

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

Jean-François Crémer, Bernard Long, Gaston Desrosiers, Laure de Montety, et Jacques Locat

Résumé : Suite aux crues de juillet 1996, une importante quantité de sédiment provenant des bassins versants contigus au fjord Saguenay s'est déversée dans la baie des Ha! Ha! et dans le bras nord. Afin de caractériser le mode de mise en place et le potentiel de remobilisation de ces dépôts, une série de carottes a été prélevée, dans le fjord, à l'aide d'un carottier-boîte et d'un carottier à gravité durant l'été 1997 et 1998. Ces carottes ont été analysées à l'aide du tomodynamomètre axial du Centre Hospitalier Régional de Rimouski. L'utilisation du scanographe (ou tomodynamomètre) permet une évaluation qualitative et quantitative de la densité des sédiments, de leur mode de mise en place et de leur état de compaction. Les 45 cm supérieurs des dépôts représentent, dans la couche nouvellement déposée, plusieurs types de faciès caractéristiques d'un mode de dépôt gravitaire. La base de cette couche repose en discordance érosionnelle sur des dépôts plus anciens de même type. Un an après la crue, aucune structure superficielle de remaniement n'a pu être décelée dans la partie sommitale des carottes. Néanmoins, des carottes prélevées en été 1998 montrent un remaniement important des sédiments de surface en relation directe avec la bioturbation. Aucun remaniement d'origine hydrodynamique n'a été observé.

Mots clés : scanographie, crue, turbidites, structures sédimentaires, compaction, bioturbation.

Abstract: Following the flood of July 1996, a significant quantity of sediment, coming from the catchment areas contiguous to the Saguenay fjord, was discharged in the Baie des Ha! Ha! and the North Arm. To characterize the mode of deposit and the potential for remobilization of these deposits, a series of cores was taken in the fjord using a box corer and a gravity corer during the summers of 1997 and 1998. These cores have been analyzed by the axial tomodynamometer at the Regional Hospital Center of Rimouski. The use of the tomodynamometer in geology allows a nondestructive study of the sample and a qualitative and quantitative evaluation of the density of the sediments, their mode of deposition, and their compaction. The study of the upper 45 cm of sediments shows the presence, in the uppermost layer, of several facies type characteristics of a gravity deposit. This layer rests on an erosional unconformity cut into the surface of the older deposits, themselves of gravity type. One year after the flood, no trace of reworking could be detected in the upper part of the cores. Nevertheless, cores taken in the summer of 1998 show a significant reworking of the superficial sediments in direct relation with bioturbation. No reworking of hydrodynamic origin was observed.

Key words: scanography, flood, turbidity currents, sedimentary structures, compaction, bioturbation.

Reçu le 21 mars 2001. Accepté le 13 septembre 2001. Publié au site Web des Presses scientifiques du CNRC à <http://rcg.cnrc.ca>, le 11 mars 2002.

J.-F. Crémer¹ et B. Long. Institut national de la recherche scientifique (INRS)-Géoressources, bur. 840, 880, chemin Sainte-Foy, Québec QC G1S 2L2, Canada.

G. Desrosiers et L. de Montety. Institut des Sciences de la Mer de Rimouski, 310, allée des Ursulines, Rimouski, QC G5L 3A1, Canada.

J. Locat. Département de Géologie et Génie Géologique, Université Laval, Sainte-Foy, QC G1K 7P4, Canada.

¹Auteur correspondant (courriel : JCREMER@NRCAN.GC.CA).

1. Introduction

Entre le 18 et le 20 juillet 1996, des pluies records se sont abattues dans la région du Saguenay (Yu et al. 1997). Ces précipitations ont provoqué des crues catastrophiques entraînant la rupture d'un barrage. Plus de 15 millions de tonnes de sédiment, provenant des bassins versants contigus au fjord du Saguenay, se sont déversés dans la baie des Ha! Ha! et dans le bras nord (partie amont du fjord du Saguenay) sous forme de courants de turbidité, recouvrant ainsi les anciens sédiments (Lapointe et al. 1998; Pelletier et al. 1999). L'épaisseur de la nouvelle couche varie entre 10 et 50 cm au centre de la Baie (Maurice et al. 2000). Cette étude a pour but de caractériser les mécanismes de mise en place de ces nouveaux sédiments,

en relation avec les structures sédimentaires présentes dans les carottes, leur potentiel de remobilisation et de déterminer les processus de consolidation de ceux-ci.

L'étude sédimentologique doit prendre en considération les structures sédimentaires telles que les laminations parallèles, obliques, entrecroisées ou le granoclasement des dépôts. En effet, ces dernières reflètent le mode de transport, les conditions de mise en place des sédiments, la direction et l'intensité des courants responsables de ces dépôts. De plus, l'analyse des structures sédimentaires secondaires, comme les traces de bioturbation, nous informent également sur le type de déposition du milieu et le taux relatif de sédimentation. Généralement, les figures retrouvées sont de type tridimensionnel. La connaissance de l'architecture interne de celles-ci permet de déterminer les différentes phases de la genèse de leur dépôt et de leur remobilisation postérieure. Or, l'étude sur le terrain ou sur des carottes n'offre qu'une vue en deux dimensions de ces structures. La scanographie axiale permet, quand à elle, de mettre en évidence les structures en trois dimensions et, de là, d'en déduire les processus sédimentaires. Elle permet également la détermination des différents faciès (tempestites, turbidites, ...) et des variations qualitatives et quantitatives de paramètres géotechniques telle que la compaction dans les sédiments ou les structures de déformation (Otani et al. 2000). Cette méthode est non destructive et permet de conserver intacts les échantillons pour d'autres types d'analyses (Holler et al. 1990; Wellington et al. 1987). La représentation des structures sédimentaires en trois dimensions, suivant des angles d'observations variés, permet de mieux caractériser les processus de dépôt associés à l'environnement sédimentaire étudié (Boespflug et al. 1995). Enfin, ce système possède une très bonne résolution spatiale et dispose également d'une excellente résolution en densité. Ainsi, des sédiments homogènes et massifs peuvent présenter des structures sédimentaires qui seront visibles grâce à leurs très faibles différences de densité dues à leurs variations du degré de compaction. Dans le cas présent, un intérêt particulier a été porté sur l'étude de la bioturbation et la recolonisation du site par la faune benthique dans les deux années suivant la crue. Cette dernière joue un rôle important dans l'accélération de la consolidation et la remobilisation des sédiments (Maurice et al. 2000; de Montety et al. 2000).

2. Site d'étude

Les carottes proviennent de la Baie des Ha! Ha! et du bras nord du Saguenay (fig. 1). Les campagnes d'échantillonnages ont été effectuées du 21 au 26 août 1997, soit 1 an après la crue, et durant l'été 1998. Les carottes ont été prélevées à la station 8 (par 149 m de profondeur) et à la station 17 (par 165 m de profondeur) à l'aide d'un carottier-boîte.

3. Principe de fonctionnement du scanographe et méthodologie

3.1 Scanographie

Même si les radiographies aux rayons X traditionnelles possèdent une très bonne résolution photographique, la scanographie offre une bien meilleure résolution en contraste de densité (4096 valeurs d'intensité tomographique correspon-

dant chacune à une variation de 0,1 % de la densité). Cette méthode permet de visualiser les structures sédimentaires dans toutes les directions de l'espace, alors que l'analyse RX traditionnelle est limitée à des plans de visualisation prédéfinis. Les données acquises par la scanographie nous permettent également de faire des corrélations quantitatives entre les valeurs d'intensité tomographique et la densité des sédiments. Les avantages de la scanographie sont décrits en détail dans Kenter (1989).

La technique, et la théorie du rayonnement X sont développés dans Hounsfield (1973) et Knoll (1989). L'appareillage (scanographe de la quatrième génération) a été décrit dans Boespflug et al. (1994). Cependant, les carottes étudiées dans ce travail ont été analysées à l'aide du nouveau tomodensitomètre axial de dernière génération, du Centre Hospitalier Régional de Rimouski (GE B7590K Hi-Speed Advantage 2.X). Cet appareil possède une meilleure résolution spatiale, soit 0,25 mm en coupe transversale et 0,5 mm en coupe longitudinale. L'épaisseur minimum des coupes est de 1 mm. Les échantillons sont placés sur le lit qui coulisse au centre d'une couronne formée par la source de rayon X et les détecteurs. Durant l'analyse, la carotte se déplace au centre de la couronne pendant que celle-ci effectue une rotation autour de l'échantillon toute les deux secondes. 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 (fig. 2).

La densité de l'échantillon est exprimée en terme d'intensité tomographique (IT) (Hounsfield 1973) :

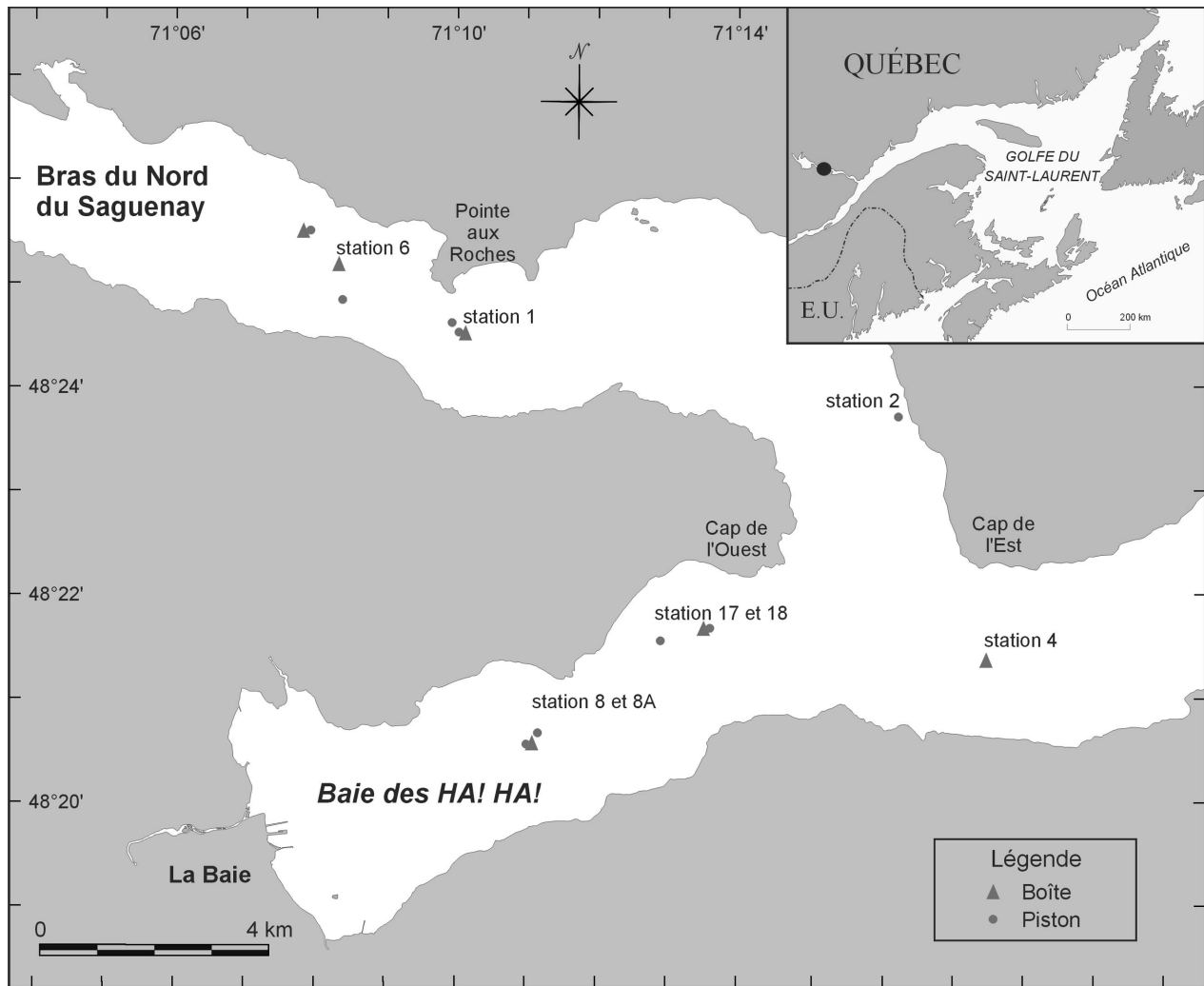
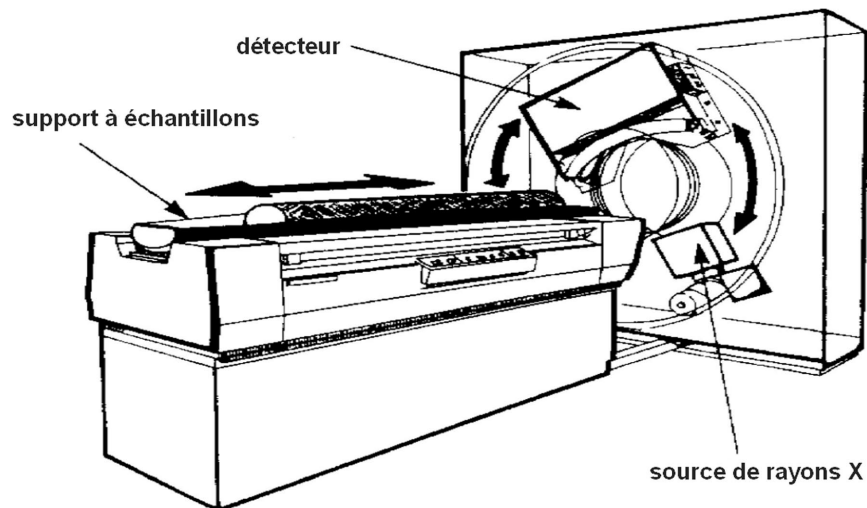
$$[1] \quad IT = \left(\frac{\mu}{\mu_{\text{eau}}} - 1 \right) \times 1000$$

Dans lequel IT représente l'intensité tomographique, μ le coefficient d'absorption linéaire de l'échantillon et μ_{eau} le coefficient d'absorption linéaire de l'eau. μ varie principalement en fonction de la densité de la matière et, dans une moindre mesure, en fonction de l'énergie du rayonnement et du numéro atomique des éléments composant l'échantillon traversé par le faisceau (Boespflug et al. 1994).

Les images sont enregistrées en format DICOM V3 (nouveau format standard utilisé en imagerie médicale). Elles peuvent, par la suite, subir une correction pour transformer ces unités en valeurs de densité. Les échantillons étudiés en géologie présentent des intensités tomographiques généralement comprises entre 500 et 3000, soit des densités vraies variant entre 1,5 et 4 Mg/m³. Les images tomographiques sont traitées à l'aide du logiciel OSIRIS (logiciel de visualisation et de traitement d'images médicales, Ligier et al. 1994). Celui-ci permet de visualiser et de manipuler les images tomographiques afin de mettre en évidence les structures sédimentaires, la géométrie des dépôts et les variations de densité.

3.2 Granulométrie

Des échantillons ont été prélevés dans les différents faciès afin de déterminer la taille des particules par analyse granulométrique au moyen d'un compteur de particules de type « laser coulter » modèle LS 100. Ces données permettent de corréler la granulométrie des sédiments et les intensités tomographiques correspondantes.

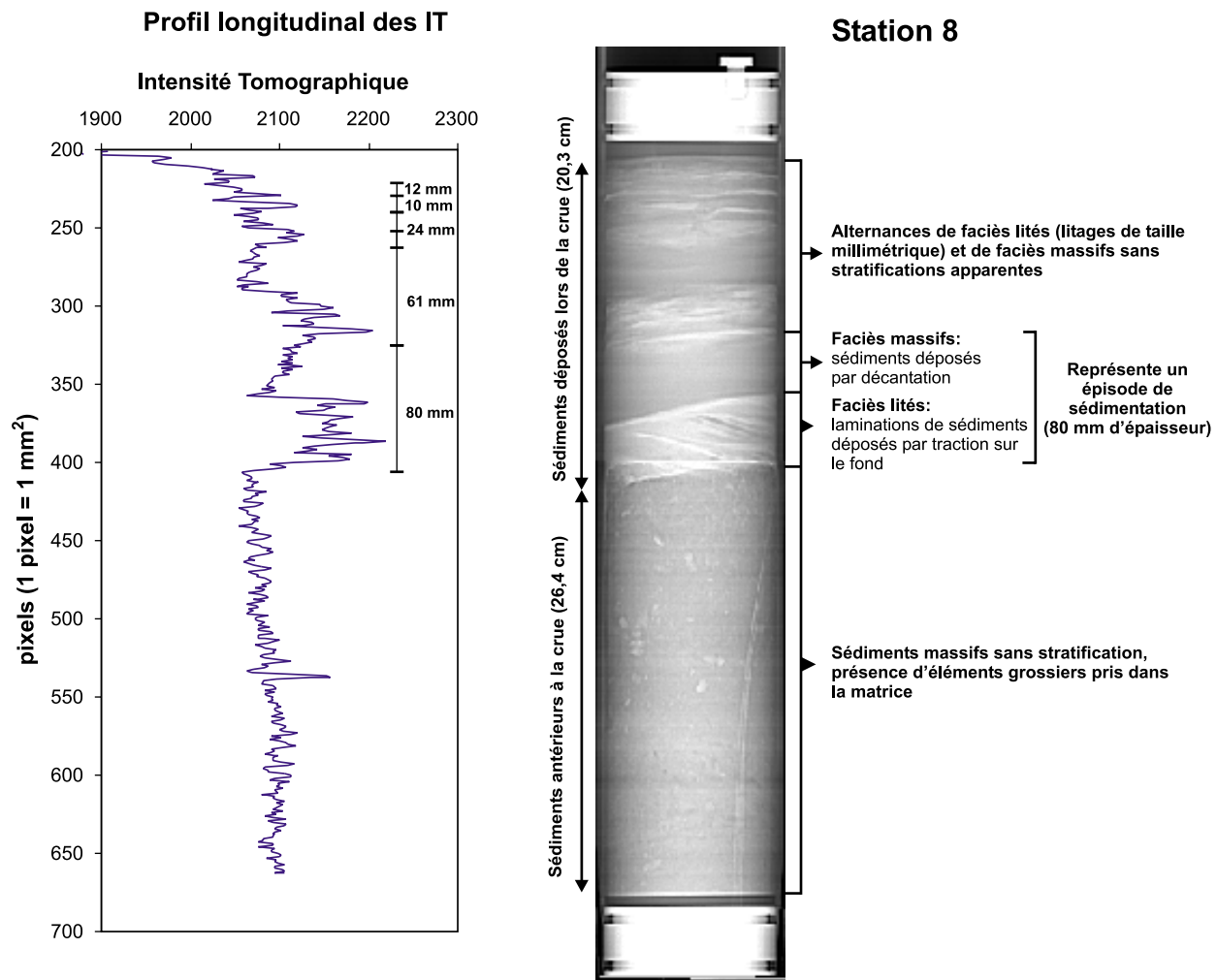
Fig. 1. Localisation des stations d'échantillonnages.**Fig. 2.** Schéma du dispositif d'après Boespflug et al. 1994.

3.3 Mesures de teneurs en eau et calculs des masses volumiques saturées

Les teneurs en eau ont été mesurées au laboratoire du Département de Géologie et Génie Géologique de l'Université

Laval. Elles ont été effectuées sur les sédiments provenant des carottes après leur passage au scanographe. La masse volumique saturée a été calculée à partir de la teneur en eau des échantillons :

Fig. 3. Coupe longitudinale dans une carotte prélevée 1 an après la crue et mettant en évidence les différents faciès caractéristiques d'une mise en place de type gravitaire. Cette distinction entre les différents faciès est nettement visible sur le profil des variations d'intensités tomographiques. La diminution des épaisseurs de chaque épisode de sédimentation vers le sommet de la carotte est également mise en évidence.



$$[2] \quad \rho_{\text{sat}} = \frac{\rho_s(1 + W)}{1 + e}$$

où ρ_{sat} est la masse volumique saturée (Mg/m^3), ρ_s la masse volumique des grains solides (Mg/m^3), W la teneur en eau (%) et e l'indice des vides. L'indice des vides e est exprimé par l'équation suivante :

$$[3] \quad e = \frac{WG}{Sr}$$

où G est la densité relative des grains solides et Sr est le degré de saturation (%). Une valeur moyenne de $2,7 \text{ Mg/m}^3$ a été définie pour ρ_s et $2,7$ pour G . Le sédiment est considéré comme saturé en eau ($Sr = 100 \%$).

4. Résultats et discussion

4.1 Caractérisation et interprétation des faciès

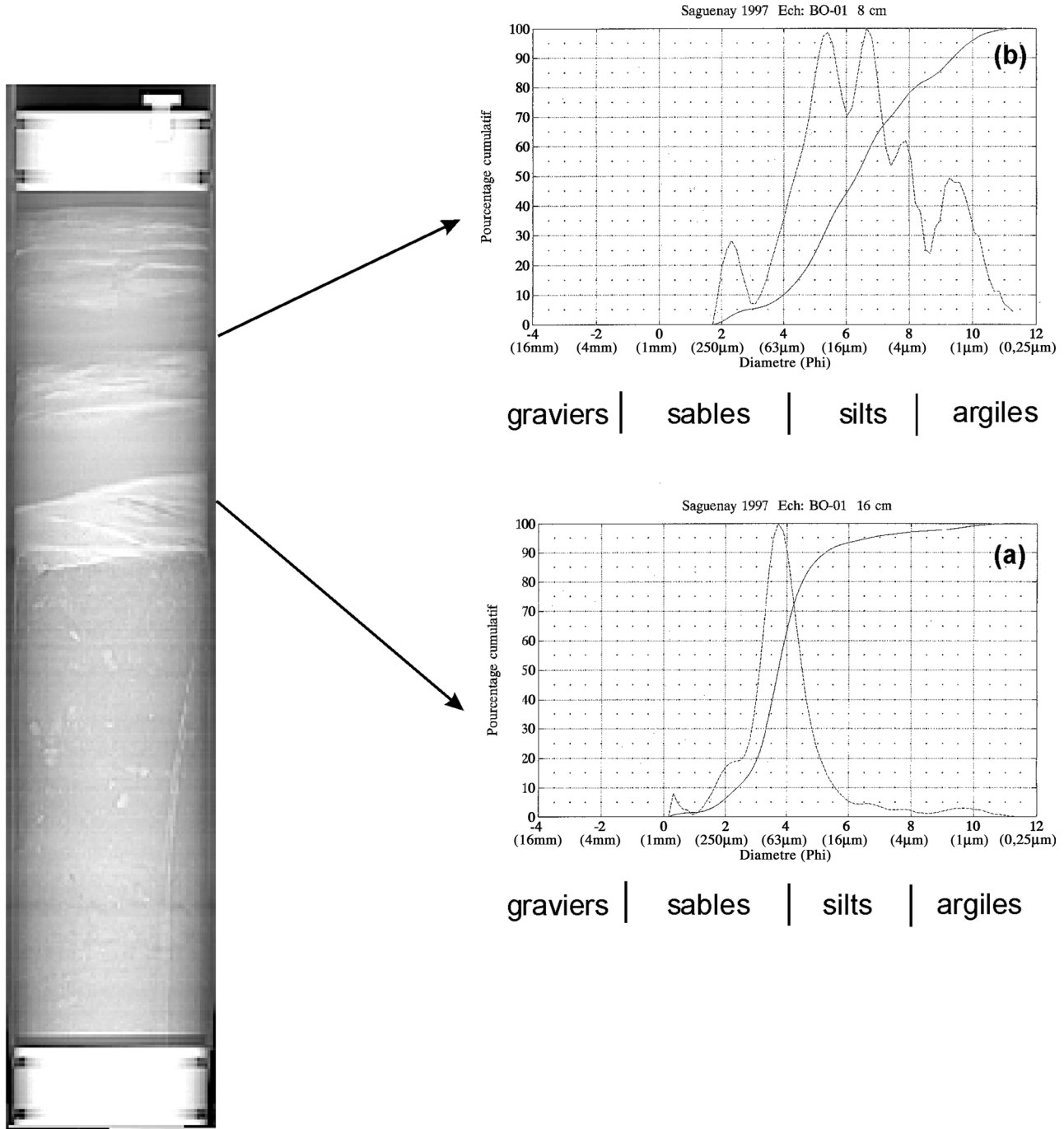
Les sédiments déposés lors de la crue sont divisés en plusieurs épisodes de dépôt (fig. 3). Ceux-ci sont surtout visibles dans les carottes prélevées dans la baie des Ha! Ha!

Chaque épisode de dépôt débute à la base par de fines laminations obliques et entrecroisées de taille millimétrique. Les fines laminations basales sont de densité plus élevée que le reste des sédiments. Elles se distinguent par une série de pics bien visibles dans les profils des intensités tomographiques (IT moyen de 2160) et sont composées de sable très fin et bien trié (fig. 4a). Ces sédiments sont typiques d'un processus de mise en place par traction sur le fond, car ils présentent de fines structures entrecroisées et une surface érosionnelle caractéristique à leur base. Ces laminations sont surmontées par des sédiments massifs et homogènes vers le sommet. Ces sédiments massifs présents au sommet de chaque épisode se sont déposés postérieurement par décantation des sédiments en suspension dans la masse turbide. Ils sont mal triés et sont principalement composés de silts et d'argiles. Ils sont caractérisés par des intensités tomographiques variant entre 2050 et 2100.

Ces couplets « fines laminations – sédiments massifs », présents dans la nouvelle couche, correspondent chacun à un épisode de deux types de dépôt, soit par traction et par décantation. Ce dépôt en deux temps résulte du mécanisme typique d'un mouvement gravitaire qui est composé de deux phases

Fig. 4. Analyses granulométriques : les fines laminations (échantillon (a) prélevé à 8 cm de profondeur) sont composées principalement de sable fin à très fin, bien trié. Les sédiments massifs sans stratification visible (échantillon (b) prélevé à 16 cm de profondeur) sont mal triés, et sont constitués d'une gamme granulométrique s'étalant des sables fins jusqu'aux argiles (voir la description stratigraphique à la fig. 3).

Station 8



au niveau de la couche limite. Tout d'abord, la couche limite basale correspondant à un mouvement par charriage dans laquelle les grains se déplacent sur le fond en entraînant les grains sous-jacents. Ce phénomène conduit à une érosion du toit de la couche inférieure et donc à la formation d'une surface d'abrasion, telle celle observée sur la figure 3. Ces sédiments qui se déplacent par charriage sont en concentration

hypercritique et se déposent sous forme de lamelles de progradation ou cliniformes. Au dessus de cette masse visqueuse et hypercritique, les sédiments plus fins se déplacent en suspension sous la forme d'un nuage turbulent qui progresse sur une épaisseur variant de quelques centimètres à quelques mètres. En fin de glissement, ces sédiments décantent, et les plus grossiers se déposent en premier, leur vitesse de chute étant

plus rapide que pour les sédiments plus fins. Néanmoins, dans le nuage turbide, les sédiments ne se déplacent pas horizontalement, mais suivant un mouvement turbulent. Il en résulte qu'en début de décantation, les grains grossiers du niveau le plus haut arrivent en même temps que les sédiments plus fins du bas de la couche turbide. Les premiers dépôts de décantation seront donc très peu classés et contiendront une gamme étendue de classes granulométriques (fig. 4*b*). Ces dépôts se formant très rapidement, les grains ne peuvent s'ajuster, la porosité sera forte et les valeurs d'IT seront faibles (IT autour de 2060). Par la suite, les sédiments de plus en plus fins se déposent, ils seront de mieux en mieux classés. Ceux-ci formeront un horizon de plus en plus compact, et les densités IT observées seront plus grandes. Ce processus des densités variant avec la vitesse de dépôt sera illustré et discuté plus en détail à la section 4.2.2.

Durant la crue, plusieurs épisodes de dépôts se sont produits successivement. Cette succession démontre que la crue s'est étalée en une série de plusieurs pulsations de sédimentation. L'importance de ces pulsations s'affaiblit avec le temps, au fur et à mesure que la crue diminue en intensité, comme le montre la réduction des épaisseurs de chaque épisode de sédimentation vers le sommet des carottes (épaisseur de 80 mm pour le premier épisode de dépôt et de 10 à 12 mm pour les dernières arrivées de sédiments à la fin de la crue, fig. 3). Des séquences de dépôt semblables sont observées, plus profondément dans la carotte, à certains endroits dans les sédiments antérieurs à la crue. Ces sédiments ont été déposés lors de crues antérieures à celle de 1996 comme le démontre la présence d'anciennes traces de bioturbation au sommet de ces dépôts (de Montety et al. 2000). Malgré l'effet de la compaction, les différentes unités sédimentaires mentionnées ci-dessus sont parfaitement reconnaissables (fig. 5*a*).

Une surface d'érosion est visible dans la plupart des images à l'interface entre les sédiments de la crue et les sédiments plus anciens. Les sédiments antérieurs à la crue sont très contrastés par rapport aux sédiments plus récents. Ils sont généralement massifs, sans stratification visible. Ils sont moins denses et contiennent des éléments grossiers de tailles variables (du millimètre au centimètre) pris dans la matrice. Ils présentent de nombreuses traces de bioturbation sur une épaisseur de 5 à 10 cm au sommet de ces dépôts (fig. 5*b*). Ces dépôts bioturbés en surface sont typiques d'un environnement caractérisé par des arrivées massives de sédiments. Lors du dépôt de ces derniers, la faune benthique est recouverte et détruite par cet événement instantané. Les sédiments nouvellement déposés ne présentent pas de traces de bioturbation, alors que celles-ci sont visibles au sommet des anciens sédiments, là où la faune benthique a été ensevelie et les structures biogènes ont été conservées. Par la suite, les nouveaux sédiments sont rapidement colonisés jusqu'à l'arrivée d'un nouvel épisode sédimentaire. Le sommet de cette nouvelle colonne sédimentaire est bioturbé jusqu'à la limite de migration des organismes vivants; en dessous, les sédiments ne présentent pas de trace de bioturbation. Par contre, dans le cas d'un régime sédimentaire régulier de faible ampleur (quelques millimètres à quelques centimètres par an), la faune benthique s'adapte à cet apport constant et creuse les nouveaux sédiments au fur et à mesure de leur dépôt. Ces sédiments présentent alors des traces de bioturbation en continu sur plusieurs mètres de profondeur. Dans le

cas présent, les traces d'activité benthique n'apparaissent pas dans la nouvelle couche prélevée par carottage 1 an après la crue, celle-ci n'ayant pas encore été recolonisée par la faune benthique. Cependant, des carottes prélevées en été 1998 montrent une recolonisation importante des sédiments de surface sur une profondeur de 20 cm (de Montety et al. 2000; Maurice et al. 2000). Aucune structure sédimentaire correspondant à un remaniement d'origine hydrodynamique (telles que laminations obliques ou entrecroisées) n'a cependant été observée, aussi bien dans les carottes prises en 1997 qu'en 1998. De plus, la nouvelle colonisation de la surface des sédiments par des organismes appuie l'absence de courants importants et donc la difficulté de générer de nouvelles structures sédimentaires indicatrices d'un remaniement des sédiments par le courant.

4.2 Étude de la compaction des sédiments

Les valeurs des intensités tomographiques varient tant en fonction de la minéralogie et de la granulométrie des sédiments qu'en fonction de leur état de compaction. Celui-ci est contrôlé par différents paramètres dont le tassement des sédiments et l'influence de la bioturbation.

4.2.1 Influence de la bioturbation

Un an après la crue, les nouveaux sédiments n'avaient pas encore été recolonisés par la faune benthique, ils ne présentaient aucune trace de bioturbation (fig. 6). Par contre, les carottes prélevées en 1998, soit 2 ans après la crue, montrent une recolonisation importante de ces sédiments. Cette recolonisation se traduit par la présence de nombreuses structures biogènes de meio et macrofaune (de Montety et al. 2000). Cette bioturbation a une influence importante sur la compaction des sédiments, car elle provoque une remobilisation de ces derniers avec le creusement de galeries par les vers et un remaniement de surface causé par les gastéropodes. L'influence de la bioturbation est également visible dans les sédiments antérieurs à la crue, des traces d'activités benthiques sont observables dans la partie sommitale de ces anciens sédiments, sur une épaisseur variant entre 5 et 10 cm (fig. 5*b*). Son action sur la compaction est illustrée par le profil des intensités tomographiques (fig. 7) dans lequel les valeurs d'IT sont relativement stables entre 400 et 500 mm (valeurs d'IT comprises entre 2060 et 2080). De 500 à 580 mm (fond de la carotte), les valeurs d'IT augmentent régulièrement de 2080 à 2110. Cette augmentation des IT en fonction de la profondeur s'explique par la compaction des matériaux déposés sous l'action du poids des sédiments. La porosité de ceux-ci diminue et leur densité augmente. Ce phénomène n'est cependant pas visible dans les 100 premiers millimètres (400 à 500 mm). En effet, à cette profondeur, la bioturbation engendrée par la faune benthique entraîne une remobilisation importante des sédiments et perturbe le processus de compaction de ces derniers. Cela se traduit par une augmentation de la porosité et une diminution de la densité totale de ces sédiments.

4.2.2 Influence du type de sédimentation et de la granulométrie

Le mode de dépôt des sédiments influence également leur état de compaction, ce phénomène est particulièrement important durant les crues, car la vitesse de dépôt varie en fonction du régime de ces dernières. En effet, les sédiments

Fig. 5. L'image de gauche (a) nous montre clairement la présence, dans les anciens sédiments, d'un épisode d'une crue antérieure à celle de 1996. À droite (b) on remarque que les anciens sédiments sont fortement bioturbés (galeries creusées par la faune benthique) alors que les sédiments déposés lors de la crue ne présentent aucune trace de bioturbation (carottes prises 1 an après la crue).

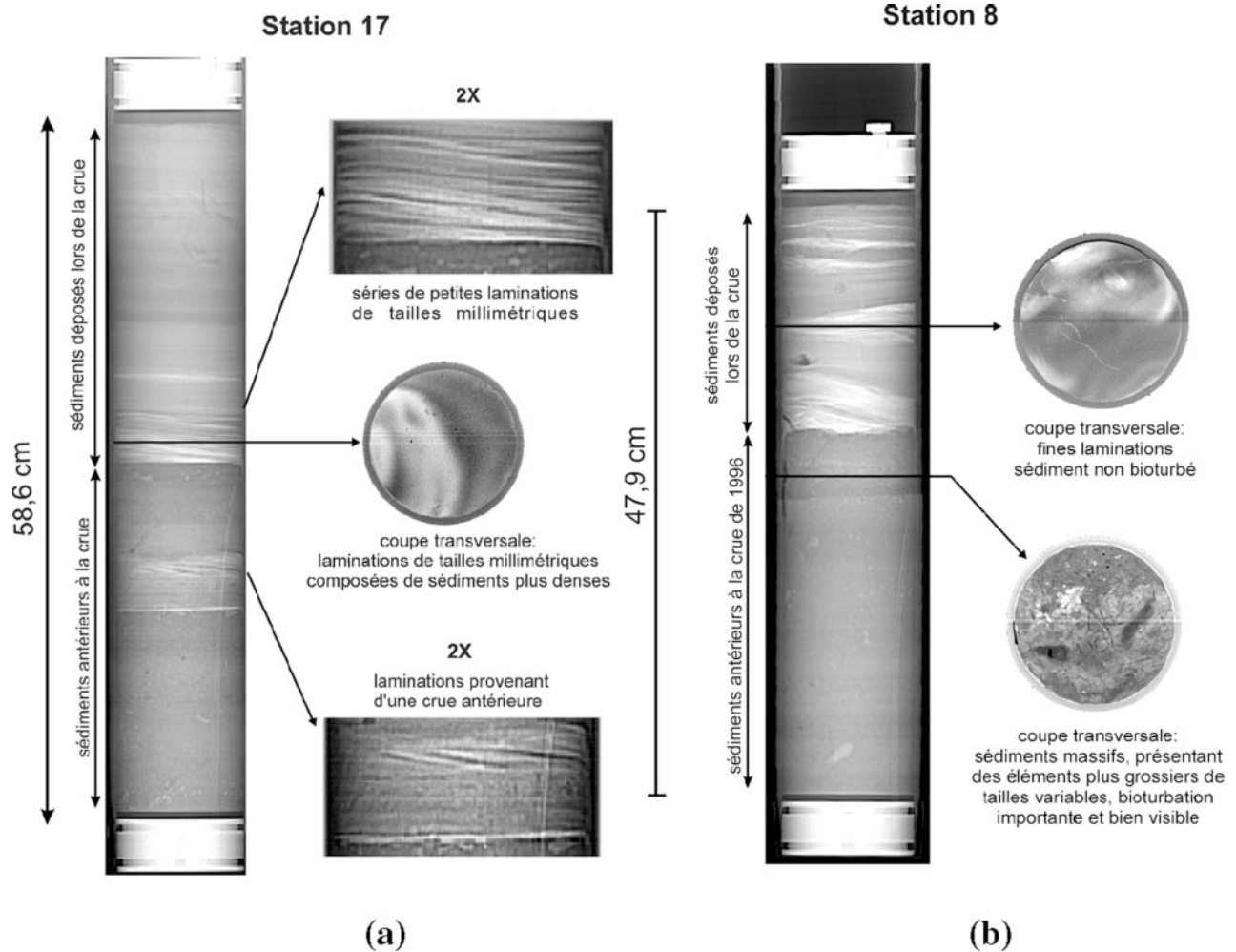
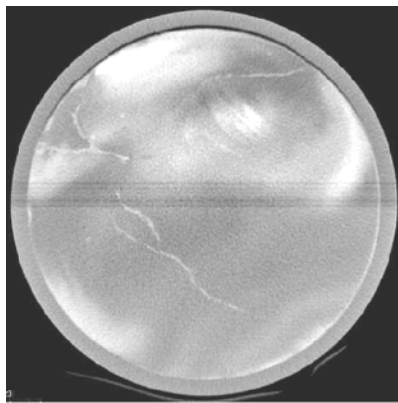
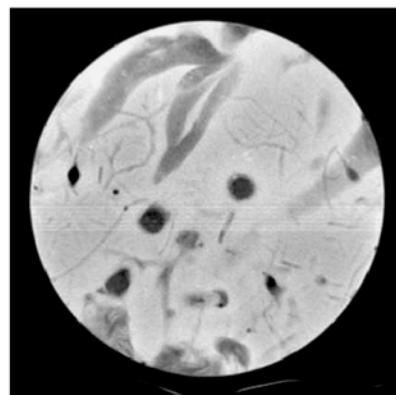


Fig. 6. Deux coupes transversales au niveau des nouveaux sédiments. Dans les carottes prélevées 1 an après la crue (a) il n'y a aucune trace de bioturbation. Alors que l'on observe une forte recolonisation des sédiments par la faune benthique dans les carottes prélevées en 1998, soit 2 ans après la crue (b).



(a)

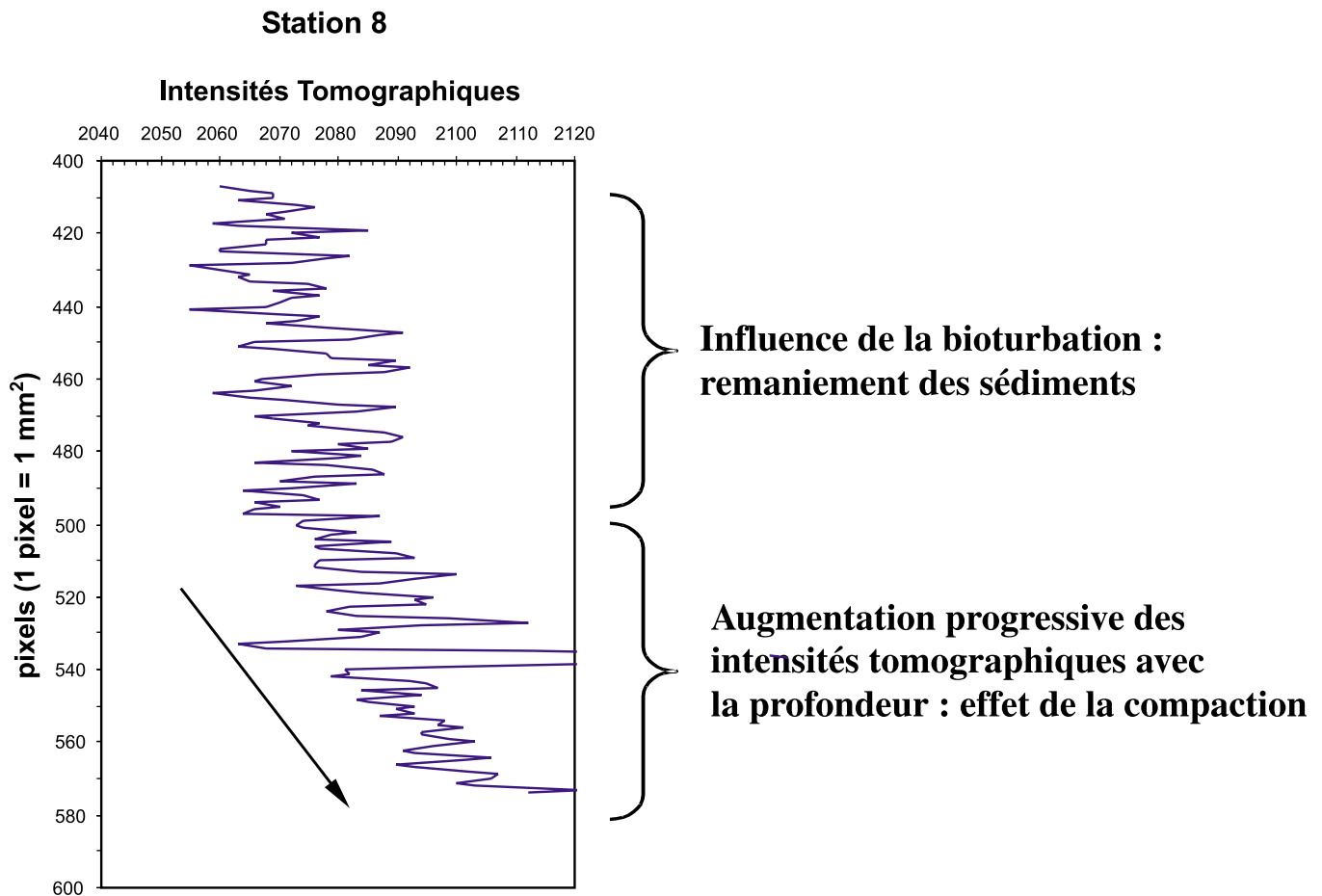


(b)

se sont mis en place au cours de plusieurs épisodes de dépôt de type gravitaire. Chacun de ces épisodes (fig. 3) débute à la base par des sables fins transportés par traction sur le fond

et, par la suite, par des sédiments silteux et argileux transportés dans la masse turbide et déposés par décantation. Or, les sables sont caractérisés par des intensités tomographi-

Fig. 7. Profil des variations des intensités tomographiques au niveau des sédiments antérieurs à la crue pour la carotte de la station 8, prise 1 an après la crue (image de la carotte à la fig. 3).



ques relativement plus élevées que celles des silts argileux (fig. 8). Ce contraste important entre ces deux types de sédiment proviendrait de la présence de carbonates dans les sédiments sableux (Mucci et al. 2000a, 2000b; Saint-Onge et al. 2000). En effet des changements minéralogiques dans les sédiments peuvent entraîner de fortes variations des intensités tomographiques (Boespflug et al. 1994), cette différence sera discutée ultérieurement lors des corrélations entre les intensités tomographiques et les masses volumiques saturées.

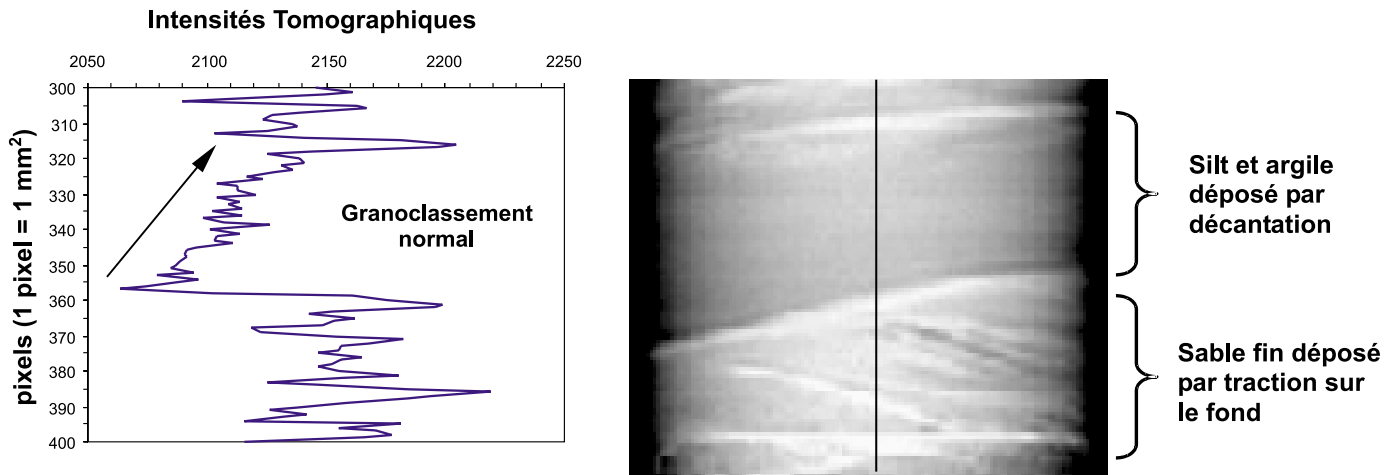
Dans les sédiments déposés par décantation, les valeurs des intensités tomographiques augmentent régulièrement de la base vers le sommet de ces derniers (fig. 8). Ces valeurs sont de l'ordre de 2070 à la base des silts et augmentent jusqu'à 2140 vers le sommet. Ces variations sont difficilement observables sur les images scanographiques, car la palette des teintes de gris est trop restreinte (256 valeurs) et ne permet pas de discriminer des variations de quelques unités d'IT. Par contre, elles sont très nettes sur le profil des intensités tomographiques le long de la carotte, les valeurs d'IT s'étalant sur 4096 niveaux. Une telle augmentation peut s'expliquer par des variations de granulométrie au cours de la phase de dépôt par décantation. Tout d'abord, les silts les plus grossiers se déposent rapidement et sont associés à une quantité importante de silt fin. Ensuite, les sédiments silteux de plus en plus fins se déposent accompagnés d'une proportion croissante de sédi-

ments argileux. Ces derniers vont progressivement occuper les pores présents entre les grains de silt. En fin de décantation, ces sédiments argileux vont constituer la majeure partie du sédiment déposé. Ce dépôt de sédiment argileux entre les grains de silt puis comme particules dominantes va réduire la porosité. Les sédiments se déposent donc selon un granoclasement vertical normal avec une diminution de la porosité vers le sommet. Cette diminution de la porosité entraîne une augmentation de la densité des sédiments et donc une augmentation des valeurs des intensités tomographiques. Ce phénomène, tel que décrit dans Boespflug et al. (1995) et Schillinger (2000), corrobore les analyses granulométriques réalisées sur les matériaux constituant ces épisodes de dépôt par décantation (fig. 4b); dans les échantillons étudiés, il existe une variété de granulométries s'étendant depuis les silts grossiers jusqu'aux argiles.

4.2.3 Corrélations entre la masse volumique saturée et les intensités tomographiques

Afin de déterminer l'importance de chacun des facteurs discutés précédemment dans la détermination de la densité scanographique des matériaux constituant le fond marin, des corrélations ont été établies entre les masses volumiques saturées, calculées à partir des teneurs en eau, et les intensités tomographiques correspondantes. Ces intensités tomographi-

Fig. 8. Agrandissement d'une partie de la carotte représentée sur la figure 3, au niveau des sédiments déposés lors de la crue. Les sables sont caractérisés par des valeurs d'IT élevées par rapport aux silts et argiles (densité plus grande). Dans les sédiments déposés par décantation, on remarque une augmentation régulière de la valeur des IT de la base jusqu'au sommet de ces derniers.



ques correspondent chacune à la moyenne de 25 pixels (25 mm²) calculée sur une zone de 5 × 5 pixels sur lesquels les mesures de teneur en eau ont été effectuées. La concordance entre les intensités tomographiques et les masses volumiques saturées est mise en évidence par un coefficient de corrélation de 0,90 (fig. 9). Les variations d'intensités tomographiques sont donc en relation directe avec les changements de densité calculée par les méthodes traditionnelles.

De plus, les deux populations de points observés correspondent chacune à des types de sédiments différents. Les silts argileux sont caractérisés par des valeurs d'IT comprises entre 2050 et 2100, et leurs masses volumiques saturées sont comprises entre 1,4 et 1,65 Mg/m³. Les sables sont plus denses, ils sont caractérisés par des IT variant de 2140 à 2160 et des masses volumiques saturées comprises entre 1,78 et 1,82 Mg/m³.

Dans les silts argileux, deux groupes sont visibles : les silts argileux déposés lors de la crue et ceux précédant cette dernière. Ces deux groupes sont caractérisés par des IT variant de 2050 à 2100 mais ils se distinguent par des valeurs de masse volumique saturée différentes. Les sédiments antérieurs à la crue présentent des masses volumiques saturées comprises entre 1,41 et 1,58 Mg/m³, alors que les silts argileux déposés lors de la crue présentent des valeurs de masse volumique saturée généralement plus grandes, comprises entre 1,49 et 1,64 Mg/m³.

Cette différence s'explique par l'effet de la bioturbation. En effet, les sédiments antérieurs à la crue présentent d'anciennes traces de bioturbation (de Montety et al. 2000). Cette bioturbation entraîne une remobilisation des sédiments et, de ce fait, une diminution de la densité totale de ces derniers (voir chapitre 4.2.1). Par contre, 1 an après la crue, les nouveaux sédiments n'ont pas encore été recolonisés par la faune benthique. Leur masse volumique saturée est donc légèrement supérieure à celle des anciens sédiments.

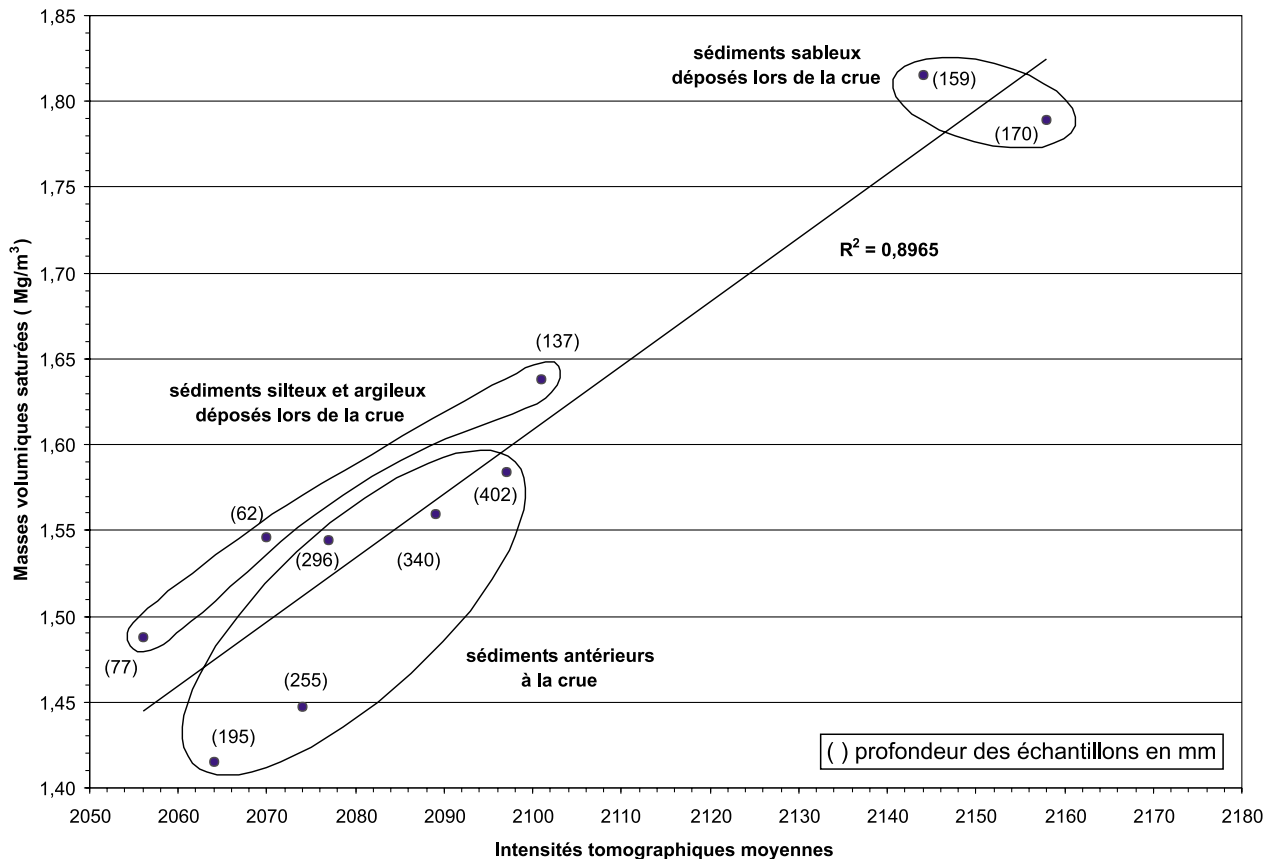
L'effet du granoclassement sur les valeurs d'IT observé dans les silts argileux déposés lors de la crue (décrit dans la section 4.2.2) n'est pas vraiment visible sur la fig. 9. Le faible nombre de mesures de masse volumique saturée effectuées dans ces sédiments ne nous permet pas d'observer ce phénomène. De plus, ces mesures n'ont pas toujours été faites dans le même épisode de sédimentation.

La différence très nette entre les sables et les silts argileux s'explique par la différence de granulométrie mais aussi par la composition minéralogique qui peut également jouer un rôle important. En effet, l'atténuation du rayonnement X est influencée par le numéro atomique des éléments composant le sédiment. Or, les matériaux déposés lors de la crue se distinguent par des concentrations en carbone inorganique importantes (0,5 %) par rapport aux concentrations retrouvées dans les sédiments plus anciens (~0,08 %). Ce carbone inorganique, principalement composé de matériaux calcaires, est associé aux argiles marines post-Wisconsinien transportées durant la crue (Mucci et al. 2000a, 2000b). Saint-Onge et al. (2000) ont également montré que les sédiments sableux déposés lors de la crue sont plus riches en carbonates. Le calcium contenu dans ceux-ci possède un numéro atomique assez élevé (20). D'après Boespflug et al. (1994), dans une carotte de 10 cm de diamètre, la calcite possède une valeur d'IT de 2448 ± 33, cette dernière varie en fonction de l'épaisseur de calcite traversée (-4,64 unités IT par centimètre d'échantillon traversé). L'absorption du rayonnement X par le quartz a été estimée à 1765 ± 14 IT pour la même épaisseur de 10 cm. Dans la présente étude, les valeurs d'IT mesurées pour les sédiments sableux varient entre 2140 et 2160. Ces valeurs correspondraient donc à un sable composé de quartz et d'une faible concentration de carbonates. Ces derniers seraient responsables de l'atténuation des rayons X et des valeurs importantes d'IT observées dans les sédiments sableux.

L'effet de compaction est également visible (fig. 9). Les intensités tomographiques et les valeurs de masse volumique saturée correspondantes mesurées dans les sédiments antérieurs à la crue augmentent en fonction de la profondeur. Les valeurs les plus importantes sont situées à la base de ces sédiments (IT de 2096 à 402 mm) et diminuent régulièrement jusqu'à sommet (IT de 2064 à 195 mm). Cependant, les deux premiers échantillons prélevés à 195 et 255 mm sont assez éloignés de la droite de corrélation (masse volumique saturée plus faible). Cette variation s'explique par le fait que ce niveau a subi une importante bioturbation qui a remanié les sédiments et donc perturbé le processus de compaction de ces derniers.

Ainsi, la bonne corrélation observée entre les mesures d'intensités tomographiques et les masses volumiques satu-

Fig. 9. Corrélations entre les intensités tomographiques et les masses volumiques saturées correspondantes pour des échantillons pris à différentes profondeurs.



rées permet d'utiliser la scanographie pour la détermination de la densité des sédiments. Cette méthode est très rapide, mais elle est également très sensible à certains paramètres comme la minéralogie des sédiments, leur granulométrie et leur état de compaction. La bioturbation joue aussi un rôle important dans les variations d'intensité tomographique. Les sédiments à étudier doivent donc être étalonnés avec les méthodes de mesure directes afin de pouvoir évaluer et quantifier les variations d'intensités tomographiques dues à ces différents paramètres (Kantzas 1995).

5. Conclusion

La scanographie se révèle être un outil très efficace pour la définition des faciès caractéristiques des différentes phases de dépôt gravitaire. Ainsi, les sédiments déposés lors de la crue sont divisés en plusieurs épisodes de dépôt (ceux-ci sont surtout visibles dans les carottes prélevées dans la baie des Ha! Ha!). Chaque épisode de dépôt est constitué d'un couplet, composé de fines laminations sableuses à la base et surmonté de silt argileux. Ces couplets correspondent chacun à un épisode de sédimentation. En effet, durant la crue, le delta a subi une arrivée massive de sédiment, une grande quantité de ceux-ci ont transité par-dessus ce corps sédimentaire. En fonction du débit, ces sédiments ont migré jusqu'au front deltaïque où ils ont formé une nouvelle écaïlle de progradation instable. Par la suite, ces sédiments sont repris par les mouvements gravitaires et vont former des séquences successives de dépôts dans le bassin, ces séquences se retrouvant au niveau

des carottes. L'intensité de ces mouvements s'affaiblit avec le temps comme le traduit la réduction des épaisseurs de chaque épisode de sédimentation entre la base et le sommet des carottes. Ce processus de dépôt correspond au mécanisme de sédimentation prédominant dans la Baie des Ha! Ha! (Michaud et al. 2001). En effet, des séquences de dépôt semblables sont observées à plusieurs niveaux dans les sédiments antérieurs à la crue. Ces sédiments ont été déposés lors de crues antérieures à celle de 1996 et, malgré l'effet de la compaction, ces différentes unités sédimentaires sont encore reconnaissables sur la plupart des images scanographiques. Une surface d'érosion est généralement présente à l'interface entre les sédiments de la crue et les sédiments plus anciens. Le contraste entre ces derniers est très marqué dans la plupart des carottes étudiées. Les sédiments antérieurs à la crue sont généralement massifs, sans stratification visible, ils présentent de nombreuses traces anciennes de bioturbation qui sont probablement responsables de l'homogénéisation des sédiments stratifiés. En effet, la bioturbation affecte de manière significative les sédiments et les structures sédimentaires présentes dans ceux-ci. Ces sédiments vont subir un remaniement important qui va aérer et homogénéiser ces derniers, ce qui contrarie le phénomène de consolidation dû au tassement. Ce phénomène est visible dans la plupart des carottes et se traduit par une variation progressive de l'intensité tomographique en profondeur. Ces traces d'activité benthique sont absentes dans la nouvelle couche échantillonnée 1 an après la crue, celle-ci n'ayant pas encore été recolonisée. Cependant, des carottes prélevées 2 ans après la crue, en été 1998, montrent une reco-

lisation importante des sédiments de surface et un remaniement important de ces derniers. Par contre, les échantillons prélevés 1 ou 2 ans après la crue ne montrent pas de remaniement d'origine hydrodynamique.

Grâce à sa très haute résolution dans les mesures de densité, le scanographe nous a permis de mettre en évidence de faibles variations d'intensité tomographique dans les sédiments silteux et argileux mis en place lors de la crue. Ces variations correspondent à un phénomène de granoclasement lors de la phase de dépôt par décantation.

En conclusion, la scanographie devient un outil indispensable à l'étude qualitative et quantitative des structures sédimentaires et de la densité des sédiments. Ces mesures combinées ouvrent la voie à une nouvelle approche de l'analyse de la genèse d'un dépôt en considérant les structures sédimentaires, la taille des grains composant le sédiment et le degré d'arrangement ou de consolidation des dépôts. Au niveau géotechnique, cette méthode non destructive permet des mesures rapides de la porosité. Un étalonnage précis doit cependant être réalisé, en fonction du type de sédiment étudié, afin de déterminer les influences relatives de la composition minéralogique, de la granulométrie et de la compaction sur les valeurs des intensités tomographiques mesurées. Cette technique permet également de mettre en évidence les changements de l'intensité des agents hydrodynamiques qui contrôlent les variations de densité observées dans les sédiments mis en place.

D'autres études sont en cours de réalisation afin d'améliorer la quantification de la densité à partir des intensités tomographiques. Ces travaux prennent en compte les différents paramètres du sédiment telles que la granulométrie, la porosité, la teneur en eau et la minéralogie.

Remerciements

Cette étude est financée par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada. Nous tenons à remercier vivement le personnel du Centre Hospitalier Régional de Rimouski pour leur collaboration et le temps qu'ils nous ont consacré pour l'analyse des carottes au scanographe. Nous remercions également le personnel du Centre d'Informatique Médicale de l'Hôpital Universitaire de Genève pour leur aide précieuse et leurs conseils pour l'utilisation du logiciel de traitement d'images OSIRIS.

Bibliographie

- Boespflug, X., Ross, N., Long, B.F., et Dumais, J.F. 1994. Tomodensitométrie axiale : relation entre l'intensité tomographique et la densité de la matière. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **31** : 426-434.
- Boespflug, X., Long, B.F., et Occhietti, S. 1995. CAT-scan in marine stratigraphy: a quantitative approach. *Marine Geology*, **122** : 281-301.
- 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 axiale. *Comptes rendus de la 53^e Conférence Canadienne de Géotechnique*, Montréal, QC, 15-18 oct. 2000. *Edition R. Couture et S.G. Evans*. Vol. 1. pp. 131-135.
- 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. *British Journal of Radiology*, **46** : 1016-1022.
- Kantzas, A. 1995. Recent advances in the characterization of porous media using computer assisted tomography of X-rays. *Canadian Well Logging Society Journal*, **20** : 99-111.
- Kenter, J.A.M. 1989. Applications of computerized tomography in sedimentology. *Marine Geotechnology*, **8** : 201-211.
- Knoll, G.F. 1989. Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Lapointe, M.F., Secretan, Y., Driscoll, S.N., Bergeron, N., et Leclerc, M. 1998. Response of the Ha! Ha! River to the flood of July 1996 in the Saguenay Region of Québec: Large-scale avulsion in a glaciated valley. *Water Resources Research*, **34**(9) : 2383-2392.
- Ligier, Y., Ratib, O., Logean, M., et Girard, C. 1994. Osiris: a medical image manipulation system. *M.D. Computing Journal*, July-August 94, **11**(4) : 212-218.
- Maurice, F., et Locat, J. 2000. Caractéristiques géotechniques et évolution de la couche de sédiment déposée lors du déluge de 1996 dans la baie des Ha! Ha! (fjord du Saguenay, Québec). *Comptes rendus de la 53^e Conférence Canadienne de Géotechnique*, Montréal, QC, 15-18 oct. 2000. *Edition R. Couture et S.G. Evans*. Vol. 1. pp. 123-130.
- Michaud, E., Crémer, J.F., Long, B., de Montety, L., et Desrosiers, G. 2001. Les phases de construction deltaïque, influence d'un épisode d'apport catastrophique. *Canadian Coastal Conference, Québec, Proceeding. Compte rendu de la conférence canadienne sur le littoral 2001*, Québec, 16-19 mai, 2001. *Editeur B.F. Long*. pp. 533-547.
- Mucci, A., Guignard, C., et Olejczyk, P. 2000a. Mobility of metals and As in sediments following a large scale episodic sedimentation event. *Proceedings of the 53rd Canadian Geotechnical Conference*, Montréal, QC, 15-18 oct. 2000. *Edition R. Couture et S.G. Evans*. Vol. 1. pp. 169-176.
- Mucci, A., Sundby, B., Gehlen, M., Arakaki, T., Zhong, S., et Silverberg, N. 2000b. The fate of carbon in continental shelf sediments of eastern Canada: a case study. *Deep-Sea Research*, II. **47** : 733-760.
- Otani, J., Mukunoki, T., et Obara, Y. 2000. Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils. *Soils and Foundations*, **40**(2) : 111-118.
- Pelletier, E., Deflandre, B., Nozais, C., Tita, G., Gagné, J.-P., Desrosiers, G., et Mucci, A. 1999. Crue éclair de juillet 1996 dans la région du Saguenay (Québec). 2. Impacts sur les sédiments et le biote de la baie des Ha!Ha! et du fjord du Saguenay. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **56** : 2136-2147.
- Saint-Onge, G., et Hillaire-Marcel, C. 2000. Inventaire des couches accidentelles récentes dans le fjord du Saguenay à partir des propriétés physiques de carottes de forages. *Comptes rendus de la 53^e Conférence Canadienne de Géotechnique*, Montréal, QC, 15-18 oct. 2000. *Edition R. Couture et S.G. Evans*. Vol. 1. pp. 145-151.
- Schillinger, S. 2000. Genèse et architecture d'une flèche sableuse : Le banc du Bûcheron, Île de Ré, France. Thèse de Doctorat, Université de la Rochelle, France.
- Wellington, S.L., et Vinegar, H.J. 1987. X-Ray computerized tomography. *Journal of Petroleum Technology*, **2** : 885-898.
- Yu, W., Lin, C.A., et Benoit, R. 1997. High resolution simulation of the severe precipitation event over the Saguenay, Québec, region in July 1996. *Geophysical Research Letters*, **24** : 1951-1954.