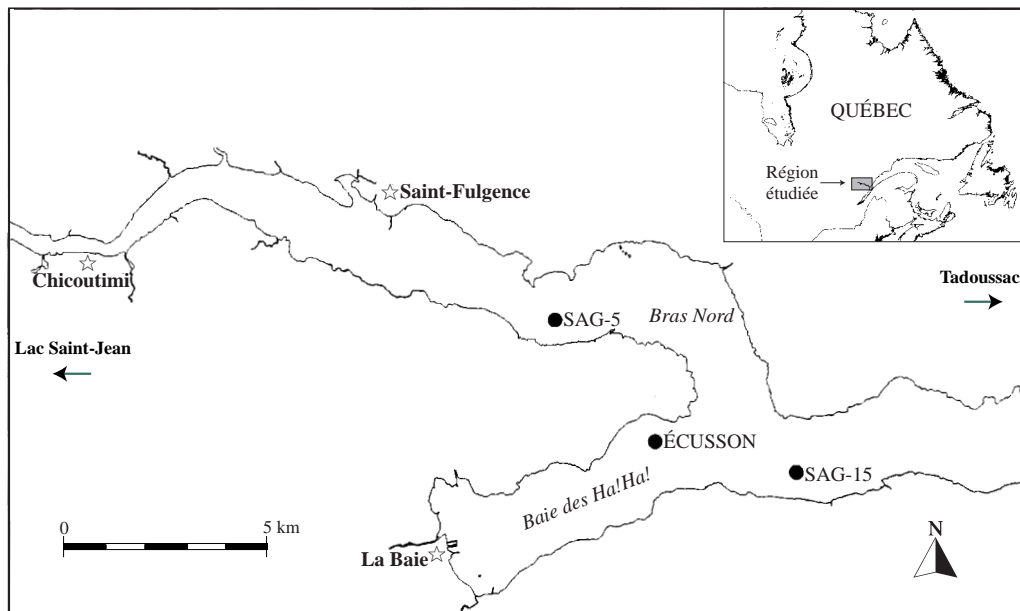
La plupart de ces isotopes sont des métaux à faible solubilité (soit avec des coefficients de partage entre les phases solides et dissoutes très élevés). Par suite, on les considère généralement chimiquement immobiles lorsque les vitesses de sédimentation dépassent une valeur critique de 1 mm/an (*Comans et al., 1989*).

Il reste donc trois paramètres déterminants. Certains modèles utilisés couramment considèrent constants l'un de ces paramètres (*e.g.*, le flux ou les vitesses de sédimentation) mais il reste que l'approche la plus satisfaisante consiste à coupler plusieurs de ces radio-isotopes. La comparaison de leur distribution permet alors de valider ou d'invalider les hypothèses posées pour résoudre un système à trois inconnues. En outre, il a été démontré que le mélange mécanique est une variable qui dépend de l'échelle de temps considérée (*cf. Boudreau, 1986*). Ainsi, en combinant plusieurs isotopes dont les périodes radioactives et les temps de séjour différents dans le sédiment, on est en mesure de mieux cerner les changements temporels du mélange mécanique.

Sur ces bases, les objectifs spécifiques de cette étude sont :

- (1) d'établir des profils comparables pour chacun de ces trois radio-isotopes à partir d'analyses de fractions aliquotes de sédiments carottés;
- (2) de préciser les vitesses de sédimentation "normales" excluant les crues, les séismes et les glissements de terrain afin de calculer par la suite des flux sédimentaires;
- (3) de déterminer l'efficacité du mélange mécanique par bioturbation aux interfaces entre les couches accidentelles et le sédiment mis en place de façon plus continue.

Ce troisième objectif est très important pour évaluer les effets à long terme du lissage des couches accidentelles, notamment dans la perspective d'établir des séries chronologiques de plusieurs milliers d'années qui sont destinées à évaluer la fréquence, à moyen terme, de perturbations naturelles.



**Figure i.1** Localisation des stations étudiées dans le fjord du Saguenay

Dans ce contexte, trois stations du fjord du Saguenay ont été sélectionnées (fig. i.1) en fonction de leur localisation et des vitesses de sédimentation proposées par les études antécédentes (*e.g.*, Smith et Walton, 1980; Barbeau *et al.*, 1981). La première station, SAG-5, est localisée dans le bras Nord. Selon Barbeau *et al.* (1981), les vitesses de sédimentation près de cette station seraient de l'ordre de 0,9 à 1 cm/an. La seconde station est située dans la Baie-des-Ha! Ha! où les apports détritiques de la crue de juillet 1996 furent extrêmement importants; la couche de crue y atteint de 10 à 50 cm par endroit (Locat *et al.*, 1998). Les vitesses de sédimentation à cette station seraient de l'ordre de 0,15 cm/an (Barbeau *et al.*, 1981). Enfin, la dernière station, SAG-15, est localisée à la confluence de la Baie-des-Ha! Ha! et du bras Nord, dans le fjord du Saguenay. Les vitesses de sédimentation y seraient du même ordre de grandeur que celles mesurées dans la Baie-des-Ha! Ha! (Barbeau *et al.*, 1981).

À chaque station, des carottes-boîte, ont été prélevées en août 1997, soit treize mois après la crue éclair. Elles ont fait l'objet d'une description visuelle ainsi que de mesures physiques, géochimiques ( $C_{org}$ ,  $C_{org}/N$  et  $CaCO_3$ ) et isotopiques ( $\delta^{13}C$ ) afin de définir une stratigraphie et d'identifier les couches mises en place lors d'événements brusques, telle la crue de 1996. Les analyses qui ont été faites selon une maille serrée d'échantillonnage permettent ensuite d'apporter des informations complémentaires sur le comportement des radio-isotopes, d'identifier plus précisément les couches accidentelles et de déterminer l'épaisseur du mélange mécanique dans le sédiment.

Dans le présent mémoire, un premier chapitre nous permettra de présenter le contexte physiographique, hydrographique et sédimentaire du fjord du Saguenay ainsi que les bases conceptuelles des approches radio-isotopiques que nous privilégions. Ensuite, une section sera consacrée aux stations d'échantillonnage choisies et aux différentes techniques employées au cours de cette étude, soit les mesures des propriétés physiques du sédiment, les analyses isotopiques et géochimiques ainsi que celles permettant de mesurer les radio-isotopes de courte période. Dans le troisième chapitre, les propriétés physiques et le contenu géochimique et isotopique des sédiments seront discutés. Enfin, le dernier chapitre consistera en une discussion des résultats des radio-isotopes.

## CHAPITRE I

### ÉTAT DE LA QUESTION

#### 1.1 Contexte physiographique et hydrographique du fjord du Saguenay

Le fjord du Saguenay est une étroite vallée submergée, longue de 90 km, qui s'étend de Saint-Fulgence, en amont, à Tadoussac, en aval (*cf.* fig. i.1). Le fjord se compose de trois bassins principaux. Le plus profond, en amont, atteint une profondeur maximale de 275 m. Les seuils séparant les bassins et le fjord lui-même de l'estuaire du Saint-Laurent sont peu profonds; celui de l'embouchure, près de Tadoussac, atteint ainsi 20 m (Schafer *et al.*, 1990). En amont, le fjord présente un embranchement : au sud-ouest, la Baie-des-Ha! Ha!, au nord-ouest, le bras Nord (fig. i.1).

Le fjord est encaissé dans les roches précambriennes du bouclier canadien. Elles incluent principalement des gneiss, des anorthosites et des granites (Lasalle et Tremblay, 1978). Des roches sédimentaires carbonatées du Paléozoïque sont également présentes à quelques endroits dans la région (Lasalle et Tremblay, 1978). Le modelé du fjord est attribuable à l'érosion des glaciers quaternaires. Au cours de la dernière déglaciation, la mer de Laflamme a envahi le fjord et, plus en amont, la région du Lac Saint-Jean. Des argiles légèrement carbonatées sont associées à la sédimentation marine de cet épisode. Ces argiles ont la réputation d'être "sensibles" (ou argile à Leda; *cf.* Crawford, 1961; Ladanyi et Eden, 1969), comme le démontre le nombre important de glissements de terrain (Chagnon, 1968; Larochelle *et al.*, 1970).

Le régime de circulation des masses d'eau du fjord est de type estuarien (Drainville, 1968, Schafer *et al.*, 1990). On y observe deux masses d'eau. En surface (0-10 m), une masse d'eau faiblement salée issue d'un mélange avec les eaux douces de la rivière Saguenay présente un gradient de 0 à 10 unités de salinité (u. s.) en amont du fjord jusqu'à 29 u. s., à son embouchure.

La température de la masse d'eau de surface peut atteindre 16 °C en été. La partie plus profonde du fjord est occupée par une seconde masse d'eau, plus dense, qui présente une salinité moyenne de 30,5 u. s., et une température de 0,5 à 2 °C. Les deux masses d'eau sont renouvelées grâce à l'influence d'une marée semi-diurne. Le flux s'accompagne en effet de la remontée d'eaux froides provenant du chenal Laurentien et de l'estuaire du Saint-Laurent, situés au-delà du seuil de Tadoussac (*cf.* Seibert *et al.*, 1979; Therriault *et al.*, 1984). La thermohalocline à l'interface des deux masses d'eau s'étend entre 10 et 25 m de profondeur.

## 1.2 Contexte sédimentaire du fjord du Saguenay

Les sédiments ont une granulométrie très variable. À l'embouchure de la rivière Saguenay, dans le bras Nord, le sédiment d'origine fluviale est sableux, alors qu'il est silto-argileux vers l'aval dans les bassins du fjord (Perret *et al.*, 1995). Les sédiments renferment un fort pourcentage de matière organique qui comprend des fibres de bois provenant des industries riveraines de pâtes et papiers (Pocklington et Leonard, 1979). Selon Schafer *et al.* (1990), les processus sédimentaires incluent une sédimentation fluvio-deltaïque, une sédimentation hypopycnale et des mouvements de masse. Smith et Walton (1980) ont démontré que l'effet combiné des processus fluvio-deltaïque et hypopycnal correspond à une décroissance exponentielle des vitesses de sédimentation à mesure que l'on s'éloigne de l'embouchure de la rivière Saguenay. En effet, la vitesse de sédimentation atteint 7 cm/an, près de Saint-Fulgence, où la sédimentation fluviale sableuse domine, tandis qu'elle est de l'ordre de 0,1 cm/an, dans le bassin profond du fjord (Smith et Walton, 1980), où la sédimentation hypopycnale fine domine (Schafer *et al.*, 1990). La sédimentation s'y effectue par la décantation des particules en suspension dans la colonne d'eau sous l'effet de leur combinaison avec d'autres particules par floculation, agglomération ou pelletisation (Syvitski *et al.*, 1987).

Les mouvements de masse (glissements de terrain et glissements sous-aquatiques) sont fréquents dans la région et affectent la sédimentation régulière du fjord. Ainsi, lors du glissement de terrain de Saint-Jean Vianney en 1971, plus de  $7,5 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de sédiment ont été entraînés vers le fjord (Lasalle et Tremblay, 1978). Des sismites se sont également mises en place, par exemple lors du séisme de 1988 (6,2 sur l'échelle de Richter) qui a affecté la région du Saguenay (Pelletier, 1993). Les pentes abruptes et les vitesses de sédimentation élevées dans le fjord augmentent les risques de glissements sous-aquatiques lors de tels événements.

La couche de la crue de 1996 a fait l'objet d'études sédimentologiques qui mettent en évidence un contenu élevé de carbone inorganique, sans doute issu de la remobilisation des argiles de la mer de Laflamme (*e.g.*, Saint-Onge et Hillaire-Marcel, 2000).

### 1.3 Les radio-isotopes de courte période dans les sédiments des milieux de transition

#### 1.3.1 Le $^{210}\text{Pb}$

Le  $^{210}\text{Pb}$  provient de la chaîne de désintégration naturelle de  $^{238}\text{U}$  et possède une période de 22,3 ans (Ivanovich et Harmon, 1992). Il est issu de la désintégration du  $^{222}\text{Rn}$  ( $T=3,82$  jours; *In* Ivanovich et Harmon, 1992), un isotope fils du  $^{226}\text{Ra}$ . Dans les sédiments marins ou lacustres, les teneurs en  $^{210}\text{Pb}$  incluent deux composantes principales (fig. 1.1) :

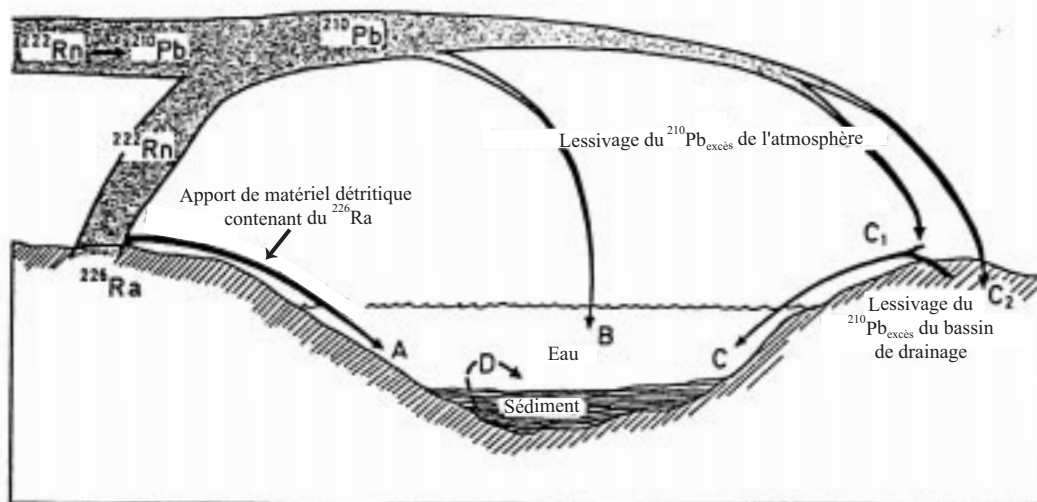
(1) la première composante est atmosphérique. Le  $^{222}\text{Rn}$ , qui possède les propriétés des gaz rares, est produit dans la lithosphère continentale superficielle puis émis vers l'atmosphère. Il se désintègre rapidement en  $^{210}\text{Pb}$  par l'intermédiaire d'une série d'isotopes de très courte période (fig. 1.2). Le  $^{210}\text{Pb}$  se fixe ensuite sur les aérosols atmosphériques et se dépose sur les continents et dans les milieux aquatiques avec les précipitations sèches et humides. En milieu aquatique, le  $^{210}\text{Pb}$  est adsorbé par les particules en suspension et se sédimente avec ces dernières (Oldfield et Appleby, 1984). Les fines particules d'argile, la matière organique et les oxy-hydroxydes de fer et de manganèse sont plus susceptibles d'adsorber cet élément que les particules grossières (Robbins et Edgington, 1975; Megumi, 1978; Duinker, 1980; Carpenter *et al.*, 1981; Smith et Walton, 1980);

(2) la seconde composante du  $^{210}\text{Pb}$  est issue de l'érosion dans le bassin de drainage. Elle est liée, dans les particules sédimentaires, à ses isotopes ascendants. Elle se présente généralement en équilibre séculaire avec ceux-ci (Oldfield et Appleby, 1984). Cette composante du  $^{210}\text{Pb}$  est généralement appelée "plomb soutenu" ( $^{210}\text{Pb}_{\text{soutenu}}$ ; Oldfield et Appleby, 1984).

La composante issue du  $^{222}\text{Rn}$  atmosphérique se présente ainsi en excès par rapport à ces isotopes ascendants, en général, hérités du substratum des bassins de drainage. On s'y réfère en tant que  $^{210}\text{Pb}$  "en excès" ( $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$ ) par opposition au  $^{210}\text{Pb}_{\text{soutenu}}$ .

Dans le sédiment, les deux composantes du  $^{210}\text{Pb}$  peuvent être mesurées. Le  $^{210}\text{Pb}_{\text{soutenu}}$  peut être évalué de diverses façons : i) en mesurant l'activité d'un isotope ascendant tel  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{230}\text{Th}$ , ou  $^{234}\text{U}$  et en postulant un équilibre séculaire entre l'ascendant concerné et le  $^{210}\text{Pb}$  particulière directement issu de celui-ci; ii) en déterminant l'activité asymptotique du  $^{210}\text{Pb}$  à la base des profils sédimentaires, soit jusqu'à ce que le  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$  ne soit plus mesurable (Oldfield et Appleby, 1984).

Le  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$  permet de calculer des vitesses et des taux de sédimentation, mais avec certaines réserves, soit en admettant un flux initial constant, une absence de redistribution mécanique ou chimique dans le sédiment. Dans les cas favorables, les applications chronologiques ne peuvent excéder une centaine d'années, soit environ cinq fois la période du  $^{210}\text{Pb}$ , eu égard en particulier à la précision analytique (environ  $\pm 3\%$ ). Les premières applications chronologiques ont été développées par Goldberg (1963). Elles visaient à déterminer le taux d'accumulation de la neige de la calotte groenlandaise. Koide *et al.* (1972) ont par la suite déterminé des vitesses de sédimentation en milieu marin à l'aide du  $^{210}\text{Pb}$  en étayant ces résultats de données sédimentologiques.



**Figure 1.1** Cheminement du  $^{210}\text{Pb}$  dans les écosystèmes aquatiques (Modifié de Haworth et Lund, 1984).

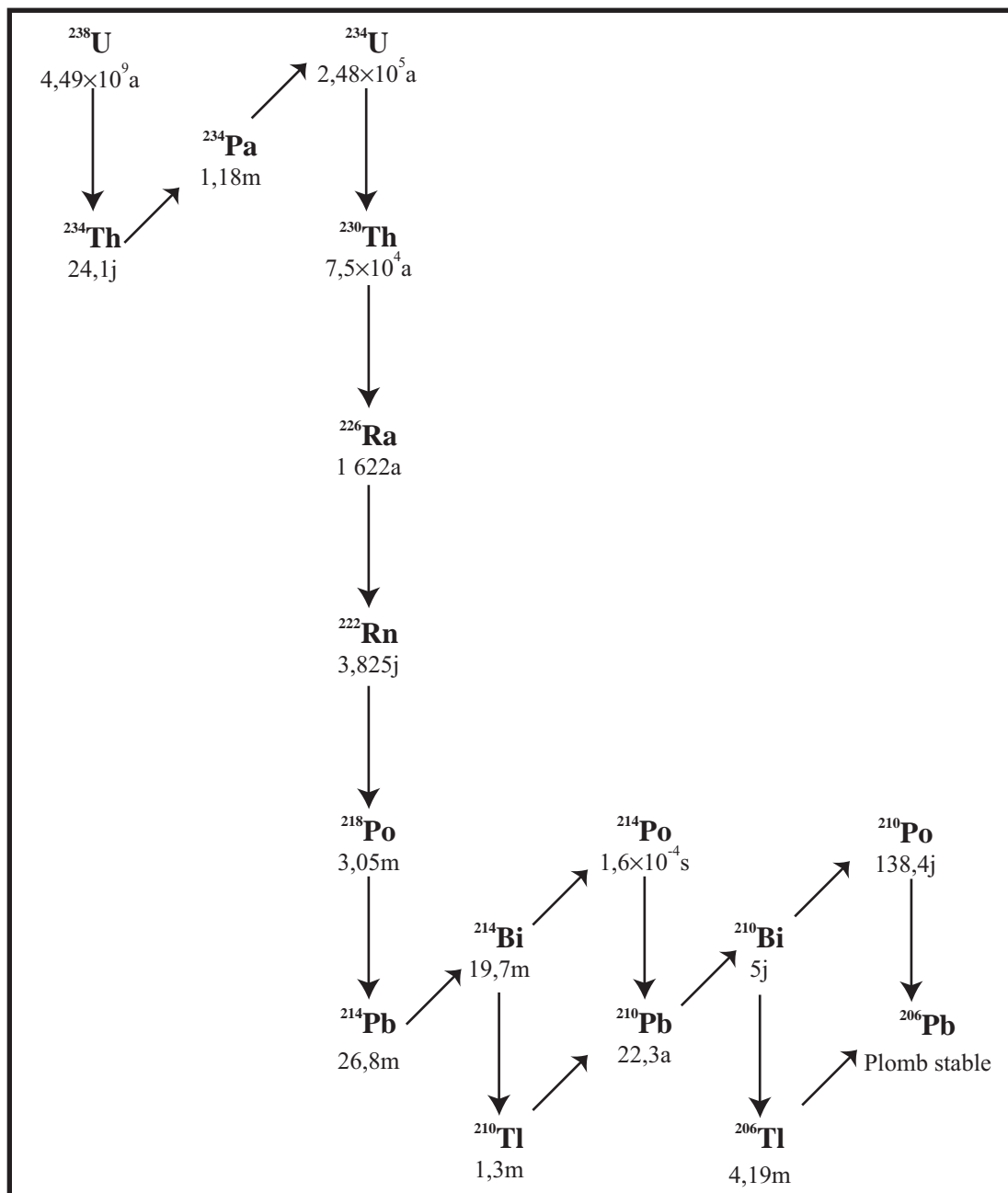


Figure 1.2 Série radioactive du  $^{238}\text{U}$ .



### 1.3.2 Le $^{137}\text{Cs}$

Contrairement au  $^{210}\text{Pb}$  dont l'origine est naturelle, le  $^{137}\text{Cs}$  est d'origine anthropique. Il a surtout été émis lors des essais thermonucléaires réalisés en haute atmosphère au cours des années 1950 et 1960 (Ritchie et McHenry, 1990). Après le traité américano-soviétique de 1963, mettant fin aux essais thermonucléaires, les émissions de  $^{137}\text{Cs}$  ont décliné rapidement (Ritchie et McHenry, 1990). Adsorbé par les précipitations sèches et humides, le césium atteint les milieux terrestres et aquatiques. Dans les milieux aquatiques, les flux de  $^{137}\text{Cs}$  ont deux composantes :

- (1) la première composante est directement issue des particules atmosphériques;
- (2) la seconde composante est un apport différé à la suite de l'adsorption des particules atmosphériques sur les sols et les végétaux des continents. Cette deuxième composante est donc liée à l'érosion des sols du bassin de drainage au cours de laquelle le  $^{137}\text{Cs}$  est préférentiellement adsorbé par les particules fines argileuses et organiques (Tamura, 1964; Francis et Brinkley, 1976; Barbeau *et al.*, 1981; Das *et al.*, 1989; Sobocinski *et al.*, 1990).

Le  $^{137}\text{Cs}$  est couramment utilisé comme traceur et géochronomètre dans les milieux marins (Santschi *et al.*, 1983; Silverberg *et al.*, 1986; Zuo *et al.*, 1991; Farmer, 1993), lacustres (Robbins *et al.*, 1978; Anderson *et al.*, 1987; Hermanson, 1990) et estuariens (Schafer *et al.*, 1980; Barbeau *et al.*, 1981; Smith et Ellis, 1982; Smith et Schafer, 1987; Schafer et Smith, 1987). Le  $^{137}\text{Cs}$  permet de définir des repères chronologiques dans un profil sédimentaire et d'estimer les vitesses de sédimentation. En pratique, on détermine, soit la profondeur d'apparition du  $^{137}\text{Cs}$  qui correspond au début des essais thermonucléaires en 1952, soit la profondeur des teneurs maximales en  $^{137}\text{Cs}$  qui peuvent être associées à un maximum d'émissions en 1963. Cependant, le  $^{137}\text{Cs}$  est susceptible d'être redistribué vers la surface et/ou vers le sédiment sous-jacent. Ce phénomène s'explique surtout par le mélange mécanique produit par les organismes benthiques et plus rarement par la diffusion chimique du  $^{137}\text{Cs}$  sous certaines conditions (*cf.* Robbins et Edgington, 1975; Robbins *et al.*, 1978; Smith et Walton, 1980; Santschi *et al.*, 1983; Anderson *et al.*, 1987; Farmer, 1993; Zuo *et al.*, 1991; Courcelles, 1998; Zhang, 1999).

Le  $^{210}\text{Pb}$  et  $^{137}\text{Cs}$  ont fréquemment été utilisés conjointement afin de déterminer des vitesses de sédimentation dans les milieux lacustres et estuariens (Robbins et Edgington, 1975; Robbins *et al.*, 1978; Schafer *et al.*, 1980; Smith et Walton, 1980; Smith et Ellis, 1982; Silverberg *et al.*,

1986; Anderson *et al.*, 1987; Smith et Schafer, 1987; Hermanson, 1990; Jenanne, 1992; Zhang, 1999). En théorie, les deux traceurs isotopiques devraient permettre de calculer les mêmes vitesses de sédimentation. Cependant, la bioturbation peut lisser les profils radio-isotopiques différemment selon leur période radioactive livrant ainsi des estimations différentes des vitesses de sédimentation. Par ailleurs, une diffusion qui dépend de la nature du sédiment peut affecter le profil de  $^{137}\text{Cs}$ . Enfin, les temps de séjour respectifs du  $^{210}\text{Pb}$  et du  $^{137}\text{Cs}$  dans le bassin de drainage et dans le milieu aquatique peuvent différer. En effet, le temps de séjour du  $^{137}\text{Cs}$  dans le bassin de drainage du fjord du Saguenay serait de 1500 ans alors que celui du  $^{210}\text{Pb}$  atteindrait 3000 ans (Smith et Ellis, 1982; Smith *et al.*, 1987). Par ailleurs, Smith et Ellis (1982) ont calculé un temps de transit d'environ un an pour que le  $^{137}\text{Cs}$  atmosphérique et le  $^{210}\text{Pb}$  atteignent le fjord proprement dit.

### 1.3.3 Le $^{228}\text{Th}$

Issu de la chaîne de désintégration naturelle du  $^{232}\text{Th}$ , le  $^{228}\text{Th}$  se caractérise par une période radioactive de 1,9 ans (*In* Ivanovich et Harmon, 1992). Il permet ainsi de détecter des événements récents et rapides (Deschamps, 1997). Le  $^{228}\text{Th}$  donne en principe accès à une échelle de temps d'environ 10 ans, eu égard à la précision analytique courante. Cependant, la décroissance radioactive du  $^{228}\text{Th}$  est contrôlée par celle d'un ascendant, le  $^{228}\text{Ra}$ , qui possède un comportement géochimique différent et une période radioactive de 5,8 ans (*in* Ivanovich et Harmon, 1992). Dans l'hydrosphère, l'équilibre séculaire entre ces isotopes est rarement atteint à cause de la grande solubilité du radium s'opposant à la faible solubilité du thorium (Ivanovich et Harmon, 1992). Les sédiments transportés par les cours d'eau sont ainsi susceptibles de présenter un défaut en  $^{228}\text{Ra}$  par rapport au  $^{228}\text{Th}$  des minéraux détritiques. L'excès en  $^{228}\text{Th}$  par rapport au  $^{228}\text{Ra}$  peut être accru par adsorption du  $^{228}\text{Th}$  produit par le  $^{228}\text{Ra}$  dissous dans le milieu aquatique. Les particules ayant un excès en  $^{228}\text{Th}$  se déposent et l'excès en  $^{228}\text{Th}$  décroît jusqu'au retour à l'équilibre séculaire avec ces ascendants. Cependant, l'équilibre du rapport  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  est commandé par celui du  $^{228}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$  qui peut être atteint dans une échelle de temps de l'ordre de 30 ans, eu égard à la période du  $^{228}\text{Ra}$ .

Quelques publications ont fait état des déséquilibres de  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  dans le sédiment et en tant que géochronomètre dans le but de déterminer le mélange benthique. Somayajulu et Goldberg (1966) furent parmi les pionniers dans ce domaine. Koide *et al.* (1973) ont également étudié le couple  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  communément au  $^{210}\text{Pb}$  et au  $^{137}\text{Cs}$ . Le comportement du couple  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  a

également été analysé dans les milieux estuariens, marins et lagunaires (*cf.* Deconinck *et al.*, 1983; Carpenter *et al.*, 1984; Silverberg *et al.*, 1986; Huh *et al.*, 1987; Jenanne, 1992; Legeleux *et al.*, 1994; Zhang, 1999). Les profils du rapport d'activité  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  sont souvent caractérisés par un excès de  $^{228}\text{Th}$  à l'interface eau-sédiment suivi d'un léger défaut de cet isotope sur quelques centimètres de profondeur, puis d'un retour à l'équilibre séculaire entre les isotopes en profondeur (Deconinck *et al.*, 1983; Huh *et al.*, 1987; Jenanne, 1992; Zhang, 1999). Deschamps (1997) a modélisé ce profil à partir d'analyses effectuées dans différents milieux tel qu'estuarien, de marge continentale et lagunaire, en tenant compte de la décroissance radioactive, des vitesses de sédimentation et de l'intensité du mélange physique par les organismes benthiques et de la diffusion chimique du  $^{228}\text{Ra}$  intermédiaire.

#### 1.3.4 Le rapport $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$

Le rapport d'activité  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  permet de déterminer les types de fraction détritique du sédiment. Le  $^{230}\text{Th}$  ( $T=7,5 \times 10^4$  ans; *In* Ivanovich et Harmon, 1992) est issu de la chaîne de désintégration de  $^{238}\text{U}$  ( $T=4,49 \times 10^9$  ans; *In* Ivanovich et Harmon, 1992) et est un lointain ascendant du  $^{210}\text{Pb}$  (*cf.* fig. 1.1). Le  $^{232}\text{Th}$  possède une période radioactive de  $14,5 \times 10^9$  ans (*In* Ivanovich et Harmon, 1992). Dans les roches du substratum précambrien régional (composées principalement de silicates), le  $^{230}\text{Th}$  est généralement en équilibre séculaire avec son ascendant,  $^{238}\text{U}$  (*e.g.*, Vallières *et al.*, 1993). Le rapport  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  est souvent proche de 1 du fait qu'il y a en moyenne trois fois plus de thorium que d'uranium dans la croûte terrestre et que la période de  $^{232}\text{Th}$  est environ trois fois plus élevée que celle de  $^{238}\text{U}$ . Dans les roches carbonatées, une très faible concentration de  $^{232}\text{Th}$  est de règle puisque le thorium est un élément très peu soluble dans l'eau. Cependant, celles-ci contiennent beaucoup d'uranium puisque celui-ci est très soluble. Les carbonates contiennent donc du  $^{230}\text{Th}$ , issu de la désintégration de  $^{238}\text{U}$ . Leur rapport  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  est ainsi généralement beaucoup plus élevé que 1. Le rapport  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  varie donc en fonction de la nature de la roche-mère ainsi que de la granulométrie des particules sédimentaires qui en sont issues. Les particules fines peuvent en effet adsorber du  $^{230}\text{Th}$  produit par l'uranium dissous dans l'eau. Ici, toutefois, le temps de séjour des particules dans la colonne d'eau est court (environ 10 jours; Zhang, 1999) et il est peu probable que les fractions fines puissent accumuler des fractions importantes de  $^{230}\text{Th}$ . Toutefois, une accumulation de  $^{230}\text{Th}$  peut se produire antérieurement dans les sols lors de la mise en solution de l'uranium ascendant. En général, lorsque les sols sont jeunes et que la décroissance radioactive du  $^{230}\text{Th}$  reste infime (ce qui est le cas ici), l'enrichissement en  $^{230}\text{Th}$  s'accompagne d'un enrichissement équivalent en  $^{232}\text{Th}$ .

## CHAPITRE II

### TECHNIQUES D'ÉCHANTILLONNAGE ET D'ANALYSES

#### 2.1 Échantillonnage

Trois stations d'échantillonnage ont été retenues : la première dans le bras Nord, la seconde dans la Baie-des-Ha! Ha! et la troisième à leur confluence (fig. i.1). Le carottage du sédiment y a été réalisé lors d'une mission du Martha Black, en 1997, à l'aide d'un carottier-boîte, afin de recouvrer intégralement le sédiment de surface (tableau 2.1). Dans chaque boîte, plusieurs "pushcores" ont été prélevés et numérotés de A à D. L'un des "pushcores" a fait l'objet de mesures physiques ; un autre a été coupé longitudinalement et a fait l'objet d'une description visuelle et d'un échantillonnage. Deux "pushcores" différents ont donc été étudiés pour les mesures physiques et les analyses géochimiques et isotopiques, respectivement. En dépit de précautions lors de l'extraction des "pushcores", une compaction différente n'est pas exclue. De plus, des variations latérales sont possibles. Ainsi, un certain décalage vertical peut être enregistré entre les données physiques et les mesures géochimiques, sans que cela ait de signification stratigraphique. Des mesures physiques ont été réalisées avant leur échantillonnage. La densité, la vitesse de propagation des ondes P, la susceptibilité magnétique volumétrique et la porosité ont été déterminées selon des intervalles centimétriques, à l'aide d'un appareil de type MST (*multi-sensor track*). Après avoir été ouvertes longitudinalement, les carottes ont

**Tableau 2.1** Localisation des stations étudiées.

Endroit et nom de la carotte	Station	Latitude	Longitude	Profondeur	Longueur de la carotte
Bras Nord MB-9701-01BO1A	SAG-5	48°25,40'N	70°51,57'O	86 m	38 cm
Baie-des-Ha! Ha! MB-9701-17BO5B	Baie-des-Ha! Ha!	48°22,01'N	70°46,19'O	164 m	55 cm
Confluence MB-9701-04BO4D	SAG-15	48°21,74'N	70°42,30'O	228 m	52 cm

fait l'objet d'une description visuelle. Les couleurs ont été déterminées à partir de la charte Munsell (*cf.* U. S. Department of Agriculture, 1975). Chaque carotte a par la suite été sous-échantillonnée en continu selon une maille de 5 mm dans la moitié supérieure et de 1 cm au-dessous. Les échantillons étaient destinés à des analyses isotopiques et géochimiques incluant la détermination de la composition isotopique du carbone organique ( $\delta^{13}\text{C}$ ), des teneurs en carbone organique ( $C_{\text{org}}$ ) et inorganique ( $C_{\text{inorg}}$ ), du rapport  $C_{\text{org}}/N$  total, des rapports d'activité  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  ainsi que des teneurs en  $^{210}\text{Pb}$  et en  $^{137}\text{Cs}$ .

## 2.2 Mesures des propriétés physiques

La densité du sédiment a été déterminée sur le sédiment total humide par atténuation des rayons gamma ( $\gamma$ ) avec une source de  $^{137}\text{Cs}$  possédant une énergie de 660 keV (Blum, 1997). L'erreur statistique de cette méthode est établie en fonction du nombre de coups reçu par le détecteur pendant un certain temps; elle est inférieure à 5 % (*cf.* Blum, 1997). La porosité exprimée en pourcentage est calculée selon une fonction inverse de la densité.

Les vitesses de propagation des ondes P ont été déterminées à l'aide d'un PWL (*P-Wave Logger*) inclus dans le MST. Une onde de 500 kHz est émise à travers la carotte et captée par un récepteur à l'extrémité de cette dernière (Blum, 1997). La vitesse de propagation des ondes P varie en fonction inverse à la porosité, à la présence de gaz, et de façon proportionnelle à la densité et au degré de consolidation.

La susceptibilité magnétique représente le degré de magnétisation du sédiment qui dépend de la quantité de matériel ferromagnétique. La susceptibilité magnétique est exprimée en unité SI ( $1 \times 10^{-5}$ ) selon une précision de 5% (Blum, 1997). Des carottes du Saguenay ont fait l'objet de mesures avec un MSL (*Magnetic Susceptibility Logger*) selon des intervalles de 1 cm. Toutefois, la mesure à partir d'un anneau de 11 cm de diamètre selon un angle de  $90^\circ$  rend compte d'une intégration sur 11 cm de long. Il en résulte un lissage significatif de la susceptibilité magnétique selon une fenêtre de 11 cm. En particulier, les mesures aux extrémités de section présentent souvent une décroissance qui constitue un artefact.

Les profils de densité, de porosité, de vitesse de propagation des ondes P et de la susceptibilité magnétique sont présentés sous forme de diagrammes pour chacune des carottes (*cf.* fig. 3.1, 3.4, 3.7) et les données sont présentées dans l'annexe A.

### 2.3 Analyses isotopiques et géochimiques

L'analyse des teneurs en carbone et azote a été effectuée l'aide d'un analyseur élémentaire de type Carlo-Erba™. Une combustion partielle de l'échantillon est réalisée à une température d'environ 1000°C. Les gaz émis sont ensuite déshydratés. Enfin, ils sont séparés sur une colonne chromatographique de type Porapack PQS™ et dosés à l'aide d'un capteur de thermoconductivité. La reproductibilité analytique de l'instrument est de 5 % environ, comme l'indiquent des analyses répétées d'étalons.

Une première analyse du sédiment brut permet de déterminer les teneurs en carbone total et en azote. Des parties aliquotes sont ensuite traitées à l'acide chlorhydrique (1N) afin de détruire les carbonates et de déterminer, par une seconde combustion, la teneur en carbone organique. Les teneurs en carbone inorganique (exprimées en équivalent CaCO<sub>3</sub>) et en carbone organique sont exprimées en pourcentage par rapport au poids sec du sédiment total. Toutefois, les sédiments du Saguenay contiennent certaines argiles (chlorites, biotites, etc.) et nombre de minéraux diagénétiques précoces qui peuvent être dissous lors de l'attaque par HCl (1N), biaisant ainsi le calcul des teneurs en carbone organique *vs* inorganique (*e.g.*, Leverthal et Taylor, 1990; Raiswell *et al.*, 1994). Le carbone inorganique du sédiment a donc été analysé indépendamment à l'aide d'un coulomètre. L'analyse consiste à ajouter 3 ml de HCl (2N) dans environ 0,1 mg de sédiment sec et à chauffer cette solution pendant 10 minutes. Le CO<sub>2</sub> produit lors de la réaction est ensuite adsorbé dans une solution de KOH, puis dirigé vers une cellule où il est titré et converti en microgramme de carbone. La limite de détection de l'appareil est de 0,08 % (par rapport au poids sec) et l'erreur analytique est d'environ 5 %. Les teneurs en carbone inorganique ainsi déterminées sont soustraites des teneurs en carbone total mesurées à partir de l'analyseur élémentaire, permettant de calculer les teneurs en carbone organique.

L'analyse des teneurs en <sup>13</sup>C de la matière organique a été réalisée à l'aide d'un spectromètre de masse de type Isoprime™ raccordé à l'analyseur élémentaire. Le CO<sub>2</sub> de

combustion fait l'objet de mesures isotopiques. Les résultats sont exprimés en unité  $\delta$  (‰), par comparaison à l'étalon PDB (*cf.* Coplen, 1995). La reproductibilité analytique est de l'ordre de  $\pm 0,15$  ‰, comme le démontrent des analyses répétées de substances étalons. Les faibles teneurs en azote de la matière organique du fjord (*e.g.* Louchouart, 1997) ne permettent pas son analyse isotopique.

Les résultats des analyses géochimiques et isotopiques sont présentés sous forme de diagrammes pour chaque carotte (*cf.* fig. 3.2, 3.5, 3.8). Les données exhaustives sont reportées dans l'annexe A.

#### 2.4 Analyse des teneurs en $^{210}\text{Pb}$ et $^{137}\text{Cs}$

Les teneurs en  $^{210}\text{Pb}$  peuvent être mesurées grâce à plusieurs techniques analytiques, soit directement par spectrométrie gamma ( $\gamma$ ), sinon indirectement par la mesure d'isotopes descendants ( $^{210}\text{Bi}$  et  $^{210}\text{Po}$ ) par spectrométrie alpha ( $\alpha$ ), bêta ( $\beta$ ) ou  $\gamma$ . Dans le cas présent, les teneurs en  $^{210}\text{Pb}$  ont été déterminées par spectrométrie  $\alpha$  *via* le  $^{210}\text{Po}$ -descendant. Celui-ci a été préparé par dissolution, purification et dépôt sur un disque d'argent (Flynn, 1968) dans une solution de HCl (8N) neutralisée à un pH approximatif de 1,35 avec du  $\text{NH}_4\text{OH}$ . La mesure de  $^{210}\text{Pb}$  *via* le  $^{210}\text{Po}$  implique un équilibre séculaire. Un délai de plusieurs mois après l'échantillonnage des sédiments (de 9 à 14 mois) est ainsi nécessaire. Le  $^{209}\text{Po}$  est utilisé comme traceur pour déterminer les rendements chimiques et de comptage. Un minimum de 2000 coups par isotope du polonium est cumulé pour atteindre une erreur analytique relative inférieure à 3 %.

Des analyses complémentaires de  $^{210}\text{Pb}$  ont également été réalisées par spectrométrie  $\gamma$  dans l'une des carottes (celle de Baie-des-Ha!Ha!) à la suite de l'acquisition d'un détecteur  $\gamma$  à puits (Canberra™). Ce détecteur permet un dosage simultané du  $^{210}\text{Pb}$  et du  $^{137}\text{Cs}$  et des analyses non-destructives. Le  $^{210}\text{Pb}$  qui est un émetteur  $\gamma$  de faible intensité ( $\sim 46,5$  keV) est dosé directement. Cependant, la faible capacité volumétrique du puits du détecteur (environ  $2,55$  cm<sup>3</sup>), le temps de comptage nécessaire pour obtenir une erreur analytique acceptable et la présence de faibles teneurs du  $^{210}\text{Pb}$ , constituent des limitations.

L'activité du  $^{137}\text{Cs}$  a été mesurée par spectrométrie  $\gamma$ . Cet isotope possède une période de 30 ans et émet sous une énergie de 661 keV. La spectrométrie  $\gamma$  ne requiert aucune extraction chimique préalable. Le sédiment est simplement broyé et déposé sur le détecteur dans un contenant prévu à cet effet. Deux spectromètres  $\gamma$  ont été utilisés pour cette étude. Le premier, de type coaxial à coïncidence, a été utilisé pour les sédiments des stations SAG-5 et SAG-15. La reproductibilité, par cette méthode, est  $\leq 35\%$  ( $\pm 1\sigma$ ). Comme mentionné ci-dessus, un détecteur à puits, a également été utilisé pour les sédiments de la station Baie-des-Ha! Ha!. Celui-ci rend compte d'une erreur inférieure à 10 %.

Les résultats de ces analyses sont présentés sous forme de profils dans les figures (*cf.* fig. 3.3, 3.6, 3.9). Les données exhaustives sont reportées dans l'annexe A.

## 2.5 Analyse des rapports d'activité des isotopes du thorium ( $^{230}\text{Th}$ , $^{228}\text{Th}$ et $^{232}\text{Th}$ )

Les rapports d'activité  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  et  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  ont été déterminés par spectrométrie  $\alpha$ . Le sédiment est préalablement broyé et brûlé pendant quelques heures afin de détruire la matière organique. La séparation du thorium est ensuite effectuée par mise en solution dans l'eau régale (HCl, HF) et filtration sur des résines échangeuses d'ions. Le thorium est électrodéposé sur un disque d'acier qui fait l'objet de mesure des émissions  $\alpha$  (*cf.* annexe B pour la méthodologie complète; Lally, 1992). Les rapports isotopiques ont été établis à partir d'un minimum de 2000 coups pour chaque isotope. Cette statistique de comptage permet d'obtenir une erreur inférieure à 3 %.

L'étude du rapport d'activité de  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  permet de déterminer les variations de composition isotopique de la fraction détritique du sédiment à travers le temps. Le  $^{230}\text{Th}$  ( $T=7,5\times 10^4$  ans; *In* Ivanovich et Harmon, 1992), issu de la chaîne de désintégration de  $^{238}\text{U}$  ( $T=4,49\times 10^9$  ans; *In* Ivanovich et Harmon, 1992), est considéré en équilibre séculaire avec son ascendant,  $^{238}\text{U}$ , dans les roches d'âge précambrien. Le  $^{232}\text{Th}$  possède une période radioactive longue ( $T= 14,5\times 10^9$  ans; *In* Ivanovich et Harmon, 1992). Le rapport  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  reflète indirectement le rapport  $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ ; on peut le relier aux sources sédimentaires.

Les résultats de ces analyses sont présentés sous forme de profils (*cf.* fig. 3.3, 3.6, 3.9) et les données exhaustives sont reportées dans l'annexe A.



## CHAPITRE III

### RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET DU CONTENU GÉOCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE.

#### 3.1 Station SAG-5

##### 3.1.1 Propriétés physiques du sédiment

Le sédiment de surface est de couleur gris brun foncé jusqu'à 11 cm de profondeur (*cf.* fig. 3.1). De 11 à 27 cm, il présente une couleur plus claire; en-dessous, on note une alternance de couches millimétriques claires et foncées. Le niveau de transition, à 22 cm, est marqué par la présence de débris cellulosiques liés à l'activité papetière régionale et une odeur de H<sub>2</sub>S. Quelques débris cellulosiques s'observent également en-dessous de 22 cm.

La densité du sédiment varie entre 1,4 et 1,6 g/cm<sup>3</sup>. De façon générale, celle-ci est légèrement plus élevée dans la partie supérieure du profil, au-dessus de 22 cm. La vitesse de propagation des ondes P fluctue entre 1440 et 1485 m/sec. Un maximum est enregistré en surface et un minimum est observé à 11 cm de profondeur. La susceptibilité magnétique varie de 72 à 140 x 10<sup>-5</sup> SI au sommet de la carotte. En dépit d'artefacts aux extrémités de la carotte et d'un lissage prononcé, la susceptibilité magnétique permet de distinguer 2 zones. Dans la partie sommitale de la carotte, au-dessus d'environ 22 cm, la susceptibilité moyenne est de 134 x 10<sup>-5</sup> SI. Dans la partie inférieure de la carotte, la susceptibilité magnétique est significativement moindre, en moyenne de 9 x 10<sup>-5</sup> SI.

Les différentes caractéristiques visuelles et physiques énumérées ci-dessus nous permettent d'établir une stratigraphie. À la base de la carotte, en-dessous de 22 cm, la faible densité et

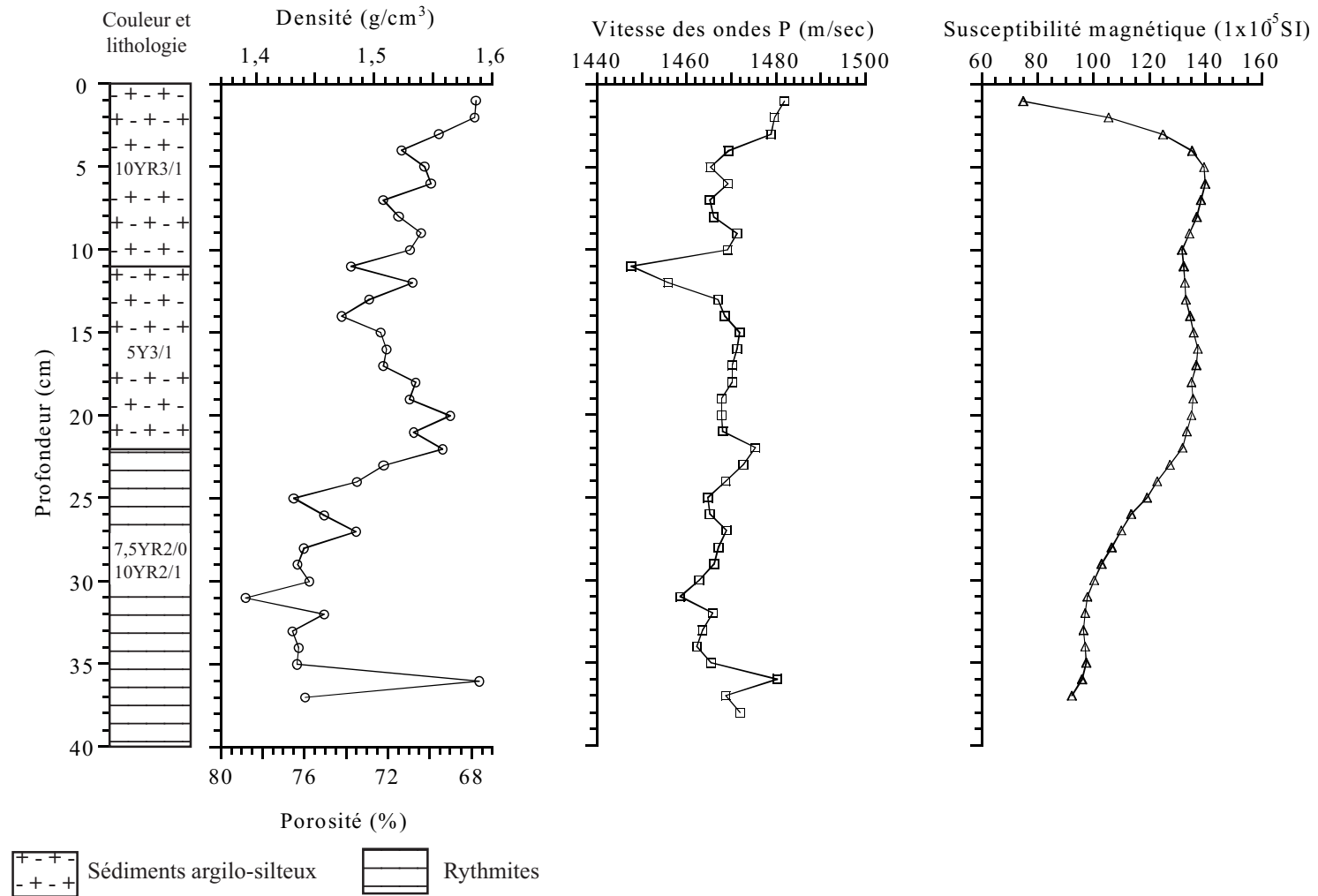
susceptibilité magnétique ainsi que le caractère finement laminé des dépôts évoquent une sédimentation de type hypopycnale. Entre ~22 cm et la surface, une faible porosité et une susceptibilité magnétique élevée suggèrent une mise en place du sédiment sous des conditions différentes de celles de la partie inférieure.

### 3.1.2 Contenu géochimique et isotopique

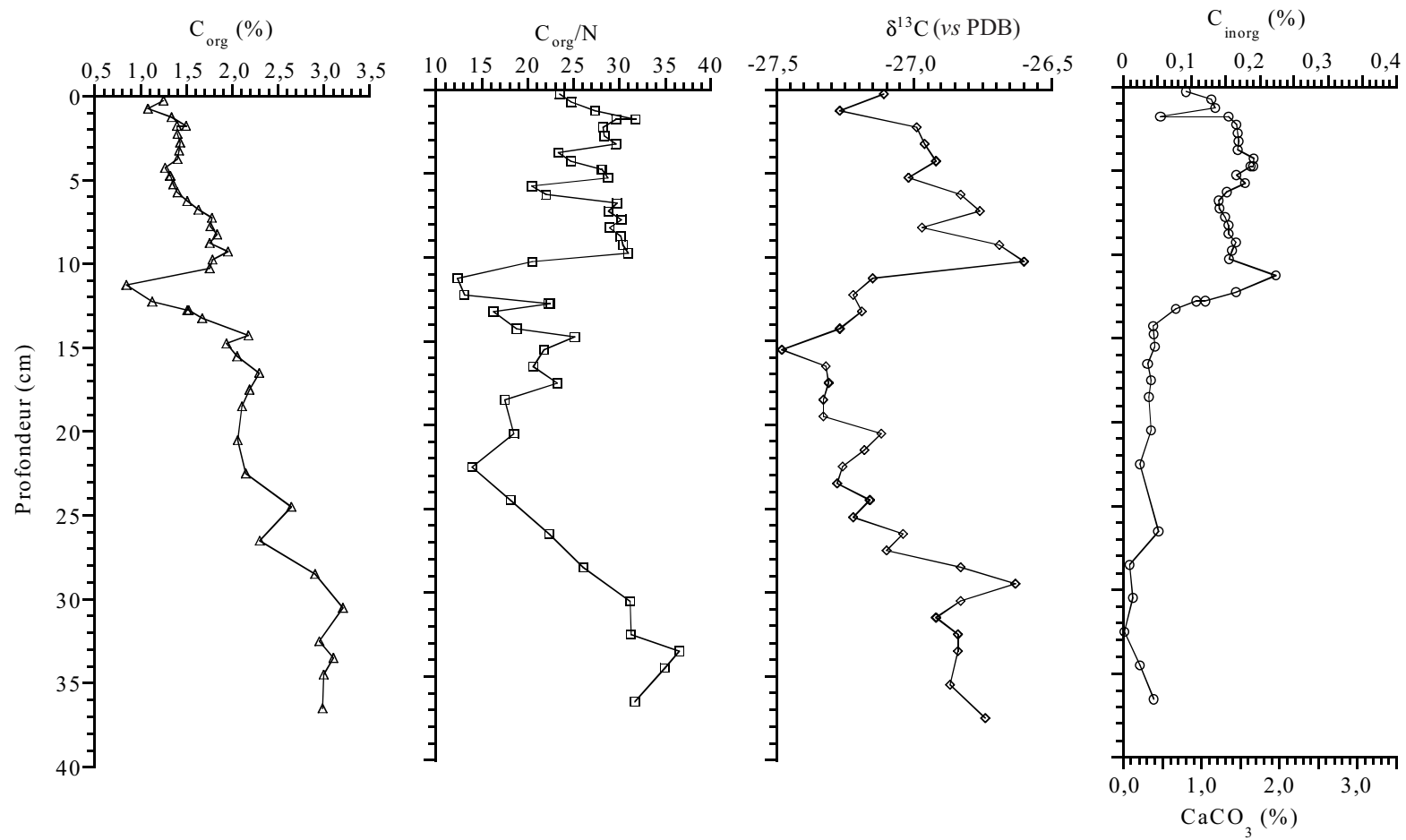
Le pourcentage de carbone organique ( $C_{org}$ ) est élevé : il varie entre 1 et 3,5 % (*cf.* fig. 3.2). Entre la surface et ~ 22 cm de profondeur, le sédiment renferme de 0,8 à 2,4 % de  $C_{org}$ . Un minimum des teneurs (0,8 %) est observé à 11 cm de profondeur. La partie inférieure du profil se singularise par un pourcentage de  $C_{org}$  particulièrement élevé de plus de 3,2 %.

Le rapport  $C_{org}/N$  fluctue de 12 à 31. Les dix premiers centimètres se caractérisent par un rapport  $C_{org}/N$  relativement élevé, s'établissant à environ 27. Entre 10 et 28 cm de profondeur, le rapport  $C_{org}/N$  est faible, inférieur à 25; à la base de la carotte, il atteint des valeurs élevées de plus de 35. Le rapport  $C_{org}/N$  permet en principe de déterminer les sources du carbone qui composent la matière organique (Craig, 1953). Lorsque la matière organique provient principalement du milieu marin, le rapport  $C_{org}/N$  est généralement de l'ordre d'environ 6; il est supérieur à 20 pour la matière organique continentale (Meyers, 1994). Le profil  $C_{org}/N$  de cette carotte nous indique que la matière organique des sédiments est principalement d'origine terrigène.

La composition isotopique du carbone organique sédimentaire varie entre -26,5 à -27,5 ‰. Sa courbe présente de fortes analogies avec le profil  $C_{org}/N$ . L'horizon 0-10 cm est légèrement enrichi en  $^{13}C$ . Les valeurs minimales (-27,4 ‰) s'observent entre 12 et 26 cm de profondeur. En-dessous la composition isotopique du carbone augmente s'établissant autour de -26,7 ‰. La composition isotopique de la matière organique permet également de déterminer les sources de carbone de la matière organique (Meyers, 1994). Une composition isotopique en  $^{13}C$  inférieure à -26 ‰ indique que le carbone est d'origine terrigène lorsque sa composition est semblable à celle retrouvée dans le bassin de drainage (Benson *et al.*, 1991). Lorsque les sources de carbone sont d'origine marine, c'est-à-dire produite par le phytoplancton, la composition isotopique des sédiments sera de -24 à -17 ‰ (Gearing *et al.*, 1984). À la station SAG-5, les sédiments sont principalement d'origine terrigène.



**Figure 3.1** Description lithologique sommaire (couleurs d’après la Charte Munsell), la densité et la porosité, la vitesse de propagation des ondes P et susceptibilité magnétique dans la carotte de SAG-5. Note : les descriptions et les mesures des propriétés physiques ont été effectuées respectivement sur les “pushcores” A et B.



**Figure 3.2** Contenu en  $C_{org}$ , rapport  $C_{org}/N$ ,  $\delta^{13}C$  de la matière organique et contenu en  $CaCO_3$  ( $C_{inorg}$ ) à la station SAG-5.

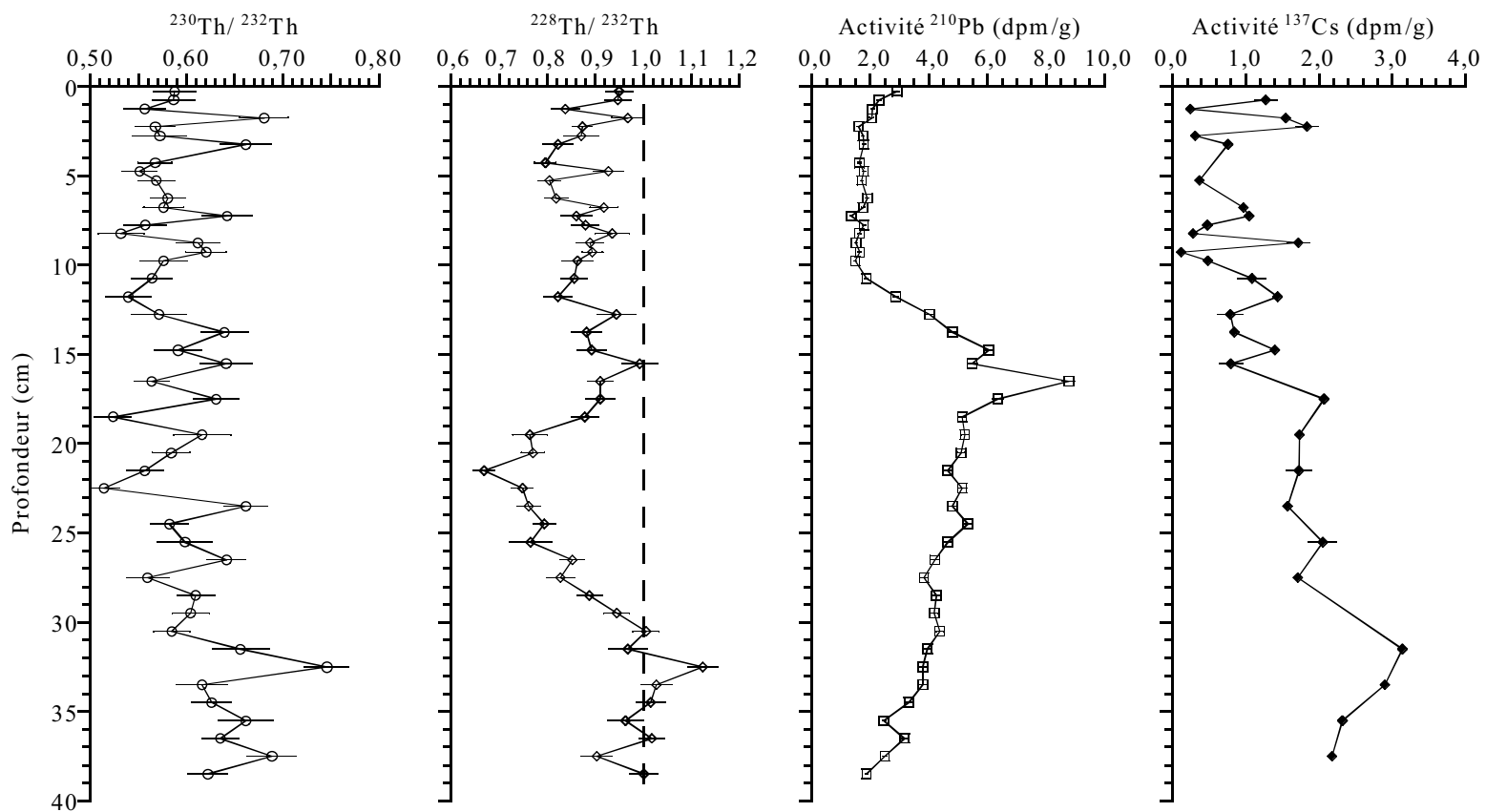
Le pourcentage de  $\text{CaCO}_3$  varie entre 0 et 2 % (*cf.* fig. 3.2). Des valeurs relativement élevées (supérieures à 1%) sont enregistrées de la surface à 13 cm de profondeur. En-dessous de 13 cm de profondeur, le contenu en  $C_{\text{inorg}}$  est inférieur à 0,50 %. Ces faibles teneurs paraissent typique de la sédimentation hypopycnale des sédiments du fjord du Saguenay. Comme il a été énoncé plus tôt, le bassin de drainage est principalement constitué de roches silicatées.

Les différents profils présentés ci-dessus nous permettent d'établir une stratigraphie de la carotte. De la base de la carotte à environ 30 cm, on observe un maximum des teneurs en  $C_{\text{org}}$  et du rapport  $C_{\text{org}}/N$ . De telles caractéristiques sont singulières et peuvent être associées à des rejets industriels issus des papetières (*cf.* Barbeau *et al.*, 1981). La diminution des pourcentages  $C_{\text{org}}$  et des rapports  $C_{\text{org}}/N$  que l'on observe entre 30 et  $\sim 22$  cm de profondeur évoquerait une baisse des apports industriels à la suite de mesures correctives concernant les rejets et les changements technologiques dans les années 1960 (*cf.* Barbeau *et al.*, 1981, Savard, 1989). Entre 22 et 14 cm, une uniformité relative des teneurs en  $C_{\text{org}}$  et en  $\text{CaCO}_3$  pourrait évoquer une sédimentation hypopycnale régulière. Un pic de  $\text{CaCO}_3$  et un minimum de  $C_{\text{org}}$  entre 10 et 14 cm révèle une perturbation. Les teneurs élevées en  $\text{CaCO}_3$  entre la surface et 13 cm suggèrent un apport d'argiles carbonatées de la mer de Laflamme vers le fjord du Saguenay comme Mucci et Edenborn (1992) l'ont remarqué pour la couche du glissement de terrain de Saint-Jean-Vianney. Les valeurs élevées en  $C_{\text{org}}/N$  et ainsi que les faibles teneurs en  $C_{\text{org}}$  permettent également de proposer qu'il s'agit d'une couche accidentelle entre la surface et 13 cm de profondeur.

### 3.1.3 Profils radio-isotopiques

Le rapport d'activité  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  (*cf.* fig. 3.3) oscille entre 0,52 et 0,76, pour une moyenne de  $0,60 \pm 1\%$ . Dans l'ensemble, il paraît augmenter légèrement avec la profondeur. Ce rapport indique que les sources détritiques sont principalement silicatées.

Le rapport d'activité  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  varie entre 0,66 à 1,12 (*cf.* fig. 3.3). De la surface jusqu'à 31 cm de profondeur, un défaut en  $^{228}\text{Th}$  ( $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th} < 1$ ) s'observe. Il atteint un maximum vers 22 cm. Des rapports  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  autour de 1 à la base du profil indiquent un équilibre séculaire entre ces isotopes.



**Figure 3.3** Profils des radio-isotopes dans le sédiment de la station SAG-5. Le rapport d'activité  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  de 1 correspond à l'équilibre séculaire.

Les teneurs en  $^{210}\text{Pb}$  varient entre 1,4 et 8,8 dpm/g. Les dix premiers centimètres de la carotte enregistrent une activité faible et assez constante d'environ 1,8 dpm/g. Cet intervalle correspondrait à une couche accidentelle identifiée sur la base des mesures géochimiques et des propriétés physiques. Entre 10 et 17 cm, elle est plus élevée et atteint un maximum de près de 9 dpm/g à 17 cm. Sous ce pic, elle décroît régulièrement jusqu'à la base de la carotte, où s'observe un minimum de  $1,87 \pm 0,05$  dpm/g, qui livre une limite supérieure pour l'activité du  $^{210}\text{Pb}_{\text{soutenu}}$ .

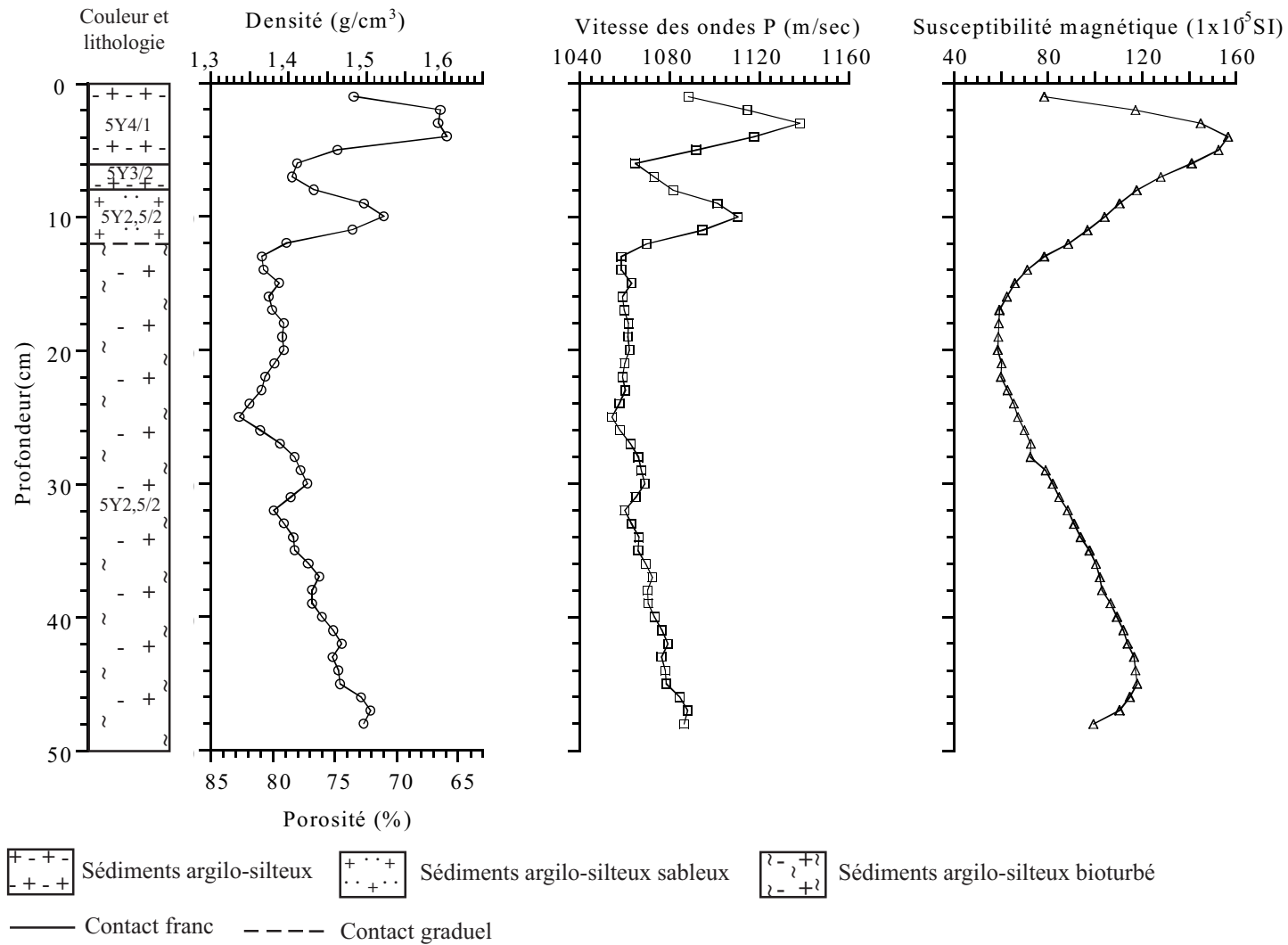
Dans la partie supérieure de la carotte, au-dessus de 17 cm de profondeur, les teneurs en  $^{137}\text{Cs}$  fluctuent entre 0,2 et 2 dpm/g. En-dessous, l'activité de  $^{137}\text{Cs}$  est légèrement supérieure et varie entre 1,6 et 3,2 dpm/g. La base de la carotte est certainement plus jeune que 1952.

### 3.2 Station SAG-15

#### 3.2.1 Propriétés physiques du sédiment

Les six premiers centimètres au-dessous de la surface sont de couleur gris foncé. Entre 6 et 8 cm, un horizon oxydé a été observé lors de l'ouverture de la carotte; il surmonte un horizon plus sableux entre 8 et 12 cm. Un vers en décomposition a été trouvé dans l'intervalle 6-10 cm. Le sédiment sous-jacent, en-dessous de 12 cm, est de couleur brun foncé; quelques fragments ligneux sont présents.

Les mesures physiques (*cf.* fig. 3.4) révèlent des profils parallèles de la densité (relation inverse pour la porosité) et de la vitesse de propagation des ondes P. La densité varie entre 1,3 à 1,6 g/cm<sup>3</sup>. Deux horizons de densités maximales ( $> 1,5$  g/cm<sup>3</sup>) sont observés entre 2 et 4 cm et autour de 10 cm de profondeur. Ces deux intervalles se singularisent aussi par une vitesse des ondes P maximales. Ils sont perceptibles dans le profil de la susceptibilité magnétique qui atteint une valeur maximale de  $157 \times 10^{-5}$  SI vers 5 cm de profondeur en dépit du lissage. Ces deux pics de forte densité se singularisent aussi par des changements granulométriques qui pourraient évoquer des événements détritiques. Le plus récent correspond, selon toute probabilité, à la crue de 1996.



**Figure 3.4** Description lithologique sommaire (couleur d'après la Charte Munsell), la densité et la porosité, la vitesse de propagation des ondes P et susceptibilité magnétique de la carotte SAG-15. Note : la description et les mesures physiques ont été effectuées respectivement sur les "pushpres" D et C.



Entre 13 et 25 cm de profondeur, la densité est minimale, d'environ  $1,3 \text{ g/cm}^3$ , et la porosité maximale (78%). La vitesse de propagation des ondes P et la susceptibilité magnétique y sont minimales. Il s'agirait d'un dépôt mis en place par sédimentation hypopycnale. En-dessous de 25 cm, on note une augmentation de la densité qui atteint  $1,5 \text{ g/cm}^3$  à la base de la carotte. Cet intervalle est aussi marqué par une diminution de la porosité et une augmentation de la susceptibilité magnétique. Il représente un sédiment plus compact.

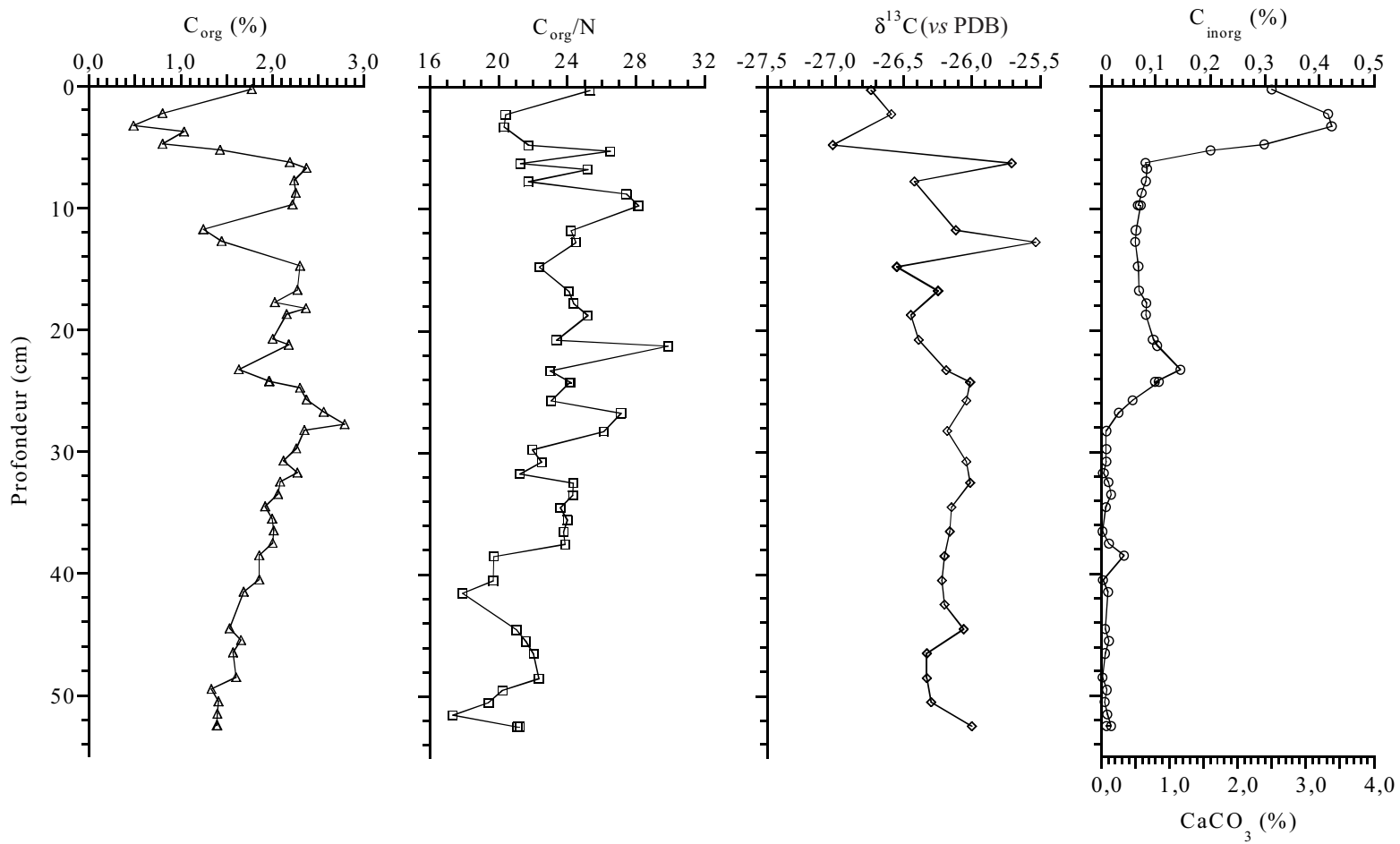
### 3.2.2 Contenu géochimique et isotopique

Le pourcentage de  $C_{\text{org}}$  enregistre des variations significatives, en particulier entre la surface et 30 cm de profondeur (*cf.* fig. 3.5). Deux minimums des teneurs en  $C_{\text{org}}$  (0,4%) sont observés entre 2 cm et 6 cm et autour de 12 cm de profondeur. Ils coïncident avec la base des pics de forte densité. Le pic supérieur se singularise également par des teneurs élevées en  $\text{CaCO}_3$  confirmant ainsi son appartenance à la couche de crue de 1996. Le second pic de densité ne s'accompagne pas de variations significatives des pourcentages de  $\text{CaCO}_3$ . Son origine sédimentaire paraît donc différente de celle de la couche de crue. De 14 cm à ~ 30 cm de profondeur, le contenu en  $C_{\text{org}}$  est élevé (1,5 à 2,5 %) témoignant d'apport de matière organique considérable. Cet intervalle se singularise toutefois par un minimum qui correspond à un petit pic de  $\text{CaCO}_3$  autour de 23 cm. Il pourrait s'agir d'un événement sédimentaire particulier.

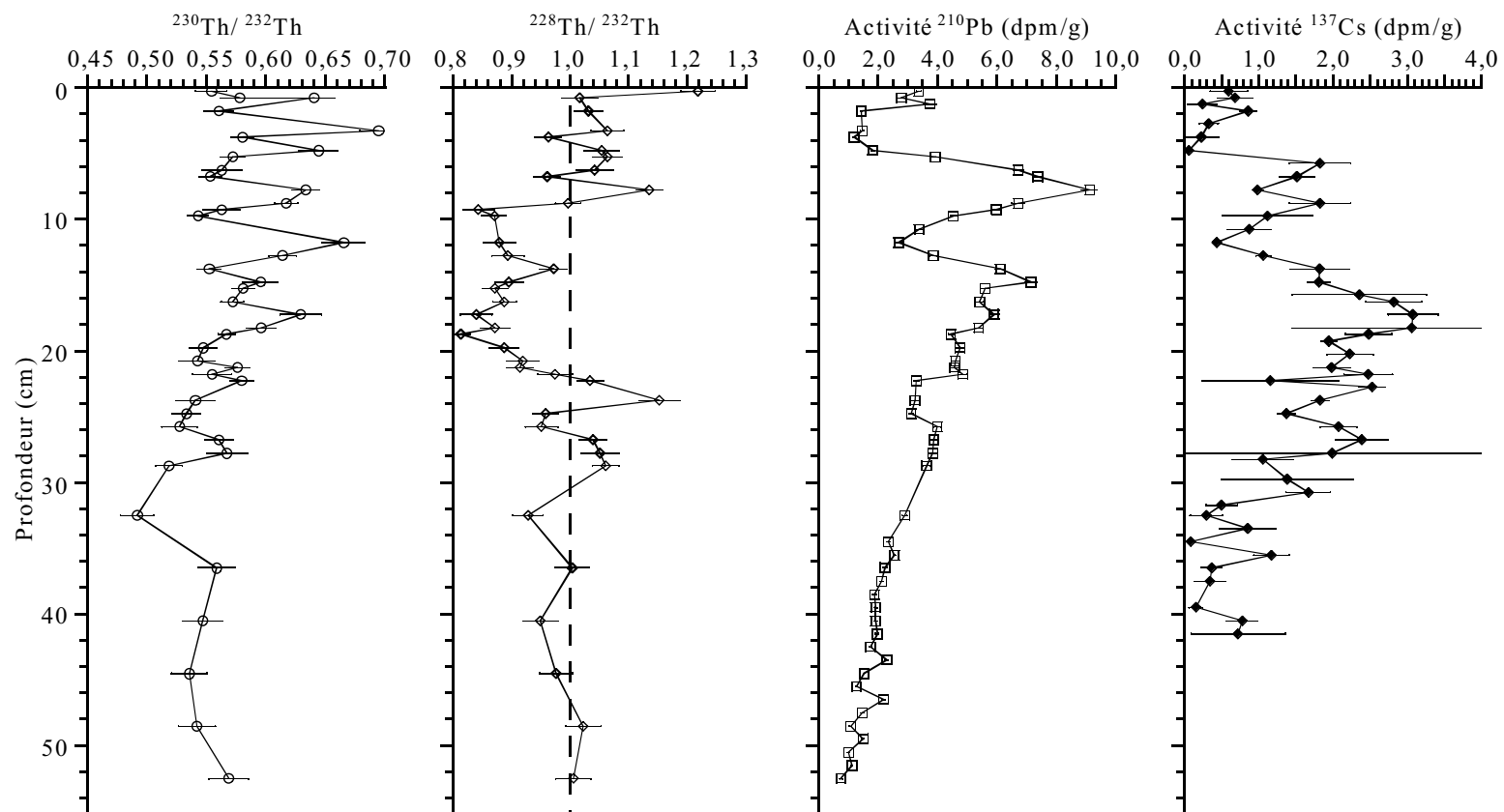
En-dessous de 30 cm, le contenu en  $\text{CaCO}_3$  est très faible, à la limite de détection, et le  $C_{\text{org}}$  augmente de 1 à 2,6 % de bas en haut. Il pourrait s'agir d'une augmentation graduelle des rejets des industries papetières. Les teneurs en  $^{13}\text{C}$  et les rapports  $C_{\text{org}}/\text{N}$  indiquent, dans l'ensemble, des apports de matière organique continentale mais les variations ténues qu'ils enregistrent sont difficiles à interpréter.

### 3.2.3 Profils radio-isotopiques

Le rapport d'activité  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  varie entre 0,45 et 0,7 (*cf.* fig. 3.6) et ne se distingue pas, de ce point de vue, de celui du profil de la station SAG-5. Cela est compatible avec des sources détritiques dominées par la composante silicatée.



**Figure 3.5** Contenu en  $C_{org}$ , rapport  $C_{org}/N$ ,  $\delta^{13}C$  de la matière organique et contenu en  $CaCO_3$  ( $C_{inorg}$ ) du sédiment de la station SAG-15.



**Figure 3.6** Profils des radio-isotopes dans le sédiment de la station SAG-15. Le rapport d'activité  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  de 1 correspond à l'équilibre séculaire.

Le rapport d'activité  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  indique un équilibre séculaire, voire un léger excès en  $^{228}\text{Th}$ , de la surface jusqu'à 9 cm de profondeur. Un défaut significatif de  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  s'observe de 9 à 22 cm de profondeur. La base du profil semble indiquer un retour à l'équilibre séculaire.

L'activité du  $^{210}\text{Pb}$  varie entre 1,0 et 9,5 dpm/g et enregistre de très fortes variations dans la partie sommitale. Les faibles teneurs en  $^{210}\text{Pb}$  entre 2 et 6 cm de profondeur ( $< 2$  dpm/g) et entre 10 et 13 cm ( $< 4$  dpm/g) correspondent aux couches détritiques identifiées sur la base des mesures physiques ou géochimiques. Un maximum de 9 dpm/g s'observe à 8 cm et un second maximum de 7 dpm/g est noté vers 15 cm. En-dessous, une décroissance régulière s'observe jusqu'à la base de la carotte, où un minimum de 0,8 dpm/g peut être noté; il marquerait une limite supérieure admissible pour le  $^{210}\text{Pb}_{\text{soutenu}}$ . Dans le profil de décroissance, une légère anomalie négative est enregistrée entre 22 et 24 cm soit au niveau du petit pic de  $\text{CaCO}_3$ .

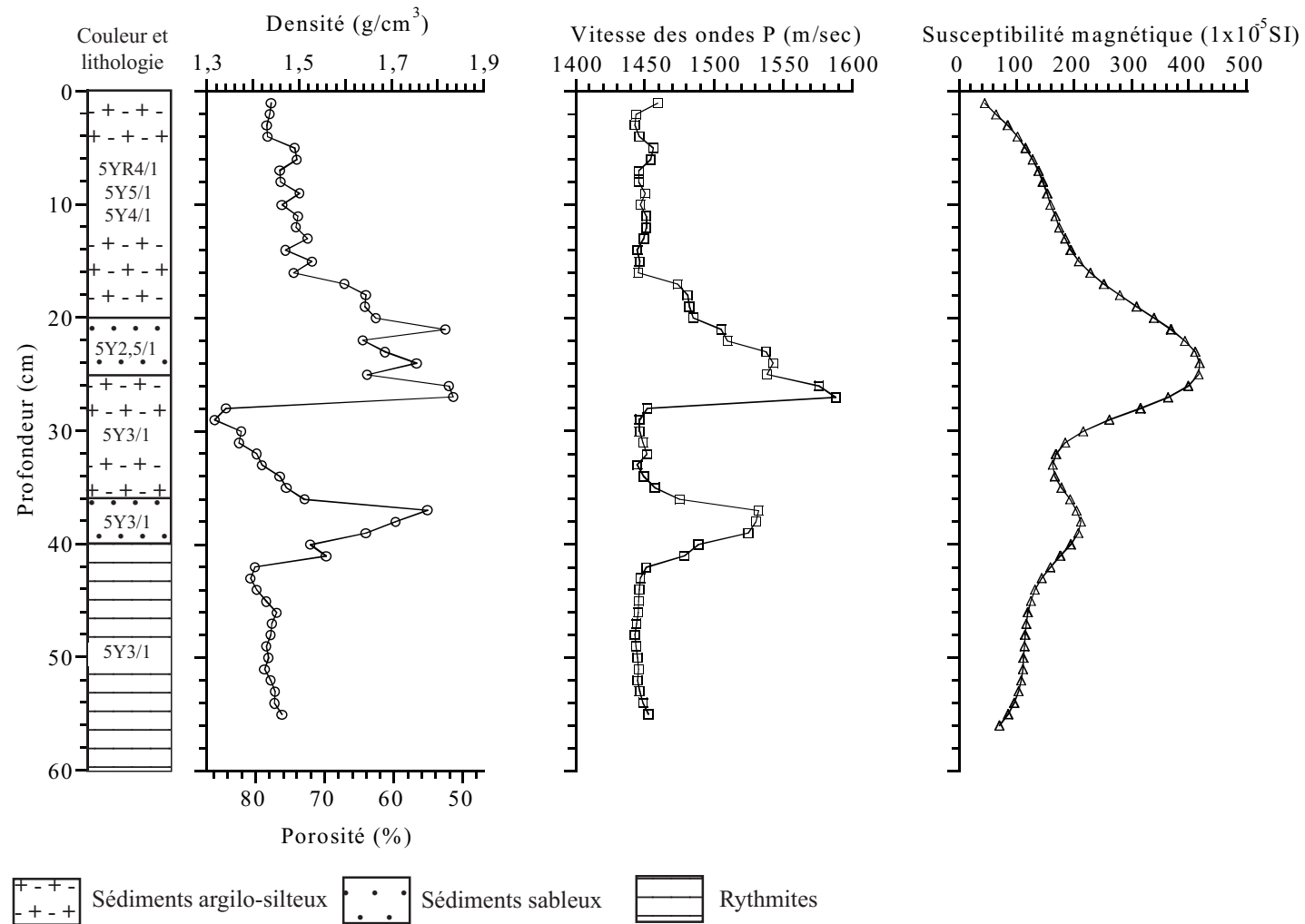
Les teneurs en  $^{137}\text{Cs}$  fluctuent entre 0 et 3,2 dpm/g. Dans les 15 premiers centimètres de la carotte, les variations présentent des analogies avec celles du  $^{210}\text{Pb}$ . La valeur maximale de 3,2 dpm/g est relevée vers 17 cm de profondeur. Au-dessous, les teneurs en  $^{137}\text{Cs}$  décroissent plus ou moins régulièrement jusqu'à la base de la carotte. La courbe de  $^{137}\text{Cs}$  indique que la carotte ne représente sans doute pas plus d'un demi-siècle.

### 3.3 Station Baie-des-Ha! Ha!

#### 3.3.1 Propriétés physiques du sédiment

La couleur du sédiment de cette carotte varie du gris au beige. Le sédiment est argilo-silteux à l'exception de deux horizons plus sableux entre 20 et 25 cm et entre 35 et 40 cm respectivement. Des tubes d'annélides ont été observés; l'un est situé entre 25 cm de profondeur et la base de la carotte. La base de la carotte en-dessous de 40 cm se singularise par des dépôts finement laminés.

Les profils de densité, de vitesse de propagation des ondes P sont parallèles (*cf.* fig. 3.7). Deux maximums de densité ( $> 1,6 \text{ g/cm}^3$ ) sont enregistrés; l'un se situe entre 16 et 28 cm de



**Figure 3.7** Description lithologique sommaire (couleur d'après la Charte Munsell), la densité et porosité, la vitesse de propagation des ondes P et la susceptibilité magnétique dans la carotte Baie-des-Ha! Ha!. Note : la description de la carotte et les mesures physiques ont été effectuées sur les "pushcores" B et A.

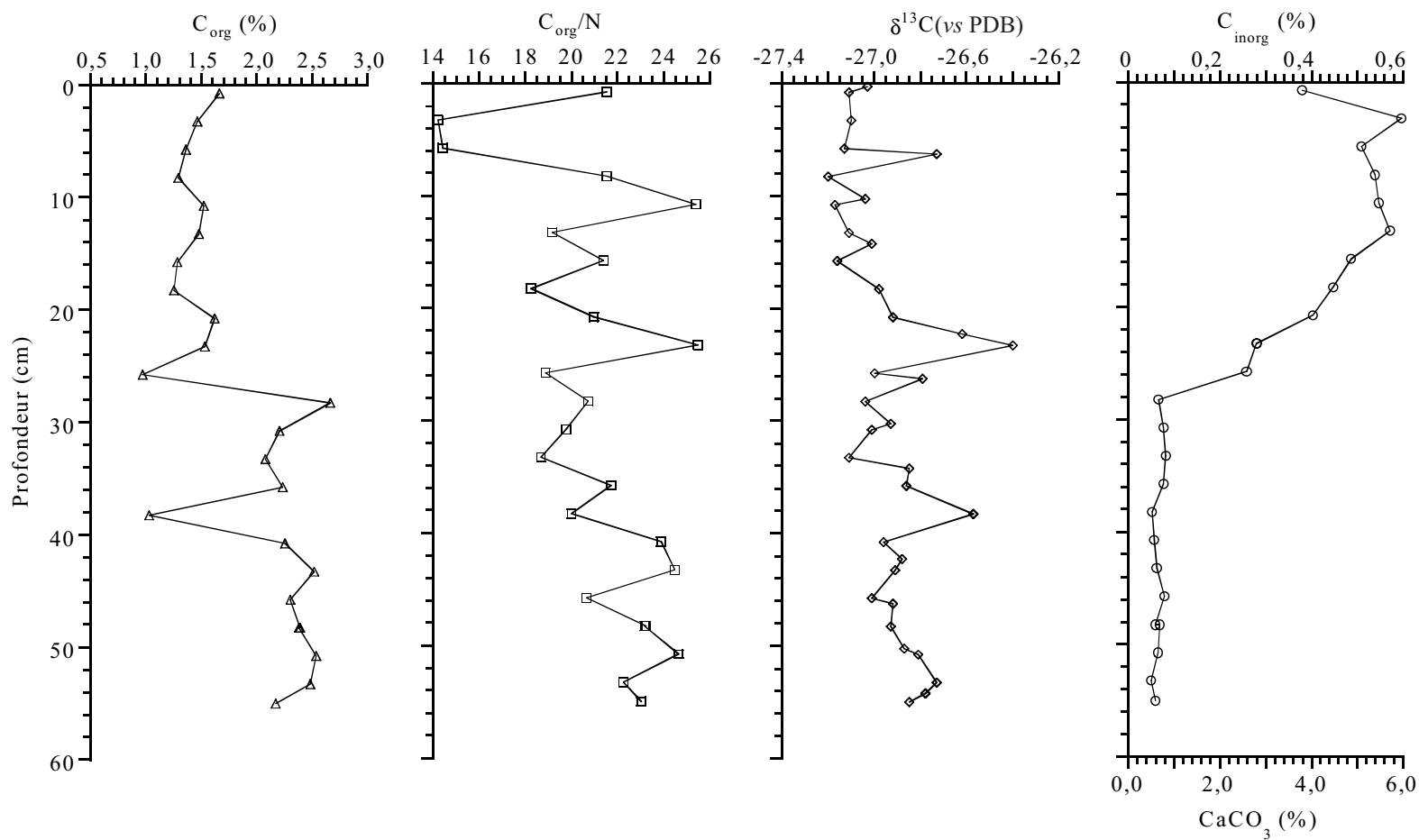
profondeur, l'autre entre 36 et 42 cm. Ces pics correspondent aux couches sableuses. La susceptibilité magnétique illustre des changements sédimentologiques identiques à ceux mis en relief par la densité et la vitesse des ondes P bien que le profil soit lissé. Deux maximums de  $420 \times 10^{-5}$  SI et environ  $200 \times 10^{-5}$  SI sont observés. Outre ces deux maximums de densité et de susceptibilité magnétique qui évoquent des événements détritiques, le sédiment de la carotte entre 0 et 16 cm, 28 et 36 cm et en-dessous de 40 cm, se caractérise par une densité et une vitesse de propagation des ondes P inférieures à  $1,5 \text{ g/cm}^3$  et à  $1455 \text{ m/sec}$ , respectivement, alors que la porosité est supérieure à 70%.

### 3.3.2 Contenu géochimique et isotopique

Le pourcentage de  $C_{\text{org}}$  est stable (1,5 %) dans la partie supérieure de la carotte, entre 0 et 22 cm de profondeur (cf. fig. 3.8). Des valeurs élevées, entre 2,2 et 2,9 %, sont enregistrées de 22 cm à la base de la carotte à l'exception d'un minimum du pourcentage de  $C_{\text{org}}$  (1 %) à 39 cm de profondeur qui correspond à un horizon sableux.

Le rapport  $C_{\text{org}}/N$  varie entre 14 et 26 le long de la carotte. On observe une série de fluctuations et notamment un minimum entre 3 et 7 cm de profondeur ( $C_{\text{org}}/N \sim 14$ ). Les valeurs les plus élevées (environ 26) s'observent vers 11, 24, 40 à 43 et 52 cm de profondeur. La composition isotopique du carbone organique du sédiment varie entre -26,4 ‰ et -27,3 ‰ et s'établit à -26,9 ‰ en moyenne. On note deux maximums ( $\delta^{13}\text{C} > -26,6 \text{ ‰}$ ) à 23 et 38 cm de profondeur.

Le contenu en  $\text{CaCO}_3$  est relativement élevé dans la partie sommitale de la carotte, de 0 à 26 cm de profondeur, indiquant la remobilisation de matériaux carbonatés de la mer de Laflamme, sans doute lors de la crue de 1996, et fluctuent entre 0,05 et 0,6 %. De 28 cm de profondeur à la base de la carotte, les teneurs en  $C_{\text{inorg}}$  sont très faibles. Le profil de  $C_{\text{org}}$ , en revanche, présente des teneurs élevées et stables qui illustrent des conditions de sédimentation hypopycnale à l'exception d'un intervalle à  $\sim 39$  cm de profondeur.



**Figure 3.8** Contenu en  $C_{org}$ , rapport  $C_{org}/N$ ,  $\delta^{13}C$  de la matière organique et contenu de  $CaCO_3$  ( $C_{inorg}$ ) à la station Baie-des-Ha! Ha!.

### 3.3.3 Profils radio-isotopiques

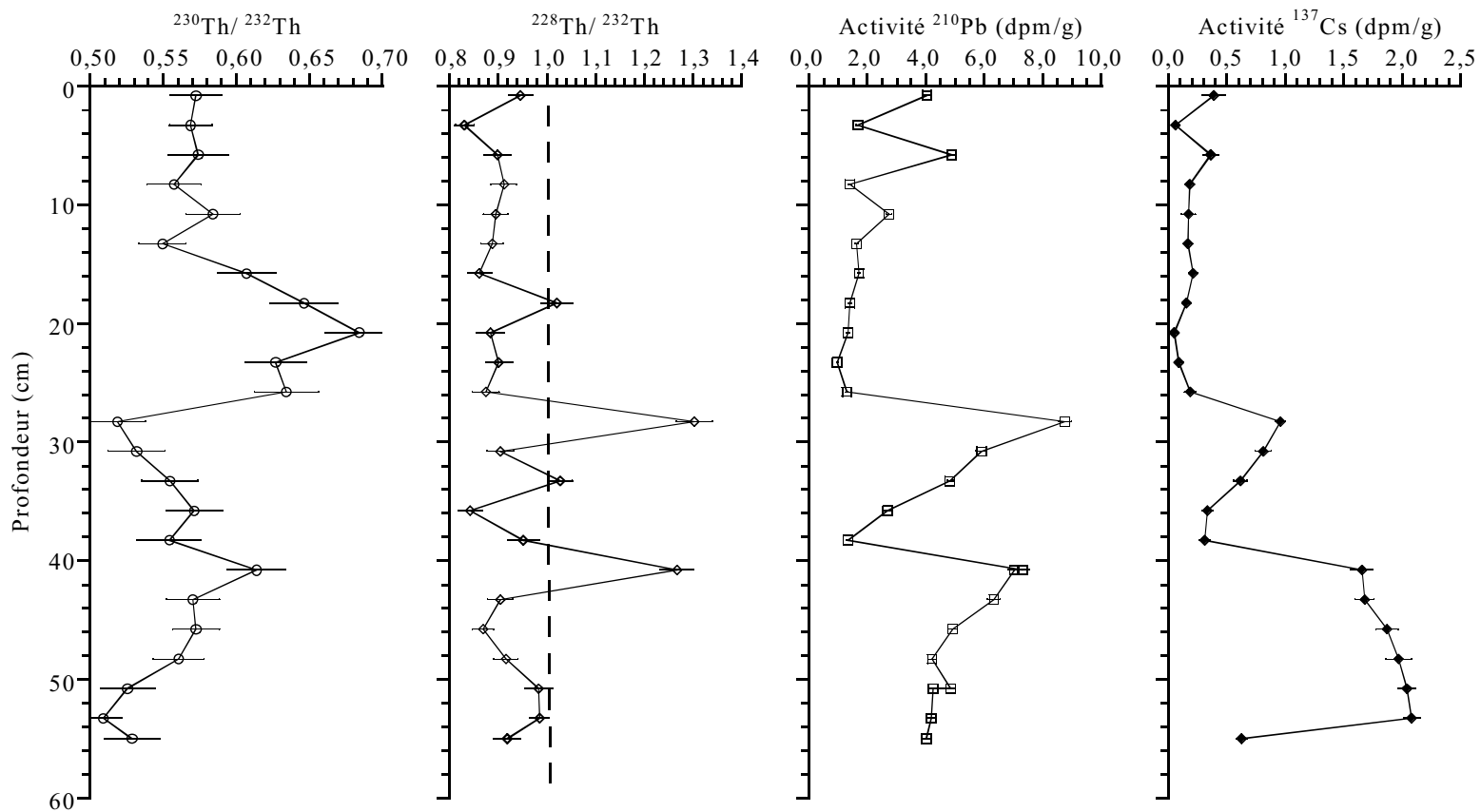
Le rapport d'activité  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  (*cf.* fig. 3.9) varie entre 0,5 et 0,7 rappelant une sédimentation à dominante silicatée comme dans les autres carottes. Toutefois, il présente un maximum entre 18 et 25 cm de profondeur correspondant à un maximum de densité et de susceptibilité magnétique qui englobe une couche sableuse.

Le profil  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  indique un léger défaut en  $^{228}\text{Th}$  sur la totalité du profil, à l'exception de quelques horizons à 18, 28, 33 cm et 41 cm de profondeur où les rapports sont supérieurs ou égaux à 1.

Les profils de  $^{210}\text{Pb}$  et de  $^{137}\text{Cs}$  sont singuliers. L'activité du  $^{210}\text{Pb}$  est particulièrement faible dans la partie supérieure du profil jusqu'à 26 cm de profondeur. Des valeurs de près de 1,0 dpm/g correspondent à celle du  $^{210}\text{Pb}_{\text{soutenu}}$  et indiquent une remobilisation du sédiment, sans doute lors de la crue de 1996. On remarque, dans la partie inférieure de la carotte, deux maximums d'environ 8 dpm/g et 7 dpm/g à 28 et 40 cm de profondeur, respectivement. Ils correspondent à des maximums en  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ . Un minimum d'activité ( $\sim 1$  dpm/g) à 38 cm, correspondant à un horizon sableux peut être associé à une anomalie liée à un événement détritique. La base du profil sous 40 cm présente des activités décroissantes avec la profondeur. Cependant, elles ne permettraient pas d'évaluer la vitesse de sédimentation compte-tenu de la faible longueur du tracé.

Le profil d'activité du  $^{137}\text{Cs}$  présente de fortes analogies avec celui du  $^{210}\text{Pb}$ . De faibles teneurs ( $< 0,5$  dpm/g) marquent la moitié supérieure de la carotte. Deux maximums s'observent, l'un à 28 cm et l'autre en-dessous de 40 cm de profondeur. Les intervalles caractérisés par une faible activité en  $^{137}\text{Cs}$  évoqueraient des couches détritiques alors que la base de la carotte, qui correspond à une sédimentation hypopycnale, se caractérise par des activités élevées indiquant une sédimentation récente (des années 1960 à 1980).





**Figure 3.9** Profils des radio-isotopes dans le sédiment de la station Baie-des-Ha! Ha!. Note : Le rapport d'activité  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  de 1 correspond à l'équilibre séculaire.

## CHAPITRE IV

### DISCUSSION

#### 4.1 Identification des accidents sédimentaires enregistrés dans les carottes du fjord du Saguenay

Dans la région du Saguenay, trois événements majeurs ont marqué les 30 dernières années. En 1971, le glissement de terrain de Saint-Jean-Vianney, situé au nord-ouest de Chicoutimi, qui a entraîné plus de  $7,6 \times 10^6$  m<sup>3</sup> d'argile de la mer de Laflamme vers le bras Nord, fut particulièrement dramatique puisque 31 personnes y ont perdu la vie (Schafer *et al.*, 1980). Une couche sédimentaire accidentelle associée à ce glissement de terrain a été retracée à plusieurs endroits dans le bras Nord (Schafer *et al.*, 1980 ; Mucci et Ederborn, 1992).

En 1988, un séisme de 5,9 sur l'échelle de Richter, dont l'épicentre était situé près de Chicoutimi, a induit plusieurs glissements sous-aquatiques dans le fjord du Saguenay et la Baie-des-Ha! Ha!. Pelletier (1993) a relevé une couche sédimentaire grano-classée dans la Baie-des-Ha! Ha! et dans le bras Nord qu'il associe à une sismite et pourrait correspondre à cet événement.

Enfin, les pluies torrentielles de juillet 1996 sont responsables d'une crue ayant entraîné plus de  $6 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de sédiments terrigènes par les tributaires du fjord (Pelletier, 1997). Une couche sédimentaire accidentelle atteignant jusqu'à 50 cm d'épaisseur, à certains endroits de la Baie-des-Ha! Ha!, s'est mise en place en quelques jours (Locat *et al.*, 1998).

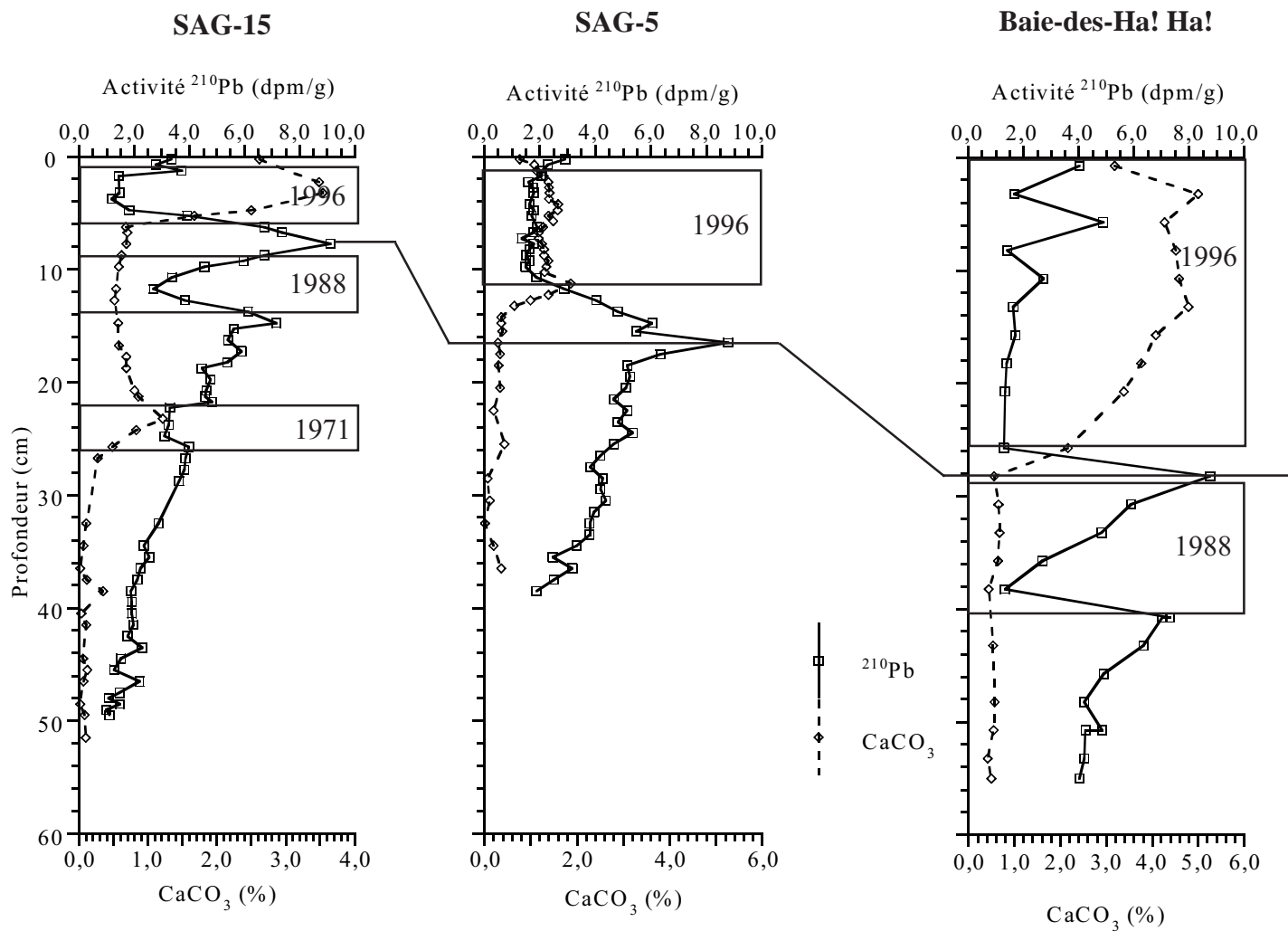
Les analyses réalisées dans les carottes de la Baie-des-Ha! Ha! du bras Nord et du bassin supérieur évoquent une sédimentation récente, représentative de quelques dizaines d'années au plus.

Dans les trois carottes, une zone sommitale riche en  $\text{CaCO}_3$  et caractérisée par des faibles activités en  $^{210}\text{Pb}$  correspondrait à la couche de crue de 1996 (*cf.* fig. 4.1). Cette couche atteint environ 5 cm à SAG-15, 10 cm à SAG-5 et plus de 25 cm à Baie-des-Ha! Ha!. Toutefois, il est difficile de déterminer avec précision la limite inférieure de la couche de crue. Dans les carottes de la Baie-des-Ha! Ha! et de SAG-15, des anomalies dans les profils radio-isotopiques, géochimiques ou sédimentologiques permettent de repérer des couches que l'on associe à des événements détritiques plus anciens que 1996. L'une d'entre elles pourrait résulter du séisme de 1988. Dans la Baie-des-Ha! Ha!, une couche sableuse surmontant un contact très franc évoquerait en effet un dépôt de type turbiditique que l'on peut associer à une sismite, selon toute probabilité à celle de 1988. De façon similaire dans la carotte de SAG-15, une couche sableuse dépourvue de carbonates et marquée par une baisse de  $^{210}\text{Pb}$  peut être associée à la sismite de 1988. Si le contact à la base de cette sismite est franc dans la carotte Baie-des-Ha! Ha!, il ne l'est pas à SAG-15. Par ailleurs, cet événement déritique ne peut être identifié dans la carotte de SAG-5. Cette station localisée sur un talus de faible pente, contrairement à celle des autres stations, est peut-être moins propice à des accumulations turbiditiques.

Dans la carotte de SAG-15, une autre anomalie du  $^{210}\text{Pb}$  est accompagnée d'un pic de  $\text{CaCO}_3$  évoquant la remobilisation d'argile marine postglaciaire. Il pourrait s'agir d'une couche mise en place à la suite du glissement de terrain de Saint-Jean-Vianney.

Dans la carotte de SAG-15, une transition dans les profils de  $\text{CaCO}_3$  et de  $^{210}\text{Pb}$  est observée entre 8 et 5 cm, sans qu'il n'y ait de contact franc à la base de la couche de 1996. De façon similaire, dans la carotte de SAG-5, une transition est observée entre 16 et 8 cm à la base de la couche. Dans un cas comme dans l'autre, il est possible que le caractère "graduel" de la transition soit causé par un mélange synsédimentaire et d'un lissage par bioturbation postsédimentaire.

Contrairement aux stations de SAG-15 et SAG-5, la carotte de la Baie-des-Ha! Ha! présente un contact franc à 26 cm de profondeur. À ce site, la couche de crue est suffisamment épaisse pour avoir limité l'activité biologique dans les sédiments sous-jacents et donc le mélange mécanique. Dans la carotte de SAG-5, il n'y a pas de couches détritiques mises en évidence sous la couche de crue de 1996.



**Figure 4.1** Profils des teneurs en  $^{210}\text{Pb}$  et du contenu en  $\text{CaCO}_3$  aux stations SAG-15, SAG-5 et Baie-des-Ha! Ha!. Les couches sédimentaires accidentelles sont délimitées de façon approximative par des boîtes. L'âge de l'événement auxquelles elles correspondent y est indiqué. Le trait transversal correspond à la teneur moderne de  $^{210}\text{Pb}$  "fossilisé" aux trois stations.

#### 4.2 Les profils de $^{210}\text{Pb}$ et estimation des flux sédimentaires

Au delà de permettre l'identification de couches accidentelles, les profils de  $^{210}\text{Pb}$  présentent des particularités dont la signification n'est pas toujours univoque. La couche de crue de 1996 est relativement facile à distinguer en raison de valeurs particulièrement faibles en  $^{210}\text{Pb}$ , qui correspondent sans doute à celles du  $^{210}\text{Pb}_{\text{soutenu}}$ . En comparaison, la couche associée à la sismite de 1988 présente des teneurs en  $^{210}\text{Pb}$  relativement élevées dans les carottes de SAG-15 et Baie-des-Ha! Ha!. Deux explications sont possibles : le lissage du sédiment par bioturbation dans une couche relativement mince, sinon le remaniement de sédiment présentant des teneurs en  $^{210}\text{Pb}$  plus élevées que dans le cas des autres couches accidentelles. Cette deuxième hypothèse serait conforme à la nature sous-aquatique des glissements induits par le séisme déclencheur.

Les flux sédimentaires de  $^{210}\text{Pb}$  ont été calculés à partir de l'équation ci-dessous de deux façons différentes : l'une tient compte du  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$  présent dans les couches catastrophiques, l'autre non.

$$I_i = \rho_i \cdot ^{210}\text{Pb}_{\text{excès } i}$$

$$\text{où } \rho_i = (1 - \phi) \cdot \rho_s$$

- où  $\rho_i$  : Masse volumique de sédiment sec ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) sous une profondeur  $x$  (cm) ;  
 $^{210}\text{Pb}_{\text{excès } i}$  : Activité du  $^{210}\text{Pb}$  en excès à la profondeur  $x$  (cm) ;  
 $\phi$  : Porosité du sédiment à la profondeur  $x$  (cm) ;  
 $\rho_s$  : Densité du sédiment sec ( $2,5 \text{ g}/\text{cm}^3$ ).

Toutefois, le premier calcul livre les valeurs les plus cohérentes avec les données de la littérature. En effet, le  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$  présent dans les couches accidentelles peut en grande partie avoir été injecté à partir des couches sus-jacentes, à l'exception, peut-être, des couches marquant des glissements sous-aquatiques (*cf. supra*). Les flux sédimentaires sont en effet calculés à l'aide de l'inventaire de la fraction en excès de l'isotope dans le sédiment et en tenant compte de la décroissance radioactive. Les résultats sont reportés dans le tableau 4.1 et comparés aux flux calculés antérieurement par Smith et Walton (1980) à des sites voisins. Ces flux concordent avec ceux calculés en incluant le  $^{210}\text{Pb}$  des couches accidentelles. Smith et Walton (1980) avaient

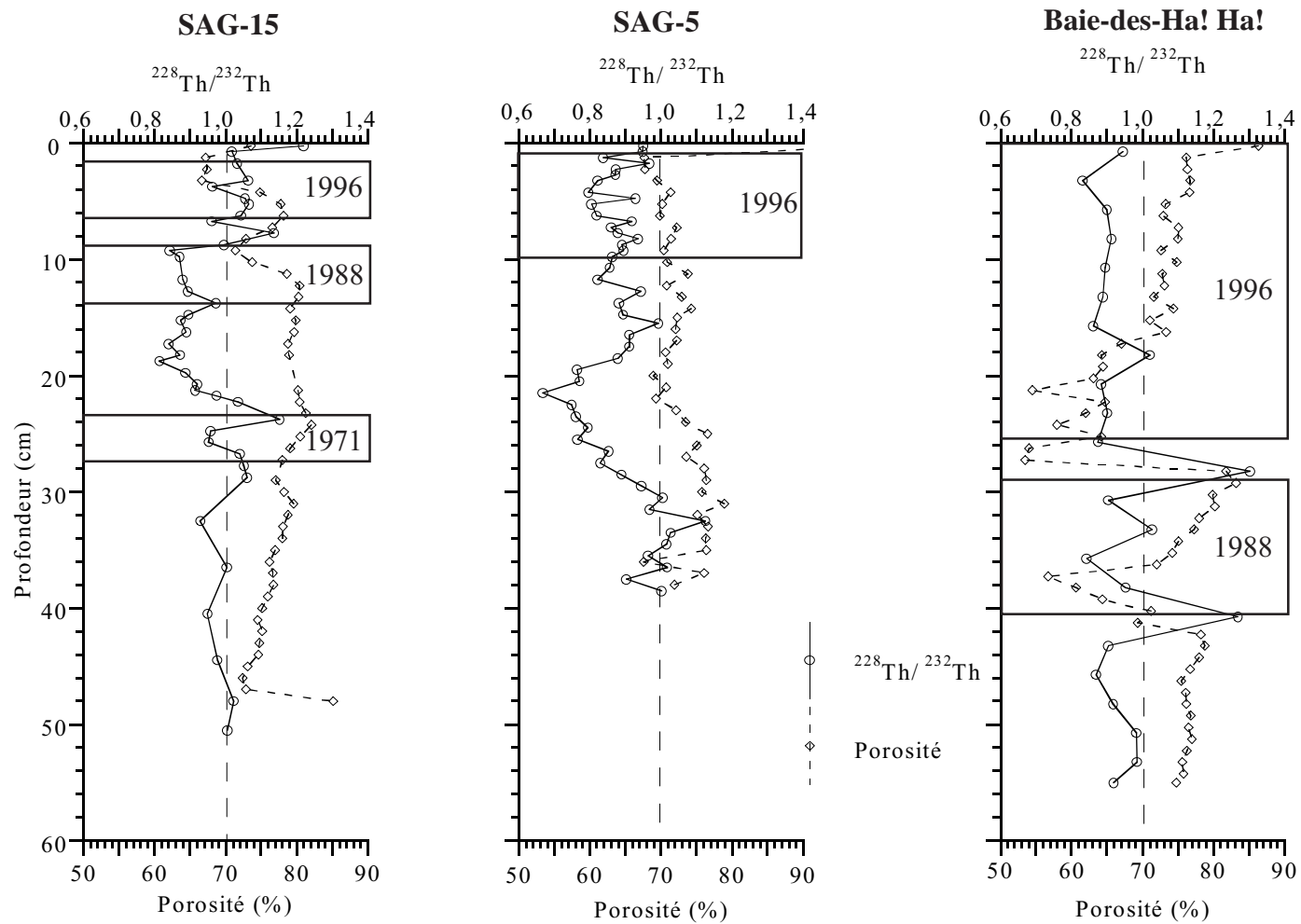
**Tableau 4.1** Flux sédimentaires (en dpm/cm<sup>3</sup>/an) de <sup>210</sup>Pb dans le sédiment du fjord du Saguenay

Station	Flux sédimentaire avec couches accidentelles	Flux sédimentaire sans couches accidentelles	Flux sédimentaire selon Smith et Walton (1980)
SAG-5	2,2	2,0	2,55
SAG-15	2,0	1,5	2,16-2,04
Baie-des-Ha! Ha!	2,7	1,5	-

également tenu compte du <sup>210</sup>Pb des couches accidentelles pour leur calcul en considérant que l'apport de <sup>210</sup>Pb<sub>excès</sub> des sols érodés compris dans les sédiments du glissement de terrain devait être négligeable devant l'apport total de <sup>210</sup>Pb fourni par le bassin hydrographique de la rivière Saguenay.

#### 4.3 Le rapport d'activité <sup>228</sup>Th/<sup>232</sup>Th

Dans les profils estuariens ou lacustres, un excès de <sup>228</sup>Th est observé en surface lorsque le sédiment est issu d'une accumulation récente. Le profil de la station SAG-15 présente un léger excès de <sup>228</sup>Th à la surface (*cf.* fig. 4.2). Par contre, aux stations SAG-5 et Baie-des-Ha! Ha!, aucun excès de <sup>228</sup>Th ne s'observe en surface. La perte de la couche néphéloïde lors du carottage pourrait en être la cause. Une accumulation sédimentaire négligeable entre la crue de 1996 et le carottage en 1997 pourrait aussi l'expliquer. Sous la surface, un intervalle marqué par un défaut de <sup>228</sup>Th est observé dans toutes les carottes, tel que cela est fréquemment rapporté dans la littérature (Deconinck *et al.*, 1983; Huh *et al.*, 1987; Jenanne, 1992; Zhang, 1999). Les défauts en <sup>228</sup>Th sont observés, entre 10 et 22 cm à SAG-15, entre environ 0 et 30 cm à SAG-5 et sur presque toute la carotte de la Baie-des-Ha! Ha!. Ils seraient attribuables à des défauts en <sup>228</sup>Ra ascendant. En effet, les particules sédimentaires perdent du <sup>228</sup>Ra par désorption et par effet de recul au cours du transport sédimentaire, sinon par diffusion dans l'eau porale. La période de cet isotope (T ~ 5,8 ans; *in* Ivanovich et Harmon, 1992) est suffisamment grande pour qu'un



**Figure 4.2** Profils des rapports d'activité  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  et de la porosité.

déséquilibre  $^{228}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$  puisse persister pendant une trentaine d'années, induisant ainsi un rapport  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  inférieur à l'équilibre séculaire au cours du même intervalle.

Quelques autres irrégularités ont été notées dans les profils  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ . À la station SAG-15 (*cf.* fig. 4.2), les unités correspondantes se caractérisent en effet par des défauts en  $^{228}\text{Th}$  sinon à des diminutions rapides des rapports  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  dans les couches accidentelles. Aux limites de ces couches, on note par ailleurs des excès de  $^{228}\text{Th}$ . Ces irrégularités sont perceptibles aux trois stations correspondant globalement à des anomalies observées dans les profils de  $^{210}\text{Pb}$ .

Les pics d'excès de  $^{228}\text{Th}$  aux limites des couches accidentelles, en particulier ceux enregistrés dans la carotte de la Baie-des-Ha! Ha!, sont difficiles à expliquer. Ils pourraient résulter d'une diffusion du  $^{228}\text{Ra}$  intermédiaire soluble dans l'eau, à l'instar de la diffusion en profondeur déjà signalée pour certains éléments par Saulnier et Mucci (2000). En fait, une relation directe entre les excès de  $^{228}\text{Th}$  et la porosité semble s'établir dans les trois carottes. Chacun des pics d'excès en  $^{228}\text{Th}$  correspond en effet à des minimums de densité ou à des maximums de porosité ayant pu ainsi favoriser la diffusion (*cf.* fig. 4.2)

#### 4.4 Le $^{137}\text{Cs}$

Les profils de  $^{137}\text{Cs}$  présentent des courbes semblables à celles du  $^{210}\text{Pb}$ , en particulier dans les carottes de SAG-15 et de la Baie-des-Ha! Ha! (*cf.* fig. 4.3). De façon générale, les couches accidentelles se singularisent par des diminutions sinon des minimums des activités en  $^{137}\text{Cs}$ . Il s'agirait de couches renfermant des matériaux remaniés plus anciens que le début des émissions atmosphériques de  $^{137}\text{Cs}$ .

À la station SAG-15 (*cf.* fig. 4.3), si le profil de  $^{137}\text{Cs}$  se caractérise par des teneurs minimales dans les couches de 1996 et 1988, celle du glissement de terrain de 1971 n'est que difficilement décelable. Sous la sismite de 1988, on observe un pic de  $^{137}\text{Cs}$  suivi d'une diminution jusqu'à la base de la carotte. Une telle distribution verticale ne semble pas être associée aux seuls flux atmosphériques de  $^{137}\text{Cs}$  au vu de la similitude avec le profil de  $^{210}\text{Pb}$ . La distribution du  $^{210}\text{Pb}$  est en effet principalement gérée par la décroissance radioactive de ses ascendants



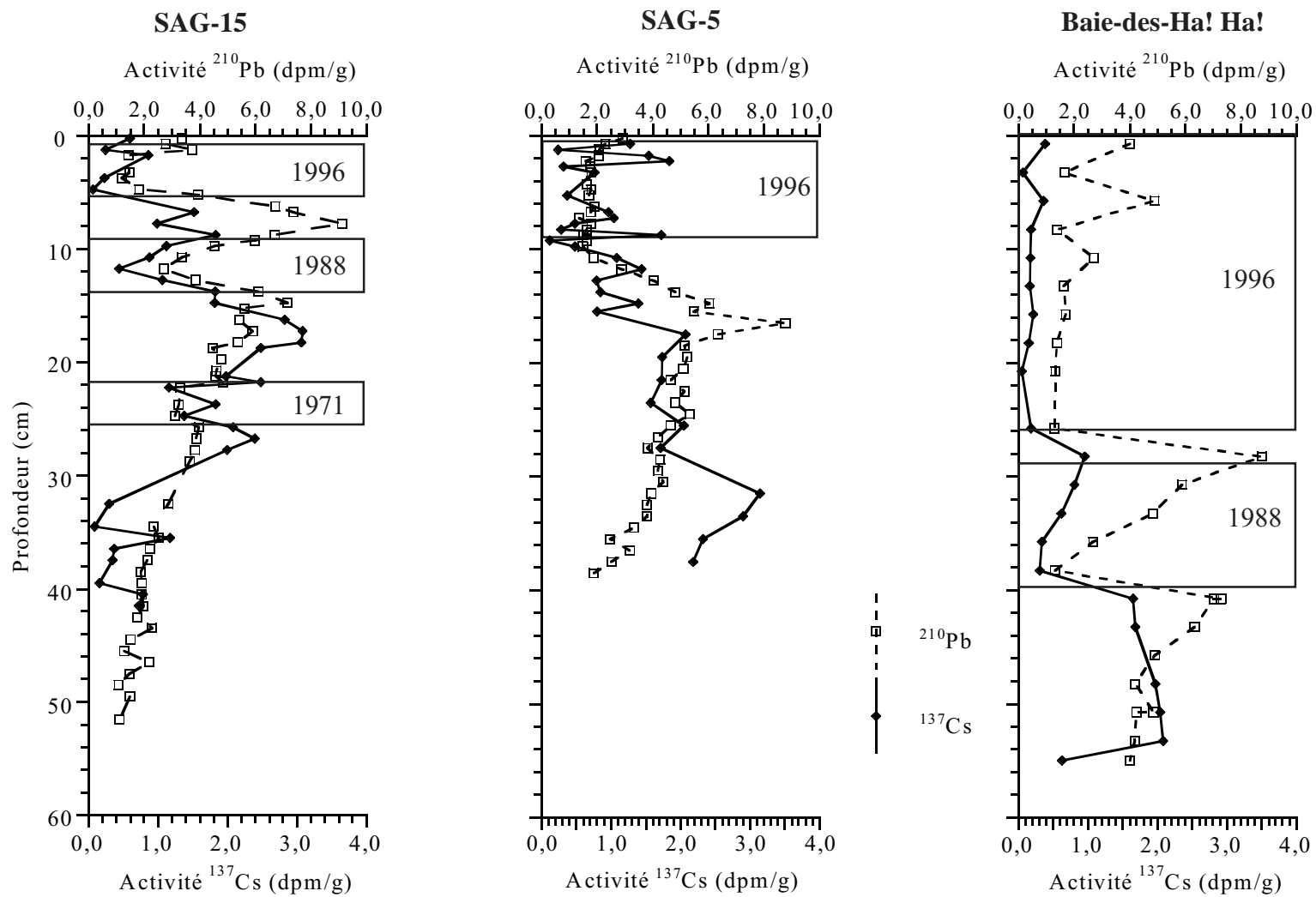


Figure 4.3 Profils des activités de  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{210}\text{Pb}$ .

( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ , etc.) et de ses différentes fractions ( $^{210}\text{Pb}_{\text{soutenu}}$  et  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$ ) et est totalement dépendante des essais thermonucléaires. De plus, le  $^{210}\text{Pb}$  et le  $^{137}\text{Cs}$  sont deux radio-isotopes dont les propriétés géochimiques et les périodes diffèrent. La similitude de leur distribution verticale nous porte à conclure que le mélange par bioturbation et les événements catastrophiques rendraient essentiellement compte de leurs comportements respectifs. Le même raisonnement peut être tenu pour ce qui concerne les profils de  $^{137}\text{Cs}$  et de  $^{210}\text{Pb}$  de la Baie-des-Ha! Ha!, qui se singularisent par un parallélisme presque parfait. Par contre à SAG-5 les profils de  $^{137}\text{Cs}$  et de  $^{210}\text{Pb}$  divergent à la base de la carotte. Ici, la distribution du  $^{137}\text{Cs}$  suivrait de façon générale le profil du flux atmosphérique mesuré dans l'hémisphère Nord depuis les années 60 (*cf.* Health and Safety Fallout Program, 1977).

#### 4.5 Source sédimentaire des couches accidentelles ( $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ )

Tel qu'expliqué dans la section 1.3.4, les variations du rapport  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  dans le sédiment carotté répondent essentiellement aux changements dans les sources détritiques sédimentaires carbonatées *versus* silicatées (*cf.* Kaufman, A., 1993).

Les profils de  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  présentent de faibles oscillations qui indiquent des apports de sources sédimentaires relativement uniformes et d'origine à dominante silicatée (*cf.* fig. 4.4). Si l'on compare les profils de  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  à ceux du carbone inorganique mesuré dans le sédiment (*cf.* fig. 4.4), on ne note aucune corrélation significative ce qui indique que les apports carbonatés sont trop faibles pour affecter les rapports  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  du sédiment. De fait, très peu de roches sédimentaires carbonatées (d'âge Paléozoïque) sont présentes autour du Lac Saint-Jean et en périphérie du fjord du Saguenay (Lasalle et Tremblay, 1978); le till de surface et les argiles de la mer de Laflamme de cette région ne sont que très légèrement carbonatés (Lasalle et Tremblay, 1978). On soulignera toutefois le profil de la Baie-des-Ha! Ha! qui présente, à la base de la couche de 1996, un signal  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  marqué.

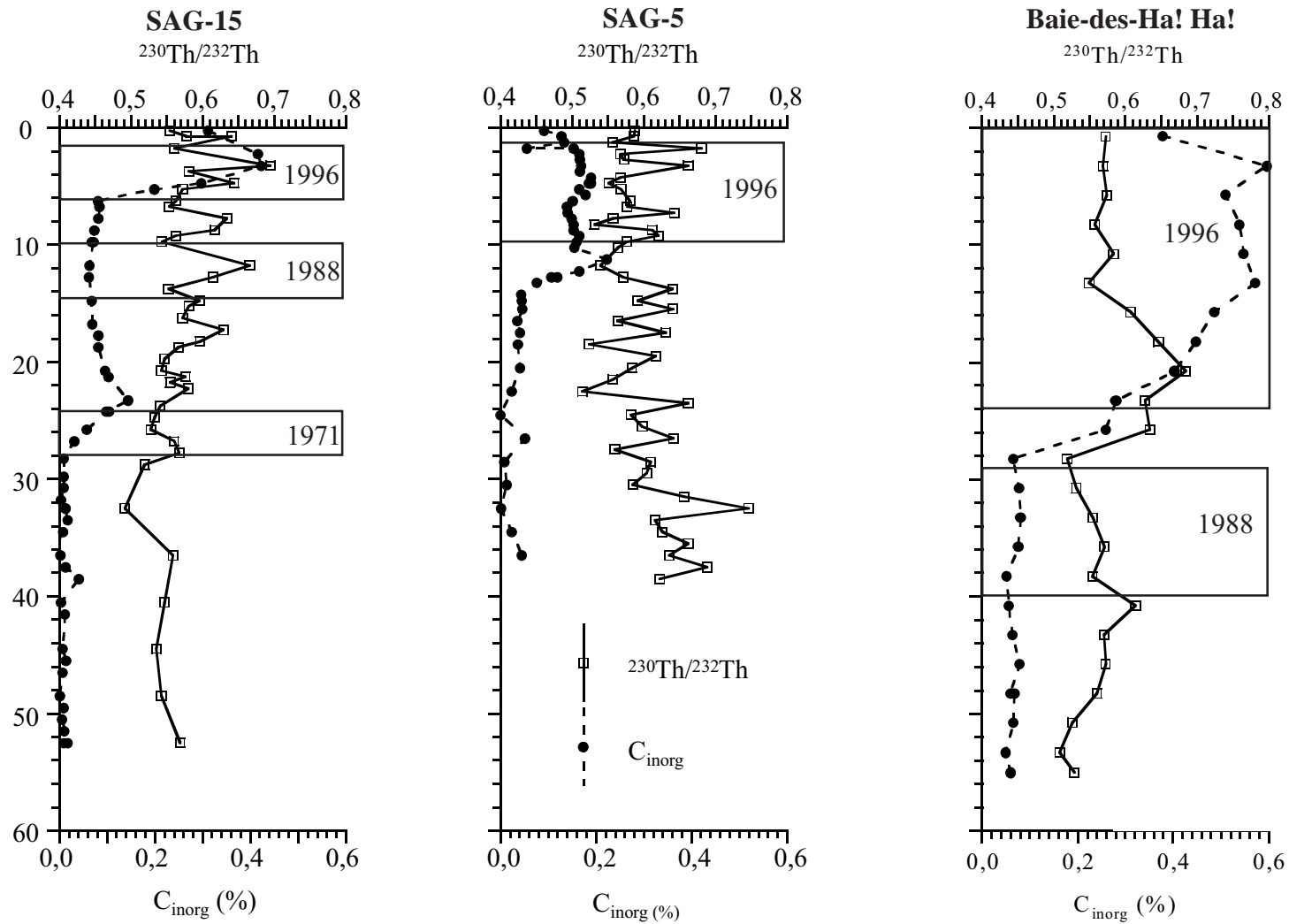


Figure 4.4 Profils de  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  et du pourcentage de  $C_{\text{inorg}}$ .

#### 4.6 Évaluation des vitesses de sédimentation

Les vitesses de sédimentation peuvent, en principe, être déterminées à partir des profils de  $^{210}\text{Pb}$  (*cf.* Appleby et Oldfield, 1984). Cependant, lorsque le sédiment est affecté par un mélange mécanique variable ou par des flux de  $^{210}\text{Pb}$  variables, le calcul des vitesses de sédimentation devient délicat. Le mélange mécanique, sous des conditions sédimentologiques stables, suit une fonction à peu près constante; toutefois, lors d'apports détritiques importants et de la mise en place rapide du sédiment, la fonction de mélange change. Plusieurs indices portent à croire que la bioturbation est un phénomène relativement important dans le fjord du Saguenay et dans la Baie-des-Ha! Ha!. Il est par ailleurs difficile d'évaluer les coefficients de mélange dans ce type d'environnement, en égard aux changements et accidents sédimentologiques fréquents, ce qui complique le calcul de vitesses de sédimentation.

L'estimation même du  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$  requiert une bonne connaissance des teneurs en  $^{210}\text{Pb}_{\text{soutenu}}$ . Or, on peut admettre une activité régionale de  $^{210}\text{Pb}_{\text{soutenu}}$  de l'ordre de 1 dpm/g pour la sédimentation argilo-silteuse du fjord du Saguenay (Zhang, 1999). Il n'est pas démontré que cette valeur puisse être appliquée aux couches accidentelles puisque, comme il a été discuté plus haut, leur rapport  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  présente de faibles oscillations (entre 0,5 et 0,7). On admettra donc que l'activité du  $^{210}\text{Pb}$  soutenu ( $\sim 1,0$  dpm/g) est connue, au mieux, à  $\pm 20\%$  près, soit à la variabilité du rapport  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  près.

Une estimation des vitesses de sédimentation a été réalisée à partir de trois modèles différents, soit celui dit "de pente", le CIC et le CRS (tableau 4.2).

##### 4.6.1 Le modèle "de pente"

La première estimation a été effectuée sur la base de la décroissance exponentielle du  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$ , observée par exemple aux stations SAG-5 et SAG-15, à l'aide de la pente du logarithme népérien du  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$ . Les vitesses de sédimentation ont d'abord été calculées en incluant les couches sédimentaires accidentelles (*cf.* fig. 4.5). Ce calcul fixe une limite pour la vitesse de sédimentation. En effet, le mélange de sédiment riche en  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$  avec les couches accidentelles qui en sont dépourvues, affecte le temps de relaxation de la courbe exponentielle, et ainsi le

calcul sur cette base. Une vitesse de sédimentation maximale de l'ordre de 0,8 cm/an a ainsi pu être établie aux stations SAG-5 et SAG-15.

La vitesse de sédimentation a également été évaluée en soustrayant les couches accidentelles présentes (*cf.* fig. 4.5). Elle s'établit à 0,6 cm/an à SAG-5 et à 0,5 cm/an à SAG-15. Aucune estimation n'a pu être faite pour la station Baie-des-Ha! Ha! puisque la décroissance exponentielle de l'activité du  $^{210}\text{Pb}$  n'est pas clairement exprimée dans cette carotte. Une carotte-boîte plus longue aurait probablement permis d'observer la base du profil du  $^{210}\text{Pb}$ , et ainsi de déterminer la vitesse de sédimentation.

#### 4.6.2 Le modèle CIC

La seconde estimation a été faite à partir du modèle CIC (*constant initial concentration*). Ce modèle suppose que les flux de  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$  et sédimentaire sont constants dans le temps. L'âge du sédiment est alors déterminé par le rapport des activités du  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$  dans deux horizons de sédiment selon l'équation suivante (*e.g.* Goldberg, 1963 ; Krishnaswami *et al.*, 1971) :

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$\text{D'où } t = -\frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{A}{A_0} \right)$$

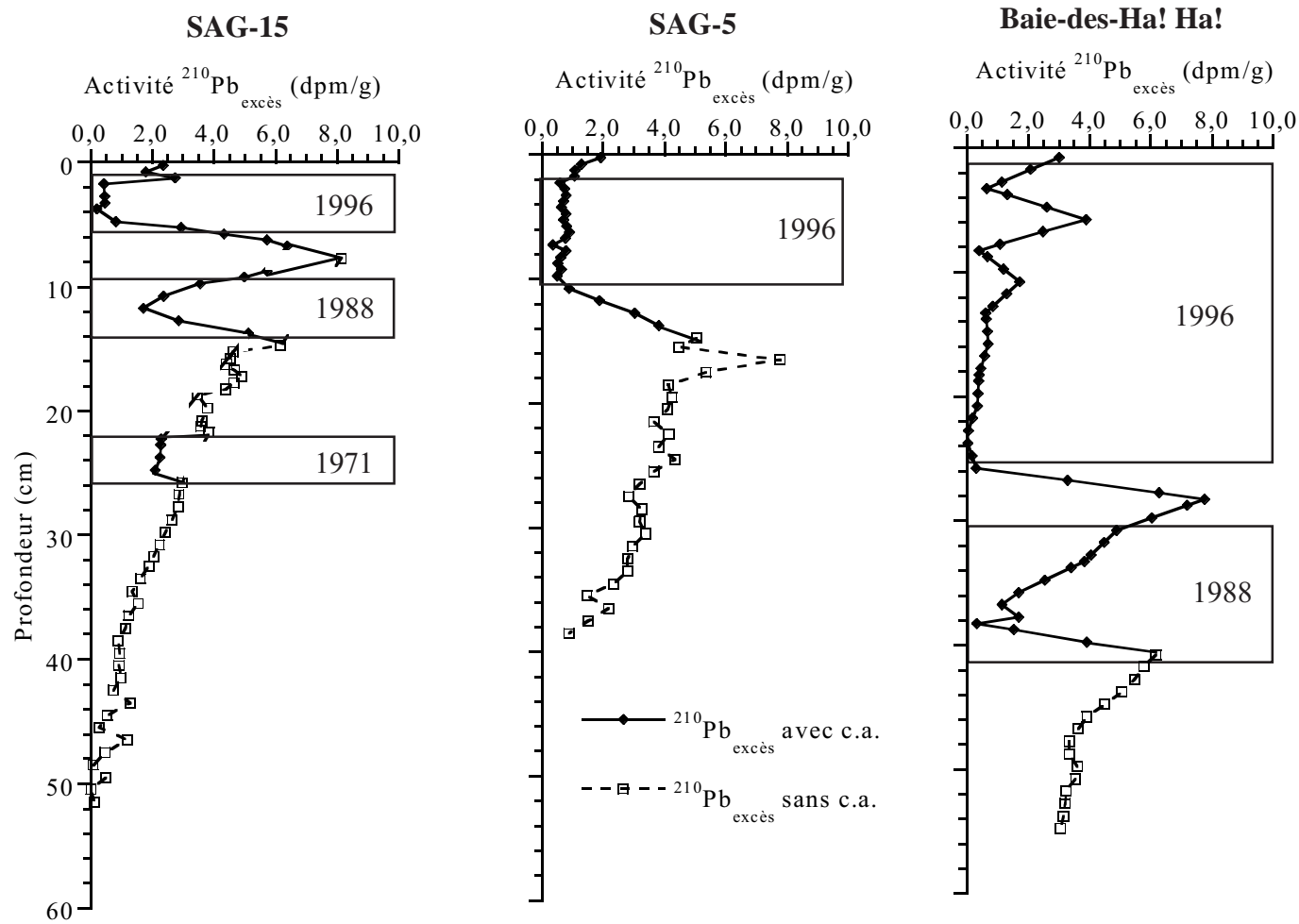
où  $A$  : Activité du  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$  (dpm/g) sous une profondeur  $x$  (cm) ;

$A_0$  : Activité du  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$  (dpm/g) en surface ( $x = 0$  cm) ;

$\lambda$  : Constante de désintégration radioactive du  $^{210}\text{Pb}$  ( $0,031 \text{ an}^{-1}$ ) ;

$t$  : Âge (année) du sédiment à la profondeur  $x$  (cm).

Encore une fois, les calculs ont été effectués d'abord en prenant en compte les couches accidentelles présentes à chaque station et, ensuite, sans ces couches. Ce modèle diffère quelque peu de celui de la pente. D'abord, contrairement au premier modèle, le modèle CIC se base sur l'activité de  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$  en surface de la carotte. Cependant, l'échantillon de surface étant intégré à la couche de la crue à toutes les stations, le  $A_0$  ne représente pas ce qu'il serait dans des conditions stables. Il a donc été déterminé à l'aide de l'ordonnée à l'origine de la pente du logarithme népérien du  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$  sans les couches accidentelles pour les stations SAG-5 et SAG-15.



**Figure 4.5** Diagrammes illustrant les activités de  $^{210}\text{Pb}$  utilisées pour le calcul des vitesses de sédimentation avec et sans les couches accidentelles (c.a.). Toutes les valeurs ont été utilisées dans le premier cas. Seules les valeurs illustrées par des carrés ont été utilisées dans le second cas.

Puisqu'aucune estimation des vitesses de sédimentation à l'aide de la pente n'a été faite à la station Baie-des-Ha! Ha!, le  $A_o$  a été estimé en se basant sur la valeur la plus élevée en  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$  qui a été relevée au-dessous de la couche accidentelle de 1996. Les vitesses de sédimentation issues du modèle CIC ont été déterminées à partir de la moyenne de la vitesse de sédimentation calculée à chaque niveau dans lequel a été réalisé des analyses du  $^{210}\text{Pb}$ . À l'inverse, le modèle de la pente utilise le meilleur coefficient de corrélation linéaire entre les points.

Le modèle CIC révèle, à la station SAG-5, des vitesses de sédimentation de l'ordre de 0,7 cm/an avec les couches accidentelles et de 0,8 cm/an sans les couches accidentelles. La vitesse de sédimentation calculée avec les couches accidentelles devrait être plus élevée car elle tient compte de la couche accidentelle de la crue de 1996. Cependant, compte-tenu des faibles teneurs en  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$  au niveau de cette couche, le modèle calcule un âge  $t$  très vieux pour un sédiment qui s'est déposé récemment. Une fois que les vitesses de sédimentation ont été calculées pour chaque valeur de  $t$  et pondérée pour toute la carotte, on constate que les valeurs correspondant à la couche de crue influencent considérablement la vitesse moyenne probable. Ainsi, calcule-t-on une vitesse de sédimentation plus faible lorsqu'il y a des couches accidentelles que s'il n'y en a pas. Ce modèle ne peut donc être utilisé ici.

#### 4.6.3 Le modèle CRS

Enfin le dernier modèle employé correspond au modèle CRS (*constant flux sediment accumulation rate*). Ce modèle suppose que le flux de  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$  vers le sédiment est constant, mais que la vitesse de sédimentation peut varier. L'âge du sédiment  $t$  est alors déterminé par l'expression suivante (*e.g.* Appleby et Oldfield, 1978) :

$$I = I_i e^{-\lambda t}$$

$$\text{D'où } t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{I}{I_i}$$

où  $I$  : Inventaire (dpm/cm<sup>2</sup>) des activités du  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$  pour l'ensemble du profil ;  
 $I_i$  : Inventaire (dpm/cm<sup>2</sup>) des activités de  $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$  pour une profondeur  $x$  (cm) ;  
 $\lambda$  : Constante de désintégration radioactive du  $^{210}\text{Pb}$  (0,031 cm<sup>-1</sup>).

L'inventaire  $I_i$  est déterminé à l'aide de la formule suivante :

$$I_i = \rho_i \cdot {}^{210}\text{Pb}_{\text{excès } i}$$

$$\text{où } \rho_i = (1 - \phi) \cdot \rho_s$$

où  $\rho_i$  : Masse volumique de sédiment sec ( $\text{g/cm}^2$ ) sous une profondeur  $x$  (cm) ;

${}^{210}\text{Pb}_{\text{excès } i}$  : Activité du  ${}^{210}\text{Pb}$  en excès à la profondeur  $x$  (cm) ;

$\phi$  : Porosité du sédiment à la profondeur  $x$  (cm) ;

$\rho_s$  : Densité du sédiment sec ( $2,5 \text{ g/cm}^3$ ).

Pour le calcul de la masse volumique, on a utilisé les mesures de porosité dans la carotte et une densité approximative de  $2,5 \text{ g/cm}^3$  de la fraction minérale du sédiment, tel que suggéré par des publications sur le fjord du Saguenay (Smith et Walton, 1980).

Le calcul des vitesses de sédimentation a été réalisé en tenant en compte des couches accidentelles puis en les excluant. Lorsqu'on tient compte de ces dernières, les vitesses de sédimentation sont de l'ordre de  $0,3 \text{ cm/an}$  à SAG-5, de  $0,4 \text{ cm/an}$  à SAG-15 et de  $0,4 \text{ cm/an}$  dans la Baie-des-Ha! Ha!. Sans les couches accidentelles, elles s'établissent respectivement à  $0,2 \text{ cm/an}$ , à  $0,3 \text{ cm/an}$  et à  $0,1 \text{ cm/an}$ .

**Tableau 4.2** Vitesse de sédimentation (cm/an) pour chaque station et selon le modèle utilisé

Station	Pente (avec couches)	Pente (sans couches)	CRS (avec couches)	CRS (sans couches)	Littérature	
					Smith et Walton, (1980)	Barbeau <i>et</i> <i>al.</i> , (1981)
SAG-5	0,8	0,6	0,3	0,2	0,5	0,9
SAG-15	0,8	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2
Baie-des-Ha! Ha!	-	-	0,4	0,1	-	0,2



#### 4.6.4 Comparaison entre les vitesses de sédimentation calculées

Les résultats obtenus varient selon la méthode utilisée. En comparant les résultats obtenus avec ceux de la littérature (*cf.* Smith et Walton, 1980 ; Barbeau *et al.*, 1981), le modèle CRS, sans prendre en compte les couches accidentelles, semble le plus cohérent avec les données de la littérature pour les stations SAG-15 et Baie-des-Ha! Ha!, ces stations étant caractérisées par des vitesses de sédimentation variables. Cependant, le modèle de la pente sans les couches accidentelles semble satisfaisant à la station SAG-5, qui est beaucoup moins affectée par les événements catastrophiques que les autres stations étudiées. Suite aux différents calculs des vitesses de sédimentation, il est possible de déterminer la vitesse de sédimentation réelle pour chaque station en considérant toutes les couches accidentelles identifiées. Le modèle CRS calculé avec les couches accidentelles semble également le plus cohérent avec les données de la littérature.

Une estimation des vitesses de sédimentation a également été réalisée à partir du profil de  $^{137}\text{Cs}$  pour les stations SAG-5 et Baie-des-Ha! Ha!. Le maximum des teneurs en  $^{137}\text{Cs}$  recensé dans ces carottes (1963) s'observe à 32 cm de profondeur à la station SAG-5, à 17 cm de profondeur à la station SAG-15, et entre 41 et 54 cm de profondeur à la station Baie-des-Ha! Ha!. Les vitesses de sédimentation seraient de l'ordre de 0,7 cm/an à la station SAG-5 et de 0,6 cm/an à la station de la Baie-des-Ha! Ha!. À la dernière station, le calcul est basé sur l'activité en  $^{137}\text{Cs}$  la plus élevée à la base du sédiment, soit à 53 cm de profondeur. Le pic d'activité maximum du  $^{137}\text{Cs}$  étant étalé sur quelques centimètres de profondeur dans le sédiment, il est possible que le maximum d'activité en  $^{137}\text{Cs}$  de 1963, proprement dit, n'ait pas été réellement atteint dans ce carottage.

#### 4.7 Effet des bioturbations sur les limites des couches accidentelles

Il y a de nombreuses indications de bioturbation dans les carottes que nous avons étudiées. Les plus évidentes sont les macro-organismes vivants ou en décomposition sinon les tubes de vers qui ont été observés jusqu'à 54 cm de profondeur dans la carotte de la Baie-des-Ha! Ha! et à 10 cm dans la carotte SAG-15. Des variations de la porosité en profondeur sont sans doute en partie liées à l'activité biologique d'organismes fousseurs. Des excès significatifs de  $^{228}\text{Th}$  dans les carottes indiqueraient une diffusion via le  $^{228}\text{Ra}$  à la faveur d'une certaine porosité dans le

sédiment, surtout aux limites des couches accidentelles. Les couches détritiques se caractérisent par une densité et une compaction relativement élevée limitant l'activité benthique.

Entre la crue de 1996 et l'échantillonnage des carottes en 1997, moins de 5 mm de sédiments hypopycniaux se sont accumulés, d'après les évaluations de vitesses de sédimentation réalisées ci-dessus. Or, une zone de mélange du  $^{210}\text{Pb}$  de  $\sim 2$  cm est observée au sommet des carottes de SAG-15 et de SAG-5; à la Baie-des-Ha! Ha!, des fluctuations entre le  $^{210}\text{Pb}_{\text{soutenu}}$  de la couche de crue et des activités supérieures atteignant 5 dpm/g sont enregistrées jusqu'à 12 cm de profondeur. Il pourrait s'agir d'un signe précoce de bioturbation. Il paraît donc évident que les bioturbations ont affecté la couche de crue en moins de treize mois.

Les profils d'activité du  $^{210}\text{Pb}$  à la base de la couche de crue de 1996 présentent une transition sur 2 cm dans la Baie-des-Ha! Ha!, environ 4 cm à SAG-15, et près de 7 cm à SAG-5. De telles transitions indiquent qu'il y a eu un lissage par mélange mécanique du signal, sans doute sous l'effet de bioturbation. Ce lissage affecte une portion significative de la couche de crue, soit près de 50% à SAG-15 et environ 40% à SAG-5. Le lissage est de moins de 10% à la Baie-des-Ha! Ha!.

En dessous de la couche de crue de 1996 et de la zone lissée, un maximum d'activité du  $^{210}\text{Pb}$  est observé : il s'établit à  $\sim 9$  dpm/g aux trois stations et constituerait une valeur probable pour le  $^{210}\text{Pb}$  moderne du bassin dont le signal serait "fossilisé" et préservé en dépit de la bioturbation (*cf.* fig. 4.1).

Le profil de  $^{210}\text{Pb}$  dans la couche du glissement aquatique de 1988 évoque également un mélange mécanique du sédiment. Un lissage des limites supérieure et inférieure, sur au moins 2 cm, est enregistré à SAG-15. Il s'étale sur 10 cm dans la carotte Baie-des-Ha! Ha!; à SAG-5 la couche n'est pas détectable par les profils radio-isotopiques, soit en raison d'une accumulation détritique trop faible, soit en raison d'un mélange mécanique trop poussé, sinon les deux.

## CONCLUSIONS

Les mesures physiques et les analyses géochimiques et radio-isotopiques qui ont été réalisées dans trois carottes-boîte du secteur amont du Saguenay révèlent un milieu sédimentaire extrêmement dynamique.

Les trois carottes couvrent quelques dizaines d'années de sédimentation; elles renferment des dépôts représentatifs d'épisodes distincts avec l'alternance de couches sédimentaires de type hypopycnal et d'accumulations sédimentaires détritiques. En particulier, la crue de 1996 est responsable d'une accumulation épaisse (7 à 30 cm selon la station) de sédiment remaniant des argiles carbonatées de la mer de Laflamme et se singularisant par une faible activité de  $^{210}\text{Pb}$  et de  $^{137}\text{Cs}$ . D'autres couches détritiques sont associées à des événements catastrophiques, tels le séisme de 1988 et le glissement de terrain de St-Jean-Vianney en 1971. En plus de la complexité des mécanismes sédimentaires, la bioturbation joue un rôle déterminant sur la distribution des radio-isotopes, notamment le  $^{210}\text{Pb}$ . Elle serait en effet responsable d'un lissage sur quelques centimètres aux limites supérieure et inférieure des couches sédimentaires accidentelles. En outre, les profils de  $^{228}\text{Th}$  tendent à illustrer une diffusion significative de son ascendant, le  $^{228}\text{Ra}$ , qui est soluble dans l'eau.

Les trois carottes présentent une certaine cohérence régionale. En effet, il a été noté que les teneurs en  $^{210}\text{Pb}$  dans la couche de crue de 1996 sont de  $\sim 1$  dpm/g aux trois stations et correspondent au  $^{210}\text{Pb}_{\text{soutenu}}$  de la région. Les profils de  $^{210}\text{Pb}$  présentent également un maximum des teneurs ( $\sim 9$  dpm/g) à la base de la couche de crue caractérisant ainsi le signal moderne de  $^{210}\text{Pb}$  des sédiments "fossilisés" il y a quelques années et qui a été préservée malgré la bioturbation. Il a également été démontré que la distribution du  $^{137}\text{Cs}$  n'était pas gérée par les flux atmosphériques de cet isotope aux stations SAG-15 et Baie-des-Ha! Ha! mais plutôt par des phénomènes externes tels que la bioturbation et les couches accidentelles. En effet, le parallélisme des profils  $^{210}\text{Pb}$  et  $^{137}\text{Cs}$ , malgré leur comportement et leur origine différents, a permis de tirer cette conclusion.

Malgré la présence de couches accidentelles de différentes origines, le rapport d'activité du  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  se singularise par des valeurs inférieures à 1, caractérisant ainsi des apports détritiques principalement silicatés peu importe le type de sédimentation (hypopycnale *versus* couches accidentelles).

Les vitesses de sédimentation calculées sont également cohérentes avec la littérature. En dépit des différences relativement importantes selon le modèle utilisé, les vitesses de sédimentation sont similaires entre les stations se singularisant par des vitesses supérieures à 0,1 cm/an et inférieures à 0,6 cm/an.

Même si l'on observe certaines cohérences régionales, il n'en reste pas moins que quelques particularités locales sont représentées par les carottes. Celles-ci sont témoin de la complexité spatiale du milieu qu'est le fjord du Saguenay. D'abord, l'épaisseur des couches accidentelles varie d'une station à l'autre en fonction de la proximité des apports détritiques. On observe, par exemple, que la couche de crue de 1996 de la station Baie-des-Ha! Ha! est au moins deux fois plus épaisse que celle des autres stations. Dans le même ordre d'idées, certaines couches ne sont pas détectées partout, telle que la turbidite de 1988 à la station SAG-5; un signal local de l'événement peut en être responsable. Il peut également y avoir eu atténuation du signal à la suite d'un mélange mécanique.

Cette étude nous permet de conclure qu'il est difficile de caractériser un environnement aussi perturbé que le fjord du Saguenay en ne se basant que sur quelques stations. En effet, les stations étudiées dans le cadre de ce projet ne reflètent que quelques particularités locales du fjord, et non son ensemble. L'étude d'une série chronologique longue dans cet environnement n'établirait que les événements détritiques à proximité de ce site. Une étude de probabilité des événements catastrophiques devra tenir compte de ces particularités.

## RÉFÉRENCES

- Anderson, R. F., S. L. Schiff et R. H. Hesslein. 1987. Determining sediment accumulation and mixing rates using  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , and others tracers : Problems due to postdepositional mobility or coring artifacts. *Journal Canadien des Sciences Halieutiques et Aquatiques*, vol. 44, p. 231-250.
- Appleby, P. G. et F. Oldfield. 1978. The calculation of  $^{210}\text{Pb}$  dates assuming a constant rate of supply of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  to the sediment. *Catena*, vol. 5, p. 1-8.
- Appleby, P. G. et F. Oldfield. 1984. «Empirical testing of  $^{210}\text{Pb}$ -dating models for lake sediments». Chap. In *Lake sediments and environmental history* sous la dir. Haworth, E. Y., et J. W. G. Lund, p. 93-141. University of Minnesota Press. Minneapolis.
- Barbeau, C., R. Bougie et J.-E. Côté. 1981. Variations spatiales et temporelles du césium-137 et du carbone dans des sédiments du fjord du Saguenay. *Journal Canadien des Sciences de la Terre*, vol. 18, p. 1004-1011.
- Benson, L. V., P. A. Meyers et R. J. Spencer. 1991. Change in the size of Walker Lake during the past 5 000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 81, p. 189-214.
- Blum, P. 1997. Physical properties handbook : a guide to the shipboard measurement of physical properties of deep-sea cores. *Ocean Drilling Project Technical Note*, vol. 26., 115 p.
- Boudreau, B. P. 1986. Mathematics of tracer mixing in sediments : II. Nonlocal mixing and biological conveyor-belt phenomena. *American Journal of Science*, vol. 286, p. 1243-1249.
- Carpenter, R., J. T. Bennett et M. L. Peterson. 1981.  $^{210}\text{Pb}$  activities in and fluxes to sediments of the Washington continental slope and shelf. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 45, p. 1155-1172.
- Carpenter, R., M. L. Peterson, J. T. Bennett and B. L. K. Somayajulu. 1984. Mixing and cycling of uranium, thorium and  $^{210}\text{Pb}$  in Puget Sound sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 48, p. 1949-1963.
- Chagnon, J.-Y. 1968. Les coulées d'argile dans la province de Québec. *Le Naturaliste Canadien*, vol. 95, p. 1327-1343.

- Comans, R. N. J., J. J. Middleburg, J. Zonderhuis, R. J. W., G. J. De Lange, A. K. Das et C. H. Van der Weijden. 1989. Mobilisation of radio cesium in pore water of lake sediments. *Nature*, vol. 339, p. 367-369.
- Coplen, T. B. 1995. Discontinuance of SMOW and PDB. *Nature*, vol. 375, p. 285.
- Courcelles, M. 1998. «Enregistrements sédimentaires des flux récents de métaux lourds et de (Pb, Hg) et d'isotopes à courte période ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{228}\text{Th}$ ) dans un lac sub-arctique à faible vitesse de sédimentation (Lac Jobert, Québec)». Thèse de doctorat, Montréal, Université du Québec à Montréal, 185 p.
- Craig, H. 1953. The geochemistry of the stable carbon isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 3, p. 53-92.
- Crawford, C. B. 1961. Engineering studies of Leda clay. *Soils in Canada*, Publication Spéciale, p. 200-217.
- Das, H. A., A. Faanhof et H. A. Van der Sloot. 1989. *Radioanalysis in geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 481 p.
- Deconinck, J. N., B. Bernat et B. Chassefière. 1983. Étude des isotopes de U, Th et du  $^{210}\text{Pb}$  dans les sédiments de l'étang du Canet (Pyrenées-Orientales). *Oceanologica Acta*, vol. 6, p. 131-138.
- 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, Montréal, Université du Québec à Montréal, 74 p.
- Doig, R. 1986. A method for determining the frequency of large-magnitude earthquakes using lake sediments. *Journal Canadien des Sciences de la Terre*, vol. 23, p. 930-937
- Drainville, G. 1968. Le fjord du Saguenay I : contribution à l'océanographie. *Le Naturaliste Canadien*, vol. 95, no 4, p. 809-847.
- Duinker, J. C. 1980. «Suspended matter in estuaries : Adsorption and desorption processes». In *Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries* sous la dir. Olausson, E. et I. Cato, p. 121-151. Éd. John Wiley and Sons, Toronto.
- Farmer, J. G. 1993. The perturbation of historical pollution records in aquatic sediments. *Environmental Geochemistry and Health*, vol. 13, p. 76-83.
- Flynn, W. W. 1968. The determination of low levels of polonium-210 in environmental materials. *Analytica Chimica Acta*, vol. 43, p. 221-227.
- Francis, C. W. et F. S. Brinkley. 1976. Preferential adsorption of  $^{137}\text{Cs}$  to micaceous minerals in contaminated freshwater sediment. *Nature*, vol. 260, p. 511-513.
- Goldberg, E. D. 1963. «Geochronology with  $^{210}\text{Pb}$ ». In *Radioactive Dating*, International Atomic Energy Agency, Vienne, p. 121-131.

- Gearing, J. N., P. J. Gearing, D. T. Rudnick, S. G. Requejo et M. J. Hutchins. 1984. Isotopic variability of organic carbon in a phytoplankton-based temperate estuary. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 48, p. 1089-1098.
- Haworth, E. Y. et J. W. G. Lund. 1984. «Lake sediments and environmental history.» University of Minnesota Press. Minneapolis, États-Unis, 327 p.
- Health and Safety Laboratory Fallout Program. 1977. HASL-318 (Annexe). *United States Army Environmental Center* (U.S.A.E.C.). A73-A75.
- Hermanson, M. H. 1990.  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  chronology of sediments from small, shallow Arctic lakes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 54, p. 1443-1451.
- Huh, C. A., D. L. Zahnle, L. F. Small et V. E. Noshkin. 1987. Budgets and behaviors of uranium and thorium series isotopes in Santa Monica Basin sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 51, p. 1743-1754.
- Ivanovich, M. et R. Harmon. 1992. *Uranium-series disequilibrium : applications to earth, marine, and environmental sciences*. 2e édition, éd. Clarendon Press, Oxford, 910 p.
- Jenanne, A. 1992. «Application de la méthode du plomb-210 dans l'estuaire maritime et le golfe du Saint-Laurent : taux de sédimentation, flux et modes d'ablation». Mémoire de maîtrise, Montréal, Université du Québec à Montréal, 85 p.
- Kaufman, A. 1993. An evaluation of several methods for determining  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  ages in impure carbonates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 57, p. 2303-2317.
- Koide, M., A. Soutar et E. D. Goldberg. 1972. Marine geochronology with  $^{210}\text{Pb}$ . *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 14, p. 442-446.
- Koide, M., K. W. Bruland et E. D. Goldberg. 1973. Th-228/Th-232 and Pb-210 geochronologies in marine and lake sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 37, p. 1171-1187.
- Krishnaswamy, S., D. Lal, J. M. Martin et M. Meybeck. 1971. Geochronology of lake sediments. *Earth and Planetary Sciences Letters*, vol. 11, p. 407-411.
- Ladanyi, B. et W. J. Eden. 1969. «Use of the deep penetration test in sensitive clays». In *7<sup>th</sup> International Conference of Soils Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, 1969, vol.1, p. 225-230.
- Lally, A. E. 1992. «Chemical procedures». Chap. In *Uranium-series disequilibrium; applications to earth, marine, and environmental sciences* sous la dir. Ivanovich, M. et R. Harmon, p. 95-126. Deuxième édition, Clarendon Press, Oxford.
- Larochelle P., J. Y. Chagnon et G. Lefebvre. 1970. Regional geology and landslides in the marine clay deposits of eastern Canada. *Journal Canadien des Sciences de la Terre*, vol. 7, p. 145-156.

- Lasalle, P. et G. Tremblay. 1978. *Dépôts meubles : Saguenay–Lac-Saint-Jean*. Ministère des richesses naturelles du Québec, Rapport géologique 191, Québec, 61 p.
- Legeleux, F., J.-L. Reyss et S. Schmidt. 1994. Particle mixing rates in sediments of the northeast tropical Atlantic : Evidence from  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{228}\text{Th}_{\text{xs}}$ , and  $^{234}\text{Th}_{\text{xs}}$  downcore distributions. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 128, p. 545-562.
- Leventhal, J. et C. Taylor. 1990. Comparison of methods to determine degree of pyritization. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 54, p. 2621-2625.
- Locat, J., G. Desrosiers, A. de Vernal, J.-P. Gagné, R. Galvez-Cloutier, Y. Gratton, P. Hill, C. Hillaire-Marcel, B. Long, A. Mucci, É. Pelletier, P. Simpkin et R. Therrien. 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, vol. 23, p. 111.
- Louchouart, P. 1997. «Cycles biogéochimiques de composés naturels et anthropiques dans les sédiments récents d'un environnement côtier : le système du Saguenay-St.Laurent, Canada». Thèse de doctorat, Montréal, Université du Québec à Montréal, 372 p.
- Megumi, K. 1978. A problem in  $^{210}\text{Pb}$  geochronologies of sediments. *Nature*, vol. 274, p. 885-887.
- Meyers, P. A. 1994. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology*, vol. 114, p. 289-302.
- Mucci, A. et H. M. Edenborn. 1992. Influence of an organic-poor landslide deposit on the early diagenesis of iron and manganese in a coastal marine sediment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 56, p. 3909-3921.
- Pelletier, M. 1993. «Les glissements sous-marins du bras nord du fjord du Saguenay : Aspects géomorphologiques et géotechniques». Mémoire de maîtrise, Québec, Université Laval, 123 p.
- 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. + annexes.
- Perret, D., J. Locat et S. Leroueil. 1995. Strength development with burial in fine-grained sediments from the Saguenay fjord, Quebec. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 32, p. 247-262.
- Pocklington, R. et J. D. Leonard. 1979. Terrigenous organic matter in sediments of the St. Lawrence Estuary and the Saguenay Fjord. *Journal of Fisheries Research Board of Canada*, vol. 36, p. 1250-1255.
- Raiswell, R., D. E. Canfield et R. A. Berner. 1994. A comparison of iron extraction methods for the determination of degree of pyritisation and the recognition of iron-limited pyrite formation. *Chemical Geology*, vol. 111, p. 101-110.



- Ritchie, J. C. et J. R. McHenry. 1990. Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns : A review. *Journal of Environmental Qualities*, vol. 19, p. 215-233.
- Robbins, J. A. et D. N. Edgington. 1975. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 39, p. 285-304.
- Robbins, J. A., D. N. Edgington et A. L. W. Kemp. 1978. Comparative  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , and pollen geochronologies of sediments from Lakes Ontario and Erie. *Quaternary Research*, vol. 10, p. 256-278.
- Saint-Onge, G. et Hillaire-Marcel, C. 2000. Isotopic constraints of sedimentary inputs and organic carbon burial rates in the Saguenay Fjord, Quebec. Soumis à *Marine Geology*.
- Santschi, P. H., Y.-H. Li, D. M. Adler, M. Amdurer, J. Belle, et U. P. Nyffeler. 1983. The relative mobility of natural (Th, Pb and Po) and fallout (Pu, Am, Cs) radionuclides in the coastal marine environment : results from model ecosystems (MERL) and Narragansett Bay. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 47, p. 201-210.
- Saulnier, I. et A. Mucci. 2000. Trace metals remobilization following the resuspension of estuarine sediments : Saguenay Fjord, Canada. *Applied Geochemistry*, vol. 15, p. 191-210.
- Savard, M. 1989. Pour que demain soit : l'état de l'environnement au Saguenay- Lac Saint-Jean, pour un développement durable. JCL, Chicoutimi, 331 p.
- Schafer, C. T., J. N. Smith et D. H. Loring. 1980. Recent sedimentation events at the head of Saguenay Fjord, Canada. *Environmental Geology*, vol. 3, p. 139-150.
- Schafer, C. T. et J. N. Smith. 1987. Hypothesis for a submarine landslide and cohesionless sediment flows resulting from a 17th century earthquake-triggered landslide in Québec, Canada. *Geo-Marine Letters*, vol.7, p. 31-37.
- Schafer, C. T., J. N. Smith et R. Côté. 1990. «Evidence of the occurrence and magnitude of terrestrial landslides in recent Saguenay fjord sediments». Chap. In *Oceanography of a large scale estuarine system : The St-Lawrence*, sous la dir. M. I. El-Sabh et N. Silverberg, p.137-145. Springer, Berlin.
- Seibert, G. H., R. W. Trites et S. J. Reid. 1979. Deepwater exchange processes in the Saguenay Fjord. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, vol. 36, p. 42-53.
- Silverberg, N., H. V. Nguyen, G. Delibrias, M. Koide, B. Sundby, Y. Yokohama et R. Chesselet. 1986. Radionuclide profiles, sedimentation rates, and bioturbation in modern sediments of the Laurentian Trough, Gulf of St. Lawrence. *Oceanologica Acta*, vol. 9, no 3, p. 285-291.
- Smith, J. N. et A. Walton. 1980. Sediment accumulation rates and geochronologies measured in the Saguenay Fjord using the Pb-210 dating method. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 44, p. 225-240.

- Smith, J. N. et K. M. Ellis. 1982. Transport mechanism for Pb-210, Cs-137 and Pu fallout radionuclides through fluvial-marine systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 46, p. 941-954.
- Smith, J. N. et C. T. Shafer. 1987. A 20th-Century record of climatologically modulated sediment accumulation rates in a Canadian Fjord. *Quaternary Research*, vol. 27, p. 232-247.
- Sobocinski, R. W., T. E. Cerling et S. J. Morrison. 1990. Sediment transport in a small stream based on <sup>137</sup>Cs inventories of the bed load fraction. *Water Resources Research*, vol. 26, p. 1177-1187.
- Somayajulu, B. L. K. et E. D. Goldberg. 1966. Thorium and uranium isotopes in seawater and sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 1, p. 102-106.
- Syvitski, J. P. M., D. C. Burrell et J. M. Skei. 1987. *Fjords : Processes and products*. Springer-Verlag, New York, 379 p.
- Syvitski, J. P. M. et C. T. Schafer. 1996. Evidence for an earthquake-triggered basin collapse in Saguenay Fjord, Canada. *Sedimentary Geology*, vol. 104, p. 127-153.
- Tamura, T. 1964. Selective sorption reaction of caesium with mineral soils. *Nuclear Safety*, vol. 5, p. 262-268.
- Therriault, J. C., R. de Ladurantaye et R. G. Ingram. 1984. Particulate matter exchange across a fjord sill. *Estuarine and Coastal Shelf Science*, vol. 18, p. 51-64.
- U. S. Department of Agriculture. 1975. Munsell soil color charts. Munsell Color Company Inc., Maryland.
- Vallières, S., C. Hillaire-Marcel et B. Ghaleb. 1993. Déséquilibres U-Th dans les dépôts meubles des Basses-terres du Saint-Laurent, Québec. *Journal Canadien des Sciences de la Terre*, vol. 30, p. 1730-1740.
- Zhang, D. 1999. «Fluxes of short-lived radio-isotopes in the marginal marine basins of Eastern Canada». Thèse de doctorat, Montréal, Université du Québec à Montréal.
- Zuo, Z., D. Eisma et G. W. Berger. 1991. Determination of sediment accumulation and mixing rates in the Gulf of Lions, Mediterranean Sea. *Oceanologica Acta*, vol. 14, p. 253-262.

## APPENDICE A

### TABLEAUX DE RÉSULTATS

A.1	Données des propriétés physiques	
	Station SAG-5.....	61
	Station SAG-15.....	62
	Station Baie-des-Ha!Ha!.....	64
A.2	Données géochimiques du carbone	
	Station SAG-5.....	66
	Station SAG-15.....	68
	Station Baie-des-Ha!Ha!.....	70
A.3	Données géochimiques des radio-isotopes étudiés	
	Station SAG-5.....	71
	Station SAG-15.....	73
	Station Baie-des-Ha!Ha!.....	76

## A.1 Données des propriétés physiques

**Station SAG-5** (MB97-1BO1A; Lat.: 48°25,40'N; Long.: 70°51,57'O)

<b>Profondeur</b> (cm)	<b>Vitesse de propagation des ondes P</b> (m/sec)	<b>Porosité</b> (%)	<b>Densité</b> (g/cm <sup>3</sup> )	<b>Susceptibilité magnétique</b> (1x10 <sup>-5</sup> SI)
1,0	1482	68	1,59	75
2,0	1480	68	1,59	105
3,0	1479	69	1,56	125
4,0	1469	71	1,52	135
5,0	1465	70	1,54	140
6,0	1469	70	1,55	140
7,0	1465	72	1,51	138
8,0	1466	71	1,52	137
9,0	1471	70	1,54	134
10,0	1469	71	1,53	132
11,0	1448	74	1,48	132
12,0	1456	71	1,53	133
13,0	1467	73	1,50	133
14,0	1469	74	1,47	134
15,0	1472	72	1,51	136
16,0	1471	72	1,51	137
17,0	1470	72	1,51	137
18,0	1470	71	1,54	135
19,0	1468	71	1,53	136
20,0	1468	69	1,56	135
21,0	1468	71	1,53	133
22,0	1475	69	1,56	132
23,0	1473	72	1,51	127
24,0	1469	73	1,49	123
25,0	1465	77	1,43	119
26,0	1465	75	1,46	113
27,0	1469	74	1,48	110
28,0	1467	76	1,44	106
29,0	1466	76	1,44	103
30,0	1463	76	1,45	100
31,0	1459	79	1,39	98
32,0	1466	75	1,46	97
33,0	1464	77	1,43	96
34,0	1462	76	1,44	97
35,0	1466	76	1,43	97
36,0	1480	68	1,59	96
37,0	1469	76	1,44	92
38,0	1472	72	1,51	84

**Station SAG-15** (MB97-4BO04D; Lat.: 48°21,74'N; Long.: 70°42,30'O)

<b>Profondeur</b>	<b>Vitesse de propagation des ondes P</b>	<b>Porosité</b>	<b>Densité</b>	<b>Susceptibilité magnétique</b>
(cm)	(m/sec)	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(1x10 <sup>-5</sup> SI)
1,0	1088	74	1,48	78
2,0	1115	67	1,60	117
3,0	1138	67	1,59	145
4,0	1118	67	1,60	157
5,0	1092	75	1,46	152
6,0	1065	78	1,41	141
7,0	1073	78	1,40	128
8,0	1082	77	1,43	118
9,0	1101	73	1,50	110
10,0	1110	71	1,52	104
11,0	1095	74	1,48	97
12,0	1070	79	1,40	89
13,0	1059	80	1,37	78
14,0	1058	80	1,37	71
15,0	1063	79	1,39	66
16,0	1059	80	1,37	63
17,0	1060	80	1,38	59
18,0	1062	79	1,39	59
19,0	1061	79	1,39	59
20,0	1062	79	1,39	59
21,0	1060	79	1,38	60
22,0	1059	80	1,37	60
23,0	1060	80	1,36	63
24,0	1058	81	1,35	66
25,0	1054	82	1,34	67
26,0	1058	81	1,36	70
27,0	1063	79	1,39	73
28,0	1066	78	1,41	72
29,0	1067	78	1,42	79
30,0	1069	77	1,42	82
31,0	1065	78	1,40	85
32,0	1060	80	1,38	88
33,0	1063	79	1,39	91
34,0	1066	78	1,41	94
35,0	1066	78	1,41	98
36,0	1070	77	1,43	100
37,0	1072	76	1,44	102
38,0	1070	77	1,43	103
39,0	1070	77	1,43	107

**Station SAG-15** (MB97-4B004D; Lat.: 48°21,74'N; Long.: 70°42,30'O)

<b>Profondeur</b>	<b>Vitesse de propagation des ondes P</b>	<b>Porosité</b>	<b>Densité</b>	<b>Susceptibilité magnétique</b>
(cm)	(m/sec)	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(1x10 <sup>-5</sup> SI)
40,0	1073	76	1,44	109
41,0	1077	75	1,46	112
42,0	1079	74	1,47	114
43,0	1076	75	1,46	117
44,0	1078	75	1,46	117
45,0	1079	75	1,47	118
46,0	1084	73	1,49	115
47,0	1088	72	1,51	111
48,0	1087	73	1,50	99
49,0	1041	85	1,28	86

**Station Baie-des-Ha! Ha! (MB97-17BO05B; Lat.: 48°22,01'N; Long.: 70°46,19'O)**

<b>Profondeur</b> (cm)	<b>Vitesse de propagation des ondes P</b> (m/sec)	<b>Porosité</b> (%)	<b>Densité</b> (g/cm <sup>3</sup> )	<b>Susceptibilité magnétique</b> (1x10 <sup>-5</sup> SI)
1,0	1459	76	1,44	44
2,0	1444	76	1,44	64
3,0	1443	77	1,43	84
4,0	1446	77	1,43	102
5,0	1456	73	1,49	116
6,0	1454	73	1,49	128
7,0	1446	75	1,46	138
8,0	1446	75	1,46	146
9,0	1450	73	1,50	153
10,0	1447	75	1,46	159
11,0	1451	73	1,50	167
12,0	1451	73	1,49	174
13,0	1449	72	1,52	184
14,0	1445	74	1,47	195
15,0	1446	71	1,53	209
16,0	1445	73	1,49	228
17,0	1474	67	1,60	252
18,0	1481	64	1,65	279
19,0	1482	64	1,64	309
20,0	1485	63	1,67	339
21,0	1505	54	1,82	368
22,0	1510	65	1,64	393
23,0	1538	62	1,69	411
24,0	1543	58	1,76	419
25,0	1538	64	1,65	417
26,0	1576	54	1,82	399
27,0	1588	53	1,83	364
28,0	1452	82	1,34	315
29,0	1446	83	1,32	261
30,0	1447	80	1,37	216
31,0	1449	80	1,37	184
32,0	1451	78	1,41	168
33,0	1445	77	1,42	163
34,0	1449	75	1,46	167
35,0	1457	74	1,47	178
36,0	1475	72	1,51	193
37,0	1532	57	1,78	205
38,0	1530	61	1,71	212
39,0	1525	64	1,65	207
40,0	1489	71	1,52	194
41,0	1479	69	1,56	176
42,0	1451	78	1,40	160

**Station Baie-des-Ha! Ha! (MB97-17BO05B; Lat.: 48°22,01'N; Long.: 70°46,19'O)**

<b>Profondeur</b>	<b>Vitesse de propagation des ondes P</b>	<b>Porosité</b>	<b>Densité</b>	<b>Susceptibilité magnétique</b>
(cm)	(m/sec)	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(1x10 <sup>-5</sup> SI)
43,0	1447	79	1,39	144
44,0	1446	78	1,41	132
45,0	1446	77	1,43	125
46,0	1445	75	1,45	119
47,0	1444	76	1,44	116
48,0	1443	76	1,44	114
49,0	1444	77	1,43	113
50,0	1445	76	1,43	111
51,0	1446	77	1,42	110
52,0	1445	76	1,44	108
53,0	1446	76	1,45	104
54,0	1449	76	1,45	96
55,0	1453	75	1,46	85



## A.2 Données géochimiques du carbone

**Station SAG-5** (MB97-1BO01A; Lat.: 48°25,40'N; Long.: 70°51,57'O)

Profondeur (cm)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	% C <sub>inorg</sub>	% C <sub>total</sub>	% C <sub>org</sub>	% N <sub>total</sub>	C <sub>org</sub> /N <sub>total</sub>
0,25	- 27,11	0,09	1,34	1,25	0,06	23,50
0,75	—	0,13	1,21	1,08	0,05	24,74
1,25	- 27,27	0,13	1,47	1,34	0,06	27,34
1,75	—	0,05	1,55	1,50	0,05	31,72
1,75	—	0,15	1,55	1,40	0,05	29,63
2,25	- 26,99	0,17	1,57	1,40	0,06	28,25
2,75	—	0,17	1,60	1,43	0,06	28,34
3,25	- 26,96	0,17	1,59	1,42	0,06	29,61
3,75	—	0,17	1,57	1,40	0,07	23,39
4,25	- 26,92	0,19	1,46	1,27	0,06	24,69
4,75	—	0,19	1,51	1,32	0,05	28,01
4,75	—	0,19	1,51	1,32	0,05	28,09
5,25	- 27,02	0,17	1,52	1,35	0,05	28,73
5,75	—	0,18	1,58	1,40	0,08	20,45
6,25	- 26,83	0,15	1,66	1,51	0,08	22,00
6,75	—	0,14	1,77	1,63	0,06	29,72
7,25	- 26,76	0,14	1,92	1,78	0,07	28,83
7,75	—	0,15	1,91	1,76	0,07	30,21
8,25	- 26,97	0,15	1,99	1,84	0,07	28,95
8,75	—	0,15	1,91	1,76	0,07	30,13
9,25	- 26,69	0,16	2,12	1,96	0,08	30,41
9,75	—	0,16	1,94	1,78	0,07	31,01
10,25	- 26,60	0,15	1,91	1,76	0,10	20,48
10,75	—	—	—	—	—	—
11,25	- 27,15	0,22	1,07	0,85	0,08	12,35
11,75	—	—	1,29	—	0,05	—
12,25	- 27,22	0,16	1,29	1,13	0,10	13,13
12,75	—	0,12	1,63	1,51	0,08	22,30
12,75	—	0,11	1,63	1,52	0,08	22,50
13,25	- 27,19	0,08	1,75	1,67	0,12	16,27
13,75	—	—	1,94	—	0,10	—
14,25	- 27,27	0,04	2,22	2,18	0,14	18,81
14,75	—	0,04	1,98	1,94	0,09	25,09
15,50	- 27,48	0,05	2,10	2,05	0,11	21,79
16,50	- 27,32	0,04	2,33	2,29	0,13	20,59
17,50	- 27,31	0,04	2,23	2,19	0,11	23,22
18,50	- 27,33	0,04	2,14	2,10	0,14	17,53
19,50	- 27,33	—	2,12	—	0,11	—
20,50	- 27,12	0,04	2,10	2,06	0,13	18,48
21,50	- 27,18	—	2,11	—	0,10	—
22,50	- 27,26	0,02	2,17	2,15	0,18	13,91

**Station SAG-5** (MB97-1BO01A; Lat.: 48°25,40'N; Long.: 70°51,57'O)

<b>Profondeur (cm)</b>	<b><math>\delta^{13}\text{C}</math> (‰)</b>	<b>% C<sub>inorg</sub></b>	<b>% C<sub>total</sub></b>	<b>% C<sub>org</sub></b>	<b>% N<sub>total</sub></b>	<b>C<sub>org</sub> / N<sub>total</sub></b>
23,50	- 27,28	—	2,11	—	0,10	—
24,50	- 27,16	0,00	2,64	2,64	0,17	18,14
25,50	- 27,22	—	2,43	—	0,12	—
26,50	- 27,04	0,05	2,35	2,30	0,12	22,35
27,50	- 27,10	—	1,98	—	0,09	—
28,50	- 26,83	0,01	2,91	2,90	0,13	26,04
29,50	- 26,63	—	2,76	—	0,09	—
30,50	- 26,83	0,01	3,22	3,21	0,12	31,17
31,50	- 26,92	—	3,12	—	0,11	—
32,50	- 26,84	0,00	2,95	2,95	0,11	31,28
33,50	- 26,84	—	3,10	3,10	0,10	36,53
34,50	—	0,02	3,02	3,00	0,10	34,95
35,50	- 26,87	—	—	—	—	—
36,50	—	0,04	3,03	2,99	0,11	31,67
37,50	- 26,74	—	—	—	—	—

**Station SAG-15 (MB97-4BO04D; Lat.: 48°21,74'N; Long.: 70°42,30'O)**

<b>Profondeur (cm)</b>	<b><math>\delta^{13}\text{C}</math> (‰)</b>	<b>% C<sub>inorg</sub></b>	<b>% C<sub>total</sub></b>	<b>% C<sub>org</sub></b>	<b>% N<sub>total</sub></b>	<b>C<sub>org</sub>/N<sub>total</sub></b>
0,25	- 26,74	0,31	2,09	1,78	0,08	25,30
2,25	- 26,59	0,42	1,22	0,80	0,05	20,40
3,25	—	0,42	0,91	0,49	0,03	20,30
3,75	—	—	1,04	1,04	0,02	—
4,75	- 27,02	0,30	1,10	0,80	0,04	21,76
5,25	—	0,20	1,63	1,43	0,06	26,48
6,25	- 25,71	0,08	2,27	2,19	0,12	21,28
6,75	—	0,08	2,46	2,38	0,11	25,20
7,75	- 26,42	0,08	2,32	2,24	0,12	21,76
8,75	—	0,07	2,33	2,26	0,10	27,42
9,75	—	0,07	2,29	2,22	0,09	28,17
9,75	—	0,07	2,29	2,22	0,09	28,13
11,75	- 26,12	0,06	1,31	1,25	0,06	24,23
12,75	- 25,53	0,06	1,51	1,45	0,07	24,49
14,75	- 26,55	0,07	2,37	2,30	0,12	22,38
16,75	- 26,25	0,07	2,34	2,27	0,11	24,08
17,75	—	0,08	2,11	2,03	0,10	24,38
18,25	—	—	2,37	2,37	0,09	—
18,75	- 26,45	0,08	2,24	2,16	0,10	25,17
20,75	- 26,39	0,10	2,10	2,00	0,10	23,38
21,25	—	0,10	2,28	2,18	0,09	29,88
23,25	- 26,19	0,14	1,78	1,64	0,08	22,99
24,25	- 26,01	0,10	2,07	1,97	0,09	24,21
24,25	—	0,11	2,07	1,96	0,09	24,13
24,75	—	—	2,30	2,30	0,09	—
25,75	- 26,04	0,06	2,43	2,37	0,12	23,07
26,75	—	0,03	2,59	2,56	0,11	27,13
27,75	—	—	2,79	2,79	0,10	—
28,25	- 26,18	0,01	2,36	2,35	0,10	26,12
29,75	—	0,01	2,27	2,26	0,12	21,98
30,75	- 26,04	0,01	2,13	2,12	0,11	22,49
31,75	—	0,00	2,28	2,28	0,13	21,24
32,50	- 26,01	0,01	2,10	2,09	0,10	24,35
33,50	—	0,02	2,08	2,06	0,10	24,30
34,50	- 26,15	0,01	1,93	1,92	0,09	23,60
35,50	—	0,00	1,99	1,99	0,10	23,96
35,50	—	0,00	1,99	2,00	0,10	24,01
36,50	- 26,16	0,00	2,02	2,02	0,10	23,78
37,50	—	0,01	2,02	2,01	0,10	23,89
38,50	- 26,20	0,04	1,90	1,86	0,11	19,71
39,50	—	0,00	1,81	1,81	0,13	16,90

**Station SAG-15** (MB97-4BO04D; Lat.: 48°21,74'N; Long.: 70°42,30'O)

<b>Profondeur (cm)</b>	<b><math>\delta^{13}\text{C}</math> (‰)</b>	<b>% C<sub>inorg</sub></b>	<b>% C<sub>total</sub></b>	<b>% C<sub>org</sub></b>	<b>% N<sub>total</sub></b>	<b>C<sub>org</sub>/N<sub>total</sub></b>
40,50	- 26,22	0,00	1,86	1,86	0,11	19,69
41,50	—	0,01	1,70	1,69	0,11	17,90
42,50	- 26,20	0,00	1,54	1,54	0,11	16,36
43,50	—	0,00	1,59	1,60	0,14	13,84
44,50	- 26,06	0,01	1,54	1,53	0,09	21,04
45,50	—	0,01	1,67	1,66	0,09	21,59
46,50	- 26,33	0,01	1,58	1,57	0,08	22,04
47,50	—	0,00	1,52	1,53	0,17	10,84
48,50	- 26,33	0,00	1,61	1,61	0,08	22,33
49,50	—	0,01	1,35	1,34	0,08	20,23
50,50	- 26,30	0,01	1,42	1,41	0,09	19,41
51,50	—	0,01	1,41	1,40	0,09	17,36
52,50	- 26,00	0,02	1,41	1,39	0,08	21,09
52,50	—	0,01	1,41	1,40	0,08	21,22

**Station Baie-des-Ha! Ha! (MB97-17BO05B; Lat.: 48°22,01'N; Long.: 70°46,19'O)**

Profondeur (cm)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	% C <sub>inorg</sub>	% C <sub>total</sub>	% C <sub>org</sub>	% N <sub>total</sub>	C <sub>org</sub> /N <sub>total</sub>
0,25	- 27,03	—	—	—	—	—
0,75	- 27,11	0,38	2,04	1,66	0,09	21,54
3,25	- 27,10	0,60	2,06	1,46	0,12	14,22
5,75	- 27,13	0,51	1,87	1,36	0,11	14,43
6,25	- 26,73	—	—	—	0,08	—
8,25	- 27,20	0,54	1,83	1,29	0,07	21,51
10,25	- 27,04	—	—	—	0,09	—
10,75	- 27,17	0,55	2,07	1,52	0,07	25,38
13,25	- 27,11	0,57	2,05	1,48	0,09	19,16
14,25	- 27,01	—	—	—	0,09	—
15,75	- 27,16	0,49	1,77	1,28	0,07	21,39
18,25	- 26,98	0,45	1,70	1,25	0,08	18,25
20,75	- 26,92	0,40	2,02	1,62	0,09	20,96
22,25	- 26,62	—	—	—	0,09	—
23,25	- 26,40	0,28	1,81	1,53	0,07	25,48
23,25	—	0,28	1,81	1,53	0,07	25,49
25,75	- 27,00	0,26	1,23	0,97	0,06	18,88
26,25	- 26,79	—	—	—	0,04	—
28,25	- 27,04	0,07	2,73	2,66	0,15	20,72
30,25	- 26,93	—	—	—	0,11	—
30,75	- 27,01	0,08	2,28	2,20	0,13	19,77
33,25	- 27,11	0,08	2,16	2,08	0,13	18,65
34,25	- 26,85	—	—	—	0,09	—
35,75	- 26,86	0,08	2,31	2,23	0,12	21,71
38,25	- 26,57	0,05	1,08	1,03	0,06	19,99
40,75	- 26,96	0,06	2,31	2,25	0,11	23,90
42,25	- 26,88	—	—	—	0,12	—
43,25	- 26,91	0,06	2,58	2,52	0,12	24,47
45,75	- 27,01	0,08	2,38	2,30	0,13	20,65
46,25	- 26,92	—	—	—	0,09	—
48,25	- 26,93	0,06	2,45	2,39	0,12	23,24
48,25	—	0,07	2,45	2,38	0,12	23,16
50,25	- 26,87	—	—	—	0,10	—
50,75	- 26,81	0,07	2,60	2,53	0,12	24,64
53,25	- 26,73	0,05	2,53	2,48	0,13	22,26
54,25	- 26,78	—	—	—	0,11	—
55,00	- 26,85	0,06	2,23	2,17	0,11	23,02

### A.3 Données géochimiques des radio-isotopes étudiés

**Station SAG-5** (MB97-1BO01A; Lat.: 48°25,40'N; Long.: 70°51,57'O)

<b>Profondeur</b> (cm)	$^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$\Delta$	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$\Delta$	$^{137}\text{Cs}$ (dpm/g)	$\Delta$	$^{210}\text{Pb}$ (dpm/g)	$\Delta$	<b>Ln (<math>^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}</math>)</b>
0,25	0,95	0,03	0,59	0,02	—	—	2,90	0,09	0,64
0,75	0,95	0,03	0,59	0,02	1,27	0,15	2,30	0,07	0,26
1,25	0,84	0,03	0,56	0,02	0,24	—	2,07	0,06	0,07
1,75	0,97	0,03	0,68	0,03	1,54	—	2,05	0,07	0,05
2,25	0,87	0,02	0,57	0,02	1,83	0,15	1,59	0,05	- 0,52
2,75	0,87	0,04	0,57	0,03	0,31	—	1,75	0,05	- 0,29
3,25	0,82	0,03	0,66	0,03	0,76	—	1,77	0,06	- 0,26
4,25	0,80	0,02	0,57	0,02	—	—	1,62	0,04	- 0,47
4,75	0,93	0,03	0,55	0,02	—	—	1,78	0,05	- 0,25
5,25	0,81	0,02	0,57	0,02	0,37	0,15	1,70	0,05	- 0,36
6,25	0,82	0,02	0,58	0,02	—	—	1,90	0,05	- 0,11
6,75	0,92	0,03	0,58	0,02	0,97	—	1,76	0,05	- 0,28
7,25	0,86	0,03	0,64	0,03	1,04	—	1,36	0,05	- 1,03
7,75	0,88	0,03	0,56	0,02	0,47	—	1,78	0,06	- 0,25
8,25	0,94	0,04	0,53	0,02	0,28	—	1,61	0,05	- 0,49
8,75	0,89	0,03	0,61	0,02	1,72	0,15	1,51	0,05	- 0,67
9,25	0,89	0,02	0,62	0,02	0,12	—	1,63	0,05	- 0,46
9,75	0,86	0,03	0,58	0,02	0,48	—	1,49	0,04	- 0,72
10,75	0,86	0,03	0,56	0,02	1,08	0,19	1,87	0,05	- 0,14
11,75	0,82	0,03	0,54	0,02	1,44	—	2,87	0,09	0,62
12,75	0,94	0,04	0,57	0,03	0,79	0,16	4,03	0,12	1,11
13,75	0,88	0,03	0,64	0,02	0,84	—	4,81	0,13	1,34
14,75	0,89	0,03	0,59	0,02	1,39	—	6,05	0,16	1,62
15,50	0,99	0,04	0,64	0,03	0,80	0,16	5,48	0,16	1,50
16,50	0,91	0,03	0,56	0,02	—	—	8,77	0,21	2,05
17,50	0,91	0,03	0,63	0,02	2,07	—	6,35	0,17	1,68
18,50	0,88	0,03	0,52	0,02	—	—	5,13	0,14	1,42

**Station SAG-5** (MB97-1B001A; Lat.: 48°25,40'N; Long.: 70°51,57'O)

<b>Profondeur</b> (cm)	<sup>228</sup> Th/ <sup>232</sup> Th	Δ	<sup>230</sup> Th/ <sup>232</sup> Th	Δ	<sup>137</sup> Cs (dpm/g)	Δ	<sup>210</sup> Pb (dpm/g)	Δ	<b>Ln (<sup>210</sup>Pb<sub>excès</sub>)</b>
19,50	0,76	0,04	0,62	0,03	1,74	0,19	5,24	0,13	1,45
20,50	0,77	0,02	0,58	0,02	—	—	5,10	0,13	1,41
21,50	0,67	0,02	0,56	0,02	1,73	0,17	4,65	0,13	1,29
22,50	0,75	0,02	0,51	0,02	—	—	5,13	0,15	1,42
23,50	0,76	0,02	0,66	0,02	1,57	—	4,80	0,13	1,33
24,50	0,79	0,02	0,58	0,02	—	—	5,33	0,14	1,47
25,50	0,77	0,04	0,60	0,03	2,05	0,19	4,64	0,13	1,29
26,50	0,85	0,02	0,64	0,02	—	—	4,19	0,12	1,16
27,50	0,83	0,03	0,56	0,02	1,71	—	3,82	0,10	1,04
28,50	0,89	0,03	0,61	0,02	—	—	4,26	0,12	1,18
29,50	0,95	0,03	0,60	0,02	—	—	4,18	0,12	1,16
30,50	1,01	0,03	0,58	0,02	—	—	4,38	0,13	1,22
31,50	0,97	0,04	0,66	0,03	3,14	—	3,95	0,12	1,08
32,50	1,12	0,03	0,75	0,02	—	—	3,80	0,10	1,03
33,50	1,03	0,03	0,62	0,03	2,90	—	3,78	0,12	1,02
34,50	1,02	0,03	0,63	0,02	—	—	3,33	0,09	0,84
35,50	0,96	0,04	0,66	0,03	2,32	—	2,47	0,08	0,39
36,50	1,02	0,03	0,64	0,02	—	—	3,17	0,09	0,77
37,50	0,90	0,03	0,69	0,03	2,18	—	2,51	0,08	0,41
38,50	1,00	0,03	0,62	0,02	—	—	1,88	0,05	- 0,13

**Station SAG-15** (MB97-4BO04D; Lat.: 48°21,74'N; Long.: 70°42,30'O)

Profondeur (cm)	<sup>228</sup> Th/ <sup>232</sup> Th	Δ	<sup>230</sup> Th/ <sup>232</sup> Th	Δ	<sup>137</sup> Cs (dpm/g)	Δ	<sup>210</sup> Pb (dpm/g)	Δ	Ln ( <sup>210</sup> Pb <sub>excès</sub> )
0,25	1,22	0,03	0,55	0,01	0,59	0,25	3,35	0,08	0,85
0,75	1,02	0,03	0,58	0,02	0,68	0,24	—	—	—
1,25	—	—	—	—	0,24	0,20	3,73	0,21	1,01
1,75	1,03	0,02	0,56	0,01	0,86	0,11	1,43	0,04	- 0,84
2,75	—	—	—	—	0,33	0,13	—	—	—
3,25	1,06	0,03	0,69	0,02	—	—	1,46	0,05	- 0,77
3,75	0,96	0,02	0,58	0,01	0,23	0,23	1,19	0,03	- 1,68
4,75	1,05	0,03	0,64	0,02	0,06	0,01	1,82	0,05	- 0,20
5,25	1,06	0,02	0,57	0,01	—	—	3,93	0,09	1,08
5,75	—	—	—	—	1,83	0,41	—	—	—
6,25	1,04	0,03	0,56	0,02	—	—	6,72	0,17	1,74
6,75	0,96	0,02	0,55	0,01	1,52	0,23	7,37	0,17	1,85
7,75	1,14	0,02	0,63	0,01	0,99	0,08	9,12	0,26	2,09
8,75	1,00	0,02	0,62	0,01	1,83	0,41	6,71	0,21	1,74
9,25	0,84	0,03	0,56	0,02	—	—	5,97	0,17	1,60
9,75	0,87	0,02	0,54	0,01	1,12	0,60	4,54	0,11	1,26
10,75	—	—	—	—	0,88	0,30	3,37	0,08	0,86
11,75	0,88	0,03	0,67	0,02	0,44	0,04	2,70	0,08	0,53
12,75	0,89	0,03	0,61	0,01	1,06	0,10	3,85	0,12	1,05
13,75	0,97	0,02	0,55	0,01	1,82	0,40	6,12	0,16	1,63
14,75	0,90	0,02	0,60	0,01	1,81	0,16	7,15	0,21	1,82
15,25	0,87	0,02	0,58	0,01	—	—	5,61	0,13	1,53
15,75	—	—	—	—	2,36	0,91	—	—	—
16,25	0,89	0,02	0,57	0,01	2,82	0,37	5,40	0,12	1,48
17,25	0,84	0,03	0,63	0,02	3,08	0,34	5,90	0,16	1,59
18,25	0,87	0,03	0,60	0,01	3,06	1,62	5,38	0,15	1,48
18,75	0,81	0,02	0,57	0,01	2,48	0,31	4,45	0,10	1,24



Station SAG-15 (MB97-4BO04D; Lat.: 48°21,74'N; Long.: 70°42,30'O)

Profondeur (cm)	$^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$\Delta$	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$\Delta$	$^{137}\text{Cs}$ (dpm/g)	$\Delta$	$^{210}\text{Pb}$ (dpm/g)	$\Delta$	Ln ( $^{210}\text{Pb}_{\text{excès}}$ )
19,25	—	—	—	—	1,94	0,11	—	—	—
19,75	0,89	0,03	0,55	0,01	—	—	4,77	0,14	1,33
20,25	—	—	—	—	2,23	0,31	—	—	—
20,75	0,92	0,03	0,54	0,02	—	—	4,60	0,13	1,28
21,25	0,91	0,02	0,58	0,01	1,98	0,25	4,57	0,14	1,27
21,75	0,97	0,03	0,55	0,02	2,47	0,33	4,84	0,14	1,35
22,25	1,03	0,02	0,58	0,01	1,16	0,92	3,29	0,07	0,83
22,75	—	—	—	—	2,53	0,17	—	—	—
23,75	1,15	0,03	0,54	0,02	1,83	0,12	3,25	0,10	0,81
24,75	0,96	0,02	0,53	0,01	1,38	0,13	3,10	0,07	0,74
25,75	0,95	0,03	0,53	0,02	2,08	0,25	3,97	0,12	1,09
26,75	1,04	0,02	0,56	0,01	2,39	0,36	3,87	0,12	1,05
27,75	1,05	0,03	0,57	0,02	1,99	2,04	3,83	0,11	1,04
28,25	—	—	—	—	1,06	0,41	—	—	—
28,75	1,06	0,02	0,52	0,01	—	—	3,63	0,11	0,97
29,75	—	—	—	—	1,38	0,88	—	—	—
30,75	—	—	—	—	1,67	0,30	—	—	—
31,75	—	—	—	—	0,50	0,21	—	—	—
32,50	0,93	0,03	0,49	0,01	0,30	0,22	2,88	0,09	0,63
33,50	—	—	—	—	0,85	0,38	—	—	—
34,50	—	—	—	—	0,09	0,02	2,34	0,06	0,30
35,50	—	—	—	—	1,17	0,24	2,53	0,04	0,43
36,50	1,00	0,03	0,56	0,02	0,37	0,14	2,22	0,06	0,20
37,50	—	—	—	—	0,34	0,22	2,11	0,06	0,11
38,50	—	—	—	—	—	—	1,88	0,06	-0,13
39,50	—	—	—	—	0,16	0,09	1,92	0,06	-0,08
40,50	0,95	0,03	0,55	0,02	0,78	0,21	1,91	0,05	-0,09

Station SAG-15 (MB97-4BO04D; Lat.: 48°21,74'N; Long.: 70°42,30'O)

Profondeur (cm)	$^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$\Delta$	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$\Delta$	$^{137}\text{Cs}$ (dpm/g)	$\Delta$	$^{210}\text{Pb}$ (dpm/g)	$\Delta$	$\text{Ln} (^{210}\text{Pb}_{\text{excès}})$
41,50	—	—	—	—	0,72	0,64	1,97	0,06	-0,03
42,50	—	—	—	—	—	—	1,75	0,05	-0,29
43,50	—	—	—	—	—	—	2,28	0,06	0,25
44,50	0,98	0,03	0,54	0,01	—	—	1,51	—	-0,66
45,50	—	—	—	—	—	—	1,26	0,03	-1,33
46,50	—	—	—	—	—	—	2,19	0,07	0,17
47,50	—	—	—	—	—	—	1,46	0,04	-0,78
48,50	1,02	0,03	0,54	0,02	—	—	1,07	0,03	-2,66
49,50	—	—	—	—	—	—	1,49	0,04	-0,72
50,50	—	—	—	—	—	—	0,99	0,03	—
51,50	—	—	—	—	—	—	1,11	0,03	-2,23
52,50	1,01	0,03	0,57	0,02	—	—	0,75	0,04	—

Station Baie-des-Ha! Ha! (MB97-17BO05B; Lat.: 48°22,01'N; Long.: 70°46,19'O)

Profondeur (cm)	$^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$\Delta$	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$\Delta$	$^{137}\text{Cs}$ (dpm/g)	$\Delta$	$^{210}\text{Pb}$ (dpm/g)	$\Delta$	$\text{Ln} (^{210}\text{Pb}_{\text{excès}})$
0,75	0,94	0,02	0,57	0,02	0,39	0,10	4,02	0,12	1,10
3,25	0,83	0,02	0,57	0,01	0,06	0,02	1,65	0,05	-0,42
5,75	0,90	0,03	0,57	0,02	0,36	0,07	4,89	0,15	1,36
8,25	0,91	0,03	0,56	0,02	0,18	0,03	1,40	0,04	-0,93
10,75	0,89	0,03	0,58	0,02	0,17	0,06	2,73	0,09	0,55
13,25	0,89	0,02	0,55	0,02	0,17	0,03	1,61	0,04	-0,49
15,75	0,86	0,03	0,61	0,02	0,21	0,04	1,69	0,06	-0,37
18,25	1,02	0,03	0,65	0,02	0,15	0,03	1,38	0,04	-0,96
20,75	0,88	0,03	0,68	0,02	0,05	0,03	1,33	0,04	-1,10
23,25	0,90	0,03	0,63	0,02	0,09	0,03	0,96	0,03	—
25,75	0,87	0,03	0,63	0,02	0,18	0,05	1,29	0,04	-1,23
28,25	1,30	0,04	0,52	0,02	0,96	0,04	8,76	0,23	2,05
30,75	0,90	0,03	0,53	0,02	0,81	0,07	5,89	0,18	1,59
33,25	1,03	0,03	0,55	0,02	0,62	0,06	4,83	0,12	1,34
35,75	0,84	0,03	0,57	0,02	0,33	0,05	2,68	0,10	0,52
38,25	0,95	0,03	0,55	0,02	0,31	0,04	1,32	0,04	-1,14
40,75	1,27	0,03	0,61	0,02	1,65	0,10	7,30	0,22	1,84
40,75	—	—	—	—	—	—	7,04	0,21	1,80
43,25	0,90	0,03	0,57	0,02	1,68	0,08	6,34	0,22	1,67
45,75	0,87	0,02	0,57	0,02	1,87	0,10	4,91	0,15	1,36
48,25	0,92	0,02	0,56	0,02	1,97	0,11	4,21	0,15	1,16
50,75	0,98	0,03	0,53	0,02	2,04	0,07	4,85	0,13	1,35
50,75	—	—	—	—	—	—	4,23	0,14	1,17
53,25	0,98	0,02	0,51	0,01	2,08	0,07	4,19	0,15	1,16
55,00	0,92	0,03	0,53	0,02	0,62	0,04	4,01	0,12	1,10

## APPENDICE B

### MANIPULATIONS GÉOCHIMIQUES DU THORIUM, DU PLOMB ET DU CÉSIUM

B.1	Manipulations du thorium.....	78
B.2	Manipulations du plomb.....	83
B.3	Spectrométrie $\alpha$ et acquisition de données.....	86
B.4	Manipulations du césium.....	87
B.5	Références.....	89

## B.1 Manipulations de thorium

La détermination des rapports d'activité  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  nécessite un traitement chimique du sédiment, une purification des radio-isotopes, leur dépôt sur un disque d'acier et le comptage par spectrométrie  $\alpha$ . Au préalable, le sédiment a été déshydraté dans une étuve puis broyé au mortier. Environ 1g de sédiment sec est déposé dans un creuset de Téflon<sup>TM</sup> préalablement identifié. Le numéro de l'échantillon correspond à un numéro puisé dans le cahier de laboratoire où est également inséré le site d'échantillonnage, la profondeur, ainsi que le poids des sédiments. Pour ces analyses, aucun traceur n'a été utilisé puisque l'on veut simplement mesurer le rapport d'activité  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  sur le même spectre  $\alpha$ . L'aire de chaque pic est déterminée aux fins de calculs des rapports d'activité isotopique.

### *Mise en solution*

L'étape suivante consiste à détruire les carbonates contenus dans les sédiments avec un mélange d'acide nitrique concentré ( $\text{HNO}_3$ , 16N), ainsi que d'acide chlorhydrique concentré ( $\text{HCl}$ , 12N). Les échantillons sont ensuite chauffés sur une plaque chauffante afin d'activer la réaction entre l'échantillon et les acides. Les échantillons sont ensuite portés à sec.

Une fois secs, quelques millilitres d'acide nitrique concentré ( $\text{HNO}_3$ , 16N) sont ajoutés afin de dissoudre les échantillons à nouveau. Ils sont ensuite centrifugés pendant 4 à 5 minutes dans le but de récupérer d'abord l'échantillon déjà sous forme liquide (que l'on disposera dans un bécher identifié), puis, la fraction résiduelle que l'on retrouve au fond du contenant de centrifugation (que l'on déposera dans le creuset de Téflon<sup>TM</sup> utilisé préalablement).

Par la suite, un mélange d'acide fluorhydrique ( $\text{HF}$ , 49%; environ 60 ml ou les  $\frac{3}{4}$  du creuset) et d'acide perchlorique ( $\text{HClO}_4$ , 70% ; 2-3 ml) est ajouté à la fraction résiduelle de sédiment. L'acide fluorhydrique permet de dénaturer les silicates et l'acide perchlorique permet

de détruire la matière organique résiduelle. De plus, ce dernier acide permet d'éviter la formation de fluorure de thorium, un produit insoluble. L'échantillon est ensuite porté à sec à nouveau.

Les échantillons sont ensuite dissous avec de l' $\text{HNO}_3$  concentré puis centrifugés pendant 4 à 5 minutes. Le surnageant est déposé dans le bécher utilisé lors la première centrifugation. Un résidu peut parfois être remarqué au fond du contenant de centrifugation. Celui-ci est principalement constitué d'un gel de silice et ne contient soit peu ou pas de thorium (Dia Hantchi, 1993).

L'étape suivante consiste à produire un précipité de fer. Celui-ci permettra l'adsorption des éléments lourds tels que U-Th de s'introduire dans ses pores. Cela consiste en l'ajout d'hydroxyde d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{OH}$ , 15N) au bécher contenant de l'acide nitrique concentré ( $\text{HNO}_3$ , 16N) en brassant continuellement jusqu'à l'obtention d'une solution orangée avec formation d'un précipité. La réaction entre  $\text{HNO}_3$  et  $\text{NH}_4\text{OH}$  est très violente à cause de leur pH très différent soit d'environ 0 pour  $\text{HNO}_3$  (acide), et d'environ 15 pour  $\text{NH}_4\text{OH}$  (base). Afin d'atténuer la violence de cette réaction, il est possible de diluer l'acide avec de l'eau distillée, ce qui neutralisera la solution. Quelques gouttes de chlorure ferrique peuvent être ajoutées si le précipité ne se forme pas à cause de la faible concentration en Fe de l'échantillon. Afin d'obtenir un précipité de fer qui captera le maximum d'éléments lourds, le pH doit se situer entre 7,5 et 8,0 (Lozano *et al*, 1997). Le précipité est ensuite chauffé à feu doux pendant environ 20 minutes dans le but de créer des mouvements de convection qui favoriseront la capture de la majorité des éléments lourds.

Lorsque le temps de chauffage est écoulé, l'échantillon est centrifugé à nouveau pendant 4 à 5 minutes, et ce, dans le but de récupérer le précipité. Une fois la centrifugation terminée, on jette le surnageant ( $\text{HNO}_3 + \text{NH}_4\text{OH}$ ) et on ajoute de l'eau bouillante dans les pots de centrifugation, afin de nettoyer le précipité. Une seconde centrifugation (environ 5 minutes) est effectuée. Après la centrifugation, on jette l'eau chaude des pots et on ajoute quelques gouttes d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ , 8N) afin de dissoudre le précipité de fer.

### *Séparation et purification des radioéléments de thorium*

L'étape de récupération du thorium consiste à séparer les radioéléments et à purifier le thorium par la suite à l'aide de colonnes contenant de la résine échangeuse d'ions. La première colonne (20 ml) permettra de séparer les radioéléments. On y verse d'abord un peu d'alcool éthylique, et ce, afin d'humecter la pastille Fritz™ qui se trouve au fond de la colonne, puis un peu d'eau distillée pour enlever l'air qu'elle contient.

Par la suite, 5 à 6 ml de résine anionique AG1X8 (Dowex®, maille 200 à 400) sont introduits dans la colonne. Cette résine permet de capter le thorium et de laisser passer certaines impuretés (le fer en particulier), ainsi que les autres éléments lourds, en majorité. Avant de passer à cette étape, la résine doit être d'abord conditionnée. Le conditionnement consiste en l'ajout successif d'un volume de HNO<sub>3</sub> (8N), d'un volume d'eau distillée, puis de quatre volumes de HNO<sub>3</sub> (8N) en prenant soin de laisser couler complètement chaque volume dans un bécher déchet avant d'y ajouter le volume suivant. Un volume correspond à la quantité de résine que l'on a versée dans la colonne. Dans le cas qui nous concerne, un volume égale 5 à 6ml.

Une fois le conditionnement terminé, l'échantillon est versé dans la colonne afin de fixer le thorium et de récupérer les impuretés. Lorsque la colonne est vidée, l'étape suivante consiste à rincer la résine à l'aide de 4 volumes d'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>, 8N) qu'on laisse écouler afin d'extraire les impuretés de l'échantillon tel que le fer et les radioéléments autres que le thorium.

Enfin, l'étape de l'élution du thorium consiste à ajouter 4 volumes d'acide chlorhydrique (HCl, 6N) dans la colonne et à récupérer cet acide, ainsi que le thorium, dans un bécher de 30 ml propre identifié. Une fois l'élution terminée, le bécher est placé sur une plaque chauffante afin d'évaporer le liquide récupéré.

Le liquide récupéré contient parfois des impuretés tels que du cuivre, du fer, etc. selon la provenance des échantillons. C'est pourquoi une deuxième colonne peut être préparée afin de purifier chaque échantillon.

Cette seconde colonne, cette fois de 10 ml, est préparée selon les mêmes procédures décrites précédemment, à l'exception des manipulations suivantes :

1. On insère seulement 2 ml de résine anionique AG1X8 (Dowex<sup>®</sup>, maille 200 à 400);
2. Lors du conditionnement de la colonne, on verse l'un après l'autre :
  - 1 volume de HNO<sub>3</sub> (8N);
  - 1 volume d'eau distillée;
  - 2 volumes de HCl (6N);
  - 4 volumes de HNO<sub>3</sub> (7N), afin de purifier au maximum la résine.

Après cette seconde colonne, l'échantillon contiendra beaucoup moins d'impuretés. L'échantillon est par la suite évaporé à nouveau.

### *Électrodépôt du thorium*

La dernière étape consiste à l'électrodéposition, c'est-à-dire à déposer par électrolyse les échantillons de thorium sur des disques d'acier polis. Les tubes de verre à électrodépôt ainsi que les fils de platine, qui ont été préalablement nettoyés à l'acide nitrique chaud, doivent d'abord être rincés à l'eau distillée puis asséchés à l'acétone. Un morceau de parafilm est ensuite placé sur la partie externe du fond du tube afin que le tout soit hermétique. On doit par la suite couper le parafilm où l'ouverture, à la base du tube. Un disque d'acier y est déposé en prenant soin que le côté poli de celui-ci soit orienté vers l'intérieur du tube en appuyant fermement afin de bien le sceller à la base du tube pour qu'il n'y ait pas de fuite.

Par la suite, on peut déposer les tubes sur les champignons de cuivre du montage et mettre des pinces afin de favoriser l'étanchéité du tube. Le montage est relié à un robinet ce qui permet de refroidir le dispositif. Des fils composés de pinces alligator sont ensuite raccordés au montage de la façon suivante : un premier fil relie le pôle négatif du voltmètre au champignon de cuivre, et un second, du pôle positif au filament de platine. Le filament est placé dans le tube de verre et il est bloqué, à l'aide d'une pince installée à cet effet, à environ 2 mm du disque d'acier.



Afin de vérifier l'étanchéité du tube, on y verse un peu d'alcool éthylique. Par la suite, si le tube est étanche, l'échantillon de thorium mis en solution dans environ 3 gouttes de HCl (6N) extra-pur est versé dans un tube. On peut mettre le voltmètre sous tension et finir de remplir le tube avec de l'alcool éthylique. Le voltage doit être réglé à environ 20 Volt et maintenu pendant la procédure d'électrodépôt. Une fois que le contrôle de voltage a atteint le maximum, on attend que le voltage descende sous la barre des 10 Volts. Une fois atteint, soit quelques heures plus tard, on peut retirer le disque d'acier et le rincer avec de l'éthanol, avant de le placer dans un boîtier identifié à cet effet et le placer dans le spectromètre alpha.

## B.2 Manipulations du plomb

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées afin de déterminer les quantités de  $^{210}\text{Pb}$  dans un échantillon :

- Par spectrométrie  $\gamma$  à puits spécialisés où la zone d'émission d'énergie du  $^{210}\text{Pb}$  est de 45 keV;
- Par spectrométrie  $\beta$  où le  $^{210}\text{Pb}$  produit du  $^{210}\text{Bi}$  qui possède une énergie d'émission de 1,2 MeV et une période de 5 jours;
- Par spectrométrie  $\alpha$  où le  $^{210}\text{Pb}$  forme le  $^{210}\text{Po}$  qui possède une énergie d'émission de 5,30 MeV et une période de 138,4 jours.

Pour cette étude, le  $^{210}\text{Pb}$  a principalement été déterminé par spectrométrie  $\alpha$ . L'application de cette dernière méthode est favorisée puisqu'elle est plus flexible et plus précise que les deux méthodes mentionnées précédemment. En effet, en spectrométrie  $\gamma$ , le bruit de fond est élevé dans cette zone d'énergie faible ce qui entraîne une diminution de l'efficacité du détecteur.

Il est important de noter que l'utilisation d'un traceur est nécessaire lors du comptage de ces échantillons dans le spectromètre  $\alpha$ . En effet, le traceur nous permet de calculer le rendement chimique des manipulations ainsi que la concentration des isotopes concernés. Deux traceurs sont employés au GEOTOP :  $^{208}\text{Po}$  et le  $^{209}\text{Po}$ . En général, le  $^{209}\text{Po}$  est plus fréquemment utilisé puisque celui-ci est peu radioactif (ce qui rend son activité plus stable) comparativement au  $^{208}\text{Po}$ . De plus, ce dernier possède une énergie d'émission proche du spectre du  $^{210}\text{Po}$  ce qui peut engendrer une interférence des spectres entre ces 2 isotopes ainsi que des erreurs de concentration des isotopes.

### *Extraction du plomb*

Tout comme il a été mentionné dans la section précédente, il est d'abord nécessaire de chauffer le sédiment dans une étuve pendant quelques jours afin de le déshydrater. Le sédiment est ensuite broyé afin de le rendre homogène.

Avant de dissoudre les échantillons, environ 2,6 ml (environ 0,28g) de traceur ( $^{209}\text{Po}$  fabriqué le 21 février 1996;  $T=102$  ans; Énergie : 4,88meV) est déposé dans un creuset de Téflon™ identifié. L'identification du bol est un numéro UQPo noté dans un cahier de laboratoire où est également inscrit le site d'échantillonnage ainsi que le poids du traceur et de sédiment.

Le creuset est ensuite chauffé à faible température puisque le traceur est fabriqué à partir de HCl (6N). Ainsi, l'acide dans lequel il est dissous n'affectera pas les carbonates du sédiment lors de la pesée de celui-ci. Lorsque le traceur est évaporé, on ajoute ensuite de 0,8 à 1,0 g de sédiment dans le creuset. Le sédiment est par la suite dissous dans différents acides comme il a été mentionné plus haut dans la manipulation du thorium. Les manipulations suivantes sont les mêmes que pour la manipulation précédente (*cf.* section précédente). Une fois le précipité de fer recueilli, l'échantillon est dissous dans de l'acide chlorhydrique (8N). L'étape suivante consiste en l'extraction du fer de l'échantillon dissous à l'aide d'ampoule de verre et d'isopropyléther afin de récupérer le polonium. En condition acide, l'isopropyléther extrait le fer présent dans la solution. Une fois le fer neutralisé, la solution devient incolore.

La prochaine étape consiste à la fixation du Pb et  $^{209}\text{Po}$  de la solution d'acide chlorhydrique sur le disque d'argent. Les disques d'argent ont d'abord été nettoyés à l'aide d'un nettoyant d'argent tel que Silvo™. Ensuite, le côté non poli du disque a été peint avec de la peinture en aérosol et séché à l'air libre par la suite.

Afin d'optimiser la fixation du polonium, la solution d'acide chlorhydrique (HCl) doit être à un pH d'environ 1,3. Afin d'obtenir ce pH, on ajoute à la solution de l'eau et de l'hydroxyde d'ammoniac ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), tout en vérifiant le pH à l'aide d'un pHmètre préalablement calibré. Une fois le pH atteint, on dépose le disque d'argent dans la solution; celui-ci doit être placé de façon à ce que la face argentée du disque soit orientée vers le haut dans le bécher. Le bécher est ensuite chauffé pour une durée de 4 à 5 heures à une température d'environ 80°C. Il est préférable de vérifier le pH à quelques reprises durant cette période. De plus, il est important de vérifier le niveau de liquide dans le bécher afin de s'assurer que le disque d'argent est couvert sinon il pourrait s'oxyder. De plus, des cristaux d'ammoniac pourraient se former et encroûter le disque d'argent. Si cela se produit, l'ajout d'eau désionisée dans le bécher dissolva les cristaux.

Lorsque le temps est écoulé, on récupère le disque d'argent à l'aide d'une petite pince, on le nettoie avec de l'eau distillée et on le laisse sécher à l'air libre ou à l'aide d'acétone. Enfin, on peut le déposer dans une petite capsule de plastique identifiée par son numéro UQPo. Le disque d'argent est maintenant prêt à être analysé à l'aide du spectromètre alpha.

Quelques analyses de  $^{210}\text{Pb}$  ont été effectués en spectrométrie  $\gamma$  (se référer à la section B.4 pour plus d'informations sur ce spectromètre).

### B.3 Spectrométrie $\alpha$ et acquisition de données

Le comptage des disques s'effectue à l'aide d'un spectromètre  $\alpha$  de type EGG-Ortec-Type 576A<sup>TM</sup> équipés de 16 détecteurs. Ces détecteurs sont des cristaux de silicium semi-conducteurs qui ont pour rôle de transformer les énergies de désintégration  $\alpha$  en signaux électriques.

Les signaux sont ensuite amplifiés et envoyés dans un analyseur multicanal. Les données sont traitées par ordinateur à l'aide du programme Maestro<sup>TM</sup>. Ce programme permet de définir les différents pics des domaines énergétiques qui représentent chaque radioélément. Le <sup>228</sup>Th, le <sup>230</sup>Th, le <sup>232</sup>Th, le <sup>209</sup>Po et le <sup>210</sup>Po possèdent respectivement des énergie de 5,424 MeV, 4,684 MeV, de 3,994 MeV, de 4,882 MeV et de 5,305 MeV.

Pour des raisons de statistique, un comptage minimum de 2000 coups est requis pour chaque isotope et ce, indépendamment du temps de comptage de l'échantillon. On peut ainsi obtenir une incertitude de  $\pm 3\%$  ( $\pm 1\sigma$ ). De plus, le bruit de fond de la chambre utilisée doit être considéré et soustrait de chaque spectrogramme analysé.

#### B.4 Manipulations du césium

Le  $^{137}\text{Cs}$  est un isotope d'origine anthropique qui provient des essais thermonucléaires réalisés en haute atmosphère surtout entre les périodes de 1950 et 1970 avec un maximum en 1963-1964. Cet isotope a la particularité d'être un émetteur  $\gamma$ . Celui-ci se désintègre de la façon suivante :



Afin d'être analysés, les échantillons sont séchés dans une étuve à environ 40°C. En général, on broie les échantillons à l'aide d'un mortier en agate. Cependant, si les échantillons sont de type marin et possiblement utilisés ultérieurement pour des analyses micropaléontologiques, ceux-ci seront plutôt humidifiés avec de l'eau désionisée dans un plat de pétrie pré-identifié et pesé. Le sédiment doit être étalé dans le plat de pétrie afin de l'homogénéiser. Le sédiment sera ensuite séché dans une étuve à 60°C et pesé.

Pour les échantillons broyés, on les dépose dans un plat de Pétrie de 60 mm de diamètre qu'on a taré et identifié initialement, et on pèse le tout afin d'obtenir la masse de l'échantillon. L'échantillon peut être par la suite analysé par spectrométrie  $\gamma$ .

Le spectromètre  $\gamma$  utilisé est de type coaxial à coïncidence (EG&G ORTEC GMX-10180). Celui-ci est composé d'un détecteur sous la forme d'un cristal de germanium très pur qui transforme chaque désintégration de la source en un signal électronique. Ce signal est par la suite amplifié puis conservé dans un analyseur multicanaux. Ce signal est par la suite déchiffré à l'aide du logiciel MAESTRO™ fonctionnant sous le système d'exploitation DOS (Microsoft™) et le calcul de la surface net sous la courbe du pic de  $^{137}\text{Cs}$  est traité par le logiciel EPAA™ (sous système d'exploitation DOS).

L'échantillon nécessite un minimum de 2000 coups afin d'obtenir une erreur de 3 % ( $\pm 1 \sigma$ ). Cependant, par manque de matériel (seulement 2 détecteurs  $\gamma$ ) et du nombre considérable

d'échantillons à analyser, l'échantillon n'a été laissé qu'un jour dans le détecteur. L'erreur sur les échantillons est donc plus importante.

Un second détecteur, à puits coaxial de type Canberra <sup>TM</sup> (Modèle 7500SL/ 742-2), a également été utilisé. Celui-ci a une capacité volumétrique approximative de 8 cm<sup>3</sup>. Le sédiment sec et broyé est, dans ce cas-ci, placé dans un tube de pyrex de 5 cm de haut et légèrement compacté. Il est ensuite analysé pendant une période variable (environ 1,5 journée) basée sur les concentrations des différents isotopes que l'on veut étudier afin d'avoir une erreur relative variant de 5 % à 10 %.

Quelques analyses de <sup>210</sup>Pb ont été effectuées sur ce spectromètre. Une calibration de l'appareil a dû être effectuée préalablement. Celle-ci a été réalisée à partir d'un étalon composé d'aiguilles et de brindilles d'épinette broyées (CLV-1 (Énergie, Mines et Ressources Canada)). De plus, des échantillons, de cette étude, préalablement analysés sur le détecteur  $\gamma$  coaxial à coïncidence (EG&G ORTEC GMX-10180) ont également servi d'étalon. Le rendement de l'appareil pour les différents isotopes analysés a été déterminé à partir de la moyenne générale des multiples analyses effectuées pour un même échantillon à plusieurs reprises et pendant des durées variables. L'efficacité du détecteur a été évaluée à 58 % pour le <sup>210</sup>Pb et à 13,5 % pour le <sup>137</sup>Cs.

## RÉFÉRENCES

- Dia Hantchi, K. 1993. «Déséquilibres Th/U dans les altérites du craton ouest nigérien». Mémoire de maîtrise, Montréal, Université du Québec à Montréal, 67 p.
- Lozano, J.C., Fernandez, F. et Gonez, J.M.G., 1997. Preparation of alpha spectrometric sources by coprecipitation with  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  : Application to Actinides. *Applied Radiation and Isotopes*, 48 (3): 383-389.