

Application de la tomodesitométrie 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 1996.

Jean-François Crémer, INRS-Géoressources, 880, chemin Sainte-Foy, bur. 840, Québec (Québec) G1S 2L2.

Bernard Long, INRS-Géoressources, 880, chemin Sainte-Foy, bur. 840, Québec (Québec) G1S 2L2.

Jacques Locat, Département de Géologie et Génie Géologique, Université LAVAL, Sainte-Foy (Québec) G1K 7P4.

Gaston Desrosiers, Institut des Sciences de la Mer, 310 allée des Ursulines, Rimouski, Québec G5L 3A1.

RÉSUMÉ Suite aux crues de juillet 1996, une importante quantité de sédiment provenant des bassins versants contigus au fjord Saguenay c'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 à boîte et d'un carottier à gravité durant l'été 1997 et 1998. Ces carottes ont été analysées à l'aide du tomodesitomètre axial du Centre Hospitalier Régional de Rimouski. L'utilisation du tomodesitomètre permet une évaluation qualitative et quantitative de la densité des sédiments, de leur mode de mise en place et de leur état de compaction. L'étude des 45 cm supérieurs des dépôts montre la présence, dans la couche nouvellement déposée, de plusieurs types de faciès caractéristiques d'un mode de dépôt gravitaire. Cette couche repose en discordance érosionnelle sur les 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 en surface en relation directe avec la bioturbation. Aucun remaniement d'origine hydrodynamique n'a été observé.

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 in the north arm. In order to characterize the mode of deposition and the potential of remobilisation of these deposits, a serie of cores was taken in the fjord using a box corer and a gravity corer during the summers of 1997 and 1998. These cores were analyzed using the axial tomodesitometer of the Regional Hospital Complex of Rimouski. The use of the tomodesitometer in Geology allows 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 deposits shows the presence, in the uppermost layer, of several facies types characteristic of a gravity deposit. This layer rests on an erosional unconformity cut into the older deposits, themselves of gravity type. One year after the floods, no trace of reworking could be detected in the upper part of cores. Nevertheless, cores taken in summer 1998 show a significant reworking of the surface sediments in direct relation with the bioturbation. No reworking of hydrodynamic origin was observed.

1. INTRODUCTION

Les pluies diluviennes qui se sont abattues entre le 19 et le 21 juillet 1996 ont provoqué des crues catastrophiques dans la région du Saguenay. Plus de 6 millions de tonnes de sédiment provenant des bassins versant 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 turbiditiques. L'épaisseur de cette nouvelle couche varie entre 10 et 50 centimètres.

L'étude des structures sédimentaires telles que laminations, turbidites, structures entrecroisées et traces de bioturbation est très importante en sédimentologie. En effet, ces dernières reflètent le mode de transport, le milieu de déposition et particulièrement les conditions de mise en place des sédiments, la direction et l'intensité des courants responsables de ces dépôts. Ces figures sont de type tridimensionnel, la connaissance de l'architecture interne de celles-ci permet de déterminer les différentes phases de la genèse des dépôts et de leur remobilisation postérieur. La reconstitution géométrique s'avère parfois difficile car le degré de préservation externe ne peut laisser entrevoir la structure interne des dépôts. De plus, l'études sur le terrain ou sur des carottes n'offrent qu'une vue en deux dimensions de ces structures. Pour cela, la tomographie axiale s'avère

un outil exceptionnel car elle permet de mettre en évidence les processus sédimentaires, la reconnaissance des différents faciès (tels que les tempestites, turbidites, etc...) et les variations de compaction rencontrées dans les sédiments. Cette méthode est non destructive, elle permet de conserver intactes les échantillons pour d'autres types d'analyses. La représentation des structures sédimentaires en trois dimensions et suivant des angles d'observations variés permet de caractériser les processus dépositionnels associés à l'environnement sédimentaire étudié. Enfin, ce système possède une résolution spatiale de 1 mm en coupe longitudinale et 0,25 mm en coupe transversale. Il dispose également d'une excellente résolution en variation de densité (1 à 4096 niveaux d'intensité tomographique correspondant chacun à une variation de 0,1 % de la densité). Ainsi, des structures sédimentaires qui seraient à la limite du visible et de très faibles variations dans la l'état de compaction des sédiments peuvent être mis en évidence. Cette technique a été appliquée ici pour l'étude des sédiments déposés lors des crues survenues au Saguenay suite au pluies diluviennes de juillet 1996 afin de caractériser les processus de mise en place des nouveaux sédiments et leur potentiel de remobilisation. Un intérêt

particulier a été porté sur l'étude de la bioturbation et la recolonisation du site par la faune benthique dans les 3 années suivant les crues. Cette dernière joue un rôle important dans la consolidation et la remobilisation des sédiments.

2. LOCALISATION DU SITE

Les carottes proviennent de la Baie des Ha! Ha! et du bras nord du Saguenay (Figure 1). Les Campagnes d'échantillonnages ont été effectuées du 21 au 26 août 1997, soit un an après la crue, et durant l'été 1998.

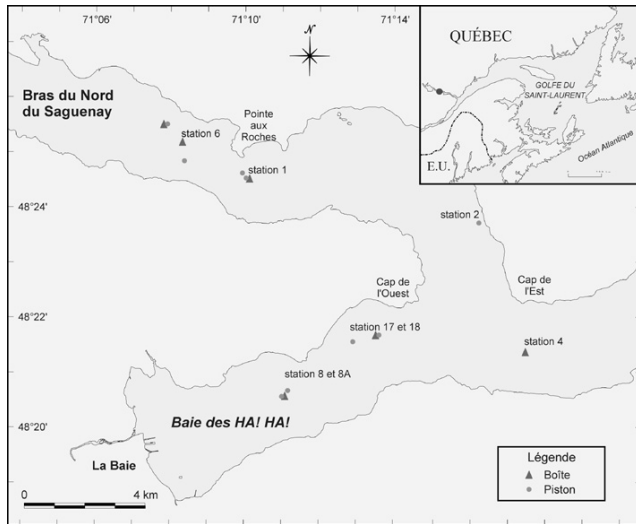


FIGURE 1 : Localisation des stations d'échantillonnages

3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET METHODOLOGIE

3.1 Tomodensitométrie

Les carottes ont été analysées à l'aide du tomodynamomètre axial du Centre Hospitalier Régional de Rimouski (GE B7590K Hi Speed Advantage 2.X). Les échantillons sont placés au centre d'une couronne formée par la source de rayon X et les détecteurs. Durant l'analyse, la carotte progresse au centre de la couronne pendant que celle-ci effectue une rotation autour de l'échantillon. Ce mouvement hélicoïdal permet une analyse de la carotte dans toutes les directions de l'espace (figure 2).

Le rayonnement X est atténué en traversant l'échantillon (figure 3A). L'intensité du rayonnement reçu par chaque détecteur est analysé et un traitement informatique permet la reconstitution de l'image à partir des signaux reçus par l'ensemble des détecteurs en tenant compte de la géométrie de l'ensemble du système (figure 3B). À chaque élément de l'image (pixel élémentaire) est attribué une valeur de l'absorption par l'échantillon. Les coupes dans l'échantillon peuvent être choisies suivant l'orientation désirée (figure 3C).

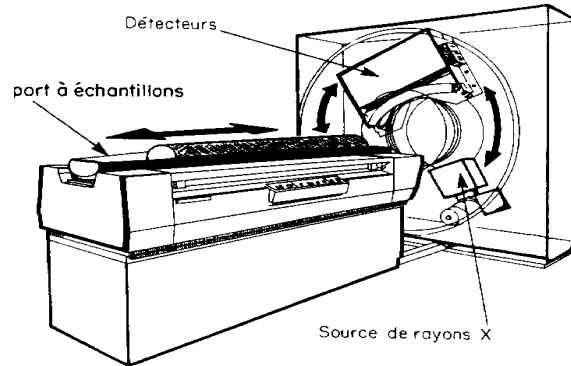


FIGURE 2 : Schéma du dispositif d'après Boespflug et al., 1994

L'absorption des rayons X est définie par la loi de Beer (Knoll, 1989):

$$[1] I/I_0 = e^{-\mu x}$$

I_0 est l'intensité initiale du faisceau, I l'intensité de faisceau à la sortie de l'échantillon, x l'épaisseur de l'échantillon dans la direction du faisceau et μ le coefficient d'absorption linéaire. Ce dernier nous donne une bonne approximation de la densité du matériaux car μ varie principalement en fonction de la densité de la matière mais également en fonction de l'énergie du rayonnement et du numéro atomique des éléments composant l'échantillon traversé par le faisceau (Boespflug et al., 1994). La densité de l'échantillon est généralement exprimée en terme d'intensité tomographique (Hounsfield, 1973):

$$[2] IT = (\mu/\mu_{\text{eau}} - 1) \times 1000$$

Dans lequel IT représente l'intensité tomographique, μ le coefficient d'absorption linéaire et μ_{eau} le coefficient d'absorption linéaire de l'eau. Par convention, $IT_{\text{eau}} = 0$ et $IT_{\text{air}} = -1000$. Une correction peut être effectuée automatiquement par le logiciel de traitement d'image pour transformer ces unités en valeurs de densité. Chaque variation d'une unité d'intensité tomographique correspond à un changement de 0,1 % de la densité. Les échantillons étudiés en géologie présentent des intensités tomographiques généralement comprises entre 500 et 3000, soit des densités vraies variants entre 1,5 et 4 alors qu'en biologie, les intensités tomographiques sont proches de 0, soit des densités vraies proches de 1. Les images tomographiques sont traitées sur PC avec le logiciel OSIRIS (logiciel de visualisation et de traitement d'images médicales, Ligier et al, 1994). Celui-ci permet de visualiser les images tomographiques et de les manipuler afin de mettre en évidence les structures sédimentaires, la géométrie des dépôts et les variations de densité.

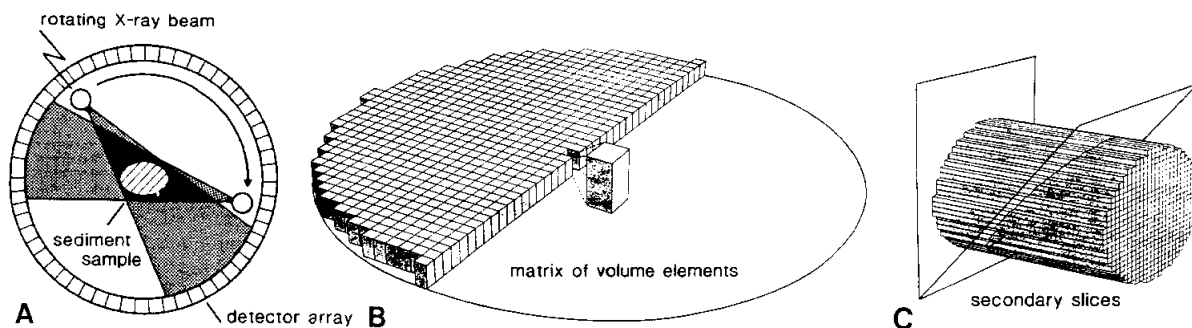


FIGURE 3 : principe de fonctionnement du tomodensitomètre d'après Kenter, 1989 (modifié)

3.2 Granulométrie

Des échantillons ont été prélevés dans les différents faciès pour déterminer la taille des particules par analyse granulométrique avec un compteur de particules de type "laser coulter" modèle LS 100. Ces données permettent de corréliser la granulométrie des sédiments et les intensités tomographiques correspondantes.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Caractérisation et interprétation des faciès

L'utilisation de la tomographie axiale se révèle très efficace pour la définition des faciès caractéristiques des différentes phases de dépôt gravitaire (figure 4). 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 débute à la base par de fines laminations obliques et entrecroisées de taille millimétrique. Ces laminations sont surmontées par des sédiments massifs vers le sommet. Les fines laminations sont de densité plus élevée que le reste des sédiments. Ils 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 (figure 4). Ces sédiments sont typiques d'un processus de mise en place par traction sur le fond. Les 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 silt fin à moyen. 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 sédimentation. Ils démontrent que la crue s'est étalée en une série de pulsions de sédimentation successives. L'intensité de ces pulses s'affaiblit avec le temps comme le montre la réduction des épaisseurs de chaque épisode de sédimentation vers le sommet des carottes. Des séquences de dépôt semblables sont observées à certains endroits dans les sédiments antérieurs à la crue. Ces sédiments ont

été déposés lors de crues antérieures à celle de 1996. Malgré l'effet de la compaction, les différentes unités sédimentaires mentionnées ci-dessus sont parfaitement reconnaissables (figure 5).

Une surface d'érosion est bien 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 taille variable (du millimètre au centimètre) pris dans la matrice. Ils présentent de nombreuses traces de bioturbation (figure 5). Ces traces d'activité benthique n'apparaissent pas dans la nouvelle couche dans les carottes prélevées un an après la crue, celle-ci n'ayant pas encore été recolonisée. Cependant, des carottes prélevées lors d'une nouvelle campagne en été 1998 montrent une recolonisation importante des sédiments de surface. Aucun remaniement d'origine hydrodynamique n'a cependant été observé.

4.2 étude de la compaction des sédiments

Les valeurs des intensités tomographiques vont varier en fonction de la minéralogie des sédiments, de la granulométrie mais également en fonction de leur état de compaction. Celui-ci va être contrôlé par différents paramètres dont le tassement des sédiments mais également l'action de la bioturbation.

4.2.1 influence de la bioturbation

Comme on peut voir très clairement sur la figure 6, un an après le dépôt des nouveaux sédiments, ces derniers n'avaient pas encore été recolonisés par la faune benthique et ne présentaient donc aucune trace de bioturbation. Les carottes prélevées en 1998, soit 2 ans après la crue, montrent une recolonisation importante des nouveaux sédiments avec la présence de nombreuses structures biogènes. Cette bioturbation va avoir une influence importante sur la compaction des sédiments et va entraîner une remobilisation de ces derniers.

L'influence de la bioturbation est également bien visible dans les sédiments antérieurs à la crue. Comme nous

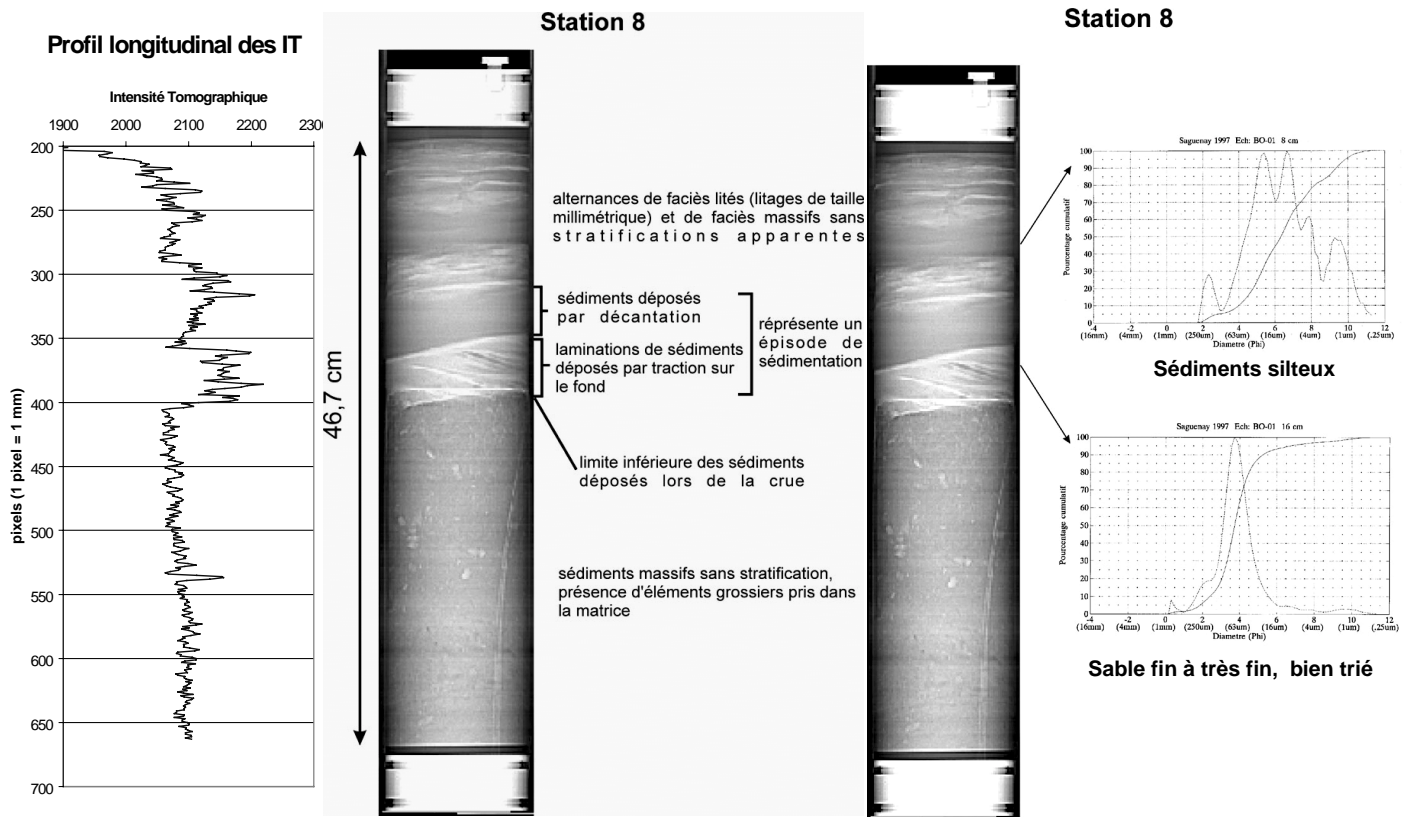


FIGURE 4 : coupe longitudinale dans 1 carotte prélevée un an après la crue et mettant en évidence les différents faciès caractéristiques d'une mise en place de type gravitaire. Cette distinction entre les différents faciès est très nettement visible sur le profil des variations d'intensités tomographiques. L'image de gauche nous montre que les fines laminations sont composées de sable fin bien trié. Les sédiments massifs sans stratification visible sont constitués de silt fin à moyen.

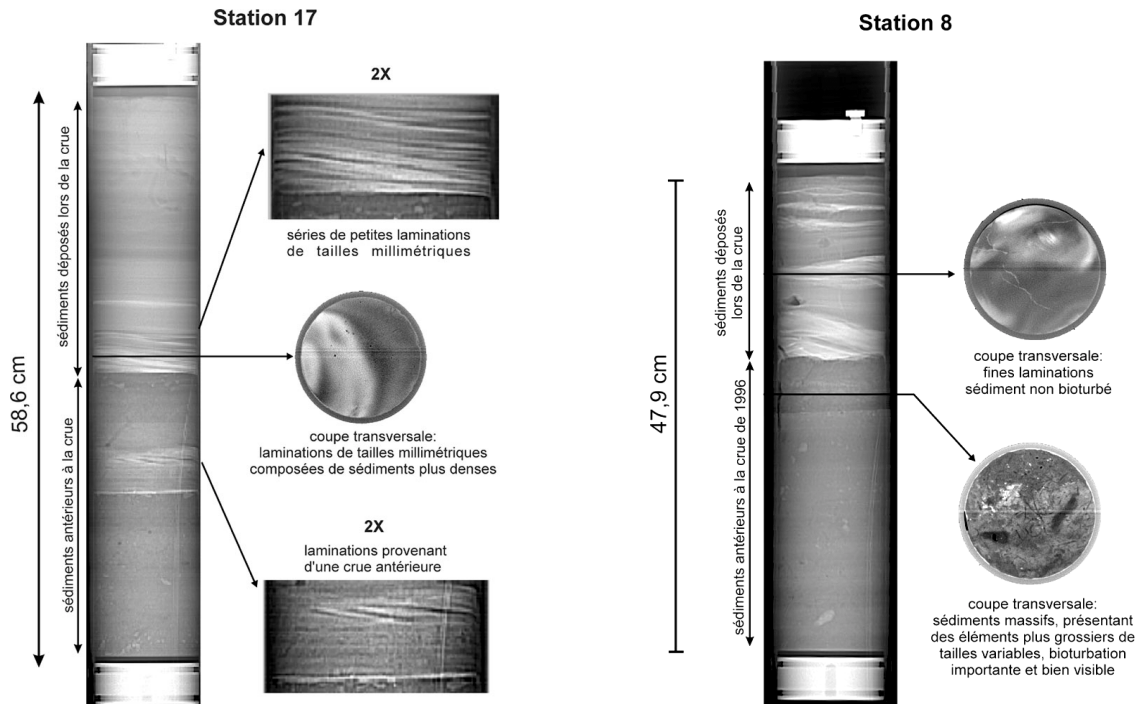


FIGURE 5 : l'image de gauche nous montre clairement la présence, dans les anciens sédiments, d'un épisode d'une crue antérieure à celle de 1996. À droite on remarque que les anciens sédiments sont fortement bioturbés alors que les sédiments déposés lors de la crue ne présentent aucune trace de bioturbation (carottes prises un an après la crue)

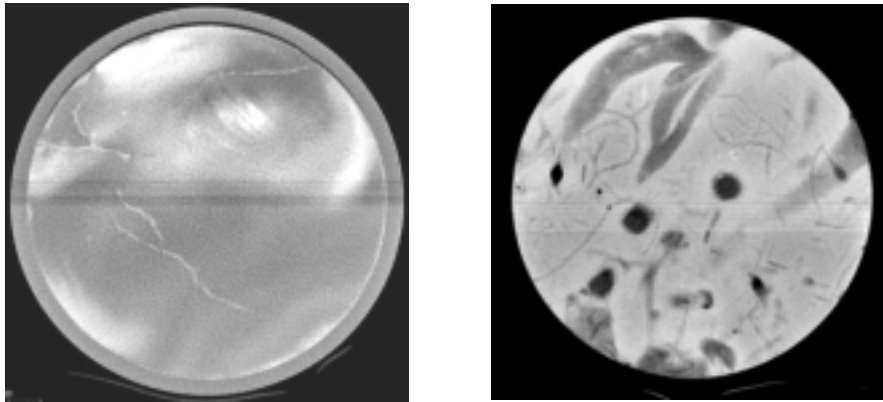


Figure 6 : deux coupes transversales au niveau des nouveaux sédiments. Dans les carottes prélevées un an après la crue (à gauche) il n'y a aucune trace de bioturbation. Alors que l'on observe une forte recolonisation par la faune benthique dans les carottes prélevée en 1998, soit 2 ans après la crue (à droite).

l'avons précisé précédemment, des traces de bioturbations sont également visibles dans la partie sommitale des anciens sédiments (figure 5). L'influence de celles-ci sur la compaction se voit clairement sur le profil des intensités tomographiques au niveau des anciens sédiments. Sur la figure 7, on remarque une augmentation faible mais régulière et progressive des intensités tomographiques le long du profil longitudinal des IT. Les intensités tomographiques sont proche de 2060 vers la partie sommitale des anciens sédiments (pixel 400), elle augmentent régulièrement jusqu'à des valeurs se situant autour de 2110 vers la base de la carotte (pixel 570). Ces variations de densités dans la sédimentation de matériaux uniformes ne peuvent s'expliquer uniquement par des changements naturels de la porosité du à la compaction des matériaux déposés. La bioturbation joue un rôle important dans ce phénomène, elle entraîne une remobilisation des sédiments et une diminution de la compaction de ces derniers. Plus bas, l'augmentation progressive de l'intensité tomographique (vers le pixel 500) s'explique par le tassement des sédiments et une diminution de la présence de structures biogènes. Les traces de bioturbation qui étaient présentes à une certaine période ont été effacées sous l'effet de la compaction.

4.2.2 influence de la vitesse et du type de sédimentation

La vitesse et le mode de dépôt des sédiments est un facteur qui influence également l'état de compaction de ces derniers. Ce phénomène est particulièrement bien visible dans les dépôts mis en place lors de la crue. Nous avons vu précédemment (figure 4) que ces sédiments s'étaient déposés en plusieurs épisodes de sédimentation de type gravitaire. Chacun de ces épisodes est composé à la base par des sables fins mis en place par traction sur le fond et ensuite par des silts déposés par décantation des sédiments contenus dans la masse turbide. Sur la figure 8, on remarque que les sables sont caractérisés par des intensités tomographiques relativement plus élevées que

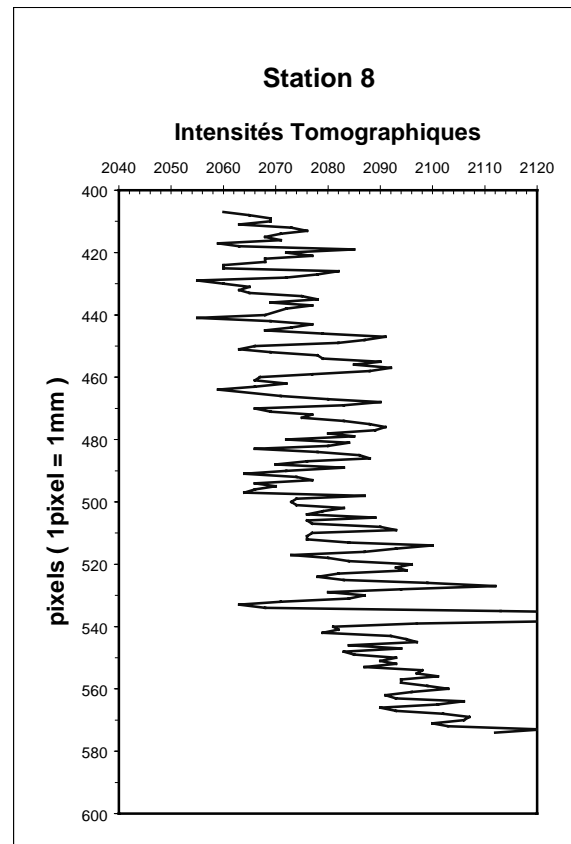


Figure 7 : profil des variations des intensités tomographiques au niveau des sédiments antérieur à la crue pour une carotte de la station 8, prise 1 an après la crue. (image de la carotte à la figure 4).

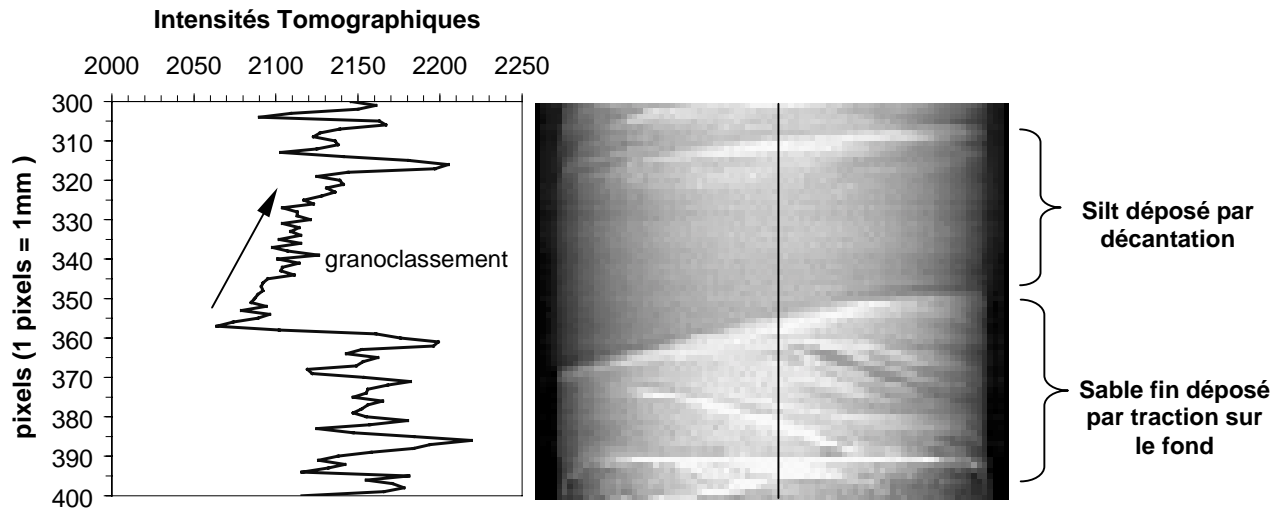


Figure 8 : agrandissement d'une partie de la carotte représentée sur la figure 4, au niveau des sédiments déposés lors de la crue. Les sables sont caractérisés par des valeurs d'IT élevées par rapport aux silts (densité plus grande). Dans les silts déposés par décantation, on remarque une augmentation régulière de la valeur des IT de la base jusqu'au sommet de ces derniers.

pour les silts. Ce contraste important entre ces deux types de sédiment provient de la différence de granulométrie mais peut également provenir d'une différence dans la composition minéralogique entre les sables et les silts. En effet des changements dans la composition chimique des sédiments peuvent entraîner de fortes variations dans les valeurs des intensités tomographiques observées (Boespflug et al., 1994).

On observe, dans les sédiments silteux une augmentation régulière des valeurs des intensités tomographiques vers le sommet de ces derniers. Ces valeurs sont de 2070 en moyenne à la base des silts et elles augmentent jusqu' à atteindre 2140 vers leur sommet. Ces variations sont difficilement observables sur les images tomodynamométriques mais elles sont très nettes lorsqu'on observe le profil des intensités tomographiques le long de la carotte sur la figure 8. Une telle augmentation peut s'expliquer par une sédimentation différentielle au niveau des silts. Les éléments les plus grossiers se déposent tout d'abord rapidement, ensuite le reste des sédiments silteux se dépose par décantation lente jusqu'aux éléments les plus fins entraînant un granoclasement des sédiments. Ce phénomène s'observe très bien dans les analyses granulométriques réalisées au niveau de ces épisodes silteux et présentés sur la figure 4, dans les échantillons étudiés on observe une gamme de granulométries s'étendant depuis les silts très fins jusqu'aux silts grossiers. Ces variations de granulométrie correspondent au phénomène de granoclasement mis en évidence par les variations d'intensités tomographiques observées sur le profil de la figure 8.

CONCLUSION

L'utilisation de la tomodynamométrie axiale se révèle très efficace pour la définition des faciès caractéristiques des différentes phases de dépôt gravitaire. 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 débute à la base par de fines laminations obliques et entrecroisées de taille millimétrique. Ces laminations sont surmontées par des sédiments massifs vers le sommet. Les fines laminations sont de densité plus élevée que le reste des sédiments (séries de pics bien visibles dans les profils des intensités tomographiques) et sont composées de sable très fin et bien trié. Elles sont typiques d'un processus de mise en place par traction sur le fond. Les 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 silt fin à moyen. Ces couplets « fines laminations-sédiments massifs » présents dans la nouvelle couche correspondent chacun à un épisode de sédimentation. Ils démontrent que la crue s'est étalée en une série de pulsions de sédimentation successives. L'intensité de ces pulses s'affaiblit avec le temps comme le montre la réduction des épaisseurs de chaque épisode de sédimentation vers le sommet des carottes. Des séquences de dépôt semblables sont observées à certains endroits dans les sédiments antérieurs à la crue. Ces sédiments ont été déposés lors de crues antérieures à celle de 1996. Malgré l'effet de la compaction, les différentes unités sédimentaires mentionnées ci-dessus sont parfaitement reconnaissables. Une surface d'érosion est bien visible dans la plupart des images 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 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 taille variable (du millimètre au centimètre) pris dans la matrice, ils présentent de nombreuses traces de bioturbation. Celle-ci affecte de manière significative la compaction des sédiments comme le démontre les variations progressives d'intensité tomographique en profondeur. Ces traces d'activité benthique n'apparaissent pas dans la nouvelle couche en ce qui concerne les carottes prélevées un an après la crue, celle-ci n'ayant pas encore été recolonisée. Cependant, des carottes prélevées lors d'une nouvelle campagne en été 1998 montrent une recolonisation importante des sédiments de surface et un remaniement non négligeable de ces derniers. Aucun remaniement d'origine hydrodynamique n'a cependant été observé. La très fine résolution en variation de densité du tomodensitomètre nous a également permis de mettre en évidence, dans les sédiments silteux mis en place lors de la crue, des variations d'intensités tomographique régulières et progressives. Celles-ci sont due à un phénomène de granoclassement lors du dépôt des silts par décantation.

Wellington S.L. and Vinegar H.J., 1987. X-Ray Computerized Tomography. *J. Pet. Technol.*, 2 : 885-898

REMERCIEMENTS

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 tomodensitomètre.

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.

RÉFÉRENCES

Boespflug X., Ross N., Long B.F. and Dumais J.F., 1994. Tomodensitométrie axiale : relation entre l'intensité tomographique et la densité de la matière. *Can. J. Earth Sci.*, 31 : 426-434.

Hounsfield, G.N., 1973. Computerized transverse axial scanning (tomography). Part 1. Description of system. *British Journal of Radiology*, 46 : 1016-1022.

Kenter J.A.M., 1989. Applications of computerized tomography in sedimentology. *Mar. Geotechnol.*, 8 : 201-211.

Knoll, G.F., 1989. Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons Inc., New York, 754 p.

Ligier Y., Ratib O., Logean M. and Girard C., 1994. Osiris : a medical image manipulation system. *M.D. Computing Journal*, July-August 94, Vol 11 No 4 : 212-218.