

UNIVERSITE DU QUEBEC A RIMOUSKI

**CARACTERISATION ET QUANTIFICATION PAR TOMODENSITOMETRIE
AXIALE DE LA BIOTURBATION INDUITE, PAR LA COMMUNAUTE A
MACOMA BALTHICA DE L'ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT, EN FONCTION
DES CARACTERISTIQUES SEDIMENTAIRES DE LA ZONE INTERTIDALE**

MEMOIRE PRESENTE A

L'INSTITUT DES SCIENCES DE LA MER DE RIMOUSKI

PAR

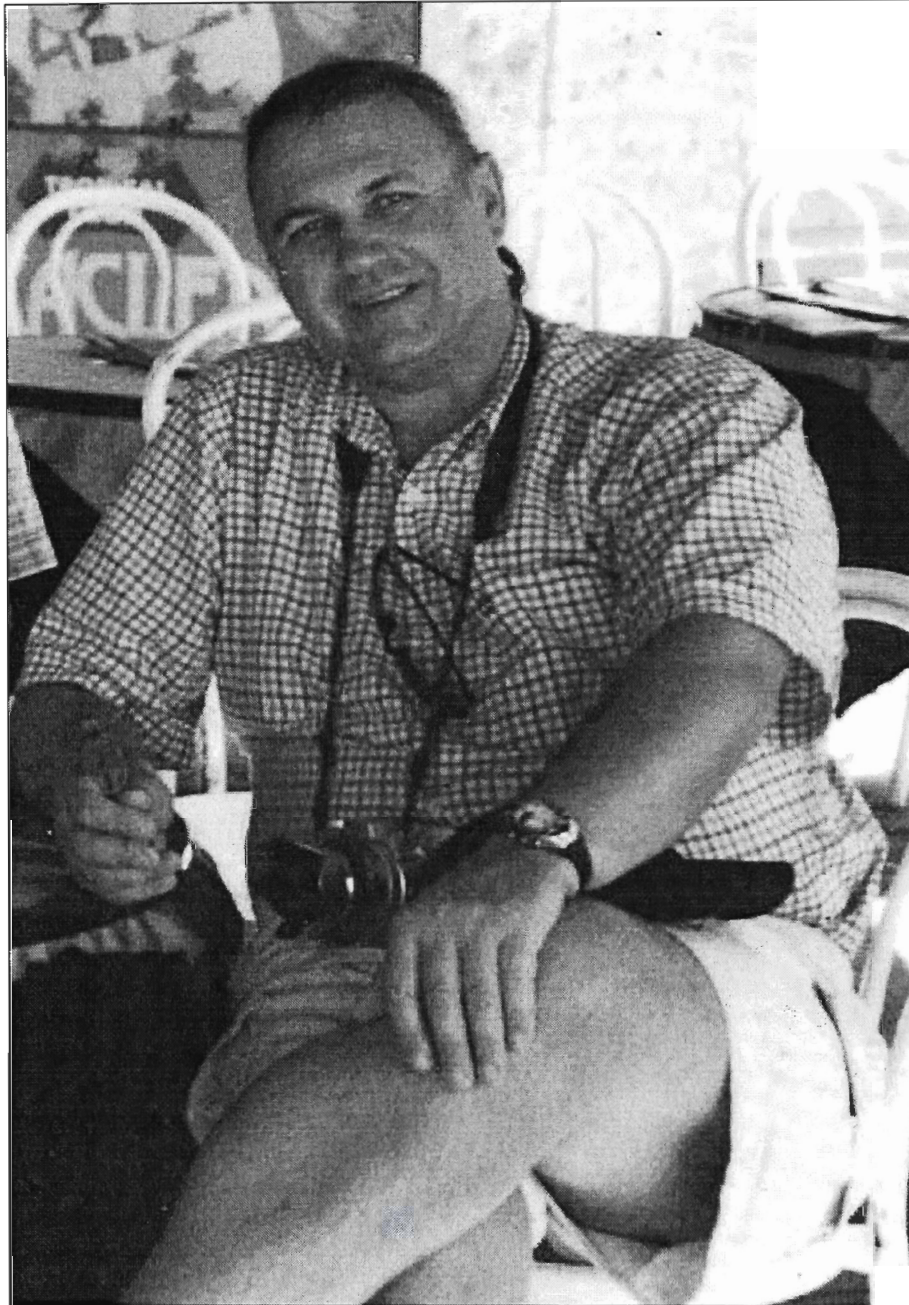
MARIE GAGNOUD

Décembre 2005

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.



A Gaston Desrosiers,

Qui a su, sans aucun doute, contribuer au bon déroulement de mes études et de mon voyage au Québec. Sa gentillesse, ses connaissances et sa disponibilité me laisseront un souvenir éternel.

Il nous restera un Kamouraska ensoleillé où Gaston s'est peut-être arrêté pour se reposer...

ABSTRACT

Intertidal zones of the St-Lawrence Estuary are inhabited by the modern community of *Macoma balthica*. In these intertidal zones, glaciomarine mud deposited during the Late-Wisconsinian postglacial marine transgression of eastern Quebec (Goldthwait Sea) is ubiquitous in the sedimentary column. This mud is very compact and thus limits the penetration of *Macoma balthica* community organisms such as the polychaete *Nereis virens* and the bivalves *Macoma balthica* and *Mya arenaria* (Mermillod Blondin, 2003). Axial tomodesitometry (CT-Scan) is a non destructive method that provides high resolution 3-D digital images of the sediment characteristics (grain size, mineralogy, primary and secondary sedimentary structures, fabric, shape and roundness, bedding contact) from multiple angles. CT-Scan images allow a visualization of the recent, highly bioturbated sediment layer, which can be distinguished from the underlying Goldthwait Sea mud. This technique, which reports the density values of analysed materials, is used to discriminate between the different lithologies, lithofacies, bioturbations and organisms composing the deposit, thus allowing a quantification of the volume occupied by the different components of the material. The CT-Scan images also provide information on the distribution, orientation and imbrication of thanatocoenosis shell beds that alternate with massive or faintly laminated glaciomarine mud beds, as well as on ichnofacies characteristics. When coupled with conventional sedimentary (grain size statistics) and radiochronological analyses (^{14}C), this data provides valuable data for identifying depositional processes and depositional sedimentary environments. Sampled cores from the sedimentary column of “Baie du Ha! Ha!” and “l’Anse à l’Original” (Bic National Park, Quebec), are used to compare sediment deposition between sites, the thickness of massive glaciomarine mud and

the *Mytilus edulis* fossil beds. The 800 mm long cores allowed us to temporally discriminate several periods of sub-marine mass movement. Following the analysis of sedimentary characteristics of the glaciomarine mud and modern sand layers, we have characterized organisms which bioturbate the upper layer. Statistical analyses are used to evaluate differences in the composition of the *Macoma balthica* community between sites of different orientation. Finally, an automatic method to quantify organisms and biogenic structures in the sedimentary column from CT-Scan was developed, to improve the previously used manual method.

RESUME

Les vasières intertidales de l'estuaire maritime du Saint-Laurent sont occupées par la communauté boréo-atlantique à *Macoma balthica*. L'unité sédimentaire de silt argileux glaciomarin mise en place pendant la transgression tardi-wisconsinienne de la mer de Goldthwait est omniprésente dans la colonne sédimentaire de plusieurs zones intertidales de l'estuaire du Saint-Laurent. Cette unité très compacte limite la pénétration d'organismes appartenant à la communauté moderne de *Macoma balthica* tels que le polychète *Nereis virens* et les deux bivalves *Macoma balthica* et *Mya arenaria* (Mermillod Blondin, 2003). La tomodensitométrie axiale (CT-Scan) est une méthode non destructive fournissant des images numériques en 3-D des caractéristiques sédimentaires telles que la granulométrie, la minéralogie, les structures sédimentaires primaires et secondaires, la texture, la morphologie des cailloux, la nature des contacts entre les lits ainsi que des images des organismes en place. Dans une étude préliminaire, les images CT-Scan nous ont permis de

visualiser la couche moderne de sédiments fortement bioturbée et de la distinguer de la couche de boue de la mer de Goldthwait sous-jacente. Étant basée sur les différences de valeurs de densité du matériel analysé, cette méthode permet de discriminer les différents lithofaciès, la bioturbation, les organismes vivants dans le sédiment, et de quantifier le volume occupé par les différentes composantes du matériel. Les images CT-Scan fournissent également des informations sur la distribution, l'orientation et l'imbrication dans les lits de thanatocénoses de coquilles alternées avec les lits massifs et faiblement laminés de silt argileux glaciomarin. Couplées à des analyses sédimentologiques conventionnelles (granulométrie) et radiochronologiques (^{14}C), les images fournissent des données aidant à mieux définir les processus et les environnements sédimentaires. L'échantillonnage des carottes au sein de la colonne sédimentaire de la baie du Ha! Ha! et de l'Anse à l'Original, parc du Bic (Québec), ont permis de suivre temporellement les sédiments, de comparer leur déposition selon la baie, l'épaisseur des argiles massives de Goldthwait et la présence ou absence des lits de *Mytilus edulis*. Les carottes de 800 mm de longueur, ont aidé à discriminer dans le temps des événements successifs comme des glissements sous-marins. Après avoir analysé les caractéristiques sédimentaires de la couche de silt argileux marin et de la couche actuelle de sable vaseux, nous avons caractérisé et quantifié les organismes bioturbateurs de cette dernière couche. Des analyses statistiques ont aidé à évaluer s'il y a des différences dans la structure de la communauté à *Macoma balthica* selon la baie d'exposition différente. Un dernier but à ce projet a été de mettre au point une méthode automatique de quantification des individus et des structures biogènes au sein de la colonne sédimentaire, dans le but d'améliorer la méthode manuelle mise au point précédemment.

TABLE DES MATIERES

ABSTRACT	IV
RESUME	V
TABLE DES MATIERES	VII
LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES ANNEXES	XI
CHAPITRE 1 PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS	1
CHAPITRE 2 MATERIEL ET METHODES	5
2. 1. SECTEUR D'ETUDE ET ECHANTILLONNAGE	5
2. 2. CONTEXTE GEOLOGIQUE	6
2. 3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA TOMODENSITOMETRIE AXIALE	9
2. 4. TECHNIQUES D'ANALYSES DES SEDIMENTS	13
2. 5. TECHNIQUES D'ANALYSES BIOLOGIQUES	14
CHAPITRE 3 RESULTATS ET DISCUSSION	15
3. 1. LA COLONNE SEDIMENTAIRE	15
3. 1. 1. <i>Résultats géologiques</i>	15
3. 1. 2. <i>Interprétations géologiques</i>	22
3. 2. LA FAUNE EN PLACE	24
3. 2. 1. <i>Résultats des analyses biologiques</i>	24
3. 2. 2. <i>Interprétations des analyses biologiques</i>	27
3. 3. LES STRUCTURES BIOGENES	29
3. 3. 1. <i>Mise au point de la méthode de quantification automatique</i>	29
3. 3. 2. <i>Comparaison des méthodes de quantification</i>	38

3. 3. 3. <i>Analyses des structures biogènes</i>	39
3. 3. 4. <i>Interprétations des données sur les structures biogènes</i>	41
CHAPITRE 4 CONCLUSIONS ET PROSPECTIVES	44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	46
ANNEXES	50

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation des deux baies dans le Parc National du Bic (photo aérienne).....	6
Figure 2. Positionnement de l’Inlandsis laurentidien en Amérique du Nord d’après Dyke et <i>al.</i> (2002)	7
Figure 3. Extension de la mer de Goldthwait d’après Fulton (1989)	8
Figure 4. Scanner Siemens au Laboratoire Multidisciplinaire de Scanographie.....	11
Figure 5. Exemple de coupe transversale, de topogramme et d’image 3-D	13
Figure 6. Analyses géologiques de l’échantillon A4.....	16
Figure 7. Analyses géologiques de l’échantillon A8.....	17
Figure 8. Représentation en 3-D des cailloux sub-arrondis.....	18
Figure 9. Représentation des différentes formes de cailloux selon leur arrondi d’après Powers (1953).....	18
Figure 10. Analyses géologiques de l’échantillon B4	20
Figure 11. Analyses géologiques de l’échantillon B8	21
Figure 12. Représentation en 3-D du lit de coquillages fossiles	22
Figure 13. Analyse hiérarchique réalisée avec le coefficient de similitude : Sorensen.....	25
Figure 14. Analyse hiérarchique réalisée avec le coefficient de similitude : Bray-Curtis ...	26
Figure 15. Profil de répartition du nombre d’individus total dans chaque site en fonction de la profondeur	27
Figure 16. Courbe de distribution du nombre de pixels en fonction des intensités tomographiques de la coupe transversale correspondante (2-75).....	30
Figure 17. Quantification manuelle des structures biogéniques (2-75).....	31
Figure 18. Courbes de Gauss d’une coupe transversale sans artéfact	33

Figure 19. Courbes de Gauss d'une coupe transversale (population importante d'argile et de carbonates).....	34
Figure 20. Courbes de Gauss d'une coupe transversale (2-75) avec mélange de faciès	35
Figure 21. Courbes d'ajustement représentant le nombre de pixels d'une coupe transversale en fonction des intensités tomographiques.....	37
Figure 22. Comparaison du pourcentage bioturbé au sein la colonne sédimentaire, selon la méthode employée.....	39
Figure 23. Application de la nouvelle méthode de quantification des structures biogènes (site A et B)	41

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1. Dufour, S., Desrosiers, G., Long, B., Lajeunesse, P., Gagnoud, M., Labrie, J., Archambault, P. and Stora, G., 2005. A new method for three-dimensional visualisation and quantification of biogenic structures in aquatic sediments using axial tomodesitometry. <i>Limnology and Oceanography : Methods</i> . 3 : 372-380.....	50
Annexe 2. Gagnoud, M., Lajeunesse, P., Desrosiers, G., Long, B., Dufour, S., Labrie, J., Mermillod-Blondin, F. and Stora, G., 2005. Litho- and bio-facies analysis of postglacial marine mud using CT-Scan. Soumis à <i>Engineering Geology</i>	61
Annexe 3. Localisation du Parc National du Bic (Amérique du Nord).....	84
Annexe 4. Données granulométriques au <i>Coulter counter</i> , sable vaseux en surface (couche 3, carotte A4).....	85
Annexe 5. Données granulométriques au <i>Coulter counter</i> , couche argileuse (couche 1, carotte A4).....	86
Annexe 6. Données granulométriques au <i>Coulter counter</i> , (couche 2 de la carotte A8)....	87
Annexe 7. Données granulométriques au <i>Coulter counter</i> , (couche 1 de la carotte A8)....	88
Annexe 8. Données granulométriques au <i>Coulter counter</i> , début de l'argile (couche 6, carotte B4).....	89
Annexe 9. Données granulométriques au <i>Coulter counter</i> , sable vaseux en surface (couche 7, carotte B4).....	90
Annexe 10. Données granulométriques au <i>Coulter counter</i> début de l'argile (couche 6, carotte B8).....	91
Annexe 11. Données granulométriques au <i>Coulter counter</i> , début couche argileuse (couche 1, carotte B8).....	92

CHAPITRE 1 PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS

Des sédiments glaciomarins sont observés au niveau de plusieurs sites sur la côte sud de l'estuaire du Saint-Laurent, à l'est du Québec (Dionne et Coll, 1995). Ces dépôts sont la conséquence directe de l'épisode de la mer de Goldthwait. Cette période correspond à la submersion marine finie et post-glaciaire des rives de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, formant une mer d'une superficie de 25 000 km² (Dionne, 1977). Ces sédiments ont parfois emprisonné des coquillages, lesquels permettent de dater la mise en place des argiles de la mer de Goldthwait (Hétu, 1998). De nos jours, cette unité argileuse est omniprésente dans la colonne sédimentaire de plusieurs zones intertidales de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, à l'est du Québec. Elle est recouverte par une couche de sable vaseux, actuellement bioturbée par les espèces de la communauté à *Macoma balthica* (Desrosiers et Brêthes, 1984).

C'est à l'intérieur de cette couche de surface que se déroulent la plupart des processus diagénétiques importants qui affectent les sédiments marins après leur dépôt et durant leur enfouissement (Chester, 1990). En plus d'être une zone géochimiquement très active, cette couche constitue pour les organismes benthiques un support physique et nutritif. Ces individus exercent des processus de bioturbation (remaniement des sédiments, construction et entretien des galeries, bioirrigation et déplacement dans le sédiment pour la recherche de nourriture). Cela modifie les paramètres géochimiques et géotechniques de la couche de surface. Plus particulièrement, ces activités vont transformer la structure primaire résultante de la mise en place des sédiments : modifications de la porosité, de la stabilité des sédiments et du granoclassement (Crémer et *al.*, 2002). Les conséquences observables de

l'activité des organismes macrobenthiques, sur ou dans les sédiments, portent couramment le nom de structures biogènes. Ces structures regroupent les traces et pistes en surface, les terriers et les galeries dans le sédiment (Gérino, 1992). De plus, elles représentent la fraction visible de la bioturbation et reflètent les potentialités de bioturbation de la faune en place (Gérino, 1992). Un des problèmes majeurs dans l'étude des processus de bioturbation reste la quantification de l'espace occupé par les structures biogènes en fonction des caractéristiques de la colonne sédimentaire (Diaz et Cutter, 2001).

La tomodynamométrie axiale est une méthode non destructive qui conserve intacte les échantillons pour d'autres analyses (Holler et Kögler, 1990 ; Wellington et Vinegar, 1987). Récemment la scanographie par CT-Scan, a permis l'obtention d'images numériques 3-D des caractéristiques sédimentaires telles que la granulométrie, la minéralogie, les structures sédimentaires primaires et secondaires, la morphologie des cailloux et la nature des contacts entre les lits. La représentation des structures sédimentaires en 3-D, suivant des angles d'observations variés, permet de mieux caractériser les processus de dépôts associés à l'environnement sédimentaire étudié (Boespflug et *al.*, 1995). Ce système possède une très bonne résolution spatiale et dispose également d'une excellente résolution en densités. L'acquisition de coupes transversales a permis également de visualiser les structures (anciennes et récentes) liées à la bioturbation dans le fjord du Saguenay et de quantifier le pourcentage d'occupation de ces structures biogènes (Crémer et *al.*, 2002 ; de Montety et *al.*, 2003 ; Michaud et *al.*, 2003). La méthode de quantification mise au point a été appliquée à la zone intertidale de l'estuaire du Saint-Laurent pour préciser exactement le volume occupé par les organismes et la profondeur des structures biogènes dans ce type d'environnement (Mermillod-Blondin, 2003).

Les objectifs de ce travail sont ciblés sur deux baies de la rive sud de l'estuaire du Saint-Laurent, lesquelles présentent des orientations différentes. Dans un premier point, en utilisant la tomographie axiale (CT-Scan), les caractéristiques sédimentaires de la Baie du Ha ! Ha ! et de l'Anse à l'Original seront précisées. De plus, avec la même technique, le second objectif sera de quantifier la bioturbation induite par les espèces de la communauté à *Macoma balthica* de la zone intertidale, en essayant notamment d'améliorer la méthode de quantification mise au point par de Montety et *al.*, 2003.

Les observations effectuées au Scanner, par Mermillod-Blondin (2003), démontrent que la pénétration d'organismes appartenant à la communauté boréo-atlantique à *Macoma balthica* tels que le polychète *Nereis virens* et les deux bivalves *Macoma balthica* et *Mya arenaria* (Mermillod-Blondin, 2003), est limitée par l'unité argileuse très compacte, appelée "argile de la mer de Goldthwait". La pénétration de ces organismes benthiques étant limitée par la présence de cette argile, il est donc indispensable d'étudier, grâce à la tomographie axiale, les caractéristiques sédimentologiques et les processus sédimentaires de mise en place de cette unité, au sein des deux baies échantillonnées.

Hypothèse nulle H_0 : Il n'y a pas de différence dans le mode de déposition des argiles de la mer de Goldthwait selon la baie.

Hypothèse alternative H_1 : Des différences dans les processus de mise en place du silt argileux glaciomarin (argile de la mer de Goldthwait) sont observées entre deux baies d'orientation différente.

La couche moderne surplombant l'épaisse couche d'argile est bioturbée par des organismes qui laissent des structures dans le sédiment. Ces structures biogènes récentes sont dépendantes des organismes en place. Par conséquent, il est important de connaître quelles

sont les différences dans la structure de la communauté à *Macoma balthica* au sein de deux baies échantillonnées.

Hypothèse nulle H_0 : Il n'y a pas de différence significative dans la structure de la communauté à *Macoma balthica*, entre les deux baies d'orientation différente.

Hypothèse alternative H_1 : Présence de différences dans la composition de cette communauté selon la baie.

Cette étude s'intègre au sein des études menées par le laboratoire de géologie marine à Laval et par le laboratoire d'écologie benthique de l'ISMER. Le laboratoire de géologie marine a pour but d'étudier la sédimentation au Quaternaire dans l'estuaire du Saint-Laurent, tandis que le laboratoire d'écologie benthique étudie la chronologie de l'implantation des communautés benthiques dans le Saint-Laurent, ainsi que la bioturbation générée par les organismes de ces communautés.

CHAPITRE 2 MATERIEL ET METHODES

2. 1. SECTEUR D'ETUDE ET ECHANTILLONNAGE

Des carottes de sédiments ont été prélevées à marée basse dans le haut de la zone intertidale, sur la rive sud de l'estuaire du Saint-Laurent (Annexe 3), dans le Parc National du Bic, Québec (Canada). Ces prélèvements ont été réalisés dans deux baies d'orientation différente : la Baie de l'Anse à l'Original (site A), d'orientation nord nord-est, et la Baie du Ha ! Ha ! (site B), d'orientation sud-ouest (Fig. 1). La topographie de ces baies est différente selon l'exposition. En effet, la Baie du Ha ! Ha ! est entourée de parois abruptes proches de la zone intertidale, tandis que l'Anse à l'Original est une zone plus dégagée ne possédant pas de parois abruptes directement en contact avec la zone benthique.

Dans chaque baie, six carottes en PVC d'environ 20 cm de long et de 9 cm de diamètre ont été enfoncées aléatoirement à l'intérieur d'une surface d'échantillonnage de 2 mètres carrés. Ces dernières étaient destinées à des études sur la structure des communautés benthiques intertidales. Puis, dans chaque site (emplacements des sites représentés de façon générale par une étoile, Fig. 1), deux autres carottes de 80 cm ont été prélevées pour des études sédimentaires. L'ensemble des carottes a ensuite été scellé par un bouchon de paraffine afin de préserver la colonne sédimentaire et d'éviter la migration de l'eau, puis les échantillons ont été conservés à 4 °C.

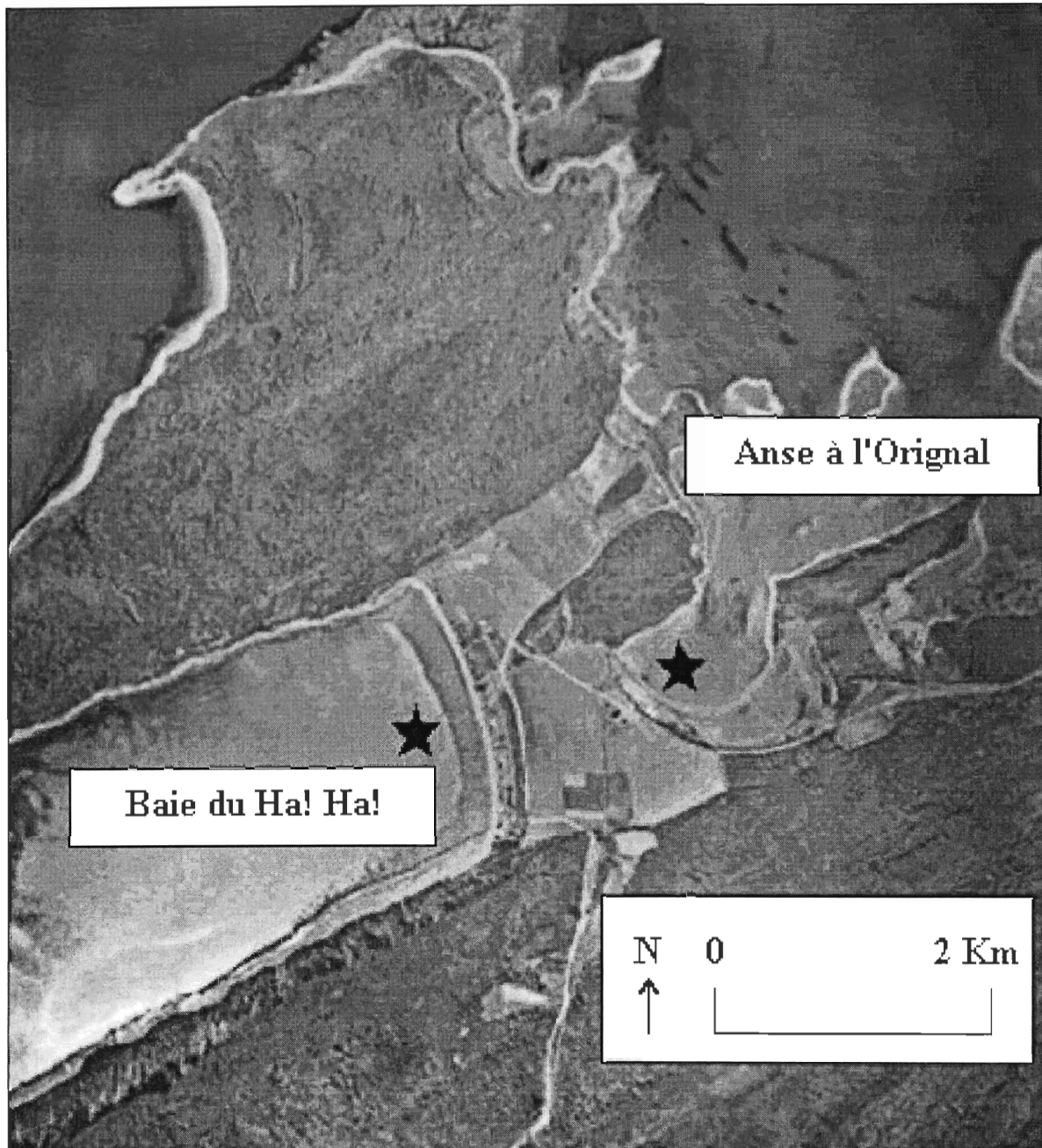


Figure 1. Localisation des deux baies dans le Parc National du Bic (photo aérienne)

2. 2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

L'Inlandsis laurentidien a recouvert de glace le Québec durant la dernière glaciation, dite wisconsinienne (Fig. 2). Il y a 14 000 ans, une augmentation de température entraîne la fonte et le retrait du glacier. C'est à cette époque que les eaux ont commencé à envahir les rives du Saint-Laurent, qui étaient abaissées par le poids des glaces wisconsiniennes, pour former la mer de Goldthwait (Fig. 3).

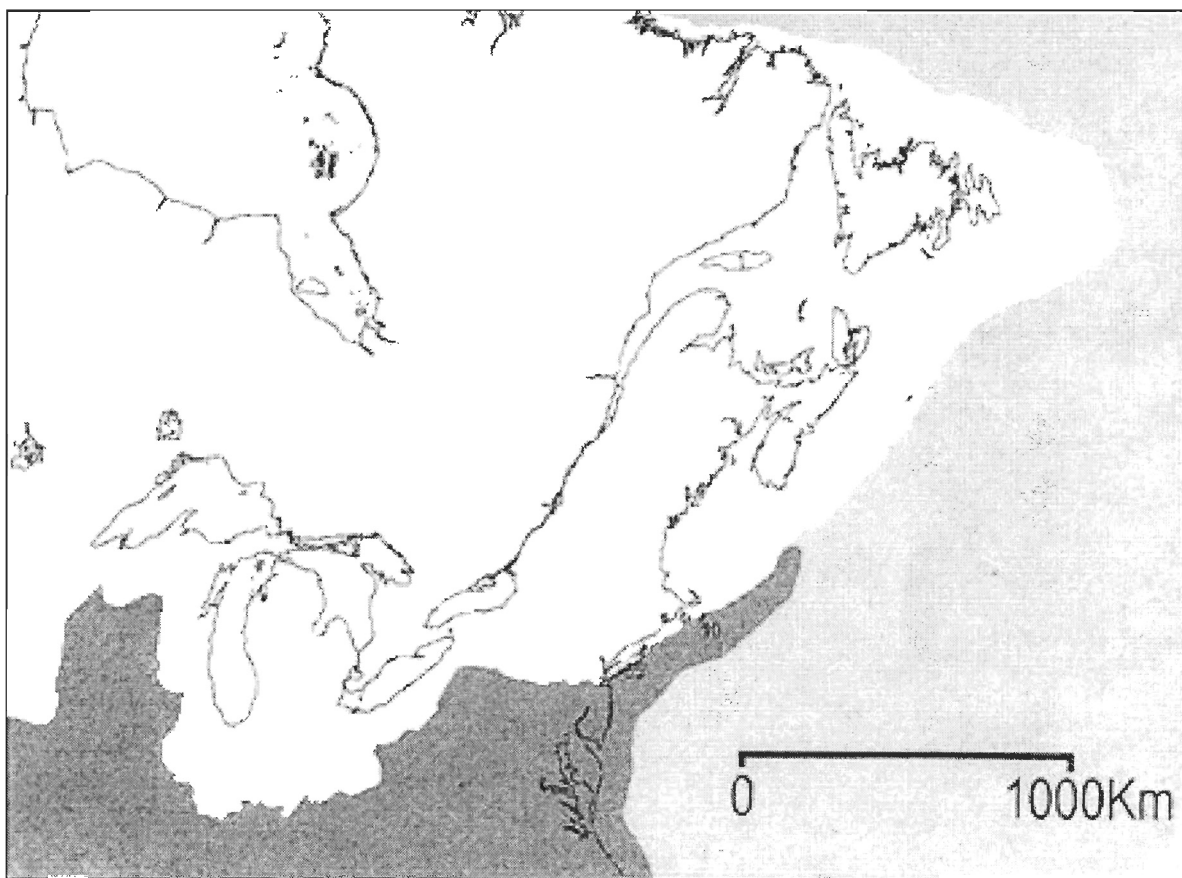


Figure 2. Positionnement de l'Inlandsis laurentidien en Amérique du Nord d'après Dyke et *al.* (2002)

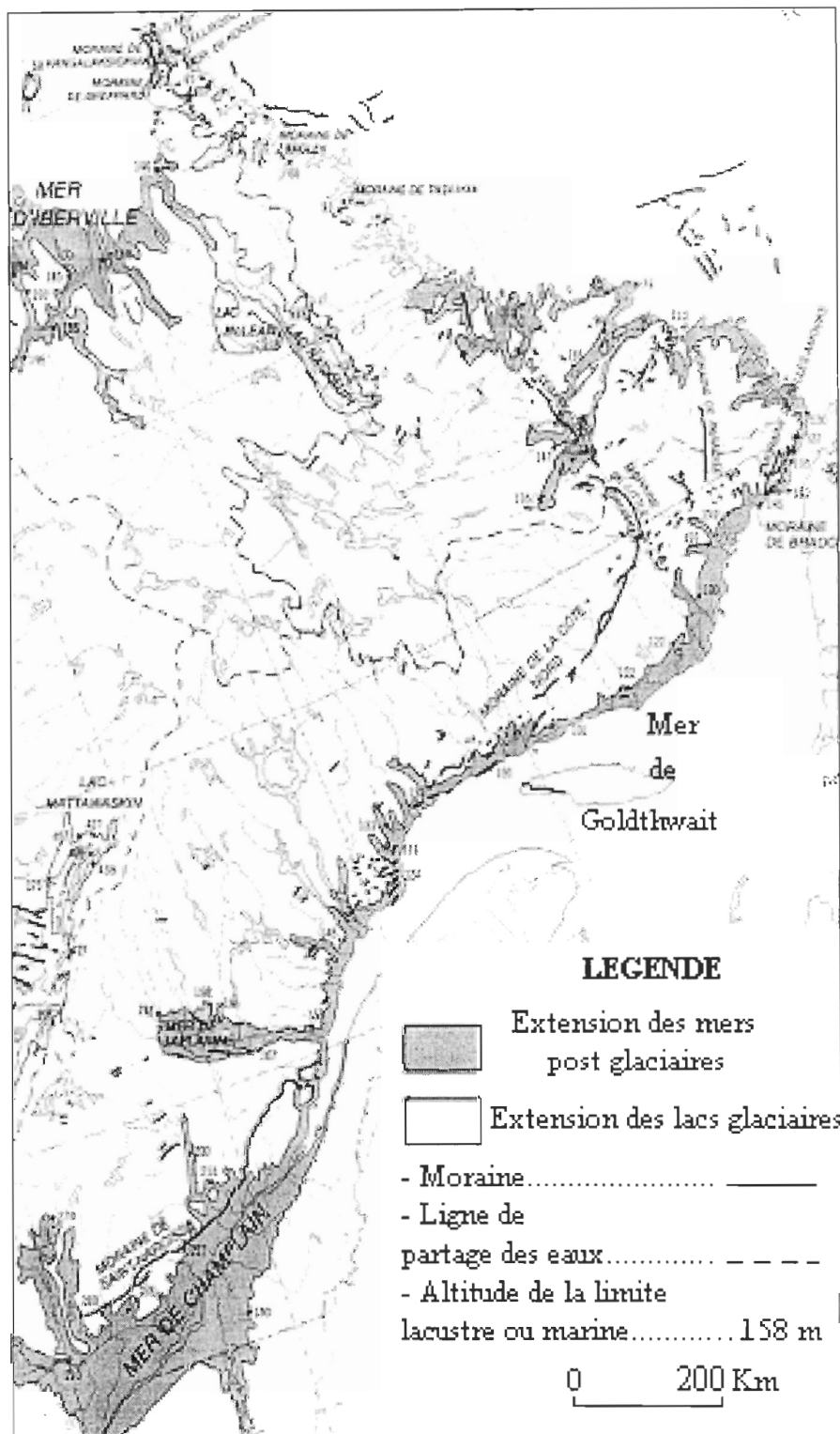


Figure 3. Extension de la mer de Goldthwait d'après Fulton (1989)

Durant cette transgression marine post-glaciaire, des sédiments fins ont été déposés majoritairement sous l'effet de plumes de turbidité provenant des eaux de fonte glaciaire (Syvitski et Praeg, 1989). Par la suite, le relèvement glacio-isostatique a provoqué une régression forcée et, ainsi, le retrait graduel de la mer. La baisse du niveau marin relatif (NMR) a amené le silt argileux glaciomarin initialement d'eaux profondes, à venir affleurer en zone intertidale. De nos jours, cette unité argileuse est omniprésente dans la colonne sédimentaire de plusieurs zones intertidales de l'estuaire maritime du Saint-Laurent (Dionne, 1977) à l'est du Québec. Elle est recouverte par une couche de sable vaseux dont le taux de sédimentation relativement faible permet l'installation des espèces de la communauté à *Macoma balthica* (Desrosiers et Brêthes, 1984).

2. 3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA TOMODENSITOMETRIE AXIALE

Par la suite, les carottes ont été analysées au Scanner *Siemens* (scanographe à statif coulissant), au Laboratoire Multidisciplinaire de Scanographie à Québec (Fig. 4). Durant l'analyse, la carotte passe au travers d'une couronne constituée d'une source de Rayons X rotative et de 600 récepteurs, dans le plan vertical. Le système émet des rayons sous tous les angles à travers l'échantillon, lesquels sont ensuite interceptés par les récepteurs. Les intensités atténuées des rayons sont transmises à l'ordinateur. Ainsi, il en résulte que l'échantillon est analysé suivant un mouvement hélicoïdal qui permet une étude de la carotte dans toutes les directions de l'espace. L'étude consiste en un problème d'atténuation des Rayons X par la matière et suit la Loi de Beer :

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

Où I_0 représente l'intensité initiale du faisceau, I l'intensité du faisceau à la sortie de l'échantillon et x l'épaisseur de celui-ci en centimètres, dans la direction du faisceau (Wellington et Vinegar, 1987). De plus, μ est le coefficient d'absorption linéaire de l'échantillon, lequel dépend de la densité de la matière, de l'énergie de rayonnement et du numéro atomique composant l'échantillon, traversé par le faisceau (Kantzas et *al.*, 1992 ; Boesflug et *al.*, 1994). Les densités de chaque caractéristique de l'échantillon sont exprimées en intensités tomographiques (IT en HU) (Hounsfield, 1973) :

$$IT = (\mu/\mu_{\text{eau}} - 1) \times 1000$$

Dans lequel μ est toujours le coefficient d'absorption linéaire de l'échantillon et μ_{eau} le coefficient d'absorption linéaire de l'eau. μ varie en fonction de chaque densité des caractéristiques de l'échantillon (Boesflug et *al.*, 1994). L'image est établie par recombinaison numérique du signal reçu sur chaque récepteur (Boesflug et *al.*, 1994; Wellington et Vinegar, 1987).

Le logiciel, associé au Scanner Siemens, effectue la transformation de ces unités en valeur de densités. Les logiciels d'imagerie médicale OSIRIS (Ligier et *al.*, 1994) et OSIRIX permettent de visualiser et de manipuler les images pour mettre en évidence les structures sédimentaires, la géométrie des dépôts, les variations de densités et les structures biogènes (Crémer et *al.*, 2000).

La scanographie offre une excellente résolution en contraste de densité (4096 valeurs d'intensités tomographiques correspondant chacune à une variation de 0,1 % de la densité). De plus, les IT sont représentées selon une échelle de gris avec une valeur par pixel. La

teinte du pixel observée sur les images est une fonction inverse de la valeur d'atténuation (Boespflug et *al.*, 1994) : les teintes claires sur les images indiquent une densité tomographique élevée comme les roches ou les carbonates, alors que les teintes foncées correspondent à de plus faibles densités tomographiques (espaces vides, eau ou matière organique).

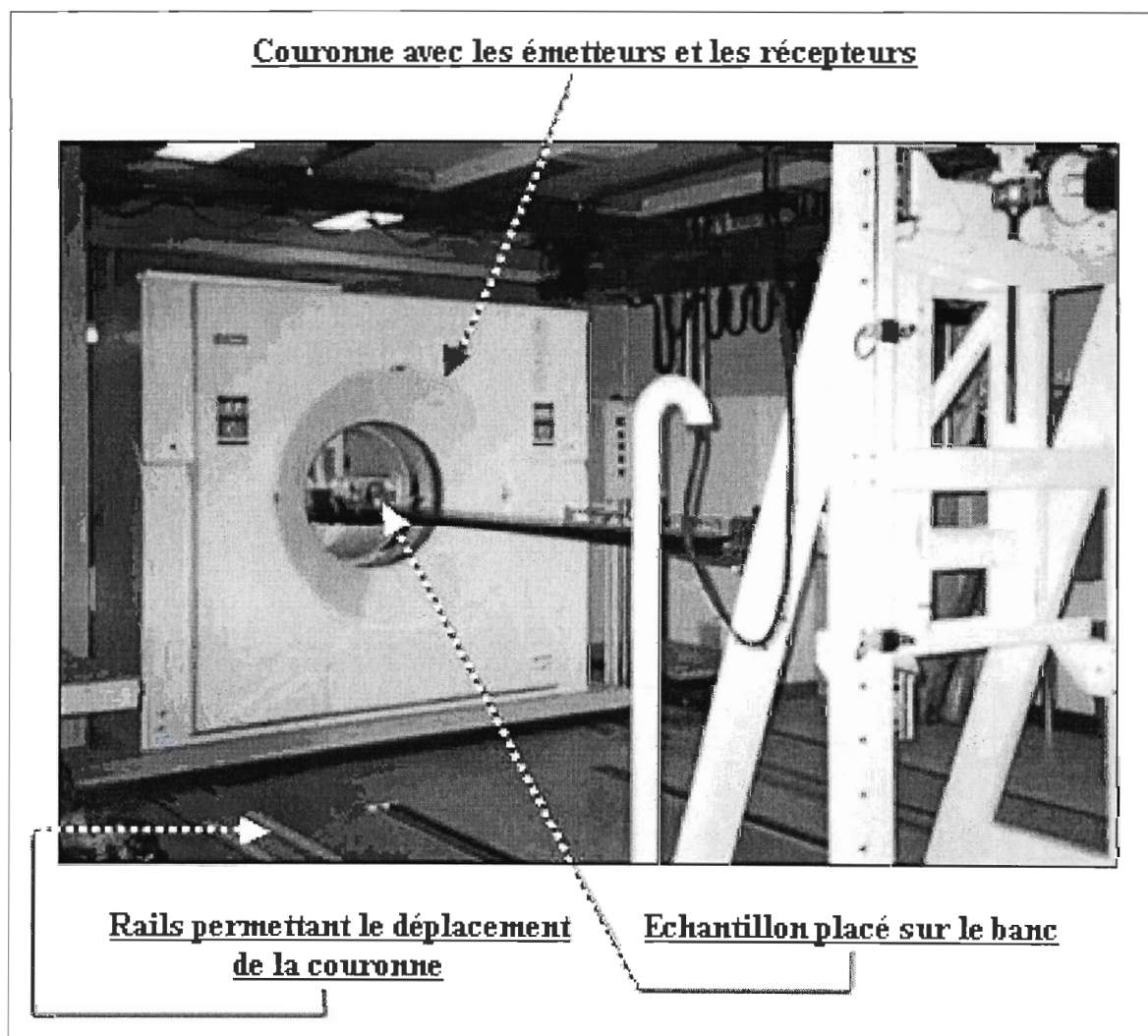


Figure 4. Scanner Siemens au Laboratoire Multidisciplinaire de Scanographie

Les coupes longitudinales ont une résolution de 1 mm par pixel, et les coupes transversales de 0,25 mm par pixel. Les coupes longitudinales (2-D ou topogrammes) sont effectuées pour observer rapidement et sans destruction les différents faciès (Fig. 5). Des coupes transversales sont ensuite réalisées au niveau des faciès intéressants. Ces coupes peuvent être utilisées par le logiciel *Siemens* du Scanner pour réaliser les images en 3-D de la zone étudiée. Elles sont surtout nécessaires pour calculer le pourcentage d'occupation des sédiments par les structures biogènes, avec le programme de quantification automatique.

Le développement de cette méthode se base en premier lieu sur la méthode manuelle développée par de Montety et *al.* (2003). Puis, cette première ébauche automatique présentant certaines contraintes, une deuxième méthode de quantification automatique sera mise au point à partir d'un algorithme d'ajustements des gaussiennes. Ces méthodes seront présentées dans la partie "Résultats et discussion" de cette étude.

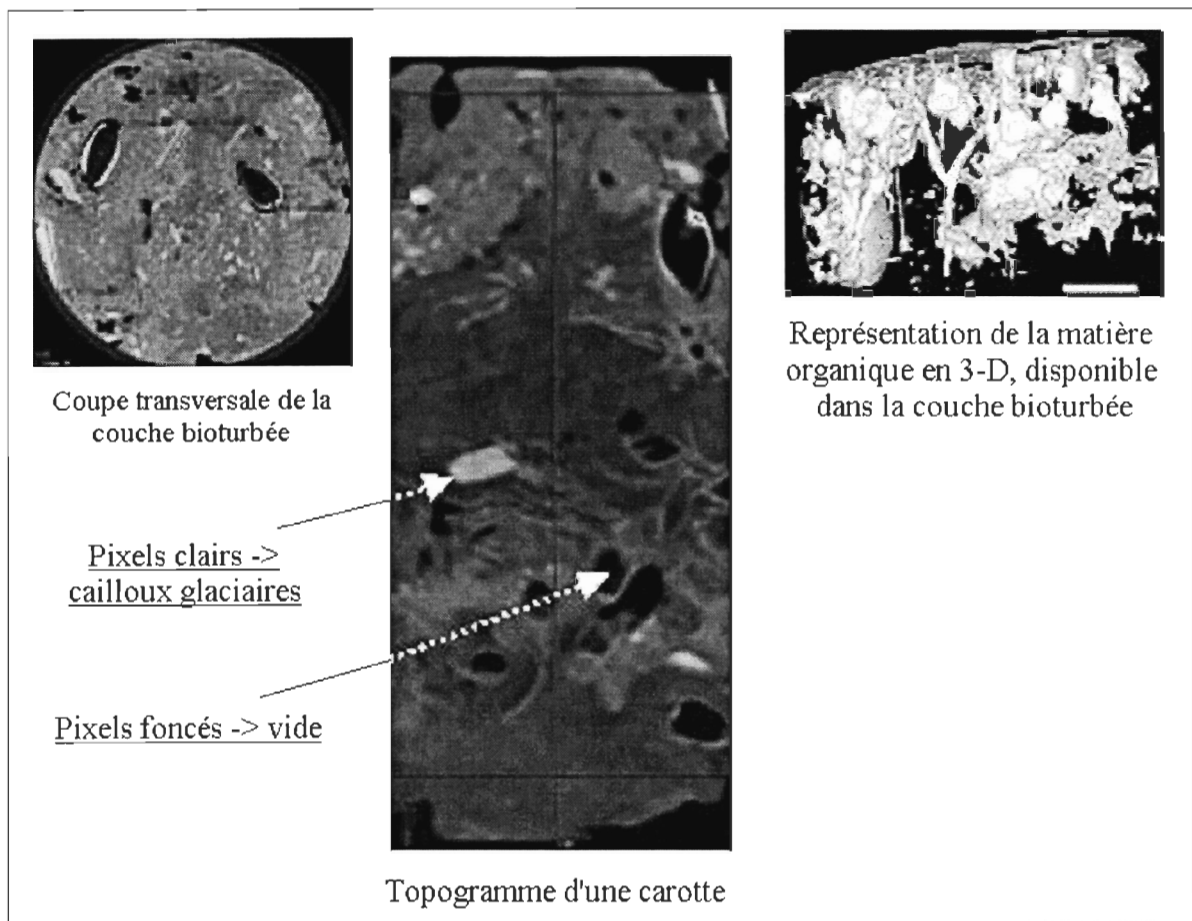


Figure 5. Exemple de coupe transversale, de topogramme et d'image 3-D

2. 4. TECHNIQUES D'ANALYSES DES SEDIMENTS

Les carottes de 80 cm utilisées pour les données géologiques, après avoir été analysées au Scanner, ont été ouvertes afin d'en décrire la granulométrie, les structures sédimentaires, les contacts entre les lits des principaux faciès sédimentaires et de vérifier la possible présence de coquillages fossiles. Dans chaque faciès des échantillons de sédiments ont été prélevés pour déterminer la taille des particules par analyse granulométrique au moyen d'un

Coulter Counter (Laboratoire de géologie, ISMER). La granulométrie et les descriptions sont utilisés dans cette étude pour valider les résultats obtenus avec la méthode de tomodynamométrie axiale. De plus, il est important, grâce à l'utilisation d'une charte Munsell, de déterminer s'il y a une différence de coloration dans les sédiments selon la baie.

Les débris de coquillages fossiles trouvés à l'intérieur des dépôts glaciomarins ont été prélevés dans chaque lit de coquillages. Afin de compléter notre étude, ces échantillons ont été datés au ^{14}C au Centre d'Études Nordiques, à l'Université Laval. Les valeurs obtenues sont non corrigées et non calibrées.

2. 5. TECHNIQUES D'ANALYSES BIOLOGIQUES

Les carottes de 20 cm, destinées aux analyses de la faune ont été découpées en tranches de 1 mm. Chacune de ces tranches a été tamisée sur un tamis de 250 μm et les organismes ont été ensuite conservés dans une solution tamponnée de formol à 4 %. Les échantillons ont été colorés avec du rose de Bengale pour faciliter leur tri au sein du sédiment. Les individus ont été comptés et triés par classe sous une loupe binoculaire, puis identifiés jusqu'au niveau spécifique pour les organismes supérieurs à 1mm.

La comparaison des densités de peuplements des différents sites a été réalisée en utilisant une analyse de variance (ANOVA à un facteur), après vérification de l'homogénéité des variances (Zar, 1974). La comparaison de la composition faunistique des peuplements dans

les différentes stations a été effectuée en utilisant le coefficient qualitatif de Sorensen (1948) et le coefficient quantitatif de Bray-Curtis (1957). La représentation graphique de la matrice de similitude de ces coefficients a été exécutée par classification automatique et plus précisément par la technique de l'analyse hiérarchique ascendante (algorithme du saut moyen).

CHAPITRE 3 RESULTATS ET DISCUSSION

3. 1. LA COLONNE SEDIMENTAIRE

3. 1. 1. Résultats géologiques

Les figures 6 et 7 présentent les topogrammes, les graphiques des IT en fonction de la profondeur et les logs (description de l'échantillon) des carottes A4 et A8, échantillonnées dans l'Anse à l'Original. L'analyse des graphiques des IT en fonction de la profondeur ne relève pas des faciès d'intensités différentes pouvant être corrélés avec les topogrammes. Ainsi, les IT dévoilent en moyenne une valeur de 650 HU pour A4 et 550 HU pour A8. Ces valeurs peuvent atteindre jusqu'à 1100 HU le long de la colonne sédimentaire. Dans cette baie, nous observons un mélange de sédiments argileux contenant un nombre important de cailloux (Fig. 8) et de graviers qui empêchent la différenciation des faciès. Selon la représentation en figure 9, ces cailloux ont une forme sub-arrondie. L'observation des logs permet cependant d'observer en surface, la présence d'une couche de sable vaseux entre 0 et 130 mm au maximum.

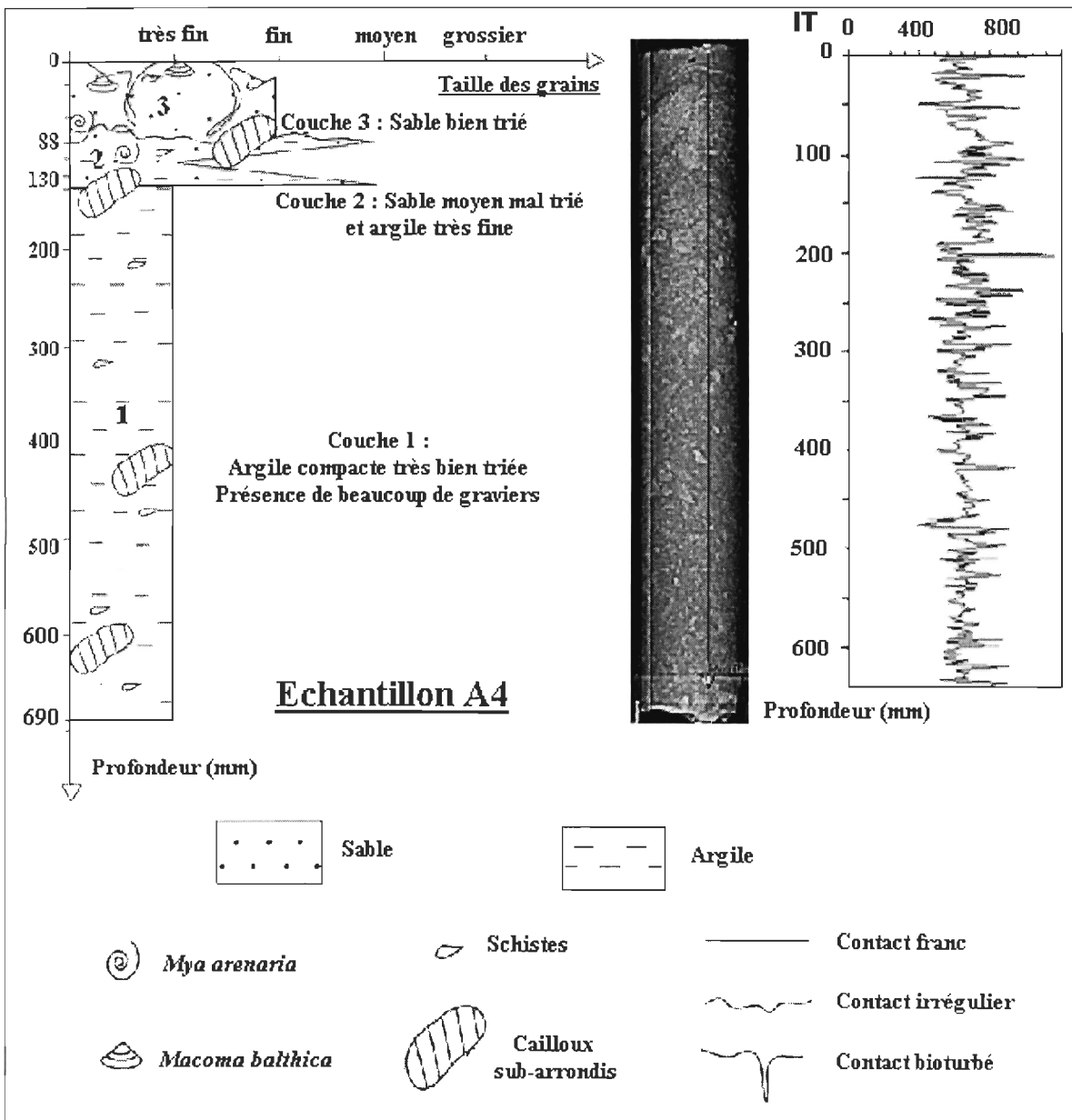


Figure 6. Analyses géologiques de l'échantillon A4

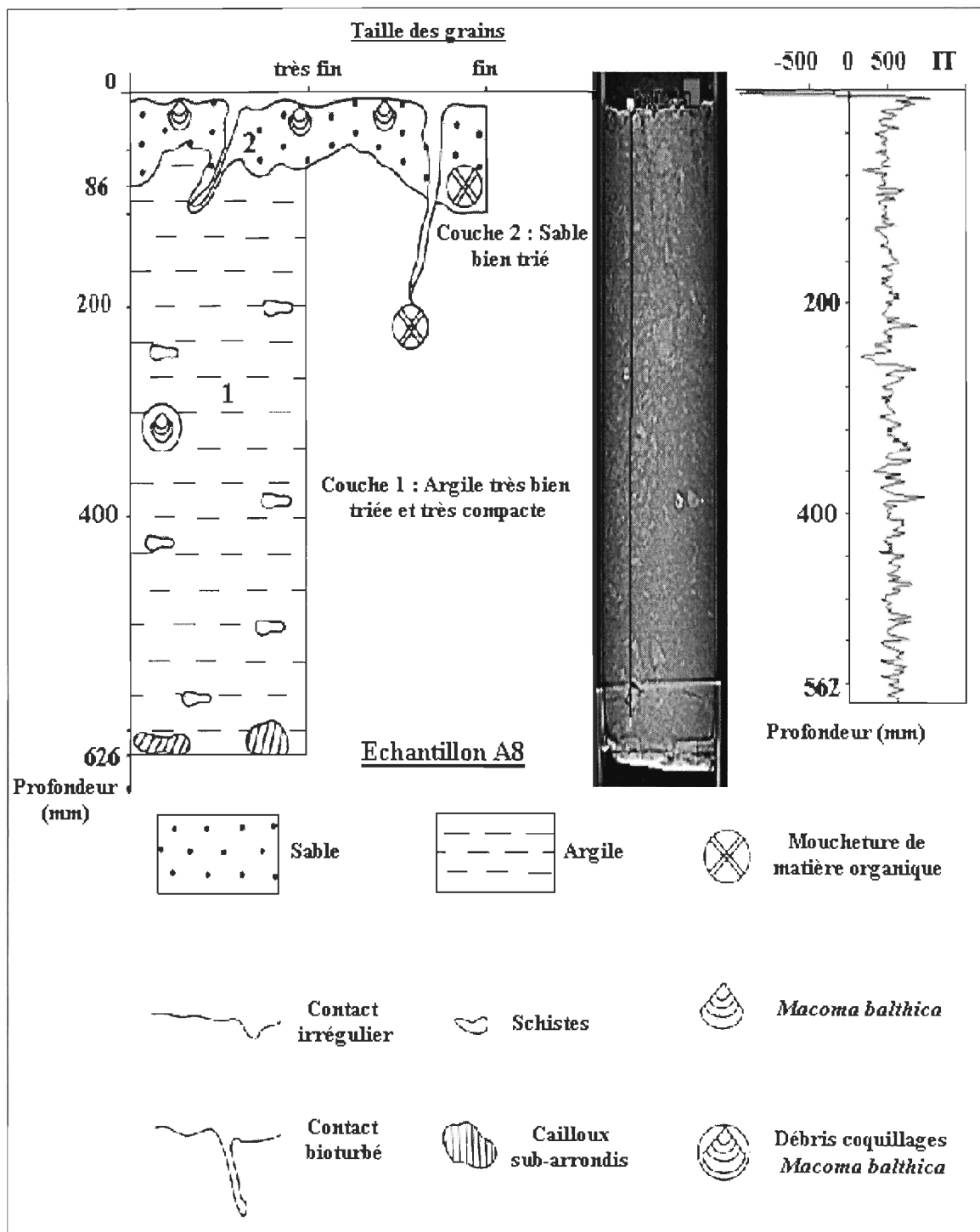


Figure 7. Analyses géologiques de l'échantillon A8



Figure 8. Représentation en 3-D des cailloux sub-arrondis

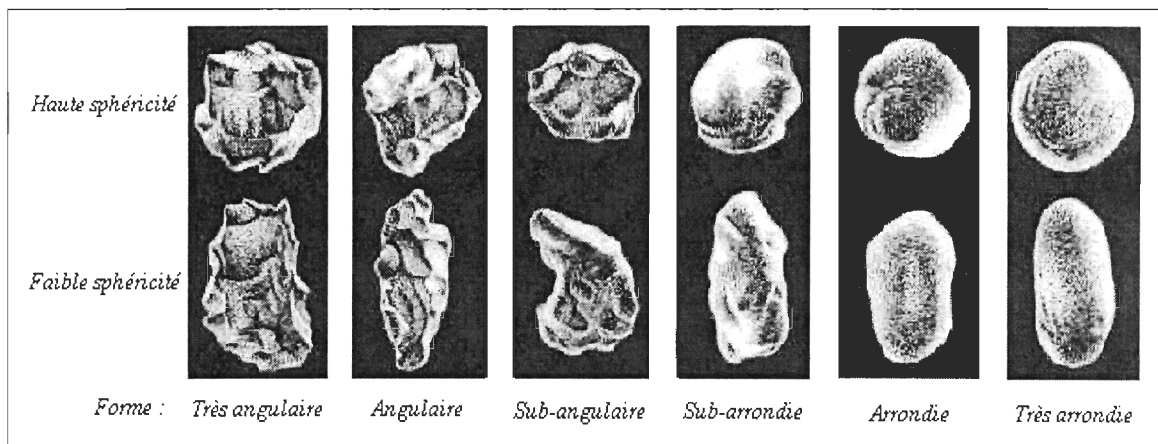


Figure 9. Représentation des différentes formes de cailloux selon leur arrondi d'après Powers (1953)

Dans la Baie du Ha ! Ha ! (Fig. 10 et 11), les structures sédimentaires en place peuvent être différenciées. Les topogrammes, les graphiques des IT en fonction de la profondeur et les logs (description de l'échantillon) des carottes B4 et B8 (Baie du Ha ! Ha !) mettent en évidence trois faciès d'intensités tomographiques différentes. Contrairement aux carottes prélevées dans l'Anse à l'Original, ces échantillons présentent des lits de coquillages fossiles problématiques (Fig. 12). Ainsi le premier faciès, correspondant à un lit de coquillages fossiles (*Mytilus edulis*), est retrouvé au bas de la carotte sédimentaire. Ces coquillages fossiles apparaissent également dans des lits récurrents le long de la colonne sédimentaire. De façon générale, ces IT peuvent atteindre 1450 HU (B8). Les datations effectuées au ^{14}C présentent une valeur de 8210 ± 120 ans BP (UL-2925) au bas de la carotte B8 et de 7990 ± 110 ans BP (UL-2800) à 180 mm de profondeur pour la carotte B4. Ces coquillages sont emprisonnés à l'intérieur d'un deuxième faciès, possédant des valeurs d'IT plus faibles. Ce faciès est constitué par une couche compacte d'argile de la mer de Goldthwait de 500 à 700 HU retrouvée tout au long de la colonne sédimentaire. Cette argile est recouverte en surface par des sables vaseux sur une profondeur pouvant atteindre 80 mm. Les IT de cette couche évoluent jusqu'à 1300 HU. Les logs et les analyses granulométriques (voir annexes), confirment les différences de faciès mises en évidence par le topogramme et le graphique des IT.

Dans les deux carottes étudiées, on note la présence de cailloux sub-arrondis à des profondeurs variables. Cependant, ces cailloux sont plus nombreux dans la baie de l'Anse à l'Original. De plus, l'argile présente dans cette baie possède une coloration différente. En effet, la charte Munsell nous révèle une couleur violacée (5YR 4/1) tandis que la Baie du Ha ! Ha ! dévoile une couleur plutôt grise (2,5YR 4/0) au niveau des argiles.

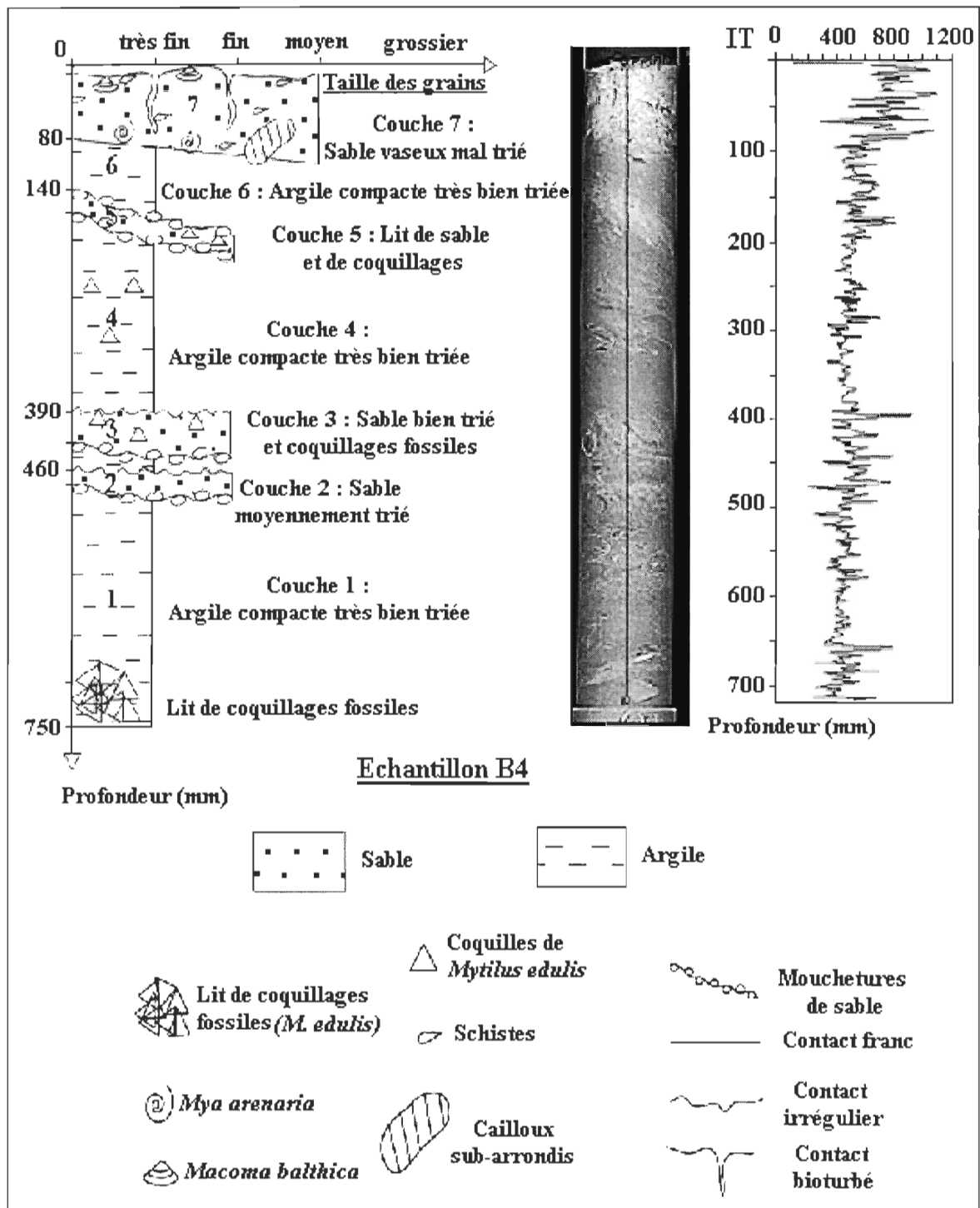


Figure 10. Analyses géologiques de l'échantillon B4

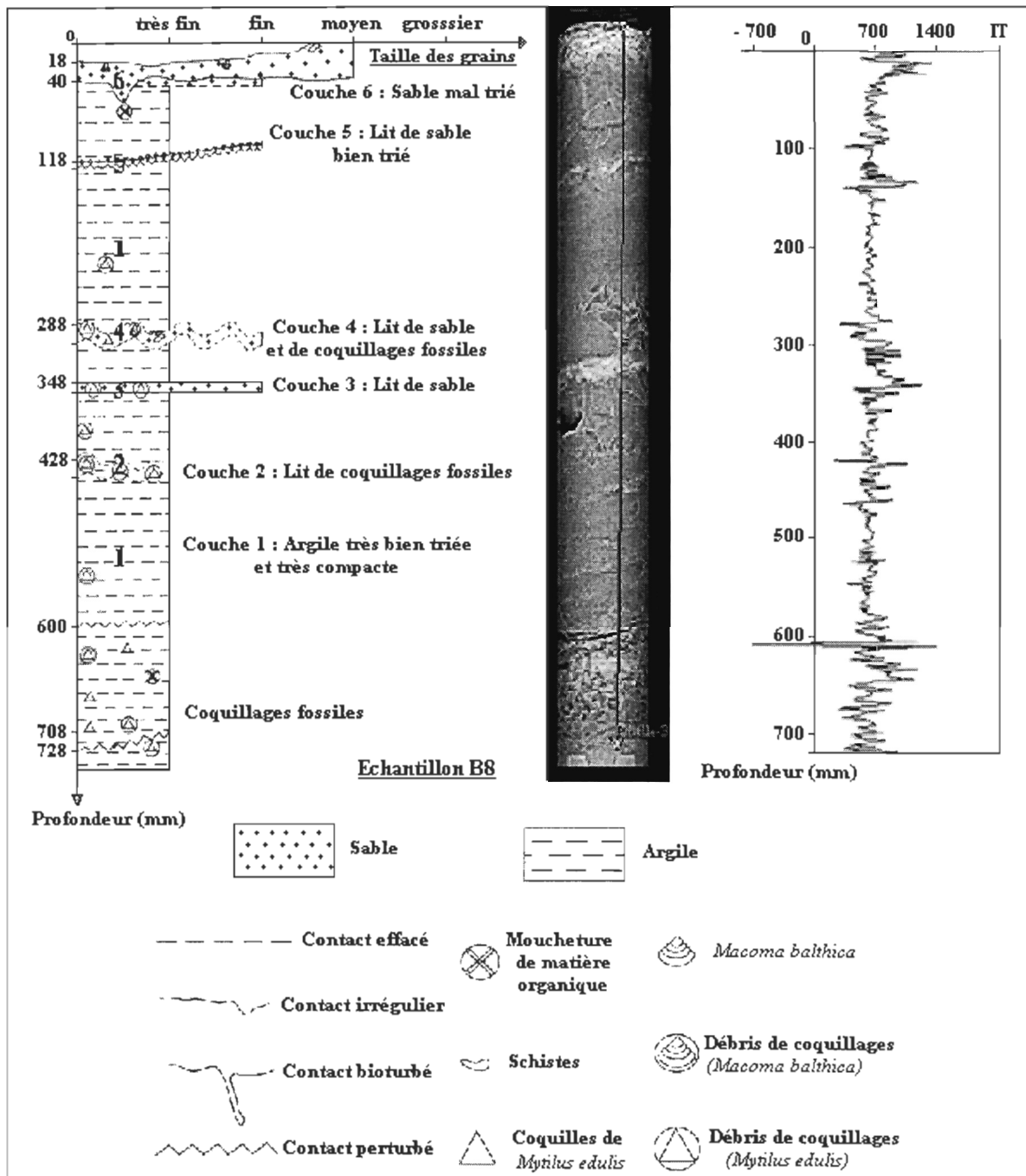


Figure 11. Analyses géologiques de l'échantillon B8



Figure 12. Représentation en 3-D du lit de coquillages fossiles

3. 1. 2. Interprétations géologiques

Les résultats révèlent des différences dans les processus de mise en place du silt argileux, selon la baie. D'après les datations, ces dépôts sont la conséquence directe de l'épisode de la mer de Goldthwait. Par conséquent, ces sédiments sont des argiles glaciomarines. Les différences observées entre les deux baies étudiées valident l'hypothèse H_1 , proposée précédemment. En effet, l'Anse à l'Original se caractérise par une topographie moins abrupte. L'absence de lits de coquillages confirme que le site a subi peu de décrochements.

Cette hypothèse est mise en valeur par la présence d'une argile différemment colorée. Lors de l'épisode de la mer de Goldthwait ce milieu a été soumis à une forte sédimentation. Au sein de la colonne d'eau, une décantation de particules fines provenant des plumes de turbidités s'est réalisée. L'abondante présence de cailloux sub-arrondis au sein de la colonne sédimentaire présente également une sédimentation par délestage. Ces sédiments provenant d'icebergs se sont détachés progressivement dans la mer de Goldthwait (Syvitski et Praeg, 1989). Les cailloux observés dans nos échantillons ont été ainsi transportés par les glaces. Les angles de ces roches glaciaires ont été adoucis par abrasion, ce qui leur confère une forme sub-arrondie.

Les carottes échantillonnées dans la Baie du Ha ! Ha ! se caractérisent par la présence de lits coquillés, emprisonnés au sein de l'argile déposée par les plumes de turbidité. L'existence de ces coquillages entassés et sans orientation préférentielle dévoile un faciès caractéristique d'un mode de dépôt gravitaire (Crémer et *al.*, 2002). Cela suggère que l'environnement sédimentaire ait été soumis à des mouvements gravitaires sous-marin. Cette communauté de *Mytilus edulis*, installée à l'époque sur les falaises abruptes d'un milieu instable, a été emportée lors d'un glissement de sédiments. Les coquillages ont été ensuite transportés par un courant de turbidité laissant place à une déposition des débris de coquilles par suspension (Gagnoud et *al.*, soumis). L'influence de la topographie sur la localisation et la morphologie des dépôts de marge glaciaire a été démontrée par Clément et Parent (1977) ; Prichonnet et *al.* (1982).

Les datations effectuées au niveau du lit de coquillages fossiles, à 180 mm et 650 mm de profondeur, dans la Baie du Ha ! Ha !, indiquent une différence de 220 ± 115 années pour

une épaisseur de 470 mm. Durant la transgression post-glaciaire, la sédimentation a été plus rapide que la sédimentation actuelle de l'estuaire. En effet, quel que soit le mode de déposition de ces argiles, de nos jours, elles sont recouvertes par le même type de sédiment sablo-vaseux dont le taux de sédimentation reste faible (Ferreyra, 1987). Il arrive que ce sédiment actuel, bioturbé par la communauté à *Macoma balthica*, soit également soumis à des épisodes aléatoires d'érosion. Ainsi, les structures biogènes sont dépendantes des événements locaux de déposition et d'érosion qui varient selon les différentes échelles de temps (Aller et Stupakoff, 1995).

3. 2. LA FAUNE EN PLACE

3. 2. 1. Résultats des analyses biologiques

- Densités des peuplements et analyses hiérarchiques

Le nombre d'espèces récoltées et la densité des peuplements sont très proches dans les deux sites avec respectivement 10 espèces, $5010,48 \pm 1831,76$ individus par mètres carrés dans l'Anse à l'Original et 9 espèces, $4845,39 \pm 2058,26$ individus par mètres carrés dans la Baie du Ha ! Ha !. De plus, ces densités ne présentent pas de différence significative ($p = 0,89$).

Sur un plan qualitatif, l'analyse hiérarchique réalisée (Fig. 13) montre à l'exception du prélèvement B2, une forte similarité proche ou supérieure à 80 %. Cette valeur de

pourcentage élevée entre les prélèvements, indépendamment de leur localisation géographique, traduit une composition faunistique très proche. Le coefficient quantitatif de Bray-Curtis (Fig. 14) montre 4 groupes formés respectivement par le regroupement des stations B5 et A5 ; B2, B1 et B3 ; A7, A6, A2, B7 et B6 et du prélèvement A1. On note cependant que le regroupement de l'ensemble des prélèvements est supérieur à 50 %, montrant une structuration très proche des peuplements en place. La présence en position dominante au sein de l'Anse à l'Original et de la Baie du Ha ! Ha ! du Gastéropode *Hydrobia minuta* et en positions subdominantes dans les deux sites, de *Macoma balthica*, *Nereis virens* et de *Mya arenaria*, espèces constituant près de 80 % des peuplements en place, expliquent les fortes similarités observées.

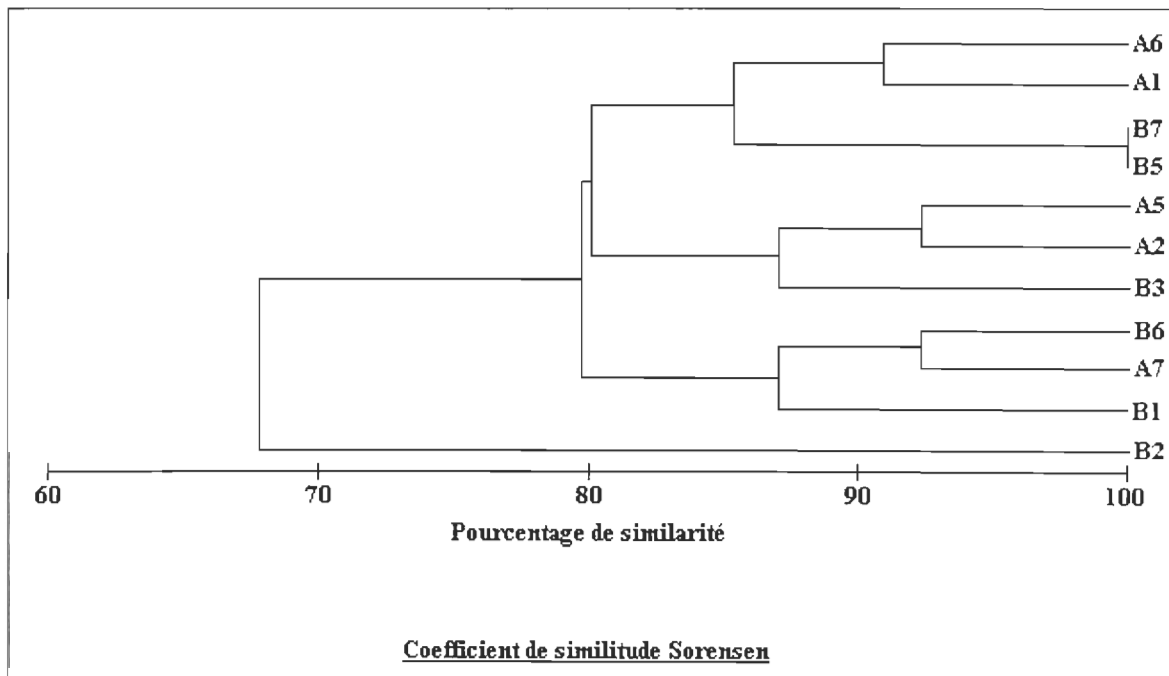


Figure 13. Analyse hiérarchique réalisée avec le coefficient de similitude : Sorensen

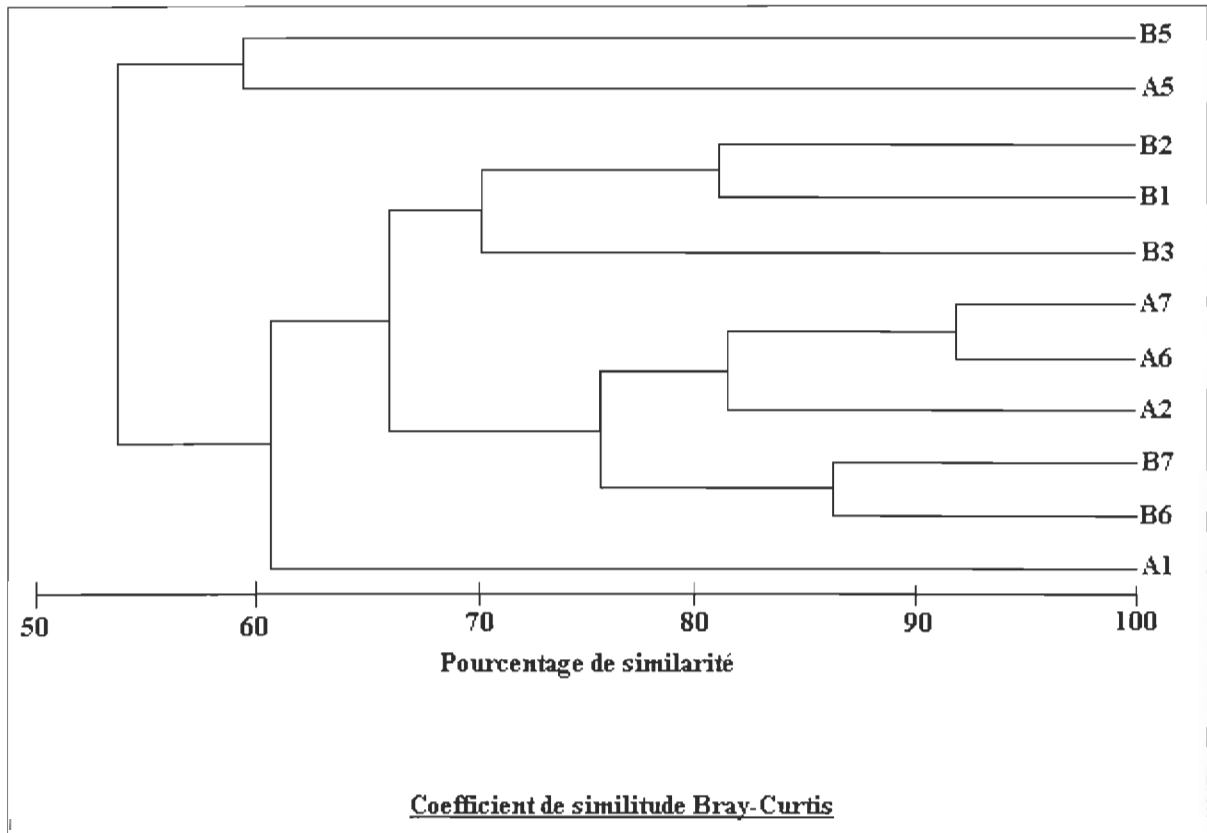


Figure 14. Analyse hiérarchique réalisée avec le coefficient de similitude : Bray-Curtis

- Analyse de la répartition en profondeur des organismes

La figure 15 présente les profils de répartition des organismes en fonction de la profondeur dans chaque baie. On observe une décroissance marquée du nombre d'individus dans les deux sites en fonction de la profondeur. Cependant, bien que les densités des peuplements en place soient très proches, on constate que la faune se répartie jusqu'à 90 mm dans l'Anse à l'Original alors qu'elle s'arrête à 40 mm dans la Baie du Ha ! Ha !.

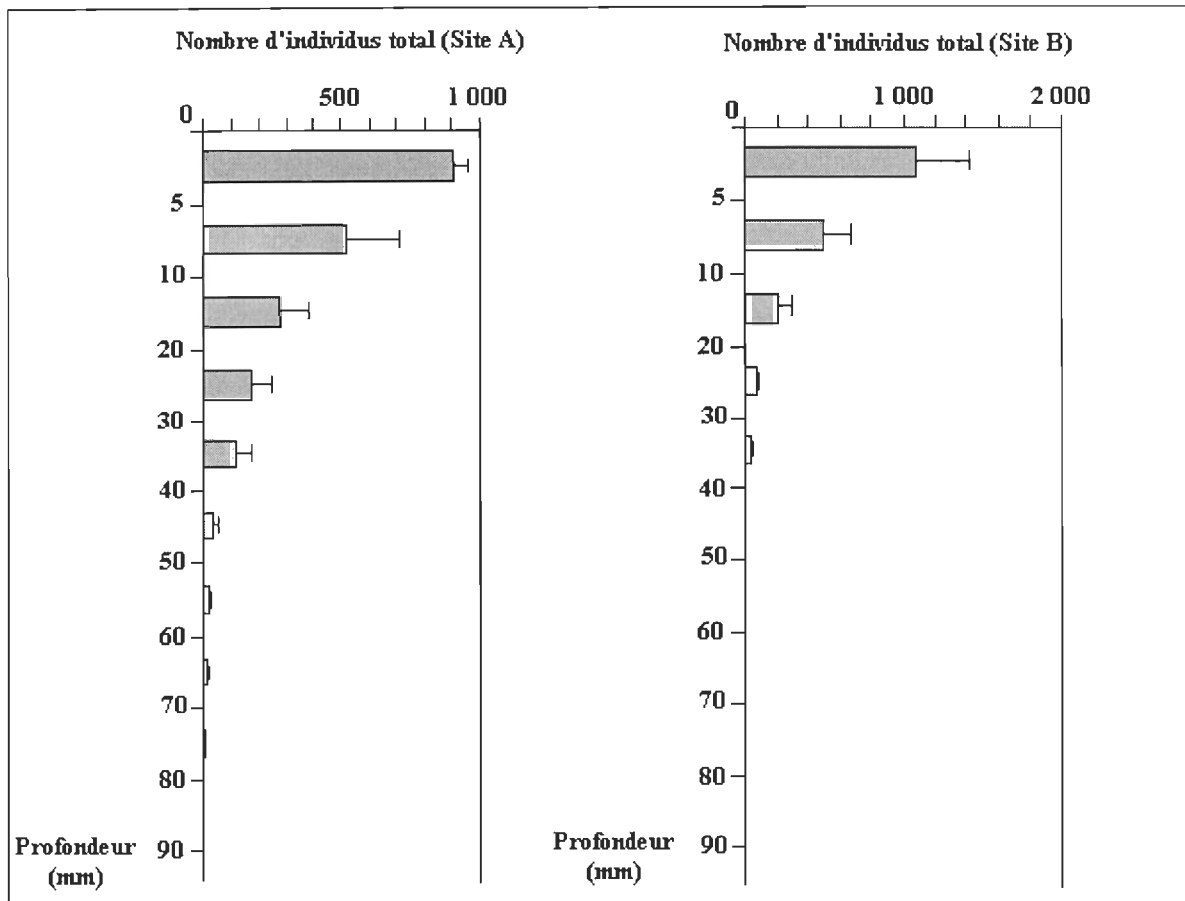


Figure 15. Profil de répartition du nombre d'individus total dans chaque site en fonction de la profondeur

3. 2. 2. Interprétations des analyses biologiques

Selon Rhoads et *al.* (1985), Alongi (1989) et Jopez-Jamar et *al.* (1992), la distribution et les caractéristiques des communautés benthiques sont fonction de la nature des sédiments, des taux de sédimentation et de l'intensité des perturbations pouvant s'exercer sur le milieu. En effet, la diversité des peuplements benthiques est reliée à l'influence des facteurs édaphiques. Dans les milieux estuariens, selon Desrosiers et *al.* (1983), les facteurs

édaphiques (facteurs locaux) viennent perturber ou supplanter les facteurs climatiques. S'ils sont modérés, ils entraînent des faciès particuliers et, s'ils sont importants, une dégradation du peuplement ou même un remplacement de communauté par un autre peuplement (Péres et Picard, 1964). Par ailleurs, les environnements sédimentaires affectés par des événements physiques sévères tendent à réduire le nombre, la diversité et la taille de la faune (Aller et Stupakoff, 1995). Plusieurs facteurs tels que des glissements de terrain (Desrosiers et *al.*, 1983) et des crues éclairées (Crémer et *al.*, 2002) perturbent les peuplements installés.

Les résultats obtenus, dans cette étude, vérifient l'hypothèse H_0 . On n'observe aucune différence significative dans la structure de la communauté à *Macoma balthica* entre les deux baies d'orientation différente. Selon Desrosiers et Brêthes (1984) et Tita et *al.*, (2002), les peuplements en place sont caractéristiques des milieux lagunaires intertidaux de l'estuaire du Saint-Laurent et sont composés d'un faible nombre d'espèces mais d'un nombre important d'individus. Si la densité, la richesse spécifique et la structuration des peuplements sont identiques entre les baies étudiées, on constate que la distribution des individus le long de la colonne sédimentaire est différente. Les organismes bioturbateurs colonisent les sédiments du site A sur une profondeur supérieure au site B. Plusieurs facteurs d'origine édaphiques ou climatiques peuvent exercer une influence sur la répartition verticale des organismes dans la colonne sédimentaire (Aller et Stupakoff, 1995). Il est probable que dans notre étude, l'argile de la mer de Goldthwait très dense, empêche en grande partie la pénétration des organismes en profondeur. Cette argile plus proche de la surface dans la Baie du Ha ! Ha ! serait responsable des différences observées dans l'occupation de la colonne sédimentaire par les organismes de la communauté à *Macoma balthica*.

3. 3. LES STRUCTURES BIOGENES

3. 3. 1. Mise au point de la méthode de quantification automatique

- Etude des différentes fractions

Ce chapitre a pour but de présenter la mise au point d'une méthode convenable, permettant de quantifier automatiquement les structures biogènes. Pour cette étape, il est nécessaire de reconnaître visuellement les différentes populations présentes sur une coupe transversale afin de pouvoir vérifier les résultats obtenus avec la méthode.

Pour exposer les différentes méthodes utilisées, nous avons choisi une coupe transversale (2-75). Cet échantillon provient d'une carotte prélevée dans la Baie du Ha ! Ha ! et qui se situe à 37,5 mm de profondeur, en fin de zone bioturbée et au commencement de la couche d'argile. La figure 16 représente la distribution du nombre de pixels en fonction des intensités tomographiques de cette coupe. Il est possible, grâce aux valeurs d'intensités tomographiques, de repérer les différents éléments représentatifs de chaque pic de la distribution (sable, sédiments rocheux, sédiments argileux, matière organique, eau et espaces vides). Ce qui nous intéresse pour quantifier les structures biogènes au sein de la colonne sédimentaire comprend, les espaces vides, l'eau et la matière organique.

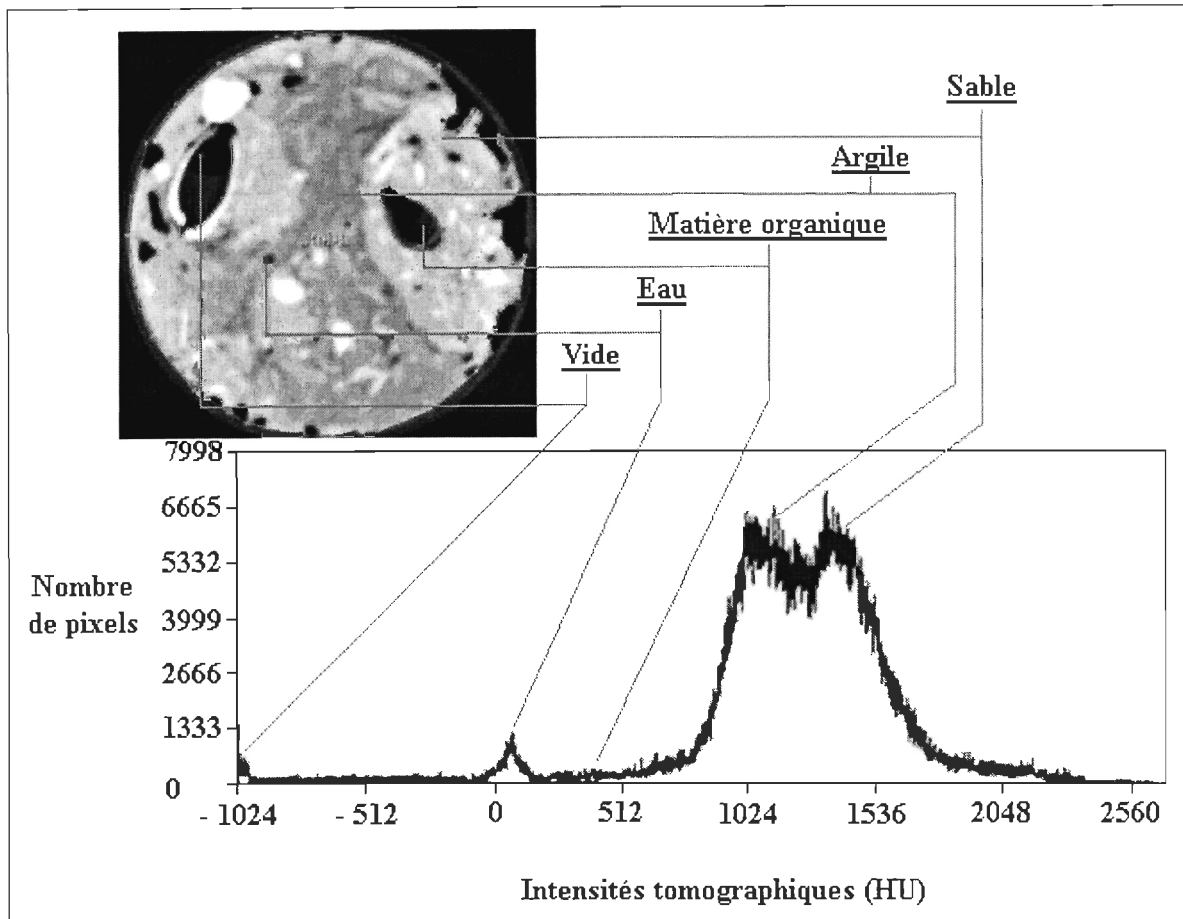


Figure 16. Courbe de distribution du nombre de pixels en fonction des intensités tomographiques de la coupe transversale correspondante (2-75)

- Méthode manuelle

Dans la méthode décrite par de Montety et *al.* (2003), le pourcentage d'occupation des sédiments, induit par les structures biogènes, est calculé à partir de cinq valeurs d'IT choisies dans trois structures biogènes différentes d'une même coupe. La densité des

structures choisies doit être la densité la plus proche des sédiments afin d'obtenir la limite supérieure de l'indice d'occupation. La valeur de densité ainsi obtenue est la limite au-dessus de laquelle les IT sont attribuables à la matrice sédimentaire et en dessous de laquelle les IT sont ceux des organismes et des structures biogènes. Ce seuil, de 916 HU dans notre exemple (Fig. 17), permet le calcul du pourcentage d'occupation des sédiments en confrontant le nombre total de pixels de faibles densités (en dessous du seuil) par rapport au nombre total de pixels de l'image. Dans cette méthode, afin de tenir compte de la compaction des sédiments, la valeur seuil est recalculée pour chaque coupe. A partir de ces données, un profil d'occupation des sédiments par les structures biogènes est établi en fonction de la profondeur.

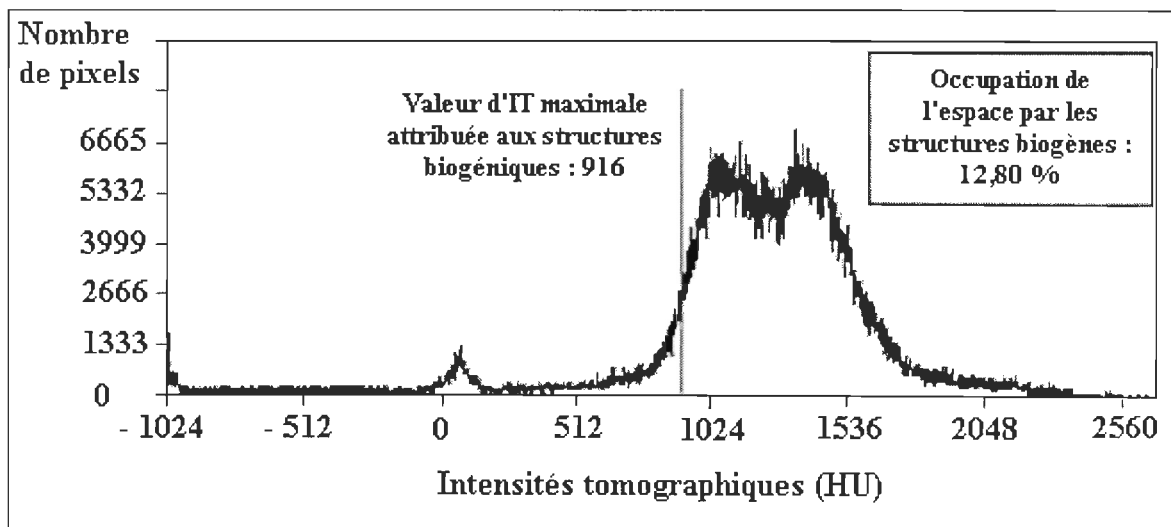


Figure 17. Quantification manuelle des structures biogéniques (2-75)

- Méthode automatique 1

Pour chaque coupe transversale, la courbe du nombre de pixels en fonction des différentes intensités tomographiques se présente sous la forme d'une courbe de Gauss (courbe pleine, Fig. 18). Une courbe théorique (courbe pointillée), dont la moyenne est placée au niveau maximum de la distribution des IT, est construite. Son écart-type est calculé à partir de toutes les valeurs de la distribution initiale, situées à droite de cette moyenne. La partie gauche de la courbe théorique est ensuite réalisée par symétrie suivant le modèle construit à droite, excluant une partie de la courbe de distribution. Superposée à la courbe théorique de Gauss, la distribution initiale présente donc des pixels supplémentaires au niveau des intensités tomographiques faibles, correspondant à l'occupation des organismes dans le sédiment. Ainsi, pour chaque coupe transversale, un programme trace automatiquement la courbe théorique de Gauss à partir des valeurs initiales. Pour avoir le pourcentage d'occupation des structures biogènes, le programme réalise la différence entre les aires sous les deux courbes selon les IT correspondantes (partie gauche de la courbe de distribution représentant les faibles IT). Cette méthode peut cependant présenter des inconvénients lorsque les sédiments ne sont pas homogènes. L'exemple de la figure 19, présente la coupe transversale 4-15 située à environ 110 mm de profondeur à l'intérieur d'une couche d'argile où sont emprisonnés quelques débris de coquillages. Sur la courbe de distribution, un deuxième pic se crée par la population de carbonates et fait dévier la pente de la courbe théorique. Du fait d'un important écart-type, le pourcentage d'occupation des sédiments présente une valeur sous-estimée en plus d'une très faible présence de structures biogènes à l'origine.

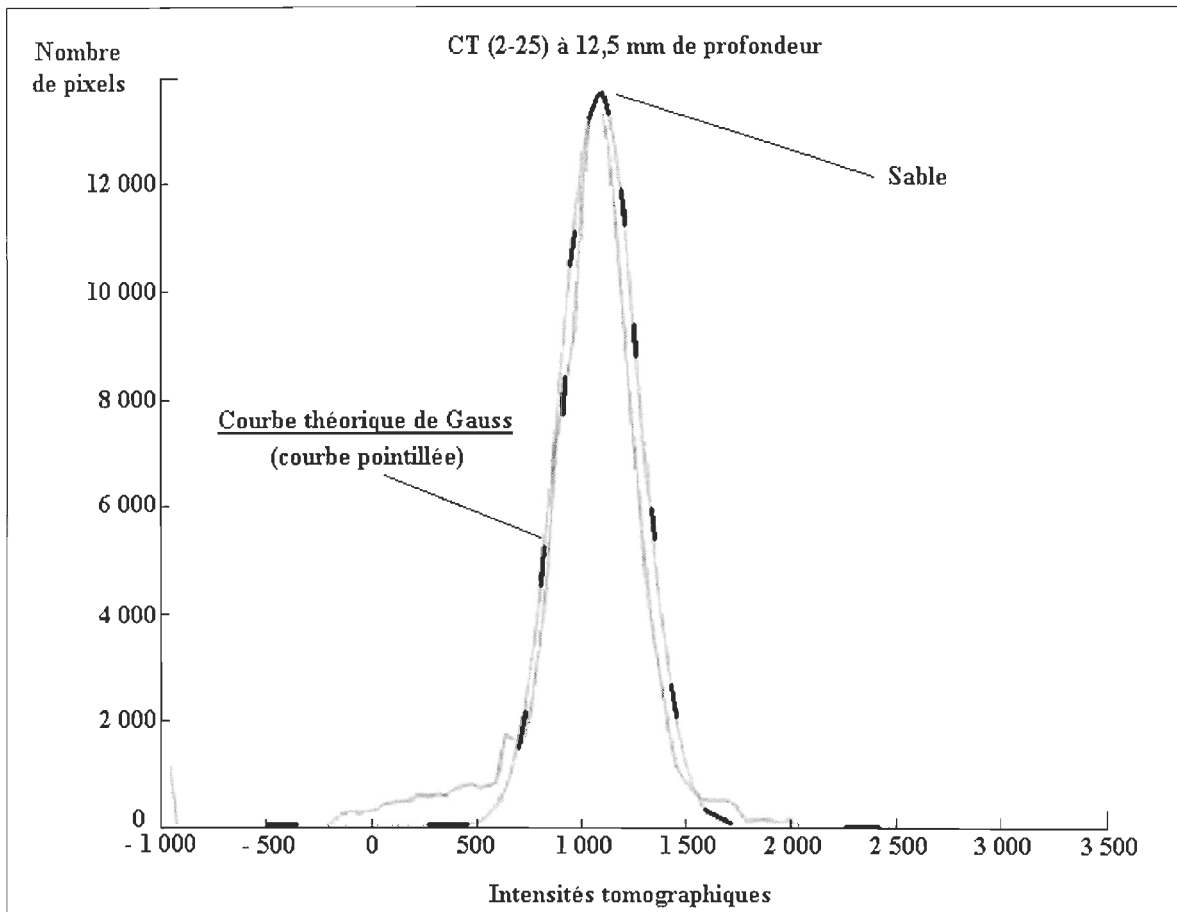


Figure 18. Courbes de Gauss d'une coupe transversale sans artéfact

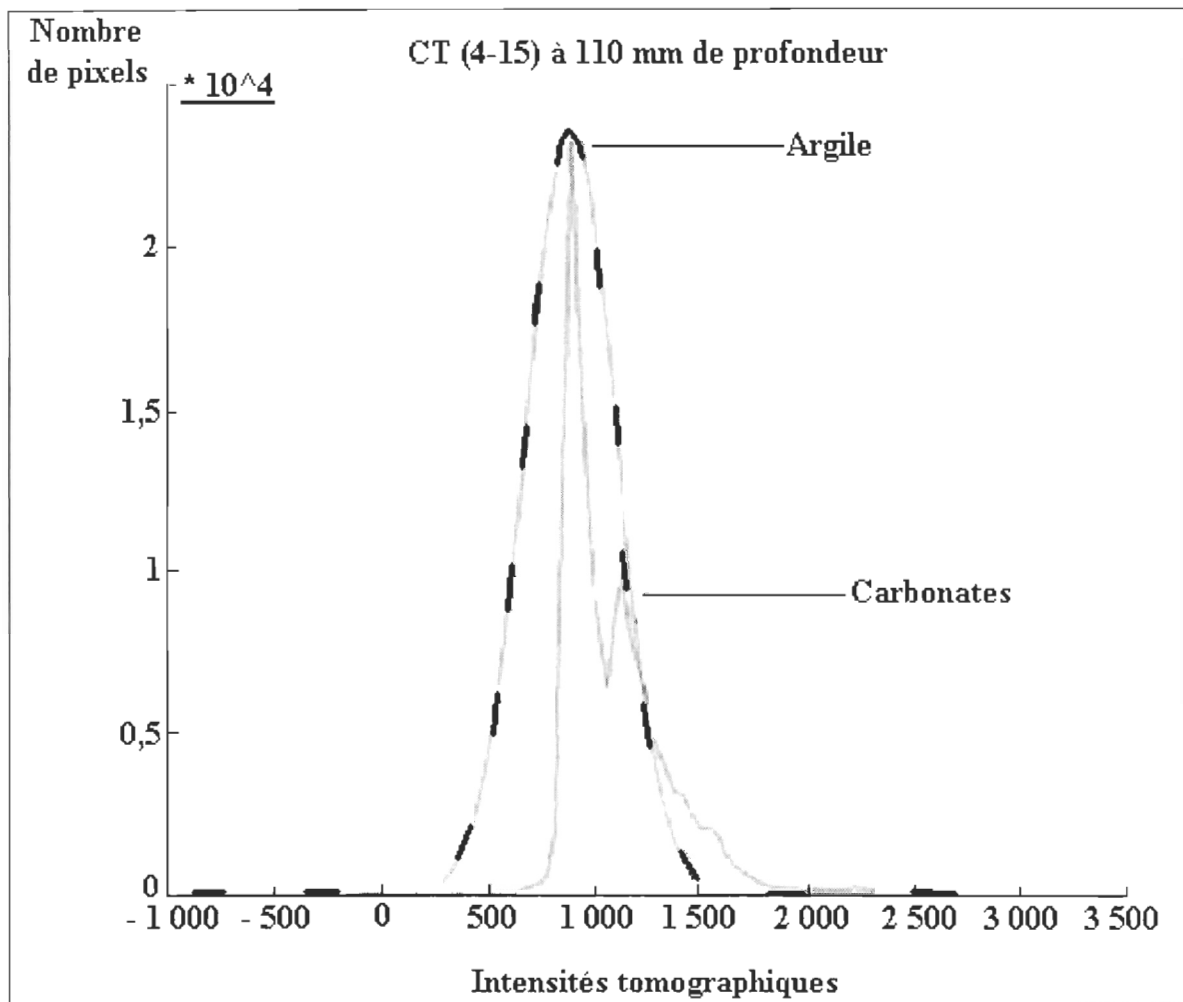


Figure 19. Courbes de Gauss d'une coupe transversale (population importante d'argile et de carbonates)

De la même façon, dans le cadre d'un mélange de sable et d'argile sur une même coupe (2-75), la moyenne théorique s'ajuste sur le pic le plus élevé, en l'occurrence le pic de sable (Fig. 20). De ce fait, la valeur de pourcentage bioturbé est surestimée, car l'aire isolée par superposition des deux courbes, prend en compte des pixels supplémentaires correspondant au matériel argileux. Il est difficile de pouvoir séparer les valeurs de matière organique et de silt argileux. Ainsi, la méthode automatique doit être améliorée pour éviter d'avoir des pourcentages sous ou surestimés selon le contexte sédimentaire.

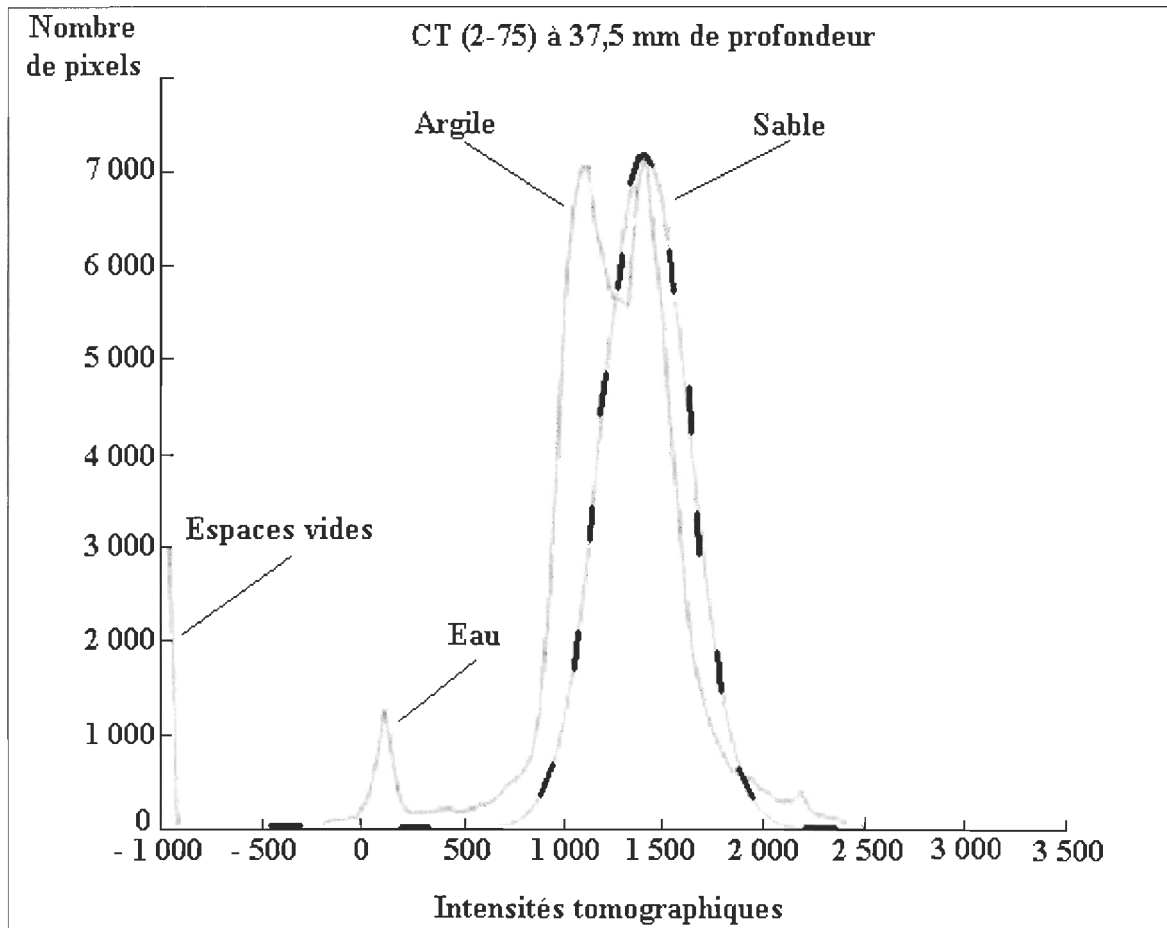


Figure 20. Courbes de Gauss d'une coupe transversale (2-75) avec mélange de faciès

- Méthode automatique 2

Pour pallier ce problème de sous ou surestimation des structures biogènes, du fait de la présence des courbes multimodales, une nouvelle approche a été utilisée. Au lieu de faire tracer une courbe gaussienne théorique, un algorithme d'ajustement des courbes gaussiennes a été appliqué sur les courbes de distribution obtenues pour chaque coupe. Les différentes populations de la distribution seront caractérisées selon leurs intensités tomographiques (espaces vides, matière organique, argile, sable, etc.). Pour simplifier le calcul, seules les valeurs d'IT situées entre -200 et 1100 HU sont soumises à l'ajustement. La population de vide inférieure à -200 HU, nécessaire dans le calcul des structures biogènes, est calculée séparément. Les valeurs supérieures à 1100 HU ne peuvent en aucun cas correspondre à des structures biogènes et par conséquent, ne sont pas prises en compte. Sur la gamme prédéfinie, le programme choisi aléatoirement trois moyennes sur la courbe de distribution. Ces moyennes au cours d'un grand nombre d'itérations vont se déplacer vers les maximums locaux. Ainsi, la hauteur et l'écart type de chaque gaussienne sont déterminés au mieux pour ajuster les valeurs initiales de la courbe de distribution. Le programme nous permet d'obtenir trois courbes de Gauss sur l'intervalle -200 à 1100 HU (Fig. 21), caractérisant l'eau (courbe de Gauss 1), la matière organique (courbe de Gauss 2) et les silts glaciomarins (courbe de Gauss 3). C'est la somme des pourcentages obtenus pour la courbe de Gauss 1 et 2, plus le pourcentage représenté par les pixels inférieurs à -200 HU (espaces vides), qui nous donne la valeur de pourcentage de bioturbation le long de la colonne sédimentaire.

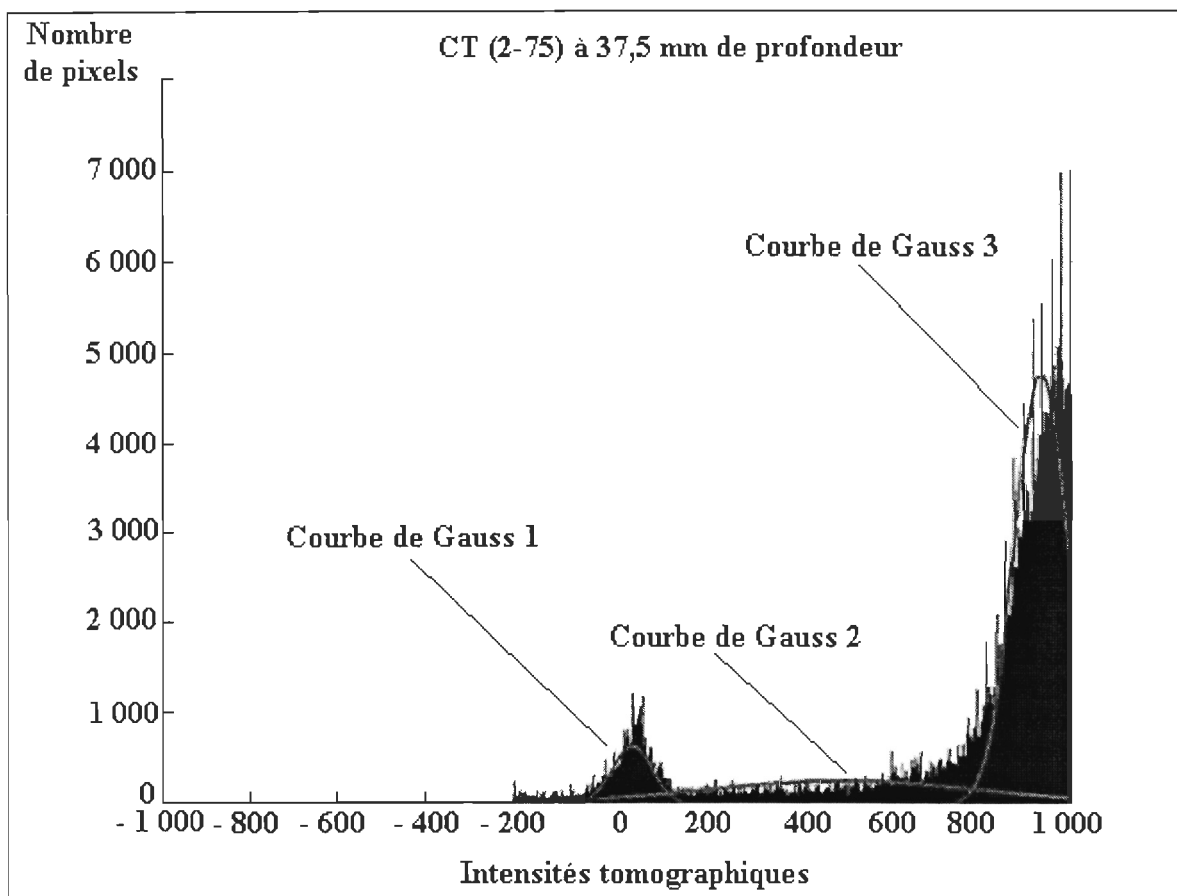


Figure 21. Courbes d'ajustement représentant le nombre de pixels d'une coupe transversale en fonction des intensités tomographiques

3. 3. 2. Comparaison des méthodes de quantification

Sur la figure 22 sont représentées les trois méthodes de quantification appliquées sur une carotte de la Baie du Ha! Ha! de 200 mm de profondeur, dont les analyses scanographiques ont été effectuées un an auparavant. En comparant les méthodes, nous pouvons observer que la méthode manuelle et la méthode automatique 2 (courbe avec points) présentent des valeurs semblables tout au long de la colonne sédimentaire. Par contre, la première méthode automatique engendre de fortes sous et sur-estimations des valeurs. Les raisons de ces variations ont été expliquées dans la partie "matériel et méthodes". Les courbes obtenues avec la méthode manuelle et la méthode automatique 2, présentent trois pics le long de la colonne sédimentaire entre 16 et 20 %. Le premier pic se situe en sub-surface, le deuxième à 40 mm de profondeur et le troisième près de 120 mm. Le topogramme réalisé montre que le premier pic se situe dans une zone de mélange homogène de sable vaseux, le deuxième pic est induit par la présence de *Mya arenaria* alors que le troisième est lié à un dépôt coquillier de *Mytilus edulis*. En effet, ce sont les vides intercoquilliers et l'espace vide entre les valves jointes qui produisent une valeur de pourcentage.

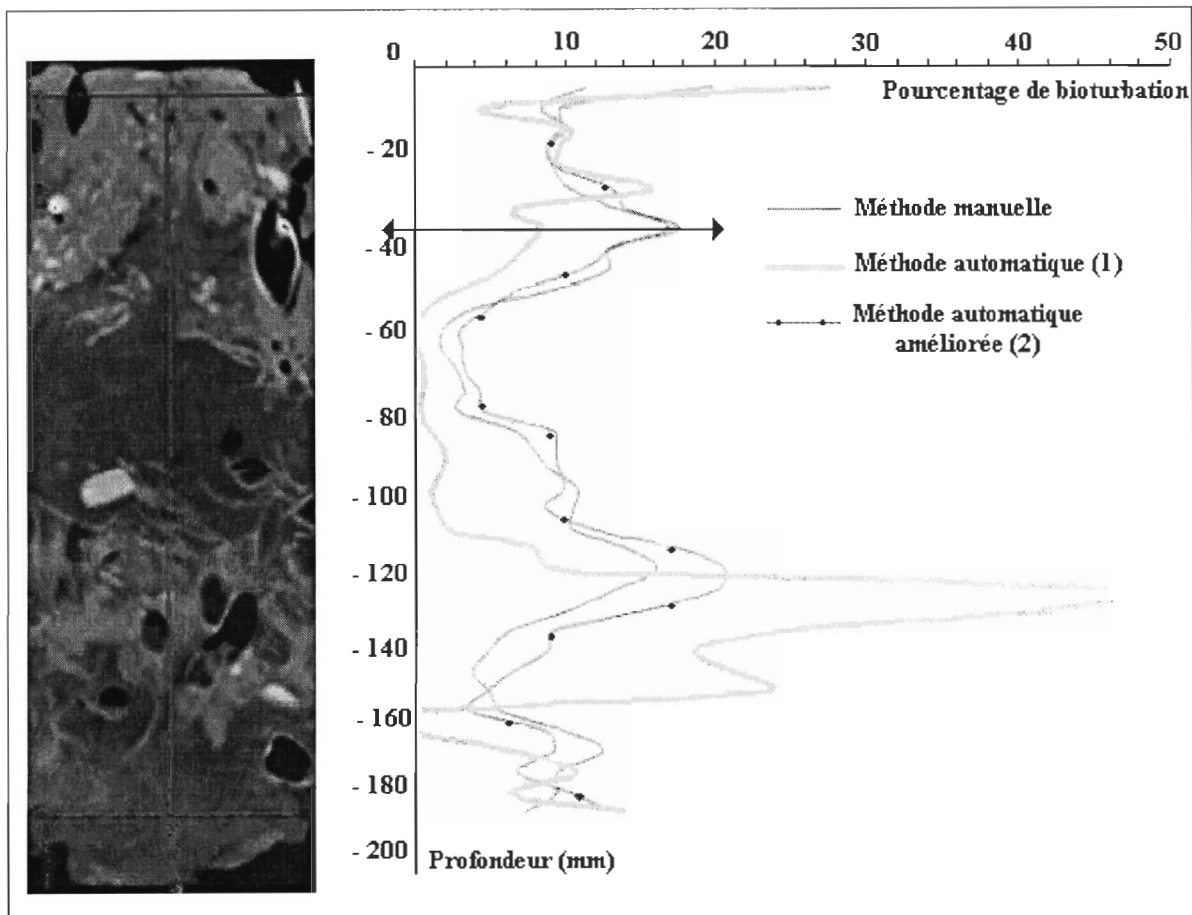


Figure 22. Comparaison du pourcentage bioturbé au sein la colonne sédimentaire, selon la méthode employée

3. 3. 3. Analyses des structures biogènes

La récente méthode de quantification a été utilisée pour quantifier les structures biogènes des sites étudiés. En raison du temps passé pour mettre au point la méthode de quantification et l'occupation du Scanner pour d'autres analyses, nous avons analysé seulement trois échantillons, deux dans l'Anse à l'Original (A2, A7) et un dans la Baie du Ha ! Ha ! (B1). La figure 23 présente les pourcentages d'occupation des structures biogènes

dans les carottes étudiées. Le caractère non plan de l'interface et la présence du bouchon de paraffine créent un artefact dans l'analyse d'image. Par conséquent, l'analyse commence de 0,5 mm à 18 mm de profondeur dans la colonne sédimentaire. Dans l'Anse à l'Original (A2 et A7), un pic aux alentours de 14 % s'observe en sub-surface et un autre entre 9 et 10 % entre 50 et 70 mm de profondeur. Plus profondément, on observe une décroissance régulière des pourcentages jusqu'à 120 mm au sein de la carotte A2. L'analyse de la carotte A7 a été arrêtée à 70 mm. En ce qui concerne le site B représenté par l'échantillon B1, le pic de sub-surface atteint pratiquement 15 %, puis le pourcentage de structures biogènes diminue jusqu'à 40 mm. Plus profondément jusqu'à 125 mm de profondeur, les pourcentages restent proches de 2 %.

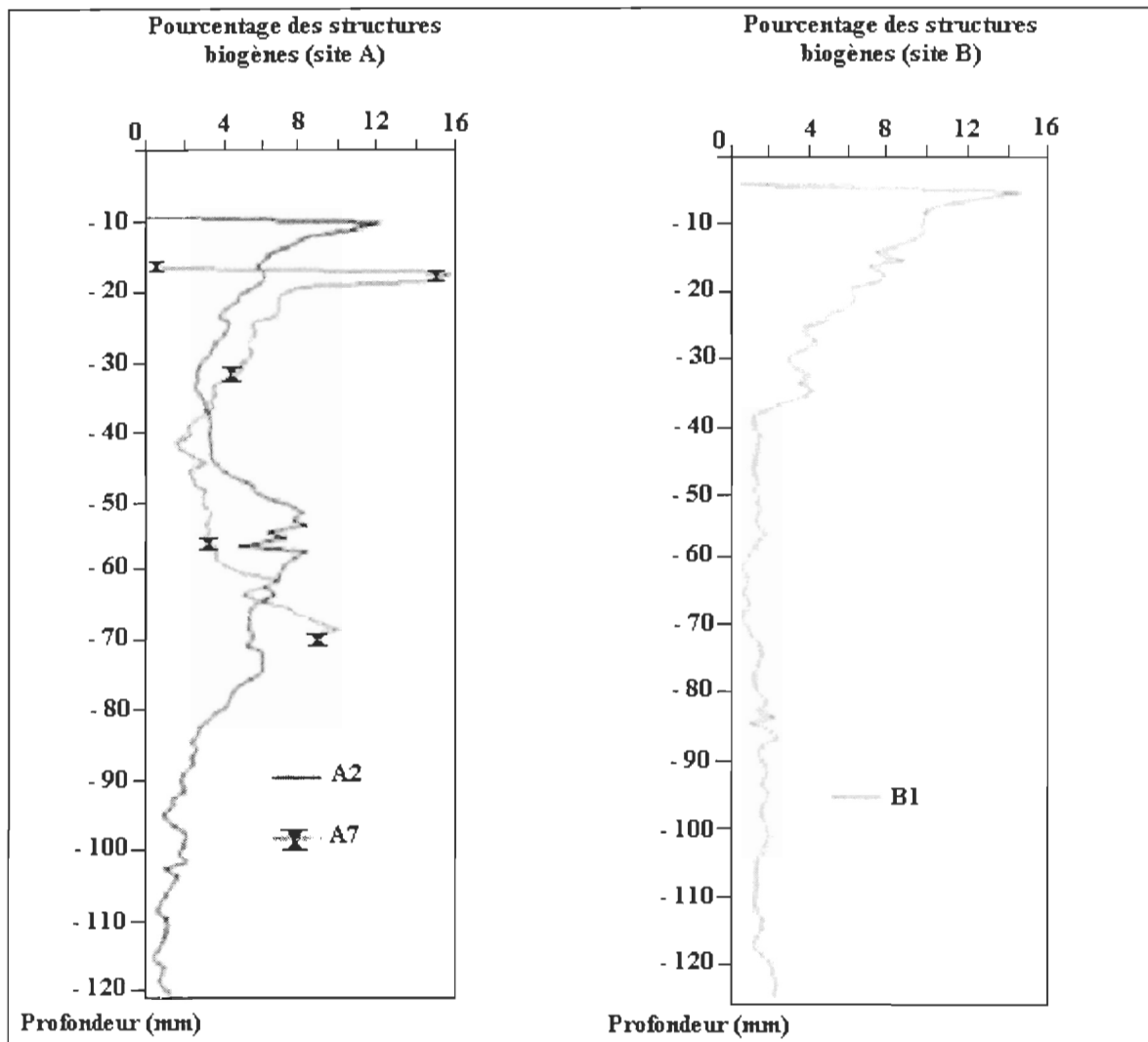


Figure 23. Application de la nouvelle méthode de quantification des structures biogènes (site A et B)

3. 3. 4. Interprétations des données sur les structures biogènes

Les structures biogènes représentent la fraction visible de la bioturbation et reflètent les potentialités de bioturbation de la faune en place (Gérino, 1992). Leur présence va dépendre du type d'activité des organismes tel que le mélange de sédiments effectué par

des mollusques ou la formation de terriers et galeries réalisés par des invertébrés comme des polychètes et certains crustacés (Risk et *al.*, 1978 ; de Vaugelas et Buscalis, 1990 ; Aller et Stupakoff, 1995 ; Wheatcroft et Martin, 1996 ; Rowden et *al.*, 1998 ; Gérino et *al.*, 1999). La quantification des structures biogènes est un élément important à prendre en compte dans les études sur les processus de bioturbation. Plusieurs méthodes ont été proposées, notamment des techniques de moulage en résine (Risk et *al.*, 1978), des traitements d'images à partir de négatifs de photographies de ces moulages ou de radiographie planaire des échantillons (Aller et Stupakoff, 1995 ; Gérino et *al.*, 1999). Cependant, aucune de ces méthodes ne permet de corréliser avec précision l'importance de l'activité des organismes benthiques, avec des paramètres géologiques tels que la granulométrie, la porosité et les carbonates. La scanographie par CT-Scan a permis aux sédimentologues de caractériser les fines structures sédimentaires (Kenter, 1989 ; Boespflug et *al.*, 1995) au sein desquelles la présence de structures biogènes a été mentionnée (Crémer et *al.*, 2000). Cette méthode offre ainsi la possibilité de quantifier les structures (anciennes et récentes) liées à la bioturbation dans la colonne sédimentaire. La quantification par la méthode manuelle devait être répétée pour chaque coupe transversale, ce qui représentait un temps considérable. De plus, la détermination du seuil des valeurs d'IT attribuables à des structures biogènes pouvait varier selon les observateurs. La nouvelle méthode, du fait de sa réalisation automatique permet un gain de temps considérable pour une efficacité identique. Des résultats satisfaisants sont obtenus pour la quantification des structures biogènes montrant que la méthode manuelle et la deuxième méthode automatique, qui prend en compte les espaces vides, l'eau et la matière organique, présentent des résultats similaires. Cette nouvelle méthode, puisque acceptable, a été utilisée dans cette étude pour quantifier les structures biogènes et comparer le pourcentage

d'occupation des sédiments selon la baie. Les carottes A2 et A7 présentent des valeurs de pourcentages de structures biogènes similaires. Même légèrement décalées, on observe deux pics, l'un dans la couche remaniée où les densités des organismes sont importantes, l'autre plus en profondeur dans la zone occupée par *Mya arenaria*. Même si la courbe de pourcentage des structures biogènes de l'échantillon B1 (Baie du Ha ! Ha !) diffère par rapport aux données de l'Anse à l'Original, il n'est pas possible de conclure que le pourcentage d'occupation des sédiments est différent selon la baie, du fait de l'étude d'une seule carotte. On peut constater par ailleurs que l'évolution des pourcentages des structures observées dans une carotte de la Baie du Ha ! Ha ! l'année précédente, est proche de celle mise en évidence dans le site A de l'Anse à l'Original. Le pic en profondeur dans les deux sites étant toujours lié comme le montrent les topogrammes, à la présence de *Mya arenaria*. En fait, l'analyse de la faune de la carotte B1 de cette étude explique que la décroissance régulière de l'occupation de l'espace en profondeur est due à l'absence de myes. Les études en cours traitant les carottes restantes permettront une analyse statistique des pourcentages d'occupation des structures biogènes dans les sites étudiés.

Les affleurements plus ou moins proches de la surface de l'argile de la mer de Goldthwait entraînent une diminution importante des pourcentages de structures biogènes observées. Dans les argiles de la Baie du Ha ! Ha !, les lits de *Mytilus edulis* entraînent un pic du fait des vides intercoquilliers. Les structures biogènes mises en évidence en dessous de la couche de sable vaseux peuvent provenir de quelques rares macroorganismes composant la faune actuelle et susceptible de pouvoir forer ces sédiments. Cependant, ces traces reflètent certainement l'activité d'organismes présents dans ces argiles glaciomarines avant l'affleurement (structures fossiles).

CHAPITRE 4 CONCLUSIONS ET PROSPECTIVES

La tomodensitométrie axiale est un outil efficace dans l'étude des sédiments meubles. Elle permet de caractériser les différents faciès sédimentaires sans destruction et de mettre en évidence le mode de déposition sédimentaire. Grâce à la nouvelle technique, en plus de caractériser les organismes colonisant ce milieu en conservant la disposition des populations intactes, il est possible de les quantifier. De plus, la scanographie se révèle être un outil approprié pour définir les faciès caractéristiques des différentes phases de dépôt gravitaire. Selon Dufour et *al.* (2005), cette technique peut être utilisée pour caractériser différents habitats benthiques.

Ce système possède une très bonne résolution spatiale et dispose également d'une excellente résolution en densité. Pour la première fois, les images 3-D des structures biogéniques permettent d'observer les communautés benthiques dans leur état naturel, avec le minimum de perturbations. Au niveau géologique, des images 3-D peuvent mettre en évidence les lits de coquillages fossiles.

Le scanographe est un outil apte à quantifier les structures biogènes, facteur clé du remaniement sédimentaire (de Montety et *al.*, 2000). Maintenant que la quantification automatique des structures biogéniques est au point, plusieurs perspectives peuvent s'offrir aux chercheurs :

- Il serait intéressant d'étudier la recolonisation d'habitats benthiques suite à des événements perturbateurs, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique (glissements de terrain, pollutions accidentelles).

- A partir de la technique de quantification mise au point, il est possible d'étudier l'activité de bioturbation exercée par différentes communautés dans des habitats variés. Cela permet, en fonction des différences ou similitudes observées, d'appréhender le rôle particulier des groupes fonctionnels en place.
- Dans le milieu géologique, la méthode de quantification pourrait être développée pour quantifier les caractéristiques de la colonne sédimentaire, telles que le volume d'espace occupé par les cailloux glaciaires sub-arrondis, du gaz ou bien des coquillages fossiles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **Aller, J. Y. et Stupakoff, I., 1995.** The distribution and seasonal characteristics of benthic communities on the Amazon shelf as indicators of physical processes. *Continental Shelf Research*, 16(5-6), 717-751.
- **Alongi, D. M., 1989.** Ecology of soft-bottom tropical benthos : a review with emphasis on emerging concepts. *Revista de Biologica Tropical*, 37, 73-88.
- **Boespflug, X., Ross, N., Long, B. et Dumais, J. F., 1994.** Tomodensitométrie axiale : relation entre l'intensité tomographique et la densité de la matière. *Revue canadienne des sciences de la Terre*, 31, 426-434.
- **Boespflug, X., Long, B. et Ochietti, S., 1995.** CAT-Scan in marine stratigraphy : a quantitative approach. *Marine Geology*, 122, 381-301.
- **Bray, J. R. et Curtis, J. T., 1957.** An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin. *Ecological Monographs*, 27, 325-349.
- **Chester, R., 1990.** *Marine geochemistry*, Chapman and Hall, London, 698 pp.
- **Clément, P. et Parent, M., 1977.** Contribution à l'étude de la déglaciation dans le centre des Cantons de l'est, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 31(3-4) : 217-228.
- **Crémer, J. F., Long, B., Locat, J., et Desrosiers, G., 2000.** Application de la tomodensitométrie à l'étude de la densité des sédiments et à la caractérisation des structures sédimentaires : exemple des sédiments déposés dans le Saguenay après la crue de juillet 1996. Dans *53^e Conférence canadienne de géotechnique*. Comptes rendus, 1, 153-160.
- **Crémer, J. F., Long, B., Desrosiers, G., de Montety, L. et Locat, J., 2002.** Application de scanographie à l'étude de la densité des sédiments et à la caractérisation des structures sédimentaires : exemple des sédiments déposés dans la rivière Saguenay (Québec, Canada) après la crue de juillet 1996. *Revue canadienne de géotechnique*, 39, 440-450.
- **De Montety, L., Long, B., Desrosiers, G., Crémer, J. F. et Locat, J., 2000.** Quantification des structures biogènes en fonction d'un gradient de perturbation dans la Baie des Ha! Ha! à l'aide de la tomodensitométrie axial. *Proceeding of the 53rd Canadian Geotechnical Conference (Montréal)*, 1, 131-135.
- **De Montety, L., Long, B., Desrosiers, G., Crémer, J. F., Locat, J. et Stora, G., 2003.** Utilisation de la scanographie pour l'étude des sédiments : influence des paramètres physiques, chimiques et biologiques sur la mesure des intensités tomographiques. *Revue canadienne des sciences de la Terre*, 40, 937-948.

- **Desrosiers, G., Brêthes, J. C. et Long, B., 1983.** L'effet d'un glissement de terrain sur une communauté benthique médiolittorale du nord du golfe du Saint-Laurent. *Oceanologica Acta*, 7, N°2.
- **Desrosiers, G. et Brêthes, J. C., 1984.** Étude de la communauté à *Macoma balthica* de la batture de Rimouski. *Sciences et techniques de l'eau*, 17, 25-30.
- **De Vaugelas, J. et Buscail, R., 1990.** Organic matter distribution in burrows of the thalassinid crustacean *Callichirus laurae*, Gulf of Aqaba (Red Sea). Dans fluxes between trophic levels and though the water-sediment interface. *Sous la direction de D. J. Bonin et H. L. Golterman. Hydrobiologia*, 207 : 269-277.
- **Diaz, R. J. et Cutter, G. R., 2001.** *In situ* measurement of organism-sediment interaction : Rates of burrow formation/abandonment and sediment oxidation/reduction. In *Animal-sediment interactions*. ed. J. Y. Aller, S. A. Woodin, & R. C. Aller, 19-32. U of South Carolina P.
- **Dionne, J. C., 1977.** La Mer de Goldthwait au Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 31, 61-80.
- **Dionne, J. C. et Coll, D., 1995.** Le niveau marin relatif dans la région de Matane (Québec), de la déglaciation à nos jours. *Géographie physique et Quaternaire*, 49, 363-380.
- **Dufour, S., Desrosiers, G., Long, B., Lajeunesse, P., Gagnoud, M., Labrie, J., Archambault, P. et Stora, G., 2005.** A new method for three-dimensional visualisation and quantification of biogenic structures in aquatic sediments using axial tomodesitometry. *Limnology and Oceanography : Methods*, 3 : 372-380.
- **Dyke, A. S., Andrews, J. T., Clarks, P. U., England, J. H., Miller, G. H., Shaw, J. et Veillette, J. J., 2002.** The Laurentide and Innuitian ice sheets during the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, 21 : 9-31.
- **Ferreira, G., 1987.** Etude spatio-temporelle des transports particuliers vers une communauté benthique intertidale de substrat meuble (estuaire maritime du St Laurent). Mémoire de Maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 97 pages.
- **Fulton, R. J. 1989.** Foreward to the Quaternary Geology of Canada and Greenland. In Quaternary Geology of Canada and Greenland, *R. J. Fulton (Editor)*. Geological Survey of Canada, Geology no. 1 (also Geological Society of America. *The Geology of North America*, v. K-1).
- **Gagnoud, M., Lajeunesse, P., Desrosiers, G., Long, B., Dufour, S., Labrie, J., Mermillod-Blondin, F. et Stora, G.** Litho- and bio-facies analysis of postglacial marine mud using CT-Scan. Soumis à *Engineering Geology*.

- **Gérino, M., 1992.** Etude expérimentale de la bioturbation en milieu littoral et profond. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille II. Centre d'océanologie de Marseille. Station d'Endoume.
- **Gérino, M., Stora, G. et Weber, O., 1999.** Evidence of bioturbation in the Cap-Ferret canyon in the deep north-eastern Atlantic. *Deep-Sea Research II*, 46, 2289-2307.
- **Hétu, B., 1998.** La déglaciation de la région de Rimouski, Bas-Saint-Laurent (Québec) : indices d'une récurrence glaciaire dans la Mer de Goldthwait entre 12 400 et 12 000 BP. *Géographie physique et Quaternaire*, 52, 325-347.
- **Holler, P. et Kögler, F. C. 1990.** Computer tomography : a non destructive, high resolution technique for investigation of sedimentary structures. *Marine Geology*, 91: 263-266.
- **Hounsfield, G. N., 1973.** Computerized transverse axial scanning tomography. Part. 1. Description of system. *The British Journal of Radiology*, 46, 1016-1022.
- **Jopez-Jamar, E., Cal, R. M., Gonzalez, G., Hanson, R. B., Rey, J., Santiago, G. et Tenore, K. R. 1992.** Upwelling and outwelling effects on the benthic regime of the continental shelf off Galicia, NW Spain. *Journal of Marine Research*, 50, 465-488.
- **Kantzas, A., Marentette, D. et Jha, K. N., 1992.** Computer-assisted tomography : from a quantitative visualization to quantitative core analysis. *Journal of Petroleum Technology*, 31 (9), 48-56.
- **Kenter, J., 1989.** Applications of computerized tomography in sedimentology. *Marine Geotechnology*, 8, 201-211.
- **Ligier, Y., Ratib, O., Logean, M. et Girard, C., 1994.** Osiris : a medical image manipulation system. *M. D. Computing Journal*, 11, 212-218.
- **Mermillod-Blondin, F., Marie, S., Desrosiers, G., Long, B., de Montety, L., Michaud, E. et Stora, G., 2003.** Assessment of the spatial variability of intertidal benthic communities by axial tomodensitometry : importance of fine-scale heterogeneity. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 287, 193-208.
- **Michaud, E., Desrosiers, G., Long, B., de Montety, L., Crémer, J. F., Pelletier, E., Locat, J., Gilbert, F. et Stora, G., 2003.** Use of axial tomography to follow temporal changes of benthic communities in an unstable sedimentary environment (Baie des Ha! Ha!, Saguenay Fjord). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 285-286, 265-282.

- **Pérès, J. M. et Picard, J., 1964.** Nouveau manuel de bionomie benthique de la mer Méditerranée. *Recueil des Travaux de la Station Marine d'Endoume, Marseille*, Vol 31, fasc. 47, 5-137.
- **Powers, M. C., 1953.** A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, V. 23, p 117-119.
- **Prichonnet, G., Doiron, A. et Cloutier, M., 1982.** Le mode de retrait glaciaire tardiwisconsinien sur la bordure appalachienne au sud du Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 37(1-2) : 125-137.
- **Risk, M., Venter, R., Pemberton, S. et Buckley, D., 1978.** Computer simulation and sedimentological implications of burrowing *Axius serratus*. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 15(8), 1370-1378.
- **Rhoads, D. C., Boesch, D. F., Zhican, T., Fengshan, X., Liqiang H. et Nilson, K. J., 1985.** Macrobenthos and sedimentary facies on the Changjiang delta platform and adjacent continental shelf, East China Sea. *Continental Shelf Research*, 4, 189-213.
- **Rowden, A., Jago, C., et Jones, S., 1998.** Influence of benthic macrofauna on the geotechnical and geophysical properties of surficial sediment, North Sea. *Continental Shelf Research*, 18 : 1347-1363.
- **Sorensen, T., 1948.** A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content and its applications to analysis of the vegetation on Danish commons. *Biologiske Skrifter Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab*, 5, 1-34.
- **Syvitski, J. P. M. et Praeg, D., 1989.** Quaternary sedimentation in the Saint-Laurent estuary and adjoining areas, eastern Canada : an overview based on high resolution seismo-stratigraphy. *Géographie physique et Quaternaire*, 43(3), 291-310.
- **Tita, G., Desrosiers, G., Vincx, M. et Clément, M., 2002.** Intertidal meiofauna of the St Lawrence estuary (Québec, Canada) : diversity, biomass and feeding structure of nematode assemblages. *Journal of the Marine Biological Association United Kingdom*, 82, 779-791.
- **Wellington, S. L. et Vinegar, H. J., 1987.** X-Ray Computerized Tomography. *Journal of Petroleum Technology*, August, 885-898.
- **Wheatcroft, R. et Martin, W. 1996.** Spatial variation in short-term (234 Th) sediment bioturbation intensity along an organic-carbon gradient. *Journal of Marine Research*, 54 : 763-792.
- **Zar. J. H., 1974.** Biostatistical analysis. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 620 pp.
- [http : //www.sim.hcuge.ch/osiris/01_Osiris_Presentation_FR.htm](http://www.sim.hcuge.ch/osiris/01_Osiris_Presentation_FR.htm) → (Logiciels osiris et osirix)

ANNEXES

Annexe 1. Dufour, S., Desrosiers, G., Long, B., Lajeunesse, P., Gagnoud, M., Labrie, J., Archambault, P. and Stora, G., 2005. A new method for three-dimensional visualisation and quantification of biogenic structures in aquatic sediments using axial tomodensitometry. *Limnology and Oceanography : Methods*. 3 : 372-380.

LIMNOLOGY and OCEANOGRAPHY: METHODS

Limnol. Oceanogr.: Methods 3, 2005, 372–380
© 2005, by the American Society of Limnology and Oceanography, Inc.

A new method for three-dimensional visualization and quantification of biogenic structures in aquatic sediments using axial tomodensitometry

Suzanne C. Dufour¹, Gaston Desrosiers¹, Bernard Long², Patrick Lajeunesse³, Marie Gagnoud¹, Jacques Labrie², Philippe Archambault⁴, and Georges Stora⁵

¹Institut des Sciences de la Mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, 310 allée des Ursulines, Rimouski (Québec) G5L 3A1, Canada

²Institut National de la Recherche Scientifique, INRS-ETE, 490 de la Couronne, Québec (Québec) G1K 9A9, Canada

³Centre d'Études Nordiques, Université Laval, Québec (Québec) G1K 7P4, Canada

⁴Institut Maurice-Lamontagne, Environmental Science Division, 850 route de la Mer, P.O. Box 1000, Mont-Joli (Québec) G5H 3Z4, Canada

⁵Laboratoire de Microbiologie, Géochimie et Écologie Marines, Centre d'Océanologie de Marseille, Université de la Méditerranée, Campus de Luminy-Case 901, 163 avenue de Luminy, 13288 Marseille cedex 9, France

Abstract

Biogenic structures formed by the activity of macro- and meiobenthic organisms exert a great influence on the physical, chemical, and biological properties of sediments. Although bioturbation processes are recognized as ecologically important, the characterization and quantification of biogenic structures produced by benthic organisms remain difficult. Several techniques (e.g., resin casting, X-radiography) were previously used to quantify these structures. However, due to a lack of definition, entire burrows, including fine structures created by meiobenthic and small macrobenthic species, could not be identified with precision. Here, we show how axial tomodensitometry (CT scan) can be used to visualize biogenic structures and organic matter in three dimensions with high resolution. Further, a simple method for calculating the space occupied by biogenic structures at given depths is developed, based on comparisons of the densities of biogenic structures with those of surrounding sediments. Other potential uses of the CT scan technique in studying benthic ecology are discussed.

Within aquatic sediments, macrofaunal organisms such as polychaetes, crustaceans, and molluscs build tubes, burrows, and galleries, which are generally called biogenic structures (Frey 1973; Rhoads 1974; Rhoads and Boyer 1982). Members of the meiofauna, including harpacticoid copepods (William-Howe and Fleeger 1987) and nematodes (Platt and Warwick 1980; Nehring et al. 1990) also contribute to the formation of biogenic structures. These formations are the result of benthic organisms burrowing in the substrate that surrounds them; as such, biogenic structures can represent the course taken by an organism or the pathways through which it obtains food and/or other metabolites, such as dissolved gasses. Some biogenic structures are of short duration, while others can be maintained for longer periods.

Often, more durable structures are cemented by mucopolysaccharides secreted by the burrowing organism. Whereas many biogenic structures are associated with bioturbation or sediment destabilization, others, such as the roots of seagrasses and the tubes of phoronids, are sediment stabilizers (Rhoads 1974).

In sedimentary environments, biogenic structures are known to affect the surrounding benthic faunal and microbial communities, as well as sediment geochemistry. The presence of biogenic structures can lead to a localized enhancement of meiofaunal (Reise 1983; Alongi 1985; Giere 1993; Austen and Widdicombe 1998) and macrofaunal populations (Rhoads et al. 1978; Commito 1982; Flint and Kalke 1986; Tamaki 1988; Posey et al. 1991; Widdicombe et al. 2004). The walls of open biogenic structures (burrows, tubes, galleries) are key microenvironments for biogeochemical processes as they are the site of exchanges between the ambient sediment and either the organism or water within the structure. As structures are irrigated, geochemical fluxes within the sediment are stimulated, enhancing bacterial growth (Wavre and Brinkhurst 1971; Driscoll 1975; Fukuhars et al. 1980; Yingst and Rhoads 1980; Reichardt 1988; Stief et al.

Acknowledgments

This research was funded by an NSERC (Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada) individual discovery grant to G.D., an NSERC postdoctoral fellowship to S.C.D., an NSERC operating grant to B.L., and a GEOID network of excellence project (RES#LON) to B.L. The CT scanner was funded by a Canada Foundation for Innovation grant to B.L.

2004) and the mineralization of organic matter (Aller and Yingst 1978; Grossman and Reichardt 1991; Aller 1994). Also, the filling of biogenic structures by surface sediments can introduce organic matter to deeper sediment layers, affecting bacterial distribution and metabolism at those sites (Gerino et al. 1999). Further, biogenic structures at the sediment-water interface can increase bacterial colonization beneath the structures (Soltwedel and Vopel 2001), in turn affecting habitat heterogeneity for small benthic organisms. In seagrass ecosystems (where roots are part of the biogenic structures), oxygen is released into the sediment by the root system (Caffrey and Kemp 1991), and bacteria might play a key role in benthic trophic chains in these organically enriched environments (Danovaro 1996).

Despite the recognized importance of these biogenic structures, it has been difficult to visualize, describe, and quantify the space occupied by such structures in the sedimentary layer (Gerino et al. 1999). As detailed below, the available techniques have several limitations in their ability to reveal the complexity and extent of biogenic structures and macrobenthic communities in a given volume of sediment.

Resin casts—Early attempts of biogenic structure visualization consisted of making resin casts of structures to determine their shape and length (Shinn 1968; Risk et al. 1978; Gerino and Stora 1991; Miron et al. 1991; Lee and Koh 1994; Barros 2001). Although the overall spatial organization of larger structures can be studied by making resin casts, the lack of resolution and definition of this method precludes a precise determination of the space occupied by all burrows, including small structures created by meiobenthos or small macrobenthos, and structures filled with sediment. Also, the position of organisms within or around biogenic structures, and the temporal evolution of those structures, cannot be revealed by making resin casts. Lastly, it would not be possible to study the mucopolysaccharide lining of biogenic structures following the inclusion of resin.

Sediment profile imaging—A number of studies have used a specialized camera, developed by Rhoads and Cande (1971), to observe structures within muddy sediments (Diaz and Cutter 2001; Keegan et al. 2001; Nilsson and Rosenberg 1997, 2003). The greatest advantage of this technique is that it allows in situ observations to be made. However, given that the two dimensional (2D) photographs of sediments are taken along one plane, approximately perpendicular to the seafloor, it can be difficult to interpret the visible traces and structures that often have been sectioned by the apparatus.

X-radiography—X-radiography has been used to visualize and quantify endobenthic burrows (Stanley 1970; Rhoads and Boyer 1982; Davey 1994; Diaz et al. 1994; Gerino et al. 1999; Gosselin and Hare 2003) and, in combination with the use of contrasting agents, to determine the behavior of organisms in the sediment (Charbonneau et al. 1997). With this method, only thin sections (up to a few centimeters in thickness) of sediments can be observed, therefore it is of limited use for observing structures made by larger animals or those

in three dimensions. Furthermore, given that x-ray attenuation is a function of the thickness of the object it penetrates, sediment slabs would need to be of a constant thickness in order for comparative analyses of x-ray intensity values to be valid. However, with X-radiography, it is possible to follow the temporal progression of structures made by smaller animals in experimental setups (Dufour and Felbeck 2003).

Scopix—A variation on traditional X-radiography was developed where the brightness of digital X-radiographs is amplified and the various densities are represented on a grayscale with 256 levels (Migeon et al. 1999). Here, the best results are obtained on 1 cm thick slabs, although some imaging was obtained of longitudinal views through 10 cm diameter cores (or half those cores). Scopix images through entire cores produced data that represented the average densities through the planes of x-ray penetration, lacking the necessary resolution to observe biogenic structures. The scopix technique is an improvement over classical x-ray methods, since it does not use film. This leads to an increase in the reproducibility and precision of results, as well as a higher resolution. However, as with traditional X radiography, the thickness of the sediment slab must be constant if intensity values are to be compared. From the digital images obtained, simplified, binary images can be produced (Lofi and Weber 2001). No rapid technique was developed to determine volumetric space occupation by biogenic structures from those binary images. The percentspace occupation would have to be calculated on X radiographs obtained from successive slabs, which can be quite time consuming.

CT scan—Geologists have used CT scan to characterize sedimentary structures and define facies of submarine mass-movement deposits (Kenter 1989; Boespflug et al. 1994; Crémer et al. 2002) or of intertidal sandbars (Long and Schillinger 2001). Among the various sediment features that could be observed by this technique, it was noted that biogenic structures were visible, due to their reduced density compared with surrounding sediments (Crémer et al. 2002). In the past few years, the use of CT scanning to visualize biogenic structures within cores of marine sediments has increased (de Montety et al. 2003; Mermillod-Blondin et al. 2003; Michaud et al. 2003). CT scanning has also been used in the terrestrial environment for visualizing and quantifying earthworm burrows (Pierret et al. 2002; Bastardie et al. 2003; Capowiez et al. 2003).

During a CT scan, the sample progresses through a rotating array of x-ray emitters and receivers. The system emits and detects x-rays at all angles around the sample, allowing 2D images to be reconstructed. Consecutive transverse sections of the sample are thus scanned. The x-rays are attenuated at each scanned point (or "voxel") within the sample according to material density, atomic number, and the principles of radiation matter. X-ray attenuation is then measured at the detectors according to the Beer law (Eq. 1):

$$I_v = I_0 e^{-\mu v x} \quad (1)$$

where I_v represents the radiation intensity of a voxel, measured at the detector after passing through the sample, I_0 represents the emitted radiation intensity, x equals sample thickness along the radiation pathway, and μ_v is the coefficient of absorption according to voxel density. By comparing μ_v with μ_{water} , the tomographic intensity (TI), expressed in Hounsfield Units (HU), can be obtained (Eq. 2):

$$TI = [(\mu_v - \mu_{\text{water}}) - 1] \cdot 1000 \quad (2)$$

The tomographic intensity received by each detector is transmitted to a computer, and the voxel density is calculated by comparing the TI with the TI of water (by convention, $TI_{\text{water}} = 0$ HU and $TI_{\text{air}} = -1000$ HU). The density of a given voxel includes that of all sedimentary particles and empty spaces in the corresponding volume (typical voxel dimensions for scanners built in the 1990s are between 1 and 2 mm along each plane).

In previous studies, 2D images of sections of the sediment cores were reconstituted by the scanner and visualized using the software Osiris (Ligier et al. 1994). On these sections, the intensity of each pixel is correlated with the TI at the corresponding voxel in the sample (Boespflug et al. 1994; Wellington and Vinegar 1987). At the time, and with the available system, it was not possible to produce three-dimensional (3D) images of biogenic structures from the individual sections. However, the relative spatial occupation of biogenic structures at different depths within the cores could be calculated from the 2D sections, as described below.

Other researchers transformed CT scan data into 2D binary images, which could be used to produce 3D "skeletons" of biogenic structures, revealing, for example, the organization and estimated dimensions of earthworm burrows (Capowiez et al. 1998). Although these skeletons can help understand the general layout of burrows, they do not reveal the entire volume occupied by those structures in the represented space, because precision is lost when the data are transformed into binary images.

Determination of the space occupied by biogenic structures—A method was developed to calculate the percentage of space occupied by biogenic structures on the transverse sections obtained by CT scan (Mermillod Blondin et al. 2003; Michaud et al. 2003), using the freeware Osiris. Briefly, the technique consisted of determining, on each transverse section, the maximal tomographic intensity (MTI) from the mean of five points within the three least visible of the clearly identified biogenic structures (having intensity values closest to the surrounding sediment). All tomographic intensities inferior to the MTI were deemed to correspond with biogenic structures. Then, from a curve of the number of pixels versus TI values, the area underneath the curve and to the left of the predetermined MTI was determined. This area was then divided by the total area underneath the curve to obtain the percentage of surface occupied by biogenic structures in the given section. This procedure is repeated for consecutive transverse sections, and a curve of the percentage biogenic occupation with depth

is obtained (see Fig. 2B in Mermillod-Blondin et al. 2003; Figs. 8, 9 in Michaud et al. 2003).

The major inconvenience of this technique is that the MTI values need to be determined manually for each section, the tomographic values for biogenic structures varying because of changes in mineralogy, grain size, and sediment compaction with depth. Therefore, for a 10 cm thick section and for a slice thickness of 1 mm, this determination needs to be done 100 times in order for the percentage space occupation to be calculated. In order for such calculations to be feasible on a larger scale, a more efficient method was required to calculate biogenic space occupation in a given volume.

In the present study, we use the CT scan technique to visualize in three dimensions the biogenic structures (burrows, galleries) formed by benthic organisms, as well as some of the organisms themselves, in marine sediments collected from different sites. The space occupied either by currently used structures, or by the sum of those structures and organic matter (including organisms, patches of organic matter, and sediment-air or sediment-water interfaces, as explained below) at given depths is then calculated using a new, automated method, which is faster to use and more precise. The technique used here is compared to the one which recently has been in use for studying biogenic structures in terrestrial environments, based on a 3D reconstruction of CT scan images using a granulometry transform (Pierret et al. 2002; Bastardie et al. 2003; Capowiez et al. 2003).

Materials and procedures

Sampling of sediment cores—In October 2003, three sediment cores were collected from a high intertidal zone (Baie du Ha! Ha!, Bic provincial park, Québec, Canada). The cores measured about 20 cm in length and 10 cm in diameter and were scanned 3 weeks after collection.

In May 2004, seven cores (diameter: 10 cm; length: from 8 to 25 cm) of exposed sediments from two marshes (Barachois [$n = 3$] and Saint Siméon [$n = 4$], along the Gaspé Peninsula, Canada) were collected. Core 3 was obtained from a site dominated by growing eelgrass (*Zostera marina*) at Barachois. All other sites were free of vegetation cover. Core 7, from Saint-Siméon, consisted of sandy sediments from outside the marsh. Organic matter content was determined for surface sediments from each of the cores and for a few samples at various depths within the cores by calculating the percentage of weight lost following incubation of dried sediment samples at 400°C for 1 d.

All cores were sealed with rubber caps upon retrieval and transported to the laboratory, where they were refrigerated and scanned 1 week later. By this time, most of the water within the core structures had leaked out.

CT scanning—The sediment cores were CT scanned using a Siemens Somatom Volume Access scanner at the Institut National de la Recherche Scientifique, Eau-Terre-Environnement, in Québec

City. A scanning voltage of 140 kV was used. The cores were scanned over their entire length, without interruption and from all spatial directions, each transverse section having a thickness of 1 mm. One of the cores was also scanned at a section thickness of 0.5 mm to compare the quality of resulting 3D images with those obtained from 1 mm thick sections. The Siemens scanner reconstructs 2D images from a total of 26,000 spatial projections, provides a pixel resolution of up to 0.1 mm on a matrix of 512 * 512 pixels (in our case, the pixel resolution is of 0.2 mm since we scanned entire cores having a diameter of 10 cm), and represents TI on a grayscale of 4096 values.

Data analysis—3D images of the biogenic structures were reconstructed using either the Siemens software or the OsiriX freeware (<http://homepage.mac.com/rossetantoinne/osirix/>) by selecting a range of TI values corresponding to soft organic matter, or air; the spatial distribution of the corresponding TI values can then be visualized. Given that the TI values obtained by the scanner are the sum of such values in a given voxel (which can contain a mixture of sediment, water, air, and organic matter), the TI values in the range corresponding to organic matter also include voxels that are at sediment-water or sediment-air interfaces, having tomographic intensities of intermediate value.

Quantifications of biogenic structures were made using two automated calculations programmed in Matlab (code available upon request) and based on the technique of de Montety et al. 2003, where the percentage of pixels having TI values corresponding to organic matter and biogenic structures (burrows, tubes, etc.) in each transverse section is determined. In the first approach, TI values are plotted against the number of pixels in a given section. The result is the sum of two or more curves having approximately normal or Gaussian distributions (Fig. 1). Assuming that the density distribution of sediments follow normal distributions (which can be multimodal if more than one type of sediment is present, e.g., sand and clay), the space occupied by biogenic structures and organic matter in a given section can be defined as the area underneath the curve and to the left of the theoretical sediment curve (TSC), which would be expected if only sediments were present (Fig. 1). Therefore, the obtained curves show an increase in pixel number at lower TI values (i.e., lower densities). This is proportional to the degree of space occupied by biogenic structures and organic matter in the given section (that is, a peak on the left side of the TSC, corresponding to organic matter, and a peak at the very lowest TI values, which correspond to air-filled cavities, burrows, and other spaces in our sediment cores from which water had drained out). For each section, a unimodal TSC is fitted upon the TI curve obtained. This TSC has a mean corresponding to the mode located to the immediate right of the organic matter peak, and an α value giving the best fit with the right side of the TI curve. The area under the TSC is subtracted from the area under the TI curve and to the left of the TSC mean. The resulting value is divided by

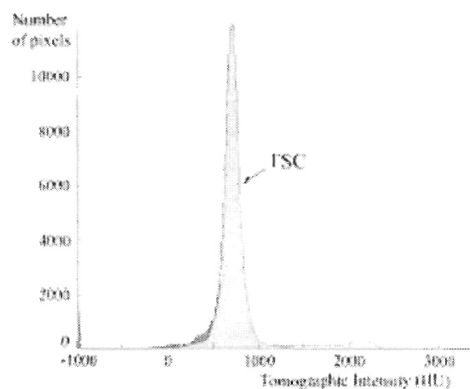


Fig. 1. Number of pixels according to tomographic intensity for a 0.5-mm thick core section from Bale du Hal Hal. From left to right, successive peaks correspond to air, organic matter, sand, and gravel, respectively. The area underneath the theoretical sediment curve (TSC) is in light gray, and the area underneath the curve and to the left of the TSC, in dark gray, is that corresponding to organic matter and empty spaces (filled with air).

the total area underneath the TI curve to obtain the percentage space occupation by benthic organisms. After repeating this calculation automatically for successive sections, the percentage of spatial occupation with depth can be graphed.

A second calculation was made to determine the distribution of air-filled voids (biogenic structures which, after core retrieval, were filled with air) according to depth. Here, the proportion of TI values inferior to -410 (corresponding to air) was determined for each section. The percentage of empty spaces according to depth was then plotted. For a few cores, where the curve corresponding to organic matter was clearly separate from the sediment curve(s), the proportion of TI values inferior to 800 was similarly determined. This provided another measure of the percentage organic matter and air-filled voids according to depth.

Assessment

CT scans were made of the 10 retrieved sediment cores, and 3D reconstructions were obtained for densities corresponding to organic matter and air (Fig. 2). The scans obtained for the organic matter densities revealed the contour of structures, such as burrows made by polychaetes (Fig. 2D), and organisms, such as *Macoma balthica* and *Mya arenaria* specimens (Fig. 2B) and the roots of *Zostera marina* (Fig. 2F). The organisms were recognizable, their relative position in the sediment column could be determined, and features such as the siphons and feet of bivalves were visible (Fig. 2B). In the case of tubes and burrows, the represented surfaces are most likely voxels at the sediment-air interface of the biogenic structures, which have TI values matching those of organic matter. Also visible were accumulations of organic matter in the sediment, perhaps under decomposition (Fig. 2D). Some of the smaller traces may have been formed by meiofauna, however, this remains to be determined.

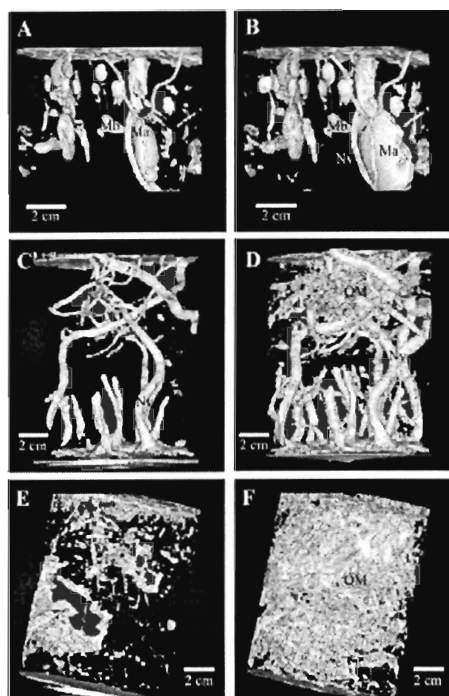


Fig. 2. CT scans of sediment cores, representing the densities of air or organic matter. (A) Air-filled structures, Baie du Ha! Ha! The pallial cavities of the bivalves *Mya arenaria* (Ma) and *Macoma balthica* (Mb) are visible, as well as a *Nereis virens* burrow. (B) Organic matter, Baie du Ha! Ha! The mantle of *Mya arenaria* (Ma) and *Macoma balthica* (Mb), and mucus-lined burrows of *Nereis virens* (Nv) can be seen. (C) Air-filled structures, Saint-Siméon. Burrows of *Nereis virens* (Nv). (D) Organic matter, Saint-Siméon. Mucus linings of *Nereis virens* burrows (Nv), and patch of organic matter (OM). (E) Air-filled structures, Barachois. Some structures may be the lumen of *Zostera marina* roots. (F) Organic matter, Barachois. Dense organic matter (OM), mostly consisting of *Zostera marina* roots.

Dissection of the cores following scanning revealed that the core represented in Fig. 2A, B contained the bivalve species *M. balthica* and *M. arenaria*; the core represented in Fig. 2C, D contained one adult and four juvenile *Nereis virens* individuals (which were not clearly seen on the scans, given that the scale of TI values chosen for 3D representation was too broad); and the core shown in Fig. 2E, F contained dense clumps of *Z. marina* roots, but no macrofauna. Additional cores obtained from the same localities revealed similar communities, distributed at the same depth within the cores.

The 3D reconstructions of the densities of air revealed the internal structure of burrows and tubes, from which the water must have leaked out when the core was taken and stored before scanning (Fig. 2A, C, E). In addition, bivalve pallial and siphonal cavities were visible (Fig. 2A).

The space occupied by organisms and biogenic structures was calculated for the cores, using the automated method. Due to uneven surface topology, these calculations were not made for the topmost 8 to 10 mm of the sediment cores. For the three cores shown in Fig. 2, the curves of spatial occupation with depth for organic matter and empty spaces, or for empty spaces only, are shown in Fig. 3.

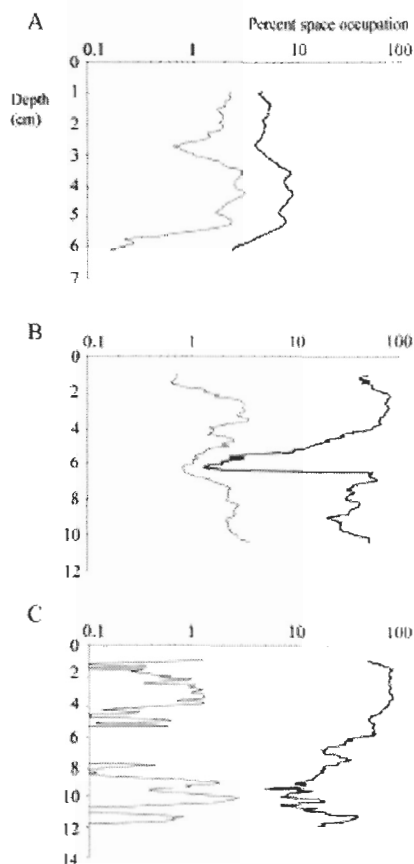


Fig. 3. The percent space occupied by air-filled structures (thin line) and organic matter + air-filled structures (thick line), at different depths in sediment cores from Baie du Ha! Ha! (A), Saint-Siméon (B), and Barachois (C). The curves were calculated from the cores depicted in Fig. 2.

In the core from the muddy sand intertidal (Fig. 3A), the percent occupation of organic matter and voids varied between 4.2% and 5.4% from 1 to 2.5 cm from the surface, with higher occupation between 3 and 5 cm, where *Mya arenaria* were situated. Empty spaces within biogenic structures consisted of between 2% and 2.5% space occupation between 1 and 2.5 cm from the surface, and increased where *M. arenaria* were located (Fig. 3A). In the core from the muddy intertidal (Fig. 3B), the two curves have roughly the same shape and reveal a higher organic matter density and a slightly higher percentage of empty spaces than in the muddy sand Intertidal core. Further, the curves reveal zones of reduced bioturbation at the very surface and between 45 and 65 mm depth. The latter zone seems to correspond to a sediment deposition event, which would have closed off some of the worm burrows (others, however, span the deep and top sediment layers and would seem to be more recent). In the *Zostera marina* marsh core, the percent organic matter and biogenic structures varied between 6.0% and 87.8% throughout the core, whereas the percentage of empty spaces only was more constant (Fig. 3C). There was less bioturbation in the *Z. marina* marsh sediments than in cores from the other environments. Some of the empty spaces may have been root lumen.

The CT scan technique allowed us to observe and compare the macrobenthic organisms present in three different environments. The species found at the three sites corresponded to the previously described macrofauna of intertidal regions around the St. Lawrence estuary and in the Gulf of St. Lawrence (Desrosiers and Brêthes 1984; Desrosiers et al. 1984). When taking into consideration the sediment type and organic matter content, the Baie du Ha! Ha! and Saint Siméon communities can be categorized as boreal *Macoma balthica* assemblages with differing food availabilities, as described by Pearson and Rosenberg (1987). The Barachois site borders *Macoma balthica* communities but does not contain them. In sites with muddy sand and a relatively lower organic matter content (at surface of core represented in Fig. 2A, B: 2.9%), the bivalves *M. balthica* and *Mya arenaria* and the polychaete *Nereis virens* were found. In muddy sites with a higher organic matter content (at surface of core represented in Fig. 2C, D: 12.9%, and at 4 cm depth, within the patch of organic matter: 10.6%) and a higher oxygen demand, no bivalves were found, but *N. virens* was well represented. In muddy sites with the most organic matter (dense *Zostera marina* roots shown in Fig. 2E, F, organic matter content at surface: 15.7%, and at 5 cm depth: 14.9%), no macrofauna were observed. Visualization and quantification of current biogenic structures in the different environments revealed that the muddy Intertidal environment, inhabited by *N. virens*, had the greatest level of bioturbation, followed by the muddy sand intertidal; the *Z. marina* marsh sediments were the least bioturbated (most likely due to seasonal anoxic conditions below the surface layers and the roots occupying a large part of the space).

Advantages of CT scan—The use of CT scan analysis to observe and quantify biogenic structures has many advantages over previously used techniques. First, it is a non-destructive method, allowing samples to be preserved in intact form for subsequent geochemical and biological analyses. As such, it is a clear improvement over resin casting techniques, as well as over more traditional x-ray methods, which require the slicing of thin sediment slabs, a process which inevitably causes distortion at the edges of the slabs.

Second, it reveals a more precise view of biogenic structures in three dimensions, allowing observation from multiple angles to be made. Freeware such as OsiriX can create movies of rotating CT scan images, facilitating interpretation (see Web Appendix 1). This system produces images with a spatial resolution of up to 0.1 mm. These values are greater than previously attainable (de Montety et al. 2003; Mermillod-Blondin et al. 2003). In addition, densities within the sample can be resolved to a very fine level (a change of one TI unit corresponds to a 0.1% change in density). As a result, the system can detect the presence of small biogenic structures that are not visible to the naked eye and are not taken into consideration by other techniques such as x-ray analysis (Gerino et al. 1999). Although not confirmed, some of those small structures may be formed by meiofauna.

Third, CT scanning is very fast and cost effective. The scanning of a core requires only a few seconds, and 3D reconstruction is obtained within a few minutes, at most. The cost of scanning depends on the resolution required (here, we obtained similar 3D images when scanning at section thicknesses of 1 mm and 0.5 mm) and the scanning time. The current cost of a 1-mm section is approximately 2 Canadian dollars (CAD); however, two to four consecutive sections can be scanned simultaneously, depending on the diameter of the core, lowering the cost per section to 0.5 to 1 CAD. In comparison, the cost of one X radiograph (1 cm thick) is between 4 and 10 CAD. Therefore, for a 10 cm thick sample, a CT-scan analysis would cost approximately 100 CAD, compared to 40 to 100 CAD for ten consecutive 1 cm thick x-rays of lower resolution and requiring physical sectioning.

The automated method for quantifying the volume occupied by biogenic structures in a given volume of sediment is more efficient and more precise than the previously used technique (de Montety et al. 2003; Michaud et al. 2003), which may have overestimated space occupation (if there was an overlap between TI curves corresponding to organic matter and sediments). The technique used here, when applied to the core from Baie du Ha! Ha!, yielded somewhat smaller percent spatial occupation values (for organic matter + voids) than those obtained by Mermillod-Blondin et al. (2003) for cores of similar size from another sandy-muddy intertidal site, also in the Bic provincial park; in the latter cores, however, more organisms were present. The greatest spatial occupation values obtained by Mermillod-Blondin et al. (2003) corresponded to the top 10 mm from the sediment surface—a portion of the core which, in this study, was not analyzed. It would, therefore, be worthwhile to modify the present spatial occupation determination program to be able to deal with uneven surface topography.

In the sediment cores studied here, the space occupied by air-filled voids and by the sum of organic matter and voids could be compared. The spatial distributions of voids only are more revealing of the occupation of structures made by larger macrofauna, such as bivalves and polychaetes, whereas the distribution of organic matter may include mucus linings of those and other smaller structures, as well as patches of organic matter (detritus, seagrass roots, etc.) and sediment-water or sediment-air interfaces. Comparisons between spatial occupation curves can reveal the distribution of burrows and tubes in relation to patches of organic matter (as in Fig. 2D).

Comparison with granulometry transform technique—The CT scan system used here, together with the method for quantifying biogenic structure spatial occupation, bears a number of advantages over the system used by several researchers to study terrestrial sedimentary environments (Pierret et al. 2002; Bastardie et al. 2003; Capowiez et al. 2003). First, the Siemens scanner used here provides a higher voxel resolution (0.1 * 0.1 * 0.3 mm versus 0.4 * 0.4 * 1 mm) and represents densities on a grayscale of 4096

levels (as opposed to 256 gray levels). The 3D reconstruction, processed by the Siemens software, consists of a direct superposition of voxels from successive sections. The original data are not transformed by this process. In contrast, with the granulometry transform, the original data are filtered in such a way that the finest structures (with a diameter smaller than 1 mm) are lost. While the technique has been successful in demonstrating the spatial occupation of different earthworm species in soil environments (Bastardie et al. 2003; Capowiez et al. 2003), it would underestimate the volumetric occupation of all biogenic structures present. With the present technique, the finest structures are included in the calculations, which are based on untransformed scanner data.

Discussion

The CT scan technique was used here to study different endobenthic environments, each having unique sedimentary and faunal characteristics. The images obtained after scanning those cores confirm that the technique can be used in a variety of benthic habitats and yield equally good results.

For the first time, detailed, 3D visualization of biogenic structures could be made: this breakthrough finally allows researchers to observe benthic communities in their natural state with minimal disturbance. Whether comparing biogenic structures from a given site at various times or making comparisons of benthic structure from different locations, the CT scan provides a rapid and powerful way to visualize complex systems.

An unexpected benefit of the CT scan technique is its ability to reveal the spatial distribution of organic matter in the sediment. In some of the cores we studied, patches of what appeared to be detritus were visible. Such information is clearly informative and of value in studies of benthic ecosystem processes at several levels.

Given that the purpose of this study was to observe active burrows within the sediment, we have not attempted to visualize in 3D or quantify burrows that have been filled with sediment. However, it is possible to distinguish such features on the transverse sections based on the different densities of sediment within and outside the filled burrows: within the burrows, sediment is less compact and has lower tomographic intensities than outside the burrows. Also, it was shown that the burrow linings are often more dense than the surrounding sediment, perhaps due to compaction by the animal during burrowing activities (de Montety et al. 2003).

The quantification technique developed here allows us to compare the space occupied by empty spaces, or by organic matter and empty spaces, in different environments. These data might not be directly comparable to previously obtained spatial occupation values (e.g., Gerino et al. 1999; Michaud et al. 2003), which on one hand may have excluded patches of organic matter, and on the other may have overestimated spatial occupation by assuming that no

sediment had the same density as biogenic structures. A direct comparison of the results obtained by the two techniques would be required to settle this issue.

In addition to providing researchers with precise visualization and quantification of biogenic structures in sediment samples, the CT scanner could be used to observe the position of organisms within these burrows at given times and thus study the behavior of organisms in sediment cores or aquariums with no disturbance. Also, the CT scanner can be used to visualize biogenic structures that have become fossilized (Gagnoud et al. 2004). Therefore, the technique has potential applications in biogenic structure observation over geological time scales.

With knowledge of the densities of objects of interest, such as shells or rocks, it is possible to map the position and behaviour of organisms relative to these objects within the sediment. Therefore, the CT scanner allows researchers to observe and describe a multitude of sedimentary characteristics and benthic organism behaviour simultaneously or even in succession over a very short time scale to observe temporal changes.

Further analysis of the data obtained by CT scanning could provide information on burrow size and spatial distribution, or burrow surface to volume ratios. Such data could be obtained by using either the scanner software or available freeware. Alternatively, simple programs could be developed to extract this information from the matrix of TI values obtained from the scanner. As such, specific questions relating to biochemical transport in the sediment could be addressed using this technology.

Overall, CT scanning has the potential of becoming a very powerful method for benthic studies, and it is certain that it will be used to address issues which previously could not be explored in this field.

Comments and recommendations

Experimental setups, if possible, should be maintained in plastic containers, without metallic parts, as some metals can lead to CT scanning artifacts.

References

- Aller, R. C. 1994. Bioturbation and remineralization of sedimentary organic matter: effects of redox oscillation. *Chem. Geol.* 114:331-345.
- and J. Y. Yingst. 1978. Biogeochemistry of the tube dwellings: a study of the sedentary polychaete *Amphitrite ornata*. *J. Mar. Res.* 36:201-254.
- Alongi, D. M. 1985. Effect of physical disturbance on population dynamics and trophic interactions among microbes and meiofauna. *J. Mar. Res.* 43:351-364.
- Austen, M. C., and S. Widdicombe. 1998. Experimental evidence of effects of the heart urchin, *Brissopsis lyrifera* on associated subtidal meiobenthic nematode communities. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 222:219-238.

- Barros, F. 2001. Ghost crabs as a tool for rapid assessment of human impacts on exposed sandy beaches. *Biol. Conserv.* 97:399-404.
- Bastardie, F., Y. Capowiez, J. -R. de Dreuzy, and D. Cluzeau. 2003. X-ray tomographic and hydraulic characterization of burrowing by three earthworm species in repacked soil cores. *Appl. Soil Ecol.* 24:3-16.
- Boespflug, X., N. Ross, B. Long, and J. -F. Dumais. 1994. Tomodensitométrie axiale: relation entre l'intensité tomographique et la densité de la matière. *Can. J. Earth Sci.* 31:426-434.
- Caffrey, J. M., and W. M. Kemp. 1991. Seasonal and spatial patterns of oxygen production, respiration, and root-rhizome release in *Potamogeton perfoliatus* L. and *Zostera marina* L. *Aquat. Bot.* 40:109-128.
- Capowiez, Y., A. Pierret, O. Daniel, and P. Monestiez. 1998. 3D skeleton reconstructions of natural earthworm burrow systems using CAT scan images of soil cores. *Biol. Fertil. Soils* 27:51-59.
- , A. Pierret, and C. J. Moran. 2003. Characterization of the three-dimensional structure of earthworm burrow systems using image analysis and mathematical morphology. *Biol. Fertil. Soils* 38:301-310.
- Charbonneau, P., L. Hare, and R. Carignan. 1997. Use of X-ray images and a contrasting agent to study the behavior of animals in soft sediments. *Limnol. Oceanogr.* 42:1823-1828.
- Commito, J. A. 1982. Importance of predation by infaunal polychaetes in controlling the structure of a soft-bottom community in Maine, USA. *Mar. Biol.* 68:77-81.
- Crémer, J. -F., B. Long, G. Desrosiers, L. de Montety, and J. Locat. 2002. Application de la scanographie à l'étude de la densité des sédiments et à la caractérisation des structures sédimentaires: exemple des sédiments déposés dans la rivière Saguenay (Québec, Canada) après la crue de juillet 1996. *Can. Geotech. J.* 39:440-450.
- Danovaro, R. 1996. Detritus-bacteria-meiofauna interactions in a seagrass bed (*Posidonia oceanica*) of the NW Mediterranean. *Mar. Biol.* 127:1-13.
- Davey, J. T. 1994. The architecture of the burrow of *Nereis diversicolor* and its quantification in relation to sediment-water exchange. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 179:115-129.
- de Montety, L., B. Long, G. Desrosiers, J. -F. Crémer, J. Locat, and G. Stora. 2003. Utilisation de la scanographie pour l'étude des sédiments: influence des paramètres physiques, chimiques et biologiques sur la mesure des intensités tomographiques. *Can. J. Earth Sci.* 40:937-948.
- Desrosiers, G., and J. -C. Brêthes. 1984. Etude bionomique de la communauté à *Macoma balthica* de la batture de Rimouski. *Sci. Technol. Eau* 17:25-30.
- , J. -C. Brêthes, and B. F. N. Long. 1984. L'effet d'un glissement de terrain sur une communauté benthique médiolittorale du nord du golfe du Saint-Laurent. *Oceanol. Acta* 7:251-258.
- Diaz, R. J., and G. R. Cutter, Jr. 2001. In situ measurement of organism-sediment interaction: rates of burrow formation, abandonment and sediment oxidation, reduction, p 19-32. *In* J. Y. Aller, S. A. Woodin, and R. C. Aller [eds.], *Organism sediment interactions*. University of South Carolina Press.
- , R. Cutter, and D. C. Rhoads. 1994. The importance of bioturbation to continental slope sediment structure and benthic processes off Cape Hatteras, North Carolina. *Deep-Sea Res. II.* 41:719-734.
- Driscoll, E. G. 1975. Sediment-animal interaction, Buzzards Bay, Massachusetts. *J. Mar. Res.* 33:275-301.
- Dufour, S. C., and H. Felbeck. 2003. Sulphide mining by the superextensile foot of symbiotic thyasirid bivalves. *Nature* 426:65-67.
- Flint R. W., and R. D. Kalke. 1986. Biological enhancement of estuarine benthic community structure. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 31:23-33.
- Frey, R. W. 1973. Concept in the study of biogenic sedimentary structures. *J. Sediment. Petrol.* 43:6-19.
- Fukuhars, A. H., E. Kikuchi, and Y. Kurihara. 1980. The effect of *Branchiura sowerbyi*, (Tubificidae) on bacterial populations in submerged ricefield soil. *Oikos* 34:88-93.
- Gagnoud, M., P. Lajeunesse, G. Desrosiers, B. Long, J. Labrie, F. Mermillod-Blondin, and G. Stora. 2004. Sedimentary facies analysis of glaciomarine mud using axial tomodensitometry (CAT-scan). 32nd International Geological Congress, Florence, Italy.
- Gerino, M., and G. Stora. 1991. Analyse qualitative in vitro de la bioturbation induite par le polychète *Nereis diversicolor*. *C.R. Acad. Sci. Paris III* 313:489-494.
- , G. Stora, and O. Weber. 1999. Evidence of bioturbation in the Cap-Ferret Canyon in the deep northeastern Atlantic. *Deep-Sea Res. II* 46:2289-2307.
- Giere, O. 1993. *Meiobenthology. The microscopic fauna in aquatic sediments.* Springer-Verlag.
- Gosselin, A., and L. Hare. 2003. Burrowing behavior of *Chaoborus flavicans* larvae and its ecological significance. *J. North Am. Benthol. Soc.* 22:575-581.
- Grossman, S., and W. Reichardt. 1991. Impact of *Arenicola marina* on bacteria intertidal sediment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 77: 85-93.

- Keegan, B. F., and others. 2001. Sediment profile imagery as a benthic monitoring tool: introduction to a 'long-term' case history evaluation (Galway Bay, West coast of Ireland), p 43-62. *In* J. Y. Aller, S. A. Woodin, and R. C. Aller [eds.], *Organism-sediment interactions*. University of South Carolina Press.
- Kenter, J. A. M. 1989. Applications of computerized tomography in sedimentology. *Mar. Geotechnol.* 8:201-211.
- Lee, Y. -H., and C. -H. Koh. 1994. Biogenic sedimentary structures on a Korean mud flat: spring-neap variations. *Neth. J. Sea Res.* 32:81-90.
- Ligier, Y., O. Ratib, M. Logean, and C. Girard. 1994. Osiris: a medical image manipulation system. *MD Comput.* 11: 212-218.
- Lofi, J., and O. Weber. 2001. SCOPIX-digital processing of X-ray images for the enhancement of sedimentary structures in undisturbed core slabs. *Geo-Mar. Lett.* 20:182-186.
- Long, B. F., and S. Schillinger. 2001. Détermination des faciès sédimentaires de flèches intertidales par tomographie axiale, p 447-463. *In* B. F. Long [ed.], *Proceedings of the 2001 Canadian Coastal Conference*, May 16-19, 2001. Canadian Coastal Science and Engineering Association.
- Mermillod-Blondin, F., S. Marie, G. Desrosiers, B. Long, L. de Montety, E. Michaud, and G. Stora. 2003. Assessment of the spatial variability of intertidal benthic communities by axial tomodensitometry: importance of fine-scale heterogeneity. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 287:193-208.
- Michaud, E., and others. 2003. Use of axial tomography to follow temporal changes of benthic communities in an unstable sedimentary environment (Baie des Ha! Ha!, Saguenay Fjord). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 285-286: 265-282.
- Migeon, S., O. Weber, J.-C. Faugeres, and J. Saint-Paul. 1999. SCOPIX: a new X-ray imaging system for core analysis. *Geo-Mar. Lett.* 18:251-255.
- Miron G., G. Desrosiers, C. Retière, and R. Lambert. 1991. Evolution spatio-temporelle du réseau de galeries chez le polychète *Nereis virens* (Sars) en relation avec la densité. *Can. J. Zool.* 69:39-42.
- Nehring, S., P. Jensen, and S. Lorenzen. 1990. Tubedwelling nematodes: tube construction and possible ecological effects on sediment-water interfaces. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 64:123-128.
- Nilsson, H. C., and R. Rosenberg. 1997. Benthic habitat quality assessment of an oxygen stressed fjord by surface and sediment profile images. *J. Mar. Syst.* 11:249-264.
- and ———. 2003. Effects on marine sedimentary habitats of experimental trawling analysed by sediment profile imagery. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 285:453-463.
- Pearson, T. H., and R. Rosenberg. 1987. Feast and famine: structuring factors in marine benthic communities, p 373-395. *In* J. H. R. Gee and P. S. Miller [eds.], *The 27th symposium of the British Ecological Society*, Aberystwyth 1986. Blackwell.
- Pierret, A., Y. Capowiez, L. Belzunces, and C. J. Moran. 2002. 3D reconstruction and quantification of macropores using X-ray computed tomography and image analysis. *Geoderma* 106:247-271.
- Platt, H. M., and R. M. Warwick. 1980. The significance of freeliving nematodes to the littoral ecosystem, p 729-759. *In* J. H. Price, D. E. G. Irvine, and W. F. Farnham [eds.], *The shore environment*, Vol. 2: *Ecosystems*. Academic.
- Posey M. H., B. R. Dumbauld, and D. A. Armstrong. 1991. Effects of a burrowing mud shrimp, *Upogebia pugettensis* (Dana), on abundances of macro-infauna. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 148:283-294.
- Reichardt, W. 1988. Impact of bioturbation by *Arenicola marina* on microbiological parameters in intertidal sediments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 44:149-158.
- Reise, K. 1983. Experimental removal of lugworms from marine sand affects small zoobenthos. *Mar. Biol.* 74:327-332.
- Risk, M. J., R. D. Venter, S. G. Pemberton, and D. E. Buckley. 1978. Computer simulation and sedimentological implications of burrowing by *Axius serratus*. *Can. J. Earth Sci.* 15: 1370-1374.
- Rhoads, D. C. 1974. Organism-sediment relations on the muddy sea floor. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 12:263-300.
- and L. F. Boyer. 1982. The effects of marine benthos on physical properties of sediments: a successional perspective, p 3-52. *In* P. L. McCall and M. J. S. Tevesz [eds.], *Animalsediment relations*. Plenum.
- and S. Cande. 1971. Sediment profile camera for in situ study of organism-sediment relations. *Limnol. Oceanogr.* 16:110-114.
- , P. L. Mc Call, and J. Y. Yingst. 1978. Disturbance and production on the estuarine seafloor. *Am. J. Sci.* 66: 577-586.
- Shinn, E. A. 1968. Burrowing in recent lime sediments of Florida and the Bahamas. *J. Paleontol.* 42:879-894.
- Soltwedel, T., and K. Vopel. 2001. Bacterial abundance and biomass in response to organism-

generated habitat heterogeneity in deep-sea sediments. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 219:291-298.

-Stanley, S. M. 1970. Relation of shell form to life habits in the bivalvia (Mollusca). *Geol. Soc. Am. Mem.* 125:1-293.

-Stief, P., D. Altmann, D. De Beer, R. Bieg, and A. Kureck. 2004. Microbial activities in the burrow environment of the potamal mayfly *Ephoron virgo*. *Freshwater Biol.* 49:1152-1163.

-Tamaki, A. 1988. Effects of the bioturbating activity of the ghost shrimp *Callinassa japonica* Ortmann on migration of a mobile polychaete. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 120:81-95.

-Wavre, M., and R. O. Brinkhurst. 1971. Interactions between some tubificid oligochaetes and bacteria found in sediments of Toronto Harbour, Ontario. *J. Fish. Res. Bd. Can.* 28:335-341.

-Widdicombe, S., M. C. Austen, M. A. Kendall, F. Olsgard, M. T. Schaanning, S. L. Dashfield, and H. R. Needham. 2004. Importance of bioturbators for biodiversity maintenance: indirect effects of fishing disturbance. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 275:1-10.

-William-Howe, J., and J. W. Fleeger. 1987. Pore pattern: a possible indicator of tube building in *Stenhelia* and *Pseudostenhelia* (Copepoda: Harpacticoida). *J. Crustacean Biol.* 7:148-157.

-Wellington, S. L., and H. J. Vinegar. 1987. X-ray computerized tomography. *J. Petrol. Technol.* 39:885-898.

-Yingst, J. Y., and D. C. Rhoads. 1980. The role of bioturbation in the enhancement of bacterial growth rates in marine sediments, p 407-422. *In* K. R. Tenore and B. C. Coull [eds.], *Marine benthic dynamics*. University of South Carolina Press.

Submitted 10 December 2004

Revised 21 April 2005

Accepted 16 July 2005

Annexe 2. Gagnoud, M., Lajeunesse, P., Desrosiers, G., Long, B., Dufour, S., Labrie, J., Mermillod-Blondin, F. and Stora, G., 2005. Litho- and bio-facies analysis of postglacial marine mud using CT-Scan. Soumis à *Engineering Geology*.

Litho- and bio- facies analysis of postglacial marine mud using CT-Scan

Marie Gagnoud¹, Patrick Lajeunesse^{2*}, Gaston Desrosiers¹, Bernard Long³, Suzanne
Dufour¹, Jacques Labrie³, Florian Mermillod-Blondin⁴ and
Georges Stora⁵

¹ *Institut des sciences de la mer, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec G5L 3A1 Canada*

² *Centre d'Études Nordiques & Département de Géographie, Université Laval, Québec G1K 7P4 Canada*

³ *INRS-ETE, 490 rue de la Couronne, Québec, Québec G1K 9A9 Canada*

⁴ *LEHF, Université de Lyon I, Campus de la Doua, 69622 Villeurbanne cedex, France*

⁵ *LMGEM-COM, Campus de Luminy, 13288 Marseille cedex 09, France*

- Corresponding author. Fax: (418) 656-3960; email : patrick.lajeunesse@ggr.ulaval.ca

Manuscript submitted to *Engineering Geology* (15 December, 2004)

Abstract

Marine silty-clay deposited during the Late-Wisconsinian postglacial marine transgression of eastern Québec (Goldthwait Sea) is ubiquitous in the sedimentary column of intertidal zones of the St-Lawrence Estuary. This mud is very compact and limits the penetration of organisms composing the modern *Macoma balthica* community. In order to describe the characteristics of intertidal sediments containing Goldthwait Sea mud, axial tomography (CT-Scan) is used. CT-Scan is a non-destructive method that can be used to describe sediment characteristics (grain size, mineralogy, primary and secondary sedimentary structures, fabric, shape and roundness, bedding contact), and to obtain high resolution, 3D representations of structures within sediment cores. Based on differences in the densities of analysed materials, the different lithologies, lithofacies, and organisms within the core can be discriminated, and a quantification of the volume occupied by the different components of the material can be made. Here, CT-Scan images provide information on the distribution, orientation and interweaving of thanatocoenosis shell beds that alternate with massive or faintly laminated postglacial marine mud beds, as well as on ichnofacies characteristics. In addition, we show 3D images of bioturbation structures within the recent sediment layer, which is distinguished from the underlying Goldthwait Sea mud. When coupled with conventional sedimentary (grain size statistics) and radiochronological (^{14}C) analyses, these data provide information which is valuable for identifying depositional processes within sedimentary environments.

Keywords: CT-Scan; postglacial marine sediments; sedimentary structures; lithofacies; biofacies.

1. Introduction

The Laurentide Ice Sheet (LIS) is estimated to have retreated from the southern sector of the St-Lawrence estuary between 13 500 and 12 500 years BP (Dionne, 1977; Dyke and Prest, 1987). Immediately following its retreat, marine waters invaded this glacio-isostatically depressed basin to form the Goldthwait Sea transgression (e.g., Dionne, 1977). During this postglacial transgression, large volumes of fine sediments were transported and deposited in this marine setting, mostly through turbid meltwater plumes emanating from the glacial margin in contact with the open sea (Syvitski and Praeg, 1989). Following deglaciation, glacio-isostatic recovery lead emergence of land that was previously submerged by 140 m (Dionne, 1977, 2001; Locat, 1977; Héту, 1998). This fall in relative sea level (RSL) brought postglacial marine silty-clay sediments deposited in deep waters to what is now the intertidal zone, where they can be easily sampled. These sediments are now covered by a thin veneer of coastal massive muddy sand and the upper parts are periodically eroded by storms, forming lag beds. Today, the sedimentation rate is weak and allows colonization by the *Macoma balthica* community (Desrosiers and Brêthes, 1984). This contrasts with the massive sedimentation which led to the presence of shell beds in the compact marine sediment layer (Dionne, 1977).

The description of a sedimentary environment at the core scale is difficult because the quality of this description is a function of observational quality. The use of axial tomodensitometry (CT-Scan), as described in the present study, improves sedimentary analysis power, since it is a very sensitive tool with regards to size and internal variation within the analysed sample.

CT-scan has been used by sedimentologists for both qualitative and quantitative evaluations of sediment density, state of compaction and depositional origin (Crémer et al.,

2002). More recently, CT-Scan has been used to identify and quantify the space occupied by benthic organisms in the sedimentary column (de Montety et al., 2003; Michaud et al., 2003; Mermillod-Blondin et al., 2003). This method allows us to better understand the behaviour of these organisms and their bioturbation and bioirrigation processes, as well as to identify and quantify ancient bioturbation traces, or ichnofacies (Michaud et al., 2003). As opposed to traditional methods, CT-scan allows us to obtain a 3-D representation of sedimentary structures without destroying the cores (Crémer, 2002; de Montety et al., 2003), thereby allowing us to follow the succession of events at a particular study site. With the digital data obtained, it is possible to discriminate sedimentary features by their respective density, and to automatically quantify the volume occupied by certain structures within the core (Dufour et al., submitted).

In this paper, we apply the CT-Scan technique to analyse and reconstruct the depositional environment and processes of Goldthwait Sea silty-clay beds from their deposition to the development of modern benthic communities.

2. Materials and Methods

Three sediment cores (20 cm in length; 10 cm in diameter) were collected in the upper reaches of the intertidal zone of Baie du Ha! Ha!, Parc National du Bic, on the south shore of the St-Lawrence River, Québec (Fig. 1). The cores were analyzed with a *Siemens Somatom Volume Access* scanner at the *Institut National de Recherche Scientifique – Eau-Terre-Environnement* (INRS-ETE; Quebec City, Canada) along their entire length, without interruption and in all spatial directions. The scanner functions as described by Michaud et al. (2003) and de Montety et al. (2003), with the following improvements: 1) tomographic intensity (TI) values are represented by a greyscale of 4096 values corresponding

respectively to 0.1 % variations in density; 2) transverse sections of the cores have a pixel resolution of 0.20 mm, and longitudinal sections have a pixel resolution of 1 mm; 3) 3D images, representing a range of density values selected by the operator, can now be reconstructed by the scanner – for example, living organisms and biogenic structures (tubes, galleries, etc.), fossils and stones can be visualized.

For each sediment core, a tomogram, representing densities along a longitudinal plane for the entire length of the core, was obtained. Then, from scans of 1 mm-thick transverse sections, 3D reconstructions of living and fossil organisms were made.

Based on the transverse sections obtained, we developed a method for the automated quantification of the space occupied by recent benthic organisms and biogenic structures, such as galleries and other water-filled spaces within the sediments (Dufour et al., submitted). For each transverse section, the curve depicting the number of pixels according to TI values, expressed in Hounsfield Units (HU) (Fig. 2) shows secondary peaks to the left of a theoretical Gaussian curve, whose mean equals the average TI of the least dense class of sediments in that section; the proportion of pixels to the left of the theoretical curve depends on the degree of sediment occupation by living organisms and biogenic structures (through calibration, TI values of -1000 and 0 correspond to air and pure water, respectively; organic matter values are somewhat higher than water, reaching about 700 HU). Consequently, the difference obtained when the two curves are superimposed (Fig. 2) reveals the percentage of space occupied by organisms and water-filled spaces in the sediment. This calculation is performed automatically, using a program written in Matlab.

Following the CT-Scan analyses, cores were opened in order to visually assess the principal sedimentary facies as well as to sample the sediment for grain size analyses and

¹⁴C dating. Sediment samples were taken from each layer of the cores for grain size distribution analyses using a Coulter Counter LS-100. ¹⁴C-dating of two samples of shells retrieved in the fossil shell beds was realised at the Centre d'Études Nordiques ¹⁴C Laboratory (Université Laval, Quebec City, Canada), following pre-treatment with 5% HCl. The ages are non-corrected and presented in ¹⁴C years. The three cores present the same succession of events; here, only the core G3 is presented.

3. Results and Discussion

The longitudinal section tomogram and graph of TI values with depth (Fig. 3) allowed us to distinguish a succession of layers, showing three distinct sedimentary facies within our core sample. This graph (Fig. 3B) shows TI values along the vertical line shown in Fig. 3A, which intercepts the core. On average, TI values consist of about 700 HU in the deeper part of the core. Heading towards the surface, these values increase to 1500 in the middle part of the core, then decrease to 700 and increase to 1300 in the upper part. From this, three lithofacies are identified: 1) a lithofacies (composed of two sublithofacies) consisting of massive silty-clay with TI values of 700 (LF1); 2) a fossil shell bed with TI of ~1500 (LF2); and 3) a sand and gravel bed (two sub-lithofacies) with TI of ~1500 (LF3). Grain size distribution data confirms the presence of these three distinct beds (Fig. 4).

3.1. Lithofacies 1. Massive silty-clay bed (LF1)

3.1.1. Description

Massive silty-clay (LF1) occurs in two sub-lithofacies: at the bottom (Layer A) and in the middle of the core (Layer D) (Fig. 4). LF1 sediments have a mean grain size of 6 µm,

and appear in darker tones in CT-scan images due to the lower density of clay, their constituent material.

The two sub-lithofacies are separated by a thin sand bed (Layer B) and a fossil shell bed (Layer C). Sediments composing Layer A are well sorted, although not as well as those of Layer D; also, Layer A sediments contain a greater quantity of sand particles and a few paired shells. Layer A has a sharp contact with the upper Layer B sand bed that is characterised by an irregular geometry. Layer D shows a sharp contact with the lower shell bed (LF2; Layer C) and an erosion contact with the upper bioturbated surface sand and gravel bed (LF 3; Layer E).

3.1.2. Interpretation

The massive silty-clay lithofacies is interpreted as being deposited by suspension settling through the water column. The deposition of its two sub-lithofacies is attributed to a fast disturbance event that occurred through an otherwise continuous sediment rain-out on the seafloor. No trace fossils are present within this bed, probably because it is too compact and massive to allow colonisation (Mermillod-Blondin et al., 2003).

3.2. Lithofacies 2. Fossil shell beds (LF2)

3.2.1. Description

Lithofacies 2 (LF2) consists of a fossil shell bed (Layer C), containing individual or paired *Mytilus edulis* valves, or fragments thereof, in no particular or preferential orientation. The matrix of Layer C consists of poorly sorted silty-clay and poorly sorted sand along with subrounded, polished and faceted clasts (Fig. 5). Mud in this layer has a mean grain size of 5 μm .

The shell bed is enclosed between upper and lower beds of massive silty-clay (LF1). Also, Layer C is underlain by, and has a sharp contact with, a thin sand bed (Layer B). ¹⁴C dating of shell samples in this thanatocoenosis bed resulted in ages of 7990 ± 110 (UL-2800) and 7940 ± 110 BP (UL-2801).

3.2.2. Interpretation

These shells are found very close to each other and in no particular order, suggesting transport and deposition by a submarine mass movement. The shells seem to have been transported by a turbidity current that eroded the lower bed and deposited the shells above it. Then, the shell bed was buried by suspension settling that continued after the turbidity current event which trapped it.

3.3. Lithofacies 3. Sand and gravel (LF3)

3.3.1. Description

Lithofacies 3 (LF3) is found at two locations within the core: from the surface to ~ 20-60 mm deep (Layer E) and between ~ 13 and 15.5 cm deep (Layer B) (Fig. 4). LF3 consists chiefly of sand and gravel, but also contains silt and clay fractions. Layer E sand and gravel is poorly sorted and has a mean grain size of 350 μm . It contains schist clasts at its surface and traces of organic matter within the entire layer. Layer B consists of medium and well sorted sand containing 50 mm x 30 mm subangular to subrounded polished clasts (Fig. 6). This sand layer covers the lower massive mud with a sharp contact.

Layer E forms a biofacies, in which different species composing the *Macoma balthica* community, and evidence of their bioturbation activity, can be observed in 3D using the new *Siemens* CT-Scan (Fig. 7).

3.3.2. Interpretation

The thickness and sorting of this bed depends on the exposure of this site to currents (the greater the erosion, the thinner the bioturbated layer). The concentration of schists and subrounded clasts at the core surface is attributed to an erosion event which formed a lag deposit. Sub-rounded clasts of glacial origin were observed (Fig. 6); these were released in the water column by floating sea ice that remobilized glaciogenic deposits during a high RSL.

The high porosity and poor compaction of this lithofacies allows the establishment of a *Macoma balthica* community, composed of the molluscs *Macoma balthica* and *Mya arenaria* (Fig. 7) as well as the polychaete worm *Nereis virens*. This community plays an important role in sediment reworking and bioirrigation (Mermillod-Blondin et al., 2003).

3.4 Percent space occupation

Figure 8 represents, for core G3, the percentage of volumetric space occupied by either living organisms, or empty spaces within the sediment (such as biogenic structures, or voids between fossil valves), according to depth. Two peaks can be distinguished: a peak of 18% spatial occupation is found in the surface layer (Layer E), and corresponds to the modern biofacies. The second peak (27%) is found at about 12 cm depth (Layer C), and corresponds to the fossil shell bed, where there were several empty spaces between intact or broken valves.

4. Conclusions

From the present data, an interpretation of the various events leading to the accumulation of the sediment layers, and the establishment of the biological community observed in the present sediment cores, can be made. Taken together, the data suggest a sequence of events, over a glacial cycle, which resulted in the lithofacies organisation revealed here using a non-destructive observational technique.

The results of this study reveal an environment exposed to high sedimentation rates by suspension settling through the water column and turbidity currents during the Goldthwait Sea episode. This sedimentation covered a shell bed, showing no particular organisation, that was previously deposited during a submarine mass movement. In the massive silty-clay and shell beds, outsized clasts of a glacial origin indicate sea ice transport and deposition. The two radiocarbon dates of 7990 ± 110 (UL-2800) and 7940 ± 110 BP (UL-2801) obtained from shells sampled in the thanatocoenosis bed (lithofacies 2), where such clasts were observed by CT-Scan, suggest that these processes were still occurring at 8000 years BP. These dates also indicate that a submarine mass movement event occurred about 8000 years ago, when the RSL was 20-30 m higher than today. This submarine landslide likely occurred along the high slope gradient of the bedrock hill that is adjacent to these deposits; no deltaic deposits occur near the site. During this period, glacial ice had already retreated far inland. The sediments analysed here are interpreted as deposited in a paraglacial system (Church and Ryder, 1972; Syvitski and Praeg, 1989), in which suspension settling and gravity flows were the main sedimentary processes.

Axial tomodesimetry presents many advantages when compared to the conventional X-radiography method. The scanned images show a higher resolution of density values, which allows a better observation of elements such as sedimentary

structures. Their digital format allows observers to simultaneously view elements sharing a same density value, in three dimensions, from any point in space. Available software can produce TI diagrams that help to distinguish different beds and laminations in the sediments within a core sample. CT-Scan can also 'section' the core into very closely spaced transverse profiles, adding a greater precision of the data compared to the conventional X-radiography. The method developed for quantifying the percentage of space occupied by modern benthic organisms could potentially be used to determine the volume occupied by ice-rafted debris, sedimentary structures, fossils, etc. within cores.

Acknowledgements

This study was partly funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) through Discovery grants to P. Lajeunesse and G. Desrosiers. The authors would like to thank Marlène Dionne and other people at the Parc National du Bic for sampling permits. B. Long received a Canadian Foundation for Innovation (CFI) grant to develop the Multidisciplinary Scanographic Laboratory in Quebec City.

References

Church, M., Ryder, J.N., 1972. Paraglacial sedimentation: a consideration of fluvial processes conditioned by glaciation. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 83, 3059-3072.

Crémer, J-F., Long, B., Desrosiers, G., de Montety, L., Locat, J., 2002. Application de la scanographie à l'étude de la densité des sédiments et à la caractérisation des structures sédimentaires: exemple des sédiments déposés dans la rivière Saguenay (Québec, Canada) après la crue de juillet 1996. *Can. Geotech. J.* 39, 440-450.

De Montety, L., Long, B., Desrosiers, G., Crémer, J-F., Locat, J., Stora, G., 2003. Utilisation de la scanographie pour l'étude des sédiments: influence des paramètres physiques, chimiques et biologiques sur la mesure des intensités tomographiques. *Can. J. Earth Sci.* 40, 937-948.

Desrosiers, G., Brêthes, J-C., 1984. Étude de la communauté à *Macoma balthica* de la batture de Rimouski. *Sci. Tech. Eau* 17, 25-30.

Dionne, J-C., 1977. La mer de Goldthwait au Québec. *Geogr. Phys. Quat.* 31, 61-80.

Dionne, J.-C., 2001. Relative sea-level changes in the St.Lawrence estuary from deglaciation to present day. *Geol. Soc. Am. Sp. Pap.* 351, 271-284.

Dufour, S.C., Desrosiers, G., Long, B., Lajeunesse, P., Gagnoud, M., Labrie, J., Archambault, P., Stora, G., Submitted. A new method for three-dimensional visualisation and quantification of biogenic structures in aquatic sediments using axial tomodesitometry. *Limnol. Oceanogr.: Methods*.

Dyke, A. and Prest, V.K., 1987. Late Wisconsinan and Holocene history of the Laurentide Ice Sheet. *Geogr. Phys. Quat.* 41, 237-263.

Héту, B., 1998. La déglaciation de la région de Rimouski, Bas-Saint-Laurent (Québec): indices d'une récurrence glaciaire dans la Mer de Goldthwait entre 12 400 et 12 000 BP. *Geogr. Phys. Quat.* 52, 325-347.

Locat, J., 1977. L'émersion des terres dans la region de Baie-des-Sables/Trois-Pistoles, Québec. *Geogr. Phys. Quat.* 31, 297-306.

Mermillod-Blondin, F., Marie, S., Desrosiers, G., Long, B., de Montety, L., Michaud, E., Stora, G., 2003. Assessment of the spatial variability of intertidal benthic communities by axial tomodesitometry: importance of fine-scale heterogeneity. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 287, 193-208.

Michaud, E., Desrosiers, G., Long, B., de Montety, L., Crémer, J-F., Pelletier, E., Locat, J., Gilbert, F., Stora, G., 2003. Use of axial tomography to follow temporal changes of benthic communities in an unstable sedimentary environment (Baie des Ha! Ha!, Saguenay Fjord). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 285-286, 265-282.

Syvitski, J.P.M., Praeg, D., 1989. Quaternary sedimentation in the Saint-Laurent estuary and adjoining areas, eastern Canada: an overview based on high resolution seismic stratigraphy. *Geogr. Phys. Quat.* 43, 291-310.

Figure Legends

Fig. 1. Location of the Bic National Park, Quebec (Canada).

Fig. 2. Curve depicting the number of pixels according to tomographic intensity values for a transverse section of a sediment core. A theoretical Gaussian curve (calculated using Matlab) is superimposed to the original curve.

Fig. 3. A. Two-dimensional, longitudinal tomogram taken through the center of the core G3, showing different sedimentary facies. **B:** Graph of tomographic intensity values according to the depth along the vertical line shown in 3A.

Fig. 4. Log of core G3 and grain size distribution for layers A to E. Layer A: coastal massive muddy sand, badly sorted; Layer B: postglacial marine silty-clay sediments, very well sorted; Layer C: postglacial marine silty-clay sediments, fairly sorted; Layer D: sand, badly sorted; Layer E: postglacial marine silty-clay sediments well sorted.

Fig. 5. CT-scan representation of a thanatocoenosis shell bed (Layer C). Fragments of *Mytilus edulis* shells, and some sub-rounded stones are visible (pointed by arrow). Scale bar: 2 cm.

Fig. 6. CT-scan representation of sub-rounded stones of glacial origin (Layer B). Scale bar: 2 cm.

Fig. 7. CT-scan representation of the bioturbated layer (Layer E). Small (*Macoma balthica*) and larger (*Mya arenaria*) molluscs are visible, as well as Y-shaped galleries built by the worm *Nereis virens*. Scale bar: 2 cm.

Fig. 8. Percentage space occupied by living organisms and empty spaces within the sediments (i.e. biogenic structures, spaces between fossil shell valves) according to depth, for core G3.

Figure 1.

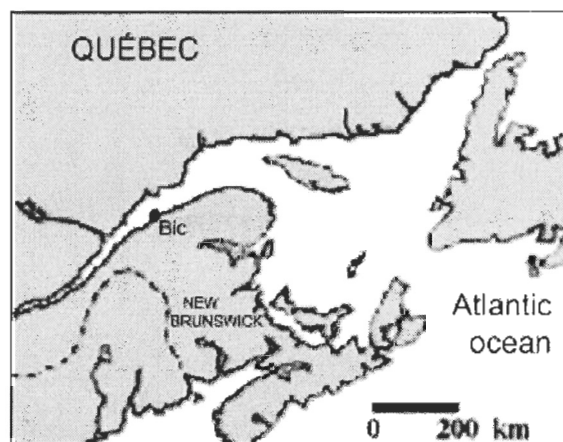


Figure 2.

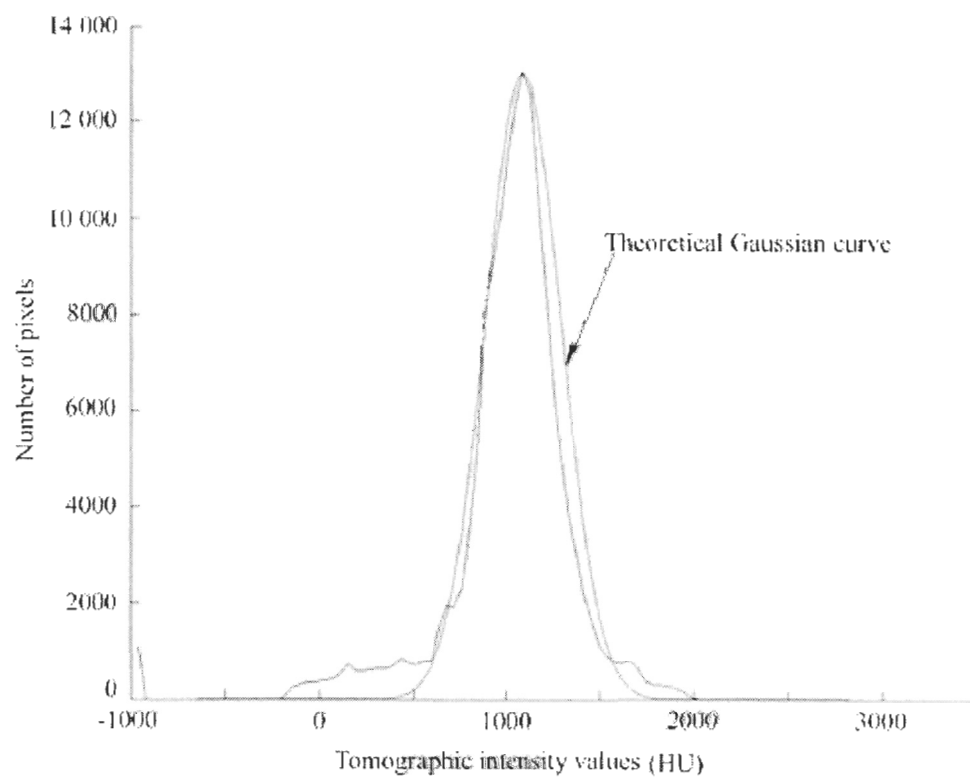


Figure 3.

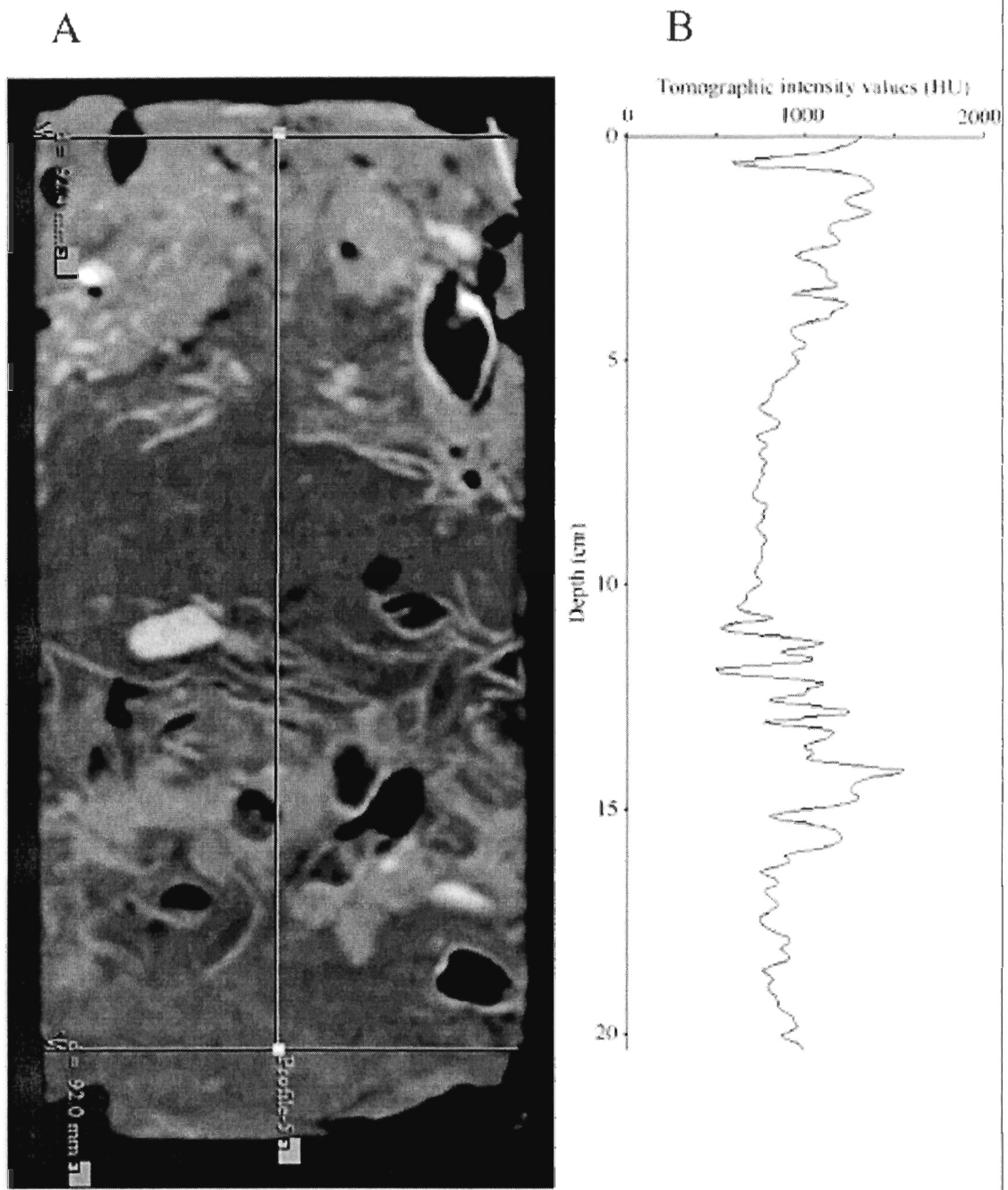


Figure 4.

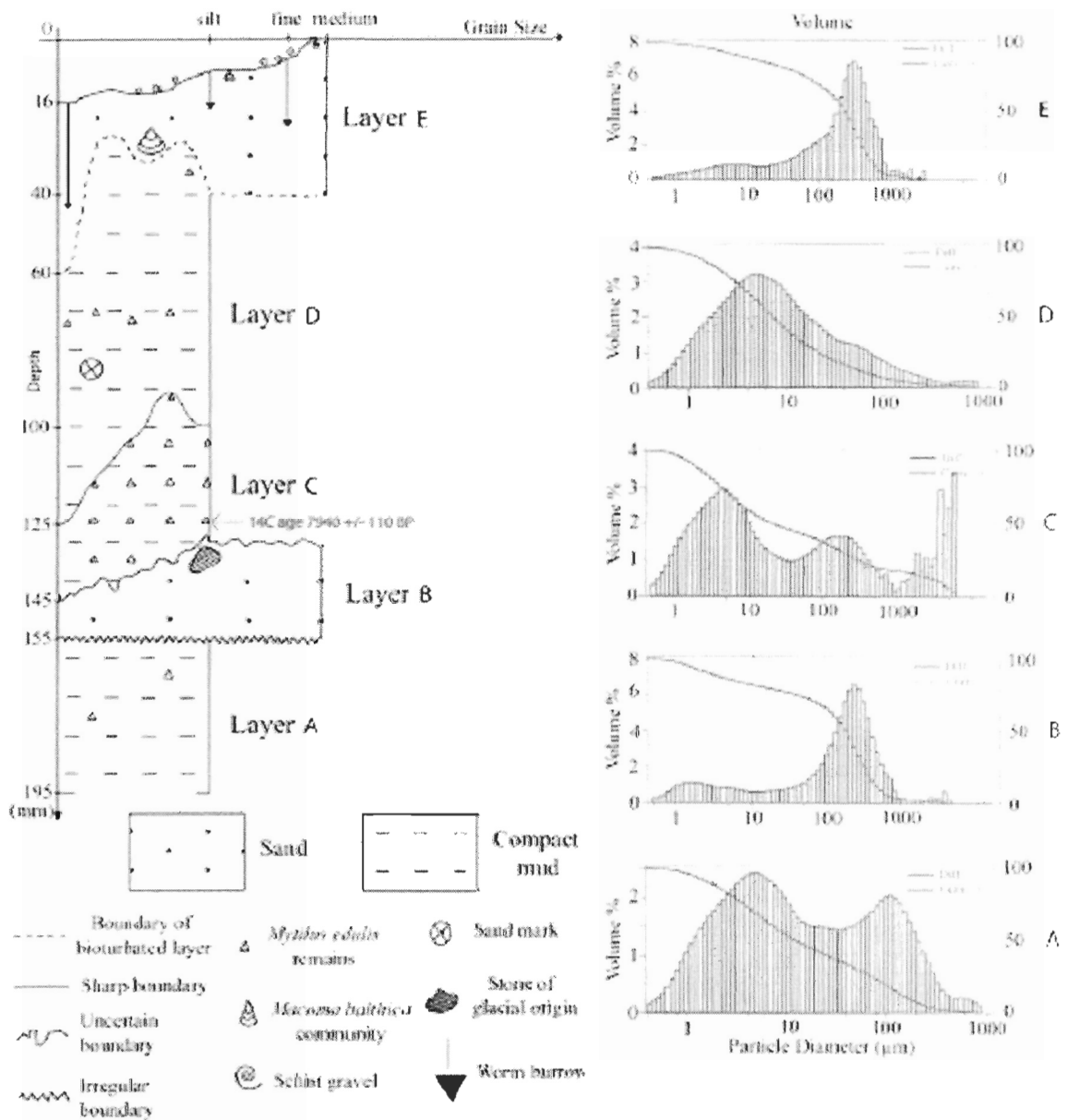


Figure 5.

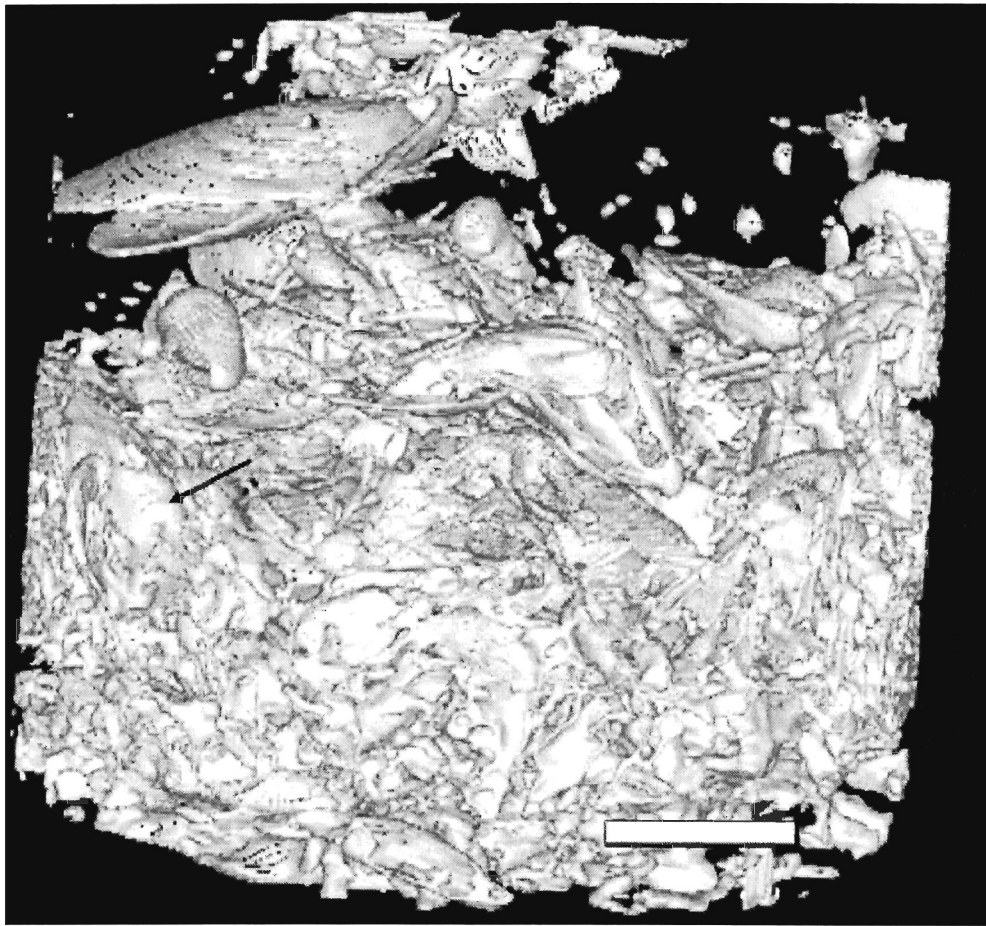


Figure 6.

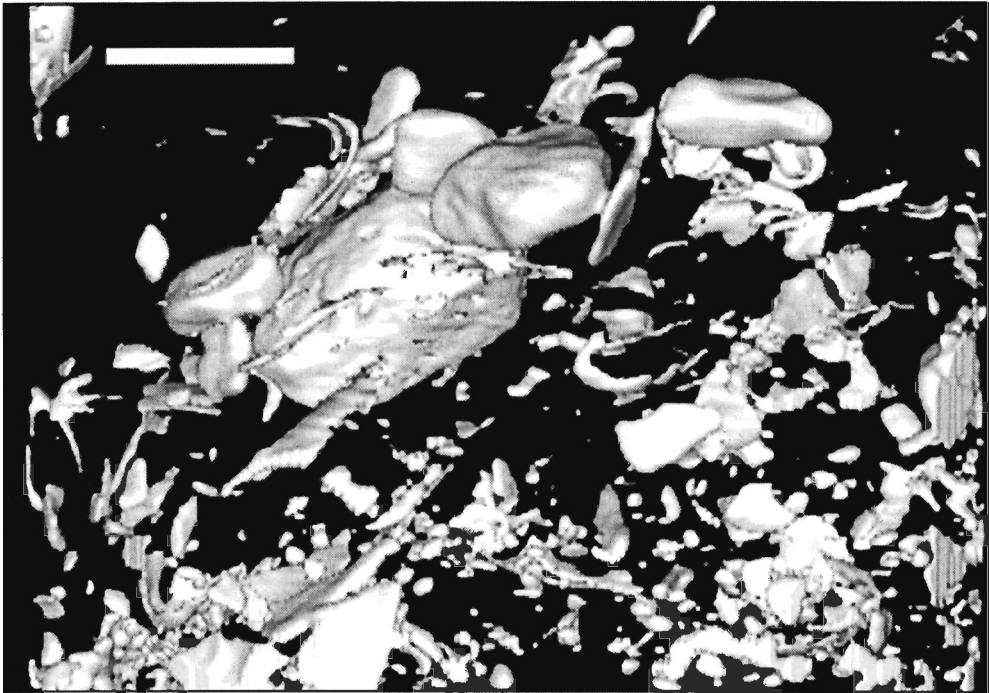


Figure 7.

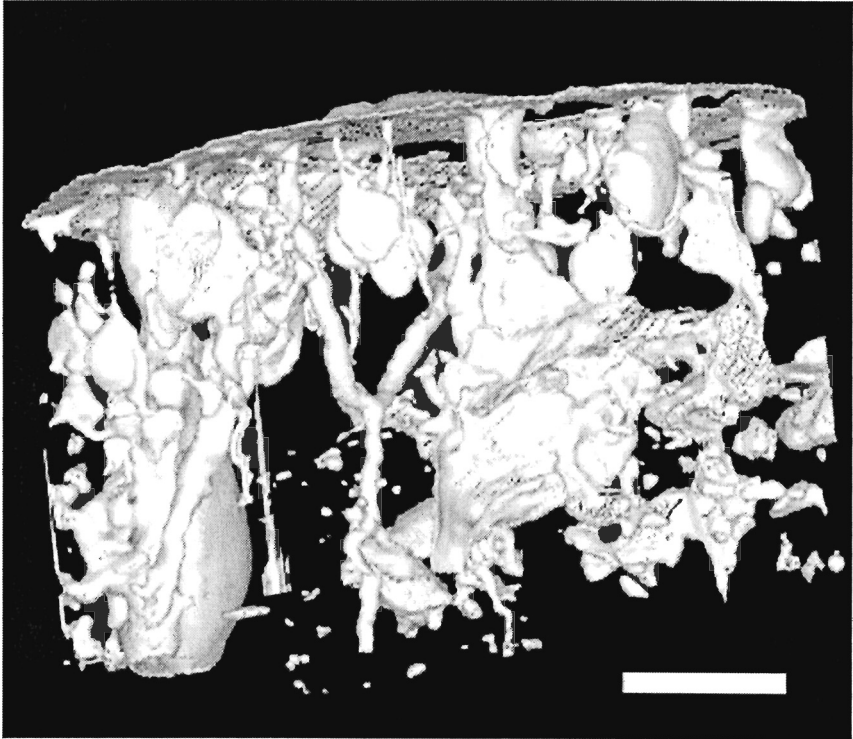
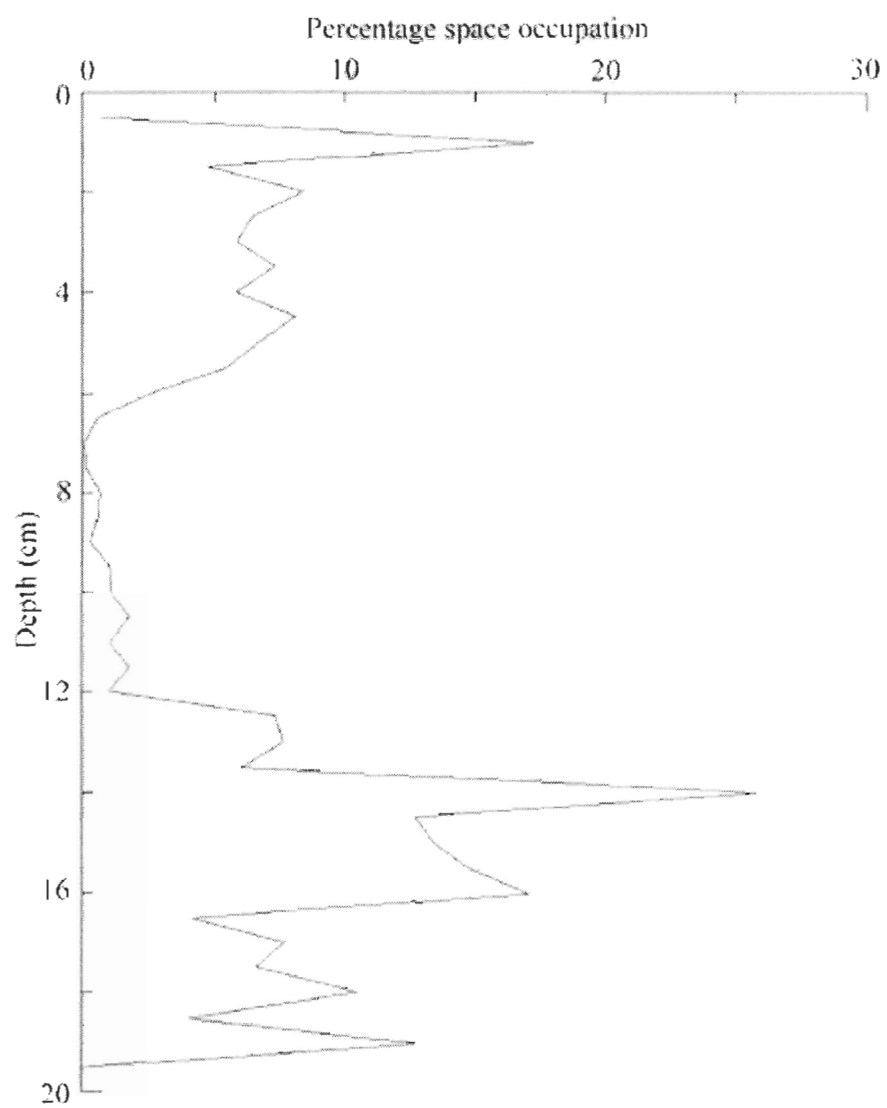
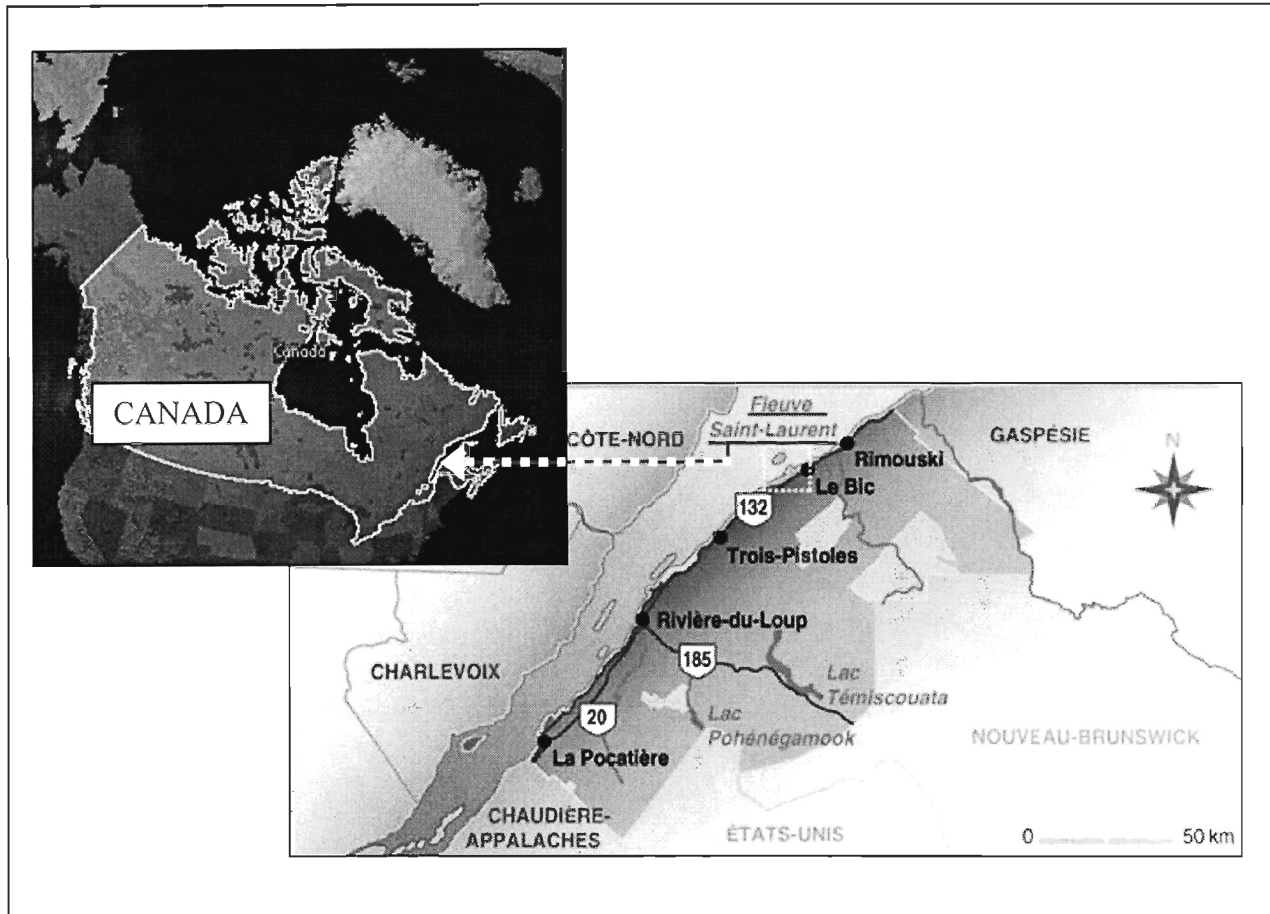
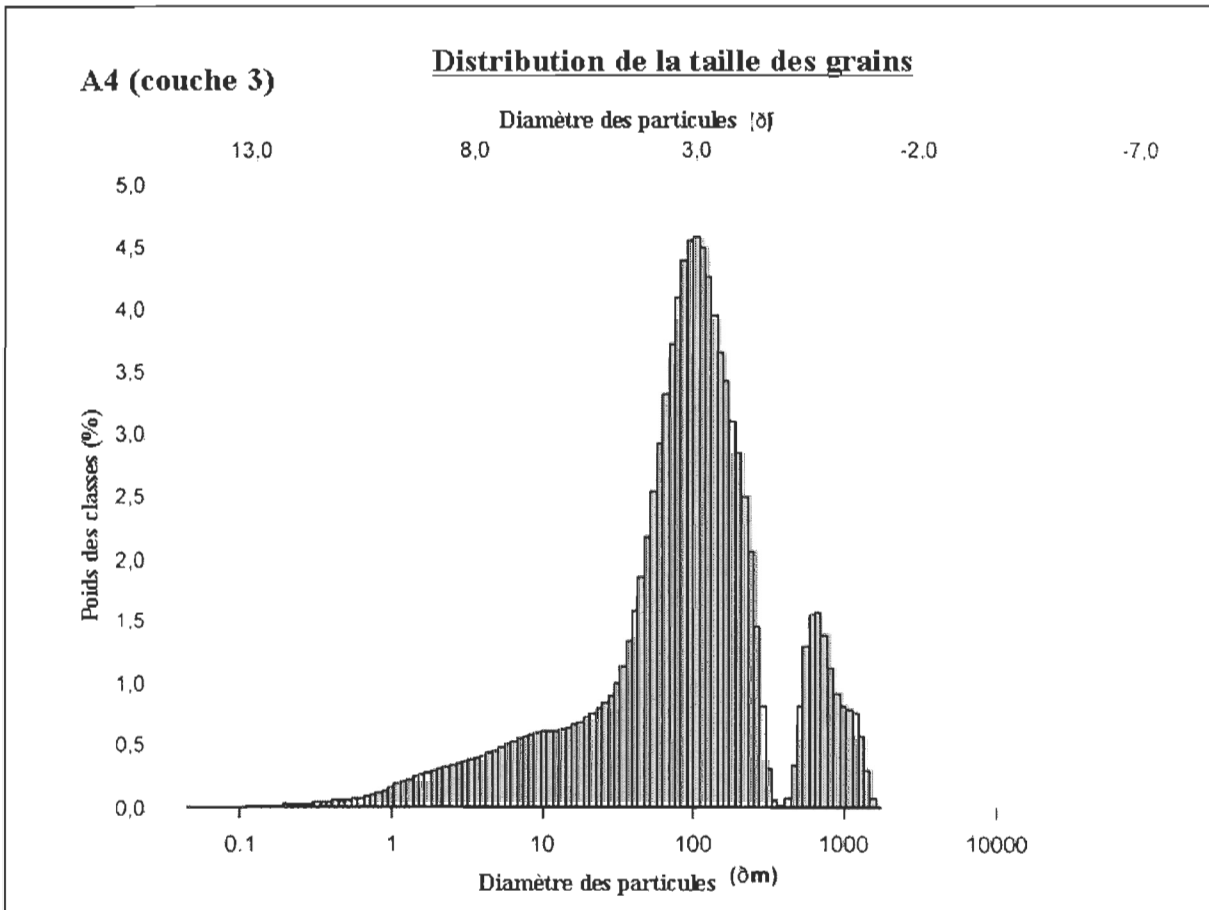


Figure 8.

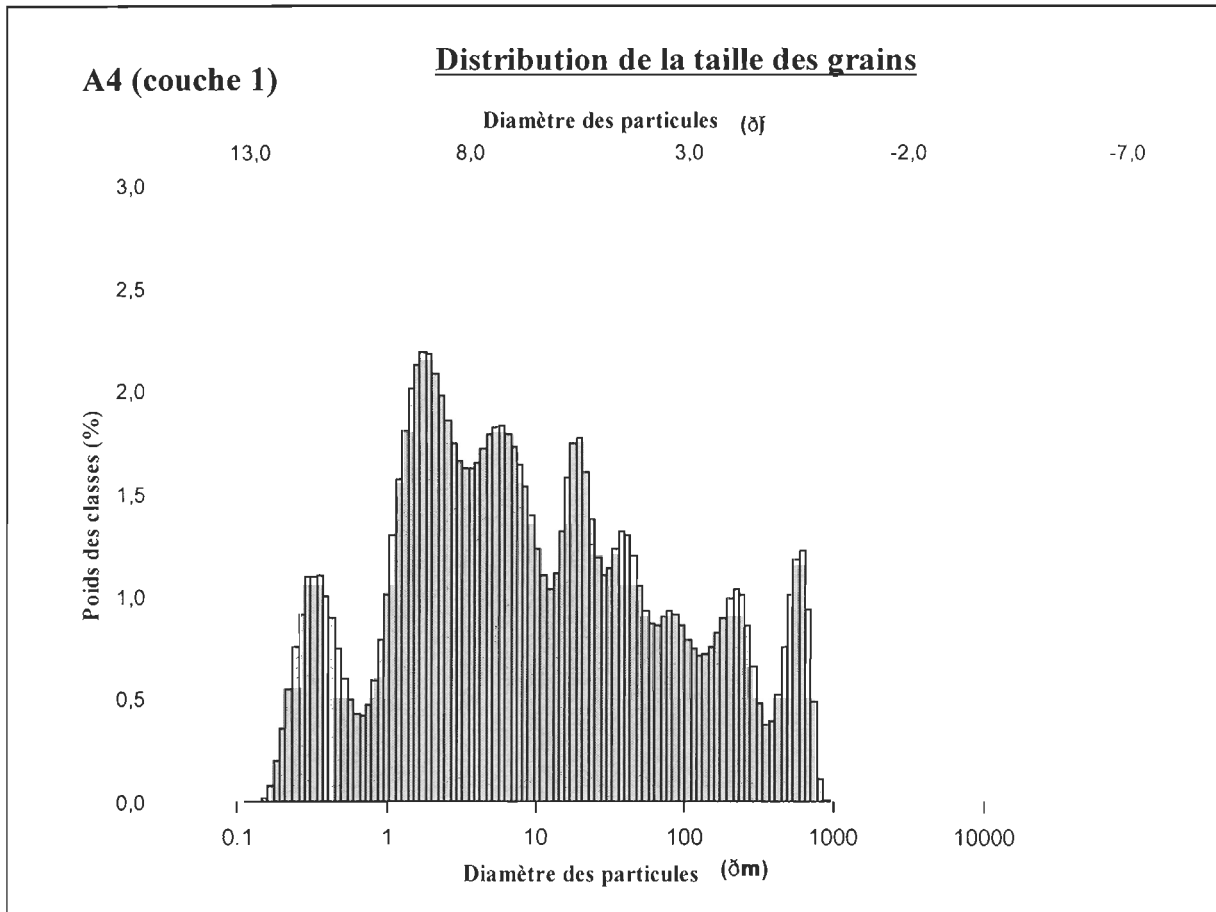




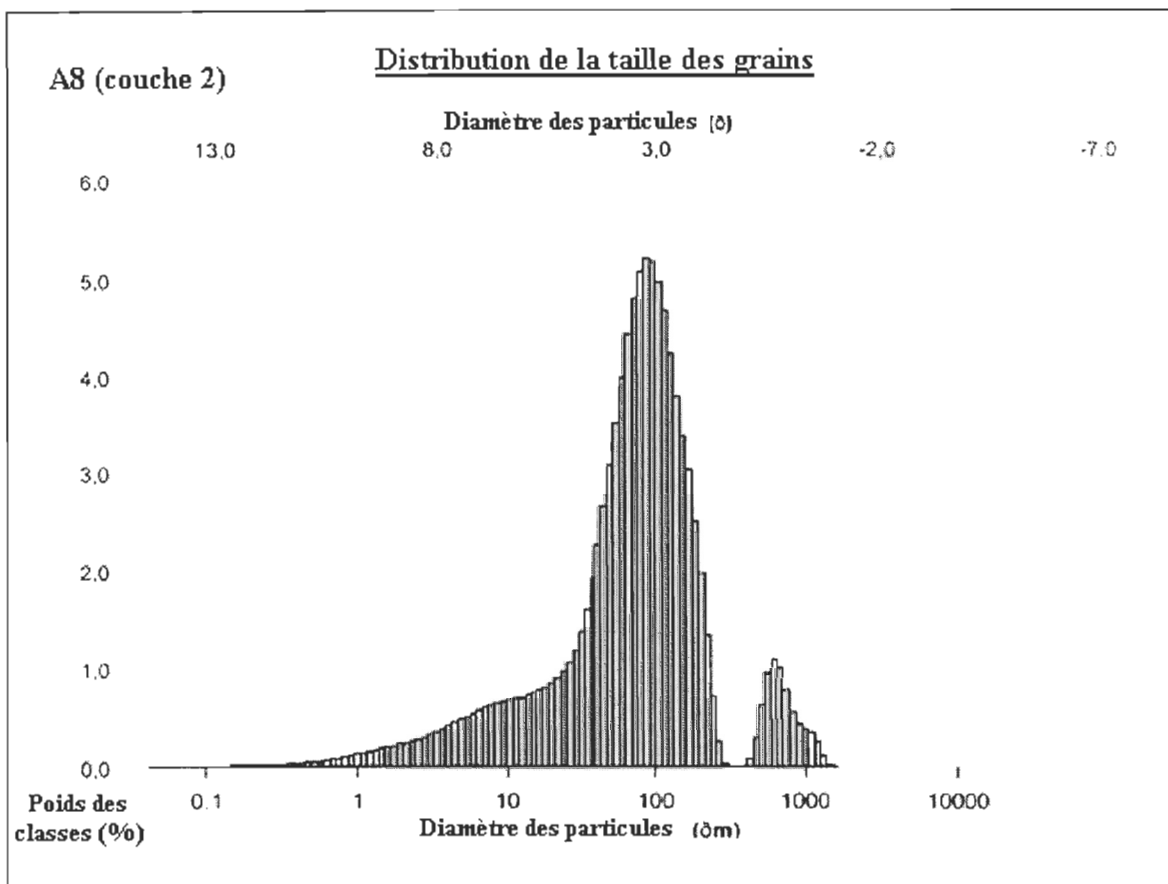
Annexe 3. Localisation du Parc National du Bic (Amérique du Nord)



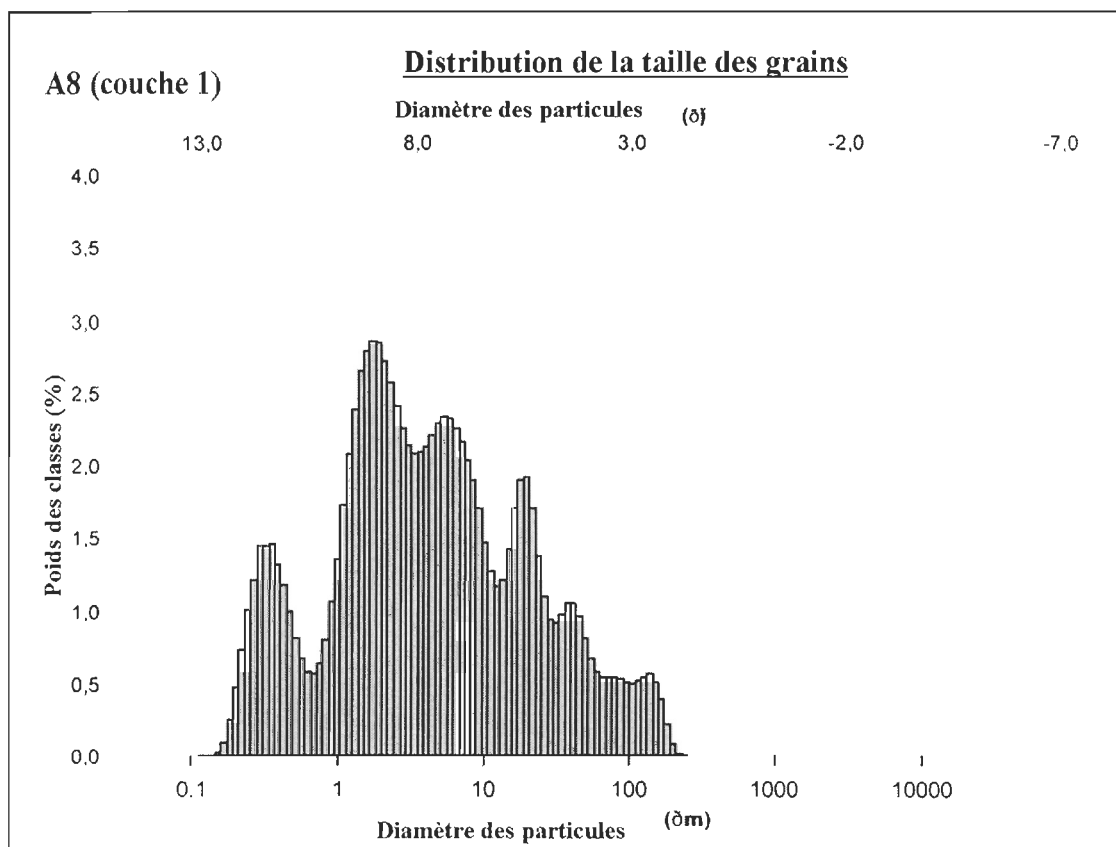
Annexe 4. Données granulométriques au *Coulter counter*, sable vaseux en surface (couche 3, carotte A4)



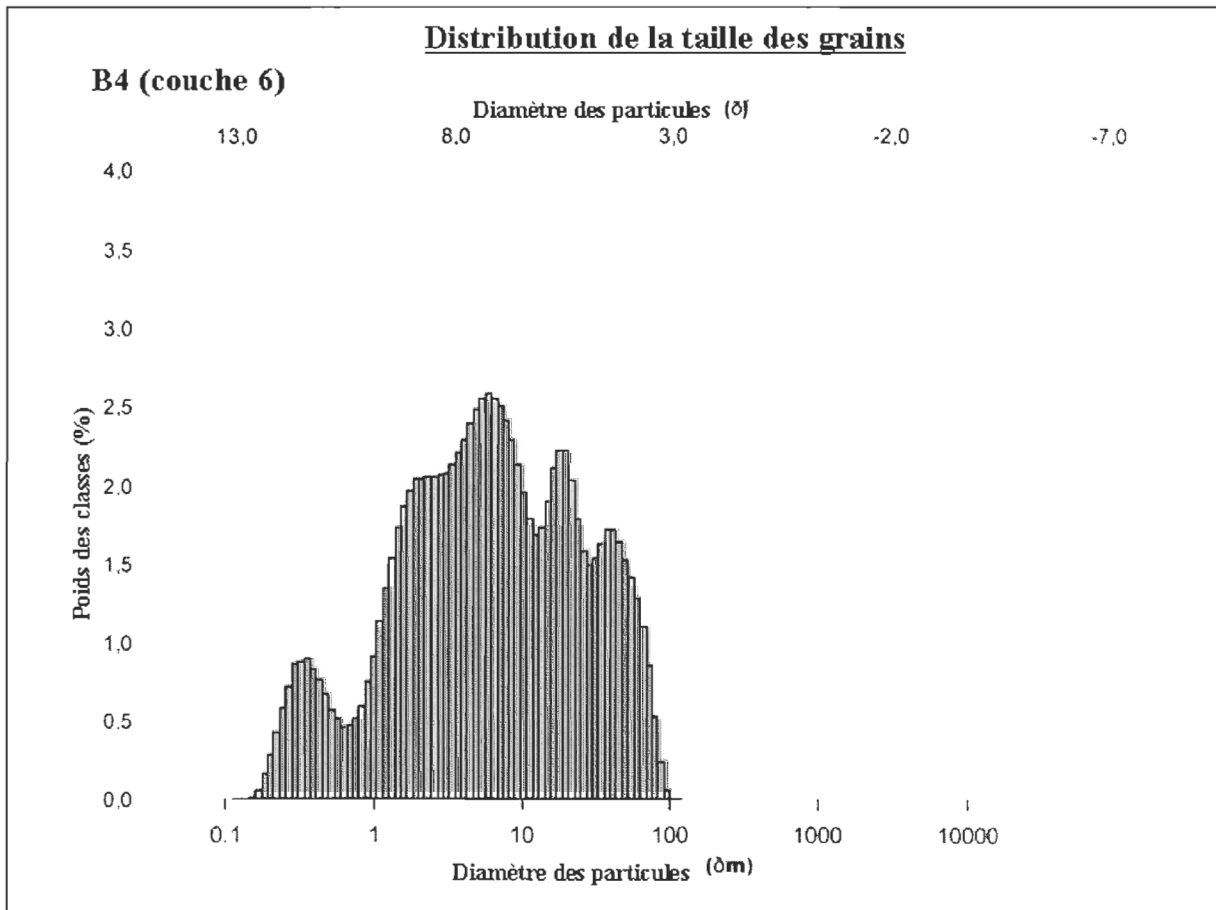
Annexe 5. Données granulométriques au *Coulter counter*, couche argileuse (couche 1, carotte A4)



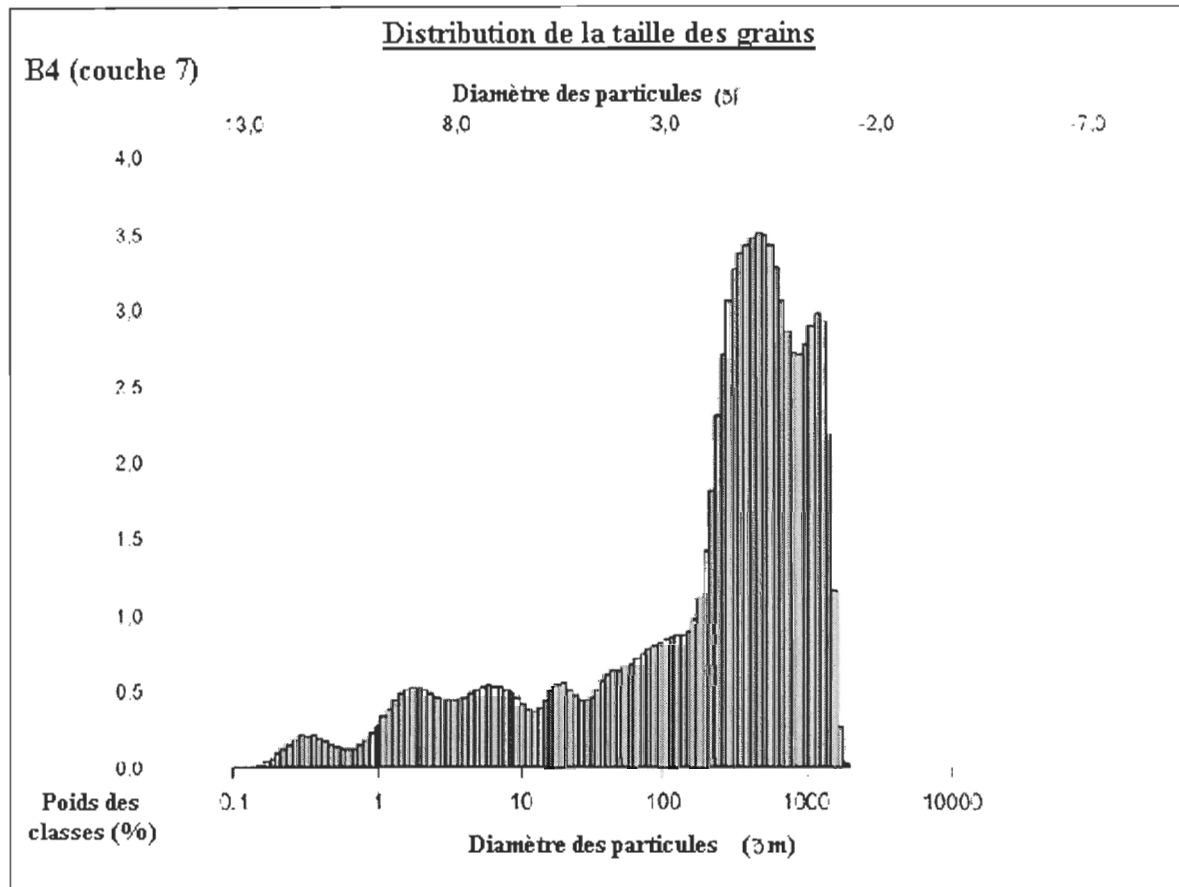
Annexe 6. Données granulométriques au *Coulter counter*, (couche 2 de la carotte A8)



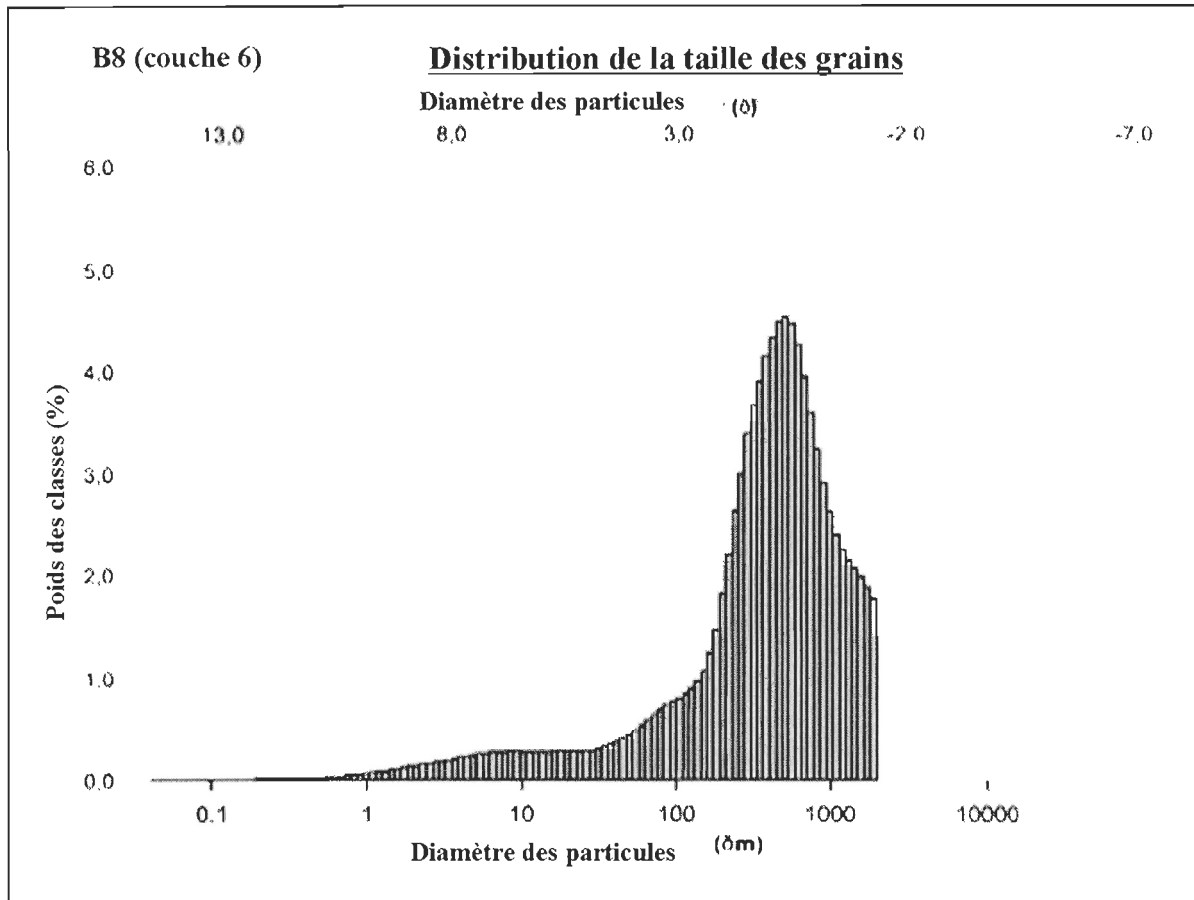
Annexe 7. Données granulométriques au *Coulter counter*, (couche 1 de la carotte A8)



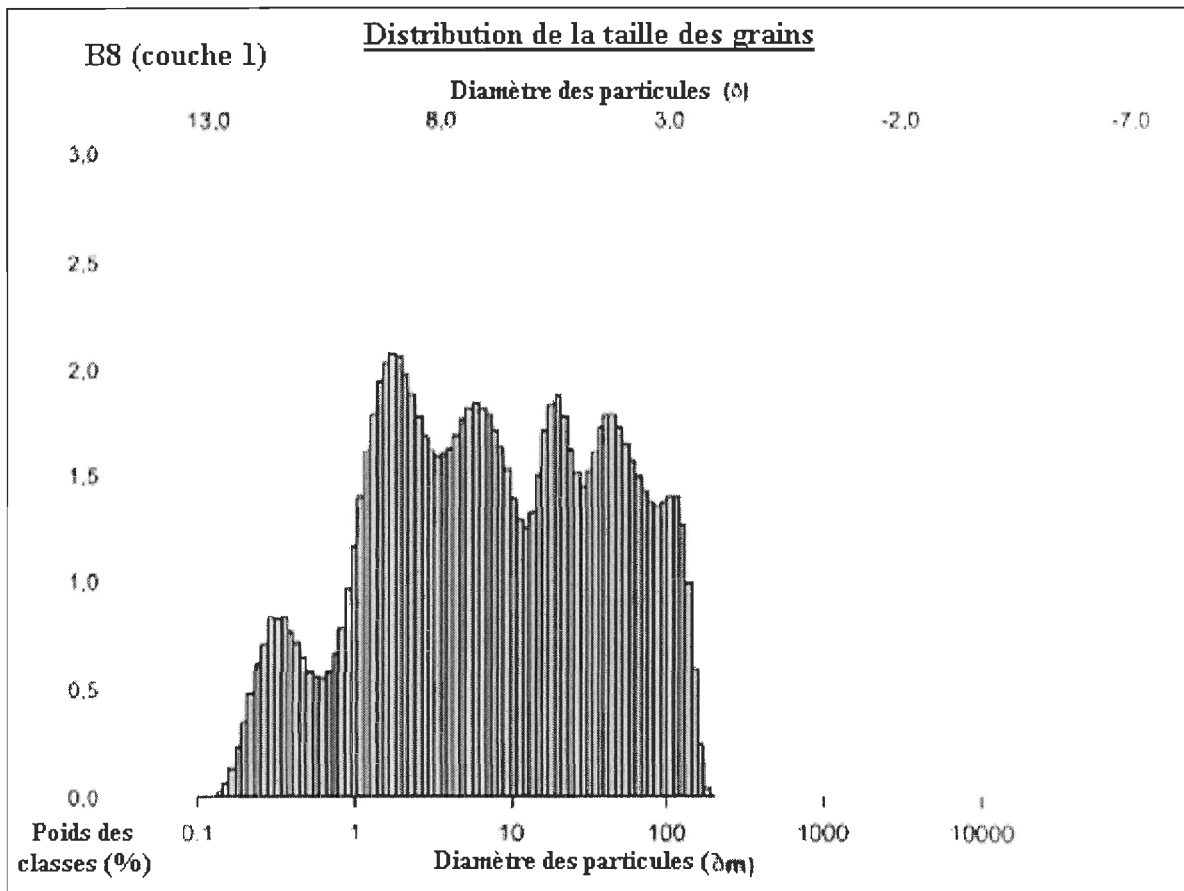
Annexe 8. Données granulométriques au *Coulter counter*, début de l'argile (couche 6, carotte B4)



Annexe 9. Données granulométriques au Coulter counter, sable vaseux en surface (couche 7, carotte B4)



Annexe 10. Données granulométriques au *Coulter counter* début de l'argile (couche 6, carotte B8)



Annexe 11. Données granulométriques au *Coulter counter*, début couche argileuse (couche 1, carotte B8)