

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC  
INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE EAU TERRE ENVIRONNEMENT

**DÉFINITION DES PARAMÈTRES SÉDIMENTOLOGIQUES MESURÉS  
AU SCANOGRAPHE DENSITOMÉTRIQUE ET ESTIMATION DE LA  
CONTRAINTÉ DE CISAILLEMENT SUR UNE RIDE SABLEUSE**

Par

**Stéphane MONTREUIL**

Thèse présentée pour l'obtention du grade de *Philosophiae Doctor*, Ph.D.  
en sciences de **Doctorat en sciences de la terre**

Jury d'évaluation

Président du jury et examinateur externe	Prof. Dr. Patric Jacobs Ghent University (UGCT)
Examineur externe	Prof. Dr. Carl L. Amos University of Southampton
Examineur interne	Prof. Dr. Yves Gratton INRS, Centre-Eau, Terre et Environnement
Directeur de recherche	Prof. Dr. Bernard F. Long INRS, Centre-Eau, Terre et Environnement



## RÉSUMÉ

Cette thèse est fondée sur les mesures réalisées avec un scanographe tomодensitométrique ("CT-scanner") à travers lequel est inséré un canal. Le canal est rempli d'une couche de sable au-dessus de laquelle circule un fluide formant, par sa circulation, un champ de rides. De ces mesures découlent la définition des paramètres sédimentologiques présentant plus en détails l'architecture des rides sableuses en migration sous un courant unidirectionnel et constant. Les paramètres sédimentologiques sont présentés sur des profils de densité couvrant, en continu, le sommet de la colonne d'eau jusqu'à la base du lit sédimentaire. L'architecture des rides sableuses est ainsi redéfinie en tenant compte du comportement hydraulique de l'environnement de la ride, le tout se fondant sur les bases établies dans la littérature.

Cette étude utilise pour ce faire deux canaux hydrauliques. L'un est vertical, en boucle fermée de 3048 mm de long et 1219 mm de haut. La section intérieure rectangulaire du canal (152 mm par 304 mm) est introduit dans le statif coulissant du scanographe. Ensuite, la partie inférieure du canal est partiellement rempli d'une couche de sable de quartz de 30 mm d'épaisseur et le régime d'écoulement est ajusté avec un moteur électrique et contrôlé par un débitmètre Doppler. Dans ce canal, l'élément de volume ("voxel") a été fixé à 0.39 mm par 0.60 mm par 1.00 mm. Les profils de densité mesurés par le scanographe sont obtenus d'une matrice de mesures de 512 x 512 x 512 voxels ayant un volume de 305 x 305 x 200 mm.

Le second canal est un canal à surface libre de 300 x 300 x 7000 mm, en boucle fermé. La section rectangulaire du canal (300 x 300 mm) est passée au travers du statif coulissant du scanographe. La dimension des voxels est de 0.6 x 0.6 x 0.6 mm. Le flot continu est mesuré par un débitmètre Doppler installé dans le circuit de pompage. Le scanographe permet ainsi de mesurer en continu le transport par suspension et le transport par charriage sans interférence hydraulique sur l'eau ou sur les sédiments.

L'imagerie à rayons X du scanographe mesure l'atténuation linéaire du rayons X traversant le volume de mesure. Le résultat est un groupe de tranches mesurées formant une matrice de densité tridimensionnelle. Le rayon X est atténué en fonction de la densité du matériau, son numéro atomique effectif et de l'épaisseur de l'échantillon analysé.

Dans cette étude, deux techniques différentes sont utilisées afin de réaliser des mesures pseudo-instantanées. L'approche globale de mesure du transport ("*Global Volume Technique*", AGVT), qui utilise le scanographe pour mesurer un volume important donnant une image d'ensemble de la ride sableuse, à un moment précis. Cette technique donne une image tridimensionnelle de la ride sableuse sur une longueur allant jusqu'à 1500 mm. Pour mesurer un champ de rides, le scanographe doit se déplacé le long du canal.

La deuxième technique, la technique périodique à volume fixe ("*Periodic Single Volume Technique*", PSVT), fournit une représentation eulérienne de l'architecture durant la migration de la ride sableuse. Pour réaliser cette mesure, un volume formé de 30 tranches (chaque tranche de 300 x 300 x 0,6 mm) est mesuré, en gardant la position fixe (le statif coulissant du scanographe reste immobile). Chaque volume obtenu a été mesuré avec un intervalle en secondes ou minutes selon la vitesse de migration de la ride.

Les valeurs fournies par le scanographe sont des densités relatives exprimées en Unité Hounsfield (HU). Sous cette unité, les valeurs de l'air et l'eau sont respectivement -1000 HU et 0 HU. Le sable de quartz utilisé dans cette étude a une densité relative similaire à celle de l'os humain et de la colonne vertébrale (1477 HU). Les densités relatives mesurées sont donc converties en densité ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

Les résultats de l'étude indiquent donc que les paramètres sédimentologiques mesurés au scanographe révèlent des couches importantes dans la compréhension du transport sédimentaire. La forme des profils de densité aux rayons X concorde avec les mesures au profileur par résistivité *in situ*.

La première observation est la mesure de la couche supérieure du transport par charriage, qui donne une mesure de l'épaisseur du transport par charriage actif. Cette couche varie en épaisseur discontinue selon sa position sur la ride et redéfinit la notion de contrainte de cisaillement, qui est théoriquement fonction, d'une surface solide de la ride. L'étude des profils de viscosité indique une forme différente de contrainte de cisaillement. Il en découle une équation modifiée donnant la contrainte de cisaillement en fonction de la couche supérieure du transport par charriage.

$$\tau_0 = \frac{\rho V^2}{\left[5.75 \log\left(\frac{y_0}{K_{UBTZ}}\right)\right]^2} \begin{cases} 5.09 \text{ mm} < K_{UBTZ} < 18.29 \text{ mm, base du flanc d'érosion} \\ 1.17 \text{ mm} < K_{UBTZ} < 5.90 \text{ mm, dessus du flanc d'érosion} \\ 1.18 \text{ mm} < K_{UBTZ} < 14.75 \text{ mm, flanc de progradation} \end{cases}$$

où  $\tau_0$  est la contrainte de cisaillement à une élévation  $y_0$  de la surface solide du lit,  $V$  est la vitesse moyenne du fluide,  $\rho$  est la densité de l'eau à 24°C et  $K_{UBTZ}$ , une mesure de l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage le long de la ride de sable (quartz).  $K_{UBTZ}$  est fonction du courant, de la position sur la ride et de la granulométrie.

Une seconde observation révèle une pseudo-liquéfaction de la matrice sédimentaire dans la section d'érosion. Cette pseudo-liquéfaction indique une déstabilisation causée par l'intrusion de l'eau dans la matrice, ce qui facilite la mise en transport du sédiment. Des mesures révèlent que la pseudo-liquéfaction efface temporairement et partiellement la stratification du lit sédimentaire, confirmant du même coup l'hypothèse de la circulation de l'eau dans la matrice sédimentaire. Ces observations sont associées à des profils de porosité de forme exponentielle ayant des valeurs de 0.60 à 0.51 dans le flanc d'érosion.

La couche supérieure de transport par charriage est caractérisée en fonction de ses profils de transition par des indices et globalement (section de ride) par des indicateurs de transition. La lecture de ces paramètres indique que la référence (base de la ride, "*datum*") utilisée dans le calcul du transport qui est basé sur la géométrie de la ride, est discontinue le long de la ride et qu'elle est située sous la surface visible, à la surface *stricto sensu* de 1.90 à 2.20 g cm<sup>-3</sup> de densité. Ceci entraîne donc une estimation plus importante du transport sédimentaire.

## ABSTRACT

This thesis is based on measures carried out with X-ray computed tomography (CT-Scanner) through which is inserted a channel. The channel is filled with a layer of sand on top of which a fluid circulates forming a field of ripples. These measures stem from the definition of sedimentological parameters presenting more in detail the sand ripple architecture in migration under a steady unidirectional flow. The sedimentological parameters are presented on the profiles of density covering, continuously, the summit of the water column to the base of the sedimentary bed. The sand ripple architecture will therefore be redefined, considering the hydraulic behaviour of the ripple environment while based on foundations established in the literature.

This study has used two hydraulic channels. The first one was a vertical flume, closed-loop of 3048 mm long and 1219 mm high. The rectangular interior section of the flume (152 mm x 304 mm) is passed by the mobile gantry of CT-Scanner. The lower part of the canal has been partially filled with a layer of quartz sand of 30 mm of thickness. The flow regime is adjusted with an electric motor and controlled by a Doppler flow meter. In this channel, the element of volume (Voxel) has been fixed at 0.39 mm x 0.60 mm x 1.00 mm. The profiles of density measured by the CT-Scanner extracted from a matrix of measures of 512 x 512 x 512 voxels have a volume of 305 x 305 x 200 mm.

The second flume was an open channel of 300 x 300 x 7000 mm in closed loop. The rectangular section of the channel (300 x 300 mm) is passed through the CT-Scanner mobile gantry; here the size of the voxels is 0.6 x 0.6 x 0.6 mm. The continuous flow is measured by a Doppler flow meter installed in the pumping circuit. The CT-Scanner has enabled us to continuously measure the transport by suspension and bedload without hydraulic interference on the water-sediment mixture.

The imaging to X-ray measures the linear attenuation of the ray across the volume of measurement. The group of slices measured form a matrix of density with a three-dimensional in shape. The X-ray attenuation is a function of the material density, its atomic number, and the thickness of the sample analysed. In this study, two different techniques have been used in order to achieve pseudo-instantaneous measures. The technique for measuring by volume (Global technical volume, GVT) uses the CT-Scanner in order to measure a large volume, giving a global view of the sand ripple at a specific time. This technique gives a 3D picture of the ripple carvings on a length available to 1500 mm. To measure a ripple field, the CT-Scanner moves along the canal.

The second technique, the periodic single technical volume (PSVT), provides an Eulerian architecture representation during the sand ripple migration. To perform this measurement, a volume form of 30 slices (each slice of 300 x 300 x 0.6 mm) is measured bearing the fixed position (the gantry of the CT-Scanner remains immobile). Each volume is therefore measured with a delay in seconds or minutes depending on the speed of ripple migration. The values supplied are relative densities expressed in Hounsfield Unit (HU). Under this unit, the values of the air and water are respectively -1000 HU and 0 HU. The quartz sand used in this study has a relative density similar to human bones and spine (1477 HU). The relative densities measured are converted into density ( $\text{g cm}^{-3}$ ), leading to a new definition considering the dynamic processes above and inside the sand ripple.

Therefore, the study results indicate that sedimentological parameters measured by CT-scanner reveal areas of importance to the understanding of sediment transport. The shapes of X-ray density profiles are consistent with *in situ* resistivity profiler measurements.

The first observation is the measurement of the upper bedload transport zone which gives a measure of the thickness of the active bed load transport. This layer varies in thickness depending on its position on the ripple. This layer also redefines the concept of shear stress which depends, in theory, on the visible surface of the ripple, which is not the case. The study of viscosity profile shows a different form of shear stress and the result is a modified equation that gives the shear stress according to the upper bedload transport layer.

$$\tau_0 = \frac{\rho V^2}{\left[5.75 \log\left(\frac{y_0}{K_{UBTZ}}\right)\right]^2} \begin{cases} 5.09 \text{ mm} < K_{UBTZ} < 18.29 \text{ mm, stoss-side base} \\ 1.17 \text{ mm} < K_{UBTZ} < 5.90 \text{ mm, upper stoss-side} \\ 1.18 \text{ mm} < K_{UBTZ} < 14.75 \text{ mm, lee-side} \end{cases}$$

where  $\tau_0$  is the shear stress at elevation  $y_0$  from the solid ripple surface,  $V$  is the averaged flow velocity,  $\rho$  is the water density at 24°C and  $K_{UBTZ}$ , is a measure of upper bedload transport layer along a quartz sand ripple.  $K_{UBTZ}$  is a function of flow, position along the ripple and the grain size.

A second observation reveals a pseudo-liquefaction of the sediment matrix in the erosion section. This pseudo-liquefaction indicates a destabilization caused by the intrusion of water into the sediment matrix, which facilitates sediment transport. The measures reveal that the pseudo-liquefaction temporarily and partially erases the stratification of the sediment bed, confirming at the same time the assumption of flow of water inside the bedform. These observations are associated with porosity profiles, of exponential form, with values from 0.60 to 0.51 on stoss-side.

Finally, the upper bedload transport layer is characterized in terms of its transition profiles by indices and on ripple section by transition indicators. Reading these parameters indicates that the datum used in the calculation of transport is based on ripple geometry, is discontinuous along the ripple and is located below the visible surface, at the surface *stricto sensu*, with a density between 1.90 to 2.20 g cm<sup>-3</sup>. This therefore leads to a higher estimate of sediment transport.

## REMERCIEMENTS

Des remerciements particuliers à la Fondation canadienne pour l'innovation (FCI) pour leur contribution financière. Des remerciements particuliers au Professeur Dr. Bernard Long pour son support et ses enseignements, au Professeur Dr. YAMADA Fumihiko de l'Université de Kumamoto et au Professeur Dr. Tsujimoto Gozo du Kobe City College of Technology pour leurs commentaires sur ces travaux, au Professeur Dr. Lyal Harris de l'INRS ETE pour ses commentaires et la révision des multiples *proceedings*, au Dr. J. William Kamphuis, P.Eng. Queen's University Kingston pour ses recommandations et au Professeur Ole S. Madsen, MIT pour ses suggestions et ses encouragements. Aussi, des remerciements à Louis-Frédéric Daigle et Mathieu Des Roches pour leurs rigueurs et leurs apports aux expériences. Enfin, je remercie mon épouse Caroline et mon fils Tommy pour leur infinie patience lors de la réalisation de cette étude.

Je dédie cet ouvrage à mon défunt père, qui dès mon plus jeune âge, a su m'inculquer l'importance de l'apprentissage et du savoir.



# TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>V</b>
<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>VII</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	<b>IX</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>XX</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES</b>	<b>XLV</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1. REVUE DE LITTÉRATURE</b>	<b>5</b>
1.1 Introduction	5
1.2 Genèses des rides sableuses à travers l'action du fluide	8
1.3 Architecture des rides sableuses	16
1.4 Géométrie de la ride et mesure par traceur radioactif	23
1.5 Profils de porosité des formations sédimentaires	27
1.6 Variables hydrauliques et écoulement au-dessus d'un lit sédimentaire	32
1.7 Tomodensitométrie	43
1.7.1 Principes et applications .....	43
1.7.2 Artéfacts .....	50
1.7.3 Évolution de la densité du lit durant le remplissage .....	54
1.8 Paramètres sédimentologiques d'après Montreuil (2006)	56
<b>CHAPITRE 2. MÉTHODOLOGIE</b>	<b>65</b>
2.1 Canaux hydrauliques	65
2.2 Imagerie tomodensitométrie en hydraulique	75
2.3 Traitements et conversion des données DICOM	81
2.4 Imagerie tomodensitométrie et artéfacts majeurs	90

2.4.1. Effet de volume partiel.....	92
2.4.2. Durcissement de faisceau .....	92
2.4.3. Artéfacts circulaires .....	92
2.5 Caractéristiques du lit sédimentaire .....	95
<b>CHAPITRE 3. RÉSULTATS</b> .....	<b>97</b>
3.1 Visualisation des stratifications des rides .....	97
3.2 Profils de densité et paramètres sédimentologiques le long d'une ride .....	103
3.2.1 Expérience 1 .....	106
3.2.2 Expérience 2 .....	125
3.2.3 Expérience 3 .....	133
3.2.4 Expérience 4 .....	141
3.2.5 Expérience 5 .....	151
3.2.6 Expérience 6 .....	161
3.2.7 Regroupement des profils de densité par localisation sur la ride .....	171
3.3 Mesure des profils de densité à la base du transport .....	179
3.3.1 Introduction .....	179
3.3.2 Flanc d'avalanches .....	179
3.3.3 Flanc de progradation .....	180
3.3.4 Flanc d'érosion .....	183
3.4 Localisation du point de densité maximale .....	189
3.4.1 Introduction .....	189
3.4.2 Résultats .....	189
3.5 Valeur du point de densité maximale .....	193
3.5.1 Introduction .....	193
3.5.2 Résultats .....	193
3.6 Mesure de la porosité des couches formant la ride .....	196
3.6.1 Introduction .....	196

3.6.2 Résultats .....	196
3.7 Calcul des profils de viscosité dynamique	199
<b>CHAPITRE 4. DISCUSSION</b>	<b>201</b>
4.1 Introduction	201
4.2 Méthodologie	202
4.3 Validation de la forme des profils du scanographe	203
4.4 Visualisation de la stratification d'une ride au scanographe	207
4.5 Paramètres sédimentologiques	209
4.5.1 Introduction .....	209
4.5.2 Profils typiques et terminologie .....	210
4.6 Étude des points et des couches	218
4.6.1 Couche de transport en suspension.....	218
4.6.2 Point de passage entre la suspension et le charriage .....	219
4.6.3 Couches de transport par charriage .....	219
4.7 Effets du fluide sur la densité de la couche supérieure de transport par charriage	223
4.8 Surface de la ride	229
4.9 Étude de la contrainte de cisaillement	233
<b>CONCLUSION</b>	<b>241</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>247</b>
<b>ANNEXE 1: GRANULOMÉTRIE DES SABLES</b>	<b>263</b>
<b>ANNEXE 2 : CANAUX HYDRAULIQUES</b>	<b>266</b>
<b>ANNEXE 3 : CANAL HYDRAULIQUE À SURFACE LIBRE</b>	<b>272</b>
<b>ANNEXE 4 : PARAMÈTRES DICOM</b>	<b>284</b>
<b>ANNEXE 5: COMPOSITION DES SABLES</b>	<b>287</b>
<b>ANNEXE 6: ALGORITHME DE TRAITEMENT</b>	<b>288</b>
<b>ANNEXE 7 : VITESSE DE TRANSPORT</b>	<b>289</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Taux moyens de migration de petites et grandes rides pour trois sables de grosseurs différentes et à différentes vitesses de courant (D'après Dillo, 1960).....	7
Tableau 2.	Tableau des porosités moyennes de la figure 18 en fonction de la position sur la ride, incluant une mesure réalisée sur un monticule de forme non exactement définie par Wheatcroft (2002). ....	31
Tableau 3 :	Tableau de calculs de différence de niveau entre les réservoirs, constituant l'écoulement du canal à surface libre (Détails en annexe 3).....	73
Tableau 4 :	Tableau résumé des principaux paramètres disponibles dans l'entête d'un fichier DICOM, paramètres permettant la mise en contexte de l'image à travers l'ensemble de la mesure.....	81
Tableau 5 :	Synthèse des paramètres expérimentaux utilisés pour les six expériences réalisées avec la technique de mesure par événements périodiques (AMÉP). <i>ID</i> est l'identificateur de l'expérience, $d_{50}$ la granulométrie, $U_{moyenne}$ la vitesse moyenne, le nombre de mesures (volume), $\Delta t$ le temps écoulé entre chaque mesure, le temps de passage équivalent à une période de la ride et la durée totale de l'expérience. Les couleurs indiquent les axes de comparaison recherchés lors de la mise en place des expériences. Les vitesses initiales prévues des expériences 2 à 5 étaient de $30 \text{ cm s}^{-1}$ . Les vitesses indiquées sont celles mesurées en court d'expérimentation et dérivant en raison de la bathymétrie. ....	105
Tableau 6 :	(a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques du Profil-8 au Profil-12 de l'expérience 1. La vitesse du fluide utilisée est de $U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}$ et le diamètre des sédiments est de $d_{50} = 0.470 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente $m$ et $j$ , indice du rapport	

épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire ..... 110

Tableau 7 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 17 à 26 de l'expérience 1. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.470 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire ..... 114

Tableau 8 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 27 à 31 de l'expérience 1. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.470 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire ..... 117

Tableau 9 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 32 à 36 de l'expérience 1. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.470 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire ..... 120

Tableau 10 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 39 à 54 de l'expérience 1. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des

sédiments est de  $d_{50} = 0.470$  mm. (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire. .... 123

Tableau 11 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 22 à 30 de l'expérience 2. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 31.0$  cm s<sup>-1</sup> et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.470$  mm. (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire. .... 128

Tableau 12 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 32 à 44 de l'expérience 2. La vitesse du fluide utilisée est de 31.0 cm s<sup>-1</sup> et le diamètre  $d_{50}$  est de 0.470 mm. (b) Épaisseur des couches et différences de densités entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire. .... 131

Tableau 13 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 10 à 50 de l'expérience 3. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 31.1$  cm s<sup>-1</sup> et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.250$  mm. (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire. .... 136

Tableau 14 :	(a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 60 à 100 de l'expérience 3. La vitesse du fluide utilisée est de $U = 31.1 \text{ cm s}^{-1}$ et le diamètre des sédiments est de $d_{50} = 0.250 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente $m$ et $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.....	139
Tableau 15 :	(a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 2 à 18 de l'expérience 4. La vitesse du fluide utilisée est de $U = 34.7 \text{ cm s}^{-1}$ et le diamètre des sédiments est de $d_{50} = 0.200 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente $m$ et $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.....	143
Tableau 16 :	(a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 23 à 65 de l'expérience 4. La vitesse du fluide utilisée est de $U = 34.7 \text{ cm s}^{-1}$ et le diamètre des sédiments est de $d_{50} = 0.200 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente $m$ et $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.....	146
Tableau 17 :	(a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 66 à 76 de l'expérience 4. La vitesse du fluide utilisée est de $U = 34.7 \text{ cm s}^{-1}$ et le diamètre des sédiments est de $d_{50} = 0.200 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente $m$ et $j$ , indice du rapport	

épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire..... 149

Tableau 18 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 2 à 18 de l'expérience 5. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 28.6 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.120 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire..... 153

Tableau 19 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 30 à 54 de l'expérience 5. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 28.6 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.120 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire..... 156

Tableau 20 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 60 à 100 de l'expérience 5. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 28.6 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.120 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire..... 159

Tableau 21 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 50 à 130 de l'expérience 6. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 21.9 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des

	sédiments est de $d_{50} = 0.120$ mm. (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente $m$ et $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.....	163
Tableau 22 :	(a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 150 à 230 de l'expérience 6. La vitesse du fluide utilisée est de $U = 21.9$ cm s <sup>-1</sup> et le diamètre des sédiments est de $d_{50} = 0.120$ mm. (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente $m$ et $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.....	166
Tableau 23 :	(a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 250 à 330 de l'expérience 6. La vitesse du fluide utilisée est de $U = 21.9$ cm s <sup>-1</sup> et le diamètre des sédiments est de $d_{50} = 0.120$ mm. (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente $m$ et $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.....	169
Tableau 24 :	Mesure de la différence d'élévation $\Delta h$ , de la différence de temps $\Delta t$ , ainsi que la pente $m$ pour les quatre types de tendance présentés aux figures 101 à 104. ....	190
Tableau 25 :	Mesures de porosité moyenne pour le sommet et le creux des rides des expériences 1, 2, 5 et 6, incluant la moyenne des trois expériences et les valeurs obtenues par le profileur par résistivité (Wheatcroft, 2002). ....	197

Tableau 26 :	Synthèse des paramètres sédimentologiques en relation avec les profils-types décrit aux figures 116, 117 et 119. ....	216
Tableau 27.	Tableau regroupant les six types de transitions se retrouvant à l'intérieur de la couche supérieure de transport par charriage. ....	220
Tableau 28.	Tableau des calculs des paramètres locaux de chacun des équipements .....	276
Tableau 29 :	Matrice de calculs des débits dans chacune des composantes du circuit hydraulique. ....	278
Tableau 30 :	Tableau de calculs de différence de niveau entre les réservoirs, constituant l'écoulement du canal à surface libre .....	279
Tableau 31 :	Tableau résumé des principaux paramètres disponibles dans l'entête d'un fichier DICOM, paramètres permettant la mise en contexte de l'image à travers l'ensemble de la mesure.....	284
Tableau 32 :	Résultats et paramètres utilisés dans le calcul de la vitesse d'initiation du transport suivant la méthode préconisée par Jimenez & Madsen (2003). Les sables utilisés sont identifiés par la dénomination du fournisseur soit : C-109, 705, 505, 530 et Flint Silica. Les granulométries sont disponibles à l'annexe 1 et leur composition à l'annexe 5.....	289

## LISTE DES FIGURES

- Figure 1. Le diagramme d'Hjulstrom montre les relations entre l'érosion, le transport et la déposition. Le diagramme prend en compte la granulométrie et la vitesse du courant. (Hjulstrom, 1935) 6
- Figure 2. Forme de l'écoulement du fluide à l'avant du flanc de progradation. Distribution de la vitesse du courant, séparation du fluide et les trois zones majeures. D'après Reineck & Singh (1975), modifié d'après Jopling (1963, 1967). 9
- Figure 3. Histogramme et courbe de valeur cumulative de la vitesse de migration selon le temps de passage de deux rides successives. D'après Middleton & Southard (1977) 11
- Figure 4. Représentation de l'écoulement d'un fluide au-dessus d'une ride. Modifié de Middleton & Southard (1977). 12
- Figure 5. Représentation de l'écoulement d'un fluide dans un conduit et les points similaires avec l'écoulement au-dessus d'une ride. Modifié de Middleton & Southard (1977). 13
- Figure 6. Distribution de la vitesse du fluide, contrainte de cisaillement du lit sédimentaire  $\tau_0$ , et pression à la surface en forme de ride. Schématisée d'après Raudkivi (1963) et Vanoni & Hwang (1967). La pression est exprimée en termes de pression au sommet de la ride,  $P_c$ , et la vitesse moyenne du courant  $U$  est d'environ  $30 \text{ cm s}^{-1}$ . (Middleton & Southard, 1977). 14
- Figure 7. Région hydrodynamique au-dessus d'une ride complète. (1) Écoulement turbulent principal. (2) Couche de cisaillement laminaire. (3) Transition entre la turbulence et le transport. (4) Rattachement. (5) Écoulement de recirculation, irrégulier. (6) Couche limite du flanc de progradation. (7) Couche limite en amont de la pente d'avalanches. (8) Couche limite de séparation du flanc de progradation, avec petits vortex. (Blumberg & Curl, 1974). 15

Figure 8.	Définition des sections d'une ride (Reineck & Singh, 1975). En A, la ride est définie par une succession de points déterminants. En B, la ride est divisée en section afin de distinguer l'érosion, le transport et la déposition ou formation.	18
Figure 9.	Définition des couches internes d'une ride. (Reineck & Singh, 1975) L'architecture interne de la ride est caractérisée par trois types de couches, soit : les lamines de transport, les écailles de progradation et les lamines basales.	19
Figure 10.	Méthode d'observation des rides <i>in situ</i> . (Reineck & Singh, 1975)	19
Figure 11.	Photographie utilisée dans l'observation des structures sédimentaires et des couches internes des rides, modifié d'après de Reineck & Singh (1975).	20
Figure 12.	Description générale d'une ride sableuse, Tucker (2001).	21
Figure 13.	Mouvement du fluide aux abords de la ride pour un écoulement laminaire. (Yalin, 1977).	22
Figure 14.	Mouvement du fluide aux abords de la ride pour un écoulement laminaire, modifié de Baas (2003), d'après Reineck & Singh (1980).	22
Figure 15.	(A), schématisation du déplacement d'un grain obtenu par la méthode du traceur radioactif. (B) distance de déplacement du grain en fonction du temps (ligne pleine) et la migration du flanc de progradation de la ride (tiret). Les points P <sub>1</sub> (1) à P <sub>4</sub> (4) indiquent le cheminement du grain pendant la migration de la ride. (Middleton & Southard, 1977)	24
Figure 16.	Schématization du déplacement des sédiments sous forme de ride. D'après Yalin (1992).	25
Figure 17.	Profil typique de la résistivité ( $\Omega$ m) par rapport à la profondeur (mm). Modifiée d'après Wheatcroft (2002)	28
Figure 18.	(A) Profils de porosité représentant les trois types d'emplacements de mesure. (a) Sommet de la ride. (b) Monticule. (c) Creux de la	

- ride. (B) Agrandissement du graphique en A. Modifiée de Wheatcroft (2002). 30
- Figure 19. Graphique de la porosité moyenne. Mesures réalisées entre 1–10-mm (symboles solides) et entre 10–100-mm de profondeur (symboles ouverts). La granulométrie médiane est d'environ 0.400 mm avec un "très faible courant". (Wheatcroft, 2002). 31
- Figure 20. (A) Définition des composantes de l'écoulement au-dessus d'une ride. (B) Image photographique de l'écoulement le long d'une ride, avec la position des profils de vitesse. (C) Profils de vitesses localisés sur l'image de B. Les profils sont présentés sous forme de vitesse moyenne à une hauteur donnée  $U$  et de vitesse efficace  $u'$  (RMS), aussi selon la hauteur. Modifiée de Bridge & Demicco (2008), basée sur Bennett & Best (1995). 34
- Figure 21. Présentation des principales caractéristiques de la structure des couches limites turbulentes en fonction de l'élévation et de la vitesse du courant. Adaptée de Bridge & Demicco (2008) d'après Bridge (2003a). 36
- Figure 22. La contrainte de cisaillement total  $\tau_T$  dans un canal à surface libre et une fonction linéaire fonction de la profondeur. Au-delà de la hauteur de la contrainte de cisaillement  $\delta$ , le transfert d'énergie est donné seulement par la contrainte de cisaillement  $\tau_t$ . À proximité du fond, la contrainte de cisaillement est donnée par la rugosité du lit  $k_s$ , qui est essentiellement fonction de la topographie du lit. (Gyr & Hoyer, 2006). 37
- Figure 23. Valeur moyenne des forces gravitationnelles, de pression hydrostatique et de friction sur le lit agissant sur un écoulement stationnaire et non stationnaire. (Bridge & Demicco, 2008), de Bridge (2003b) 39
- Figure 24. Représentation schématique de l'acquisition des projections pour un scanographe de troisième génération. La source de rayons X est opposée à des détecteurs collimatés et opposés, qui sont fixées sur un statif qui tournent autour de l'échantillon. Ainsi, pour

- chacune des projections, les coefficients d'atténuation linéaire à travers l'échantillon sont déterminés. Tirée de Dului, (1999). 44
- Figure 25. Schéma du tube-détecteur de système de 3<sup>ème</sup> génération tomodynamomètre. Le tube à rayons X émet un faisceau en éventail fortement collimaté de rayons X qui passe à travers le patient et atteint une barrette de détecteurs. Le tube et les détecteurs sont en rotation autour du patient. Une exposition comprend souvent une rotation de 360°. (Smith, 2011) 46
- Figure 26. Représentation schématique de la relation entre l'objet étudié et son image tomodynamométrique. La rotation de la source et des détecteurs du statif détermine une section virtuelle à travers l'échantillon dont l'épaisseur est à peu près égale au diamètre du faisceau de rayonnement. Comme résultat de l'algorithme de reconstruction, cette section est décomposée en éléments de volume ("voxels"). Chaque coupe forme une matrice de 512x512 voxels qui est caractérisée par une valeur moyenne du coefficient d'atténuation linéaire exprimée en HU. D'après Wellington & Vinograd (1987), modifié par Dului (1999). 47
- Figure 27. Image tridimensionnelle d'un lit sédimentaire mesuré par rayons x avec le scanographe. Le volume eau/lit sédimentaire de 300 mm de largeur par 300 mm de hauteur par 900 mm de longueur est formé de 1500 coupes de 512 x 512 pixels pour des voxels de 0.6 mm x 0.6 mm x 0.6 mm. 49
- Figure 28. Volume mesuré au scanographe, formé par 30 coupes de 0.6 mm d'épaisseur prélevées à un intervalle de 0.6 mm. Chacune des coupes a une résolution de 512 x 512 pixels et forme un volume complet de 300 x 300 x 18 mm. 49
- Figure 29. Image tomodynamométrique d'une plaque d'aluminium. Les artéfacts de durcissement de faisceau sont visibles par une diminution de la densité dans la partie centrale de la plaque. 50
- Figure 30. Images tomodynamométrique de trois tiges en acrylique de 12 mm de diamètres soutenus en parallèle dans l'air à environ 15 cm de

- l'axe centrale du scanographe. (a) Image obtenue avec les tiges partiellement pénétrées dans le volume de mesure montre des artefacts de volume partiel. (b) Image obtenue avec les tiges complètement pénétrées dans le volume de mesure ne montre pas d'artefacts de volume partiel. (Barrett & Keat, 2004) 51
- Figure 31. Image scanographique. Les artefacts circulaires sont visibles même en l'absence de matériau solide dans le statif coulissant du scanographe. Un cercle est ajouté afin d'améliorer la perception visuelle de l'artefact (modifié de Montreuil, 2006). 52
- Figure 32. Images tomographiques conventionnelles d'un fantôme composé de bulle d'air et de coquille d'œuf (Fig. 21b). (a) Image obtenue au repos, montre une absence d'artefacts. (b) Image obtenue au cours d'un déplacement linéaire à une vitesse de  $10 \text{ mm s}^{-1}$  montrant des artefacts perceptibles. (c et d) Images obtenus lors d'un déplacement linéaire à une vitesse de  $20 \text{ mm s}^{-1}$  (c) et  $40 \text{ mm s}^{-1}$  (d) montrent des artefacts de mouvement linéaire sévère. (e et f) sont des images obtenues au cours d'un mouvement de rotation de 0.1 révolution par seconde, montrant des artefacts visibles ou graves en fonction de la distance de l'iso centre du scanographe. (g, h) Les images obtenues pendant le mouvement de rotation à 0.5 révolution par seconde montrent artefacts sévères. (Beckmann, 2006) 53
- Figure 33. Exemple d'artefacts métalliques dans une image tomographique à rayon X. (De Man et al., 1998). 54
- Figure 34. Profils de densité du sédiment (C-109, annexe 1) mesurés lors du remplissage du canal en boucle vertical. Les courbes présentent les variations de densité du lit sédimentaire sous une colonne d'eau respectivement de 10, 60 et 120 cm. Le résultat indique une augmentation de la densité en surface du lit conséquence de la pression de la colonne d'eau, (Montreuil, 2006). 56
- Figure 35. Image scanographique en couleur (sans échelle), d'une coupe entière : le profil vertical de densité présenté est réalisé à

l'emplacement de l'axe des y. Le profil densité est composé de la trappe d'accès aux sédiments (1), de la zone d'écoulement du fluide (2), de la zone de transport sédimentaire en suspension (3), de la zone de transport mixte (4), la zone de transport par traction seulement (5), de la zone de transport par charriage et zone de passage de traction à suspension (6), de la zone de chargement (7), le fond du canal (8) et l'espace d'air sous le canal (9).

57

Figure 36. Profil de densité du canal : La section en A définit la trappe d'accès du canal composé d'acrylique (Fig. 140, annexe 2). En B, l'augmentation de densité au centre de la trappe est causée par la colle qui joint les deux panneaux d'acrylique qui forment la trappe.

58

Figure 37. Profil de densité de la zone de fluide : la section A représente la zone de déplacement du fluide dans le canal et la section B indique la zone de transport par suspension. La zone de suspension débute lorsque la densité moyenne dans le fluide devient supérieure à 0 HU, ce qui indique la présence de sédiments dans le fluide. Le point C indique le point de densité maximale du profil.

59

Figure 38. Profil de densité d'une ride : la section A indique la zone de transport mixte ou zone de passage du transport par suspension vers le transport par charriage. C'est cette zone qui est définie comme le début du transport par charriage ou zone supérieure de charriage.

59

Figure 39. Profil de densité d'une ride : la section A indique la zone de transport par traction où la densité atteint son maximum. Cette zone est délimitée par la cassure dans la pente du profil et le point de densité maximale du profil.

60

Figure 40. Profil de densité d'une ride : la section A représente la zone de chargement du lit sédimentaire. Cette zone est formée par la mise en place des sédiments et, ensuite, par déposition dans le transport. Le remplissage du canal est réalisé couche par couche avec un râteau. La section B représente le fond du canal constitué

	d'acrylique. La section C indique probablement la présence des lamines basales.	60
Figure 41.	Profil de densité, image au CAT-scan d'une ride sableuse et la définition des zones de transport, (Montreuil & Long, 2007)	61
Figure 42.	Canal d'acrylique en boucle verticale localisé dans l'ancienne installation de tomographie.	66
Figure 43.	Canal d'acrylique à surface libre traversant le statif coulissant. (Photo : Professeur Bernard Long)	68
Figure 44.	Sonde du courantomètre Doppler (modèle, Controlotron 1020) installée sur le tuyau de 4 pouces en ABS noir. Le tuyau est installé à la sortie du réservoir en aval de la pompe de recirculation, mesurant ainsi la vitesse du courant dans le tuyau. En icône, à droite, le processeur et l'enregistreur de données.	68
Figure 45.	Sonde du courantomètre Doppler (Vctrino <sup>MC</sup> ) installée dans le canal d'acrylique. La profondeur de mesure est ajustée en fonction de la hauteur d'eau moyenne afin de mesurer la vitesse moyenne du fluide.	69
Figure 46.	Profil de vitesse verticale moyenne ( $V_{mean}$ ) dans un canal à surface libre ; $d$ = profondeur à partir de la surface ; le triangle inversé représente la surface d'eau. (Thomas, 2008).	69
Figure 47.	Capture d'écran du tableur utilisé dans la conversion des mesures des résultats obtenues avec le Controlotron <sup>MC</sup> et les résultats obtenus avec le Vectrino <sup>MC</sup> . Le tableur suivant considère que lorsque l'écoulement est en régime permanent, les débits dans le système sont tous le même. Ainsi en utilisant le rapport entre la section la conduite de la pompe et le canal d'acrylique, il est possible d'obtenir les vitesses réciproques.	70
Figure 48.	Circuit hydraulique, en boucle fermée, du système de recirculation utilisé dans le calcul des débits	71

Figure 49.	Statif coulissant du scanographe se déplaçant sur quatre rails parallèles le long du canal à surface libre, qui repose sur la table d'examen.	74
Figure 50.	Capture d'écran de l'onglet Scan de l'interface d'opération du scanographe. (A) Épaisseur et nombre de tranches (0.6 mm). (B) Déplacement du statif sur 0 mm. (C) Nombre de répétitions de la séquence ou groupes de tranches (100 groupes de 30 tranches). (D) Temps nécessaire à la mesure d'un groupe de tranches ou volume (1 s.). (E) Temps d'attente entre chacun des 100 volumes mesurés (30.0 s). (F) Durée totale de l'examen (2971 s). (G) protocole d'examen utilisé, séquence abdominale (" <i>abdomen sequence</i> ").	78
Figure 51.	Capture d'écran de l'onglet Routine de l'interface d'opération du scanographe. (A) Nombre de fichiers générés par la numérisation de 100 groupes de 30 tranches.	79
Figure 52.	Canal à surface libre en acrylique passant au travers du statif coulissant du scanographe. Aussi illustré, le volume mesuré par le scanographe en mode approche de mesure par événements périodiques (300 mm x 300 mm x 18 mm).	80
Figure 52.	Équation de correction pour le canal en boucle vertical. (Montreuil, 2006)	84
Figure 54.	Image d'une boîte d'acrylique utilisée dans les pré-tests (300 x 300 x 300 mm). La boîte est remplie d'une couche de sable de quartz, puis déposée sur la table d'examen (parallélogramme en bas d'image). L'image est d'une dimension de 350 mm (512 pixels) x 350 mm (512 pixels) pour une dimension de voxels de 0.68 mm x 0.68 mm x 0.60. En (A), la reconstruction est réalisée avec un filtre (" <i>Convolution Kernel</i> ") B80s. En (B), la reconstruction est réalisée avec un filtre (" <i>Convolution Kernel</i> ") B50s. En (C), la reconstruction est réalisée avec un filtre (" <i>Convolution Kernel</i> ") B20s	87

- Figure 55. Profils de densité relative (HU) mesurés verticalement dans une couche de sable de quartz, utilisé dans les pré-tests. Les profils sont extraits dans une épaisseur de sable d'environ 35 mm. En (A), profils associés à la reconstruction réalisée avec un filtre ("*Convolution Kernel*") B80s. En (B), profils associés à la reconstruction réalisée avec un filtre ("*Convolution Kernel*") B50s. En (C), profils associés à la reconstruction réalisée avec un filtre ("*Convolution Kernel*") B20s 88
- Figure 56. Graphique de l'écart-type dans l'axe des z. Les valeurs supérieures sont causées par les joints d'acryliques et par le passage entre le flanc de progradation et le flanc d'érosion (Montreuil et al., 2008). 89
- Figure 57. Image scanographique du canal en boucle verticale. Effet du durcissement de faisceau et effet Compton. L'image montre, dans le haut, l'attache de la trappe, dans les côtés les ancrages et en bas la table d'examen. 91
- Figure 58. (A) Graphique théorique de l'atténuation d'un demi-artéfact circulaire. (B) Graphique de l'amplitude d'un demi-artéfact circulaire mesuré en HU directement sur l'image DICOM extraite de mesures faites sur le canal, contenant les valeurs brutes non traitées ou corrigées. (C) Graphique de l'amplitude d'un demi-artéfact circulaire mesuré en HU directement sur l'image DICOM extraite de mesures faites en l'absence du canal (mesurée dans l'air). 94
- Figure 59. Courbes granulométriques du sédiment identifié 705 (Annexe 1). La granulométrie est effectuée par tamisage selon la norme ASTM E 11-87. L'échantillon témoin est celui prélevé directement dans la réserve de sable. La série 5 renferme les données du manufacturier et les échantillons 1 à 3 renferment les mesures réalisées au sommet, au centre et à la base de la ride. Ces derniers échantillons sont prélevés à la fin de l'expérience ceci dans le but de détecter toute modification du sable d'origine. 96

- Figure 60. Contours isométriques de densité d'une ride au temps  $t = 0$  s du retrait de l'eau du canal, la vitesse d'origine du fluide étant d'environ  $31.1 \text{ cm s}^{-1}$ . La figure couvre une dimension de 120 mm de longueur par 66 mm de hauteur. Le diamètre médian  $d_{50}$  du sable de quartz est de 0.250 mm. La barre de couleur indique la valeur de la densité des contours et l'échelle du bas est comprimée afin de discriminer les densités élevées, mesurées au centre du canal. 98
- Figure 61. Contours isométriques de densité d'une ride après  $t = 7$  min et  $t = 22$  min. La figure couvre une dimension de 120 mm de longueur par 66 mm de hauteur. Le diamètre médian  $d_{50}$  du sable de quartz est de 0.250 mm. La barre de couleur indique la valeur de la densité des contours. 99
- Figure 62. Contours isométriques de densité d'une ride à  $t = 40$  min et  $t = 54$  min après le retrait de l'eau du canal incluant la présence d'air en surface. La figure couvre une dimension de 120 mm de longueur par 66 mm de hauteur. Le diamètre médian  $d_{50}$  du sable de quartz est de 0.250 mm. La barre de couleur indique la valeur de la densité des contours. En a, des laminations sous l'influence du vortex d'érosion, visibles sur une profondeur beaucoup plus importante que dans la littérature. En b, des lamines de progradation et en c, des lamines de progradation apparaissent comme horizontales, donc indétectables. 100
- Figure 63. Contours isométriques de densité d'une ride à  $t = 1\text{h}54$  après le retrait de l'eau du canal et la présence d'air en surface. La figure couvre une dimension de 120 mm de longueur par 66 mm de hauteur. Le diamètre médian  $d_{50}$  du sable de quartz est de 0.250 mm. La barre de couleur indique la valeur de la densité des contours. Les flèches indiquent des lamines de transport, en rose, et des lamines de progradation, bleue, apparaissent suivant l'angle de déposition. 101
- Figure 64. Contours isométriques de densité d'une ride à  $t = 2\text{h}54$  après le retrait de l'eau du canal et la présence d'air en surface. La figure

couvre une dimension de 120 mm de longueur par 66 mm de hauteur. Le diamètre médian  $d_{50}$  du sable de quartz est de 0.250 mm. La barre de couleur indique la valeur de la densité des contours.

101

Figure 65. Contours isométriques d'une ride à  $t = 24h$  et  $t = 44h$  après le retrait de l'eau du canal. La figure couvre une dimension de 120 mm de longueur par 66 mm de hauteur. (a) Lames de progradation visibles au travers des porosités ouvertes et fermées qui sont définies par de fines couches en surface de la ride, mais aussi par le classement des grains. (b) Pseudo-liquéfaction visible en couche proportionnelle à la quantité d'eau en circulation dans la ride se caractérise par des laminations parallèles avec une épaisseur homogène. (c) Lames de transport horizontale sous la ride suivie de la concrétisation des lames de progradation et des traces d'avalanches. La barre de couleur indique la valeur de la densité des contours.

102

Figure 66. Les profils de densité 8 à 12 de l'expérience 1 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 42.3$  cm  $s^{-1}$ . (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge, les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Les lignes pointillées indiquent les limites de la couche supérieure de transport par charriage.

109

Figure 67. Les profils de densité 17 à 26 de l'expérience 1 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 42.3$  cm  $s^{-1}$ . (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Au profil-24,

la flèche indique le point d'inflexion et la couche d'inflexion qui s'additionne à la couche supérieure de transport par charriage. 113

Figure 68. Les profils de densité 27 à 31 de l'expérience 1 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 42.3$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. 116

Figure 69. Les profils de densité 32 à 36 de l'expérience 1 sont mesurées avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 42.3$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Les flèches noires pointent une discontinuité dans le passage suspension/charriage. Les flèches rouges pointent une réduction de densité avant le passage. 119

Figure 70. Les profils de densité 39 à 54 de l'expérience 1 sont mesurées avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 42.3$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Les flèches pointent un cisaillement dans le profil de densité de la suspension. 122

Figure 71. Représentation graphique des indices  $j$  et  $m$  de l'expérience 1. L'évolution des indices est présentée en fonction des numéros de profils. L'indice  $j$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la variation de la densité dans la couche. L'indice  $m$  est le rapport entre l'épaisseur de la

couche supérieure de transport par charriage et la densité moyenne dans la couche.

124

Figure 72. Les profils de densité 22 à 30 de l'expérience 2 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 31.0$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Profil-26, en (1) le point de frontière prévu et en (2) le point de frontière réel. Profil-30, en (3), le point de frontière.

127

Figure 73. Les profils de densité 32 à 44 de l'expérience 2 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 31.0$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage.

130

Figure 74. Représentation graphique des indices  $j$  et  $m$  de l'expérience 2. L'évolution des indices est présentée en fonction des numéros de profils. L'indice  $j$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la variation de la densité dans la couche. L'indice  $m$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la densité moyenne dans la couche.

132

Figure 75. Les profils de densité 10 à 50 de l'expérience 3 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.250$  mm et  $U = 31.1$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Les flèches indiquent des transitions à l'approche du point de frontière.

135

- Figure 76. Les profils de densité 60 à 100 de l'expérience 3 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.250$  mm et  $U = 31.1$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. La flèche indique un point de frontière avec une régression typique du sommet de la ride. La ligne pointillée délimite la zone active (dessus) de la zone inactive. 138
- Figure 77. Représentation graphique des indices  $j$  et  $m$  de l'expérience 3. L'évolution des indices est présentée en fonction des numéros de profils. L'indice  $j$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la variation de la densité dans la couche. L'indice  $m$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la densité moyenne dans la couche. 140
- Figure 78. Les profils de densité 2 à 18 de l'expérience 4 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.200$  mm et  $U = 34.7$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Les flèches pointent l'évolution du point d'inflexion. 142
- Figure 79. Les profils de densité 23 à 65 de l'expérience 4 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.200$  mm et  $U = 34.7$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Les flèches

indiquent les discontinuités dans la transition de la couche supérieure de transport par charriage.

145

- Figure 80. Les profils de densité 66 à 76 de l'expérience 4 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.200$  mm et  $U = 34.7$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Les flèches pointent des cassures dans les profils de suspension pouvant provenir du vortex responsable de l'érosion.

148

- Figure 81. Représentation graphique des indices  $j$  et  $m$  de l'expérience 4. L'évolution des indices est présentée en fonction des numéros de profils. L'indice  $j$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la variation de la densité dans la couche. L'indice  $m$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la densité moyenne dans la couche.

150

- Figure 82. Les profils de densité 2 à 18 de l'expérience 5 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.120$  mm et  $U = 28.6$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Les flèches pointent sur les parties non-homogènes du profil de concentration.

152

- Figure 83. Les profils de densité 30 à 54 de l'expérience 5 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.120$  mm et  $U = 28.6$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage.

155

- Figure 84. Les profils de densité 60 à 100 de l'expérience 5 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.120$  mm et  $U = 28.6$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. 158
- Figure 85. Représentation graphique des indices  $j$  et  $m$  de l'expérience 5. L'évolution des indices est présentée en fonction des numéros de profils. L'indice  $j$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la variation de la densité dans la couche. L'indice  $m$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la densité moyenne dans la couche. 160
- Figure 86. Les profils de densité 50 à 130 de l'expérience 6 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.120$  mm et  $U = 21.9$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. Contrairement aux autres expériences, cette formation est un lit plat. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Les flèches pointent sur les variations subtiles, à la fin de la transition. 162
- Figure 87. Les profils de densité 150 à 230 de l'expérience 6 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.120$  mm et  $U = 21.9$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. 165

- Figure 88. Les profils de densité 250 à 330 de l'expérience 6 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.120$  mm et  $U = 21.9$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. 168
- Figure 89. Représentation graphique des indices  $j$  et  $m$  de l'expérience 6. L'évolution des indices est présentée en fonction des numéros de profils. L'indice  $j$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la variation de la densité dans la couche. L'indice  $m$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la densité moyenne dans la couche. 170
- Figure 90. Figure synthèse des profils de densité représentant l'érosion à la base du flanc d'érosion, pour l'ensemble des granulométries et des vitesses de courant des expériences 1 à 5. (a) expérience 1, (b) expérience 2, (c) expérience 3, (d) expérience 4 et (e) expérience 5. 175
- Figure 91. Figure synthèse des profils de densité exprimant la progression de l'érosion du milieu vers le bas du flanc d'érosion, dans un intervalle de temps, pour l'ensemble des granulométries et des vitesses de courant des expériences 1-2 et 4-5. (a et b) expérience 1, (c) expérience 2, (d) expérience 4 et (e) expérience 5. 176
- Figure 92. Figure synthèse des profils de densité représentant l'érosion de la partie sommitale, pour l'ensemble des granulométries et des vitesses de courant des expériences 1 à 5. (a et b) expérience 1, (c) expérience 2, (d) expérience 3, (e) expérience 4 et (f) expérience 5. 177
- Figure 93. Figure synthèse des profils de densité exprimant la progression de la déposition dans un intervalle de temps, pour l'ensemble des

granulométries et des vitesses de courant des expériences 1 à 5. (a et b) expérience 1, (c) expérience 2, (d) expérience 3, (e) expérience 4 et (f) expérience 5.

178

Figure 94. Profils de densité 80 à 100 mesurée dans la zone de recirculation, à la base du flanc d'érosion avec  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 29.7$  cm s<sup>-1</sup>. Les profils (a) sont séparés par un intervalle de temps de 30 secondes et présentés par des pas de 5, pour un espacement de 150 secondes entre les mesures présentées en (b) et (c), où (1 à 4) pointent la pénétration de l'eau dans la matrice sédimentaire. Les lignes horizontales en (b) délimitent la zone de recirculation.

180

Figure 95. Profils de densité 55 à 75 mesurée dans la zone de recirculation, à la base du flanc d'érosion avec  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 29.7$  cm s<sup>-1</sup>. Les profils (a) sont séparés par un intervalle de temps de 30 secondes et présentés par pas de 5, pour un espacement de 150 secondes entre les mesures présentées en (b) et (c). Les lignes horizontales en (b) délimitent la zone de recirculation. Les barres noires montrent l'évolution de la suspension. En 1, l'eau pénètre dans la matrice par rapport au profil précédent et en 2, il y a compaction du lit, au dessus de l'eau présentent dans la matrice.

182

Figure 96. Profils de densité 60, 62 et 64, mesurées à droite de la partie creuse de la zone de recirculation, à la base du flanc d'érosion avec  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 29.7$  cm s<sup>-1</sup>. Les profils sont séparés de 60 secondes. (a) Déposition de sédiments entre le Profil-62 et le Profil-64, accompagnée d'une augmentation de la densité de 1.709 vers 1.788 g cm<sup>-3</sup>. (b) Augmentation de la densité à la base de la couche de transport en suspension (1.311 g cm<sup>-3</sup>) sur une épaisseur de 4.13 mm.

183

Figure 97. Profils de densité 30 à 50 mesurée dans la zone de recirculation, à la base du flanc d'érosion avec  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 29.7$  cm s<sup>-1</sup>. Les profils (a) sont séparés par un intervalle de temps de 30 secondes et présentés par pas de 5, pour un espacement de 150 secondes entre les mesures présentées en (b) et (c). Les lignes horizontales en (b) délimitent la zone de recirculation.

184

- Figure 98. Profils de densité 35, 37 et 39 mesurée à gauche de la partie creuse de la zone de recirculation, à la base du flanc d'érosion avec  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 29.7$  cm s<sup>-1</sup>. Les profils sont séparés par 60 secondes. (a) Absence d'érosion entre le Profil-37 et Profil-39 jusqu'à l'atteinte de densité de 1.757 g cm<sup>-3</sup> à une élévation de 35.4 mm et apparition d'un double point d'inflexion (point vert). (b) Diminution du point de densité maximale de 1.14 mm. (c) Fluctuations de la densité entre les profils 37, 35 et 39 (entre 1.862 et 1.947 g cm<sup>-3</sup>). 185
- Figure 99. Profils de densité 5 à 25 mesurée dans la zone de recirculation, à la base du flanc d'érosion. Les profils (a) sont séparés par un intervalle de temps de 30 secondes et présentés par pas de 5, pour un espacement de 150 secondes entre les mesures présentées en (b) et (c). Les lignes horizontales en (b) délimitent la zone de recirculation. 187
- Figure 100. Profils de densité 25 à 30, mesurée au début de la zone de recirculation, à la base du flanc d'érosion. Les profils sont séparés de 150 secondes. (a) Érosion de 1.27 mm dans la couche de transport par charriage. (b) Densité constante (1.952 g cm<sup>-3</sup>). (c) Diminution de l'élévation du point de frontière (41.89 mm vers 38.35 mm) et augmentation de sa densité (1.158 vers 1.318 g cm<sup>-3</sup>). 188
- Figure 101. Représentation graphique de l'élévation du point de frontière et du point de densité maximale de l'expérience 7. La granulométrie est de 0.470 mm et la vitesse de 29.7 cm s<sup>-1</sup>. Les lignes noires sont des indicateurs visuels permettant de définir des zones d'évolution mais aussi des discontinuités qui se répètent sur toutes les expériences. Le cercle indique une variation typique qui se retrouve au flanc de progradation. 190
- Figure 102. Représentation graphique de l'élévation du point de frontière et du point de densité maximale de l'expérience 1. La granulométrie est de 0.470 mm et la vitesse de 42.3 cm s<sup>-1</sup>. 191

Figure 103.	Représentation graphique de l'élévation du point de frontière et du point de densité maximale de l'expérience 5. La granulométrie est de 0.120 mm et la vitesse de 28.6 cm s <sup>-1</sup> .	191
Figure 104.	Représentation graphique de l'élévation du point de frontière et du point de densité maximale de l'expérience 4. La granulométrie est de 0.200 mm et la vitesse de 34.7 cm s <sup>-1</sup> .	192
Figure 105.	Densité maximale, localisée sur la fin de la transition de la couche supérieure du transport par charriage, mesurée dans les profils résultant d'une technique de mesure de volume global. La courbe de densité est superposée sur l'image à rayon X de la ride. Les couleurs représentent la densité mais à titre indicatif seulement.	194
Figure 106.	Densité maximale, localisée sur la fin de la transition de la couche supérieure du transport par charriage. La courbe de densité est superposée sur l'image à rayon X de la ride.	195
Figure 107.	Densité maximale, localisée sur la fin de la transition de la couche supérieure du transport par charriage, mesurée dans les profils résultant de l'expérience 1. La courbe de densité est superposée sur l'image à rayon X de la ride. La technique de mesure au scanographe utilisée est celle de l'approche de mesure par événement périodique.	195
Figure 108.	Profils de porosité moyenne au sommet de la ride (15, 16 et 17) et profils de porosité du creux de la ride (29, 30 et 31). Profils de porosité obtenus des profils de densité de l'expérience 1 ( $d_{50} = 0.470$ mm et $U = 42.3$ cm s <sup>-1</sup> ).	197
Figure 109.	Profils de porosité moyenne au sommet de la ride (25, 90 et 130) et profils de porosité du creux de la ride (150, 230 et 310). Profils de porosité obtenus des profils de densité de l'expérience 2 ( $d_{50} = 0.470$ mm et $U = 31.0$ cm s <sup>-1</sup> ).	198
Figure 110.	Profils de porosité moyenne au sommet de la ride (29, 30 et 31) et profils de porosité du creux de la ride (43, 44 et 45). Profils de porosité obtenus des profils de densité de l'expérience 2 ( $d_{50} = 0.120$ mm et $U = 28.8$ cm s <sup>-1</sup> ).	198

Figure 111.	Profils de porosité moyenne au sommet de la ride (5, 7 et 9) et profils de porosité du creux de la ride (93, 95 et 97). Profils de porosité obtenus des profils de densité de l'expérience 2 ( $d_{50} = 0.120$ mm et $U = 21.9$ cm s <sup>-1</sup> ).	198
Figure 112.	Profil de viscosité dynamique sur la partie haute de flanc d'érosion.	200
Figure 113.	Profil de viscosité dynamique sur la partie basse du flanc d'érosion.	200
Figure 114.	(A) Profils de porosité représentant les trois types emplacements de mesure. (a) Le sommet de la ride. (b) Un monticule. (c) Le creux de la ride. Modifiée de Wheatcroft (2002). (B) Profils de porosité (au tomographe) mesurés au sommet d'une ride (Profil-17) et mesurée dans le creux d'une ride (Profil-29) lors de l'expérience 2. Les flèches et les cercles indiquent les similitudes entre les profils en A et B.	205
Figure 115.	(a) Description des lamines et des écailles selon Reineck & Singh (1975). (b) Contours isométriques du lit sédimentaire à $t = 44$ heures. (c) Contours isométriques du lit sédimentaire à $t = 7$ min.	209
Figure 116.	Profil de forme typique de la partie basse du flanc d'érosion et du flanc de progradation. (a) Limite de la surface de l'eau. (b) Limite supérieure de transport en suspension. (d) Point de frontière. (e) Couche de transport en suspension. (f) Couche supérieure de transport par charriage.	213
Figure 117.	Profil de forme typique de la partie sommitale du flanc d'érosion. En rouge, forme logarithmique typique d'un profil de suspension. (c) Limite supérieure de la sous-couche de fluide. (d) Point de frontière de faible densité, est aussi la limite inférieure de la sous-couche fluide. (l) Point de densité maximale. (m) Limite inférieure de basse densité.	214
Figure 118.	Illustration des profils verticaux de vitesses et de concentrations de sédiments en suspension. D'après Liu (2001).	215

Figure 119.	Agrandissement de la couche d'inflexion de la figure 113 (g) et le point d'inflexion (k) scindant la couche supérieure de transport par charriage (f) en deux parties (g et h). (l) Point de densité maximale. (m) Limite inférieure de basse densité. (i) Couche intermédiaire de transport par charriage. (j) Couche inférieure de transport par charriage.	215
Figure 120.	Profils de densité dans la partie basse du flanc d'érosion et position du vortex au-dessus du lit, en fonction des influences de ce dernier sur le lit sédimentaire.	225
Figure 121.	Mesure des couches par densité incluant la zone d'intrusion, de migration et d'éjection du fluide ainsi que l'épaisseur de la couche de transport en suspension (S) et de la couche supérieure de transport par charriage (C). (Montreuil & Long, 2011).	226
Figure 122.	Mesures des vecteurs de vitesse présentes au-dessus du flanc de progradation et de la base du flanc d'érosion. (Crédit : Équipe du Professeur Bernard Long)	227
Figure 123.	Représentation graphique de l'élévation du point de frontière et du point de densité maximale de l'expérience 4. Cette expérience est réalisée avec une granulométrie ayant une médiane de 0.200 mm et une vitesse de 34.7 cm s <sup>-1</sup> .	231
Figure 124.	Définition des sections d'une ride modifiée de Reineck & Singh (1975). En A s'ajoute le point d'arrondie, où la ride linéaire amorce un rayon de courbure formant le sommet de la ride.	232
Figure 125.	Définition des couches internes d'une ride, modifiée de Reineck & Singh (1975). L'architecture interne de la ride est caractérisée par trois types de couches, soit : les lamines de transport dorsale et sommitale, les écailles de progradation et la lamine basale.	232
Figure 126.	Profils de viscosité dynamique sur la partie basse du flanc d'érosion (bleu) et sur la partie sommitale (noir).	235
Figure 127.	La contrainte de cisaillement total $\tau_T$ dans un canal à surface libre et une fonction linéaire fonction de la profondeur. Au-delà de la	

hauteur  $\delta$ , le transfert d'énergie est donné seulement par la contrainte de cisaillement  $\tau_t$ . À proximité du fond, la contrainte de cisaillement est donnée par la rugosité du lit  $k_s$ , qui est essentiellement fonction de la topographie du lit. (Gyr & Hoyer, 2006).

236

Figure 128. La contrainte de cisaillement total  $\tau_t$  est une fonction linéaire fonction de la profondeur. (Liu, 2001).

236

Figure 129. Nouvelle définition de la contrainte de cisaillement qui comprend la pénétration d'eau dans les sédiments et l'augmentation de la profondeur à laquelle le transport des sédiments est mesuré en fonction des paramètres sédimentologiques actifs. USP : limite supérieure de la suspension, STZ : zone de transport par suspension, FDP : point de frontière, MDP : point de densité maximale et UBTZ : couche supérieure de transport par charriage.

237

Figure 130. Profil de forme typique de la partie basse du flanc d'érosion et du flanc de progradation. (a) Limite supérieure de transport en suspension. (b) Couche de transport en suspension. (c) Point de frontière. (d) Couche supérieure de transport par charriage (e) Sous couche d'inflexion. (f) Point d'inflexion. (g) Point de densité maximale. (h) Limite inférieure de basse densité (i) Couche intermédiaire de transport par charriage. (j) Couche inférieure de transport par charriage. (k) Sous couche fluide. (l) Limite inférieure du transport par suspension (seulement en présence d'une sous couche fluide).

243

Figure 131. Courbes granulométriques, du sable identifié comme Flint Silica de la Bell & Mackenzie Co Ltd, réalisées selon le standard (ASTM E 11-87).

263

Figure 132. Courbes granulométriques, du sable identifié comme No 505 de la Bell & Mackenzie Co Ltd, réalisées selon le standard (ASTM E 11-87).

263

Figure 133.	Courbes granulométriques, du sable identifié comme No 530 de la Bell & Mackenzie Co Ltd, réalisées selon le standard (ASTM E 11-87).	264
Figure 134.	Courbes granulométriques, du sable identifié comme No 705 de la Bell & Mackenzie Co Ltd, réalisées selon le standard (ASTM E 11-87).	264
Figure 135.	Courbes granulométriques, du sable identifié comme sable d'Ottawa de couleur rose (fournisseur inconnu), réalisées selon le standard (ASTM E 11-87).	265
Figure 136.	Courbes granulométriques, du sable identifié comme C-109 de la Cie Accusand, réalisées selon le standard (ASTM E 11-87).	265
Figure 137.	Capteur Doppler de la partie descendante du canal	266
Figure 138.	Capteur Doppler et trajectoire de l'onde sonique (Controlotron, 2006).	267
Figure 139.	Schéma du canal en boucle verticale	268
Figure 140.	Canal en boucle verticale : (1) trappe d'accès aux sédiments de 457 mm X 380 mm ; (2) dispositifs de retenu en nylon ; (3) couche de sédiments.	269
Figure 141.	Canal en boucle verticale : dispositifs de drainage à deux niveaux et statif coulissant. Vanne à poignée noire de 2.5 cm de diamètre utilisée pour la vidange du fluide et vanne à poignée rouge utilisée pour l'évacuation des fluides et d'une partie des sédiments.	270
Figure 142.	Dessin du canal à surface libre projeté et réalisé. (Conception : S. Montreuil ; Dessin : P. Labonté)	271
Figure 143.	Matériaux disponibles pour la réalisation des diffuseurs. De gauche à droite, fibres de carton alvéolées plastifiées, feuilles de plastique perforées de trous d'un diamètre de 20 mm, feuilles de plastique d'alvéoles carrées de 5mm coupées et regroupées pour obtenir un cube de 300mm x 300mm x 300mm.	272
Figure 144.	Courbe de la pompe MEGGA PCF-4L, 10 HP, 5 pouces, (Megga, 2003)	273

Figure 145.	Circuit hydraulique, en boucle fermée, du système de recirculation utilisé dans le calcul des débits	274
Figure 146.	Courbe de la pompe définie selon les spécifications du fabricant. (Megga, 2003)	277
Figure 147.	Courbe de perte de charge de la vanne principale, " <i>stainless steel lined resilient seated knife gate valve</i> " (Familian Northwest, 2005).	277
Figure 148.	Photographie du joint d'étanchéité déformable de 25.4 mm installé entre la partie d'acrylique et le réservoir.	280
Figure 149.	Statif coulissant du scanographe se déplaçant sur quatre rails parallèles le long du canal à surface libre, qui repose sur la table d'examen.	281
Figure 150.	Courbe du courant théorique et pratique en fonction de l'ouverture de la vanne principale dans la plage d'opération.	282
Figure 151.	Photographie représentant les conduites flexibles installées dans la boucle de recirculation de la pompe.	282
Figure 152.	Photographie représentant le canal d'acrylique à surface libre ainsi que le champ de rides obtenu avec le sable de quartz ( $d_{50} = 0.120$ mm) et un courant d'environ $30 \text{ cm s}^{-1}$ . (a) section de l'écoulement instable, en sortie du diffuseur et (b) section stabilisée de l'écoulement, où se trouve le volume mesuré par le scanographe.	283
Figure 153.	Feuille de données techniques typiques des sédiments de la formation Ottawa comprenant l'analyse chimique du minéral.	287
Figure 154.	Algorithme type utilisé pour coder le programme d'ouverture, de traitement et d'analyse des points et couches.	288

## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

<b>Sigles</b>	<b>Expression anglaise</b>	<b>Sigles</b>	<b>Expression française</b>
	Summitpoint		Point sommital
	Brinkpoint		Point de rupture
	Toepoint		Point de base de la sédimentation
	Troughpoint		Base du flanc d'érosion
	Stoss-side		Flanc d'érosion
	Slipface		Flanc d'avalanches
	Lee-side		Flanc de progradation
	Stoss-side laminae		Lamines de remaniement
	Bottom set laminae		Lamines basales
	Fore set laminae		Écailles de progradation
USP	Upper suspension point		Limite supérieure de transport en suspension
VSZ	Viscous sublayer zone		Sous-couche visqueuse
FSP	Fluid sublayer point	LSSF	Limite supérieure de la sous-couche fluide
FDP	Frontier density point	PF, PDF	Point de frontière
MDP	Maximum density point	PDM	Point de densité maximale
LDP	Lower density point	PDI	Limite inférieure de basse densité
IDP	Inflexion density point	PI	Point d'inflexion
STZ	Suspended transport zone	CTS	Couche de transport en suspension
FSZ	Fluide sublayer zone	SCF	Sous-couche fluide
UBTZ	Upper bedload transport zone	CSTC	Couche supérieure du transport par charriage
IZ	Inflexion Zone	CI	Sous-couche d'inflexion
MBTZ	Middle bedload transport zone	CITC	Couche intermédiaire du transport par charriage
LBTZ	Lower bedload transport zone	CIcC	Couche inférieure du transport par charriage
		ZTS	Zone de transport en suspension

<b>Sigles</b>	<b>Expression anglaise</b>	<b>Sigles</b>	<b>Expression française</b>
		ZTC	Zone de transport par charriage
		ZTSC	Zone supérieure de transport par charriage
		ZITC	Zone intermédiaire de transport par charriage
GVT	Global Volume Technique	AGVT	Approche globale de mesure du transport
PSVT	Periodic Single Volume Technique	AMÉP	Approche de mesure par événement périodique
CT-Scanner CAT-Scan CT-Scan	Computed axial tomography		Science : tomodensitométrie Appareil : scanographe
IRP	In-situ resistivity profiler		Profileur par résistivité
PIV	Particule image velocimetry		
		TACO	Tomographie axiale calculée par ordinateur
2D	Two dimensions	2D	Deux dimensions
3D	Tree dimensions	3D	Trois dimensions
4D	Four dimensions	4D	Quatre dimensions
pixel	Picture element	pixel	Unité de base de la définition d'une image numérique matricielle
voxel	Volume element	Voxel	Pixel à trois dimensions
		IFT	Tomographie des écoulements incompressibles
HP	Horse power	HP ou CV	Chevaux vapeur
USGPS	US gallon per seconde	USGPS	Gallon par seconde (US)
MAPLE	Multi-beam autonomous portable laser	MAPLE	Laser autonome portable multi-faisceau
LiDAR	Light detection and ranging		
		AGMT	Approche globale de mesure du transport

<b>Sigles</b>	<b>Expression anglaise</b>	<b>Sigles</b>	<b>Expression française</b>
RAM	Random (read/write) access memory	RAM	Mémoire vive
		AMÉP	Approche de mesure par évènement périodique
PC	Personal computer	PC	Ordinateur personnel
DICOM	Digital imaging and communications in medecine	DICOM	Protocole d'encodage des images médicales.
ASTM	American Society for Testing and Materials		
		SI	Système international d'unité
mAs	Milliampere second	mAs	Milliampère seconde
KeV	Kilo electron volt	KeV	Kilo electron volt

<b>Symbole</b>	<b>Unité</b>	<b>Description</b>
$\delta$	m	Hauteur
$\delta y$	mm	Sous-couche visqueuse
$\Delta$	m	Hauteur d'une ride
$\Delta_i$	m	Hauteur d'une ride d'indice i
$\Lambda$	m	Longueur ou période de la ride
$\Lambda_r$	m	Longueur de la ride
$\Lambda_d$	m	Longueur de la dune
$\Lambda_i$	m	Longueur d'une séquence érosion/déposition d'une ride
$\varepsilon$		Porosité du mélange
$\lambda$		Facteur de correction de la porosité
$\mu$	kg s m <sup>-2</sup>	Viscosité dynamique du fluide
$\mu$		Coefficient d'atténuation
$\mu_l$	kg s m <sup>-2</sup>	Viscosité interne du charriage
$\mu$	g cm <sup>-3</sup>	Densité du fluide
$\mu_s$	kg s m <sup>-2</sup>	Viscosité dynamique du fluide
$\Theta$	degré	Angle de la zone de déposition
$\rho$	g cm <sup>-3</sup>	Densité du fluide
$\rho_s, \rho_{mix}$	g cm <sup>-3</sup>	Densité du mélange eau-sédiment
$\rho_r$	HU	Densité relative du mélange eau-sédiment
$\tau$	Pa	Contrainte de cisaillement
$\tau_0$	Pa	Contrainte de cisaillement moyenne
$\tau_t$	Pa	Composante linéaire de la contrainte de cisaillement turbulente
$\tau_v$	Pa	Contrainte de cisaillement visqueuse
$\tau_w$	Pa	Contrainte de cisaillement à la couche limite (parois)
$\tau_z$	Pa	Contrainte de cisaillement totale
$\vartheta, \nu$	m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	Viscosité cinématique
$a$	mm	Épaisseur de la frontière
$A_{max}$	HU	Amplitude maximale
$C$		Concentration de sédiment dans le fluide
$C_a$		Concentration de référence
$C_D$		Coefficient de friction

<b>Symbole</b>	<b>Unité</b>	<b>Description</b>
D	mm	Diamètre médian des grains
D	m	Largeur
d	mm	Profondeur moyenne du lit sédimentaire
d	mm	Distance
d	mm	Profondeur d'eau
d <sub>c</sub>	m	Profondeur d'eau critique
D <sub>ss</sub>	m	Distance entre la source et l'émetteur radio actif
d <sub>50</sub>	mm	Granulométrie médiane
d <sub>84</sub>	mm	84 <sup>ème</sup> percentile de la taille des sédiments
ΔE	KeV	Variation d'énergie
E	cm	Épaisseur du transport
E	joule	Énergie totale d'un système
F <sub>D</sub>	Kg m s <sup>-2</sup>	Force de trainée
Fr		Nombre de Froude
g	cm s <sup>-2</sup>	Accélération gravitationnelle
HU		Unité Hounsfield
H	m	Hauteur de la ride
H	m	Hauteur de tête d'eau
h	m	Hauteur d'eau
h <sub>sed</sub>	mm	Hauteur de sédiments
I	Bq	Intensité d'un flux radio actif
i		Indice numérique
l <sub>u</sub>	cm	Longueur de la ride
I <sub>0</sub>	KeV	Intensité initiale du rayon X
I <sub>0</sub>	Bq	Intensité initiale d'un flux radio actif
j	cm cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup>	Rapport entre l'épaisseur de la couche et la densité moyenne de la couche
k <sub>s</sub>	mm	Rugosité du lit sédimentaire ou hauteur du lit sédimentaire
K <sub>s</sub>	mm	Hauteur de la rugosité du lit (1 à 3.5 fois d <sub>84</sub> )
K <sub>UBTZ</sub>	mm	Hauteur de la rugosité de la couche supérieure de transport par charriage

<b>Symbole</b>	<b>Unité</b>	<b>Description</b>
L	m	Longueur de la ride
L1		Rapport de projection horizontale du flanc d'érosion
L2		Rapport de projection horizontale du flanc de progradation
$L_i$	m	Période d'une ride d'indice i
$L_s$	m	Longueur du flanc d'érosion
m	$\text{mm s}^{-1}$	Pente de la transition de la densité
m	$\text{cm cm}^3 \text{g}^{-1}$	Rapport entre l'épaisseur de la couche de transport et la variation de densité dans la couche (aussi appelé la pente)
$M_d$	mm	Diamètre médian des grains
n		Coefficient de Manning
$P_c$	Pa	Pression au sommet d'une ride
$P_r$	mm	Profondeur de la référence de la ride (datum)
Q	$\text{m}^3$	Volume du fluide
$Q_b$	$\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-1}$	Transport par charriage
$q_s$	$\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-1}$	Transport par charriage
r	mm	Rayon d'un cercle
Re		Nombre de Reynolds
s		Gravitation spécifique
S		Pente du lit sédimentaire
T	s	Période d'une ride
T	s	Période de migration
t	s	Temps
U	$\text{cm s}^{-1}$	Vitesse du courant
$U_*$	$\text{m s}^{-1}$	Vitesse de cisaillement
u	$\text{m s}^{-1}$	Vitesse du fluide le long de la frontière
u	$\text{cm s}^{-1}$	Vitesse du fluide
u	$\text{cm s}^{-1}$	Vitesse du fluide à une hauteur y
$u'$	$\text{cm s}^{-1}$	Vitesse efficace (RMS) d'un fluide
V	$\text{cm s}^{-1}$	Vitesse moyenne du fluide dans le canal
V	$\text{cm s}^{-1}$	Vitesse du fluide
$V_{\text{mean}}$	$\text{cm s}^{-1}$	Vitesse moyenne du fluide

<b>Symbole</b>	<b>Unité</b>	<b>Description</b>
$V_m$	$\text{cm s}^{-1}$	Vitesse de migration du sédiment
$V_m$	$\text{cm s}^{-1}$	Vitesse moyenne du fluide dans une section rectangulaire
$V_R$	$\text{cm s}^{-1}$	Vitesse moyenne réelle du fluide
$\nu_s$	$\text{Pa s}$	Viscosité dynamique
$w$	$\text{cm s}^{-1}$	Vitesse dans l'axe du fluide
$w_s$	$\text{cm s}^{-1}$	Vitesse d'initiation du transport sédimentaire
$x$	$\text{m}$	Distance parcourue par un électron
$y$	$\text{mm}$	Épaisseur de la couche limite
$y$	$\text{m}$	Hauteur de la colonne d'eau
$y_0$	$\text{m}$	Élévation de la surface de la ride
$z$	$\text{m}$	Hauteur d'eau
$z$	$\text{m}$	Épaisseur de sédiments
$Z_s$	$\text{m}$	Épaisseur d'eau

## INTRODUCTION

Malgré l'avènement de technologies toujours plus sophistiquées en dynamique sédimentaire tel que les échos sondeurs appuyés de logiciel de plus en plus sophistiqués ou l'usage en laboratoire du "*CT-Scanner*" (Montreuil, 2006 et Montreuil et al., 2008) et du vélocimètre acoustique Doppler (Wilson & Siegel, 2008), l'étude du transport des sédiments reste très actuelle (Dean, 1977; Damgaard & Soulsby, 1996; Hamilton et al., 2001; Miller, 1998; Dean & Dalrymple, 2002; Amoudry & Souza 2011).

La récente construction des îles sableuses de Dubaï (Kamphuis, 2006), l'érosion côtière en Gaspésie et aux Îles-de-la-Madeleine (Morneau et al., 2001 ; Xhardé et al., 2011) ou la remise en suspension des sédiments dans les canaux de France (Pham Van Bang et al., 2009) laisse entrevoir des besoins grandissants et diversifiés en matière d'analyse, de mesures et d'études des sédiments en milieu marin. De plus, les changements climatiques tel que les tempêtes, l'élévation du niveau marin (Houghton et al., 1996 ; Collin et al., 2008; Bolch et al., 2010; Valentina & Regine, 2011) rendent plus urgente encore la nécessité de comprendre les phénomènes qui régissent le transport des sédiments (Forbes et al., 1997).

Lors du mouvement des sédiments, l'architecture du lit sédimentaire évolue en fonction du milieu marin, des courants, de la nature et la disponibilité du sédiment (Gordon et al., 2004). Cette thèse fait suite aux travaux de Montreuil (2006) où les couches de transport par charriage, mesurées pour la première fois en mode dynamique, indiquent des subdivisions du transport qui ont conduit à l'élaboration d'une nomenclature de base des points et zones critiques montrant l'architecture interne d'un lit sédimentaire et la mise en place d'un vocabulaire (Nummedal et al., 1993; Allen & Posamentier, 1994; Van Wagoner, 1995). Même si les rides sableuses formées par les vagues sont majoritairement responsables de l'érosion des berges et des côtes (Carter et al., 1973; Blondeaux, 1990; Christensen et al., 1994), cette étude se concentre sur les courants stationnaires similaires aux courants des rivières et de marées (Yalin, 1992; DeHaan, 1998; Van Rijn, 1986, 2007) afin de jeter les bases d'un vocabulaire associé à une méthode de mesure et d'analyse qui pourra être repris lors de l'étude des vagues.

Les mesures réalisées de façon non intrusives et non destructives par le scanographe permettent d'observer le passage des sédiments transportés par charriage vers le transport en suspension, Montreuil (2006) s'étant limité à l'élaboration du canal et de la technique de mesure pour ensuite établir une définition des points et zones décrivant l'architecture d'un lit sableux.

Cette thèse vise donc à définir et à caractériser l'évolution du mélange eau-sédiments dans un champ de rides sableuses en migration sous un écoulement stationnaire. Ne voulant pas négliger et risquer d'omettre des phénomènes pouvant être jugés importants et, dans le souci de transmettre le plus fidèlement des informations utiles à la poursuite des travaux, les mesures ont été faites à partir de la surface de l'eau jusqu'à la base du lit sédimentaire. Par contre, les couches de transport par charriage ont été spécifiquement ciblées en raison de l'étude, à l'échelle d'une ride, du transport sédimentaire par charriage.

Premièrement, les mesures réalisés avec l'ensemble canal et scanographe donnent des résultats en 3D et 4D d'un champ de rides en migration. Les champs de rides sont étudiés à différentes phases de leur évolution en utilisant plusieurs vitesses de courant et plusieurs granulométries de sédiments. Des deux canaux développés et utilisés, le canal à surface libre a été conçu et optimisé spécifiquement pour travailler sous scanographe et étudier le transport sédimentaire. Cette approche originale procure une compréhension détaillée de l'architecture à travers des paramètres sédimentologiques impliqués dans le transport de sédiments. Les questionnements à l'origine de ces travaux font suite la maîtrise de Montreuil (2006) prouvant la possibilité de mesurer les caractéristiques d'un champ de rides sableuses par rayons X. De cette dernière, a découlé des paramètres sédimentologiques basés sur la littérature de Reineck & Singh (1975), Allen (1984) et Tucker (2001). Par contre, ces auteurs laissaient des phénomènes en suspens, à savoir si la vitesse du courant et la granulométrie affectent les paramètres sédimentologiques de la ride et si ces paramètres expliquent plus adéquatement la friction dans la couche de transport par charriage, friction qui est fonction de la contrainte de cisaillement. De plus, des divergences existent entre les auteurs, qui ne situent pas exactement au même endroit la frontière ou la limite entre le flanc d'érosion et le flanc de progradation. Il s'agit d'une limite importante car elle

circonscrit la section d'érosion de la section de déposition, point important dans la réalisation d'un bilan sédimentaire. Lors de l'analyse des différentes zones (couches) de transport par charriage, plusieurs interrogations sont apparues quant à l'épaisseur et à la mobilité des couches en fonction de leur position sur la ride et de la contrainte de cisaillement le long de celle-ci. C'est pourquoi l'objectif premier de cette thèse est d'établir une définition des paramètres sédimentologiques faisant suite à celle de Montreuil (2006). Cette définition des paramètres sédimentologiques prendra en compte la vitesse du courant et de la granulométrie, qui sont les deux principaux aspects dynamiques, et enfin la corrélation entre les différentes formes des couches de transport par charriage des profils de densité et la position le long de la forme de la ride. L'analyse de ces paramètres permettra d'améliorer la compréhension des phénomènes hydrauliques affectant l'érosion et le transport sédimentaire d'une ride sableuse. Ainsi, le présent ouvrage montre aussi, par des mesures empiriques, l'influence de la vitesse d'écoulement et des formes de reliefs sur les paramètres sédimentologiques composant les couches, formant la ride sableuse.

Afin de pouvoir établir une topographie de la ride, la surface de la ride a été choisie comme étant le point de densité maximale telle que déterminée par Montreuil (2006). C'est ainsi qu'ont été observées des variations de densité en surface de la ride, les variations qui pourront être corrélées avec les différentes sections composant la ride sableuse. La différence dans les résultats des mesures de densité maximale, qui résulte de l'étude des profils de densité, entraîne la nécessité d'investiguer la possibilité d'une pseudo-liquéfaction à la base du flanc d'érosion et d'une compaction en mode discret du flanc de progradation.

Aussi, dans Montreuil (2006), une diminution de la densité à l'approche de la frontière suspension-charriage a été observée, nécessitant de nouvelles observations conduisant à une nouvelle définition basée sur les concepts existants. Ceci, dans le but de contribuer à l'avancement de la compréhension du phénomène de transport sédimentaire par l'apport d'une définition différente et plus actuelle des rides sableuses.

Ainsi, lors de l'observation des profils de densité obtenus par mesures à rayons X (Montreuil, 2006), l'analyse du point d'inflexion et de la sous-couche d'inflexion, à

l'intérieure de la couche supérieure du transport par charriage entraîne le développement d'une méthode d'observation événementielle nommée l'approche de mesure par événements périodiques (AMÉP). Cette approche révèle l'importance des vortex dans l'intensité du transport et leurs effets sur la structure ou l'architecture interne de la matrice sédimentaire.

Enfin, observé par l'approche de mesure par événements périodiques et par l'approche globale, il est déterminé si la matrice sédimentaire renferme, en présence d'un courant, des empreintes des laminations à l'origine de la formation et de la destruction des rides et pourquoi certaines mesures réalisées par Montreuil (2006) révèlent la présence de laminations qui n'ont pu être mesurées par la suite. Ainsi, une expérience est conduite afin de déterminer s'il est possible de retrouver les stratifications observées dans les mesures *in situ* citées dans la littérature (Reineck & Singh, 1975 et Allen, 1984).

Deuxièmement, les résultats obtenus des profils de densité sont transformés afin d'obtenir une valeur de porosité du mélange eau-sédiments. Les profils de porosité ainsi obtenue sont comparés à des mesures réalisées avec un profileur à résistivité par Wheatcroft (2002). L'objectif de cette comparaison est d'établir une corrélation entre les profils de porosité obtenus en laboratoire (rayon X) et les résultats *in situ* du profileur à résistivité.

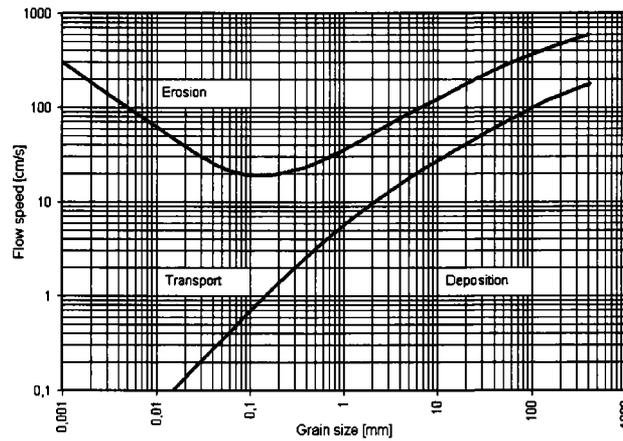
Troisièmement, suite aux observations des variations de la densité maximale, localisées à la surface *stricto sensu* de la ride, la présence d'une pseudo-liquéfaction est démontrée et expliquée à l'aide de mesures réalisées à la base du flanc d'érosion. Ces résultats démontrent une baisse de la hauteur de la référence ("*datum*") utilisée dans le calcul du transport sédimentaire.

Enfin, les conclusions dérivant de la mesure des couches de transport par charriage permettent en premier lieu de modifier la référence utilisée dans le calcul du transport faisant appel à la géométrie de la ride. Par la suite, les mesures de densité des couches de transport par charriage permettent d'améliorer une équation estimant la contrainte de cisaillement sur l'ensemble du lit sédimentaire incluant tout particulièrement la base du flanc d'érosion, emplacement clef du transport sédimentaire.

# CHAPITRE 1. REVUE DE LITTÉRATURE

## 1.1 Introduction

L'étude des rides sableuses s'inscrit dans la recherche des paramètres physiques entraînant un mouvement des sédiments. Les traces laissées, il y a des millions d'années, ont servi de base à la première observation de sédiments transportés. Cette observation entraîne un questionnement sur les conditions qui prévalaient à l'époque où le mouvement des sédiments s'est produit. Les premières investigations ont conduit à une définition de structures sédimentaires, telles que laissées dans la roche (Pettijohn & Potter, 1964). Brush (1965) inclut par la suite les environnements physico-chimique et hydraulique pour conclure que les conditions hydrodynamiques ont majoritairement contrôlé la déposition des formes observées. Plusieurs auteurs ont étudié les rides formées par les phénomènes éoliens. Dans cette étude, les conditions étant reliées au fluide (eau), nous nous basons sur les informations fournies par Bagnold (1956, 1966), Prandtl (1952, 1956), Truckenbrodt (1968), Sellin (1969) et Allen (1968), ce dernier ayant produit un résumé des principes régissant le mouvement du fluide et du sédiment. L'influence du fluide sur la vitesse de migration des rides sableuses est réalisée en détails par Dillo (1960). Pour ce faire, il mesure le déplacement des formations par méthode photographique (Tab. 1). Quoique peu précise en raison des irrégularités causées par l'effet de mur du canal et par la distance maximale d'observation limitée aussi par le canal, les résultats présentent une estimation valable pour les besoins de l'époque. D'autres mesures corroborant les résultats de Dillo (1960) ont été réalisés par Reineck (1961) et Coleman (1969). La vitesse d'entraînement est très bien exprimée par Hjulstrom (1935) où la vitesse du fluide et la grosseur des grains sont prises en compte (Fig. 1).



**Figure 1. Le diagramme d'Hjulstrom montre les relations entre l'érosion, le transport et la déposition. Le diagramme prend en compte la granulométrie et la vitesse du courant. (Hjulstrom, 1935)**

D'un point de vue historique, la première observation détaillée est relatée par Bertoloy dans Bucher (1919) qui stipule que, autour de 1900, les premières rides et dunes ont été quantifiées et décrites (Darwin, 1884; Cornish, 1897, 1914). Ces observations ont été reprises par Bagnold (1935, 1954b) et Sundborg (1956). Par la suite, à maintes reprises, il a été observé que les rides se développent en fonction du courant ou par une intervention artificielle (USACE-WES, 1935 ; Rathburn & Guy, 1967; et Southard & Dingles, 1971).

**Tableau 1. Taux moyens de migration de petites et grandes rides pour trois sables de grosseurs différentes et à différentes vitesses de courant (D'après Dillo, 1960).**

Current velocity (cm/sec)	Average rate of migration in cm/sec in sand of different values of Md.					
	Md = 0.085		Md = 0.19		Md = 0.28	
	small ripples	mega-ripples	small ripples	mega-ripples	small ripples	mega-ripples
30	—	—	—	—	—	—
35	—	—	—	—	0.018	—
40	—	—	0.02	—	0.035	—
50	0.03	—	0.1	—	0.15	—
60	0.07	—	0.35	—	0.6	—
70	0.18	—	0.9	—	1.5	—
80	0.40	—	2.0	—	—	0.45
90	0.90	—	3.5	0.4	—	0.6
100	1.50	—	—	0.55	—	0.8
105	—	—	—	0.9	—	—
110	—	—	—	—	—	—
120	—	—	—	—	—	—

La décennie 70, est marquée par un accroissement important du développement des infrastructures routières et immobilières en milieu côtier, l'observation et la prise de conscience du rôle du fluide dans la formation des rides (Clos-Arceuduc 1967, 1969; Wilson, 1972a, 1972b; Folk, 1976, 1977; Leeder, 1977) ont contribué à l'étude de l'effet de la couche limite sur la compréhension du phénomène de saltation ou transport par intermittence (Grass, 1970; Williams & Kemp, 1971, 1972; Costello, 1974). Ces études ont conduit, par la suite, à l'étude de la sous-couche visqueuse et à son épaisseur (Etheridge & Kemp, 1979).

Une composante importante de l'écoulement au-dessus des rides est le vortex du flanc d'érosion, aussi décrit comme le vortex à l'avant du flanc de progradation (Allen, 1984). Plusieurs auteurs ont d'abord rejeté l'effet du vortex dans le transport des sédiments (Beadnell, 1910; King, 1916, 1918; Hume, 1925; Bagnold 1937, 1954a; Sharp 1966; Coopers 1958, 1967), certains allant même, selon Allen (1984), à nier l'existence du vortex du flanc d'érosion. Par la suite, certains auteurs se sont ravisés et plusieurs autres ont démontrés hors de tout doute la contribution du vortex du flanc d'érosion dans le transport sédimentaire sous forme de rides ou de dunes, tant au plan

hydraulique (Sidwell & Tanner, 1938; Melton, 1940; Bagnold, 1954b, 1966, 1973, 1977; Cooper, 1958; Hoyt, 1966; Inman et al., 1966; Allen, 1984) qu'au plan éolien (Sevenet, 1943; Sharp, 1966; Glennie, 1970; Jopling, 1961; Simons et al., 1961; Simons & Richardson, 1962; Guy et al., 1966; Allen, 1968b; Allen, 1984).

Enfin, Smith (1970) et Costello (1974) ont démontré l'importance de la séparation du fluide et du point de rattachement du fluide dans le transport sédimentaire, faisant ainsi le lien entre le transport sédimentaire et la contrainte de cisaillement (Verbanck, 2004). Dans le même ordre d'idée, l'importance de la notion de rugosité du lit dans le transport sédimentaire est développée par Klein (1963) et Krinsley & Doornkap (1973). La rugosité du lit, notion introduite par Nikuradse (1933), a comme effet l'augmentation du coefficient de friction ou de frottement sur le fond (Schlichting, 1960; Williams, 1969; Graf, 1971; Davis and Sutherland, 1980; Nomicos, 1956; Julien & Raslan, 1988; Karim, 1995) indiquant ainsi son lien étroit avec la viscosité du mélange eau-sédiment (Happel & Brenner, 1965; Barnes, 1980; Huppert et al., 1995). Cette brève revue permet de mettre en contexte les publications subséquentes et d'établir la chronologie de la compréhension scientifique à l'origine des premières observations ayant conduit aux expériences *in situ* et en laboratoire, des phénomènes régissant le transport sédimentaire.

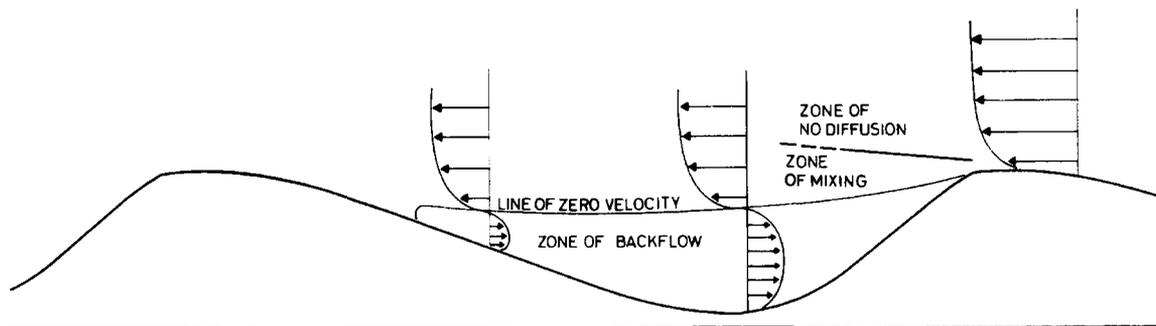
## **1.2 Genèses des rides sableuses à travers l'action du fluide**

Le mouvement du sédiment, ou transport sédimentaire, sous forme de ride peut se résumer par le déplacement du sédiment du flanc d'érosion vers le flanc de progradation. Ainsi, le sédiment est érodé du point le plus bas de la ride vers le sommet et est simultanément transporté en suspension et par charriage de la base vers le sommet de la ride où il se dépose par avalanches en formant, de façon discrète, la pente du flanc de progradation et, par conséquent, les lamines de progradation.

Les rides sableuses se forment lorsque la quantité de sédiments et la vitesse du courant le permettent pour ensuite migrer sous forme de champs. La migration des rides sableuses se suivent successivement et migrent en parallèles. Les types de rides sont normalement décrits en se basant sur la forme du sommet de la ride. Les formes peuvent être parallèles, ondulatoires, linguoïdales, cuspides, semi-lunaires ou

rhomboïdales (Allen, 1968 et Baas, 2003). Allen (1968) en fait une description détaillée qu'il présente sous forme d'une compilation imagée permettant de faire le lien avec les phénomènes hydrodynamiques des rides bidimensionnelles et tridimensionnelles. Les rides bidimensionnelles sont définies comme étant uniformes en hauteur ; elles migrent à angle droit par rapport au courant. Les rides tridimensionnelles varient en hauteur et le sommet ondule par rapport à l'orientation du courant (Reineck & Singh, 1975). Selon Reineck et Singh (1975), à l'exception de la grosseur de la ride et du passage au lit plat, il n'existe pas de différence dans la formation des rides, peu importe l'intensité des courants. Par contre, les variations et les instabilités du courant au-dessus de la ride fait de la continuité des composantes de la structure interne de la ride.

Reineck & Singh (1975) sépare l'action du courant selon trois zones ; la zone de mélange, la zone de non diffusion et la zone de recirculation ("*backflow*"). Ils indiquent donc une différence d'écoulement séparée par une ligne de courant nul (Fig. 2).

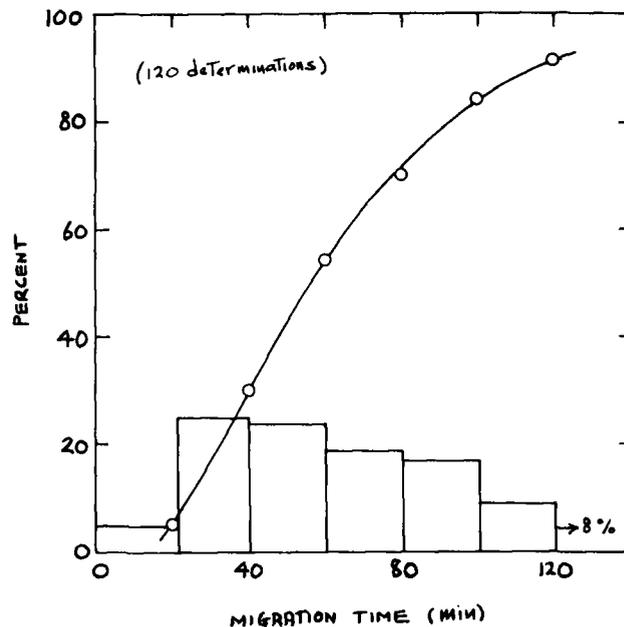


**Figure 2.** Forme de l'écoulement du fluide à l'avant du flanc de progradation. Distribution de la vitesse du courant, séparation du fluide et les trois zones majeures. D'après Reineck & Singh (1975), modifié d'après Jopling (1963, 1967).

Le flanc de progradation, composé des lamines de progradation de la ride, est ainsi formé par la chute gravitaire des sédiments (Bagnold, 1956; Reineck & Singh, 1975). Reineck (1961) suggère que les lamines de progradation sont formées selon quatre processus qui contribuent à différents degrés à la construction. Les avalanches contribuent pour 75 à 90%, la chute des sédiments grossiers tombant de la suspension pour 10%, la déposition des sédiments fins venant de la suspension pour 5% et le

transport ou recirculation pour 10%. De plus, les variables contrôlant la forme et la pente des lamines de progradation (Jopling 1963, 1965 et Wilcock & McArdeil, 1997) sont la vitesse, la contrainte de cisaillement et le rapport de la profondeur du bassin de déposition et de la profondeur d'eau. Ces derniers influencent l'angle de déposition des lamines de progradation (McKee, 1957). McKee (1957) étudie l'effet de la granulométrie sur la forme des lamines de progradation, indiquant une constance dans leur caractéristiques si la granulométrie est serrée.

De plus, les rides migrant sous un courant stationnaire présentent des vitesses de migration très variables (Southard et al., 1980). La vitesse de migration de la ride est définie par le temps requis pour le passage de deux sommets de rides devant une fenêtre d'observation fixe. Les résultats de Southard et al. (1980) présentent, par contre, une durée de vie d'une ride d'environ trois longueurs de rides. La disparition de la ride est causée par : l'apparition d'une nouvelle ride se formant sur une précédente ride, l'effacement simple de la ride ou par la division d'une ride en deux nouvelles rides. Middleton & Southard (1977) et Southard et al. (1980) analysent une compilation de 120 mesures de rides en migration (Fig. 3) et montrent que pour un  $d_{50}$  de 0.38 mm, une profondeur d'eau de 9.3 cm et un courant moyen de  $19.2 \text{ cm s}^{-1}$ , le temps de migration typique est entre 40 et 80 minutes et que la variabilité des résultats est reliée à la dynamique des rides.



**Figure 3. Histogramme et courbe de valeur cumulative de la vitesse de migration selon le temps de passage de deux rides successives. D'après Middleton & Southard (1977)**

Selon Yalin (1977), la formation des rides résulte de la conséquence d'une discontinuité géométrique et, dans le cas présent, ces discontinuités géométriques sont causées par les irrégularités produites par la méthode utilisée lors de la mise en place du sédiment dans le canal. Donc, les propriétés de la ride qui se développe sont dépendantes des discontinuités d'origine et, ainsi, de la manière utilisée pour le remplissage d'un canal. Il est possible de contrer ce phénomène si une très grande vitesse est initiée afin de créer un lit plat (Jopling, 1967). Ce lit est utilisé comme point de départ, car il est dépourvu des marques de surface laissées lors de l'installation du lit sédimentaire.

L'aspect qui domine l'écoulement d'un fluide au-dessus d'une formation de rides sédimentaires est la séparation du fluide au sommet du flanc d'érosion. C'est à ce point que l'angle de la forme change abruptement sous la forme du flanc de progradation. Middleton & Southard (1977) notent que la forme (rondeur) du sommet de la ride et la position du point de séparation du fluide change en fonction de l'intensité du courant. La figure 4, qui représente l'écoulement d'un fluide au point de séparation d'une ride, présente des similitudes avec la séparation d'un fluide dans un conduit en expansion

(Fig. 5). L'expérience sous conduit (Reynolds, 1965) est donc comparable si, localement, les parois du conduit sont remplacées par des murs et que seule la partie du bas est considérée (Middleton & Southard, 1977). Il est observé que la distance sur laquelle existe un fort cisaillement est courte et correspond à la distance entre le point de séparation et le point de rattachement du fluide, qui est entre 5 et 10 fois la hauteur de la ride. En amont du point de rattachement, une région de forte turbulence renferme un vortex principal et des vortex secondaires de position irrégulière. Cet ensemble cause des recirculations induites sous l'effet du fluide circulant au-dessus de la ride, appelé écoulement principal. Cette partie de l'écoulement surmonte la section turbulente située entre le point de séparation et le point de rattachement.

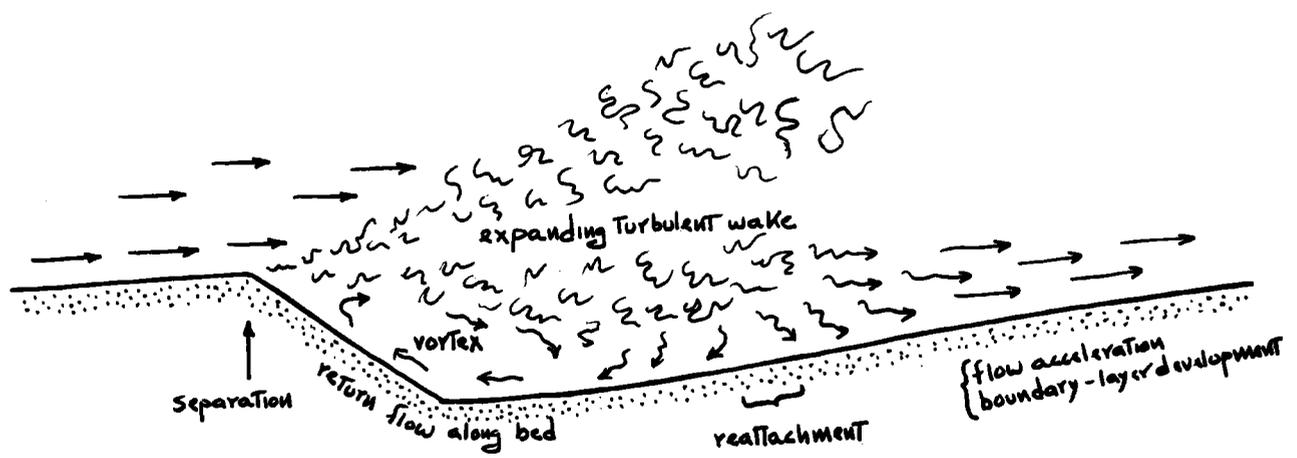
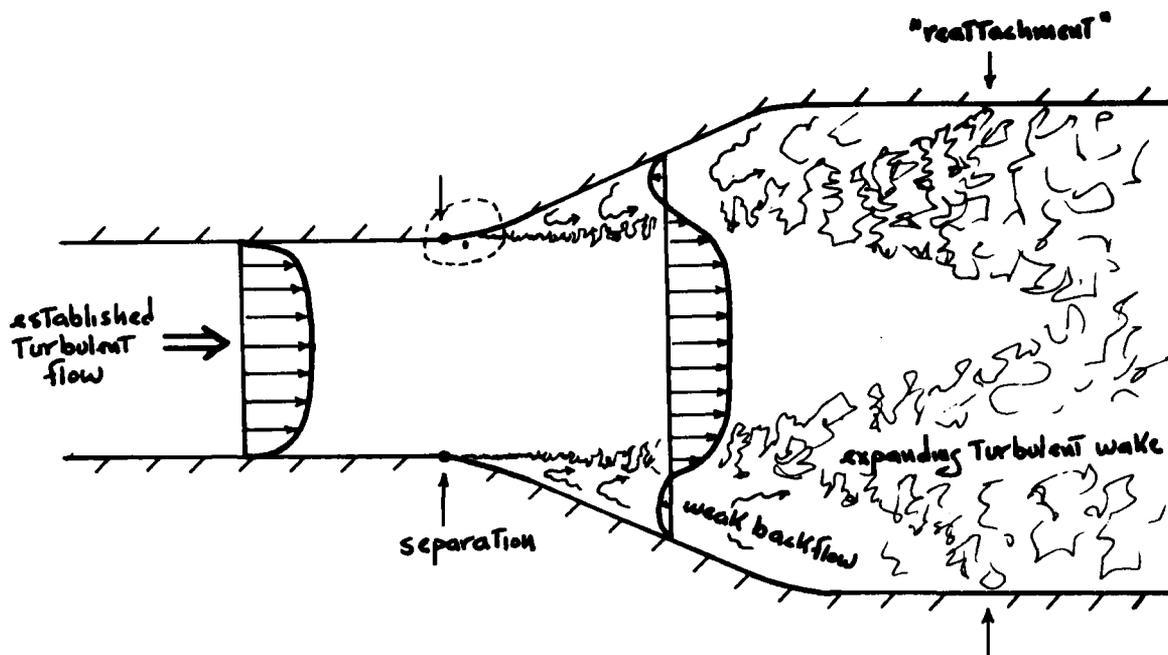


Figure 4. Représentation de l'écoulement d'un fluide au-dessus d'une ride. Modifié de Middleton & Southard (1977).



**Figure 5.** Représentation de l'écoulement d'un fluide dans un conduit et les points similaires avec l'écoulement au-dessus d'une ride. Modifié de Middleton & Southard (1977).

Middleton & Southard (1977) présentent sous forme de profils, la distribution typique du courant à différents points sur la ride (Fig. 6). La contrainte de cisaillement ainsi que la distribution de la pression à la base de la colonne d'eau sont indiquées par rapport à la forme de la ride. Les profils de vitesse sur la ride présentent des différences importantes entre la partie supérieure du flanc d'érosion et la partie formée du flanc de progradation et de la base du flanc d'érosion. En effet, le vortex à la base du flanc d'érosion forme, dans le profil de vitesse, une inversion du sens du courant, qui génère une recirculation (Garde, 1994). Par la suite, le profil de vitesse retrouve sa forme unidirectionnelle, mais la vitesse à la base du profil augmente jusqu'au sommet de la formation. Ces variations dans le profil de vitesse sont associées à la contrainte de cisaillement. La contrainte de cisaillement moyenne augmente de zéro au point de rattachement du fluide jusqu'à une valeur de  $3 \text{ dynes cm}^{-2}$  ( $0.3 \text{ Pa}$ ) près du sommet de la ride. L'accroissement de la contrainte de cisaillement se fait dans le sens du courant, mais la partie pointillée est incertaine et est marquée comme négative.

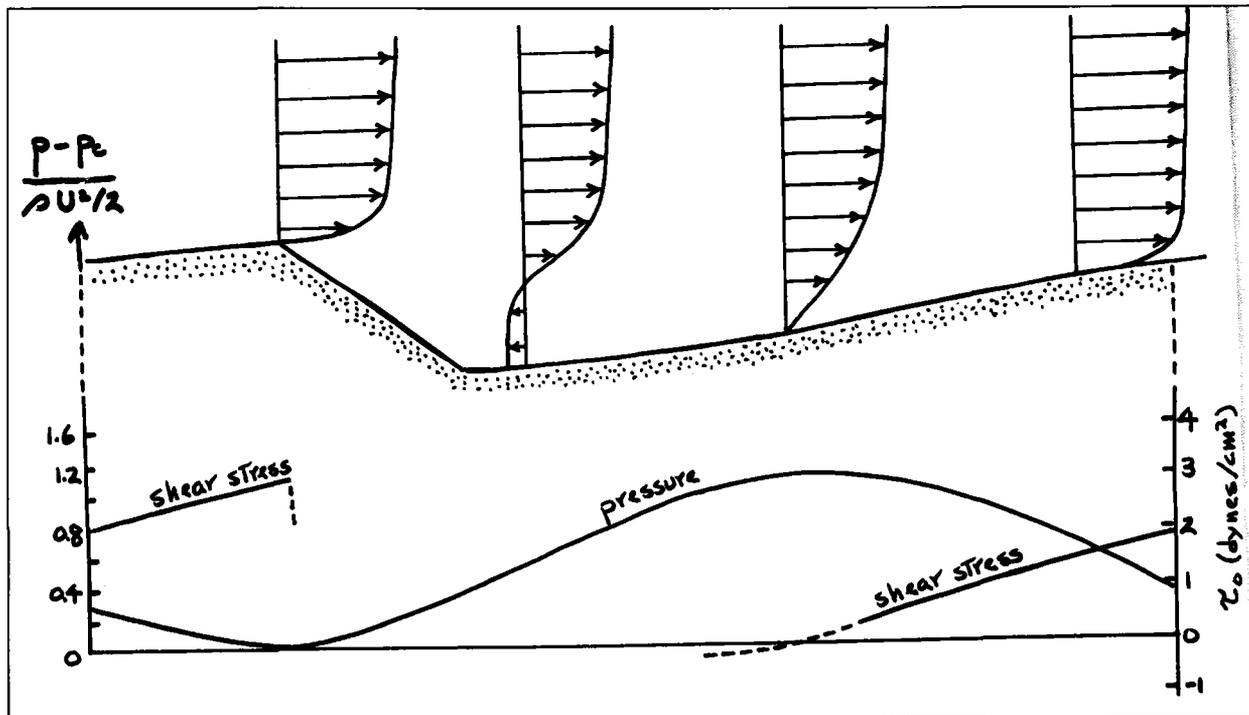


Figure 6. Distribution de la vitesse du fluide, contrainte de cisaillement du lit sédimentaire  $\tau_0$ , et pression à la surface en forme de ride. Schématisée d'après Raudkivi (1963) et Vanoni & Hwang (1967). La pression est exprimée en termes de pression au sommet de la ride,  $P_c$ , et la vitesse moyenne du courant  $U$  est d'environ  $30 \text{ cm s}^{-1}$ . (Middleton & Southard, 1977).

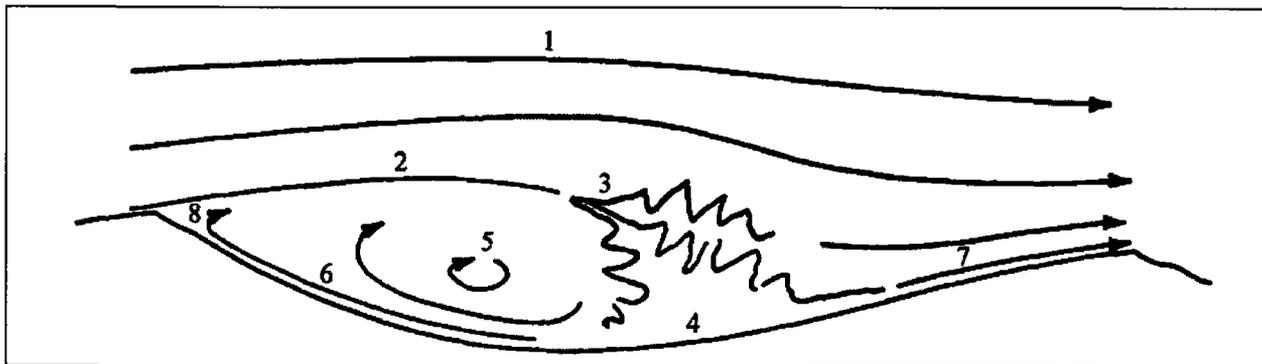
Malheureusement, il n'y a pas d'information sur la caractéristique de la contrainte de cisaillement au-dessus de la section turbulente, information que cette thèse tente de fournir. De plus, la pression dans la colonne d'eau est minimale au point de séparation.

À la zone de séparation, la force de pression nette ("*form drag*") (Einstein & Barbarossa, 1952; Gessler, 1965; Chuna, 1967; Alam & Kennedy, 1969; van Rijn, 1984) sur une ride est celle causée par la séparation d'un fluide et n'est donc pas une représentation de la force nette agissant sur la contrainte de cisaillement à la frontière eau-sédiments, car elle ne prend pas en compte les propriétés du sédiment (Middleton & Southard, 1977).

L'observation du profil de vitesse au point de séparation du fluide indique une chute de la vitesse du fluide suivie ensuite d'une accélération près du point de rattachement. Cette accélération engendre le développement d'une couche limite (Stehr, 1975) sur la partie supérieure du flanc d'érosion. Selon Middleton et Southard (1977), une couche

limite, qui est à l'origine des turbulences, se développe dans une couche limite existante et cette combinaison de couche est croissante jusqu'au sommet de la ride. Il est donc question "d'une couche dans une couche".

Blumberg & Curl (1974) détaillent les mécanismes hydrauliques présents sur une ride comme des régions hydrauliques (Fig. 7). Les régions hydrauliques agissant sur le sédiment sont surmontées par l'écoulement turbulent principal (1) circulant au-dessus de la forme. Sous cet écoulement, se crée la couche de cisaillement laminaire à partir du point de séparation du fluide (2). Cette couche, qui surplombe les vortex (5), se termine par une transition turbulente (3) se prolongeant jusqu'au rattachement du fluide (4), qui se termine par la couche limite en amont du flanc de progradation (7). Sous la couche de cisaillement laminaire (2) se trouve le vortex aussi appelé l'écoulement de recirculation irrégulier (5). L'irrégularité symbolise les fluctuations du vortex et peuvent être en lien avec les avalanches, processus discret et instable. Enfin, sous le vortex se trouve la couche limite du flanc de progradation (6), qui se termine par une couche limite de séparation du flanc de progradation et de la couche de cisaillement laminaire (8). Cette couche composée de petits vortex affectant la chute et l'accumulation des sédiments.



**Figure 7.** Région hydrodynamique au-dessus d'une ride complète. (1) Écoulement turbulent principal. (2) Couche de cisaillement laminaire. (3) Transition entre la turbulence et le transport. (4) Rattachement. (5) Écoulement de recirculation, irrégulier. (6) Couche limite du flanc de progradation. (7) Couche limite en amont de la pente d'avalanches. (8) Couche limite de séparation du flanc de progradation, avec petits vortex. (Blumberg & Curl, 1974).

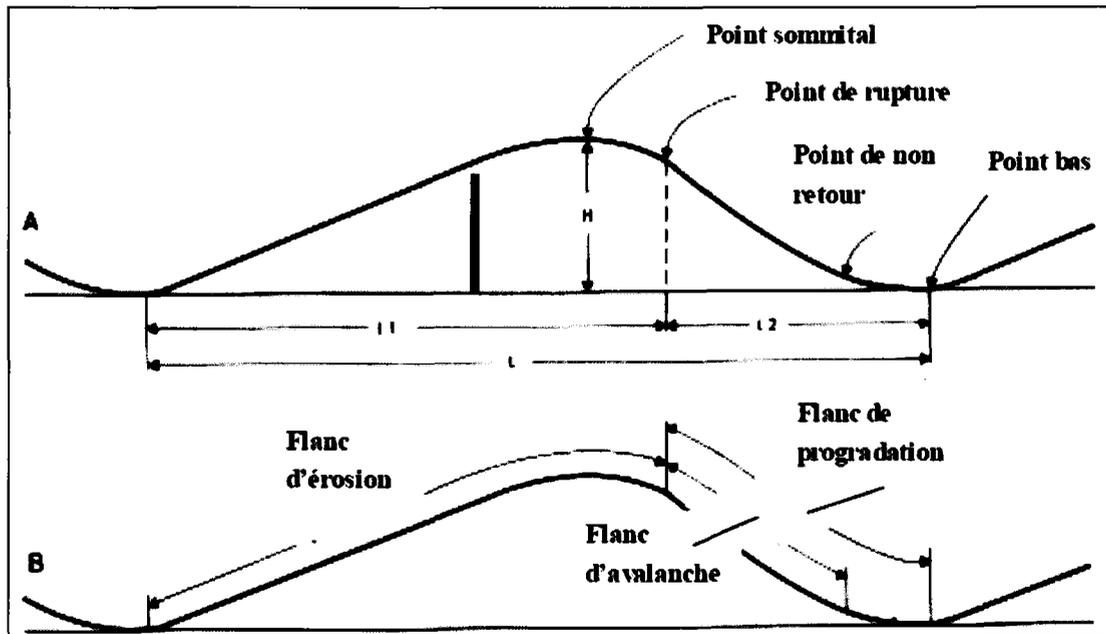
En résumé, les auteurs s'accordent pour dire que le courant s'inverse dans le creux de la ride, créant une recirculation associée aux phénomènes de vortex. Par contre, des différences apparaissent lorsqu'il est question d'établir la limite entre l'écoulement principal et la partie où se localisent l'inversion du courant et les turbulences. Reineck et Singh (1975) positionnent une ligne de vitesse nulle ayant un rayon de courbature inverse à celui du taux de la ride (Fig. 2) alors que Blumberg & Curl (1974) placent une couche de cisaillement laminaire (Fig. 7 (2)) qui se termine par une transition turbulente conduisant à une couche limite vers le sommet de la ride. Aussi, Middleton et Southard (1977) ont produit un modèle (Fig. 4) similaire à Blumberg & Curl (1974), à l'exception de l'absence d'une ligne de courant nul ou d'une couche laminaire. Ils placent plutôt une zone d'expansion et d'atténuation des turbulences. Ceci implique un effet de la zone de turbulences jusqu'au niveau de l'écoulement principal.

### **1.3 Architecture des rides sableuses**

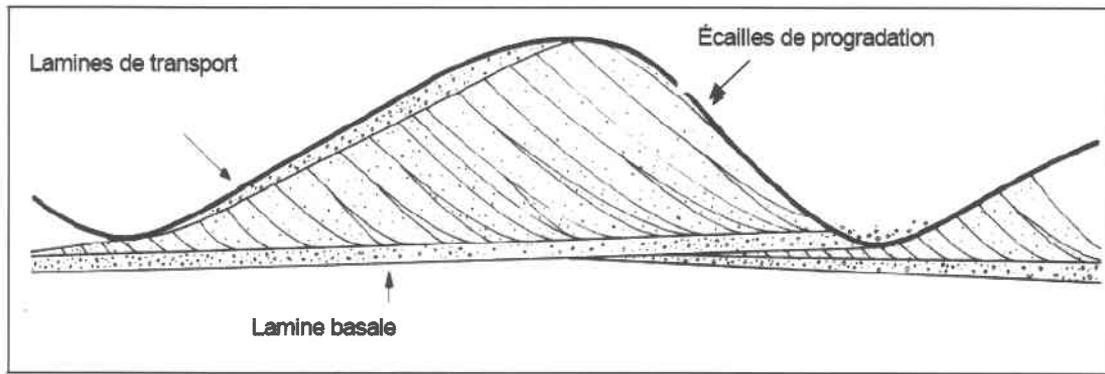
La définition sédimentologique utilisée comme référence dans cette étude et celle de Montreuil (2006) (Fig. 3 et Fig. 4) qui a été préalablement décrite par Reineck & Singh (1975). Reineck & Singh débutent leur analyse par un extrait de R. Hunt (1904), cité par Kindle (1917) qui se résume ainsi : "les contradictions apparentes des auteurs sur les traces de rides sont si surprenantes que l'on ne voit pas comment l'étudiant ou même les auteurs de manuels peuvent trouver leur chemin à travers cette brume. Ils ont donc défini les paramètres de la ride de façon à délimiter et à nommer chacune des couches et chacun des points de la formation observés". Reineck & Singh (1975), tout en évitant une surenchère terminologique, mais en demeurant suffisamment détaillés pour ne pas tomber dans la simplification abusive, décrivent une ride selon sa forme et sa taille en une combinaison de couches limitées par des points représentatifs. La ride est ainsi divisée en points et en sections (Fig. 8 : la longueur de la ride  $L$ , la hauteur de la ride  $H$  sont les limites de la ride, délimitant sa périodicité). Le point sommital ("*summitpoint*") est le point le plus élevé de la ride. Ce point de référence de la mesure de  $H$ , localisé sur le dessus de la ride, qui peut être rond ou de forme aplatie. La base de la sédimentation ("*toepoint*") correspond à la limite entre le flanc d'avalanches ("*slipface*") et la couche de dépôt due aux turbulences à la base de la ride. C'est le point où

s'arrêtent les dépôts de progradation. Le point de rupture ("*brinkpoint*") est le point limite où se termine l'entraînement par charriage et où débute l'accumulation de sédiments qui conduit au mouvement gravitaire, aussi nommé mouvement d'avalanches. Ce point sépare le flanc de progradation ("*lee-side*") de la ride du flanc d'érosion ("*stoss-side*"). C'est le flanc de progradation qui constitue le flanc sur lequel s'accumulent les sédiments et où il y a croissance de la ride, aussi exprimé comme la migration de la ride. Cette migration est discontinue et formée des lamines de progradation ("*fore set laminae*") (Fig. 9). Ces formations sont visibles, *in situ*, lors de la réalisation d'une tranchée (Fig. 10) ou par l'observation de stratification sédimentaire (Fig. 11). Les lamines de progradation sont la principale composante de la ride et elles peuvent prendre, sur une même ride, des formes et des angles différents (Fig. 9). Les trois formes mesurées sont angulaire, tangentielle et sigmoïdale. Les angles mesurés varient de 20 à 35° (Shrock, 1948 et McKee, 1953) et leurs valeurs changent le long de la pente du flanc de progradation. La partie active où se produisent les avalanches est nommée la surface de glissement et est située entre le point de rupture et la base de la sédimentation. Le creux de la ride ("*troughpoint*") est le point le plus bas de la ride. Ce point est aussi la base du phénomène d'érosion, instigateur du transport des sédiments le long de la ride. De plus, il correspond au point de séparation d'une ride par rapport à une autre ride. Le flanc de progradation se limite donc entre le point de rupture et le creux de la ride, formant ainsi le front de la ride. Le flanc d'érosion, délimité par le creux de la ride et le point de rupture, renferme les vortex d'érosion, incluant une pente moins importante que sur le front. La structure interne de la ride (Fig. 9) se compose de lamines de progradation et des lamines de transport ("*stoss-side laminae*"), formées par le charriage des sédiments. Les lamines basales ("*bottom set laminae*") sont localisées sous la ride et provient d'une couche de sédiments homogénéisée située à la base du flanc de progradation (Reineck & Singh, 1975). Dans le but de classifier les rides, deux index sont utilisés. L'index de forme verticale, ou l'index de ride, est le rapport de la longueur sur la hauteur de la ride  $L/H$  (Bucher, 1919). L'index de symétrie, lui, est défini comme le rapport de la projection horizontale du flanc d'érosion  $L1$  et de la projection du flanc de progradation  $L2$  (Fig. 8).

Ces paramètres ont été nommés en fonction de paramètres mesurables et observables. Les rides croissent par une série de lamelles de progradation déposées par avalanches. Les lamines de transport sont exposées à une érosion constante lors de la migration de la ride. Une partie du matériel érodé se déplace par charriage sous forme de lamines de transport, qui sont presque perpendiculaires aux écailles de progradation. Pour Reineck & Singh (1975), deux niveaux existent dépendant du mouvement : le champ statique de lamines basales et les lamines de transport en érosion constante. Cette étude détermine donc la position des paramètres des rides statiques et dynamiques en utilisant les paramètres sédimentologiques mesurés au scanographe.



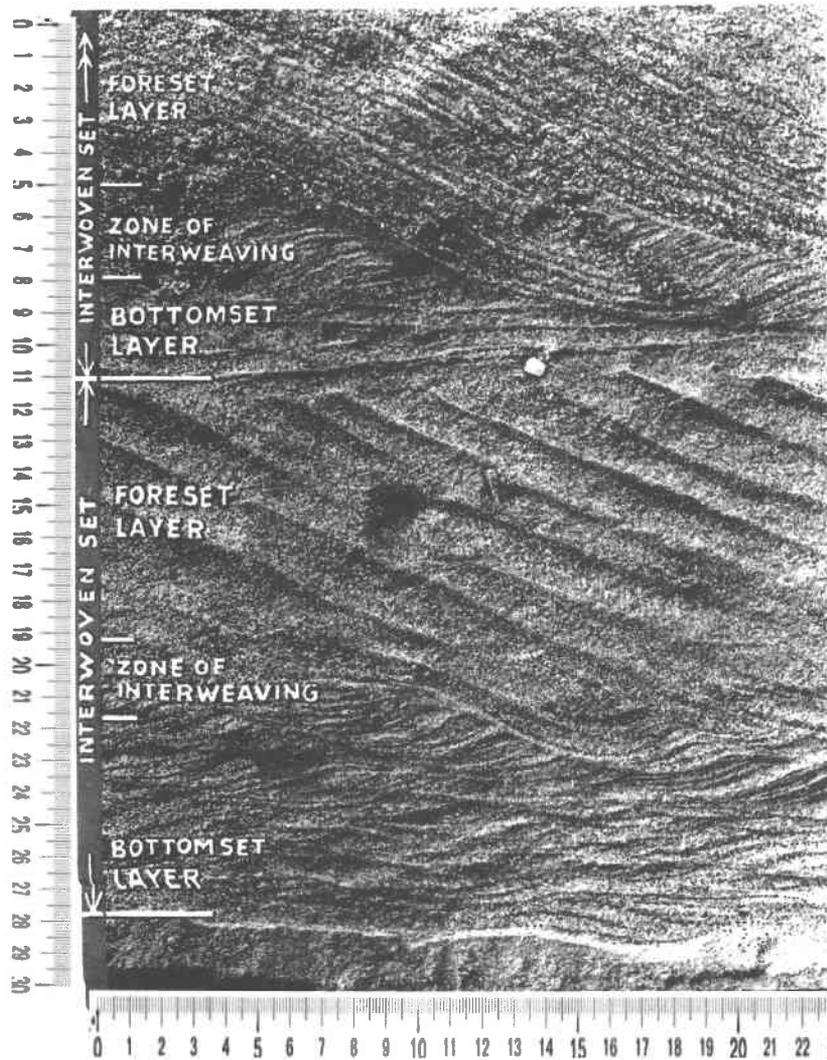
**Figure 8.** Définition des sections d'une ride (Reineck & Singh, 1975). En A, la ride est définie par une succession de points déterminants. En B, la ride est divisée en section afin de distinguer l'érosion, le transport et la déposition ou formation.



**Figure 9.** Définition des couches internes d'une ride. (Reineck & Singh, 1975)  
 L'architecture interne de la ride est caractérisée par trois types de couches, soit : les lamine de transport, les écailles de progradation et les lamine basales.

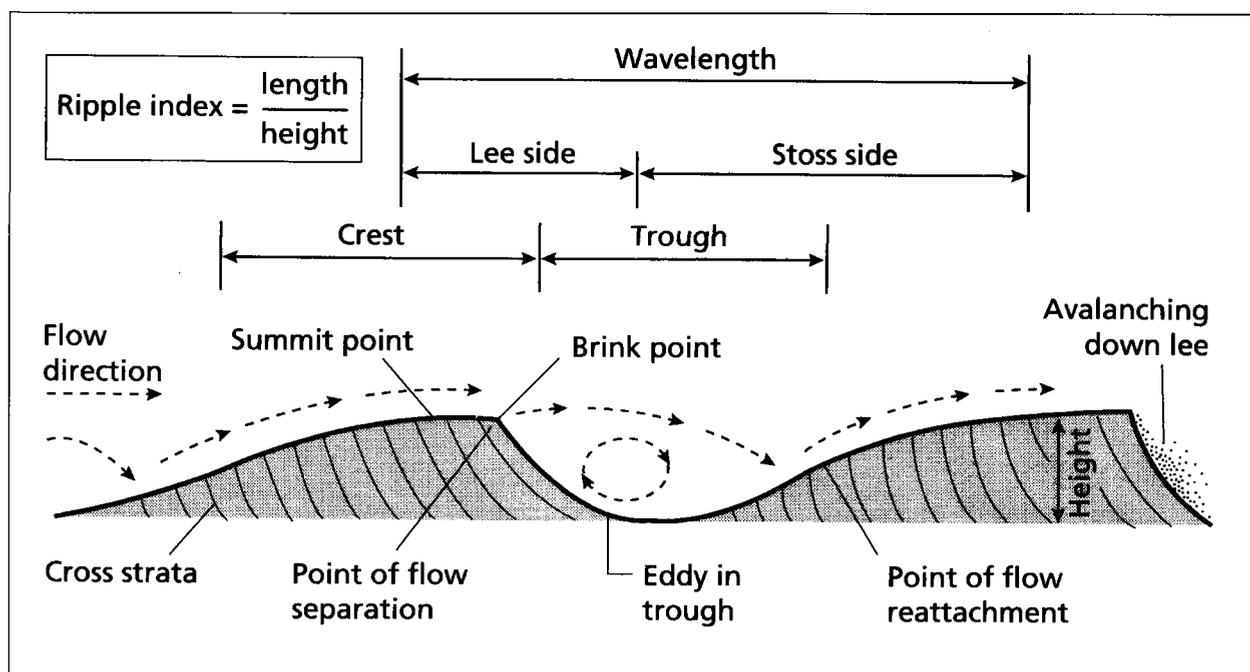


**Figure 10.** Méthode d'observation des rides *in situ*. (Reineck & Singh, 1975)



**Figure 11. Photographie utilisée dans l'observation des structures sédimentaires et des couches internes des rides, modifié d'après de Reineck & Singh (1975).**

D'autres définitions comprenant les notions de crête et de creux sont apportées par Tucker (2001). Ce dernier situe la frontière du flanc de progradation et du flanc d'érosion avant le point sommital, ce qui diffère de l'ensemble de la littérature (Fig. 12). Cet emplacement n'est pas en accord avec Reineck & Singh (1975), qui le situe du côté du flanc d'érosion, au point de rupture, alors que Tucker (2001) le localise du côté du flanc d'érosion, mais avant le point sommital. Cette observation entraîne l'utilisation de paramètres sédimentologiques afin de positionner la frontière entre le flanc de progradation et le flanc d'érosion. De plus, il n'est pas spécifié chez les auteurs si la mesure de la forme de la ride a été réalisée en mode de statique ou dynamique.



**Figure 12. Description générale d'une ride sableuse, Tucker (2001).**

Pour l'écoulement en suspension, Kastaschuk & Villard (2001) proposent un modèle conceptuel de l'écoulement, où la couche limite interne correspond à la théorie de la sous-couche de fluide énoncée plus loin dans cette thèse. De l'autre côté, la région turbulente ne correspond pas à la fin des activités des vortex. Dans la présente revue de littérature, la quantification du transport par suspension n'est pas expliquée, car l'attention est portée sur le transport par charriage.

Du point de vue de Yalin (1977), durant la formation initiale des rides sableuses, l'environnement se compose d'une hauteur d'eau mesurée à partir du dessus du canal jusqu'au niveau moyen du sédiment et la hauteur de la ride  $\Delta$  est mesurée entre son sommet et son creux. La vitesse du courant sur la ride augmente jusqu'au sommet de celle-ci et la zone de déposition possède un angle  $\theta$  où le sédiment tombe par gravité. Au même moment, un vortex (recirculation) affecte la base de la ride, causant l'érosion. Ainsi, il mesure la longueur de la ride  $\Lambda$  entre deux creux de la ride. Enfin, le rayon de courbure du dos de la ride et de la ligne séparant la recirculation de l'écoulement laminaire est dans le même sens (Fig. 13).

Enfin, Baas (2003) présente une figure qui comporte une définition plus complète des paramètres hydrauliques et sédimentologiques d'une ride. La figure 14 résume bien la définition d'une ride car elle présente, au point de séparation du fluide, trois zones distinctes, qui ne sont pas toujours définies par les différents auteurs soit : la zone d'écoulement principal laminaire ("zone of free flow"), la zone de mélange ("zone of mixing") et la zone de recirculation ("zone of backflow").

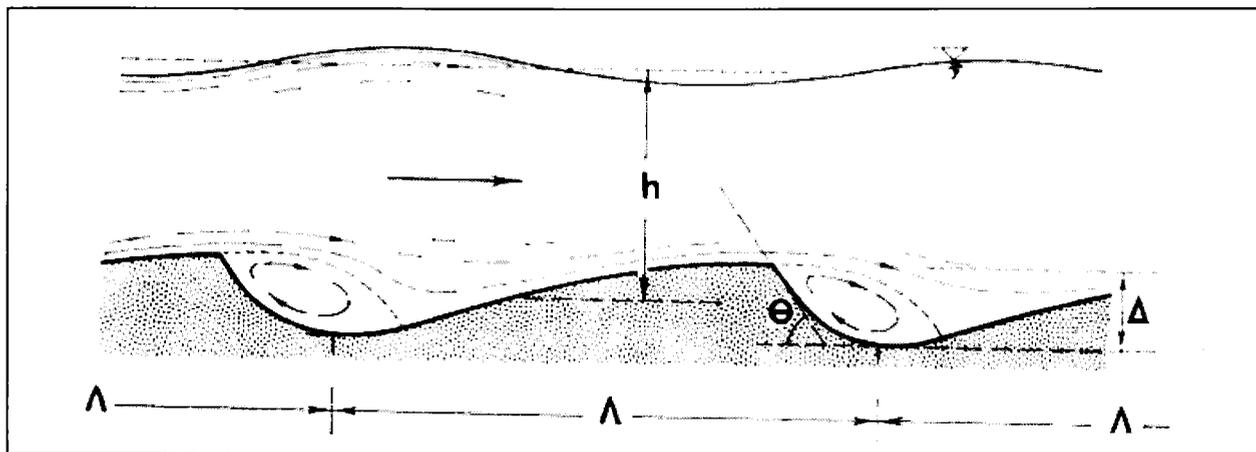


Figure 13. Mouvement du fluide aux abords de la ride pour un écoulement laminaire. (Yalin, 1977).

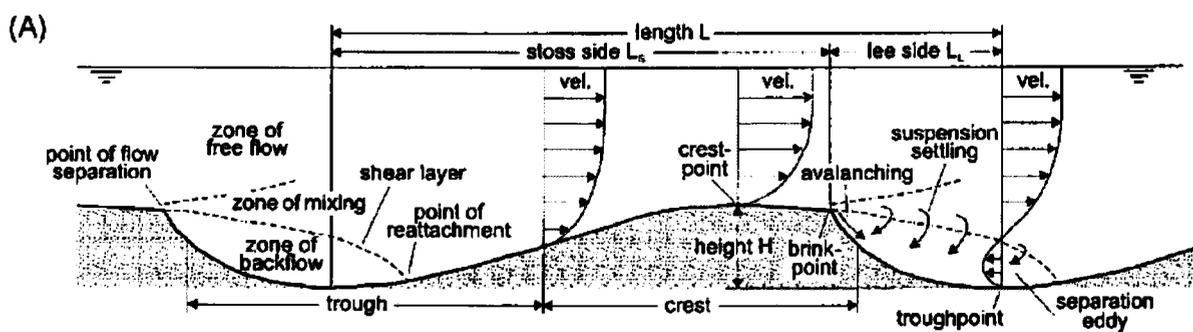


Figure 14. Mouvement du fluide aux abords de la ride pour un écoulement laminaire, modifié de Baas (2003), d'après Reineck & Singh (1980).

## 1.4 Géométrie de la ride et mesure par traceur radioactif

La technique de mesure du transport par traceur radioactif permet de mettre en évidence que les sédiments du flanc d'érosion sont transportés, puis enfouis au flanc de progradation (Crickmore & Lean, 1962; Sauzay, 1969; Grigg, 1970; Alquier et al., 1970; Middleton & Southard, 1977; Lavelle et al, 1978; Long & Drapeau, 1983; Hodgins et al., 1986, Cheong et al., 1992; Séka, 2000).

Cette méthode consiste en l'utilisation de sédiments radioactifs (verre broyé servant de support à un isotope radioactif) déposés sur une formation, ce qui permet, de façon périodique, d'obtenir une série de mesures permettant de déterminer le mouvement des sédiments radioactifs sous forme de nuage. Ces mesures identifient le déplacement, mais aussi la profondeur à laquelle ces sédiments sont enfouis.

Middleton & Southard (1977) présentent une illustration générale en appliquant les conditions nécessaires au respect de l'équation de conservation (Equ. 1), mais en considérant seulement le transport par charriage. Cela permet d'obtenir un taux de changement de la hauteur de la ride directement proportionnel au taux de sédiments transportés (Gillie, 1984).

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (1)$$

$1/(1-\lambda)$  est un facteur de correction de la porosité et  $q_s$  le transport par charriage. Une représentation schématisée (Fig. 15) permet de mieux comprendre cette méthode de mesure de terrain. L'orientation du transport sur la forme géométrique d'une ride est réalisée comme suit : au moment  $t_1$ , des grains sont ensevelis dans la ride au point  $P_1$  (Fig. 15A). Ensuite, à un temps  $t_2$ , le grain apparaît à la surface de la forme à la position  $P_2$ . Dans un délai relativement court, le grain est à nouveau transporté et déposé au point  $P_3$ , pour une mesure de temps  $t_3$ . Après une période de temps  $(t_4-t_3)$ , le grain se retrouve dans les lamines de progradation, au point  $P_4$ , à l'intérieur de la ride. Cette succession de points constituent un cycle d'observation (Middleton & Southard, 1977).

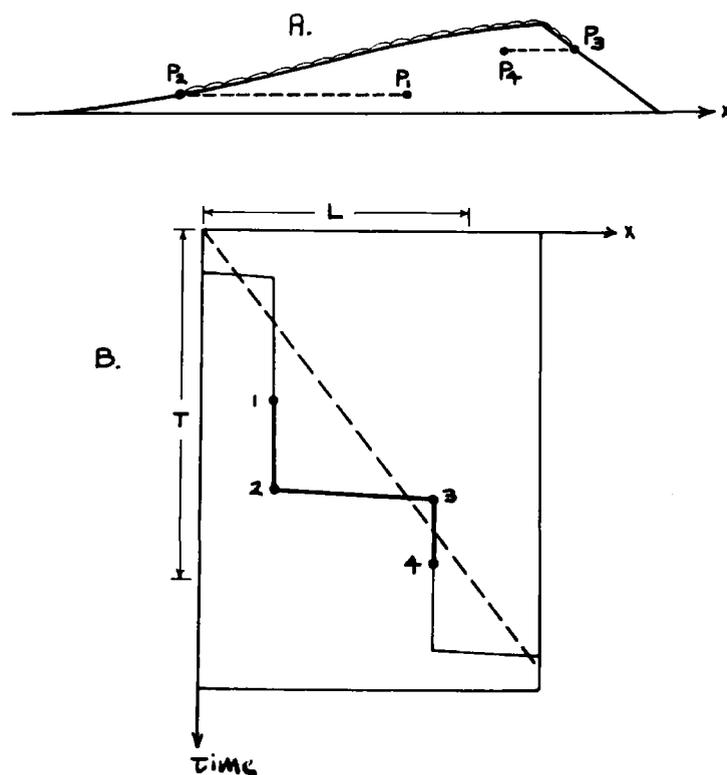
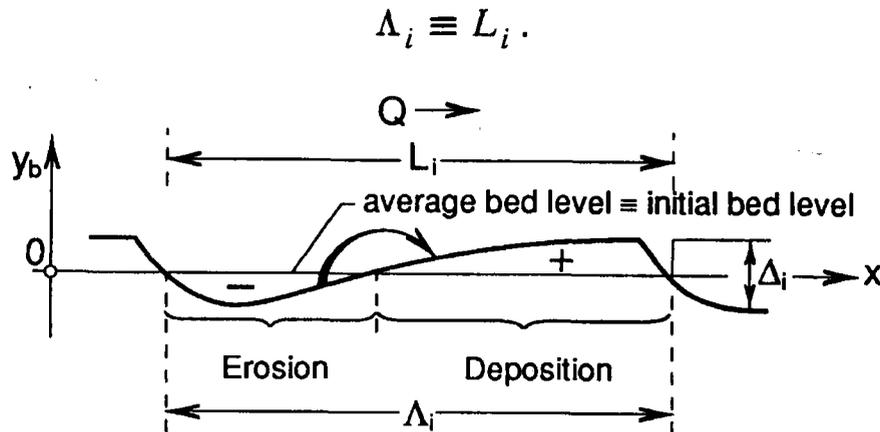


Figure 15. (A), schématisation du déplacement d'un grain obtenu par la méthode du traceur radioactif. (B) distance de déplacement du grain en fonction du temps (ligne pleine) et la migration du flanc de progradation de la ride (tiret). Les points  $P_1$  (1) à  $P_4$  (4) indiquent le cheminement du grain pendant la migration de la ride. (Middleton & Southard, 1977)

Le graphique de la distance parcourue par le grain en fonction du temps (Fig. 15B) indique bien que le transport s'effectue de la base du flanc d'érosion jusqu'au flanc de progradation, formant un dispositif de recirculation du sédiment. En effet, la longueur de la ride  $L$  et le temps de migration  $T$  de la ride indiquent qu'entre les points 1 et 2 ainsi que les points 3 et 4, les grains sont immobiles alors qu'entre les points 2 et 3, il y a, par charriage en surface, un déplacement rapide des grains par rapport au temps de migration de la ride (Middleton & Southard, 1977).

Dans le même ordre d'idées, Yalin (1992) stipule qu'au temps zéro, si un courant est quasi uniforme et que la condition initiale est un lit plat, éventuellement le lit se déforme de façon ondulatoire pour former un lit sédimentaire en forme de rides (Fig. 16). Chaque ride  $i$  est une séquence érosion-déposition de longueur  $\lambda_i$  et de période ayant une longueur identique  $L_i$  (Nezu & Nakagawa, 1993, 1989). Cette égalité s'explique en

raison du lit plat initial où les sédiments érodés, créent une dépression dans le lit, pour ensuite former une élévation (déposition) ayant comme résultat un lit en forme de rides. Enfin, dans cette représentation de la ride, la hauteur  $\Delta_i$  de celle-ci est mesurée entre son creux et son sommet.



**Figure 16. Schématisation du déplacement des sédiments sous forme de ride. D'après Yalin (1992).**

Ainsi, la forme sédimentaire (ride) se définit comme étant l'impression continue d'une forme par les structures d'un fluide visqueux sur le lit sédimentaire subissant un écoulement turbulent (Yalin, 1977 et Yalin 1964). Par conséquent, chacune des rides est dépendante des rides en amont et contribue à la ride en aval. En effet, selon Yalin (1992), une discontinuité engendre une première formation, qui est en elle-même une discontinuité de la surface du lit, qui formera la ride suivante, le tout, nécessitant une période de temps afin d'obtenir un équilibre apparent.

La mesure *in situ* par traceur radioactif faite à l'aide de l'appareil de mesure développé par Thibault (1984) utilise le principe développé par Cabadi (1984). Soma (1985) fabriqua le détecteur permettant de mesurer *in situ* en continu des variations de hauteur des formes sédimentaires. Selon Séka (2000), Hudier (1986) a redéfini le principe des sondes de mesures en l'appliquant au déferlement des vagues. Gagné (1989) a optimisé la prise et le traitement des données résultants. Ceci a permis une large utilisation des mesures *in situ* (Long & Chapalain, 1985; Long & Hudier, 1987a; Koutitonsky & Long, 1991; Long & Dufour, 1995; Séka, 2001). Par contre, elle a perdu

en popularité, malgré des résultats intéressants, en raison de la conscientisation environnementale émergente, qui n'est pas en faveur de l'utilisation de matériaux radioactifs dans les milieux naturels. Par contre, la composition et la forme de la ride, ainsi que les coefficients d'atténuation suivant une loi de Beer-Lambert (Beer, 1852) sont comparables, dans le principe, à l'atténuation des rayons X. De plus, il est intéressant d'explorer la possibilité d'utiliser le principe du traceur radioactif combiné à la tomodynamométrie.

Le principe de mesure utilisant l'atténuation des rayons gamma se présente comme suit :

$$I = I_0 e^{-\left( (\mu/\rho)_s \rho_s z_s + (\mu/\rho) \rho (D_{ss} - z_s) \right)} \quad (2)$$

où  $I$  est l'intensité du flux radioactif passant à travers une épaisseur  $z$  de sédiments,  $I_0$  est l'intensité initiale, à la source, du flux radioactif,  $(\mu/\rho)_s$  est le coefficient d'atténuation massique du sédiment,  $(\mu/\rho)$  est le coefficient d'atténuation massique de l'eau,  $\rho_s$  est la densité du sédiment,  $\rho$  est la densité de l'eau,  $D_{ss}$  est la distance entre la source et le détecteur et  $(D_{ss} - z_s)$  est la hauteur d'eau. Le flux de radiation gamma mesuré normalement sur une période de soixante-quatre jours est influencé par l'intensité de la source, les propriétés du sédiment, la distance entre la source et le capteur ainsi que l'épaisseur d'eau. La limitation de temps est imposée par la demi-vie du radio-isotope (Iridium 192 d'une demi-vie de 74 jours) utilisé (Jaffry & Heuzel, 1960).

Les mesures réalisées avec le traceur radioactif, ayant démontré leurs efficacités, ont servi d'inspiration dans l'utilisation des rayons X dans la mesure du transport sédimentaire. L'utilisation de la tomodynamométrie est définie plus loin, cette dernière nécessitant un développement particulier en raison de son application aux phénomènes géologiques.

## 1.5 Profils de porosité des formations sédimentaires

Wheatcroft (2002) a déployé un profileur de résistivité *in situ* en eau peu profonde afin de mesurer la porosité de la surface des sables marins sur 8 cm, avec une perturbation minimale. Cette méthode de profilage est étudiée en raison des profils de porosité obtenus contenant peu de perturbations. La porosité  $\varepsilon$  se définit comme l'espace libre entre les grains par rapport au volume total (Gaither, 1953 et Huettel et al., 1996). De plus, la porosité en surface de la ride est une composante importante du transport par charriage (Bennett et al., 1990; Terzaghi & Ralph, 1948; Terzaghi et al., 1948; Gaither, 1953; Meade, 1966; Beard & Weyl, 1973; Jackson et al., 1978; Richard et al., 1990; Briggs et al., 1998). La méthode traditionnelle de mesure de la stratification d'un lit est le prélèvement par carottage avec un diamètre d'échantillonnage de 10 cm (Bennett et al., 1990). Par conséquent, la mesure de la porosité des lits sableux à l'interface eau-sédiments est difficile à réaliser sans affecter la porosité de la matrice sédimentaire. L'erreur principale se produit lors du prélèvement de la carotte. Cette dernière est soumise à la sédimentation en surface conduisant à une sous-estimation de la porosité de surface. De plus, le transport entre le site et le lieu d'analyse entraîne des altérations car les travaux de Moore (2004) sur la déposition et la sédimentation démontrent une différence de porosité entre le centre et les parois d'un cylindre comme utilisé pour le prélèvement *in situ*.

La mesure de résistivité de Wheatcroft (2002) permet d'obtenir un profil de résistivité de la transition entre l'eau et la colonne sédimentaire (Fig. 17).

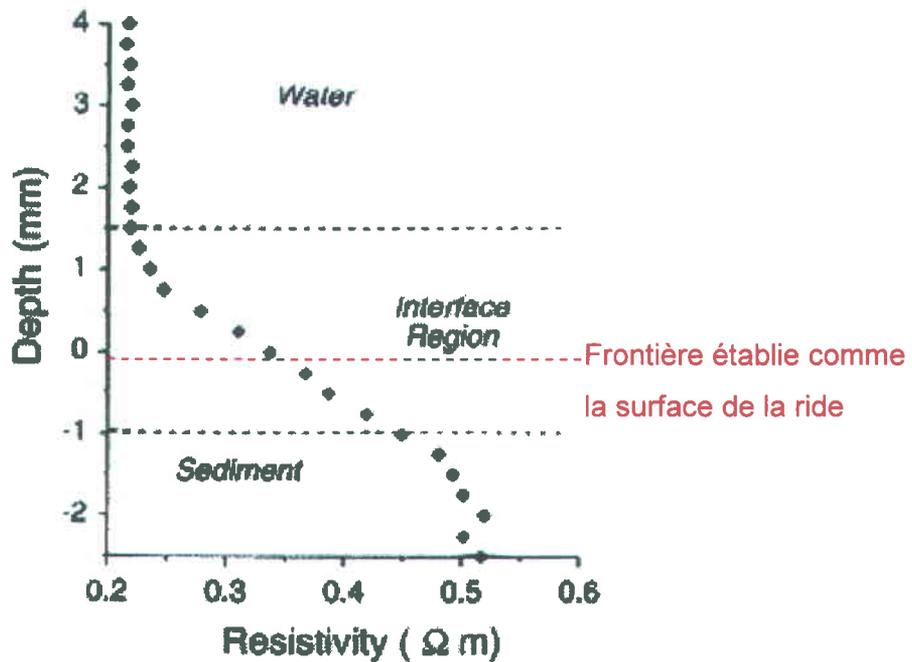


Figure 17. Profil typique de la résistivité ( $\Omega$  m) par rapport à la profondeur (mm). Modifiée d'après Wheatcroft (2002)

Le IRP ("*in situ resistivity profiler*") utilisé enregistre la résistivité du lit sédimentaire avec un minimum de perturbations, mais il est à noter qu'elles ne sont pas nulles (Andrews & Bennett, 1981, Kermabon et al., 1969; Winsauer et al., 1952; Jackson et al., 1978; Gerland et al., 1993). Le profil de résistivité mesurée, en  $\Omega$ m, est composé d'une colonne d'eau située au-dessus de +1.5 mm où la résistivité est d'environ 0.207  $\Omega$ m avec une variation de  $\pm 0.001$   $\Omega$ m. Sous ce point, la résistivité augmente d'environ 0.005  $\Omega$ m pour chaque 0.25 mm de profondeur. À une profondeur de -1 mm, la résistivité du mélange sédiments-eau atteint le point où elle est considérée comme suffisamment élevée pour faire partie du lit. Wheatcroft (2002) réalise la conversion des valeurs de résistivité en valeurs de porosité suivant la méthode d'utiliser par Ng (1999).

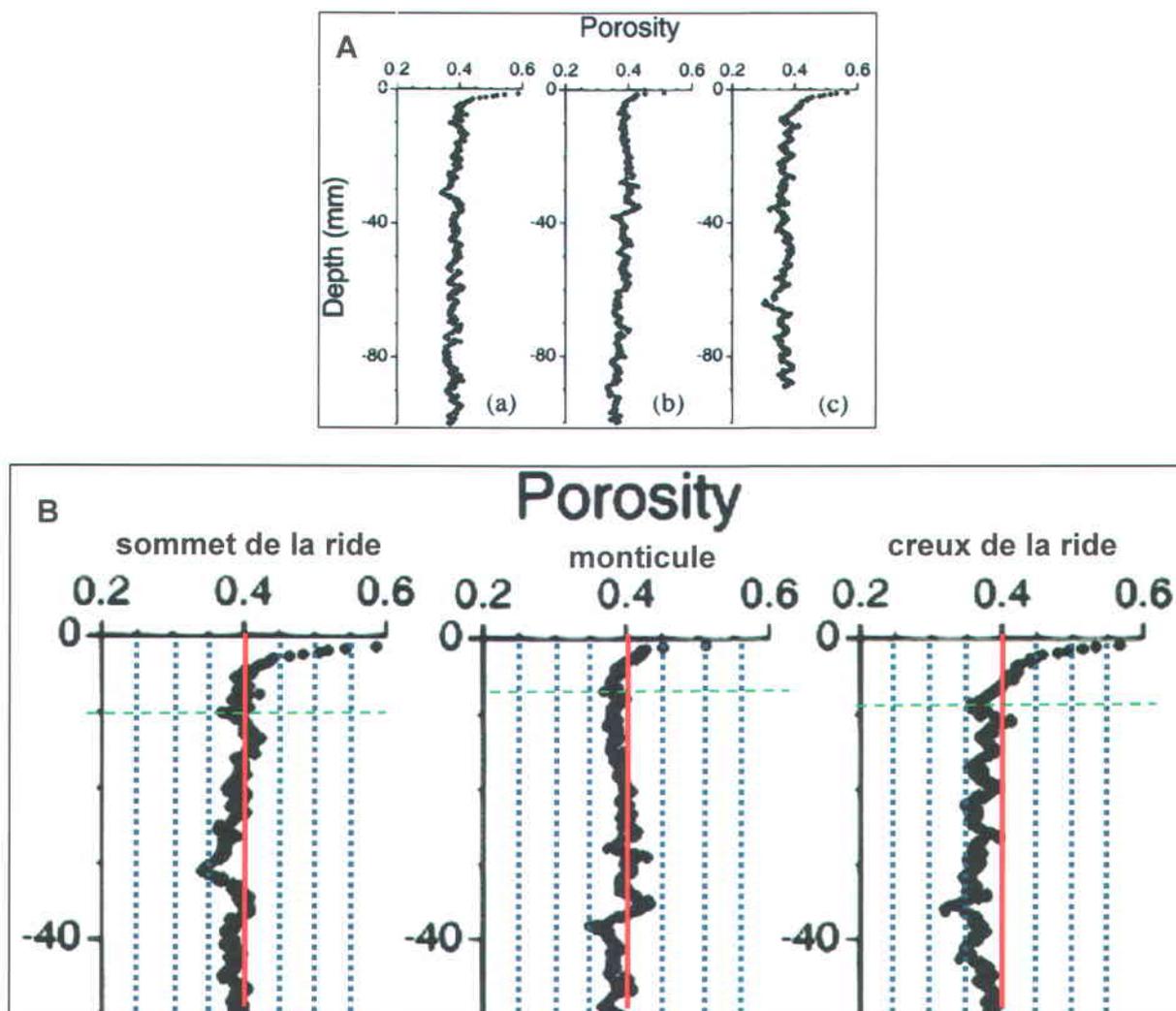
La partie supérieure des profils de porosité, entre 0 et -10 mm, présente une différence marquée de leur forme lors du passage entre 0.6 et 0.4 (Fig. 18). Il est important de rappeler que Wheatcroft (2002) identifie le niveau zéro de la ride environ à mi-chemin entre la valeur de résistivité de l'eau et celle du sédiment, comme indiqué sur le profil de la figure 17. Sur le point bas de la ride, la partie entre 0 et 2.5 mm du profil de porosité

(Fig. 18) correspond à la transition entre le fluide et le sédiment. La porosité passe progressivement de 0.567 à 0.450 sur une épaisseur de 2.5 mm. Ensuite, la porosité diminue de 0.450 à 0.350 entre 2.5 et 4.2 mm de profondeurs. À 2.5 mm, une inflexion apparaît dans la transition et elle est semblable à celle retrouvée par Montreuil (2006).

Les mesures de porosité de Wheatcroft (2002) sont composées de 67 profils similaires à ceux présentés (Fig. 18). L'analyse de ces résultats démontre clairement une variation dans la forme des profils de porosité entre la partie inférieure (point bas) du flanc d'érosion (Fig. 18, c) et la partie supérieure de la ride (point sommital) (Fig. 18, a).

La valeur moyenne de la porosité, entre -10 mm et -50 mm, est de 0.378 au sommet de la ride par rapport à 0.363 sur le point le plus bas de la ride. Cette différence de porosité comporte une augmentation des fluctuations par rapport à la moyenne de la porosité de  $\pm 0.05$  (à la base), comparativement à  $\pm 0.003$  (au sommet de la ride). Donc, la porosité entre 10 et 50 mm est légèrement plus faible à la base de la ride, mais cette section est aussi plus riche en perturbations, comparativement à l'autre section qui est soumise à la compaction (Meade, 1966 et Skempton, 1970). Sur le sommet de la ride, la porosité diminue exponentiellement, sans inflexion, de 0.590 jusqu'à 0.378 sur une profondeur de 10 mm. Plus bas, elle présente moins de variations qu'à la base de la ride.

Wheatcroft (2002) identifie dans les mesures du IRP deux et, potentiellement, trois nouveaux attributs à la porosité des sables marins. Premièrement, une mince couche de 5 à 15 mm existe contigüe à l'interface sédiments-eau. Deuxièmement, il y a une fluctuation de 0.10 dans la porosité de sous-surface, c'est-à-dire qu'elle n'est pas uniforme. Troisièmement, la porosité varie systématiquement en fonction de la position de la mesure, c'est-à-dire qu'il y a une différence dans la valeur et dans la forme du profil de porosité le long de la ride, entre la base et le sommet.



**Figure 18.** (A) Profils de porosité représentant les trois types d'emplacements de mesure. (a) Sommet de la ride. (b) Monticule. (c) Creux de la ride. (B) Agrandissement du graphique en A. Modifiée de Wheatcroft (2002).

Les résultats de porosité moyenne (Tab. 2) reproduit à la figure 19 sont présentés pour la couche supérieure (0 - 10 mm, identifié par le symbole  $\blacklozenge$ ) et pour le reste de la colonne sédimentaire (10 - 100 mm, identifié par le symbole  $\blacklozenge$ ) (Wheatcroft, 2002). La valeur de porosité mesurée est plus élevée à la base du flanc d'érosion (creux de la ride) et plus faible au sommet de la ride (crête de la ride). Ces résultats seront comparés avec les profils de densité obtenus par tomographie et convertis en profils de porosité.

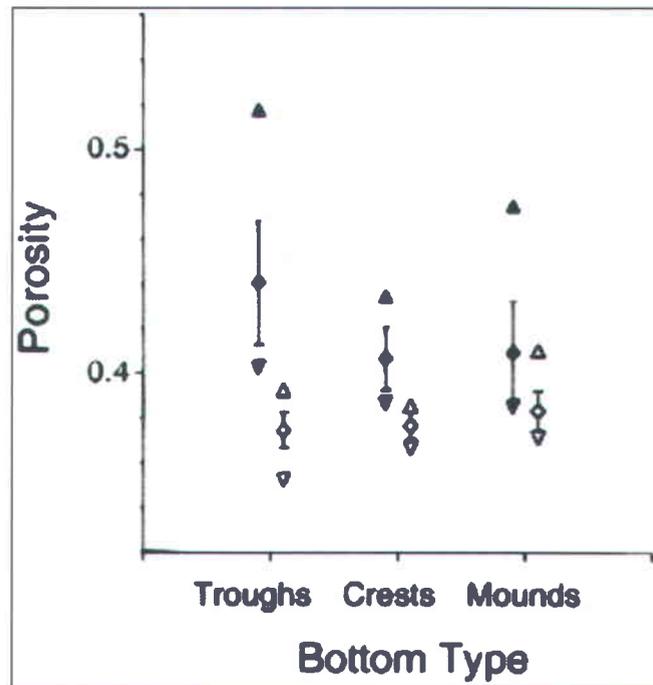


Figure 19. Graphique de la porosité moyenne. Mesures réalisées entre 1–10-mm (symboles solides) et entre 10–100-mm de profondeur (symboles ouverts). La granulométrie médiane est d'environ 0.400 mm avec un "très faible courant". (Wheatcroft, 2002).

Tableau 2. Tableau des porosités moyennes de la figure 18 en fonction de la position sur la ride, incluant une mesure réalisée sur un monticule de forme non exactement définie par Wheatcroft (2002).

Profondeur dans la colonne sédimentaire	Porosité moyenne dans le creux de la ride	Porosité moyenne sur le sommet de la ride	Porosité moyenne sur un monticule
1 - 10 mm	0.44	0.41	0.42
10 - 100 mm	0.27	0.28	0.31

## 1.6 Variables hydrauliques et écoulement au-dessus d'un lit sédimentaire

Bridge & Demicco (2008) Bridge & Bennett (1992) et Bennett & Best (1995) ont établi une synthèse des connaissances de l'environnement des rides sableuses en relation avec le courant (Fig. 20). Cette synthèse prend en compte l'augmentation et la diminution de la vitesse moyenne du courant et de la contrainte de cisaillement selon la position ou section de la ride. Par contre, les limites entre l'érosion et la déposition ne sont pas explicites. Enfin, la rétroaction du vortex d'érosion est affichée en indiquant une remontée du courant sur le flanc de progradation. De plus, Bridge & Demicco (2008) reprennent les essais réalisés par Yalin (1977 & 1992) afin d'expliquer la contrainte de cisaillement le long d'une ride ("*drag partitioning*"). Cette approche est réputée difficile en raison de la présence de turbulences dans le courant. Il est donc conseillé d'utiliser la mesure de la hauteur de la ride et de sa vitesse de migration, comme suggéré par Seka (2000).

La figure qui synthétise le mieux l'écoulement d'un fluide au-dessus d'une ride ou d'une dune est présentée par Bridge & Demicco (2008), elle est basée sur les résultats de Bennett & Best (1995) (Fig. 20). L'élévation de la surface du fluide est en inversion de phase avec la topographie de la formation sédimentaire (Fig. 20A). Ce déphasage est dû, tel qu'exigé par l'équation de continuité, à l'accélération du fluide le long du flanc d'érosion et à sa décélération sur le flanc de progradation. Ce phénomène hydraulique entraîne des variations significatives des profils verticaux des vitesses locales, de la contrainte de cisaillement et de l'intensité des turbulences. Bridge & Demicco (2008) stipulent que la décélération et l'inversion du courant sur le flanc de progradation sont suivies d'une augmentation du gradient de vitesse et par là-même de la contrainte de cisaillement. Ces derniers augmentent de façon progressive du point de rattachement du fluide jusqu'au sommet de la ride (Fig. 20C). Bridge & Demicco (2008) comme Middleton and Southard (1977) respectent ainsi l'équation de Bernoulli (Bernoulli, 1738; Chanson, 2004) qui indique que, pour un changement de vitesse le long de l'écoulement, il doit y avoir une élévation de la surface du fluide et/ou un changement dans la pression de ce dernier. Au sommet de la ride, la pression près du lit est plus

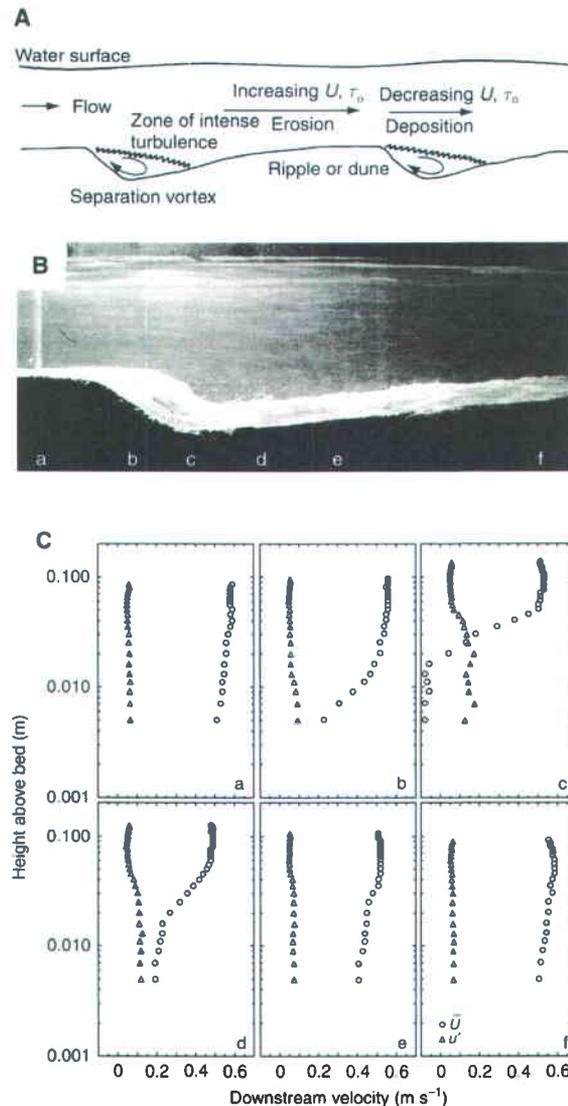
faible et la vitesse est la plus élevée ; cette vitesse est minimale au point de séparation du fluide, au-dessus du flanc de progradation.

Bridge & Demicco (2008) appliquent la loi du mur ("*Law of wall effect*") sur l'ensemble de la formation sédimentaire. Ainsi, la contrainte résultante du cisaillement inclut la résistance due à la forme géométrique de la ride. Pour cela les auteurs considèrent tant les grains mobiles que les grains immobiles, ce qui permet de tenir une hauteur de rugosité du sable comparable à la hauteur de la ride. Cette composante sera appliquée à la base du flanc d'érosion.

La loi du mur a aussi été appliquée à la partie basse des profils de vitesse de courant afin de déterminer les variations locales de la rugosité et de la contrainte de cisaillement (Bridge & Demicco, 2008). Cette loi est valide seulement pour un écoulement stationnaire très proche du lit. Les valeurs locales de rugosité et de contrainte de cisaillement obtenues sont en augmentation constante entre le point de rattachement et le sommet de la ride. Néanmoins, les valeurs de rugosité obtenues sont plus grandes que celles anticipées, ceci étant principalement dû à l'existence de petites formations (micro-rides) sur le dos de la ride principale. Ces résultats sont donc en accord avec les résultats de Middleton & Southard (1977), (Fig. 6).

Il est donc constaté que la structure géométrique interne des rides sableuses est le résultat des forces agissant sur le fluide en courant stationnaire (Van Den Berg, 1987) et de la relation entre la vitesse du fluide et la pression hydraulique, telle que décrite par les équations de Bernoulli (Fredse & Deigaard, 1994), qui expriment la conservation de l'énergie formée de l'énergie potentielle, l'énergie cinétique et la pression. Par contre, au-dessus d'un champ de rides sableuses, le courant n'est pas laminaire, mais turbulent. La transition entre le courant de l'écoulement tranquille et le courant turbulent se produit au-dessus des vortex d'érosion et dépend des frontières séparant le flanc d'érosion du flanc de progradation. Ces vortex sont à l'origine de la formation et de la migration des champs de rides. L'écoulement turbulent est causé par la présence d'une contrainte de cisaillement visqueuse telle qu'exprimée dans les équations de Reynolds (Fredse & Deigaard, 1994).

Il existe pour tout fluide réel possédant une viscosité des contraintes de cisaillement. En effet, même si un fluide est en mouvement, il doit avoir une vitesse nulle dans la zone de contact avec des solides. Toutes différences de vitesse au sein d'un fluide visqueux entraînent des contraintes de cisaillement. Les particules fluides allant plus vite sont freinées par celles allant moins vite et c'est pour cette raison qu'il faut exercer une certaine force pour mettre un fluide en mouvement.



**Figure 20.** (A) Définition des composantes de l'écoulement au-dessus d'une ride. (B) Image photographique de l'écoulement le long d'une ride, avec la position des profils de vitesse. (C) Profils de vitesses localisés sur l'image de B. Les profils sont présentés sous forme de vitesse moyenne à une hauteur donnée  $U$  et de vitesse efficace  $u'$  (RMS), aussi selon la hauteur. Modifiée de Bridge & Demicco (2008), basée sur Bennett & Best (1995).

La relation entre contrainte de cisaillement et gradient de vitesse s'écrit, pour un fluide newtonien dans un écoulement de Couette, comme (Gessler, 1971; Schmidt & Gyr, 1998; Bridge (2003a); Gyr & Hoyer, 2006; Bridge & Demicco, 2008)

$$\tau(y) = \varepsilon \frac{\partial u}{\partial y} \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3)$$

où  $\varepsilon$  est la pression de déformation,  $\mu$  est la viscosité dynamique,  $u$  est la vitesse du fluide à une hauteur  $y$ , qui est la hauteur de la colonne de fluide.

Dans une couche limite turbulente en régime permanent, l'écoulement turbulent uniforme est fonction de la friction sur le fond. Le frottement de l'écoulement du fluide, à la limite avec le solide, entraîne une réduction de la vitesse d'écoulement à l'approche de la frontière (Fig. 21). Bridge (2003a) montre que la principale caractéristique de la structure de la couche limite est turbulente (Kline et al., 1967) et qu'elle est constituée de trois différentes couches. Très proche des sédiments, une sous-couche visqueuse ( $\delta y$ ) de quelques millimètres d'épaisseur est présente à l'approche du lit, la vitesse tend vers zéro et les turbulences disparaissent. De plus, le flux agit comme si l'écoulement est laminaire. Cette couche est surmontée d'une couche tampon (Fig. 21), appelée couche interne, qui est composée d'une région de génération de turbulences. Plus au-dessus, une couche pleinement turbulente, appelée la couche externe n'est généralement pas influencée par la forme du lit (Bridge & Demicco, 2008). Les limites en hauteur entre ces trois couches sont approximativement définies entre la sous-couche visqueuse et la couche interne par :

$$\delta y = \frac{10\vartheta}{U_*} \quad (4)$$

où  $\vartheta$  est la viscosité cinématique et  $U_*$  est la vitesse de cisaillement. La constante d'une valeur de 10 provient d'une plage de valeurs variant entre 5 et 12. Entre les deux couches turbulentes, la viscosité cinématique devient quatre fois plus importante, en raison de la présence de vortex et de sédiments en suspension, et s'écrit :

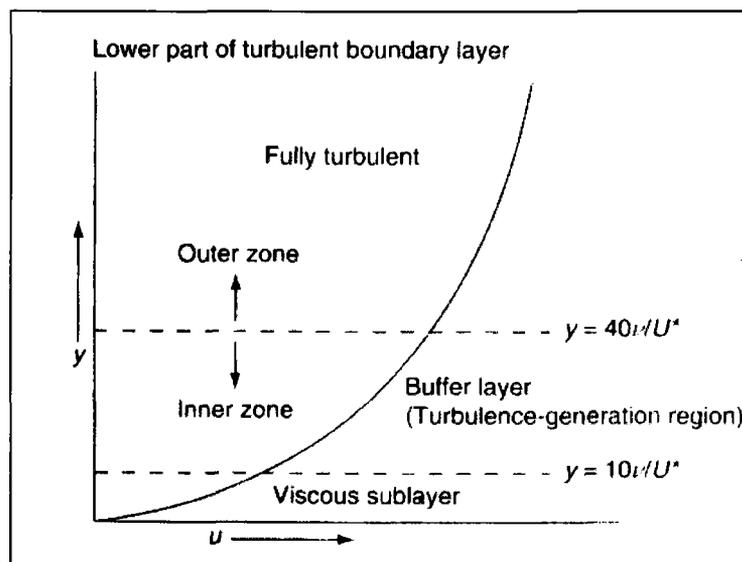
$$\delta y = 40\vartheta/U_* \quad (5)$$

La vitesse de cisaillement  $U_*$  pour sa part se définit comme suit

$$U_* = \sqrt{(\tau_0/\rho)} \quad (6)$$

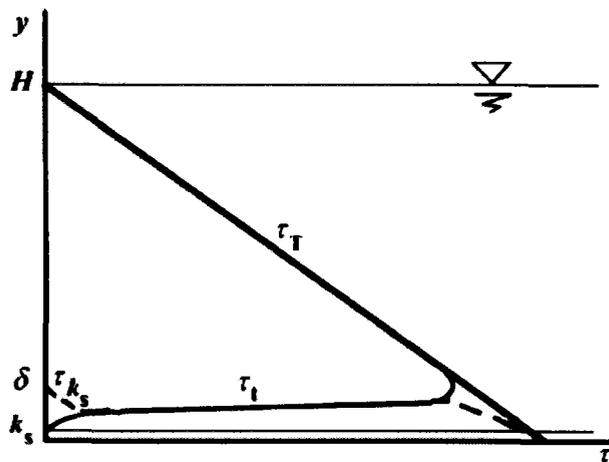
où  $\tau_0$  est la contrainte de cisaillement moyenne dans l'espace du fluide au niveau du lit et  $\rho$  est la densité du fluide.

Au moment du transport des sédiments, ces couches de séparation ne sont pas constantes le long d'un lit sédimentaire, principalement parce que  $U_*$  est variable le long du lit, majoritairement en raison des variations de vitesse locale (Fig. 20). Par contre, la contrainte de cisaillement est dominée par une condition d'équilibre, qui est utilisée en mécanique des fluides. Ainsi, les forces de frottement du lit doivent être égales, mais opposées aux forces d'accélération du fluide. Comme les forces de gravitation sont constantes, le courant devrait accélérer indéfiniment. Par contre, une force de frottement de la même valeur doit être transférée au lit afin qu'il conserve son immobilité.



**Figure 21. Présentation des principales caractéristiques de la structure des couches limites turbulentes en fonction de l'élévation et de la vitesse du courant. Adaptée de Bridge & Demicco (2008) d'après Bridge (2003a).**

La contrainte de cisaillement (Fig. 22) en fonction de la hauteur d'écoulement diminue linéairement avec la profondeur et disparaît à la hauteur  $H$ , qui est le niveau de la surface du fluide (Gyr & Hoyer, 2006). Cette diminution linéaire de  $\tau_T$  ne signifie pas que le passage se fasse progressivement, car le processus qui régit l'échange dynamique d'une couche à la suivante est soumis à un cisaillement. Le phénomène régissant cet échange est extrêmement complexe, même si il existe une hiérarchie dans les couches responsables dans le cisaillement des vitesses (Gyr & Hoyer, 2006). Ainsi, il existe deux zones distinctes, la première qui régit l'écoulement turbulent de la partie supérieure du fluide et la seconde qui régit l'écoulement très près du lit. Cette dernière couche est généralement présentée comme la rugosité du lit ( $k_s$ ) ou la hauteur de la forme sédimentaire (Nikuradse, 1933). Cette couche présente donc le plus grand intérêt car c'est celle-ci qui est à l'origine du transport par charriage et qui contrôle ce dernier.



**Figure 22.** La contrainte de cisaillement total  $\tau_T$  dans un canal à surface libre et une fonction linéaire fonction de la profondeur. Au-delà de la hauteur de la contrainte de cisaillement  $\delta$ , le transfert d'énergie est donné seulement par la contrainte de cisaillement  $\tau_t$ . À proximité du fond, la contrainte de cisaillement est donnée par la rugosité du lit  $k_s$ , qui est essentiellement fonction de la topographie du lit. (Gyr & Hoyer, 2006).

La force totale est composée de la contrainte de cisaillement, qui est tangentielle, et de la pression, qui est perpendiculaire à la surface du lit. Ces forces s'expriment en  $\text{N m}^{-2}$  ou en Pascal. La pression sur le lit se décompose comme étant la pression hydrostatique, qui est fonction de la hauteur d'eau, et de la pression hydrodynamique,

due au déplacement du fluide. De plus, l'équation de calcul de la contrainte de cisaillement  $\tau_0$  (Richardson et al., 2001) sur un fond sableux est utilisés localement, à la base du flanc d'érosion, compte tenu de la présence de turbulence et d'un vortex. Elle est donnée par

$$\tau_0 = \frac{\rho V^2}{\left[5.75 \log\left(12.27 \frac{y_0}{K_s}\right)\right]^2} \quad (7)$$

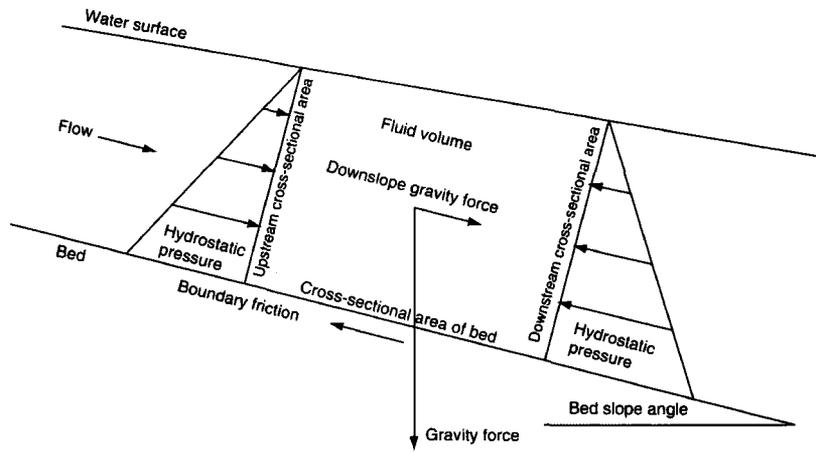
où  $\tau_0$  est la contrainte de cisaillement à une élévation  $y_0$  du fond,  $V$  est la vitesse moyenne du fluide dans le canal,  $\rho$  est la densité de l'eau et  $K_s$  est la rugosité du lit sédimentaire établie, pour un lit plat, en fonction de la granulométrie et pour une ride, en fonction de sa hauteur. Les valeurs en usage dans cette équation sont entre  $d_{84}$  et 3.5 fois  $d_{84}$ , respectivement pour un lit de sable pur et pour les sédiments grossiers. La valeur  $K_s$  dans une analyse locale à une longueur de ride considère donc la surface comme une couche de sable solide et immobile dont la rugosité est seulement  $K_s$ .

Le nombre de Reynolds permet de quantifier l'état d'un écoulement, à savoir s'il est laminaire, transitoire ou turbulent. Ce nombre représente ainsi le régime de l'écoulement. Pour un écoulement dans un canal à surface libre, le nombre de Reynolds se définit comme

$$Re = \rho U d / \mu \quad (8)$$

où  $U$  est la vitesse du fluide s'écoulant,  $d$  est la profondeur moyenne du lit,  $\rho$  est la densité du fluide et  $\mu$  est la viscosité dynamique du fluide. La transition d'un écoulement laminaire à turbulent s'opère par un nombre de Reynolds variant entre 500 à 2000. Il s'agit d'un paramètre important lors de l'élaboration du devis d'un canal.

La couche visqueuse est généralement de quelques millimètres d'épaisseur (Bridge & Demicco, 2008). C'est dans cette couche, dominé par une contrainte de cisaillement visqueuse, que la formation des turbulences devient inexistant (Bridge & Demicco, 2008). Afin qu'un écoulement soit considéré comme étant un écoulement uniforme, il doit répondre aux critères suivants : la profondeur d'eau, l'aire du canal, la pression hydrostatique moyenne, la vitesse moyenne du fluide et la contrainte de cisaillement doivent être constante entre les points de mesure (Fig. 23).



Parameters	Uniform flow	Non-uniform flow
Flow depths: $d_{up}, d_{down}$	$d_{up} = d_{down}$	$d_{up} \neq d_{down}$
Cross-sectional areas of flow: $a_{up}, a_{down}$	$a_{up} = a_{down}$	$a_{up} \neq a_{down}$
Mean hydrostatic pressure: $P_{up}, P_{down}$	$P_{up} = P_{down}$	$P_{up} \neq P_{down}$
Mean flow velocities: $U_{up}, U_{down}$	$U_{up} = U_{down}$	$U_{up} \neq U_{down}$
Bed shear stress: $\tau_0$	$F = G \sin \alpha$	$F \neq G \sin \alpha$
Cross-sectional area of bed: $a$		
Boundary friction: $F = \tau_0 a$		
Gravity force: $G$		
Bed slope: $S = \sin \alpha$		

**Figure 23. Valeur moyenne des forces gravitationnelles, de pression hydrostatique et de friction sur le lit agissant sur un écoulement stationnaire et non stationnaire. (Bridge & Demicco, 2008), de Bridge (2003b)**

La contrainte de cisaillement moyennée dans l'espace reprend un équilibre entre la gravité, la friction et les pressions. Ainsi la contrainte de cisaillement s'écrit

$$\tau_0 = \rho g d S \quad (9)$$

où  $\tau_0$  est la contrainte de cisaillement du fluide moyenné dans l'espace au niveau du lit,  $d$  est la profondeur moyenne,  $\rho$  est la densité du fluide et  $S$  est la pente du lit et de la surface du fluide. Le même raisonnement permet d'obtenir une formule prenant en compte l'épaisseur très près du lit ( $d-y$ ). Ainsi, la contrainte de cisaillement moyenne à la base du fluide devient

$$\tau = \rho g (d - y) S \quad (10)$$

où  $y$  est la hauteur dans la colonne d'eau. En combinant les deux formules,  $\tau$  devient

$$\tau = \tau_0 \left( \frac{1-y}{d} \right) \quad (11)$$

Cette dernière formule explique la diminution linéaire de la surface du fluide jusqu'à la surface du lit sédimentaire (Fig. 22). La contrainte de cisaillement ainsi obtenue est

d'une importance majeure, car elle contrôle le transport sédimentaire. Par contre, l'utilisation de cette formulation implique que le lit sédimentaire doit être considéré comme une surface solide et comparable aux plaques utilisées dans un écoulement de Couette.

En supposant un écoulement stationnaire, de vitesse moyenne  $U$  constante, sur la longueur d'un canal à surface libre (Fig. 23), l'énergie cinétique par unité de masse d'eau est donnée par

$$\frac{mU^2}{2mg} = \frac{U^2}{2g} \quad (12)$$

et l'énergie totale du système s'exprime comme

$$E = \frac{U^2}{2g} + d + z \quad (13)$$

où le premier terme de droite est la vitesse de tête, le second terme est la pression de la tête et le troisième, la hauteur de la tête. Cette dernière équation provient de l'équation de Bernoulli qui exprime l'équilibre entre les différentes pressions d'un système. Lorsque l'écoulement est étudié près du lit sédimentaire, la hauteur est nulle ( $z=0$ ) et la hauteur de tête spécifique  $H$  est donnée comme suit

$$H = \frac{U^2}{2g} + d \quad (14)$$

Comme le volume d'eau dans le système est donné par  $Q=Udw$ , où  $w$  est la vitesse dans l'axe du fluide et  $Q$  le volume de fluide sont constants, il est possible d'exprimer la hauteur de tête spécifique ou la variation de profondeur comme étant

$$H = \frac{Q^2}{(2gd^2w^2)} + d \quad (15)$$

En assumant que  $Q$  et  $w$  demeurent constantes, il existe deux valeurs de  $d$  pour une valeur de  $H$  donnée. Ainsi, à un petit  $d$  est associée une grande vitesse  $U$ , ce qui représente un écoulement super critique, caractérisé par une vitesse de courant importante et une faible pression. Lorsque l'inverse se produit, il est alors question d'écoulement sous-critique (Fig. 23). Les deux types d'écoulement sont séparés par une profondeur d'eau critique ( $d_c$ ) obtenue en dérivant l'équation 15 afin d'obtenir

$$d_c = \left[ \frac{Q^2}{(gw^2)} \right]^{1/3} \quad (16)$$

Cette dernière équation, en considérant que Q et w sont constants, peut s'écrire comme suit

$$\frac{U}{\sqrt{gd_c}} < 1 \quad (17)$$

L'équation ainsi écrite conduit à l'introduction du nombre de Froude (Froude, 1877; Znamenskaya, 1962, 1969; Bonnefille, 1963)

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gd}} \quad (18)$$

Le nombre de Froude est utilisé afin de caractériser, dans un fluide, l'importance relative des forces liées à la vitesse et à la gravité. Ce nombre est utilisé essentiellement dans les phénomènes d'écoulement à surface libre, en particulier dans les études de cours d'eau. Ainsi, si le nombre de Froude est plus petit que 1, l'écoulement est sous-critique (ou régime fluvial caractérisé par une forte hauteur d'eau et une faible vitesse) et, si le nombre de Froude est supérieur à 1, l'écoulement est dit super-critique (ou régime torrentiel caractérisé par une faible hauteur d'eau et une forte vitesse).

Lorsque la vitesse du fluide dépasse la vitesse d'initiation du transport (Yang, 1973; Vanoni, 1975, 1978; Zanke, 1982; Dietrich, 1982; Jimenez & Madsen 2003; Carmenen & Larson, 2004) et que l'écoulement est sous-critique, des rides commencent à se former. Lorsque les premières formes apparaissent, la couche visqueuse est modifiée, entraînant la modification de l'écoulement du flanc de progradation, ce qui entraîne également la séparation du fluide. Le système évolue ainsi jusqu'à la formation et la migration de rides continues et successives (Leeder, 1982).

L'effet du transport sédimentaire sur les caractéristiques de l'écoulement du fluide implique que la présence de sédiments dans le fluide modifie les valeurs de densité et de viscosité du mélange sédiments-eau. Dans la colonne d'eau, la concentration de sédiments dans l'eau peut être obtenue à l'aide de l'équation d'Einstein & Krone, (1952).

$$C = \frac{\rho_{mix} - \rho}{\rho_s - \rho} \quad (19)$$

où  $\rho_{mix}$  est la densité du mélange eau-sédiments,  $\rho_s$  est la densité des sédiments et  $\rho$  est la densité de l'eau à la température mesurée lors de l'expérience, de l'équation (19) la porosité  $\varepsilon$  est obtenue par

$$\varepsilon = 1 - C \quad (20)$$

La charge en suspension, située entre le point de rattachement du fluide et le point de séparation du fluide, peut être analysée en utilisant la viscosité dynamique selon l'équation d'Einstein & Krone, (1952)

$$\mu_s = \mu (1 + 2.5C + 6.25C^2 + 15.26C^3) \quad (21)$$

où  $\mu$  est la viscosité du fluide (eau à la température d'expérimentation) et  $C$  est la concentration des sédiments obtenus de l'équation (19).

Enfin, la viscosité cinématique peut être obtenue en combinant l'équation (21) et la densité du mélange

$$v_s = \frac{\mu_s}{\rho_s} \quad (22)$$

Afin d'estimer la vitesse d'initiation du transport sédimentaire, deux différentes approches peuvent être utilisées : une approche dite idéale, dans laquelle les particules sédimentaires sont supposées sphériques, ou une autre plus près de la réalité du lit sédimentaire, dont la forme des grains de sédiments naturels est considérée (Jimenez & Madsen, 2003; Van Rijn et al., 1989). Généralement la première approche est la plus largement utilisée. La vitesse d'initiation du transport sédimentaire appliquée à une sphère au repos dans un fluide peut être estimée en déterminant l'équilibre entre la force gravitationnelle et le coefficient de frottement.

$$(s - 1)\rho g \frac{\pi}{6} d^3 = \frac{1}{2} \rho C_D \frac{\pi}{4} d^2 w_s^2 \quad (23)$$

où  $s$  est la gravitation spécifique du sédiment tel que donnée par  $\rho_s/\rho$ ,  $\rho_s$  et  $\rho$  étant respectivement la densité du sédiment et la densité de l'eau,  $g$  étant l'accélération

gravitationnelle,  $d$  étant le diamètre médian du sédiment,  $C_D$  étant le coefficient de frottement et  $w_s$  étant la vitesse d'initiation du transport. L'équation (23) peut être remaniée permettant d'obtenir une équation d'initiation de la vitesse du transport.

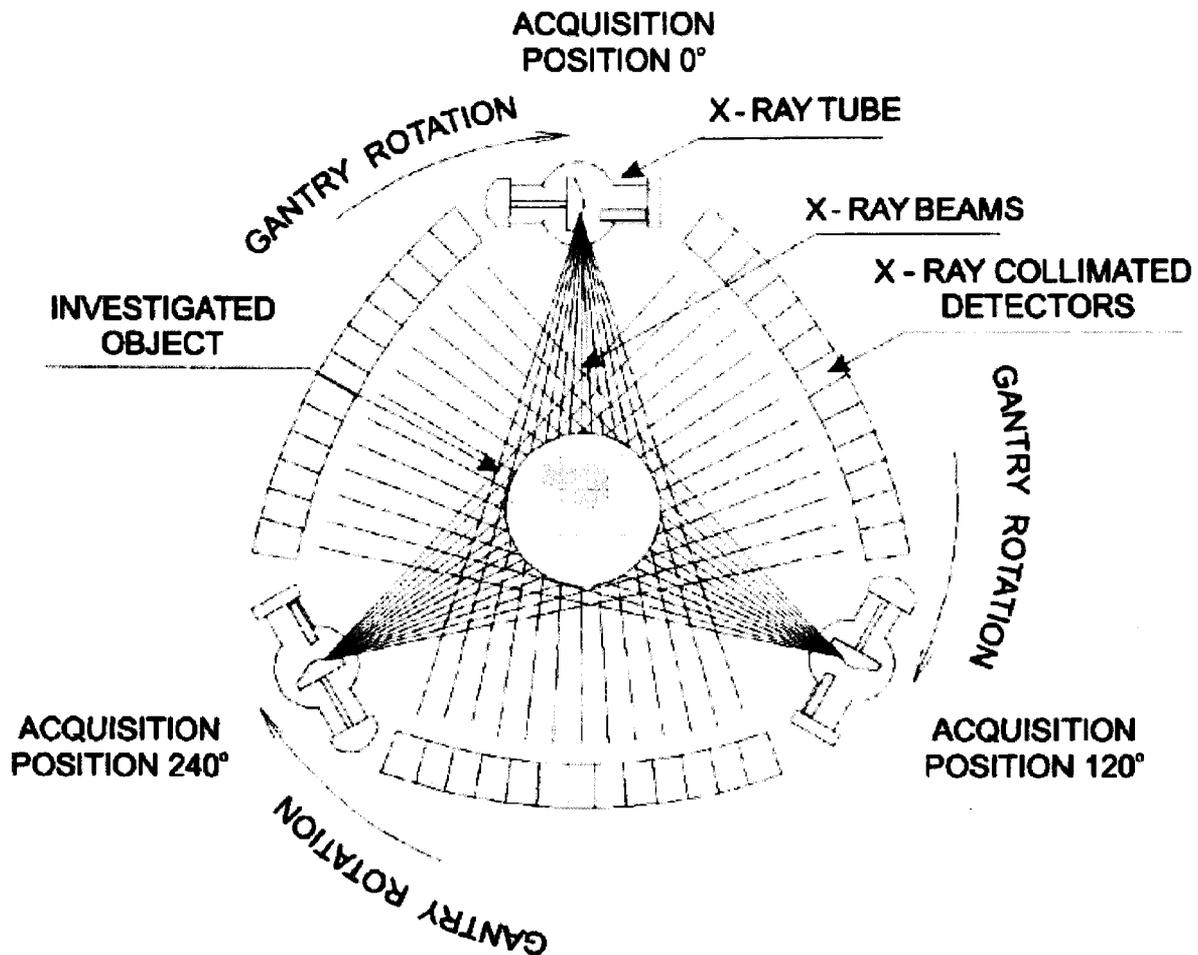
$$w_s = \sqrt{\frac{4(s-1)gd}{3C_D}} \quad (24)$$

Les paramètres hydrauliques énoncés (Bridge & Demicco, 2008 et Bennett & Best, 1995) dans cette partie décrivent bien les phénomènes qui entrent en jeu ainsi que leurs variables. Ces variables sont utilisées afin de quantifier et modéliser les paramètres à l'intérieur de l'écoulement. De plus, ces paramètres montrent bien l'interaction entre le fluide et le sédiment (Richardson et al., 2001), interaction qui justifie une attention particulière au milieu séparant l'écoulement du fluide de la formation sédimentaire, cette interaction étant à l'origine du transport sédimentaire.

## 1.7 Tomodensitométrie

### 1.7.1 Principes et applications

La tomodensitométrie, la tomographie, la tomographie axiale calculée par ordinateur (TACO), le CT-Scan ("*Computed Tomography Scanning*") et le CAT-Scan ("*Computer Assisted Tomography Scanning*") sont tous des synonymes se rapportant à une technique d'imagerie médicale qui consiste à mesurer l'absorption des rayons X par la matière et, par traitement à l'aide d'ordinateurs, à numériser et à reconstruire des images à deux ou trois dimensions. Pour réaliser l'acquisition des données, la technique d'analyse tomographique par coupes est utilisée, ceci en soumettant le patient ou l'objet au balayage d'un faisceau de rayons X qui est mesuré par une barrette de capteurs situés à l'opposé du tube. Afin de réaliser un balayage complet, le tube ainsi que les détecteurs sont en rotation autour de l'objet (Fig. 24). L'imagerie en trois dimensions est obtenue par un déplacement de l'objet ou du statif coulissant. La mesure, en trois dimensions, doit donc s'effectuer suivant un déplacement linéaire générant une mesure de forme hélicoïdale.

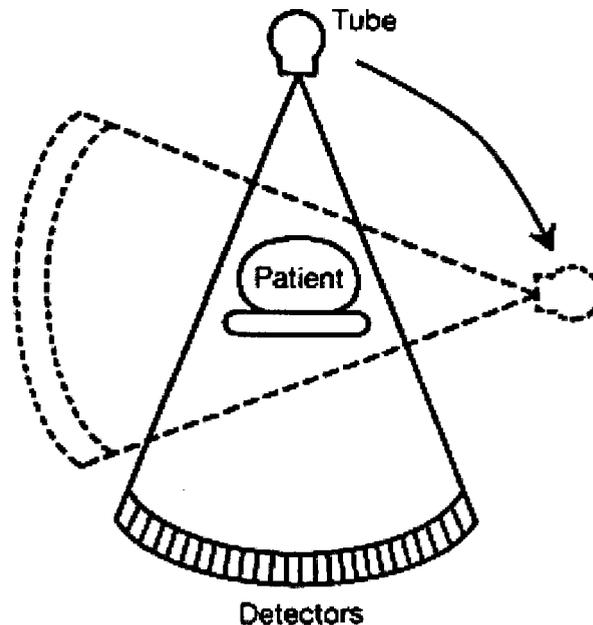


**Figure 24.** Représentation schématique de l'acquisition des projections pour un scanographe de troisième génération. La source de rayons X est opposée à des détecteurs collimatés et opposés, qui sont fixés sur un statif qui tournent autour de l'échantillon. Ainsi, pour chacune des projections, les coefficients d'atténuation linéaire à travers l'échantillon sont déterminés. Tirée de Dului, (1999).

La tomographie médicale préalablement conçue pour l'étude du corps humain (Hounsfield, 1972, 1973) permet d'étudier la structure interne d'un mélange solide-liquide en produisant des images 3D (Brooks & Di Chiro, 1975; Rutherford et al., 1976a, 1976b; Dubai & Wiggli, 1977; Morgan, 1983). Aussi, il est possible de réaliser des mesures en trois dimensions sur des matériaux non organiques tels que les carottes de forage, les roches, les fossiles (Rowe et al., 2001), et les météorites (Gnos et al., 2002) et les dépôts sédimentaires (Vinegar, 1986; Wellington & Vinegar, 1987; Boespflug et al., 1995; Nickel & Beckmann, 2002; lovea et al., 2006).

Par conséquent, la tomographie est présente dans de nombreux domaines d'applications en raison de son caractère non destructif et non intrusif. Aussi, cette technique est utilisée en recherche pétrolière afin de déterminer l'architecture interne des sols et des roches, la caractérisation des milieux et l'analyse des propriétés de roches réservoirs (Honarpour et al., 1985; Hicks et al., 1992; Peters & Afzal, 1992; Peters et al., 1996; Mori et al., 1999; Mooney, 2002). Elle est également utilisée dans l'étude en trois dimensions des hétérogénéités sédimentaires (Wellington & Vinegar, 1987). En lien avec cette étude, elle est utilisée dans l'estimation de la porosité interne des lits sédimentaires (Kantzas et al., 1992). De plus, la technique est appliquée afin d'identifier la répartition des structures sédimentaires (Hunt et al., 1988a, 1988b; Champanet et al., 1989 ; Kawamura, 1990; Dixon, 1991; Blaich et al., 1992; Boespflug et al., 1995; Crémer et al., 2002) et de caractériser les sédiments par leur granulométrie, leur porosité et leur densité (Wellington & Vinegar, 1987; Amos et al., 1992; Amos et al., 1996). Elle est employée dans la détermination de la perméabilité des sols (Petrovic et al., 1982; Heijs et al., 1996). Enfin, elle permet de déterminer les faciès sédimentaires et l'épaisseur de remaniement des sédiments (Schillinger & Long, 2001), ceci démontrant l'importance de cette technique dans la mesure des sédiments en mode statique, dans les lits sédimentaires inactifs. Par conséquent, il s'agit de la technique non destructive et non intrusive la plus efficace pour la caractérisation des formations sédimentaires en milieu hydraulique actif (Montreuil, 2006), qui caractérise le transport sédimentaire.

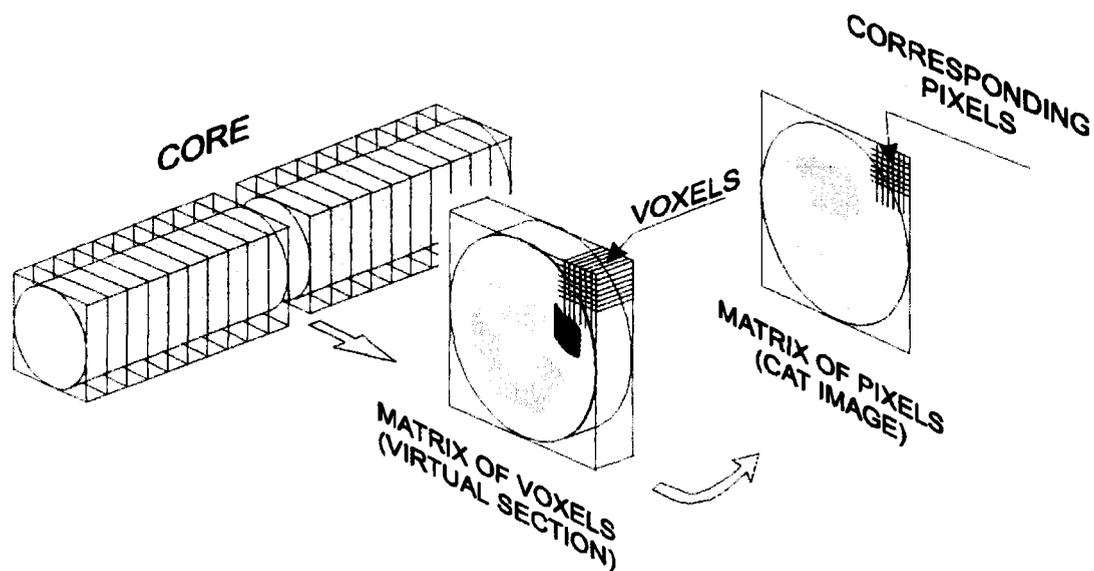
Le concept de tomographie à rayon X repose sur 3 éléments : une source de rayon X, un objet au travers lequel voyagent les rayons X et une série de détecteurs qui mesurent l'atténuation du signal. La tomographie de 3<sup>ème</sup> génération utilise une série de détecteurs en rotation autour de l'objet (patient) comparativement à la radiographie conventionnelle, qui utilise une source et un détecteur fixe (Fig. 25).



**Figure 25.** Schéma du tube-détecteur de système de 3<sup>ème</sup> génération tomodynamomètre. Le tube à rayons X émet un faisceau en éventail fortement collimaté de rayons X qui passe à travers le patient et atteint une barrette de détecteurs. Le tube et les détecteurs sont en rotation autour du patient. Une exposition comprend souvent une rotation de 360°. (Smith, 2011)

Les données aux détecteurs du scanographe sont utilisées pour créer une image 2D, nommée coupe ("*slice*"). Plusieurs coupes sont regroupées pour former une image en 3D (Fig. 26).

La source de rayon X du scanographe possède un spectre d'énergie permettant une pénétration contrôlée dans le matériel. Une onde hautement énergétique pénètre les matériaux denses, mais la sensibilité aux variations subtiles de densité et de composition est moindre. En effet, l'intensité du rayon X émis par rapport au signal reçu influence le rapport signal à bruit dégradant la clarté de l'image. C'est pourquoi l'intensité est optimisée afin de s'adapter aux matériaux cibles et à leur taille. Ceci est réalisé avec de l'interface d'opérations qui se compose de différents filtres de reconstruction (Siemens, 2001).



**Figure 26.** Représentation schématique de la relation entre l'objet étudié et son image tomographique. La rotation de la source et des détecteurs du statif détermine une section virtuelle à travers l'échantillon dont l'épaisseur est à peu près égale au diamètre du faisceau de rayonnement. Comme résultat de l'algorithme de reconstruction, cette section est décomposée en éléments de volume ("voxels"). Chaque coupe forme une matrice de 512x512 voxels qui est caractérisée par une valeur moyenne du coefficient d'atténuation linéaire exprimée en HU. D'après Wellington & Vinegard (1987), modifié par Duluiu (1999).

L'imagerie 3D provenant du scanographe correspond à l'atténuation linéaire du rayon X au travers du matériel examiné (Fig. 27). L'atténuation est caractérisée par la loi de Beer, qui décrit la réduction de l'intensité ou l'absorption en fonction de l'énergie des rayons X, de la longueur du trajet, et du coefficient d'atténuation linéaire du matériel. Un algorithme de reconstruction est ensuite utilisé pour reconstruire la distribution de l'atténuation des rayons X dans le volume examiné.

$$I = I_0 \exp[-\mu x] \quad (25)$$

où  $I_0$  est l'intensité initiale du rayon X,  $\mu$  est le coefficient d'atténuation linéaire du matériel numérisé et  $x$  est la distance parcourue par le rayon X.

Si le matériel n'est pas homogène, ce qui est le cas de la majorité des matériaux étudiés, l'équation 25 devient

$$I = I_0 \exp\left[\sum -\mu_i x_i\right] \quad (26)$$

où la variable  $i$  représente l'indice des différents matériaux qui composent l'objet.

La majorité des algorithmes de reconstruction médicale utilise l'équation (26).

Le groupe de tranches mesurées instantanément forme une matrice volumétrique tridimensionnelle renfermant la densité de chacun des éléments de volume ("voxels") (Fig. 28). L'atténuation des rayons X est donc fonction de la densité du matériau, de son numéro atomique effectif et de l'épaisseur de l'échantillon analysé. Selon Duluiu (1999), quatre effets permettent de caractériser l'interaction des rayons X avec la matière. Toutefois, dans les scanographes médicaux qui utilisent l'énergie en-dessous de 150 keV, seuls deux principaux effets caractérisent l'interaction des rayons X avec la matière : l'effet photo-électrique et l'effet Compton. L'effet Compton est, par définition, la diffusion inélastique d'un photon sur l'électron d'un atome. Au cours du processus d'émission d'un électron par le tube, l'électron est éjecté de l'atome, qui se retrouve donc ionisé. Compton a observé l'allongement de la longueur d'onde du photon dans cette diffusion. Cette variation de la longueur d'onde entraîne une variation de l'énergie  $\Delta E$  telle que donnée par le Postulat de Planck-Einstein (Siegbahn, 1968). Les rayons X dispersés par l'effet Compton et qui atteignent le récepteur additionnent une brume de fond spécifique à chaque densité, ce qui masque les différences d'absorption entre les tissus et peut générer des représentations floues aux frontières entre les tissus. Ainsi, un certain nombre de méthodes sont couramment utilisées pour contrer leurs effets, ces derniers faisant partie du logiciel et n'étant pas disponible au publique (Siemens, 2007).

L'effet photoélectrique consiste en l'émission d'électrons de la matière lors de l'absorption du rayonnement électromagnétique du faisceau composé de rayons X (Siegbahn, 1968). Cela a pour effet de réduire le contraste entre deux matériaux de densités différentes. La solution est de réduire la puissance, mais la pénétration dans le matériel de forte densité s'en trouve grandement affectée.

Dans les mesures de mélange eau-sédiments appliquées à cette étude, l'effet photo-électrique domine (Moore, 2004).

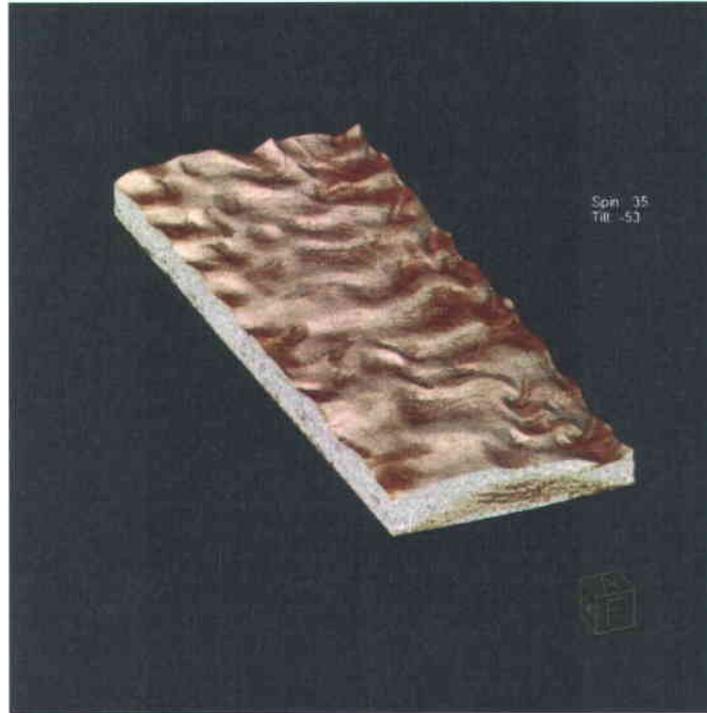


Figure 27. Image tridimensionnelle d'un lit sédimentaire mesuré par rayons x avec le scanographe. Le volume eau/lit sédimentaire de 300 mm de largeur par 300 mm de hauteur par 900 mm de longueur est formé de 1500 coupes de 512 x 512 pixels pour des voxels de 0.6 mm x 0.6 mm x 0.6 mm.

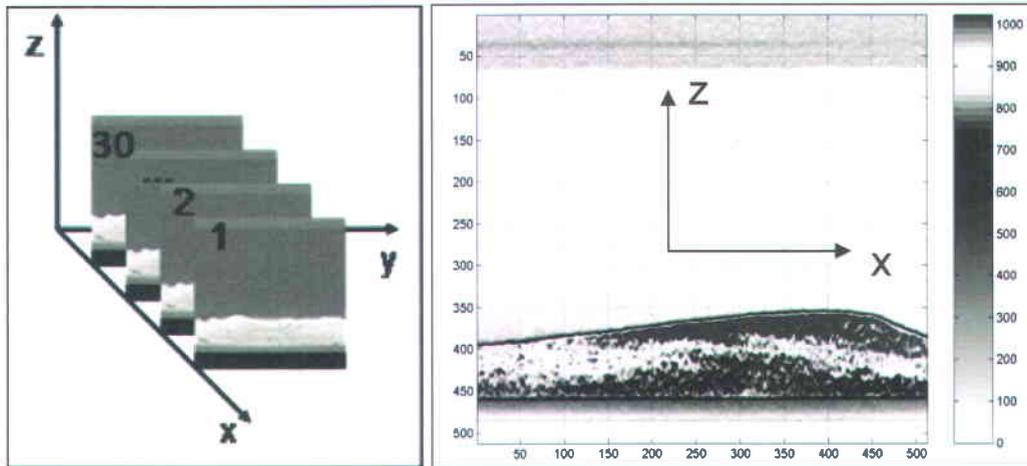
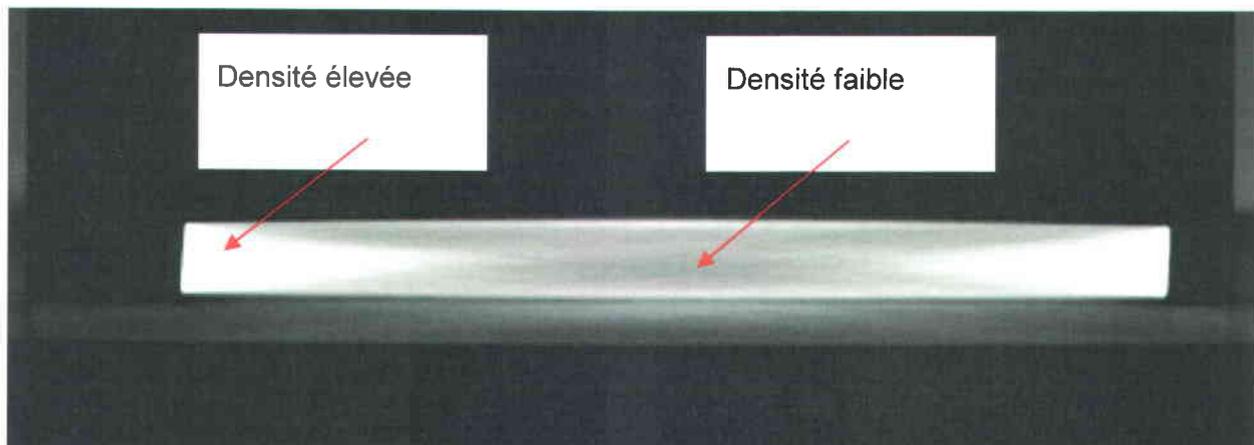


Figure 28. Volume mesuré au scanographe, formé par 30 coupes de 0.6 mm d'épaisseur prélevées à un intervalle de 0.6 mm. Chacune des coupes a une résolution de 512 x 512 pixels et forme un volume complet de 300 x 300 x 18 mm.

Sur tous les types d'appareils de mesure utilisant les rayons X, on retrouve dans les résultats des déformations, des effacements ou des altérations importantes de l'image. On nomme ces bruits ou ces phénomènes indésirables se nomment des artéfacts.

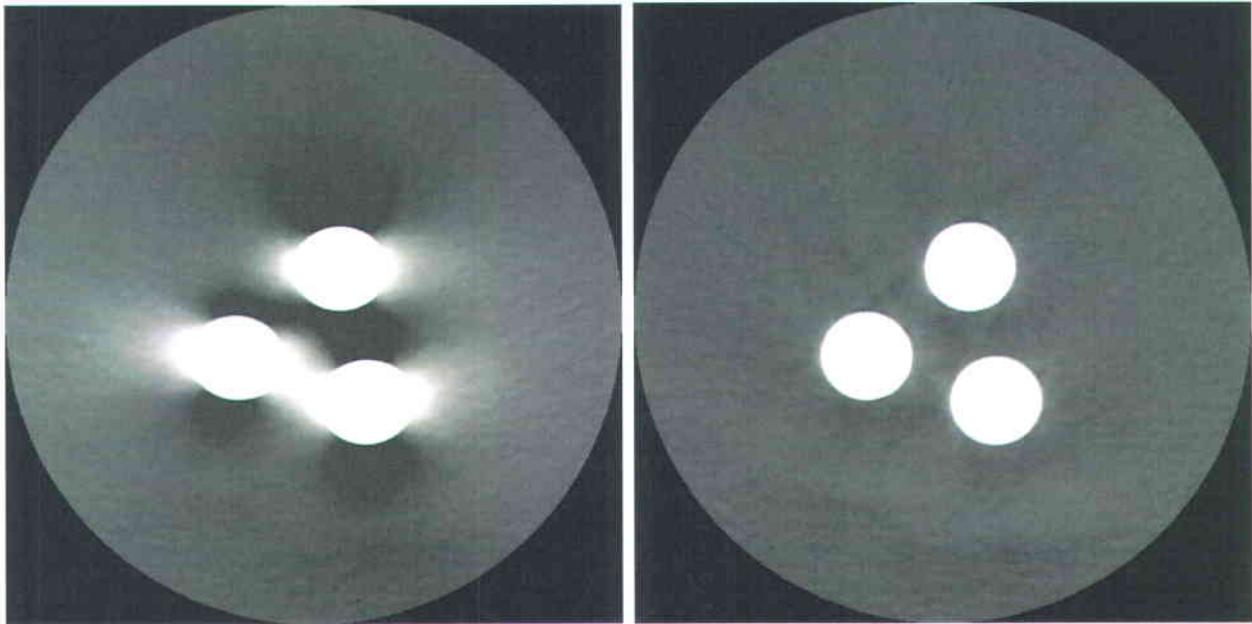
### 1.7.2 Artéfacts

Les artéfacts se présentent sous six formes différentes. Ainsi, l'artefact dominant est le durcissement du faisceau ("*Beam hardening*") ou la dispersion du faisceau qui peut donner une apparence creuse ou une impression de vide. Il se produit lorsqu'il y a plus d'atténuation dans le centre de l'objet que sur le pourtour. Ceci peut être partiellement corrigé par filtration numérique (Barrett & Keat, 2004) ou en utilisant des techniques de reconstruction utilisant des filtres lisses ("*smooth*") (Jadu et al., 2011). Ainsi, le durcissement du faisceau fait en sorte qu'un objet homogène et dense apparaît plus dense en périphérie qu'en son centre (Fig. 29).



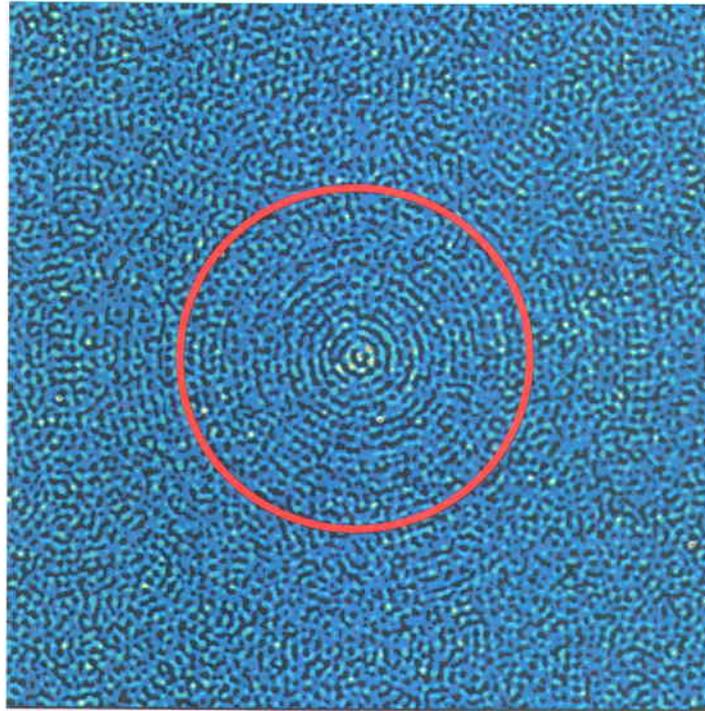
**Figure 29.** Image tomodensitométrique d'une plaque d'aluminium. Les artéfacts de durcissement de faisceau sont visibles par une diminution de la densité dans la partie centrale de la plaque.

L'effet de volume partiel ("*Partial volume effect*") apparaît comme un brouillage des bords tranchants ou des angles droits (Fig. 30). Il est dû au scanographe qui est incapable de différencier entre une petite quantité de matériau de haute densité (par exemple, l'os) et une plus grande quantité de faible densité (par exemple, tissus mous). L'ordinateur de reconstruction tente de faire la moyenne des deux densités ou des structures, et l'information exacte est perdue. Ceci peut être partiellement corrigé par numérisation à l'aide de tranches ou coupes les plus minces possibles.



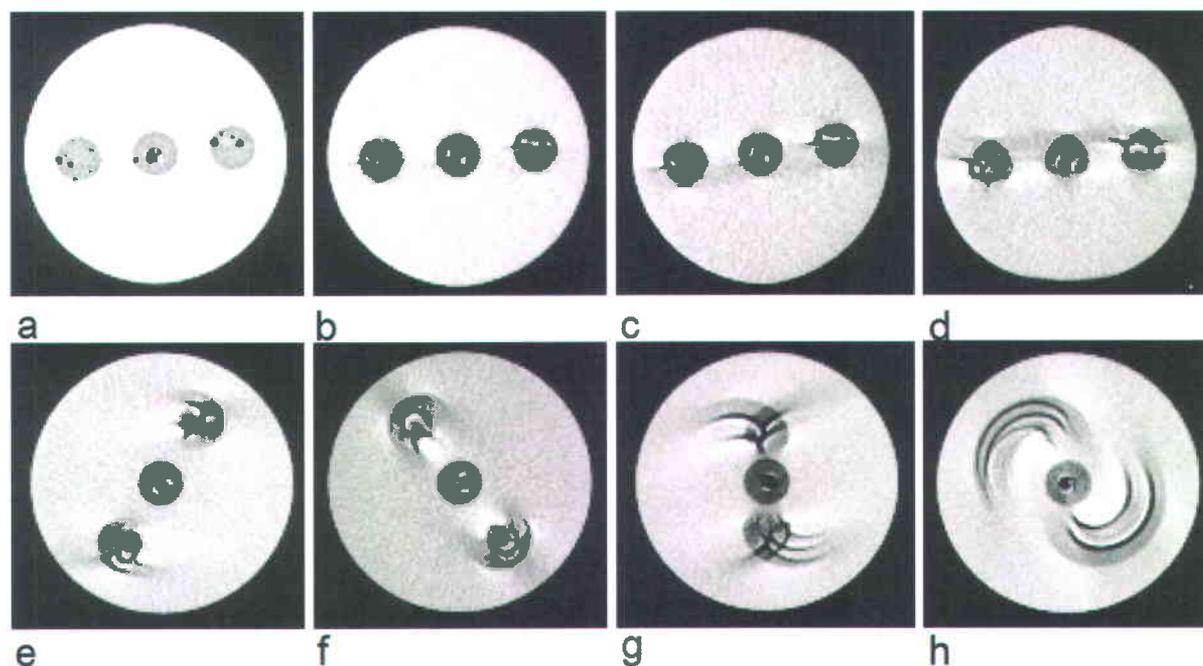
**Figure 30.** Images tomodensitométrique de trois tiges en acrylique de 12 mm de diamètres soutenus en parallèle dans l'air à environ 15 cm de l'axe centrale du scanographe. (a) Image obtenue avec les tiges partiellement pénétrées dans le volume de mesure montre des artéfacts de volume partiel. (b) Image obtenue avec les tiges complètement pénétrées dans le volume de mesure ne montre pas d'artéfacts de volume partiel. (Barrett & Keat, 2004)

L'artéfact Anneau ("*Ring artefact*") est probablement l'objet le plus commun dans la tomographie d'objet de forte densité ou de grande dimension (Fig. 31). Ainsi, l'image d'un ou plusieurs anneaux apparaît dans l'image mesurée. Cela est généralement dû à un détecteur en défaut, à une déficience dans la calibration de l'appareil ou à une variation dans la température ambiante de la pièce, ce qui influence la calibration originale (Wilting & Timmer, 1999). Les artéfacts circulaires ("*Ring artéfacts*") du scanographe utilisé sont principalement causés par la dilatation thermique de la barre de capteur, un changement de la température ambiante ou l'expiration du délai avant une nouvelle calibration (Fig. 32). D'un point de vue des logiciels, lors de la reconstruction, un chevauchement est nécessaire pour combler l'espace entre les capteurs. La dilatation thermique des capteurs réduit l'espace entre les capteurs et le chevauchement dans le logiciel de reconstruction est exagéré. L'image présente donc des cercles concentriques plus denses centrés sur l'axe de rotation du scanographe. Un réétalonnage fréquent du scanographe réduit les artéfacts circulaires (Siemens, 2001).



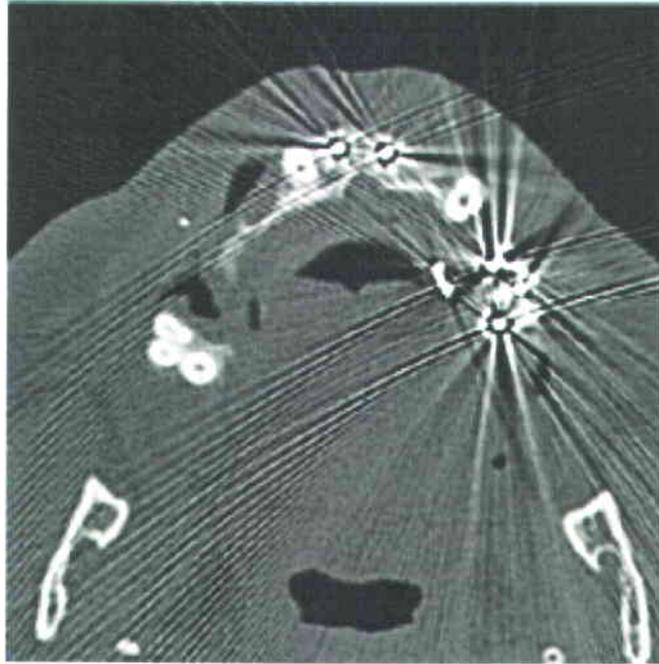
**Figure 31.** Image scanographique. Les artéfacts circulaires sont visibles même en l'absence de matériau solide dans le statif coulissant du scanographe. Un cercle est ajouté afin d'améliorer la perception visuelle de l'artéfact (modifié de Montreuil, 2006).

L'artéfact de mouvement du patient ("*Motion artifact*") entraîne un flou ou des stries dans l'image. Ceci est causé par le mouvement de l'objet durant la période de mesures. Le mouvement de flou peut être réduit en utilisant une nouvelle technique appelée IFT (tomographie des écoulements incompressibles) (Beckmann, 2006). Il est à noter que l'IFT n'est pas disponible sur tous les scanographes.



**Figure 32.** Images tomographiques conventionnelles d'un fantôme composé de bulle d'air et de coquille d'œuf (Fig. 21b). (a) Image obtenue au repos, montre une absence d'artéfacts. (b) Image obtenue au cours d'un déplacement linéaire à une vitesse de  $10 \text{ mm s}^{-1}$  montrant des artéfacts perceptibles. (c et d) Images obtenus lors d'un déplacement linéaire à une vitesse de  $20 \text{ mm s}^{-1}$  (c) et  $40 \text{ mm s}^{-1}$  (d) montrent des artéfacts de mouvement linéaire sévère. (e et f) sont des images obtenues au cours d'un mouvement de rotation de  $0.1$  révolution par seconde, montrant des artéfacts visibles ou graves en fonction de la distance de l'iso centre du scanographe. (g, h) Les images obtenues pendant le mouvement de rotation à  $0.5$  révolution par seconde montrent artéfacts sévères. (Beckmann, 2006)

L'artéfact de stries ("*Streak artifact*") se retrouve habituellement autour des matériaux qui bloquent les rayons X, comme les métaux ou les os (Fig. 33). Ces stries peuvent être causées par le sous-échantillonnage, l'appauvrissement en photons, le mouvement de l'objet ou les angles droits.



**Figure 33. Exemple d'artéfacts métalliques dans une image tomographique à rayon X. (De Man et al., 1998).**

Enfin, outre les rayons X, le traceur et le IRP, d'autres techniques sont en usage depuis plusieurs années. Ainsi, il est possible de mesurer la migration des formations sableuses. Cela peut être fait par stéréophotogrammétrie (Sternberg, 1967 et Wilkinson et al., 1985), par des mesures d'échantillonnage directes utilisant des dispositifs tels que des trappes à sédiments (Langhorne, 1978, 1981) et par échosondage à haute résolution, qui permet d'obtenir une bathymétrie du lit sédimentaire mais dont la position exacte de la surface de la ride demeure incertaine (McLean, 1983; Gordon & Cox, 2000).

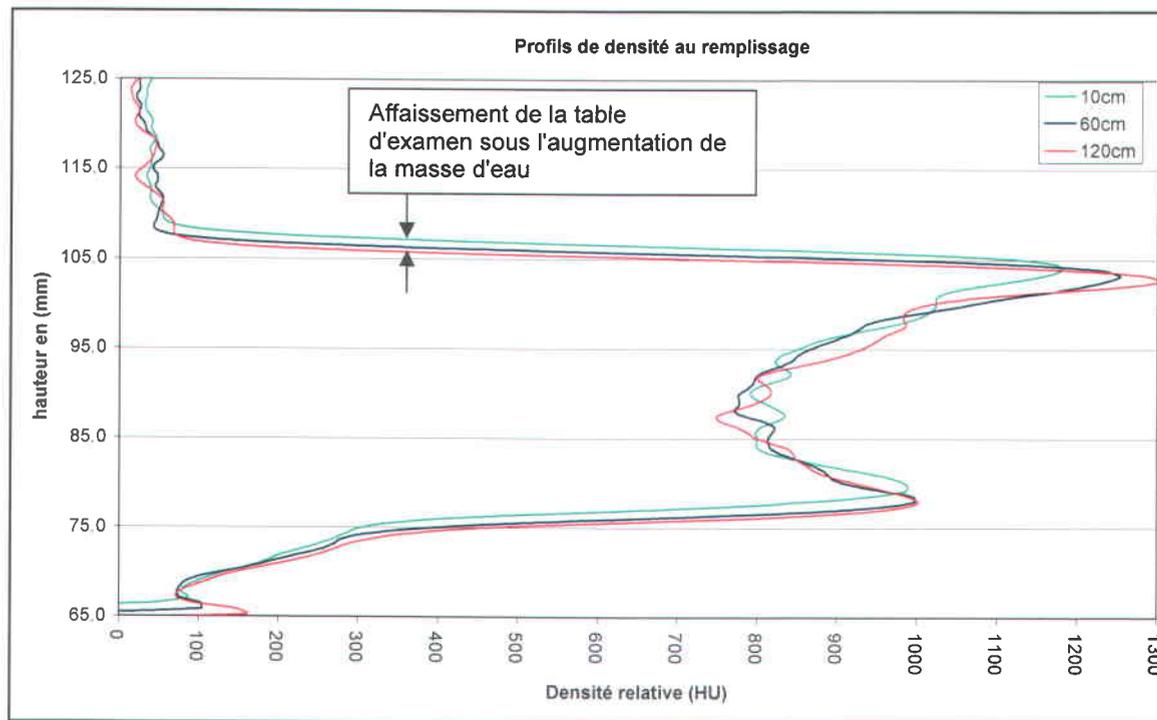
### **1.7.3 Évolution de la densité du lit durant le remplissage**

Afin de contrôler l'influence de la méthode utilisée pour effectuer le remplissage sableux, une étude a été réalisée par Montreuil (2006).

Durant le remplissage (eau) du canal contenant une couche de sédiment C-109 (Annexe 1 : Granulométrie des sables) de 30 mm (Fig. 34), la densité moyenne du sédiment est mesurée à chaque fois que la tranche d'eau augmente de 10 cm. L'étude est réalisée sur une épaisseur de 25 mm dans la zone sédimentaire située entre 85 à 110 mm. La densité moyenne à sec du mélange air-sédiments est de 529 HU (~1.553 g

cm<sup>-3</sup>). La densité moyenne du sédiment immergé par 10 cm d'eau est de 915 HU (~1.939 g cm<sup>-3</sup>) avec un maximum en surface de 1175 HU (~2.199 g cm<sup>-3</sup>). Par la suite, la densité de surface du sédiment augmente par tassement avec l'augmentation de la colonne d'eau. La densité moyenne passe alors de 910 à 903 HU (~1.934 à 1.927 g cm<sup>-3</sup>) avec un maximum en surface de 1252 à 1285 HU (~2.276 à 2.309 g cm<sup>-3</sup>) pour des tranches d'eau qui varient de 60 à 120 cm. L'épaisseur de la colonne sédimentaire subit une compaction imperceptible durant la période de remplissage de 119 minutes. Par contre, les profils de densité mettent en évidence une déformation du canal et de la table d'examen de 1.28 mm (Fig. 34).

Le point d'inflexion de la courbe de densité, arrondie par l'effet de volume partiel, est représentatif d'un sédiment statique, d'un fluide de vitesse nulle et de l'absence de transport. En utilisant un volume normalisé (0,60 mm X 25 mm X 1 mm) de 15.06 mm<sup>3</sup>, il est possible d'observer une variation de la quantité d'air dans le sédiment. La quantité d'air dans la colonne sédimentaire diminue avec l'augmentation de la colonne d'eau et du temps. Le volume d'air pour 10 cm de fluide est de 0.151 mm<sup>3</sup>, pour 60 cm de fluide de 0.114 mm<sup>3</sup> et de 0.092 mm<sup>3</sup> pour une colonne d'eau de 120 cm.

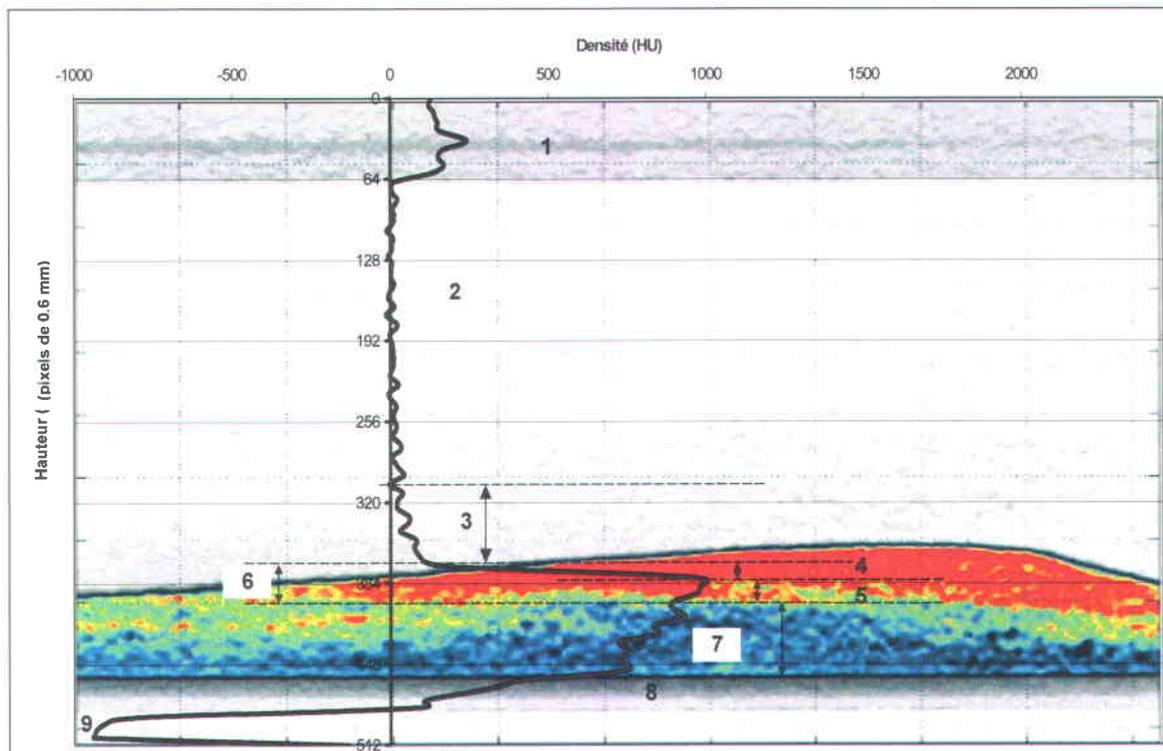


**Figure 34.** Profils de densité du sédiment (C-109, annexe 1) mesurés lors du remplissage du canal en boucle verticale. Les courbes présentent les variations de densité du lit sédimentaire sous une colonne d'eau respectivement de 10, 60 et 120 cm. Le résultat indique une augmentation de la densité en surface du lit conséquence de la pression de la colonne d'eau, (Montreuil, 2006).

## 1.8 Paramètres sédimentologiques d'après Montreuil (2006)

Montreuil (2006) a déterminé les paramètres sédimentologiques se situant à l'intérieur d'une ride sableuse. Pour ce faire, un canal en boucle fermée (Fig. 139) d'une longueur de 3048 mm et d'une hauteur de 1219 mm ayant section rectangulaire interne de 152 mm par 304 mm et passant à travers l'ouverture du statif coulissant du scanographe est utilisé. La section inférieure du canal est remplie avec une couche de 30 mm d'épaisseur de sable ( $d_{50} = 0,370$  mm). La vitesse du courant est maintenue stationnaire. Lors de l'expérience des travaux de maîtrise, les résultats ont conduit à une courbe typique de la densité de la colonne sédimentaire (Fig. 35). L'image scanographique d'une coupe est délimitée par les parois supérieure et inférieure du canal, et composée à l'intérieur de la courbe du sédiment et du fluide (Fig. 35). La ride sableuse est étudiée dans la zone de pixels située entre les pixels 50 et 450. 512 profils de densité de 512 valeurs sont disponibles pour l'analyse le long de la ride. Les courbes

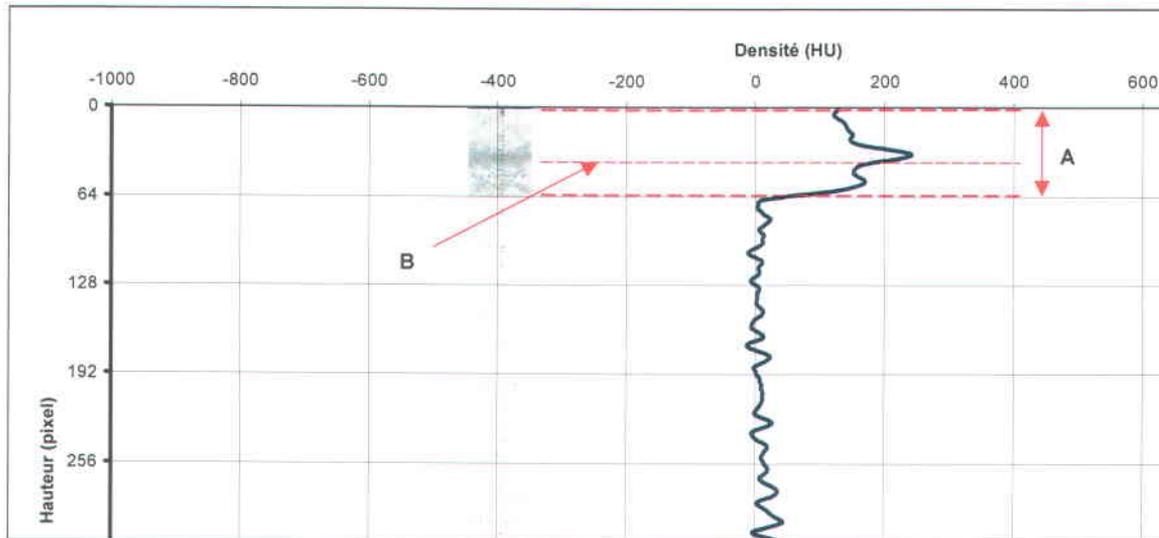
sont tracées pour chacune des positions sur la ride ou par rapport à l'évolution spatiale sur un ensemble de rides. Les différentes zones du transport sédimentaire telles que définies par Montreuil (2006) (Fig. 36 à 40) varient en fonction de la position le long de la ride. Il est important de noter que Montreuil (2006) utilisait l'unité Hounsfield (HU). Par contre, dans la présente étude, les résultats sont exprimés en densités car ces derniers sont convertis et corrigés afin de correspondre au système international d'unités (Voir le chapitre sur la méthodologie).



**Figure 35.** Image scanographique en couleur (sans échelle), d'une coupe entière : le profil vertical de densité présenté est réalisé à l'emplacement de l'axe des y. Le profil densité est composé de la trappe d'accès aux sédiments (1), de la zone d'écoulement du fluide (2), de la zone de transport sédimentaire en suspension (3), de la zone de transport mixte (4), la zone de transport par traction seulement (5), de la zone de transport par charriage et zone de passage de traction à suspension (6), de la zone de chargement (7), le fond du canal (8) et l'espace d'air sous le canal (9).

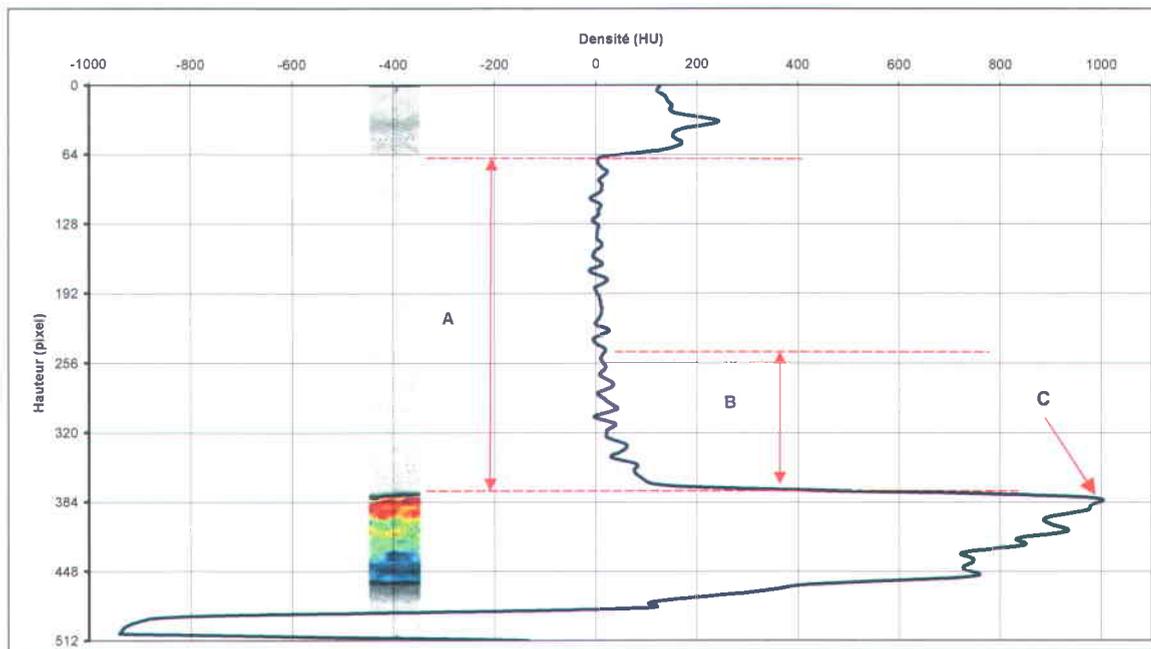
La coupe de la ride (Fig. 36) met en évidence une colonne d'eau contenant très peu de sédiments en suspension jusqu'à 10 cm au-dessus de la ride, puis progressivement une augmentation de la charge en suspension pour atteindre 1100 HU ( $\sim 2.124 \text{ g cm}^{-3}$

en valeur non corrigée<sup>1</sup>), qui correspond au point de rupture entre les sédiments en suspension et ceux transportés par charriage. Par la suite, la concentration augmente brutalement dans la zone de transition (Fig. 35; 6) pour atteindre à 1.5 mm de profondeur 500 HU (~1.524 g cm<sup>-3</sup> en valeur non corrigée) et 975 HU (~1.999 g cm<sup>-3</sup> en valeur non corrigée) à 3 mm de profondeur.

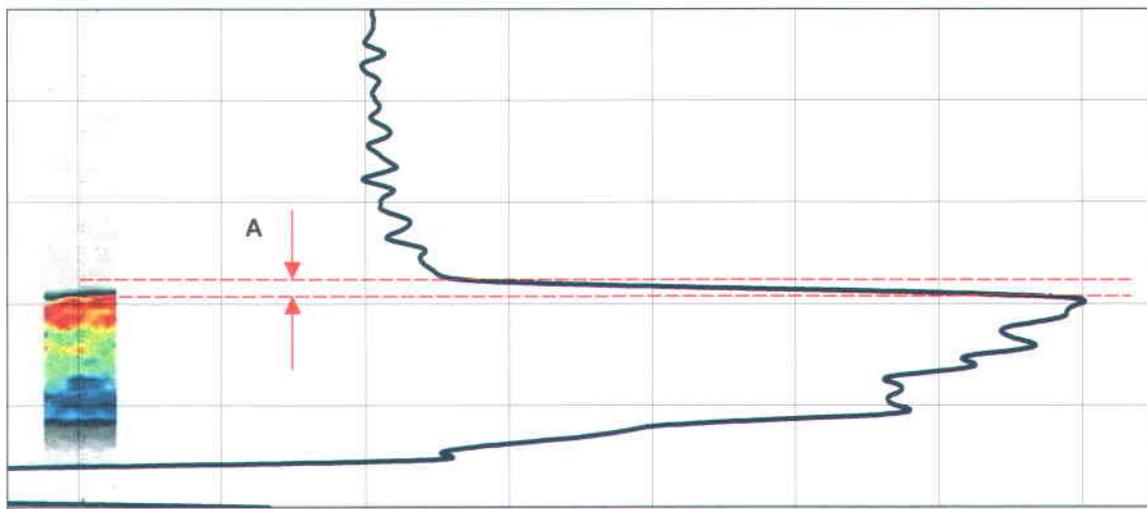


**Figure 36.** Profil de densité du canal : La section en A définit la trappe d'accès du canal composé d'acrylique (Fig. 140, annexe 2). En B, l'augmentation de densité au centre de la trappe est causée par la colle qui joint les deux panneaux d'acrylique qui forment la trappe.

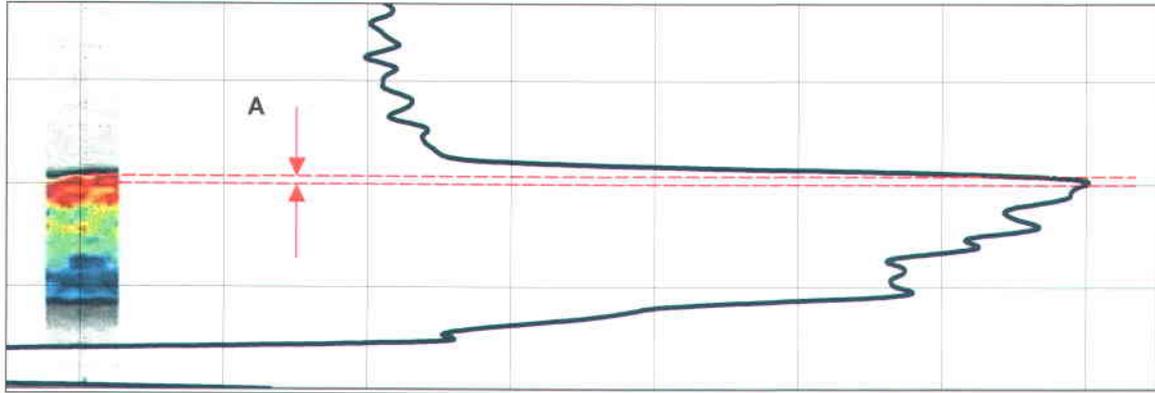
<sup>1</sup> Montreuil (2006) a présenté les données sous leurs formes brutes (raw data) avec conversion mais sans correction.



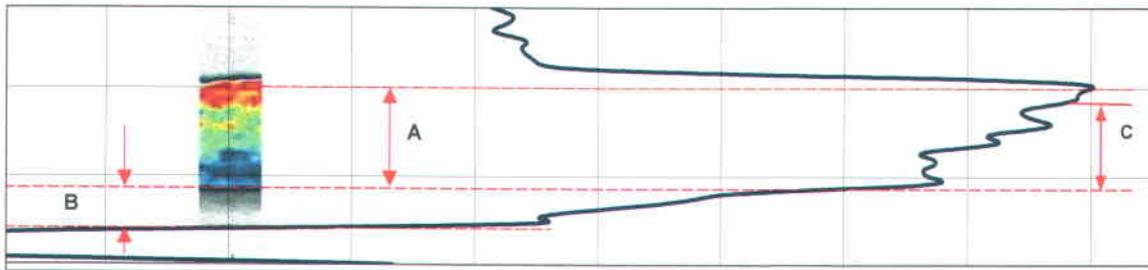
**Figure 37.** Profil de densité de la zone de fluide : la section A représente la zone de déplacement du fluide dans le canal et la section B indique la zone de transport par suspension. La zone de suspension débute lorsque la densité moyenne dans le fluide devient supérieure à 0 HU, ce qui indique la présence de sédiments dans le fluide. Le point C indique le point de densité maximale du profil.



**Figure 38.** Profil de densité d'une ride : la section A indique la zone de transport mixte ou zone de passage du transport par suspension vers le transport par charriage. C'est cette zone qui est définie comme le début du transport par charriage ou zone supérieure de charriage.



**Figure 39.** Profil de densité d'une ride : la section A indique la zone de transport par traction où la densité atteint son maximum. Cette zone est délimitée par la cassure dans la pente du profil et le point de densité maximale du profil.



**Figure 40.** Profil de densité d'une ride : la section A représente la zone de chargement du lit sédimentaire. Cette zone est formée par la mise en place des sédiments et, ensuite, par déposition dans le transport. Le remplissage du canal est réalisé couche par couche avec un râteau. La section B représente le fond du canal constitué d'acrylique. La section C indique probablement la présence des lamines basales.

Avec chacune des sections précédemment définies, il est possible d'établir une première définition des paramètres sédimentologiques (Fig. 41). Ainsi, en (A) se retrouve la colonne d'eau qui présente, dans sa partie supérieure, une zone sans sédiment et, dans sa partie inférieure (B), une zone de transport en suspension (ZTS). Dans la zone de transport en suspension, les variations de densité au-dessus de zéro indiquent l'intensité du transport sédimentaire, donc la concentration de sédiments dans la colonne d'eau. La zone de transport en suspension est séparée de la partie inférieure par un point de frontière (PDF). Ce point correspond au passage entre la zone de transport en suspension et la zone de transport par charriage (ZTC).

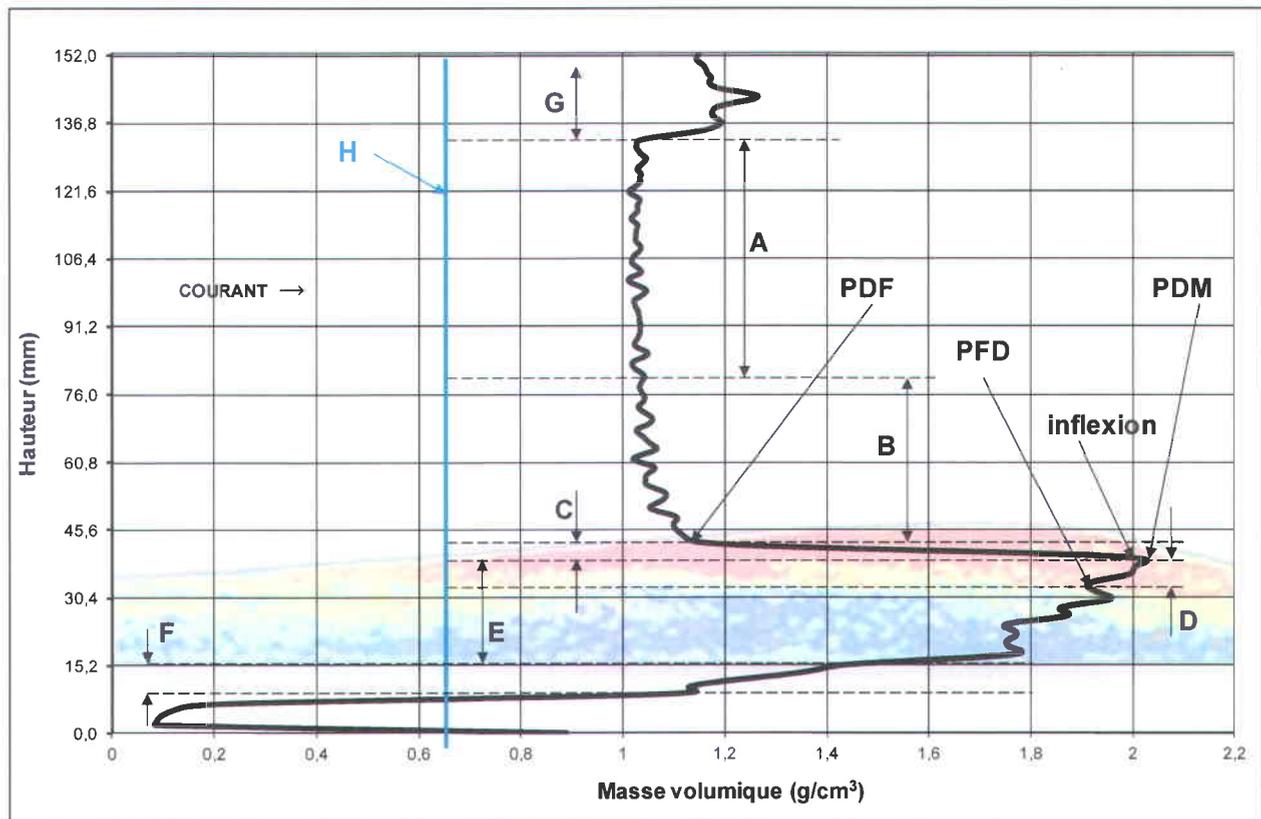


Figure 41. Profil de densité, image au CAT-scan d'une ride sableuse et la définition des zones de transport, (Montreuil & Long, 2007)

La partie supérieure de la colonne de sédiments (C) est appelée la zone supérieure de transport par charriage (ZTSC) et est limitée, par le haut, par le point de frontière et, à sa base, par le point de densité maximale (PDM). Dans la zone supérieure de transport par charriage, lors du transport, l'eau pénètre plus intensément entre les grains, mais il demeure quand même une friction entre les grains. La friction varie d'une valeur maximale quand la concentration en eau est à son minimum et à la limite de friction quand le sédiment quitte la zone de transport par charriage pour passer dans la zone de transport en suspension. Après un certain temps, un nouveau point significatif apparaît à proximité du point de densité maximale, le point d'inflexion de densité (inflexion). Selon Montreuil (2006), la présence de ce point est probablement due à une variation des caractéristiques mécaniques entre les grains durant la traction.

La zone (D) correspond à la zone intermédiaire de transport par charriage (ZITC) et est limitée au-dessus par le point de densité maximale et à sa base par le point de densité minimale (PFD). Ce point correspond au passage entre la zone intermédiaire de

transport par charriage et la zone inférieure de transport par charriage. L'épaisseur de cette zone varie le long de la surface de la ride. Elle atteint sa valeur maximale au front d'avalanches ("*lee-side*") de la ride où le processus d'avalanches est actif.

Toujours selon Montreuil (2006), la zone (E) correspond à la partie inférieure de la zone de transport par charriage (ZITC) et est limitée au-dessus par le point de densité minimale. Ce point correspond à une transition vers l'érosion due au passage d'une couche transgressive du transport par charriage au-dessus d'une couche stable. C'est une couche de transport temporairement inactive. Elle inclut ainsi une partie de la zone de transport parce qu'elle correspond à la partie supérieure des écailles de progradation ("*foreset laminae*"), qui se développent sur le front d'avalanches ("*lee-side*") de la ride. En-dessous de cette séquence, la zone de transport inactif correspond à la couche de sédiments non affectée par le passage de la ride et non mise en place par les vortex présents au front d'avalanches ("*lee-side*"). Le fond du canal en acrylique (F) et la trappe d'accès du canal (G) ne sont pas analysés.

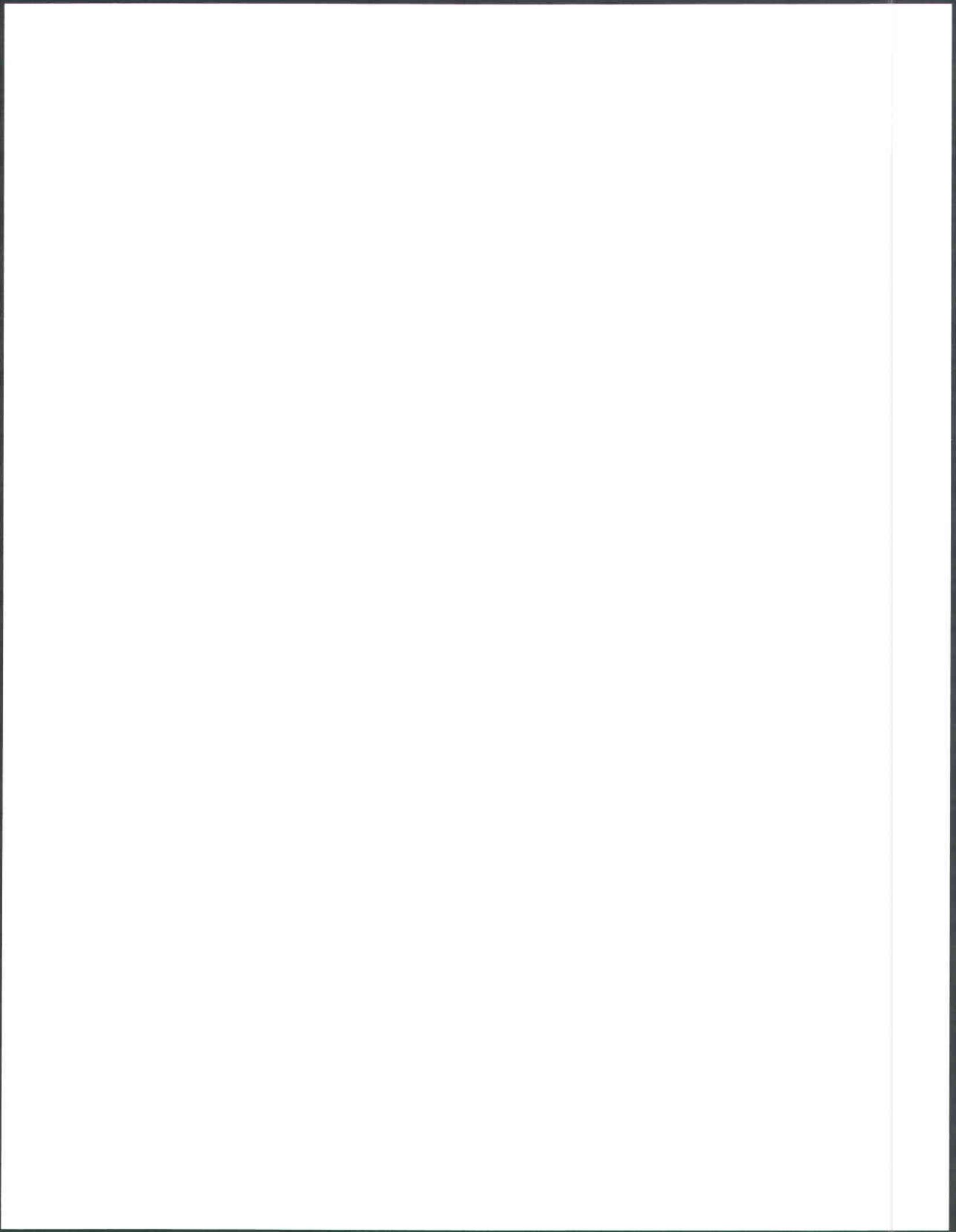
Lors de sa discussion, Montreuil (2006) signale une problématique de l'interface eau-sédiments. En effet, un problème se présente sur le flanc de progradation de la ride sableuse, à l'interface entre l'eau et les sédiments car une couche de densité relative négative en unité HU est présente en surface du sédiment. Dans la zone située entre le point de non-retour et le point bas, la mesure de densité négative (HU) indique la présence d'air. Cet air est probablement engendré par les vortex qui se forment dans la zone du flanc de progradation, vortex qui causent l'érosion des rides. Cette densité relative négative (HU) approche la densité relative de l'eau en absence de sédiment.

Certaines hypothèses sont posées afin d'expliquer ce phénomène. La présence de cette faible densité peut donc être causée par la cavitation causée par la dépression due au changement de diamètre du canal, changement causé par la forme de la surface du lit sédimentaire, par l'emprisonnement dans les vortex de l'air présente à l'origine dans le lit sédimentaire ou par un autre phénomène non identifié pour le moment. Ces phénomènes doivent être étudiés avec précision afin de déterminer l'effet de la vitesse du courant dans l'amplitude des vortex et si l'origine de l'air est indigène

ou si elle est fonction du courant du fluide. Cette thèse, faisant suite à ces travaux, répond à cette question.

Afin de préciser de manière plus fine ces processus, il est recommandé dans les conclusions de Montreuil (2006) de modifier le canal. La section rectangulaire du bas devrait être allongée pour optimiser la course du scanographe et augmenter la dimension exploitable du lit sédimentaire.

Cette étude permettra donc d'identifier la présence et de définir des paramètres sédimentaires dynamiques se basant sur les observations statiques de Reineck & Singh (1975). Suivant Montreuil (2006), la surface de la ride sera redéfinie par l'analyse des couches sédimentaires, démontrant de plus la présence d'une contrainte de cisaillement, à l'intérieur du lit sédimentaire.



## CHAPITRE 2. MÉTHODOLOGIE

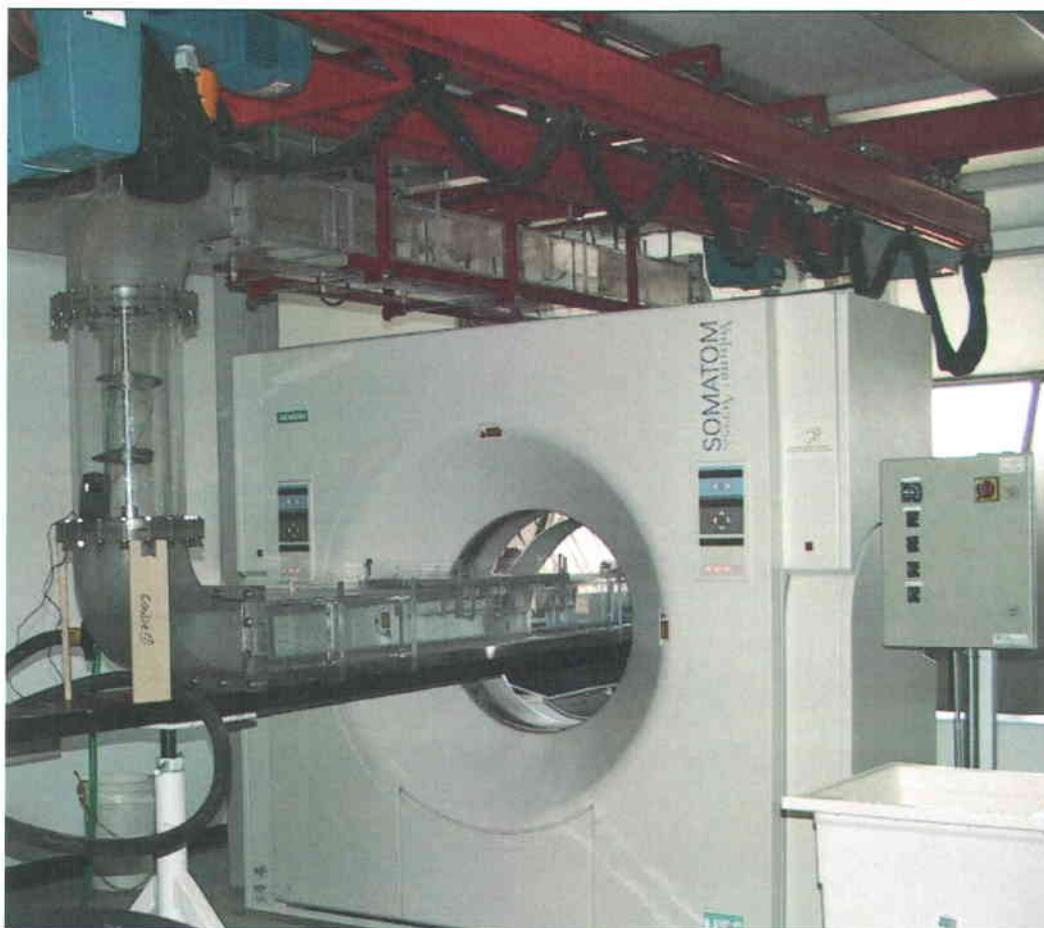
### 2.1 Canaux hydrauliques

La réalisation de cette étude a nécessité la conception et la réalisation de deux canaux hydrauliques. Le premier canal est un canal en boucle verticale fermée ("*vertical closed loop flume*") de 3048 mm de long et de 1219 mm de hauteur, réalisé par Montreuil (2006), mais originalement conçu par Teeter & Pankow (1989). Sa section rectangulaire interne est de 152 mm x 304 mm et elle est installée à travers la statif coulissant du scanographe. La partie inférieure de ce canal est partiellement remplie avec une couche de sable d'Ottawa (identifié comme C-109) de 30 mm d'épaisseur dont la médiane granulométrique est de 0.370 mm avec une densité apparente à sec de 1.560 g cm<sup>-3</sup>. La vitesse du fluide de cette expérience est ajustée à 25.0 cm s<sup>-1</sup> avec un moteur électrique couplé à une hélice et est mesurée par un débitmètre Doppler (Controlotron<sup>MC</sup> 1010N) et dont les détails sont donnés à l'annexe : Canaux hydrauliques. Pour cette expérience, le voxel choisie est de 0.39 mm x 0.60 mm x 1.00 mm et les profils de densité de la ride sableuse extraits de cette expérience donnent une matrice de 512 x 512 x 512 voxels, pour un volume de 305 x 305 x 200 mm.

Le concept de base de ce canal en boucle fermée est celui de l'US Army Corps of Engineers, (*Technical report HL-89-11*). Le matériau composant le canal est l'acrylique avec une densité relative d'environ 200 HU et une composition translucide. Ce canal, le premier à être couplé à un scanographe, est adapté à la tomographie par la réduction de la présence des structures portantes et d'assemblage métal réduisant au minimum l'effet des artéfacts.

Le canal (Fig. 42) est composé de deux sections rectangulaires. La section du bas est utilisée pour la mise en place des sédiments à l'intérieur du canal par une trappe d'accès. Cette section du canal représente donc le fond marin. Deux sections tubulaires sont utilisées : celle de gauche, pour la mesure du courant et, celle de droite, pour la propulsion du fluide. Les dimensions sont de 3048 mm par 1219 mm et la section rectangulaire intérieure mesure 152.4 mm de hauteur et 304.8 mm de largeur (annexe : Canaux hydrauliques). Le volume du canal est de 352 litres et la surface sédimentaire est de 0.92 m<sup>2</sup>. Le courant est généré par deux hélices à trois pales montées sur un

arbre de 25.4 mm de diamètre qui sont attachées à un moteur à courant continu à aimant permanent de 1 HP, alimenté par un variateur de vitesse à courant continu KBWD-240 de Penta Powers<sup>MC</sup>. Le courantomètre Controlotron<sup>MC</sup> est programmé pour mesurer le courant dans un conduit d'acrylique de 242.25 mm de diamètre et d'épaisseur de 12.75 mm (Annexe 2, Fig. 137). Le fluide programmé dans le courantomètre est de l'eau ayant des particules en suspension. Les données brutes sont transmises à un ordinateur portable par communication RS-232. La résolution des données brutes est de  $10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ .



**Figure 42. Canal d'acrylique en boucle verticale localisé dans l'ancienne installation de tomographie.**

Étant donné le changement de géométrie du canal, il y a une légère variation de la section d'écoulement et une correction doit être appliquée pour déterminer la vitesse de l'écoulement au-dessus des sédiments. La vitesse moyenne au niveau de la surface

sédimentaire est obtenue en corrigeant le diamètre du conduit vertical en fonction de la section du canal et de l'épaisseur moyenne des sédiments mesurés au tomographe.

$$V_R = V_M \times \frac{70.882}{12 \left( 6 - \frac{h_{sed}}{2.54} \right)} \quad (27)$$

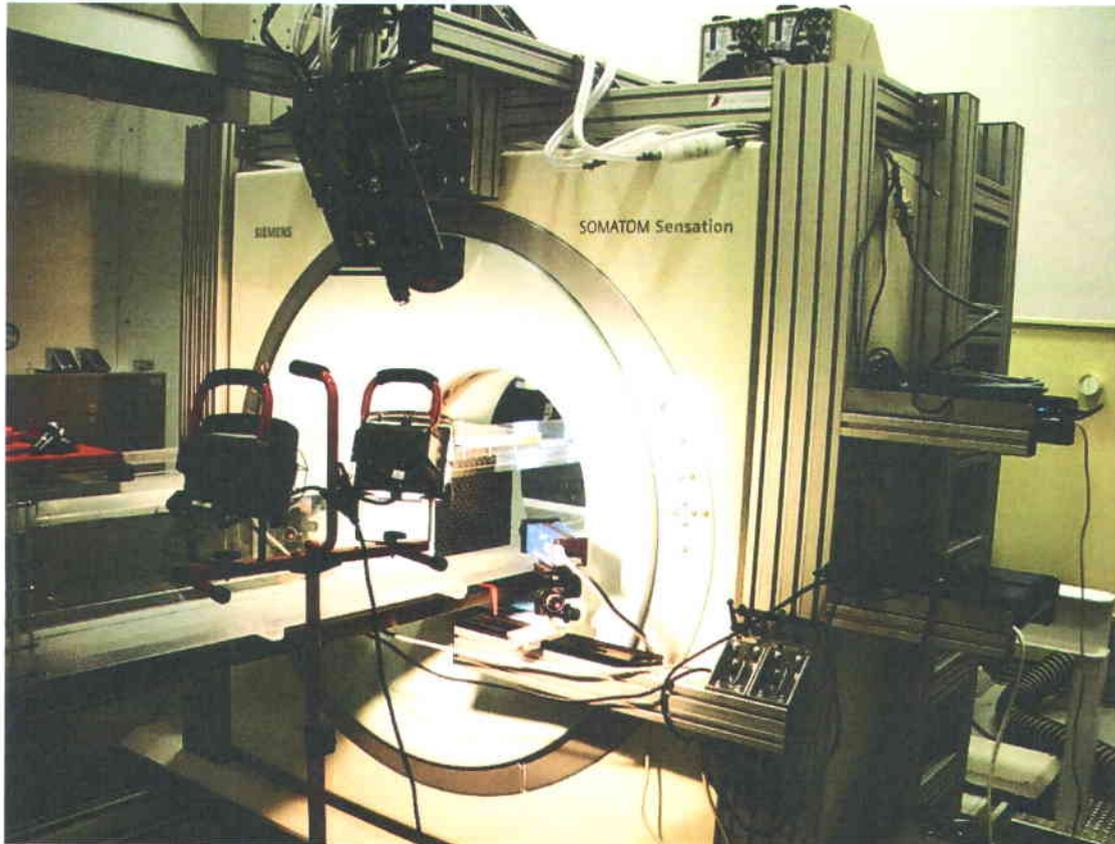
où  $V_R$  est la vitesse moyenne réelle du fluide dans la section rectangulaire,  $V_M$  est la vitesse moyenne du fluide mesurée dans la section cylindrique et  $h_{sed}$  est l'épaisseur de sédiments sur le lit. L'épaisseur moyenne des sédiments est obtenue par intégration du sédiment sous l'interface sédiments-eau.

Le second canal, d'acrylique, est de type à surface libre et est bouclé par un circuit de recirculation. La section transversale carrée est passée à travers le statif coulissant (Fig. 43). Le courant stationnaire du fluide est mesuré par un courantomètre Doppler, le même que celui utilisé dans le premier canal, mais adapté à la conduite de recirculation (Fig. 44). Le courant est contrôlé par régulateur utilisant une valve de régulation pneumatique, insérée dans le circuit de pompage et de recirculation. Il est important de prendre en considération la variation de la vitesse d'écoulement en fonction de la profondeur (Fig. 47). En raison de la friction sur le fond et à l'interface air-eau (surface), le profil d'écoulement dans un cours d'eau a généralement une forme parabolique (Fig. 46). La vitesse moyenne à faible profondeur est représentée par l'expression (28) et à des profondeurs de plus de 0.76 m par l'expression (29),

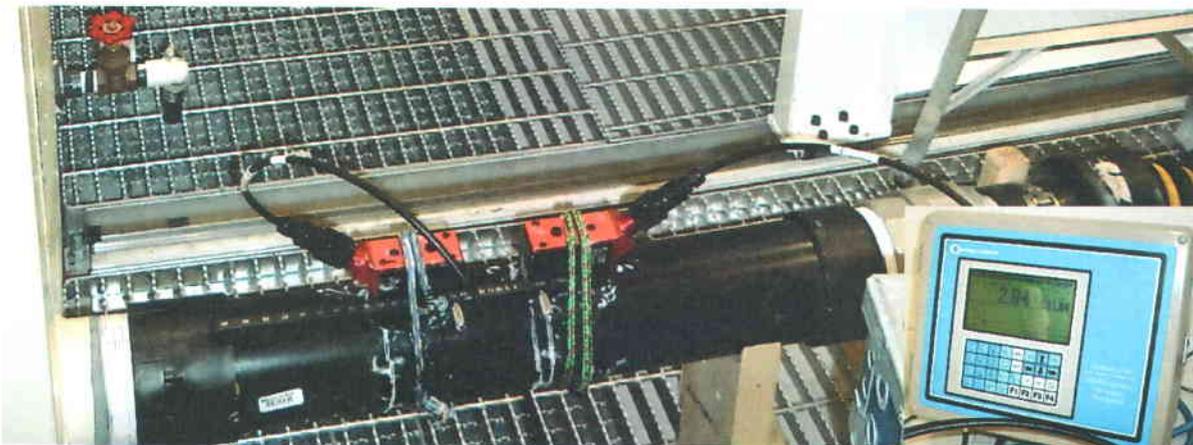
$$V_{moyenne} \approx V_{0.6 d} \quad (28)$$

$$V_{moyenne} \approx \frac{V_{0.2 d} + V_{0.8 d}}{2} \quad (29)$$

où  $d$  est la profondeur à partir de la surface et  $V$  est la vitesse (Thomas, 2008). Lorsque de l'utilisation d'un courantomètre, l'hydrologue place l'appareil à une profondeur telle que c'est la vitesse moyenne sera mesuré (Thomas, 2008). Les valeurs obtenues du courantomètre Controlotron<sup>MC</sup> installé dans le conduit peuvent être comparées aux valeurs obtenues avec le courantomètre Vectrino<sup>MC</sup> en utilisant le calculateur présenté à la figure 47.



**Figure 43.** Canal d'acrylique à surface libre traversant le statif coulissant. (Photo : Professeur Bernard Long)



**Figure 44.** Sonde du courantomètre Doppler (modèle, Controlotron 1020) installée sur le tuyau de 4 pouces en ABS noir. Le tuyau est installé à la sortie du réservoir en aval de la pompe de recirculation, mesurant ainsi la vitesse du courant dans le tuyau. En icône, à droite, le processeur et l'enregistreur de données.

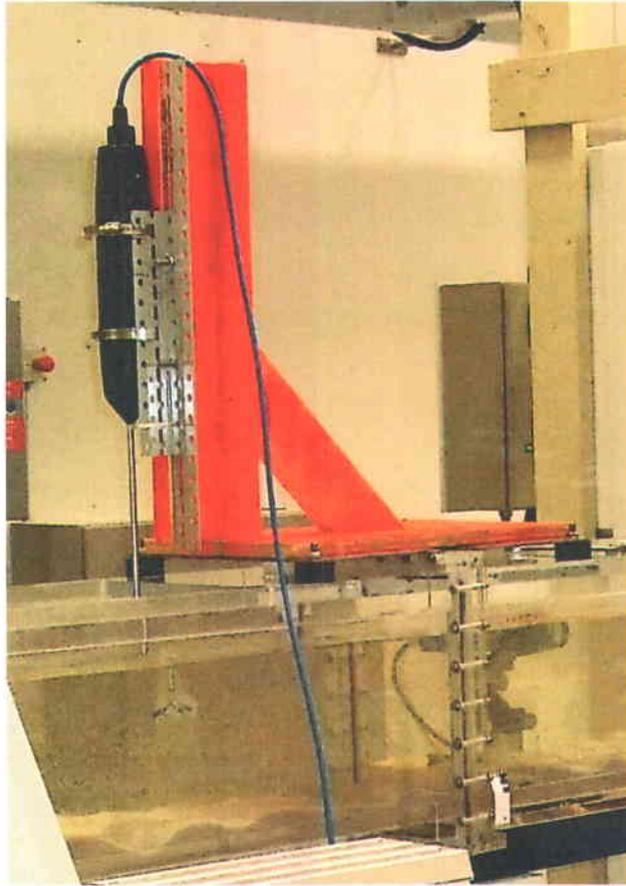


Figure 45. Sonde du courantomètre Doppler (Victrino<sup>MC</sup>) installée dans le canal d'acrylique. La profondeur de mesure est ajustée en fonction de la hauteur d'eau moyenne afin de mesurer la vitesse moyenne du fluide.

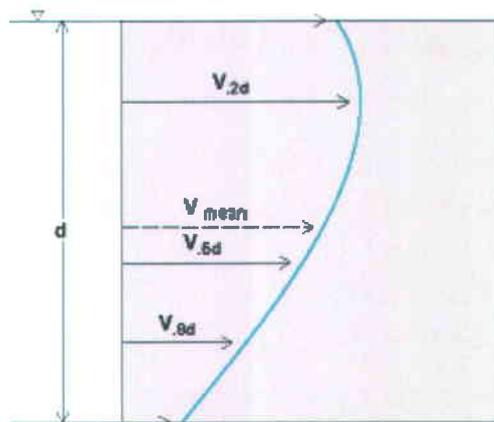


Figure 46. Profil de vitesse verticale moyenne ( $V_{mean}$ ) dans un canal à surface libre ;  $d$  = profondeur à partir de la surface ; le triangle inversé représente la surface d'eau. (Thomas, 2008).

Vitesse mesurée avec le courantomètre (Controlotron 1020) sur le tuyau de ABS de 4 pcs	U=	1,21 m/s	ENTRÉE
Diamètre mesurée, du tuyau ABS 4pcs	D=	10,08 cm	
Hauteur de la colonne d'eau dans le canal	h=	19,52 cm	ENTRÉE
Largeur canal	L=	30,00 cm	
Air du conduit ABS =		79,80 cm <sup>2</sup>	
Air de la section d'écoulement du canal =		585,60 cm <sup>2</sup>	
Ratio (air conduit/air écoulement) =		0,1363	
Vitesse moyenne (U) dans le canal=		16,49 cm/s	RÉSULTAT

**Figure 47.** Capture d'écran du tableur utilisé dans la conversion des mesures des résultats obtenues avec le Controlotron<sup>MC</sup> et les résultats obtenus avec le Vectrino<sup>MC</sup>. Le tableur suivant considère que lorsque l'écoulement est en régime permanent, les débits dans le système sont tous le même. Ainsi en utilisant le rapport entre la section la conduite de la pompe et le canal d'acrylique, il est possible d'obtenir les vitesses réciproques.

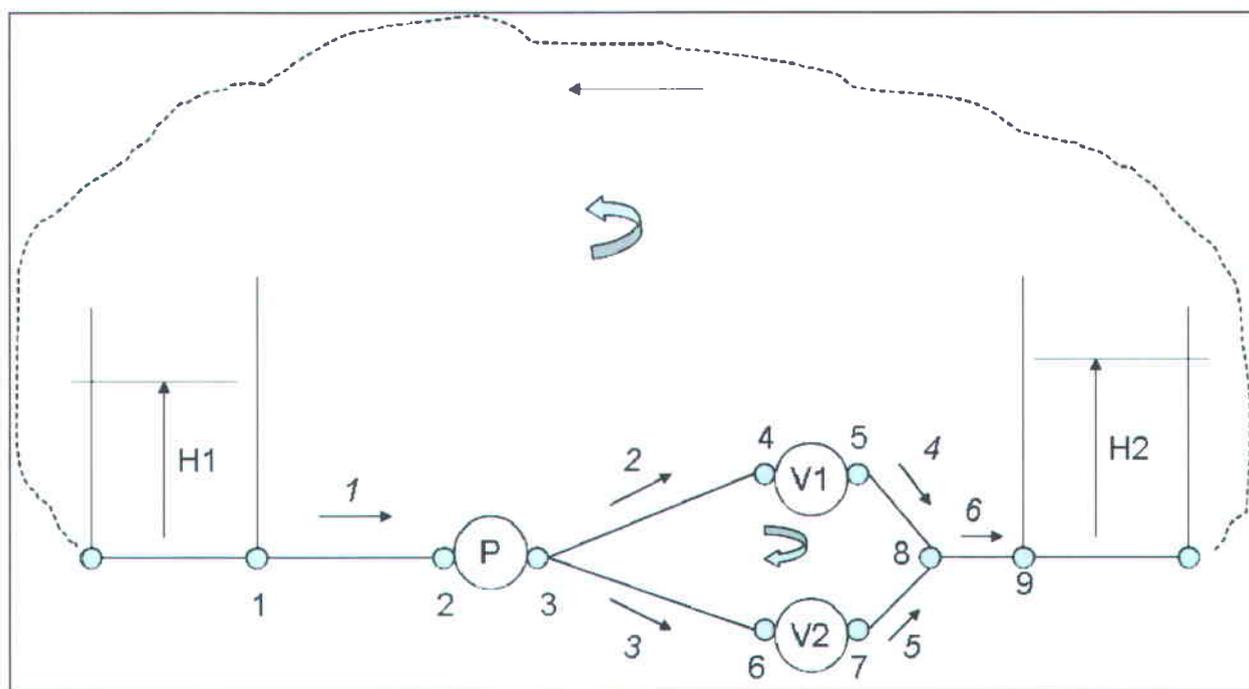
La longueur initiale du canal a été déterminée à partir des dimensions de la salle de tomographie du laboratoire lourd de l'INRS-ETE. La longueur disponible dans cette dernière était entre 6.3 m et 7.25 m. La longueur choisie pour la conception du canal a donc été fixée à 7010 mm afin de permettre la circulation autour du scanographe. Le schéma du canal est à l'annexe : Canal hydraulique à surface libre.

La largeur et la hauteur du canal ont été optimisées pour l'ouverture du statif coulissant de 500 mm de diamètre. Les dimensions internes du canal ont été fixées à 300 mm x 300 mm, ce qui permettra de placer une couche de sédiments de 50 mm, suivie d'une colonne d'eau de 200 mm et d'un espace d'air de 50 mm.

Le volume des réservoirs a été fixé à 2 m<sup>3</sup> afin d'obtenir un espace suffisant pour l'entretien des diffuseurs et de la réduction des turbulences. Plusieurs diffuseurs ont été testés afin de déterminer celui qui permet l'écoulement le moins turbulent possible, à coût raisonnable.

La pompe a été choisie en fonction d'un courant maximal de  $50 \text{ cm s}^{-1}$  dans le canal à surface libre, sans sédiment. La taille du canal étant de  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  pour une surface d'écoulement de  $900 \text{ cm}^2$  et un courant de  $50 \text{ cm s}^{-1}$ . Un débit de  $0.045 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  passe dans le canal, soit un débit de  $2.7 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$  ou de 713 USGPM.

Le circuit hydraulique du canal à surface libre se compose de deux réservoirs couplés par une pompe en série avec deux vannes de contrôle en parallèle. Les réservoirs sont munis de déversoir. Les réservoirs sont aussi mis en boucle fermée via le canal à surface libre dont les dimensions internes sont de  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ . Les débits circulant dans les conduits (branches) sont en italique et les nœuds utilisés pour la sommation des courants sont en numérotation arabe (normal) et symbolisés par de petits cercles (Fig. 48).



**Figure 48.** Circuit hydraulique, en boucle fermée, du système de recirculation utilisé dans le calcul des débits

Deux types d'équations sont utilisés pour la réalisation du calcul de débits dans chacune des conduites, calcul conduisant au choix du type de conduits, de vannes et de pompe. Premièrement, les équations de continuité sur le débit entrant et sortant des 9 nœuds (annexe : Canal hydraulique à surface libre) forment la boucle de recirculation du fluide.

Le deuxième type d'équations est basé sur l'énergie en tenant compte des pertes pouvant survenir dans le montage. Les expressions mathématiques permettant de paramétrer le comportement du système utilisent les équations d'énergie basées sur les pertes de charge dans chacune des pièces d'équipement qui sont utilisées dans la réalisation du montage.

La courbe de pompe nécessaire est définie à l'aide de MS Excel<sup>MC</sup> par le calcul des débits préalablement définis (annexe 3: Canal hydraulique à surface libre). De plus, la courbe de la vanne est obtenue avec l'information du manufacturier. La méthode de calcul utilisée est la méthode par itérations dans MS Excel<sup>MC</sup>. Les résultats des calculs des débits dans la conduite principale déterminent le débit de fluide qui circule en fonction de l'ouverture de la vanne de contrôle.

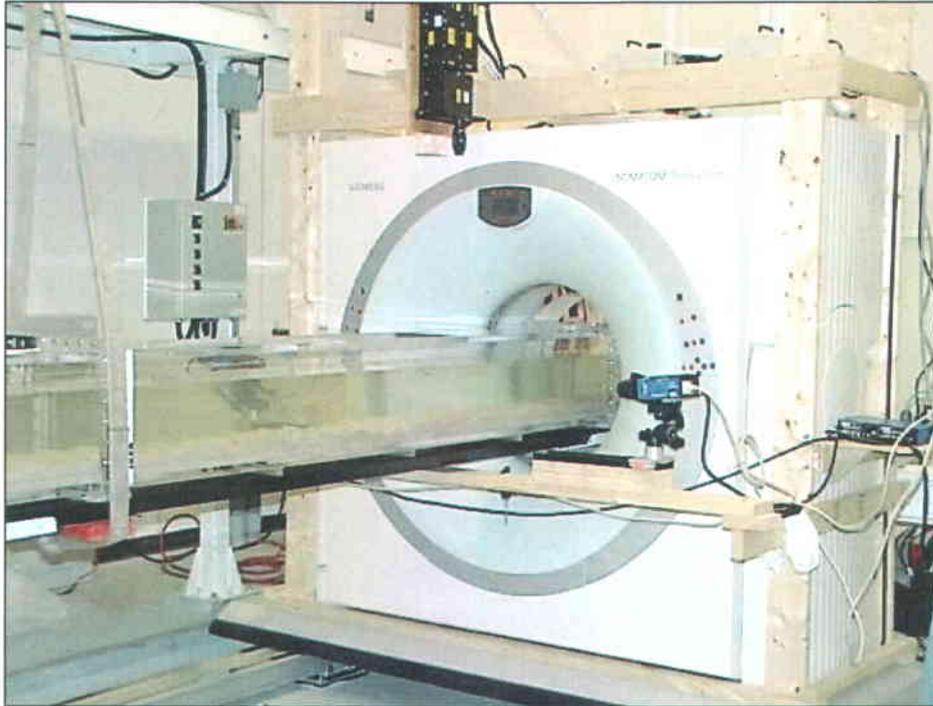
Le calcul de la pente du canal est fait en tenant compte de la vitesse d'écoulement maximum désirée et des dimensions maximales du canal à surface libre ( $H1-H2$ ). Les résultats sont présentés au tableau 3. Ce dernier renferme les résultats de la meilleure des simulations réalisées : une pente de 11.5 mm pour une longueur effective de canal de 6300 mm, une colonne d'eau de 150 mm, une épaisseur de sédiments de 50 mm, un courant de  $40.3 \text{ cm s}^{-1}$  et un coefficient de Manning de 0.03 (Nakayama & Boucher, 1999; Robert, 2007; Young et al., 2007). Le coefficient de Manning  $n$  est un coefficient empirique, qui dépend principalement de la rugosité du fonds et des parois du canal ainsi que de la sinuosité de ce dernier. La valeur choisie prend en compte un fonds sableux, des parois lisses et longitudinales (Young et al., 2007).

**Tableau 3 : Tableau de calculs de différence de niveau entre les réservoirs, constituant l'écoulement du canal à surface libre (Détails en annexe 3)**

<b>Débit</b>	Q	0,018 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	287,446 USGPM
Cte frottement selon le n de Manning	n	0,030	Manning avec ride sableuse
Profondeur	y	0,150 m	Colonne d'eau avec sed
Largeur	b	0,300 m	
<b>Vitesse</b>	V	0,403 m s <sup>-1</sup>	40,30 cm s <sup>-1</sup>
Surface	Air	0,045 m <sup>2</sup>	
Périmètre mouillé	P	0,600 m	
Rayon hydraulique	Rh	0,150 <sup>1</sup>	
FOND CANAL	S0	0,002 <sup>2</sup>	
gravité	g	9,807	
y critique	yc	0,072	
y normal	yn	0,150	
A normal	An	0,045	
P normal	Pn	0,600	
Rh normal	Rhn	0,075	
Frottement normal	f(yn)	0,007	
longueur du canal	L	6,300 m	
delta H reservoir	Ha-Hb	0,012	11,55 mm

La liaison entre le canal à surface libre et le circuit hydraulique s'obtient en insérant la vitesse du circuit hydraulique obtenue des calculs par MS Excel<sup>MC</sup> (Annexe : Canal hydraulique à surface libre) et portés à l'intérieur du calcul du canal à surface libre du tableau 3. La hauteur  $\Delta H$  est ensuite réintroduite dans le calcul du circuit hydraulique pour fin d'itérations et cela jusqu'à l'obtention d'une valeur convergente.

Après l'obtention de la valeur convergente, et afin d'évaluer les performances du canal, des essais théoriques de variations des paramètres sont réalisés. La largeur du canal étant une constante qui est imposée par l'espace circulaire disponible dans la statif et l'anneau de sécurité. La dimension hors tout du canal est de 415 x 415 mm pour une dimension intérieure de 300 x 300 mm. La longueur du canal est fixée à 7010 mm, ce qui permet une utilisation optimale de la salle de tomographie (Fig. 49).



**Figure 49.** Statif coulissant du scanographe se déplaçant sur quatre rails parallèles le long du canal à surface libre, qui repose sur la table d'examen.

Lors des essais avec différentes épaisseurs moyennes du lit sédimentaire (0 à 200 mm), l'épaisseur moyenne du lit a été mesurée afin de prévoir les effets des sédiments sur le débit de la pompe et les vitesses dans la boucle. Une attention particulière est portée sur le phénomène entraîné par le glissement des sédiments sur le fond du canal, pendant l'érosion. Il a donc été retenu d'expérimenter une mince feuille de plastique ayant une mince couche de sable collé sur sa surface. Ceci permet de maintenir la même rugosité du fond, donc un même  $n$  de Manning (acrylique avec surface artificielle et sable naturel, Barnes (1967), Marcus et al., (1992)). Par contre, au cours des expériences, il a été extrêmement difficile de maintenir coller la mince feuille de plastique dans le fond du canal. Par conséquent, la méthode retenue comme étant le meilleur dispositif permettant d'obtenir une rugosité sur le fond du canal et empêchant le glissement du lit sédimentaire est le sablage du fond du canal afin de donner une abrasion comparable aux sédiments. L'abrasion ayant débuté naturellement lors de la mise en place et du retrait des sédiments, elle a été complétée avec un papier abrasif laissant l'empreinte d'un sable grossier. Cette méthode est aussi utilisée par Madsen & Durham (2007).

Le nombre de Froude ( $Fr$ ) peut être calculé à partir de

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gd}} \quad (30)$$

où  $U$  est la vitesse,  $g$  est la constante gravitationnelle, et  $d$  est la profondeur moyenne d'eau. La mesure du débit dans un canal demande généralement que l'écoulement approche un  $Fr$  inférieur à 0.5. L'écoulement sous-critique permet d'éviter que l'action des vagues et des autres perturbations, qui pourraient nuire aux lectures précises de débit, n'entraînent des erreurs de lecture de la vitesse du courant (Bos, 1989; Bos et al., 1991). En définissant la profondeur hydraulique  $d$  comme le rapport de l'aire de la section sur la largeur  $D = A/T$ , le nombre de Froude ( $Fr$ ) du canal à surface libre devient

$$Fr = \frac{0.5}{\sqrt{9.81 \cdot 0.2}} \quad (31)$$

Cette équation donne une relation pour une valeur de  $Fr$  de 0.36 à une vitesse de 50  $\text{cm s}^{-1}$ , ce qui correspond à un écoulement tranquille, ou sous-critique, ou fluvial.

## 2.2 Imagerie tomодensitométrique en hydraulique

Dans le but de confirmer l'existence des différents points et couches formant les paramètres sédimentologiques d'une ride sableuse, trois vitesses de courant et trois granulométries différentes (annexe 1) sont successivement utilisées. En plus, des expériences secondaires, ont réalisées dans le cadre des expériences visant à calibrer le MAPLE (Long & Robitaille, 2009) et visant à corréliser les valeurs de densité obtenues avec le LiDAR bathymétrique (Long et al., 2011).

Afin de créer une colonne sédimentaire, le canal est rempli d'une couche de sable de quartz de 50 mm d'épaisseur. Cette colonne sédimentaire tiendra lieu de patient lors du paramétrage des protocoles d'examen. Le laboratoire de tomographie multidisciplinaire du laboratoire lourd de l'INRS-ETE dispose d'une salle d'examen capable d'accueillir le canal à surface libre de 300 x 300 x 7000 mm de long passant par l'ouverture du statif coulissant. Le scanographe permet une mesure continue, entière et simultanée du transport sédimentaire par suspension et par charriage, et cela, sans interférence sur le fluide ou sur les sédiments. Ainsi, l'écoulement du fluide et le transport des sédiments ne sont pas affectés ou perturbés lors de la mesure. La mesure réalisée au

scanographe fournit ainsi une matrice pouvant atteindre 512 x 512 x 1500 voxels. Le terme voxel est une contraction anglophone d'un élément de volume ("*volumetric pixel*"). C'est aussi par définition un pixel ("*picture element*") en trois dimensions. Dans les expériences du canal à surface libre, les dimensions des voxels sont de 0.59 mm x 0.59 mm x 0.60 mm. Les deux premières valeurs sont fonction de la dimension de la fenêtre de mesure utilisée. Plus la fenêtre de mesure utilisée est petite, meilleure est la résolution du voxel. Si, par exemple, la fenêtre utilisée n'est que de 100 mm x 100 mm, alors la résolution est de 0.20 x 0.20 mm. Ainsi, une fenêtre de 300 mm x 300 mm est constituée d'une matrice de 512 x 512, ce qui donne une résolution de 0.59 x 0.59 mm. Par contre, la coupe ou tranche disponible sur le scanographe ayant la plus petite épaisseur est de 0.6 mm. Ainsi la résolution de 0.59 x 0.59 mm est utilisée afin d'obtenir un voxel quasiment cubique. La mesure des tranches peut être réalisée de manière continue ou discontinue. La mesure de tranches consécutives signifie qu'il n'y a pas d'espace vide entre les tranches contrairement aux mesures discontinues où il existe des vides entre les tranches, ce qui entraîne une perte d'information et une discontinuité.

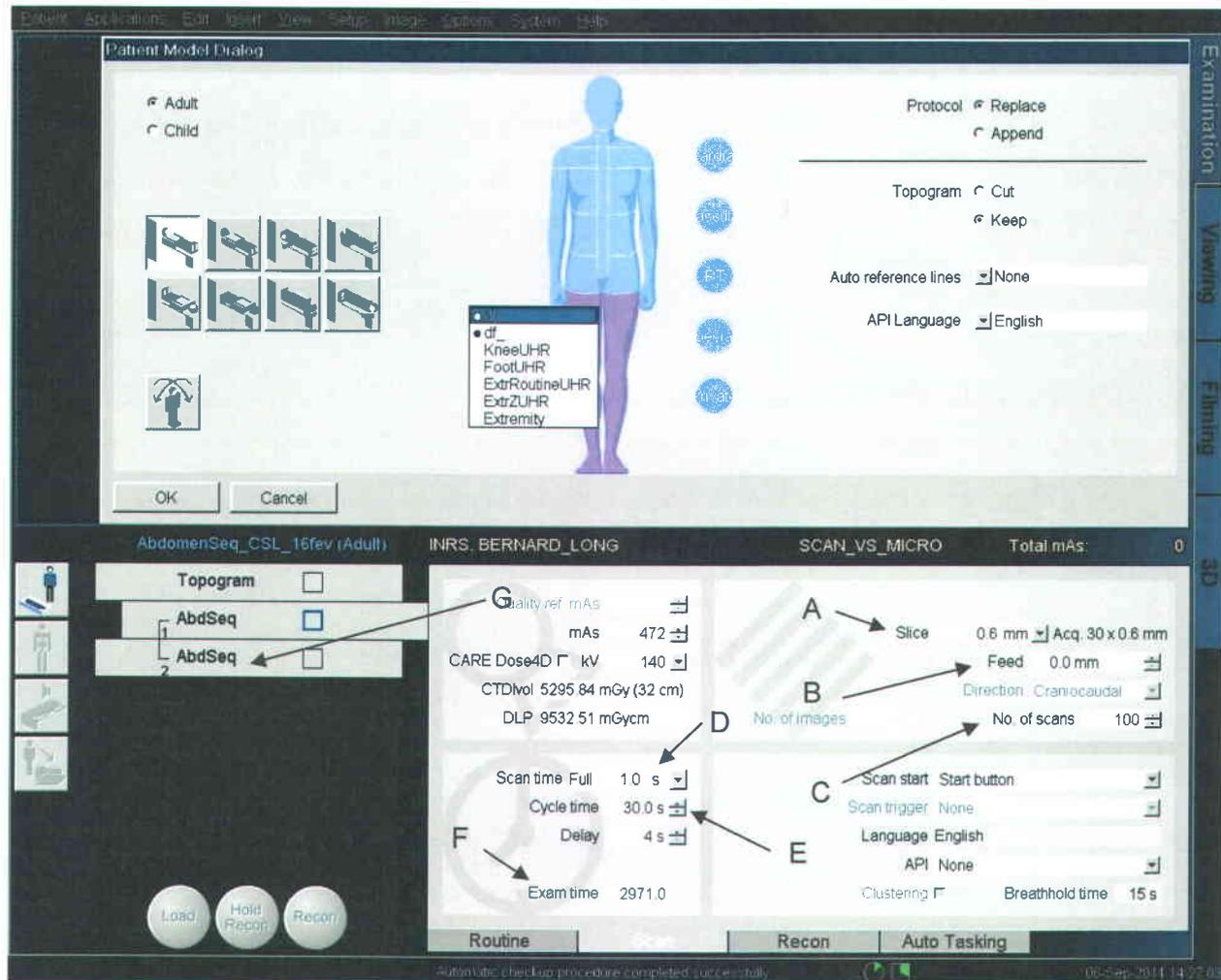
De plus, dans cette étude, deux techniques de mesure au scanographe sont utilisées : une pour une mesure pseudo instantanée (Lagrange) et l'autre pour une mesure de l'évolution dans le temps (Euler).

L'approche globale de mesure du transport (AGMT) utilise le scanographe pour une mesure d'un large volume en 3D donnant une image du champ de rides à un moment précis dans le temps (Lagrange). La technique AGMT, utilisée par Montreuil (2006), donne une image 3D de l'ensemble de la ride sableuse d'une longueur maximale de 1500 mm. Le résultat de cette mesure est un ensemble de tranches continues permettant d'observer l'ensemble du champ de rides de façon pseudo instantanée, c'est-à-dire que la mesure est d'une durée de 90 s pour un lit sédimentaire d'une longueur de 1500 mm. Cette technique utilise un protocole de reconstruction fourni avec l'ordinateur de reconstruction du scanographe. Le protocole est appelé le volume abdominal ("*abdomen volume*") et est utilisé pour la numérisation de l'abdomen du corps humain et adapté pour les personnes obèses ou de large volume. La technique de volume global est utile pour comparer tous les profils densimétriques d'une ride

sableuse sur toute sa longueur. Afin de mesurer l'ensemble de la ride, le statif coulissant du scanographe a besoin de se déplacer le long du canal, ce qui requiert un temps de déplacement de 90 s. Le mouvement simultané du statif coulissant du scanographe et du fluide à l'intérieur du canal cause une incertitude due à l'intégration des sédiments en mouvement lors de la projection des rayons X. L'approche globale de mesure du transport est alors une technique de mesure pseudo instantanée sur de larges volumes donnant une vue d'ensemble non intrusif du champ de rides. Cette approche entraîne des discontinuités temporelles et par conséquent une perte d'information du lit sédimentaire car, après 90 s, le lit n'est plus le même qu'au temps zéro. Ainsi, lors de l'analyse de larges volumes, la discontinuité temporelle doit être prise en compte. De plus, la vitesse de déplacement du scanographe étant de  $0.0167 \text{ m s}^{-1}$ , si la vitesse des sédiments dans le fluide est aussi de  $0.0167 \text{ m s}^{-1}$ , le grain de sable en suspension apparaîtra comme ayant une densité plus importante que la réalité. Ceci est dû à l'intégration des rayons X traversant l'objet et se déplaçant à la même vitesse que le scanographe.

Il faut aussi prendre en considération que la matrice générée par cette mesure, afin d'être analysée, demandera à elle seule une ressource mémoire de l'ordinateur (RAM) de 1.25 giga-octets.

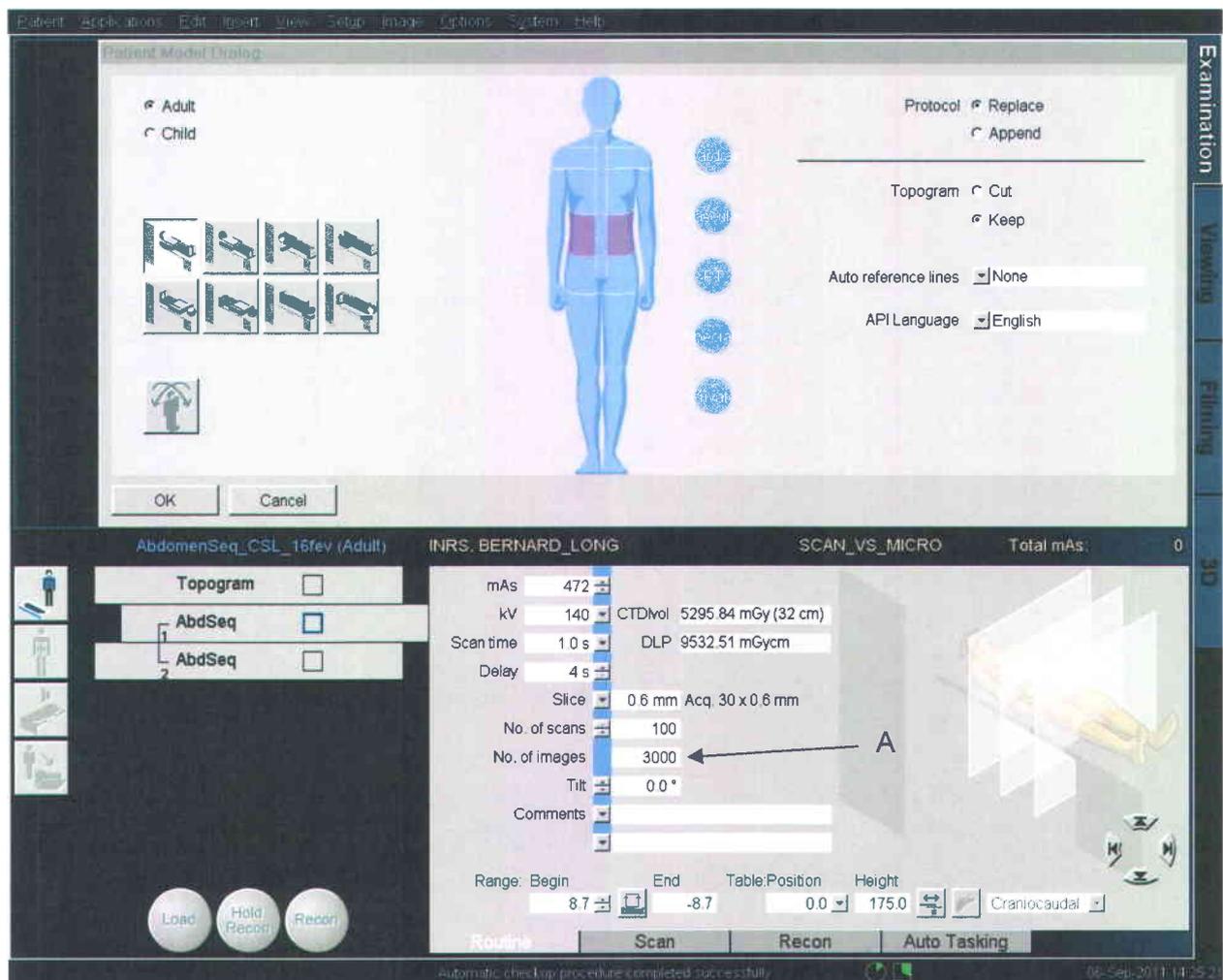
La deuxième technique, l'approche de mesure par événements périodiques (AMÉP) consiste en l'utilisation du scanographe en mode stationnaire. L'appareil demeure à la même place par rapport au canal, ce qui fournit une représentation eulérienne du mouvement. Le protocole de reconstruction utilisée avec cette technique est le protocole appelé séquence abdominale ("*abdomen sequence, adult*"). Ce protocole, lorsque le déplacement du statif est placé à une valeur nulle (Fig. 50), permet de mesurer simultanément trente tranches d'une dimension de 300 mm x 300 mm x 0.60 mm. Ainsi, le volume obtenu avec ce protocole est de 300 mm x 300 mm x 18 mm sur une période de 1 s. La durée maximale de l'expérience disponible avec le présent appareil est de 2971 s. Afin d'augmenter la durée de l'expérience, les protocoles sont répétés un à la suite de l'autre. Pour une raison encore inconnue, bien qu'une valeur supérieure à 100 groupes de tranches peut-être entrées dans l'interface d'opération (Fig. 51), une valeur supérieure à 100 entraîne l'interruption du fonctionnement de



**Figure 50.** Capture d'écran de l'onglet Scan de l'interface d'opération du scanographe. (A) Épaisseur et nombre de tranches (0.6 mm). (B) Déplacement du statif sur 0 mm. (C) Nombre de répétitions de la séquence ou groupes de tranches (100 groupes de 30 tranches). (D) Temps nécessaire à la mesure d'un groupe de tranches ou volume (1 s.). (E) Temps d'attente entre chacun des 100 volumes mesurés (30.0 s). (F) Durée totale de l'examen (2971 s). (G) protocole d'examen utilisé, séquence abdominale ("abdomen sequence").

l'ordinateur de reconstruction et un redémarrage en profondeur est nécessaire. L'utilisation de ce protocole, malgré ses limites, permet l'observation de l'évolution de l'architecture interne durant la migration de la ride sableuse. De plus, il est très important de noter la quantité d'images générées par une mesure durant une période de 2971 secondes, soit 3000 fichiers (Fig. 51) d'une taille 500 kilo-octets, ce qui occupe une espace disque de 1.5 giga-octets pour une migration de ride d'une durée de 50 minutes. Ainsi, l'étude prolongée de ride à basse vitesse demande jusqu'à 6 mesures

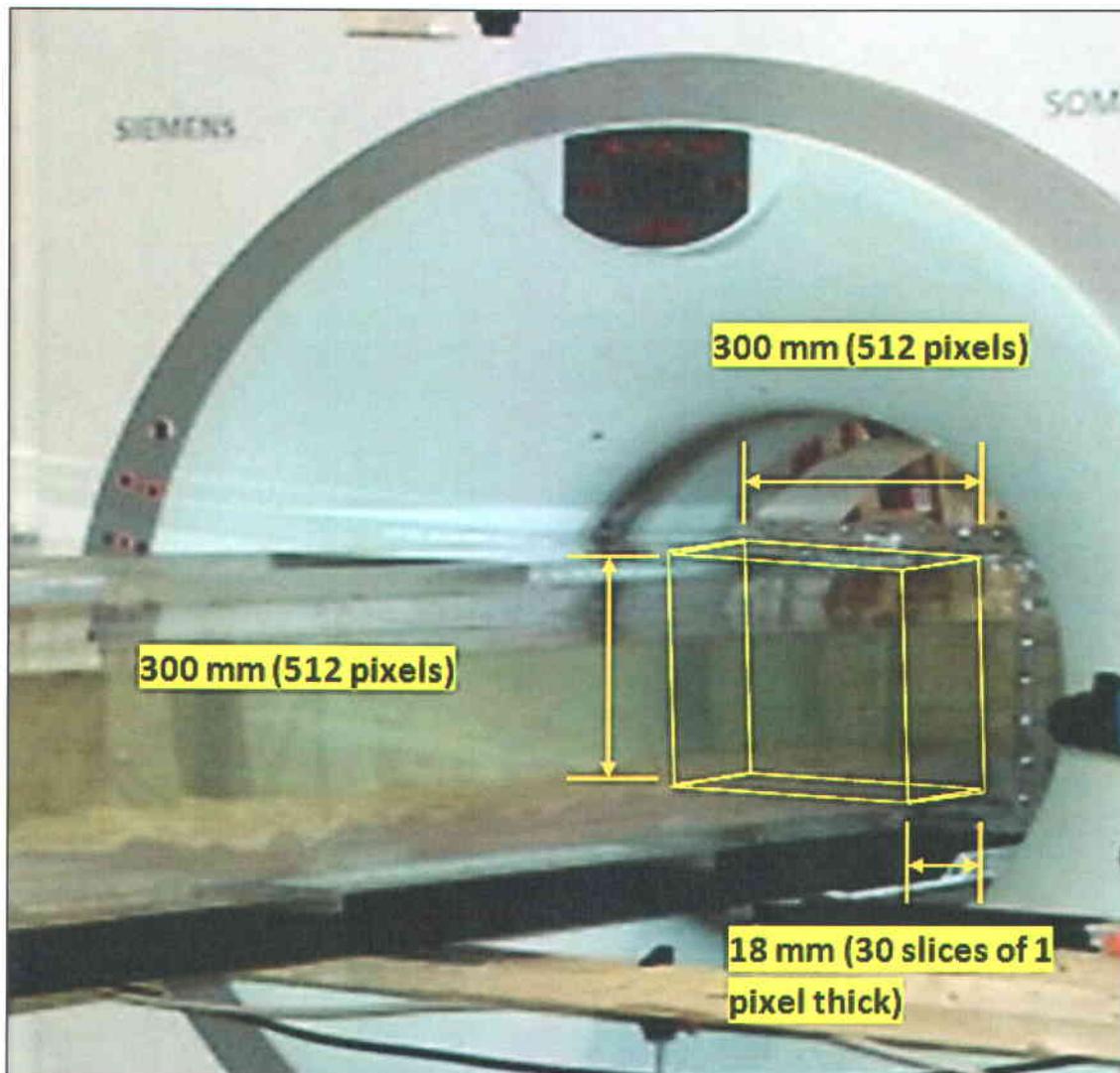
séquentielles consécutives, qui demandent un espace disque de 9 giga-octets. Enfin, le traitement de ces données exige une taille de mémoire vive équivalente. L'usage d'un PC domestique est déconseillé.



**Figure 51. Capture d'écran de l'onglet Routine de l'interface d'opération du scanographe. (A) Nombre de fichiers générés par la numérisation de 100 groupes de 30 tranches.**

Le volume (Fig. 52) comprenant le lit sédimentaire et la colonne d'eau est mesuré instantanément par un doublon de 32 lignes de capteurs. Chaque volume mesuré a un échantillonnage  $\Delta t$  espace-temps en secondes ou minutes (Fig. 50 E) selon la vitesse de migration de la ride sableuse et révèle ainsi la densité de la ride se déplaçant dans le volume fixe de l'espace d'observation. Le volume physiquement mesuré par le

groupe de tranches peut être représenté dans le canal à surface libre comme une boîte ayant les dimensions (Fig. 52) inscrites dans le protocole.



**Figure 52.** Canal à surface libre en acrylique passant au travers du statif coulissant du scanographe. Aussi illustré, le volume mesuré par le scanographe en mode approche de mesure par événements périodiques (300 mm x 300 mm x 18 mm).

### 2.3 Traitements et conversion des données DICOM

Les résultats obtenus de l'examen du lit sédimentaire se présentent en format DICOM ("*Digital Imaging and Communications in Medicine*"), format utilisé dans le domaine médical (ACR-NEMA, 2004).

À partir du coefficient d'atténuation obtenu du scanographe, l'algorithme de reconstruction choisi transfère le résultat de densité relative exprimée en HU. Par convention, le scanographe médical donne les informations en HU. L'air est de -1000 HU et l'eau de 0 HU à la différence d'un scanographe industriel, qui est calibré avec l'air à 0 HU, l'eau à 1000 HU et l'aluminium à 2700 HU. La valeur obtenue est près de la densité du matériel, car elle est recalculée en fonction de la courbe de Beer sans tenir compte de l'effet Compton, qui est influencé par le numéro atomique (Moore, 2004). Avec le scanographe utilisé, le facteur corrigeant l'ordonnée à l'origine ("*rescal intercept*" = -1024) est additionné à la matrice de l'image pour donner la valeur en HU. Ainsi, l'utilisation de la valeur brute de la matrice DICOM (ACR-NEMA, 2004) donne déjà une valeur près de la densité réelle, mais ne prend pas en compte les corrections nécessaires à l'obtention de la valeur exacte.

Les paramètres nécessaires et pertinents sont disponibles dans l'entête du fichier DICOM (ACR-NEMA, 2004). Chacun des fichiers renfermant une tranche contient dans son entête les informations telles que la puissance utilisée, la position de la tranche, la date et l'heure de l'examen ainsi que celles propres à la tranche, etc. (Tab. 4). Le tableau complet est disponible à l'annexe : Paramètres DICOM.

**Tableau 4 :** Tableau résumé des principaux paramètres disponibles dans l'entête d'un fichier DICOM, paramètres permettant la mise en contexte de l'image à travers l'ensemble de la mesure.

No DICOM	Titre et valeur du paramètre	Description
0008,0022	Acquisition Date: 20090505	Date acquisition de l'image
0008,0032	Acquisition Time: 103331.765015	Heure du début de l'acquisition
0008,1030	Study Description: Abdomen^newstephAbdomenSeq (Adult)	Description de l'étude, entrée par l'utilisateur
0008,103E	Series Description: 530_2_82_1 0.6 B20s	Description de la série entrée par l'utilisateur

No DICOM	Titre et valeur du paramètre	Description
0010,0010	Patient's Name: B20^STEPHANE_MONTREUIL	Nom du patient identifiant le client utilisant l'appareil
0010,0020	Patient ID: CANAL	Identité du patient utilisé pour fins d'identification de l'objet sujet à l'étude
0018,0015	Body Part Examined: ABDOMEN	Parties du corps examinées, l'abdomen étant utilisé pour les larges volumes
0018,0050	Slice Thickness: 0.6	Épaisseur d'une tranche
0018,0060	kVp: 140	Tension maximale appliquée au tube à rayons X lors de l'examen, 140 kVp (Peak kilovoltage)
0018,1030	Protocol Name: newstephAbdomenSeq	Nom du protocole de reconstruction utilisé
0018,1100	Reconstruction Diameter: 300	Diamètre de la reconstruction (300 mm)
0018,1151	X-ray Tube Current: 472	Courant circulant dans le tube en milliampères secondes (mAs)
0018,1210	Convolution Kernel: B20s	Filtre de l'algorithme de reconstruction, B20s signifiant une filtration basse fréquence et un lissage doux. (B20 smooth)
0020,0013	Image Number: 20	Numéro de l'image dans la série (20 de 30)
0020,1041	Slice Location: -460.7	Position de la tranche suivant l'axe des x, le déplacement de l'appareil se faisant suivant une progression négative dans l'axe (mm)
0028,0010	Rows: 512	Nombre de pixels dans la rangée
0028,0011	Columns: 512	Nombre de pixels dans la colonne
0028,0030	Pixel Spacing: 0.5859375\0.5859375	Dimension d'un pixel en (mm)
0028,0106	Smallest Image Pixel Value: 0	Valeur du pixel le plus faible (HU)
0028,0107	Largest Image Pixel Value: 2071	Valeur du pixel le plus élevé (HU)
0028,1052	Rescale Intercept: -1024	Les valeurs contenues dans le fichier varient entre 0 et 4095, afin d'obtenir la valeur standardisée (DICOM) la valeur de l'ordonnée à l'origine (-1024) doit être additionnée aux valeurs de la matrice contenue dans le fichier

Moore (2004) indique pour un sable de la Formation d'Ottawa, une densité relative en HU moyen du quartz de 723.8 HU (soit une densité d'environ  $1.74 \text{ g cm}^{-3}$ ) avec un écart-type de 54.4 HU. La densité du matériel et de l'air correspond à  $1.55 \pm 0.02 \text{ g cm}^{-3}$  et la densité du quartz à  $2.6 \pm 0.1 \text{ g cm}^{-3}$ . La densité des grains est de 1954.7 HU ( $2.98 \text{ g cm}^{-3}$ ). Ainsi, la valeur brute de densité relative (HU) est près de la densité ( $\text{g cm}^{-3}$ ) et une correction supplémentaire doit être apportée en utilisant les densités connues des matériaux. Par contre, les mesures réalisées par Moore (2004) ont été réalisées directement sur la table d'examen, ce qui confère un environnement exclusivement composé d'air.

Le scanographe médical peut être utilisé pour mesurer la densité relative des matériaux tels que des couches de sable et de roches dans les études sédimentologiques (Duliu, 1999; Ketcham & Carlson, 2001; Duchesne et al., 2006; Mees et al., 2003). Les valeurs de densité relative mesurées varient de -1024 à 3071 unités Hounsfield (HU) (Kak & Slaney, 1999) avec l'air et l'eau, qui sont respectivement de -1000 HU et 0 HU (Ketcham & Carlson, 2001). Dans le cas présent, les sédiments utilisés (Annexe : Composition des sables) sont composés à 99.7% de quartz et sont utilisés en raison de sa densité proche de l'ossature humaine et de la colonne vertébrale dont les densités relatives sont respectivement de 1477 et 1609 HU (Schneider et al., 1996). Par contre, ces sédiments renferment 0.12% d'oxyde d'aluminium ayant une densité se situant entre  $3.95$  et  $4.1 \text{ g cm}^{-3}$ , mais un numéro atomique effectif de 13 comparables à celui du quartz de 14 (Iler, 1979).

Pour les besoins de cette étude, les mesures de densité en HU sont converties en densités du SI en  $\text{g cm}^{-3}$ . L'équation utilisée pour convertir les valeurs (ASTM, 1992) des résultats obtenus conformément à la loi de Beer (Duliu, 1999) est obtenue suivant une méthode empirique. Pour ce faire, une mesure de la densité de l'eau présente à l'intérieur du canal a été réalisée. Ensuite, un bloc de quartz de la formation d'Ottawa a été placé dans le canal à surface libre, préalablement remplie d'eau et d'une couche de sédiments. Les valeurs obtenues en densité relative (HU) ont été converties en densités SI, c'est-à-dire à l'aide d'une règle linéaire. Les valeurs ainsi obtenues ne correspondent

pas à la densité réelle. L'équation polynomiale du second ordre permet donc d'obtenir les valeurs réelles de densité SI et s'écrit :

$$\rho_s = 0,0259 \left( \frac{\rho_r + 1024}{1000} \right)^2 + 1,0211 \left( \frac{\rho_r + 1024}{1000} \right) - 0,0255 \quad (32)$$

où  $\rho_s$  est la densité réelle du mélange eau-sédiments à l'intérieur du canal et  $\rho_r$  est la densité relative (HU) mesurée avec le scanographe. L'équation a été développée en utilisant des données réelles théoriques SI et les résultats au scanographe obtenus pour les mêmes matériaux dans l'environnement du canal étudié. Seulement trois points sont utilisés (Fig. 52), conformément à Moore, (2004). Les valeurs réelles SI à 24 °C sont 0.00118 g cm<sup>-3</sup> pour l'air, 0.99728 g cm<sup>-3</sup> pour l'eau et 2.65 g cm<sup>-3</sup> pour un cristal de quartz. Les valeurs corrigées du scanographe, à 24 °C, sont 0.02620 g cm<sup>-3</sup> pour l'air, 1.02851 g cm<sup>-3</sup> pour l'eau et 2.822 g cm<sup>-3</sup> pour un cristal de quartz. Cette équation de correction n'est valide que pour les mesures réalisées sur du quartz pur (Annexe : Composition des sables) à l'intérieur du canal en boucle fermée composé d'acrylique. De plus, elle nécessite l'utilisation d'un algorithme de reconstruction abdominale avec un noyau ou filtre B20s (Fig. 53). Il y a quatre différents types de noyaux ou filtres de reconstruction : H est utilisé pour la tête ("Head"), B est utilisé pour le corps et les membres, C est utilisé pour la tête des enfants ("ChildHead") et enfin, S signifie application spéciale (Siemens, 2004).

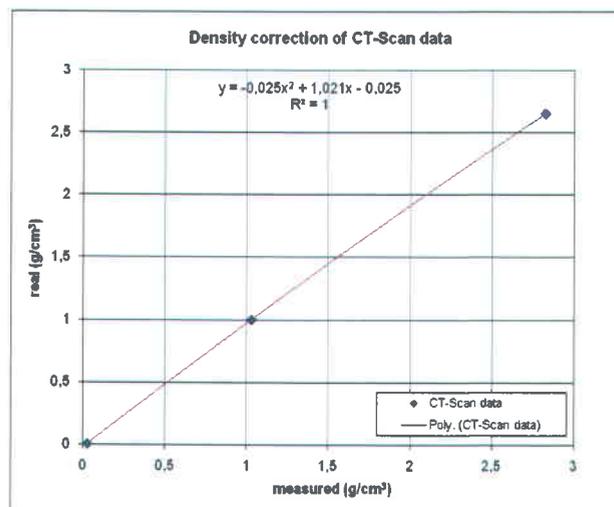


Figure 52. Équation de correction pour le canal en boucle vertical. (Montreuil, 2006)

La netteté de l'image est définie par le nombre suivant la lettre - plus le nombre est élevé, plus l'image est nette ; plus le nombre est petit, plus l'image est lissée. Les terminaisons en s ("*slow*") ou f ("*fast*") dépendent du temps de rotation. Dans cette étude, la terminaison en s, vitesse de rotation lente, est utilisée afin de permettre une meilleure pénétration dans le canal et les sédiments.

Un ensemble de 36 noyaux ou filtres est fourni avec le logiciel SOMATOM Sensation 64. Il est composé de 15 noyaux pour le corps B10s / f, B20s / f, B25s / f, B30s / f, B31s / f, B35s / f, B36f, B40s / f, B41s / f, B45s / f, B46f, B50s / f, B60S / f, B70s / f, B80s / f. Ainsi, le filtre permettant d'obtenir le meilleur contraste et combinant la meilleure réduction des artéfacts est le filtre B20s. Il est comparé à un filtre B50 et B80 à la figure 54. Sur la figure 54A, la reconstruction est réalisée en utilisant un filtre ("*Convolution Kernel*") B80s. Avec ce filtre de reconstruction, plusieurs artéfacts de stries affectent l'image. De plus, le profil de densité relative mesurée verticalement dans la couche sableuse contient du bruit à haute fréquence (Fig. 55). Sur la figure 54B, la reconstruction est réalisée en utilisant un filtre ("*Convolution Kernel*") B50s. L'utilisation de ce filtre de reconstruction réduit la fréquence des stries ainsi que leur amplitude (Fig. 54B) mais l'image nécessite quand même un post-traitement. Enfin, la reconstruction réalisée avec un filtre ("*Convolution Kernel*") B20s (Fig. 54C) permet d'obtenir une image nettoyée des artéfacts de stries, ne contenant plus de bruit à haute fréquence et ne nécessitant plus que l'application d'une équation de conversion et de correction. De plus, comme énoncé lors de la revue de littérature, il est possible obtenir dans la colonne d'eau, la concentration (adimensionnelle) de sédiments dans l'eau par l'équation de Bridge & Demicco (2008)

$$C = \frac{\rho_{mix} - \rho}{\rho_s - \rho} \quad (33)$$

où  $\rho_{mix}$  est la densité du mélange eau-sédiments,  $\rho_s$  est la densité des sédiments et  $\rho$  est la densité de l'eau et de l'équation (33) la porosité  $\varepsilon$  est obtenue par

$$\varepsilon = 1 - C \quad (34)$$

La charge en suspension peut être, si besoin est, analysée en utilisant la viscosité dynamique selon l'équation de Einstein & Krone (1962)

$$\mu_s = \mu (1 + 2.5C + 6.25C^2 + 15.26C^3) \quad (35)$$

où  $\mu$  est la viscosité du fluide (eau à la température d'expérimentation) et  $C$  est la concentration des sédiments obtenue de l'équation (33). La viscosité cinématique peut être obtenue en combinant l'équation (35) et la densité du mélange

$$\nu_s = \frac{\mu_s}{\rho_s} \quad (36)$$

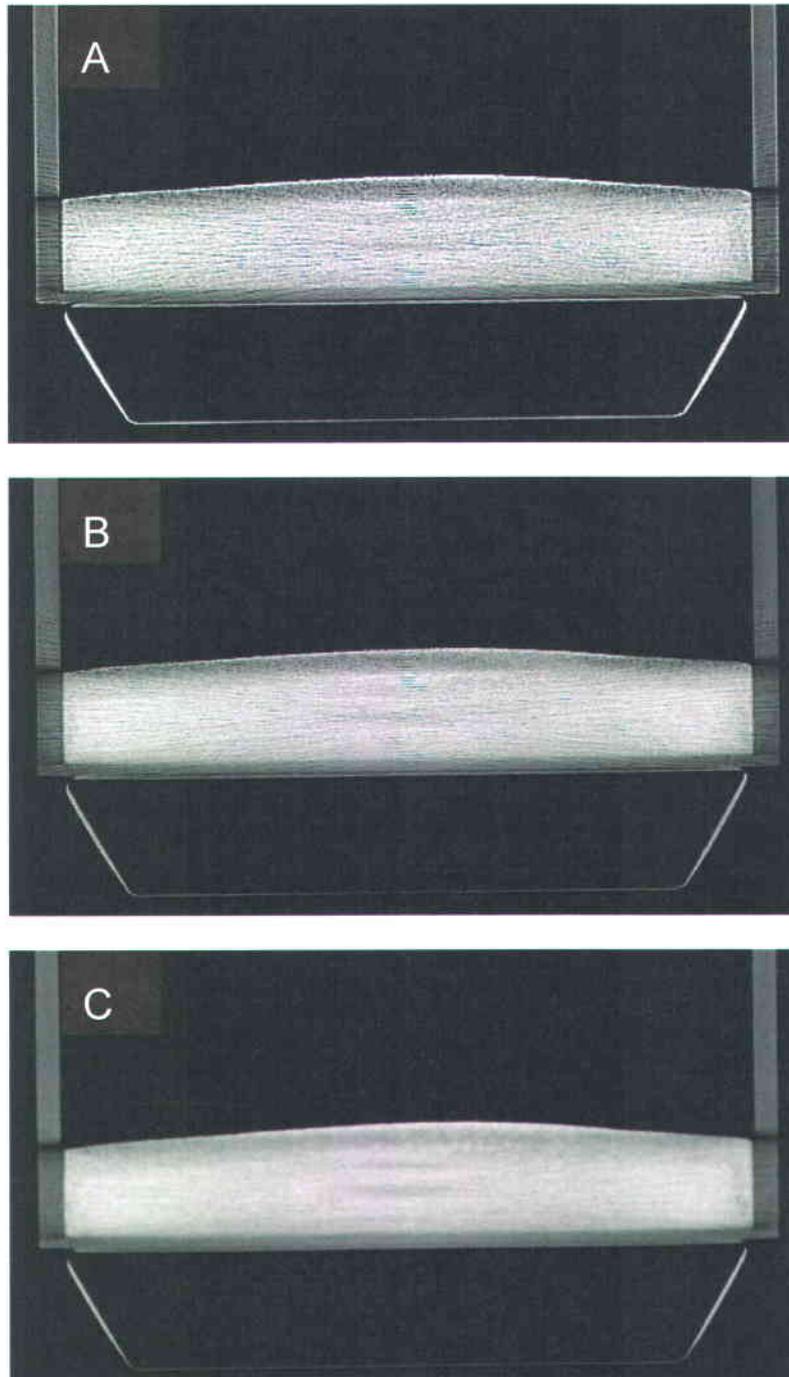
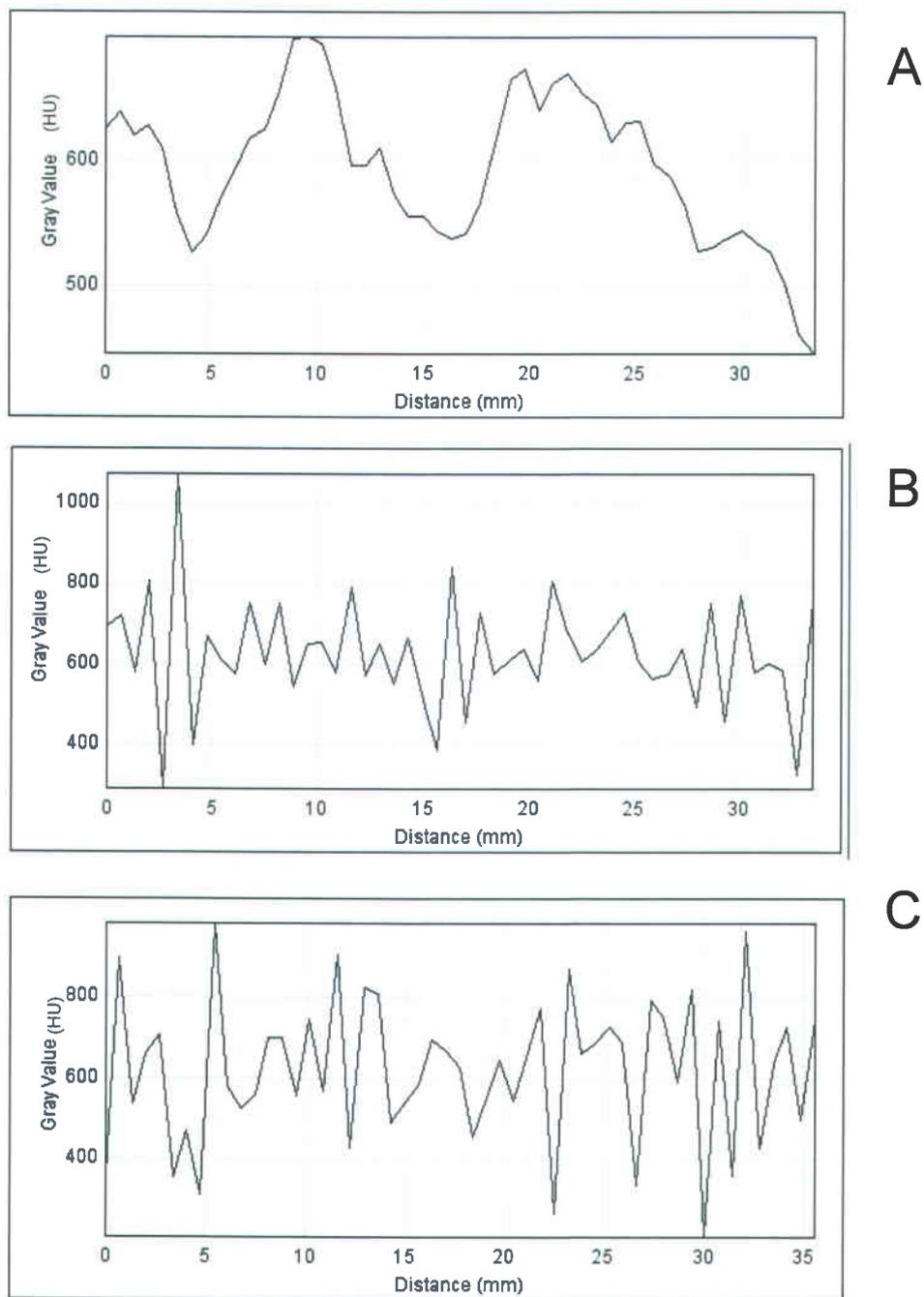


Figure 54. Image d'une boîte d'acrylique utilisée dans les pré-tests (300 x 300 x 300 mm). La boîte est remplie d'une couche de sable de quartz, puis déposée sur la table d'examen (parallélogramme en bas d'image). L'image est d'une dimension de 350 mm (512 pixels) x 350 mm (512 pixels) pour une dimension de voxels de 0.68 mm x 0.68 mm x 0.60. En (A), la reconstruction est réalisée avec un filtre ("Convolution Kernel") B80s. En (B), la reconstruction est réalisée avec un filtre ("Convolution Kernel") B50s. En (C), la reconstruction est réalisée avec un filtre ("Convolution Kernel") B20s



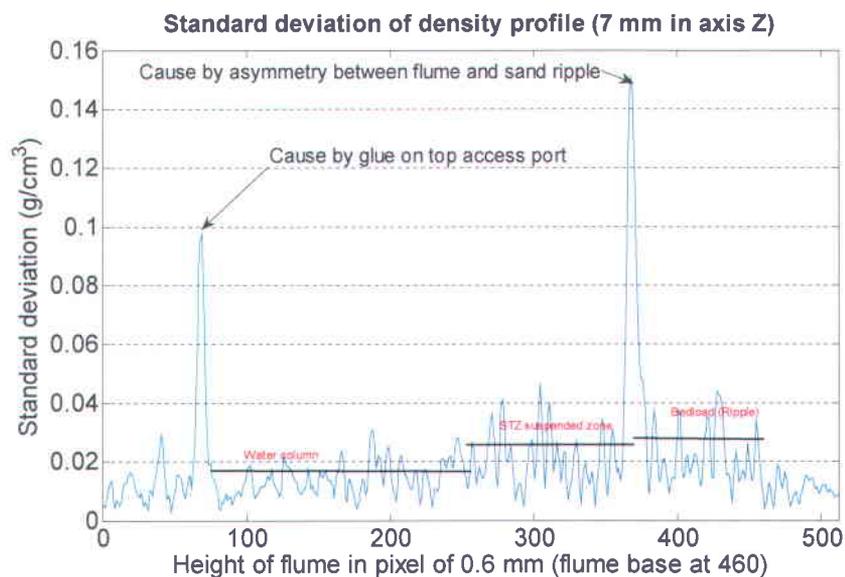
**Figure 55.** Profils de densité relative (HU) mesurés verticalement dans une couche de sable de quartz, utilisé dans les pré-tests. Les profils sont extraits dans une épaisseur de sable d'environ 35 mm. En (A), profils associés à la reconstruction réalisée avec un filtre ("Convolution Kernel") B80s. En (B), profils associés à la reconstruction réalisée avec un filtre ("Convolution Kernel") B50s. En (C), profils associés à la reconstruction réalisée avec un filtre ("Convolution Kernel") B20s

Enfin, pour les corrections à appliquer sur les mesures réalisées avec le premier canal, à surface libre, l'équation de densité SI suivante s'applique

$$\rho_s = 0,0257 \left( \frac{\rho_r + 1024}{1000} \right)^2 + 1,0209 \left( \frac{\rho_r + 1024}{1000} \right) - 0,0254 \quad (32)$$

en raison de la forme, de l'épaisseur des parois et du volume global du canal, qui diffère et où  $\rho_r$  est la densité mesurée en HU.

Pour valider le niveau de confiance des données, l'écart-type est calculé pour chaque section de la ride à l'aide d'un groupe de profils. Les résultats indiquent un écart-type de  $0.018 \text{ g cm}^{-3}$  sur la colonne d'eau (Fig. 56). La fluctuation de la valeur pour une mesure de la vitesse à zéro provient de la turbulence due au mouvement Brownien (Brown, 1828). Par définition, le mouvement Brownien est un mouvement aléatoire, irrégulier, désordonné et incessant des particules en suspension dans un fluide. Ainsi, les molécules du fluide, sous l'effet de l'agitation thermique, viennent heurter les particules fines de sédiments en suspension, les projetant dans différentes directions. La vitesse d'agitation du mouvement brownien est fonction de la taille des particules en suspension dans le fluide.



**Figure 56.** Graphique de l'écart-type dans l'axe des z. Les valeurs supérieures sont causées par les joints d'acryliques et par le passage entre le flanc de progradation et le flanc d'érosion (Montreuil et al., 2008).

Sur la couche de transport en suspension, un écart-type de  $0.022 \text{ g cm}^{-3}$  est dû à la présence de grandes turbulences à la proximité du lit et à la concentration non homogène de sédiments en suspension. À l'interface de la couche de transport par suspension et de la couche de charriage supérieure de transport, l'écart-type atteint un maximum de  $0.023 \text{ g cm}^{-3}$ . Cette valeur élevée indique la présence d'air emprisonné dans le sable et une différence dans la compaction entre les différentes strates, à l'implantation du lit sédimentaire.

Le traitement des données obtenues du scanographe nécessite l'usage du logiciel Matlab<sup>MC</sup>, afin d'appliquer les conversions et les corrections (Hsieh, 2003). Aussi, il permet mettre en place les profils de la matrice tridimensionnelle lors de l'ouverture de chacun des fichiers contenant les tranches individuelles. Un algorithme (annexe : Algorithme de traitement) est utilisé pour coder le programme d'ouverture, de traitement et d'analyse des points et des couches. Ce dernier débute par l'initialisation de variables utilisées dans le calcul de la dimension liée au nombre de fichiers totaux. Ensuite, à l'ouverture de chacun des fichiers, l'équation de conversion et de correction est appliquée afin de mettre en mémoire une matrice de densité tridimensionnelle corrigée. Ensuite s'effectue, à l'intérieur de chacun des profils, la recherche du point de frontière, qui représente la transition de densité entre la colonne d'eau et la colonne sédimentaire ainsi que la recherche du point de densité maximale à l'intérieur de la colonne sédimentaire. Les variables matricielles ainsi générées sont utilisées par d'autres programmes afin d'exécuter des analyses sur la densité et la porosité.

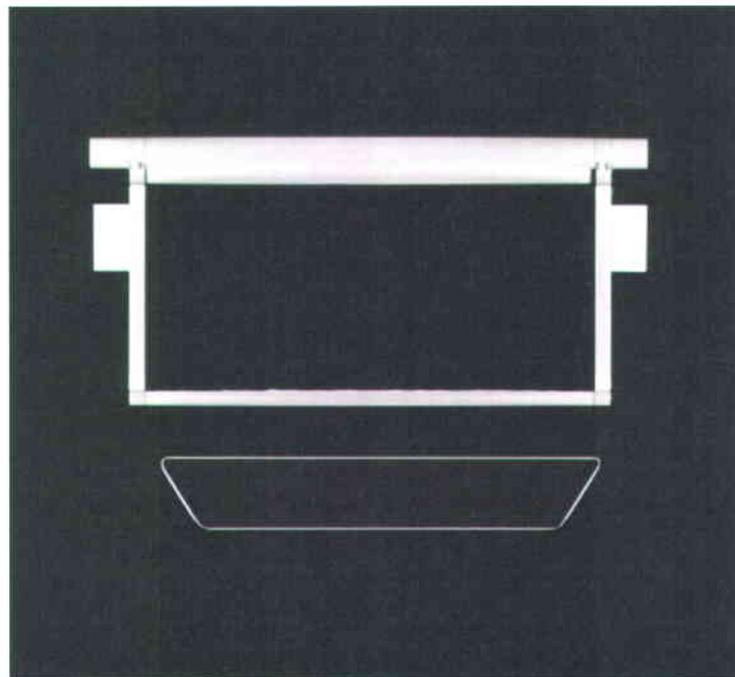
## **2.4 Imagerie tomодensitométrique et artéfacts majeurs**

Les scanographes médicaux de troisième génération sont conçus pour mesurer des objets de forme irrégulière et de densité relative inférieure à 1500 HU. L'utilisation non médicale appliquée à de grande densité relative entraîne la présence d'artéfacts (Ketcham & Carlson, 2001).

La présence d'un objet carré ou de forte densité relative (Fig. 57) entraîne aussi l'apparition d'artéfacts dans l'image scanographique.

L'observation des profils obtenus directement du fichier DICOM du scanographe présente des distorsions causées par l'effet de volume partiel. Cet effet est marquant s'il y a une grande quantité de sédiments en suspension ou d'air emprisonnée dans les sédiments. Pour atténuer l'effet, une moyenne sur 3 profils (1.2 mm) est réalisée. Les profils étudiés sont adoucis par la valeur des profils voisins (filtration par la moyenne). Lors de la détermination de la masse des sédiments transportés, une bande unitaire de 1.00 cm est choisie afin d'obtenir un volume indépendant des phénomènes ponctuels.

Dans un volume qui contient plusieurs substances ayant des propriétés différentes, ce qui est le cas du mélange eau-sédiments, la valeur mesurée sur les capteurs représente une absorption moyenne du faisceau traversant l'objet entre la source et le capteur. Cet effet du calcul moyen a pour conséquence de diminuer la variation brutale existant aux interfaces. Ainsi, les interfaces entre l'air et l'eau, l'eau et les sédiments, les sédiments et l'acrylique ne sont pas nettes. Par contre, elles présentent sur le graphique d'un profil de densité une forme caractéristique selon l'écoulement, la position sur la ride et le type de transport sédimentaire.



**Figure 57.** Image scanographique du canal en boucle verticale. Effet du durcissement de faisceau et effet Compton. L'image montre, dans le haut, l'attache de la trappe, dans les côtés les ancrages et en bas la table d'examen.

#### 2.4.1. Effet de volume partiel

L'effet de volume partiel ("*Partial-Volume effect*") étant localisés à l'interface eau-sédiments se résume ainsi. Lorsqu'un voxel, pixel à trois dimensions, contient plusieurs substances de natures différentes, la valeur représentée est en fonction de l'absorption moyenne selon les propriétés de l'ensemble des substances. Ceci explique l'absence de coupures nettes dans les profils de densité. Ce phénomène est considéré lors de l'étude des points de densité des paramètres sédimentaires. Par contre, avec les filtres de reconstruction utilisée et le fait que la granulométrie est inférieure à la taille d'un voxel, il est impossible qu'un seul grain occupe tout le volume, donc la valeur d'un voxel est toujours la densité équivalente du mélange eau-sédiments dans ce dernier, ceci étant valable pour les sédiments non cohésifs.

La valeur obtenue pour un voxel étant une densité moyenne du mélange, ceci permet de connaître la concentration de l'un par rapport à l'autre, à l'intérieur d'un voxel de  $0.21 \text{ mm}^3$ .

#### 2.4.2. Durcissement de faisceau

Le durcissement de faisceau ("*Beam Hardening*") fait en sorte qu'un objet homogène et dense apparaît plus dense en périphérie qu'en son centre. Afin de minimiser le durcissement de faisceau, les équations de correction définies sont calculées pour le tiers central du canal, partie où le durcissement de faisceau est homogène à moins de 0.2%. Les valeurs aux parois sont affectées par le durcissement de faisceau, mais elles ne sont pas utilisées dans la présente étude. Lorsque le traitement du durcissement de faisceau est nécessaire, si le lit sédimentaire est étudié sur toute sa largeur, l'équation (37), valide pour une couche de sédiments d'environ 40 mm, est appliquée horizontalement, de haut en bas, sur les 512 pixels formant la largeur du canal. Par contre, il faut étalonner l'équation de correction (polynômiale de 3<sup>ème</sup> degré), si il y a modification de l'épaisseur de la couche de sédiments.

$$y(x) = -1.6E - 7 x^3 \times -8.9E - 7 x^2 + 0.08 x + 10 \quad (37)$$

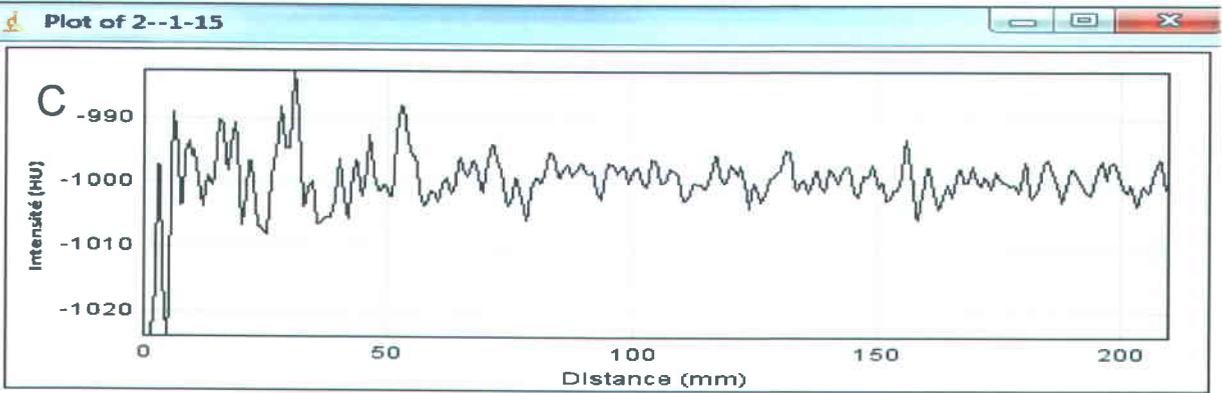
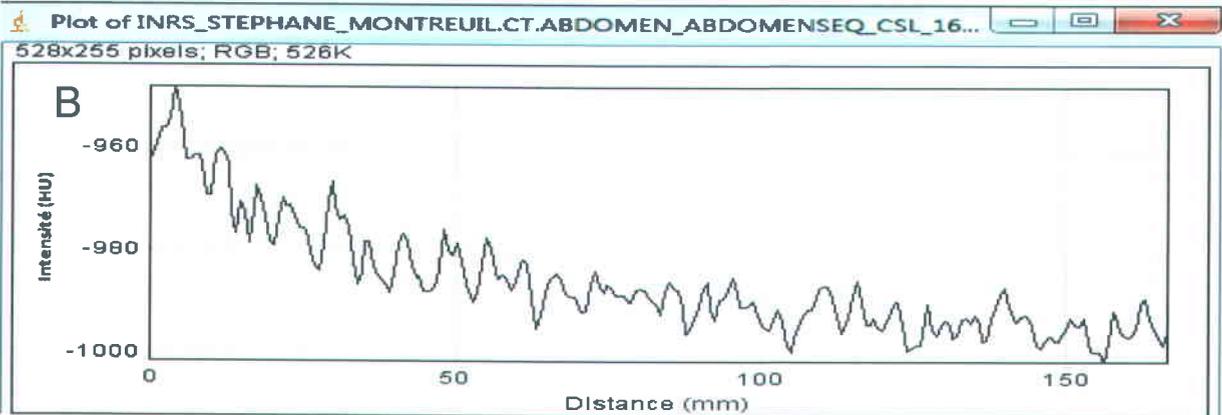
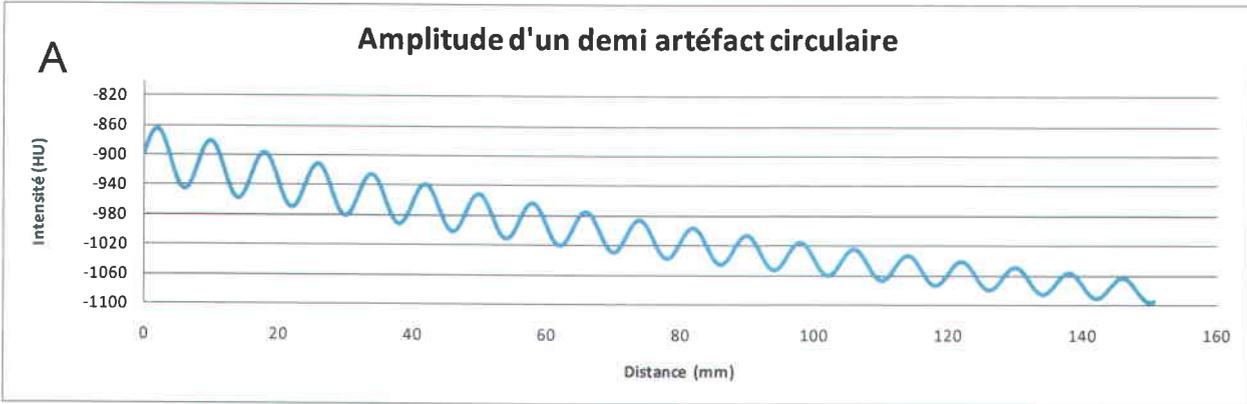
#### 2.4.3. Artéfacts circulaires

Le traitement ou l'atténuation des artéfacts circulaires est fait par application d'un filtre passe-bas d'un pas équivalent à la longueur d'onde de l'anneau. La forme du signal

(artéfact) est similaire à celui d'un gradient, comme les vagues causées par une goutte d'eau qui tombe dans une mare. Ainsi, le gradient s'atténue en fonction de la distance du centre. Par contre, cette méthode ne peut pas être utilisée avec le canal contenant le mélange eau-sédiments car l'amplitude de l'artéfact est influencée par la densité et l'homogénéité du milieu. La solution adoptée afin de réduire les artéfacts circulaires, dans la présente étude, est une optimisation du courant électrique transmis au tube, en milliampères seconde (mAs). La valeur optimisée à une tension de 140 keV est de 472 mAs (Tab. 4). L'utilisation d'une valeur supérieure entraîne l'apparition de l'artéfact créant ainsi une détérioration de la qualité de l'image. L'amplitude de l'artéfact circulaire est une onde progressive sinusoïdale et périodique car elle montre une périodicité spatiale. L'onde caractérisant les artéfacts circulaires peut être obtenue théoriquement (Fig. 58) suivant l'équation

$$Amplitude_{ring} = A_{max} \sin\left(\frac{2\pi r}{T}\right) \frac{e^{-2d/r}}{2r} + 2e^{-2d/r} \quad (38)$$

où  $A_{max}$  est l'amplitude maximale centrale de l'artéfact,  $r$  est le rayon maximal du cercle de l'artéfact,  $T$  est la période de l'artéfact en pixel et  $d$  est la distance à partir du centre du cercle. Si une correction est nécessaire, il suffit de multiplier le contenu de l'image par l'équation (38) en prenant soin d'ajuster  $A_{max}$  à l'artéfact mesuré et ensuite d'inverser la phase par un décalage des données d'une demie période d'artéfacts ou simplement en remplaçant le sinus par un cosinus dans l'équation (38). Il est important de noter que l'équation n'est valide que pour les matériaux relativement homogènes. Dans le cas de matériaux non homogènes, l'amplitude maximale de l'artéfact doit être adaptée lors des changements de densité dans les matériaux, ce qui est le cas du passage entre l'eau et les sédiments. Dans cette étude, la correction de l'artéfact circulaire n'est pas appliquée car son effet n'est pas perceptible. Pour que l'artéfact soit considéré comme étant visible, il doit entraîner des laminations fictives dans la colonne d'eau ou dans la colonne sédimentaire. Il est important de noter que les proportions de l'artéfact circulaires changent en fonction de l'environnement dans lequel il est mesuré. Ainsi, l'artéfact circulaire mesuré dans l'air n'a pas la même forme que celui mesuré en présence des parois d'acrylique du canal.

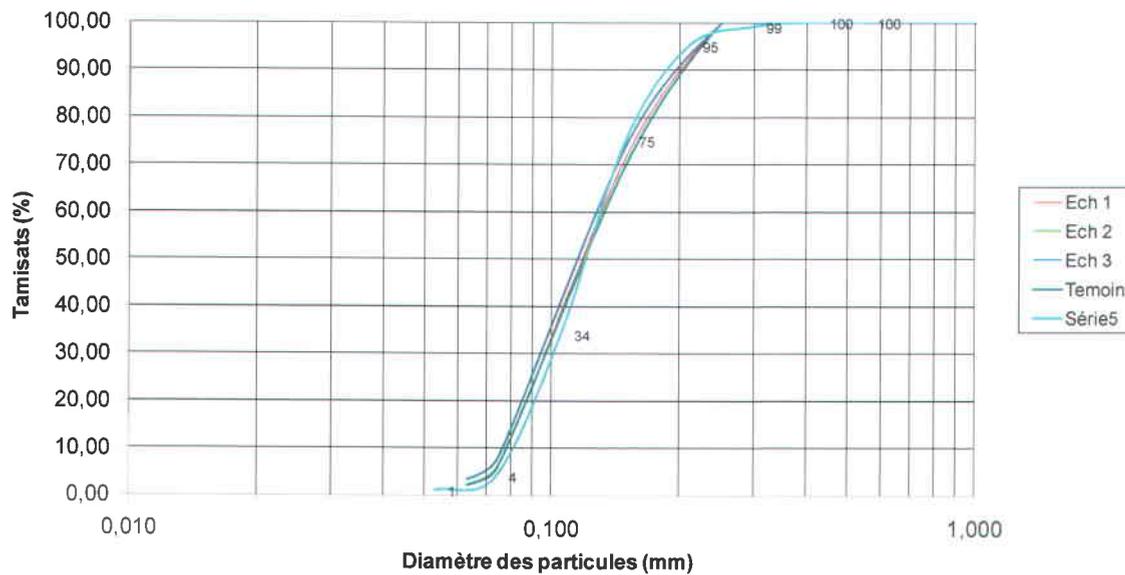


**Figure 58.** (A) Graphique théorique de l'atténuation d'un demi-artéfact circulaire. (B) Graphique de l'amplitude d'un demi-artéfact circulaire mesuré en HU directement sur l'image DICOM extraite de mesures faites sur le canal, contenant les valeurs brutes non traitées ou corrigées. (C) Graphique de l'amplitude d'un demi-artéfact circulaire mesuré en HU directement sur l'image DICOM extraite de mesures faites en l'absence du canal (mesurée dans l'air).

## 2.5 Caractéristiques du lit sédimentaire

King Jr (2005) explique que la majorité des chercheurs reconnaissent que la médiane de la granulométrie est un paramètre de première importance dans l'ampleur du transport sédimentaire (Komar, 1996). Le changement de granulométrie des particules présentes dans les canaux de large volume implique une somme d'argent importante et un entreposage volumineux. L'utilisation d'un petit canal favorise donc un remplacement des sédiments rapide et à coût raisonnable. L'utilisation d'un canal de 300 mm x 300 mm x 7000 mm permet le remplacement facile des sédiments ( $\sim 177$  kg de sable de quartz ayant une densité à sec de  $1.67 \text{ g cm}^{-3}$ ). Au total, six granulométries sont utilisées afin d'analyser l'effet de la granulométrie sur les couches de transport sédimentaire et les paramètres sédimentologiques. Les courbes granulométriques des sables utilisées et réalisées sur des échantillons prélevés à la source dans le canal, sont en annexe. Ces dernières présentent toutes une seule population (Fig. 59). Les courbes granulométriques sont réalisées en respectant la norme NQ-2560-040 et respectant le standard ASTM E 11-87, (Aïtcin, 1983; Kogel et al., 2006). Afin de évaluer l'effet des simulations de transport sédimentaire, dans le canal à surface libre, sur la granulométrie des sédiments, les courbes de granulométrie ont été tracées en utilisant, premièrement les données du manufacturier, ensuite, un échantillon des sédiments prélevés avant l'expérience, et enfin en utilisant trois échantillons prélevés dans la zone de mesure du scanographe, à la fin de l'expérience. Les trois échantillons sont prélevés à différents endroits le long d'une ride afin de prendre en compte le trie qui pourrait survenir suite au transport sédimentaire.

### 705 - Courbes granulométriques (ASTM E 11-87)



**Figure 59.** Courbes granulométriques du sédiment identifié 705 (Annexe 1). La granulométrie est effectuée par tamisage selon la norme ASTM E 11-87. L'échantillon témoin est celui prélevé directement dans la réserve de sable. La série 5 renferme les données du manufacturier et les échantillons 1 à 3 renferment les mesures réalisées au sommet, au centre et à la base de la ride. Ces derniers échantillons sont prélevés à la fin de l'expérience ceci dans le but de détecter toute modification du sable d'origine.

Chacun des courants utilisés pour les expériences est stationnaire et conservé pendant au moins 2 heures afin de former le lit de rides sableuses en migration. Entre chacune des variations de vitesse, le lit sédimentaire est remodelé (plane), pour la prochaine séquence, à l'aide d'un courant d'environ  $1 \text{ m s}^{-1}$ . Ce courant élevé est obtenu par l'abaissement de la hauteur de la colonne d'eau. Les mesures avec la technique de mesure globale sont faites au début et à la fin d'une séquence de mesure approche de mesure par événements périodiques.

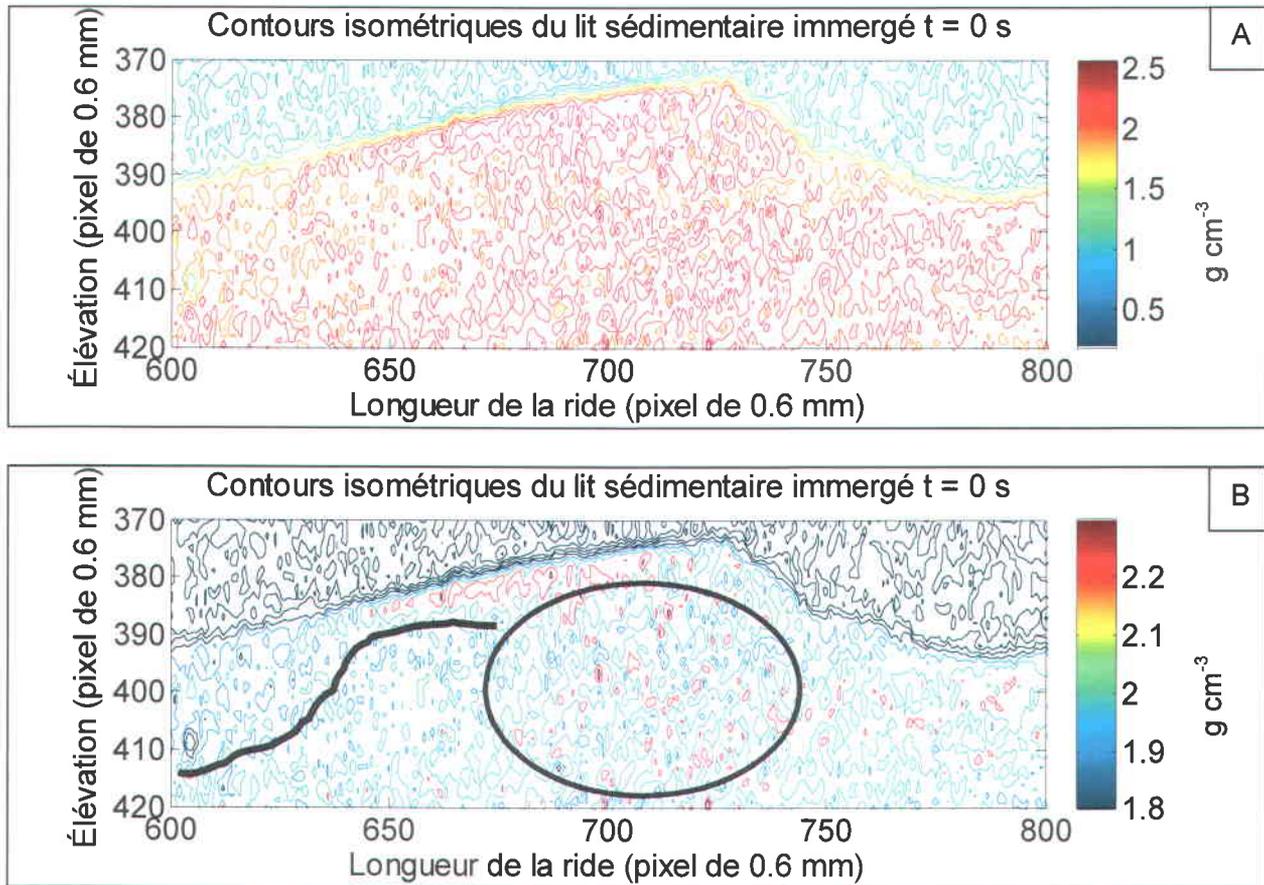
Après le calcul de la vitesse d'initiation du transport et la remise à plat du lit, les vitesses sont ajustées entre  $10 \text{ cm s}^{-1}$  et  $40 \text{ cm s}^{-1}$  afin d'excéder la vitesse d'initiation (annexe : Vitesse de transport), calculée selon la méthode de Jimenez & Madsen (2003).

## CHAPITRE 3. RÉSULTATS

### 3.1 Visualisation des stratifications des rides

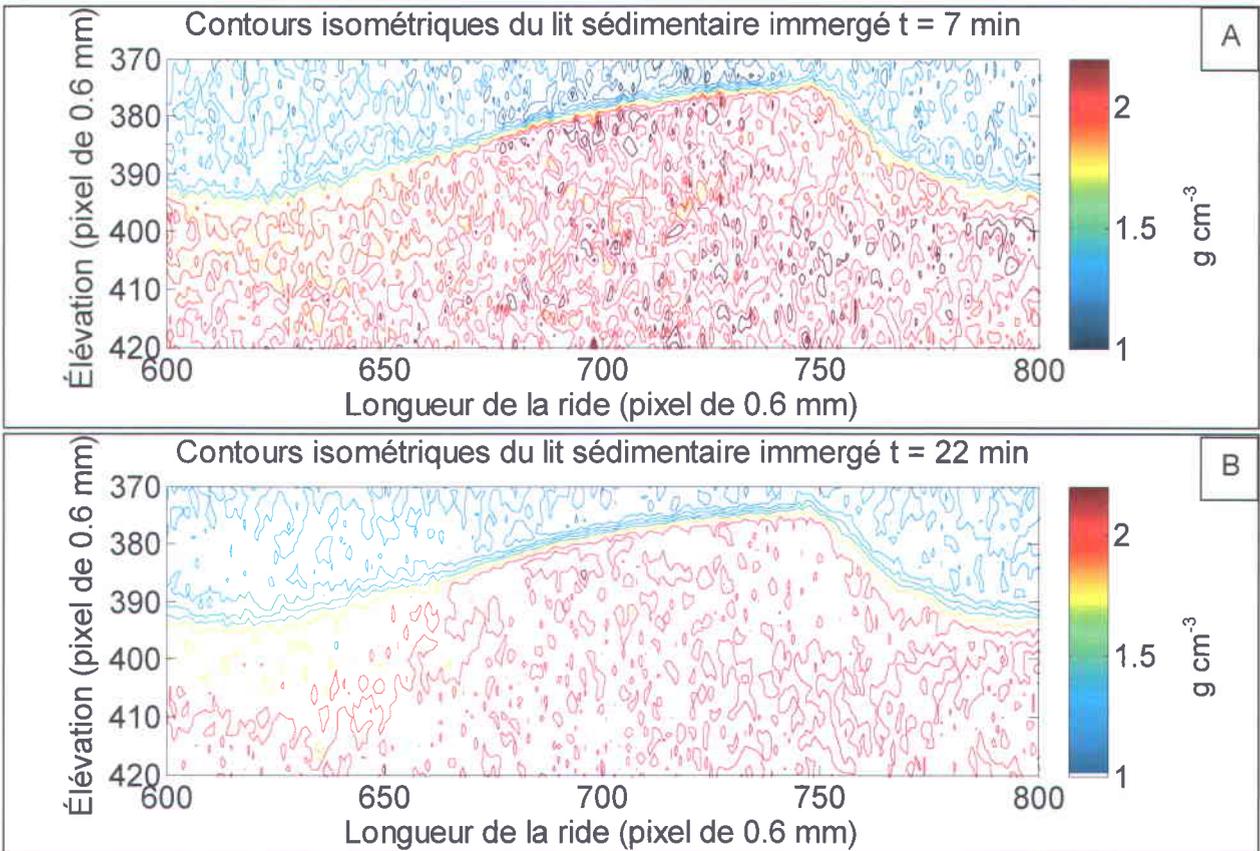
Un groupe de mesures a été réalisé sur un lit sédimentaire en fin d'expérience afin de déterminer pourquoi les lamines de progradation ne sont pas clairement visibles au scanographe et si ce phénomène est dû à une limite de la technique utilisée. La granulométrie du sable présent dans le canal lors de cette expérience est de 0.250 mm. Les 10 mesures réalisées sur une période de 44 heures permettent d'observer le retrait de la colonne d'eau ainsi que le séchage partiel du lit. Il est à noter que le courant engendré par la vidange du canal modifie légèrement la topographie d'origine. De plus, le canal d'acrylique subit une légère remontée (de ~3 mm) causée par le retrait de la masse imposée sur les supports par la colonne d'eau dans le canal. Afin de visualiser la stratigraphie de la ride et déterminer s'il est possible de percevoir des continuités, les données obtenues à partir du scanographe sont traitées en utilisant la fonction isocontours de Matlab<sup>MC</sup> sur une base de 15 couleurs, ceci afin d'obtenir la variation de la densité dans le lit sédimentaire.

L'observation au temps zéro permet de visualiser une mesure de la compaction plus importante sur le haut du flanc d'érosion que sur le flanc de progradation et la base du flanc d'érosion (Fig. 60, A). Par contre, il est impossible, sans extrapolation, de visualiser explicitement les laminations de la ride. Les valeurs de densité mesurées dans le lit présentent des variations de l'ordre de  $0.080 \text{ g cm}^{-3}$  et les contours isométriques indiquent des différences de valeurs sur de très courtes distances. La compression de l'échelle de densité (Fig. 60, B) dégage une zone de basse densité à la base du flanc d'érosion, suivie d'une couche de densité plus élevée. Des zones de densité plus élevée se retrouvent sous la partie sommitale de la ride et s'amenuisent sous le flanc de progradation.



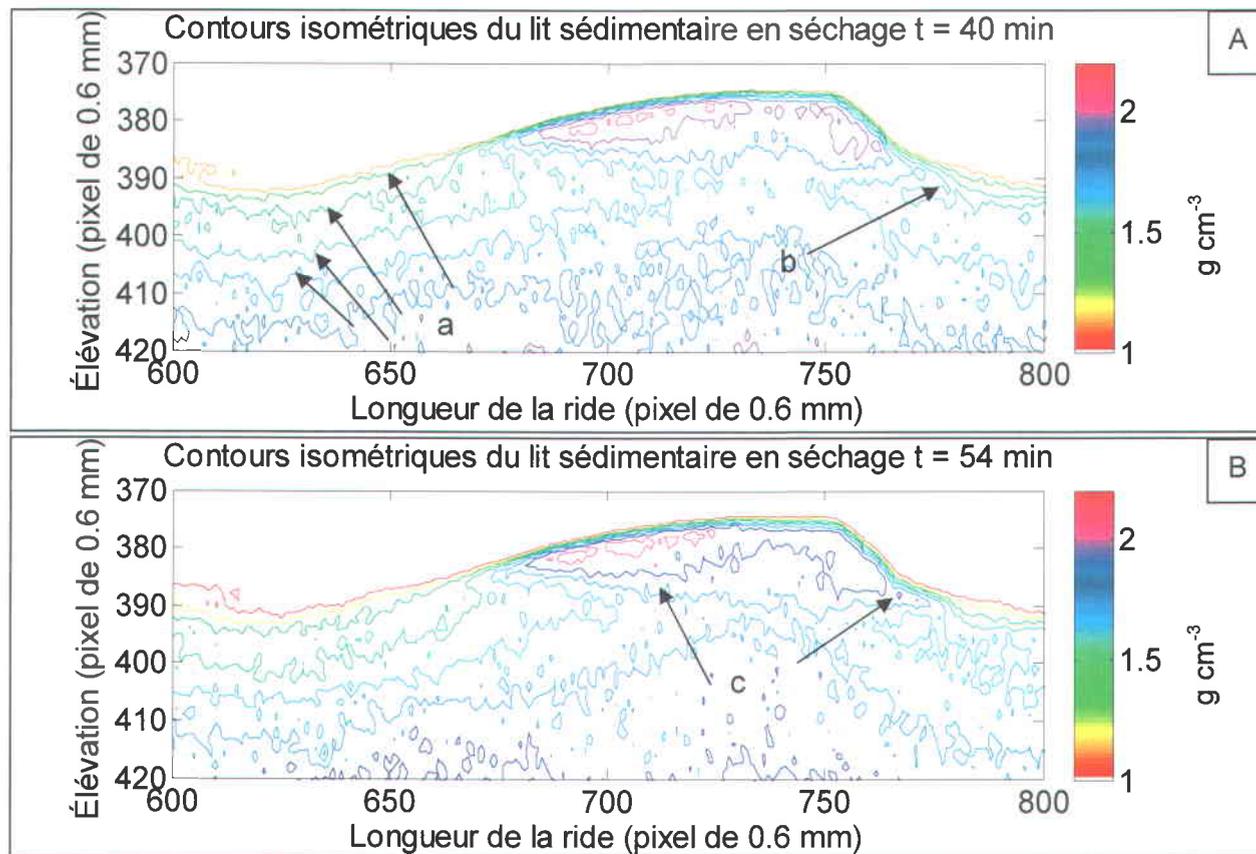
**Figure 60.** Contours isométriques de densité d'une ride au temps  $t = 0$  s du retrait de l'eau du canal, la vitesse d'origine du fluide étant d'environ  $31.1 \text{ cm s}^{-1}$ . La figure couvre une dimension de 120 mm de longueur par 66 mm de hauteur. Le diamètre médian  $d_{50}$  du sable de quartz est de 0.250 mm. La barre de couleur indique la valeur de la densité des contours et l'échelle du bas est comprimée afin de discriminer les densités élevées, mesurées au centre du canal.

Après 7 minutes de vidange du canal (Fig. 61, A), la forme de la ride a migré en raison du courant engendré par le retrait de l'eau. Donc, la comparaison dans un délai de 7 minutes présente un changement de forme à la surface, mais les structures internes sont de forme similaire. Après 22 minutes, la colonne d'eau arrive à 5 mm au-dessus de la ride, et il est observé une homogénéisation du lit sédimentaire en raison de la disparition de la multitude d'iso contours présents à 7 minutes (Fig. 61, B). Il est aussi observé au temps zéro (Fig. 60, B) que la densité près de la surface est supérieure à l'approche de la partie sommitale et que cette valeur se retrouve plus en profondeur.



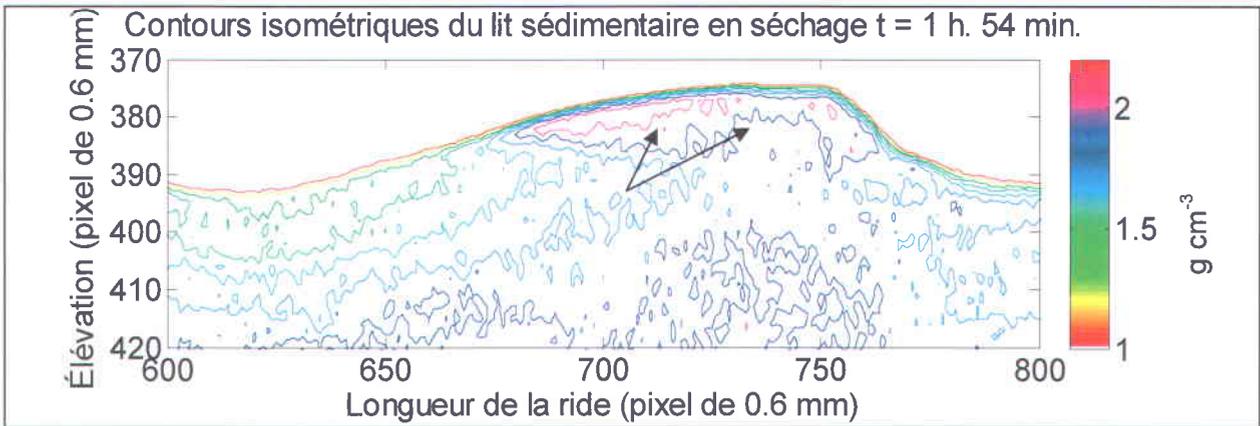
**Figure 61. Contours isométriques de densité d'une ride après t = 7 min et t = 22 min. La figure couvre une dimension de 120 mm de longueur par 66 mm de hauteur. Le diamètre médian  $d_{50}$  du sable de quartz est de 0.250 mm. La barre de couleur indique la valeur de la densité des contours.**

Après 40 minutes, les réseaux d'iso contours de la (Fig. 62, B) commencent à se définir comme des couches présentant une corrélation avec la topographie de la ride (Fig. 62, A). Après 54 minutes, les lignes isométriques présentes commencent à laisser entrevoir des formes s'apparentant aux laminations. Ainsi, l'eau remplacée par l'air, augmente la différence de densité dans la structure interne de la ride.

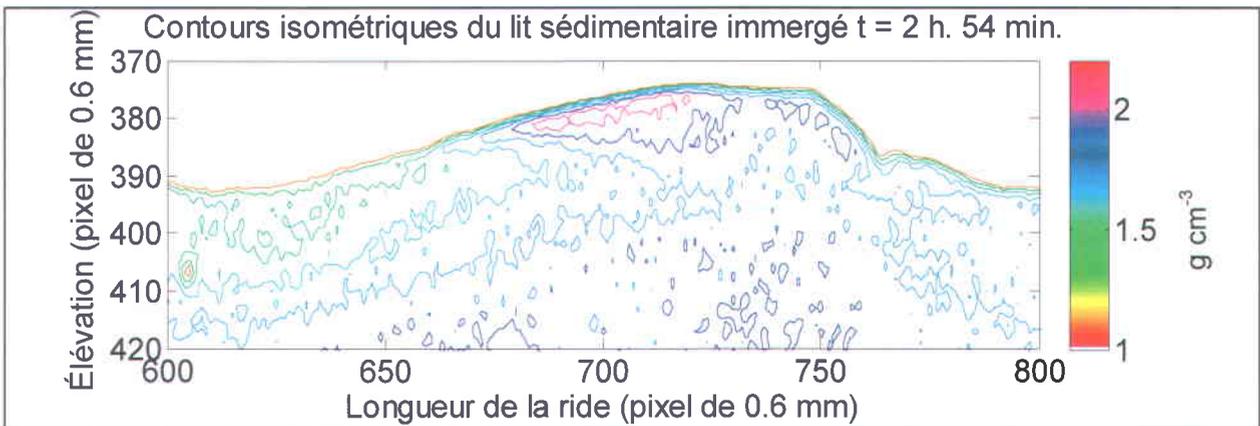


**Figure 62.** Contours isométriques de densité d'une ride à  $t = 40$  min et  $t = 54$  min après le retrait de l'eau du canal incluant la présence d'air en surface. La figure couvre une dimension de 120 mm de longueur par 66 mm de hauteur. Le diamètre médian  $d_{50}$  du sable de quartz est de 0.250 mm. La barre de couleur indique la valeur de la densité des contours. En a, des laminations sous l'influence du vortex d'érosion, visibles sur une profondeur beaucoup plus importante que dans la littérature. En b, des lamines de progradation et en c, des lamines de progradation apparaissent comme horizontales, donc indétectables.

Après 1 heure 54 minutes, les lignes isométriques commencent à laisser transparaître ce qui s'apparente à des laminations du flanc de progradation de la ride tout en conservant les laminations situés sous la ride (Fig. 63). Après 2 heures 54 minutes (Fig. 64), le principal changement est une augmentation de l'homogénéité de la base de la colonne sédimentaire. Cette augmentation est probablement liée à la compaction lors de l'évaporation du fluide.



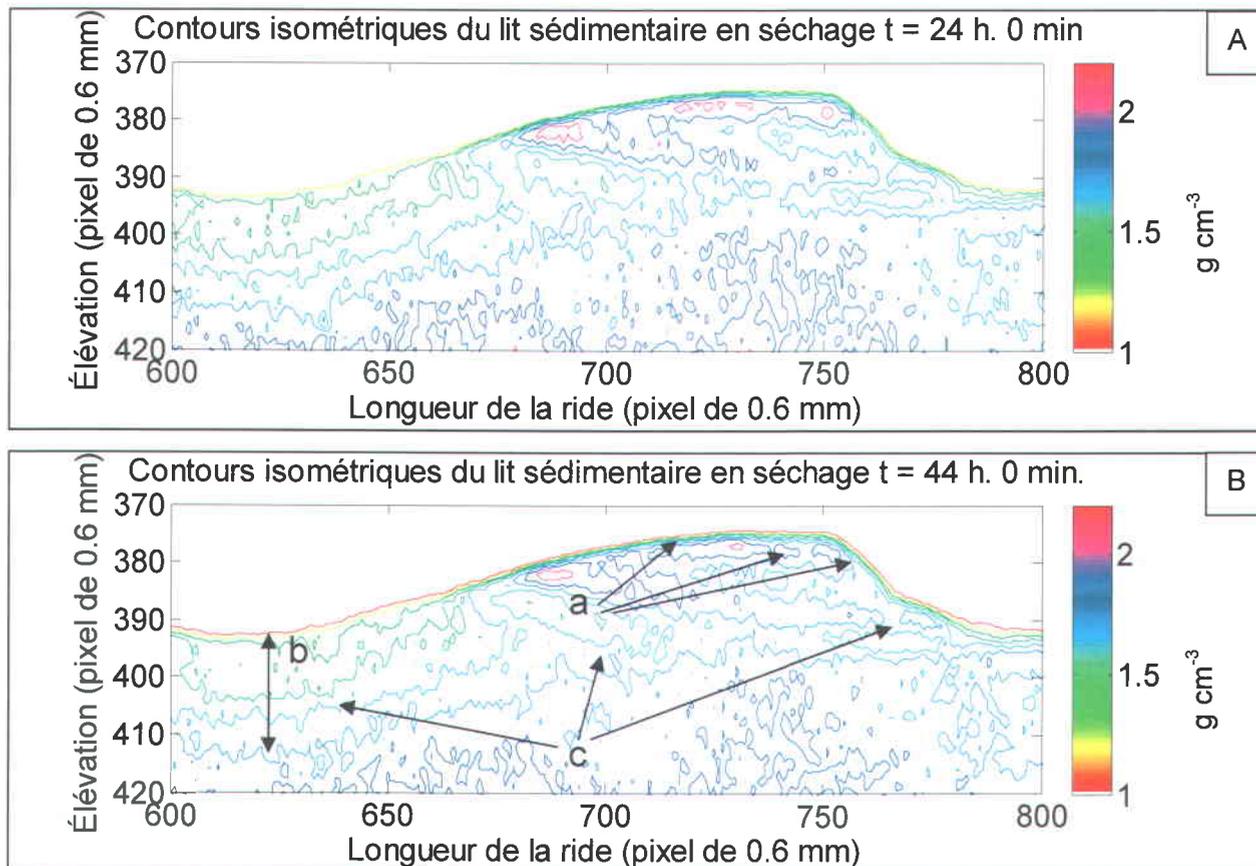
**Figure 63.** Contours isométriques de densité d'une ride à  $t = 1\text{h}54$  après le retrait de l'eau du canal et la présence d'air en surface. La figure couvre une dimension de 120 mm de longueur par 66 mm de hauteur. Le diamètre médian  $d_{50}$  du sable de quartz est de 0.250 mm. La barre de couleur indique la valeur de la densité des contours. Les flèches indiquent des lamines de transport, en rose, et des lamines de progradation, bleue, apparaissent suivant l'angle de déposition.



**Figure 64.** Contours isométriques de densité d'une ride à  $t = 2\text{h}54$  après le retrait de l'eau du canal et la présence d'air en surface. La figure couvre une dimension de 120 mm de longueur par 66 mm de hauteur. Le diamètre médian  $d_{50}$  du sable de quartz est de 0.250 mm. La barre de couleur indique la valeur de la densité des contours.

Après 24 et 44 heures, des stratifications sont visibles, révélant des couches successives d'eau n'ayant pas été rejetées de la matrice sédimentaire du bas flanc d'érosion (Fig. 65). Ainsi, au milieu du flanc d'érosion, la trace des lamines de progradation, formées au flanc de progradation, est visible (Fig. 65, B (a)). Sous le haut

du flanc d'érosion (Fig. 65, B (b)), la compaction et l'éjection de l'eau ne montre que les couches horizontales de pseudo-liquéfaction du lit. Enfin, la lamine basale de la ride est visible (Fig. 65, B (c)), ce qui n'est pas possible en présence de la colonne d'eau ou d'un remaniement récent.



**Figure 65.** Contours isométriques d'une ride à  $t = 24h$  et  $t = 44h$  après le retrait de l'eau du canal. La figure couvre une dimension de 120 mm de longueur par 66 mm de hauteur. (a) Laminas de progradation visibles au travers des porosités ouvertes et fermées qui sont définies par de fines couches en surface de la ride, mais aussi par le classement des grains. (b) Pseudo-liquéfaction visible en couche proportionnelle à la quantité d'eau en circulation dans la ride se caractérise par des laminations parallèles avec une épaisseur homogène. (c) Laminas de transport horizontale sous la ride suivie de la concrétisation des laminas de progradation et des traces d'avalanches.. La barre de couleur indique la valeur de la densité des contours.

Il est donc possible, lors du retrait de l'eau qui est remplacée par de l'air, d'observer les formations présentes dans la ride. Le retrait du fluide, observé dans le temps, dévoile la concrétion<sup>2</sup> des sédiments en zones (contours isométriques). Ces zones dévoilent les laminations de la ride permettant ainsi d'établir un lien avec les phénomènes hydrauliques internes tels la pseudo-liquéfaction<sup>3</sup>.

Enfin, il est difficile d'observer les laminations en présence du fluide car elles ne sont visibles qu'après le retrait de l'eau, à la manière des laminations observées *in situ*, en milieu asséché.

### **3.2 Profils de densité et paramètres sédimentologiques le long d'une ride**

Les profils de densité de cette section sont réalisés en utilisant l'approche de mesure par événements périodiques (AMÉP). Ainsi, chacun des profils présentés est mesuré au même emplacement physique, ce qui permet de suivre l'évolution de la colonne sédimentaire en fonction du temps puis, selon la section de la ride migrant dans la fenêtre d'observation, fenêtre qui est, elle, figée dans l'espace. Les profils sont donc présentés en ordre chronologique de passage dans la fenêtre de mesure. Les résultats sont introduits d'abord sous forme graphique montrant la topographie de la ride, suivi de cinq profils mesurés sur cette ride et, enfin, un agrandissement de la couche de transition entre la suspension et le charriage (exemple : Fig. 66). Les cinq profils retenus sont choisis afin de représenter les deux grandes divisions d'une ride, soit le flanc d'érosion, et le flanc de progradation. Ensuite les valeurs numériques sont présentées sous forme de tableaux (exemple : Tab. 6) afin de permettre l'étude des points et des couches charnières. Les points et les couches sont présentés suivant l'ordre établi par Montreuil (2006). Ces mesures permettent de discuter la pertinence

---

<sup>2</sup> Dans une roche ou un sol, partie, de nature ou de consistance différente du reste de la formation, qui s'est accrue par apport progressif de matière et a pris des formes variables.

<sup>3</sup> La pseudo-liquéfaction est défini ici par une décompaction localisée du sable en raison de l'injection ou apport forcé d'eau, dans le sable, par le vortex d'érosion localisé à la base du flanc d'érosion.

des points apportés par Montreuil (2006) et, si nécessaire, d'améliorer la précédente définition des paramètres sédimentaires. Les résultats présentés ici comprennent six expériences réalisées à partir de quatre granulométries et de quatre classes de vitesse (Tab. 5).

Afin d'être en mesure de valider la répétitivité et la cohérence des profils obtenus selon les zones de la ride, certaines expériences renferment plus d'une ride. Les expériences subséquentes présenteront des granulométries et des vitesses différentes afin d'obtenir les effets de ces derniers sur les profils de densité.

Pour chacune des expériences, les tableaux présentent les points et couches suivant les cinq profils. La partie supérieure du tableau (Tab. 6-a) fournit l'élévation et la densité des points en fonction des profils. En b (Tab. 6) se retrouve l'épaisseur et la variation de densité dans les couches en fonction des profils. Ensuite, en c (Tab. 6), se retrouve les informations sur la couche supérieure du transport par charriage. Il y a la densité moyenne dans la couche, l'indice  $j$ , qui donne une appréciation de la densité moyenne du mélange eau-sédiments en fonction de l'épaisseur, dans la couche supérieure de transport par charriage, en  $\text{cm cm}^3 \text{ g}^{-1}$ . L'indice  $m$  est l'indice du rapport de l'épaisseur de la couche sur la variation ( $\Delta$ ) de densité dans la couche, aussi exprimé en  $\text{cm cm}^3 \text{ g}^{-1}$ . Il est donc possible, grâce à ces indices, de discriminer la variation de densité selon l'épaisseur de la couche et pour un ensemble de profil à l'autre. Les indices  $j$  et  $m$  sont utilisés afin d'obtenir des valeurs pouvant être comparées et montrant l'activité présente dans la couche supérieure de transport par charriage. Ces indices permettront aussi une représentation graphique du comportement de la couche.

La densité moyenne ainsi que l'écart type de la densité de la couche inférieure du transport par charriage sont présentés en d (Tab. 6). Afin d'alléger le texte, l'unité des indices sera omise.

**Tableau 5 : Synthèse des paramètres expérimentaux utilisés pour les six expériences réalisées avec la technique de mesure par événements périodiques (AMÉP).  $ID$  est l'identificateur de l'expérience,  $d_{50}$  la granulométrie,  $U_{moyenne}$  la vitesse moyenne, le nombre de mesures (volume),  $\Delta t$  le temps écoulé entre chaque mesure, le temps de passage équivalent à une période de la ride et la durée totale de l'expérience. Les couleurs indiquent les axes de comparaison recherchés lors de la mise en place des expériences. Les vitesses initiales prévues des expériences 2 à 5 étaient de  $30 \text{ cm s}^{-1}$ . Les vitesses indiquées sont celles mesurées en court d'expérimentation et dérivant en raison de la bathymétrie.**

	ID	$d_{50}$ (mm)	$U_{moyenne}$ ( $\text{cm s}^{-1}$ )	Nb de mesures	$\Delta t$ (s)	Temps de passage de la ride (s)	Durée totale de l'expérience (min)
<b>Expérience 1</b>	<i>Flint 42.3</i>	470	42.3	55	30	690	27,5
<b>Expérience 2</b>	<i>Flint 31.0</i>	470	31.0	55	60	1560	55
<b>Expérience 3</b>	<i>530 31.2</i>	250	31.1	100	30	incomplete	50
<b>Expérience 4</b>	<i>505 34.7</i>	200	34.7	100	60	3120	100
<b>Expérience 5</b>	<i>705 28.6</i>	120	28.6	100	30	3300	50
<b>Expérience 6</b>	<i>705 21.9</i>	120	21.9	400	30	inconnue	200

Pour conclure la présentation des résultats, les mesures pertinentes de différentes expériences seront comparées entre elles sous forme de préambule à la discussion, le but étant d'alléger le document. Aussi, afin de différencier les différents profils de concentration, ce dernier seront approximés visuellement comme étant soit : linéaire, logarithmique ou discontinue.

### 3.2.1 Expérience 1

L'expérience 1 (Fig. 66) a été réalisée sous le courant le plus élevé ( $42.3 \text{ cm s}^{-1}$ ) et la granulométrie utilisée est de  $0.470 \text{ mm}$ . Elle renferme 55 mesures uniformément réparties sur une période de 27.5 minutes (Tab. 8). Pour les fins de l'étude, 25 profils sont extraits et présentés afin de couvrir les zones de la ride. De plus, cette expérience présente deux périodes de ride afin de déterminer la répétitivité des mesures d'une ride à l'autre.

Ainsi, la colonne d'eau du Profil-8 renferme une couche de transport en suspension de forme logarithmique et homogène. Le profil suivant (Profil-9) n'est plus de forme logarithmique en raison d'une brisure à  $100 \text{ mm}$  et d'un comportement chaotique de la densité mesurée. L'augmentation de densité sous la brisure indique une augmentation de la concentration de sédiments en suspension. Par contre, le Profil-10 ne possède plus cette brisure et la forme de son profil de concentration n'est pas logarithmique. Le Profil-11 et le Profil-12 présentent une transition abrupte caractérisée par une diminution soudaine de la densité au-dessus de la couche de transport par charriage. Cette diminution soudaine porte le point de frontière à  $1.006 \text{ g cm}^{-3}$  comparativement aux trois premiers profils présentant des valeurs se situant entre  $1.011$  et  $1.067 \text{ g cm}^{-3}$  (Tab. 6). Lors de cette diminution, la densité de la base de la couche de transport en suspension (LSSF) est respectivement de  $1.104$  et  $1.097 \text{ g cm}^{-3}$ . L'épaisseur de la couche de transport en suspension est mesurée là où la densité excède la densité moyenne et est nommée le point de frontière. Ce dernier se situe entre  $41.32$  et  $47.81 \text{ mm}$ , par contre, le Profil-11 présente l'élévation la plus basse avec  $37.18 \text{ mm}$ , cette valeur étant mesurée près de la partie sommitale de la ride.

Le Profil-8 possède une transition discontinue, entre le transport par suspension et le transport par charriage, sur une épaisseur de  $9.44 \text{ mm}$ , qui est délimitée par une densité au point de frontière de  $1.067 \text{ g cm}^{-3}$  et par une densité maximale (fin de transition) de  $2.034 \text{ g cm}^{-3}$  (Tab. 6). Cette transition de la couche supérieure de transport par charriage est aussi marquée par un point d'inflexion (Fig. 66 ; Profil-8 ; 1) ayant une densité de  $1.968 \text{ g cm}^{-3}$ . Ce point d'inflexion forme une sous-couche d'inflexion de  $2.95 \text{ mm}$  d'épaisseur. Ainsi, la couche supérieure de transport par charriage, d'une épaisseur de  $9.44 \text{ mm}$ , a un indice  $j$  de  $0.50$  et  $m$  de  $0.976$  pour une

densité moyenne de la couche de  $1.87 \text{ g cm}^{-3}$  et une différence de densité entre les points de la transition de  $0.967 \text{ g cm}^{-3}$ .

La transition du Profil-9 est d'une épaisseur de 13.57 mm en raison d'un point de frontière à 83.78 mm ( $1.011 \text{ g cm}^{-3}$ ) et d'une densité maximale située à 70.21 mm ( $1.995 \text{ g cm}^{-3}$ ), présentant une différence de densité dans la transition de  $0.984 \text{ g cm}^{-3}$ . Cette couche, qui est continue, a un indice  $j$  de 0.72 et  $m$  de 1.379, mais elle possède tout de même une densité moyenne ( $1.88 \text{ g cm}^{-3}$ ) comparable aux profils précédents. Ainsi, la compaction des sédiments est différente.

Au Profil-10, la densité du point de frontière est de  $1.05 \text{ g cm}^{-3}$ , mais la densité maximale est de  $1.965 \text{ g cm}^{-3}$ , par comparaison au Profil-9 dont la valeur était de  $1.995 \text{ g cm}^{-3}$ . Cette différence est faible, mais la présence d'un point d'inflexion ayant densité de  $1.919 \text{ g cm}^{-3}$  caractérise le sédiment qui s'est déposé sur une épaisseur de 0.59 mm, dans l'intervalle de temps de 30 secondes séparant les profils. Cette épaisseur est calculée entre le point de densité maximale du Profil-9 et le point d'inflexion du Profil-10.

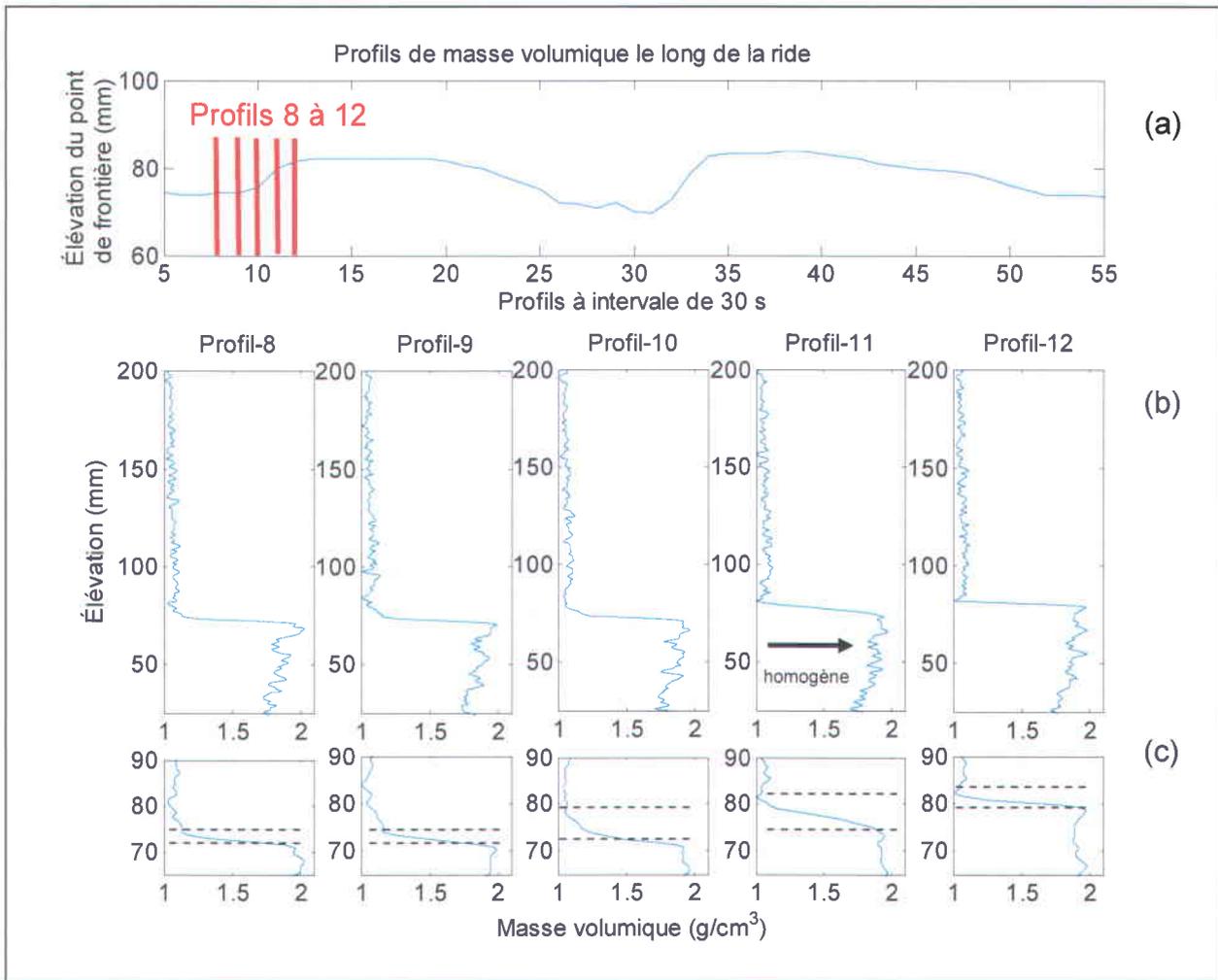
Le Profil-11 se démarque du précédent par une élévation rapide du point de frontière (81.42 mm) et une densité maximale de  $1.950 \text{ g cm}^{-3}$  soit une élévation de 2.95 mm pour le point de frontière et de 7.08 mm pour le point de densité maximale. De plus, les valeurs de la densité des points sont respectivement de  $1.006 \text{ g cm}^{-3}$  et  $1.950 \text{ g cm}^{-3}$ , pour une différence de densité dans la transition de  $0.944 \text{ g cm}^{-3}$ . Cette transition (Fig. 66 ; Profil-11, flèche) possède un double maximum car la couche de sédiment compacté au Profil-10 demeure présent à l'intérieur la ride. Il est donc possible d'obtenir une seconde épaisseur en utilisant seulement le premier point de densité maximale atteint, identifié par le point d'inflexion (74.93 mm;  $1.869 \text{ g cm}^{-3}$ ), ce qui donne une épaisseur de couche de 1.77 mm et des similitudes avec le Profil-8 d'une densité moyenne de  $1.89 \text{ g cm}^{-3}$ .

Dans ce groupe de profils, la variation de la densité de la couche intermédiaire de transport par charriage varie en épaisseur entre 1.77 et 5.31 mm pour des variations de densité entre  $0.040$  et  $0.204 \text{ g cm}^{-3}$  sans toutefois présenter de corrélation avec la position du profil sur la ride ou avec la forme ou l'épaisseur de la couche supérieure de transport en suspension, aussi nommée la transition. Il est par contre observé dans la

couche inférieure de transport en suspension du Profil-8 au Profil-10, une densité plus faible. Cette couche de valeurs plus faible tend à disparaître au fil du temps associé à la progression de la ride. Le dernier profil (Profil-12) diffère des précédents avec un point de frontière de densité de  $1.011 \text{ g cm}^{-3}$  et point de densités maximales de  $1.930 \text{ g cm}^{-3}$ , associés tous deux, à une différence de densité dans la transition de  $1.93 \text{ g cm}^{-3}$  sur une épaisseur de 3.54 mm, ce qui est inférieur au précédent profil.

Ainsi, les indices  $j$  (0.19) et  $m$  (0.385) diffèrent de façon remarquable même sur la densité moyenne de  $1.87 \text{ g cm}^{-3}$ . C'est indices étant :  $j$ , la densité moyenne du mélange eau-sédiments en fonction de l'épaisseur, dans la couche supérieure de transport par charriage et  $m$  l'indice du rapport de l'épaisseur de la couche sur la variation ( $\Delta$ ) de densité dans la couche, aussi appelé la pente de la transition de densité.

La transition est continue et présente une faible pente de transition (indice  $m$ ), c'est-à-dire de forme aplatie, comparativement aux profils précédents. Enfin, la densité moyenne de la couche inférieure de transport par charriage est de  $1.80 \text{ g cm}^{-3}$  avec un écart-type de  $0.1047 \text{ g cm}^{-3}$ . La progression de l'écart-type semble se faire au fil du temps et est donc en fonction de la compaction causée par l'accumulation de sédiment sur une épaisseur de 10.62 mm entre le Profil-8 et le Profil-12 ou entre la base du flanc d'érosion et le sommet de la ride.



**Figure 66.** Les profils de densité 8 à 12 de l'expérience 1 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 42.3$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge, les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Les lignes pointillées indiquent les limites de la couche supérieure de transport par charriage.

**Tableau 6 :** (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques du Profil-8 au Profil-12 de l'expérience 1. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.470 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.

a	Flanc d'érosion Profil-8		Flanc d'érosion Profil-9		Flanc de progradation Profil-10		Flanc d'érosion Profil-11		Flanc d'érosion Profil-12	
	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
<b>POINTS / <math>d_{50}=470 \mu\text{m}</math> / <math>U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}</math></b>										
Limite supérieure de transport en suspension	125,10	1,067	125,10	1,088	122,70	1,065	118,60	1,076	126,20	1,071
Limite supérieure de la sous-couche fluide	-	-	-	-	-	-	85,55	1,104	85,55	1,097
Point de frontière	77,29	1,067	83,78	1,011	78,47	1,050	81,42	1,006	82,01	1,011
Point d'inflexion	70,80	1,968	-	-	70,80	1,919	74,93	1,869	-	-
Point de densité maximale	67,85	2,034	70,21	1,995	66,08	1,965	73,16	1,950	78,47	1,930
Limite inférieure de basse densité	63,13	1,830	68,44	1,943	60,77	1,773	71,39	1,896	73,75	1,890
b	Flanc d'érosion Profil-8		Flanc d'érosion Profil-9		Flanc de progradation Profil-10		Flanc de progradation Profil-11		Flanc de progradation Profil-12	
	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
<b>COUCHES / <math>d_{50}=470 \mu\text{m}</math> / <math>U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}</math></b>										
Couche de transport en suspension	47,81	-	41,32	-	44,23	-	37,18	-	44,19	-
Sous-couche fluide	-	-	-	-	-	-	4,13	-	3,54	-
Couche supérieure du transport par charriage	9,44	0,967	13,57	0,984	12,39	0,915	8,26	0,944	3,54	0,919
Couche intermédiaire du transport par charriage	4,72	0,204	1,77	0,052	5,31	0,192	1,77	0,054	4,72	0,040
Sous-couche d'inflexion	34,81	-	40,12	-	32,45	-	43,07	-	45,43	-
Couche inférieure du transport par charriage	2,95	-	-	-	4,72	-	1,77	-	-	-
c	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )
	Couche supérieure du transport par charriage									
<i>m: rapport entre l'épaisseur et <math>\Delta\rho</math></i>										
<i>j: rapport entre l'épaisseur et <math>\rho</math> moy</i>										
0,976		1,379		1,354		0,875		0,385		
d	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
	Couche inférieure du transport par charriage									
1,79		0,1109		1,79		0,1102		1,80		0,1072

Toujours sur la même ride, les colonnes d'eau des profils 17 à 22 (Fig. 67) renferment des couches de transport en suspension de forme linéaire présentant une transition abrupte caractérisée par une diminution soudaine de la densité au-dessus de la couche de transport par charriage, similaire au Profil-11 et au Profil-12 de la figure 66. Cette diminution soudaine porte les points de frontière à environ  $1.073 \text{ g cm}^{-3}$  comparativement aux deux profils de la forme suivante (Profil-24 et Profil-26) ayant des valeurs se situant entre  $1.118$  et  $1.073 \text{ g cm}^{-3}$  (Tab. 7) et de forme logarithmique. Donc, le Profil-17 et le Profil-22 renferment une diminution qui s'estompe au Profil-24 et suivants. Lors de cette diminution, la densité de la base de la couche de transport par

suspension se situe entre 1.125 et 1.168 g cm<sup>-3</sup>. Cette diminution marque l'apparition d'une sous-couche de plus faibles densités d'une épaisseur se situant entre 1.77 et 5.90 mm. L'épaisseur de la couche de transport par suspension, mesurée là où la densité excède la densité moyenne et le point de frontière, se situe entre 40.11 et 52.21 mm. Ces valeurs extrêmes se situent respectivement au Profil-22 et au Profil-24, qui semblent marquer un changement ou une transition dans le transport.

Le Profil-17 et le Profil-20 (Fig. 67) présentent des similitudes avec le profil de la partie sommitale de la figure précédente (Fig. 66). En effet, la transition débute avec un point de frontière de 1.07 g cm<sup>-3</sup> (Profil-17) et 1.075 g cm<sup>-3</sup> (Profil-20) pour se terminer avec des densités de 1.987 et 1.965 g cm<sup>-3</sup> pour des épaisseurs de 6.49 et 4.13 mm, qui s'inscrivent comme de minces couches avec une forte différence de densité entre les points, 0.917 g cm<sup>-3</sup> comparativement à 0.794 g cm<sup>-3</sup> pour le Profil-26 (Tab. 7). Le Profil-17 et le Profil-20 présentent des indices  $j$  (0.35, 0.22) et  $m$  (0.708, 0.564) en lien avec une compaction de surface importante autour du point de rattachement du fluide.

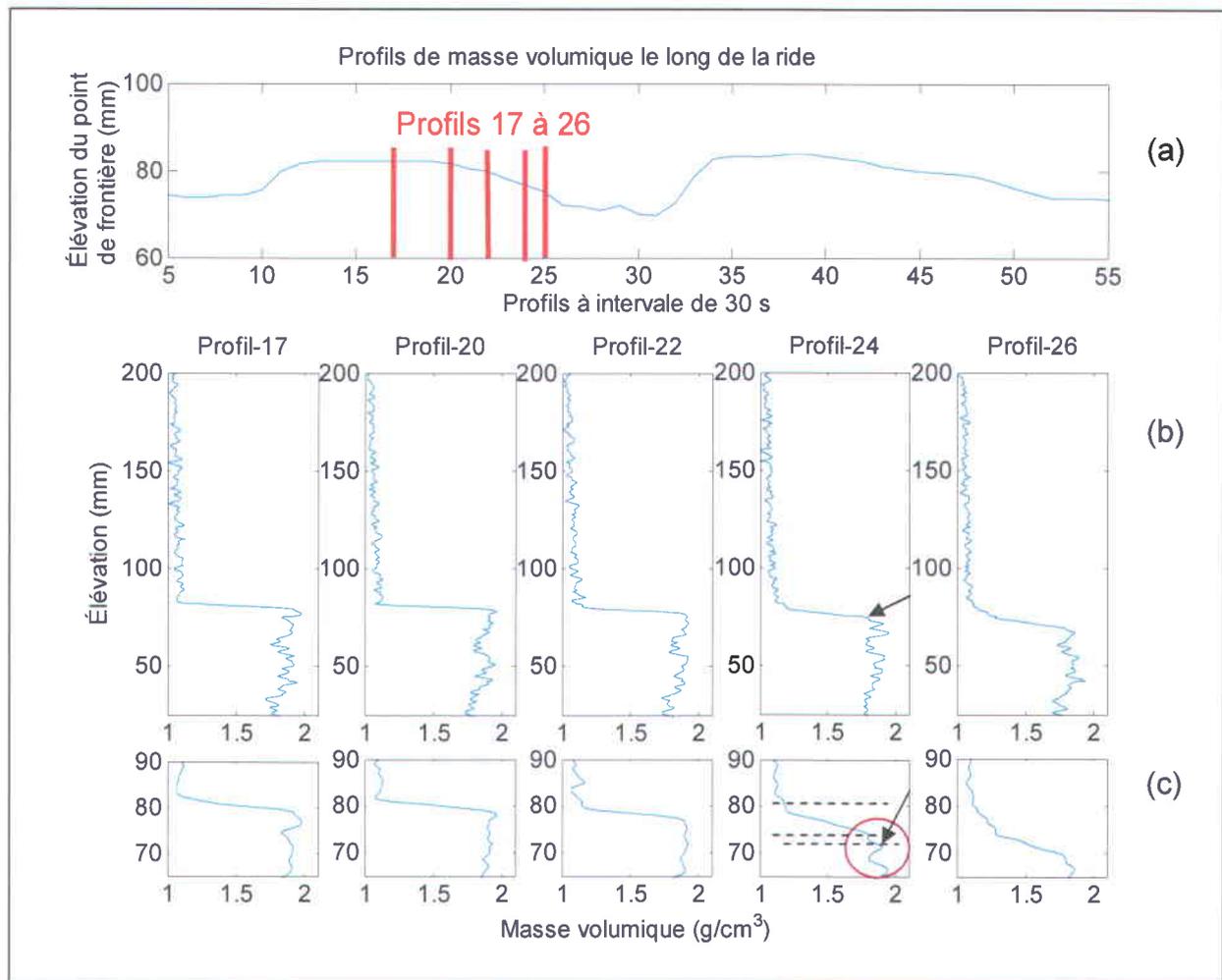
De plus, la couche intermédiaire de transport par charriage présente des épaisseurs entre 2.36 et 2.95 mm pour les quatre premiers profils comparativement au Profil-26 qui diffère avec une épaisseur de 5.90 mm.

Les différences de densités dans la couche ne peuvent être corrélés ou associés à la forme où la position du profil. Par contre, la couche inférieure de transport par charriage du Profil-17 et du Profil-20 présente une densité moyenne de 1.81 g cm<sup>-3</sup>, mais des écarts-types respectifs de 0.1056 et 0.1027 g cm<sup>-3</sup>, indiquant une concentration plus homogène. Le Profil-22, avec une densité de transition entre 1.073 et 1.922 g cm<sup>-3</sup> (différence de densité de 0.849 g cm<sup>-3</sup>), présente des similitudes avec les précédents (Profil-17 et Profil-20), mais la valeur de la densité maximale est plus basse, (1.922 g cm<sup>-3</sup>). De plus, sous la transition, la densité du sédiment est stable sur une épaisseur de 10.03 mm. Par contre, le Profil-24 présente une transition discontinue avec une discontinuité près du point de frontière de 1.185 g cm<sup>-3</sup> (Fig. 67 ; Profil-24 ; flèche) et une autre près du point de densité maximale (1.907 g cm<sup>-3</sup>). L'épaisseur de la couche résultante est donc de 11.8 mm, incluant une sous-couche d'inflexion de 2.95 mm. Ce profil présente aussi un double maximum (Fig. 67 ; cercle), indiquant une compaction

persistante dans la ride. De plus, la densité moyenne dans la couche est de  $1.82 \text{ g cm}^{-3}$ , mais l'écart-type est seulement de  $0.102 \text{ g cm}^{-3}$ .

Le dernier profil (Profil-26) présente une couche de transport en suspension de forme logarithmique ayant comme base le point de densité maximum ( $1.867 \text{ g cm}^{-3}$ ). Dans ce profil, on observe l'absence d'un point de frontière. Le point de frontière, utilisé pour le calcul de l'épaisseur (18.29 mm), est située à 84.96 mm (Tab. 7 a) et possède une densité de  $1.073 \text{ g cm}^{-3}$ . Il y a donc une association ou apparence de continuité entre le mélange de sédiments-eau de la couche de transport par suspension et le mélange sédiments-eau de la couche supérieure de transport par charriage, ne formant donc pas de frontière *stricto sensu*. Ainsi, la sommation des densités dans cette couche est de  $17.2 \text{ g cm}^{-3}$  avec une valeur moyenne de  $1.91 \text{ g cm}^{-3}$ .

Enfin, la couche de transport inférieur, d'une épaisseur de 32.45 mm, diffère des autres profils dont les valeurs varient entre 40.71 et 46.61 mm. De plus, la ligne pointillée (Fig. 66 c) indique une diminution de la densité du point maximal lorsque ce dernier est enseveli dans la ride.



**Figure 67.** Les profils de densité 17 à 26 de l'expérience 1 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 42.3$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Au profil-24, la flèche indique le point d'inflexion et la couche d'inflexion qui s'additionne à la couche supérieure de transport par charriage.

**Tableau 7 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 17 à 26 de l'expérience 1. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.470 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.**

a	Flanc d'érosion Profil-17		Flanc d'érosion Profil-20		Flanc d'érosion Profil-22		Flanc d'érosion Profil-24		Flanc d'érosion Profil-26	
	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
<b>POINTS / <math>d_{50}=470 \mu\text{m}</math> / <math>U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}</math></b>										
Limite supérieure de transport en suspension	130,40	1,065	126,30	1,080	135,40	1,053	123,30	1,076	129,20	1,082
Limite supérieure de la sous-couche fluide	89,09	1,125	85,55	1,131	84,96	1,168	-	-	-	-
Point de frontière	83,19	1,070	82,01	1,075	83,19	1,073	83,19	1,118	84,96	1,073
Point d'inflexion	79,06	1,918	-	-	-	-	74,34	1,791	69,62	1,781
Point de densité maximale	76,70	1,987	77,88	1,965	75,52	1,922	71,39	1,907	66,67	1,867
Limite inférieure de basse densité	74,34	1,835	74,93	1,904	73,16	1,903	69,03	1,806	60,77	1,741
b	Flanc d'érosion Profil-17		Flanc d'érosion Profil-20		Flanc d'érosion Profil-22		Flanc d'érosion Profil-24		Flanc d'érosion Profil-26	
	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
<b>COUCHES / <math>d_{50}=470 \mu\text{m}</math> / <math>U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}</math></b>										
Couche de transport en suspension	47,21	-	44,29	-	52,21	-	40,11	-	44,24	-
Sous-couche fluide	5,90	-	3,54	-	1,77	-	-	-	-	-
Couche supérieure du transport par charriage	6,49	0,917	4,13	0,890	7,67	0,849	11,80	0,789	18,29	0,794
Couche intermédiaire du transport par charriage	2,36	0,152	2,95	0,061	2,36	0,019	2,36	0,101	5,90	0,126
Sous-couche d'inflexion	46,02	-	46,61	-	44,84	-	40,71	-	32,45	-
Couche inférieure du transport par charriage	2,36	-	-	-	-	-	2,95	-	2,95	-
c	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$
	( $\text{g.cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	( $\text{g.cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	( $\text{g.cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	( $\text{g.cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	( $\text{g.cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )
	Couche supérieure du transport par charriage									
	1,84	0,35	1,84	0,22	1,90	0,40	1,92	0,61	1,91	0,96
d	$m$		$m$		$m$		$m$		$m$	
	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	
	0,708		0,464		0,903		1,496		2,304	
d	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$
	( $\text{g.cm}^{-3}$ )	( $\text{g.cm}^{-3}$ )	( $\text{g.cm}^{-3}$ )	( $\text{g.cm}^{-3}$ )	( $\text{g.cm}^{-3}$ )	( $\text{g.cm}^{-3}$ )	( $\text{g.cm}^{-3}$ )	( $\text{g.cm}^{-3}$ )	( $\text{g.cm}^{-3}$ )	( $\text{g.cm}^{-3}$ )
	1,81	0,1056	1,81	0,1027	1,82	0,1059	1,82	0,1019	1,82	0,1090

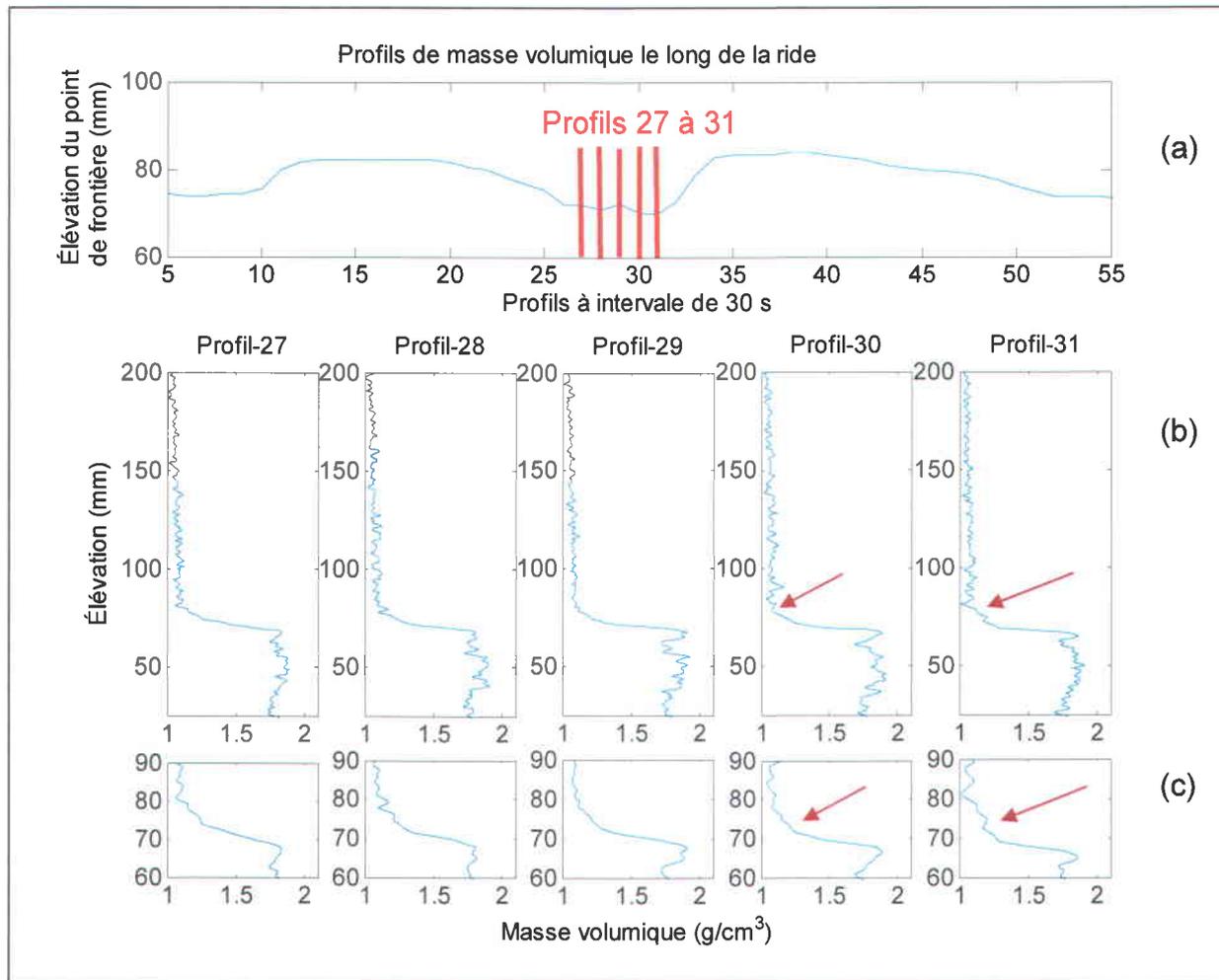
À la base du flanc d'érosion, les colonnes d'eau des profils 27 à 30 (Fig. 68) montrent des couches de transport en suspension de forme logarithmique présentant des fluctuations de la densité inégales d'un profil à l'autre. Le Profil-30 et le Profil-31 présentent des fluctuations de plus grande amplitude (voir flèche). Dans les profils 27 à 31, la densité du point de frontière varie entre 1.011 et 1.112  $\text{g cm}^{-3}$ , associée à une variation de l'élévation située entre 77.29 et 81.42 mm (Tab. 8). L'absence de diminution soudaine dans les profils 27 à 31 indique une continuité dans la transition entre le transport par suspension et le transport par charriage. L'épaisseur de la couche

de transport en suspension se situe entre 41.33 et 53.13 mm. Ces valeurs extrêmes se situent respectivement au Profil-29 et au Profil-31, ce qui semble marquer un changement dans le comportement du mélange eau-sédiments.

Les profils 27 à 30, comme le Profil-26 (Fig. 67), sont dépourvus de frontière nettement définie en raison de la continuité entre la suspension et le charriage. Les points de frontière sont établis au premier point ayant l'apparence d'une discontinuité dans la variation de la densité (Fig. 68 ; flèche rouge) et ont respectivement des densités, pour les profils 27 à 30, de 1.057, 1.112, 1.112 et 1.083 g cm<sup>-3</sup>. Les épaisseurs des couches supérieures de transport par charriage résultantes sont respectivement de 13.57, 10.03, 11.21 et 11.80 mm.

Enfin, la transition de densité du Profil-31, se situant entre 1.112 et 1.863 g cm<sup>-3</sup>, est d'une épaisseur de 8.1 mm, ce qui est inférieur aux valeurs précédemment mesurées sur les autres profils. La couche inférieure de transport par charriage, quoique plus homogène (écart-type de 0.106 g cm<sup>-3</sup>), a une densité moyenne comparable de 1.80 g cm<sup>-3</sup>, ce qui est aussi le cas pour la densité moyenne de la couche (1.89 g cm<sup>-3</sup>).

Ces profils, localisés dans la zone d'érosion, présentent donc des indices  $j$  qui varient entre 0.50 et 0.73 et des indices  $m$  qui varient entre 1.268 et 1.744. Ces derniers indiquant une décompaction du lit sédimentaire en lien avec une importante couche de transport par charriage, d'épaisseur supérieure à 10 mm sur l'ensemble de la base du flanc d'érosion et de la base du flanc de progradation. Il y a donc une continuité entre les flancs, pour les profils situés dans le creux de la ride. Ils présentent ainsi l'interconnexion entre les composantes d'un vortex.



**Figure 68.** Les profils de densité 27 à 31 de l'expérience 1 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 42.3$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage.

**Tableau 8 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 27 à 31 de l'expérience 1. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.470 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.**

a	Flanc d'érosion Profil-27		Flanc d'érosion Profil-28		Flanc d'érosion Profil-29		Flanc d'érosion Profil-30		Flanc d'érosion Profil-31		
	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	
<b>POINTS / <math>d_{50}=470 \mu\text{m}</math> / <math>U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}</math></b>											
Limite supérieure de transport en suspension	125,70	1,054	128,00	1,064	119,80	1,071	131,60	1,081	133,30	1,058	
Limite supérieure de la sous-couche fluide	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Point de frontière	80,83	1,057	77,29	1,112	78,47	1,112	78,47	1,083	74,42	1,112	
Point d'inflexion	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Point de densité maximale	67,26	1,835	67,26	1,809	67,26	1,913	66,67	1,887	64,90	1,863	
Limite inférieure de basse densité	63,13	1,749	66,08	1,784	66,08	1,860	60,77	1,683	62,54	1,729	
b	Flanc d'érosion Profil-27		Flanc d'érosion Profil-28		Flanc d'érosion Profil-29		Flanc d'érosion Profil-30		Flanc d'érosion Profil-31		
	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	
<b>COUCHES / <math>d_{50}=470 \mu\text{m}</math> / <math>U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}</math></b>											
Couche de transport en suspension	44,87	-	50,71	-	41,33	-	53,13	-	58,88	-	
Sous-couche fluide	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Couche supérieure du transport par charriage	13,57	0,778	10,03	0,697	11,21	0,801	11,80	0,804	9,52	0,751	
Couche intermédiaire du transport par charriage	4,13	0,086	1,18	0,025	1,18	0,053	5,90	0,204	2,36	0,134	
Sous-couche d'inflexion	34,81	-	37,76	-	37,76	-	32,45	-	34,22	-	
Couche inférieure du transport par charriage	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
c	$\rho$ moy ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	
	Statistiques										
	Couche supérieure du transport par charriage										
	<i>m</i> : rapport entre l'épaisseur et $\Delta\rho$ <i>j</i> : rapport entre l'épaisseur et $\rho$ moy										
$m$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	
1,744		1,439		1,400		1,468		1,268		1,268	
d	$\rho$ moy ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	
	Statistiques										
Couche inférieure du transport par charriage											
1,81		0,1113		1,81		0,1053		1,80		0,1104	

Afin de valider et extraire, en discussion, des profils types, un deuxième flanc de progradation est étudié.

Les colonnes d'eau du Profil-32 et du Profil-33 (Fig. 69) renferment des couches de transport en suspension de forme logarithmique présentant, par contre, une réduction de densité juste avant la transition (voir flèche). Les profils 34 à 36 ne sont plus de forme logarithmique en raison d'une diminution de la densité mesurée au-dessus de la couche de transport par charriage. Cette diminution soudaine porte le point de frontière entre 1.043 et 1.059  $\text{g cm}^{-3}$  (Tab. 9). Lors de cette diminution (Fig. 69 ; profils 32 à 36),

la densité de la base de la couche de transport en suspension est respectivement pour les trois derniers profils de 1.132, 1.093 et 1.109 g cm<sup>-3</sup>. Cette diminution définit une couche d'une épaisseur variant entre 1.77 et 8.26 mm. L'épaisseur de la couche de transport en suspension se situe entre 43.06 et 60.21 mm, et le Profil-33 et le Profil-34 présentent les valeurs extrêmes.

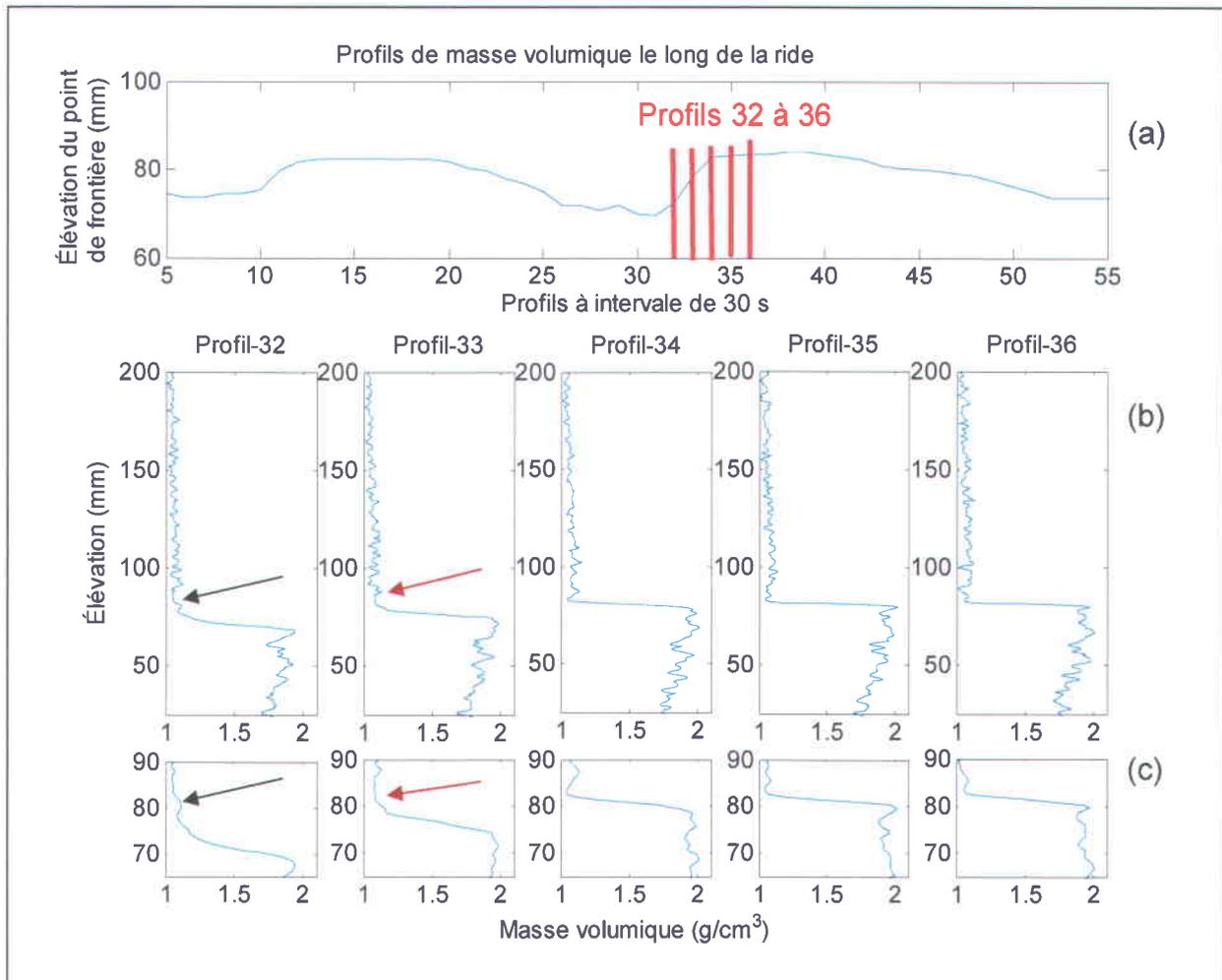
Les trois premiers profils de ce groupe contiennent des valeurs différentes en raison de leur position, là où la ride progresse rapidement. Tous les profils ont une couche de transport en suspension débutant aux environs de 130 mm, à l'exception du Profil-34 (143.4 mm) qui présente une élévation ponctuelle de la densité par rapport à ses voisins.

Le Profil-32 (Fig. 69) présente une transition presque continue de la couche supérieure de transport par charriage (1.085 et 1.948 g cm<sup>-3</sup>) ayant une épaisseur de 11.21 mm et une sommation des densités de la couche de 11.07 g cm<sup>-3</sup>, ce qui est plus bas que les valeurs des profils suivants (17.12 à 22.61 g cm<sup>-3</sup>). Le Profil-33 présente une transition discontinue (Fig. 69, flèche rouge) entre les points de frontière (86.14 mm; 1.076 g cm<sup>-3</sup>) et le point de densité maximale (71.39 mm; 1.985 g cm<sup>-3</sup>). Ce profil est situé dans la section d'avalanches, au niveau où la compaction s'est faite, contrairement au Profil-32 où le sédiment est nouvellement déposé. L'épaisseur de la base du lit sédimentaire ou couche inférieure de transport par charriage est d'une épaisseur de 41.30 mm, comparativement aux valeurs des profils précédant et suivant qui sont respectivement de 32.45 et 48.97 mm.

Les profils 34 à 36 (Fig. 69) présentent un aplatissement dans la pente de la transition entre la suspension et le charriage. Ainsi, les points de frontière pour ces profils sont respectivement de 1.043, 1.043 et 1.059 g cm<sup>-3</sup> pour des points de densité maximale associés, respectivement de 1.964, 2.018 et 1.974 g cm<sup>-3</sup> (Tab. 9). Donc, le passage entre la suspension et le charriage se fait sur des épaisseurs respectives de 4.72, 4.13 et 3.54 mm, ce qui marque une transition nette dans la couche de transport supérieur par charriage.

Pour les profils 32 à 36, les indices  $j$  augmentent de 0.19 jusqu'à 0.61. Par contre, l'indice  $m$  est de 1.229 et 1.623 pour les profils 32-33, à la base du flanc de progradation et passe de 0.512 vers 0.387 pour les profils 34, 35 et 36.

Enfin, la couche inférieure de transport par charriage ne semble pas affectée par le passage du sommet de la ride, car les valeurs restent aux environs de  $1.8 \text{ g cm}^{-3}$  avec un écart-type autour de  $0.09 \text{ g cm}^{-3}$ .



**Figure 69.** Les profils de densité 32 à 36 de l'expérience 1 sont mesurées avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.470 \text{ mm}$  et  $U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}$ . (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Les flèches noires pointent une discontinuité dans le passage suspension/charriage. Les flèches rouges pointent une réduction de densité avant le passage.

**Tableau 9 :** (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 32 à 36 de l'expérience 1. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.470 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.

a	Flanc de progradation Profil-32		Flanc de progradation Profil-33		Flanc d'érosion Profil-34		Flanc d'érosion Profil-35		Flanc d'érosion Profil-36		
	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )									
<b>POINTS / <math>d_{50}=470 \mu\text{m}</math> / <math>U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}</math></b>											
Limite supérieure de transport en suspension	130,40	1,057	129,20	1,055	143,40	1,060	132,80	1,083	132,20	1,085	
Limite supérieure de la sous-couche fluide	-	-	-	-	87,32	1,132	85,55	1,093	91,45	1,109	
Point de frontière	78,47	1,085	86,14	1,076	83,19	1,043	83,78	1,043	83,19	1,059	
Point d'inflexion	-	-	74,34	1,935	-	-	-	-	-	-	
Point de densité maximale	67,26	1,948	71,39	1,985	78,47	1,964	79,65	2,018	79,65	1,974	
Limite inférieure de basse densité	60,77	1,736	69,62	1,949	77,29	1,944	76,70	1,884	77,29	1,885	
b	Flanc de progradation Profil-32		Flanc de progradation Profil-33		Flanc d'érosion Profil-34		Flanc d'érosion Profil-35		Flanc d'érosion Profil-36		
	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )									
<b>COUCHES / <math>d_{50}=470 \mu\text{m}</math> / <math>U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}</math></b>											
Couche de transport en suspension	51,93	-	43,06	-	60,21	-	49,02	-	49,01	-	
Sous-couche fluide	-	-	-	-	4,13	-	1,77	-	8,26	-	
Couche supérieure du transport par charriage	11,21	0,863	14,75	0,909	4,72	0,921	4,13	0,975	3,54	0,915	
Couche intermédiaire du transport par charriage	6,49	0,212	1,77	0,036	1,18	0,020	2,95	0,134	2,36	0,089	
Sous-couche d'inflexion	32,45	-	41,30	-	48,97	-	48,38	-	48,97	-	
Couche inférieure du transport par charriage	-	-	2,95	-	-	-	-	-	-	-	
c	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	
	Couche supérieure du transport par charriage		Couche supérieure du transport par charriage		Couche supérieure du transport par charriage		Couche supérieure du transport par charriage		Couche supérieure du transport par charriage		
1,84		0,61		1,88		0,78		1,89		0,25	
$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	
1,299		1,623		0,512		0,424		0,387			
d	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	
	Couche inférieure du transport par charriage		Couche inférieure du transport par charriage		Couche inférieure du transport par charriage		Couche inférieure du transport par charriage		Couche inférieure du transport par charriage		
1,80		0,0942		1,79		0,0939		1,80		0,1015	
								1,80		0,0946	
								1,80		0,0986	

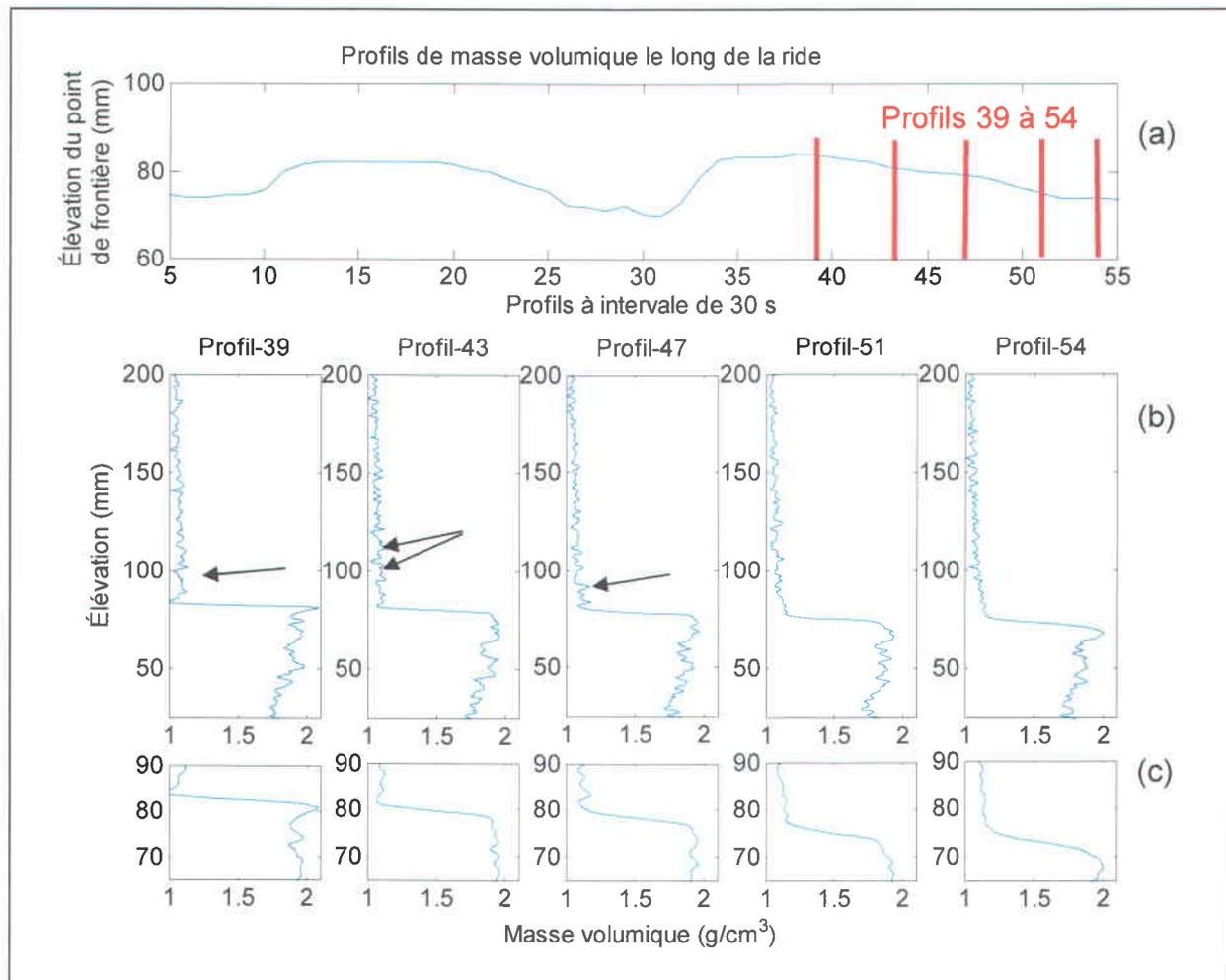
Les profils de concentration des 39 à 47, localisés sur un second flanc d'érosion, sont linéaires et relativement semblables, car ils présentent tous une faible valeur de concentration à la base des profils, dans la base de la couche de transport en suspension. La différence se situe sous les 110 mm d'élévation où des fluctuations de densité non homogènes sont présentes. Ces fluctuations entraînent donc l'augmentation des valeurs du point de frontière allant de  $1.021$  à  $1.087 \text{ g cm}^{-3}$ . Juste au-dessus du point de frontière, la densité avant diminution fluctue entre  $1.112$  et  $1.178$

$\text{g cm}^{-3}$  (Tab. 10). De plus, ces trois profils présentent une forme en cisaillement dépeint par des variations rapides de la densité dans la colonne d'eau (Fig. 70, flèche).

Par contre, le Profil-51 et le Profil-54 ne présentent plus de diminution, mais plutôt un profil de forme logarithmique comprenant l'augmentation de la densité du point de frontière entre  $1.140$  et  $1.149 \text{ g cm}^{-3}$  (Tab. 10). Ces variations pourront probablement être rattachées au fait que la ride est plus épaisse, ce qui entraîne une augmentation du courant.

Les profils 39 à 47 (Fig. 70) sont similaires aux profils 17 à 22 (Fig. 67) car ils sont tous localisés sur le flanc d'érosion de leur ride respective. Conséquemment, le Profil-51 et le Profil-54 présentent des caractéristiques (Tab. 10) comparables aux profils 27 à 31 (Tab. 8) en raison de leur position similaire. Ceci permet donc d'observer la répétitivité des caractéristiques des profils dans le temps et dans l'espace.

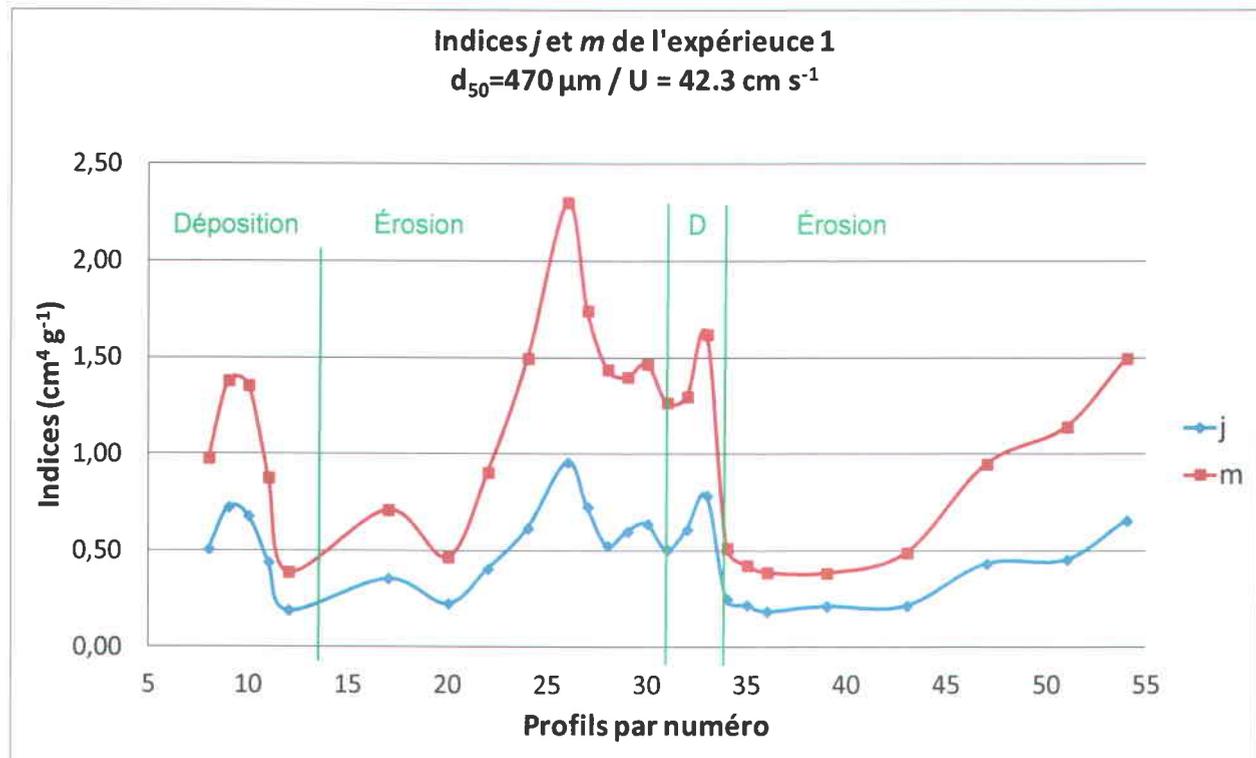
La figure 71 présente les indices  $j$  et  $m$  en fonction des numéros de profils, ce qui permet d'observer une augmentation des valeurs à l'intérieure même des zones de la ride. Ainsi, la valeur la plus basse est localisée sur le sommet de la ride et la valeur la plus importante est située sous la zone de vortex (érosion). Les indices  $j$  et  $m$  sont exprimés graphiquement afin de déterminer une tendance ou une corrélation entre le comportement de la couche supérieure de transport par charriage et les phases d'érosion/déposition ou les paramètres expérimentaux.



**Figure 70.** Les profils de densité 39 à 54 de l'expérience 1 sont mesurées avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 42.3$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Les flèches pointent un cisaillement dans le profil de densité de la suspension.

**Tableau 10 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 39 à 54 de l'expérience 1. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.470 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.**

a	Flanc d'érosion Profil-39		Flanc d'érosion Profil-43		Flanc d'érosion Profil-47		Flanc d'érosion Profil-51		Flanc d'érosion Profil-54	
	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
POINTS / $d_{50}=470 \mu\text{m}$ / $U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}$										
Limite supérieure de transport en suspension	137,50	1,075	123,30	1,057	123,90	1,073	115,60	1,069	126,80	1,058
Limite supérieure de la sous-couche fluide	89,09	1,122	84,37	1,112	83,19	1,178	-	-	-	-
Point de frontière	84,90	1,021	81,42	1,065	81,42	1,087	77,88	1,149	80,83	1,140
Point d'inflexion	-	-	-	-	76,70	1,882	73,75	1,770	71,39	1,839
Point de densité maximale	80,83	2,084	77,29	1,910	73,16	1,957	69,03	1,923	67,85	2,007
Limite inférieure de basse densité	76,70	1,882	76,70	1,905	70,21	1,906	67,85	1,889	63,13	1,836
b	Flanc d'érosion Profil-39		Flanc d'érosion Profil-43		Flanc d'érosion Profil-47		Flanc d'érosion Profil-51		Flanc d'érosion Profil-54	
	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
COUCHES / $d_{50}=470 \mu\text{m}$ / $U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}$										
Couche de transport en suspension	52,60	-	41,88	-	42,48	-	37,72	-	45,97	-
Sous-couche fluide	4,19	-	2,95	-	1,77	-	-	-	-	-
Couche supérieure du transport par charriage	4,07	1,063	4,13	0,845	8,26	0,870	8,85	0,774	12,98	0,867
Couche intermédiaire du transport par charriage	4,13	0,202	0,59	0,005	2,95	0,051	1,18	0,034	4,72	0,171
Sous-couche d'inflexion	48,38	-	48,38	-	41,89	-	39,53	-	34,81	-
Couche inférieure du transport par charriage	-	-	-	-	3,54	-	4,72	-	3,54	-
c	$\rho$ moy	$j$								
	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )
	Statistiques									
Couche supérieure du transport par charriage	1,91	0,21	1,92	0,22	1,91	0,43	1,95	0,45	1,98	0,66
$m$ : rapport entre l'épaisseur et $\Delta\rho$	$m$									
$j$ : rapport entre l'épaisseur et $\rho$ moy	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )									
	0,383		0,489		0,949		1,143		1,497	
d	$\rho$ moy	$\sigma$								
	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )
Statistiques										
Couche inférieure du transport par charriage	1,80	0,1108	1,80	0,1083	1,79	0,1071	1,80	0,1148	1,78	0,1050



**Figure 71.** Représentation graphique des indices  $j$  et  $m$  de l'expérience 1. L'évolution des indices est présentée en fonction des numéros de profils. L'indice  $j$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la variation de la densité dans la couche. L'indice  $m$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la densité moyenne dans la couche.

### 3.2.2 Expérience 2

L'expérience 2 (Fig. 72) est réalisée avec la même granulométrie que l'expérience 1 ( $d_{50} = 0.470$  mm), mais la vitesse du courant utilisé est réduite de 42.3 à 31.0  $\text{cm s}^{-1}$  et le lit sédimentaire a été aplani par un courant de forte intensité entre les expériences. De plus, les intervalles de temps entre les mesures de cette expérience sont de 60 secondes, afin de suivre la migration de la ride.

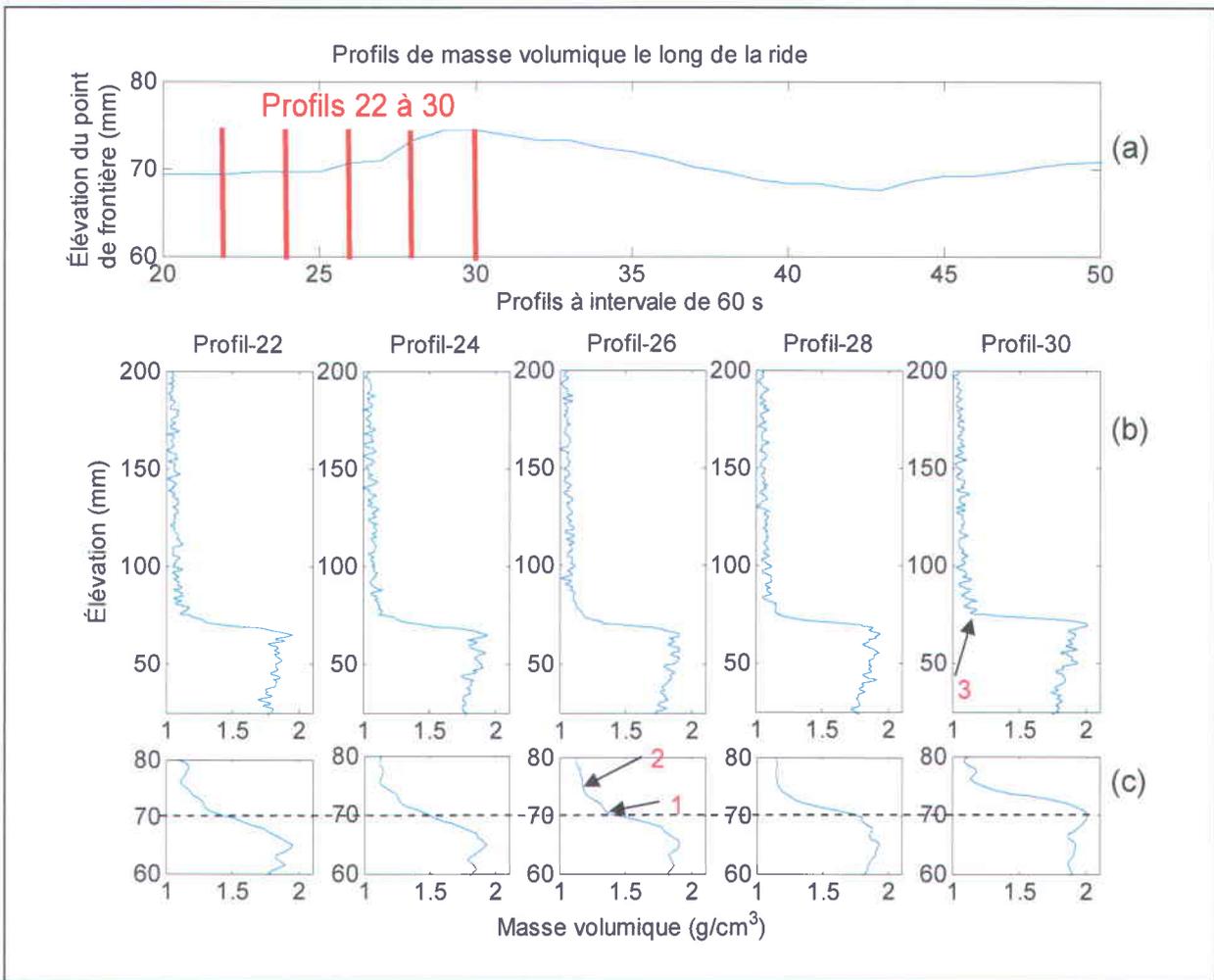
Les colonnes d'eau des profils 22 à 28 présentent des couches de transport en suspension de forme logarithmique renfermant des parties non homogènes. Le profil suivant (Profil-30) n'est plus de forme logarithmique en raison d'une diminution de la densité au point de frontière (Fig. 72 ; Profil-30 ; flèche noire). Cette diminution de la densité porte le point de frontière à  $1.133 \text{ g cm}^{-3}$ , ce qui est comparable aux quatre profils précédents dont les valeurs se situent entre 1.112 et  $1.147 \text{ g cm}^{-3}$  (Tab. 11). Lors de cette diminution, la densité de la base de la couche de transport en suspension est de  $1.182 \text{ g cm}^{-3}$ . L'épaisseur de la couche de transport en suspension, mesurée là où la densité excède la densité moyenne et le point de frontière, se situe entre 41.25 et 49.59 mm. Le Profil-26 présente la valeur la plus basse avec 41.25 mm, ce profil est situé dans la partie de progradation de la ride. De plus, le Profil-30 présente lui aussi une forme en zigzag du profil de densité dans la partie basse (Fig. 72 ; Profil-30 ; flèches rouges).

#### *Préambule à la discussion*

Le Profil-22, située au bas du flanc d'érosion, présente des similitudes avec le Profil-27 (Fig. 68) mesuré à une vitesse de  $42.3 \text{ cm s}^{-1}$ . La densité des points de frontière de ses deux profils sont comparables, par contre la densité maximale à la fin de la transition dans la couche supérieure de transport par charriage est plus élevée ( $1.950 \text{ g cm}^{-3}$ ) avec une vitesse de courant supérieure ( $1.835 \text{ g cm}^{-3}$ ). De plus, la ligne pointillée (Fig. 72 c) indique une diminution moins importante de la densité maximale, lorsque ce dernier est enseveli dans la ride, qu'à l'expérience 1 (Fig. 67 c). Par conséquent, les formes internes des sédiments de la couche inférieure de transport par charriage semblent moins affectées lorsque le courant est plus faible. En effet, la densité moyenne de la couche inférieure de transport en suspension passe de 1.81 à 1.85 g

$\text{cm}^{-3}$ , indiquant une plus faible teneur en eau et une homogénéité plus grande comme le traduit d'un écart-type de la densité dans cette couche qui se situe entre 0.044 et 0.050  $\text{g cm}^{-3}$ , ce qui est plus faible que l'expérience précédente où la valeur était approximativement de 0.107  $\text{g cm}^{-3}$ .

Une similitude existe aussi entre cette expérience et la précédente (Fig. 69 ; Profil-33) au niveau du Profil-26, qui est situé dans la section d'avalanches, comme le Profil-33, Ce profil renferme des discontinuités au niveau de la couche supérieure de transport par charriage qui présente une évolution discontinue de la compaction. Une corrélation devrait exister entre la base du lit sédimentaire et la vitesse du courant au-dessus de la ride. De plus, le Profil-30 présente une densité au point de frontière de 1.133  $\text{g cm}^{-3}$  et une augmentation au point de densité maximale jusqu'à 2.008  $\text{g cm}^{-3}$ , valeur supérieure au profil se situant dans la section d'érosion et dans la section d'avalanches (1.875 à 1.950  $\text{g cm}^{-3}$ ) laissant présager une corrélation avec la vitesse.



**Figure 72.** Les profils de densité 22 à 30 de l'expérience 2 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.470 \text{ mm}$  et  $U = 31.0 \text{ cm s}^{-1}$ . (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Profil-26, en (1) le point de frontière prévu et en (2) le point de frontière réel. Profil-30, en (3), le point de frontière.

**Tableau 11 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 22 à 30 de l'expérience 2. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 31.0 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.470 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.**

a	Flanc de progradation Profil-22		Flanc de progradation Profil-24		Flanc de progradation Profil-26		Flanc de progradation Profil-28		Flanc d'érosion Profil-30	
	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
<b>POINTS / <math>d_{50}=470 \mu\text{m}</math> / <math>U = 31.0 \text{ cm s}^{-1}</math></b>										
Limite supérieure de transport en suspension	121,50	1,051	125,70	1,104	120,90	1,077	126,80	1,079	125,70	1,075
Limite supérieure de la sous-couche fluide	-	-	-	-	-	-	-	-	77,29	1,182
Point de frontière	76,11	1,112	76,11	1,125	79,65	1,126	77,29	1,147	76,11	1,133
Point d'inflexion	-	-	66,67	1,851	67,85	1,769	69,62	1,795	-	-
Point de densité maximale	64,90	1,950	64,90	1,932	64,90	1,905	67,85	1,875	70,21	2,008
Limite inférieure de basse densité	62,54	1,830	61,95	1,795	63,13	1,830	66,67	1,852	66,67	1,869
b	Flanc de progradation Profil-22		Flanc de progradation Profil-24		Flanc de progradation Profil-26		Flanc de progradation Profil-28		Flanc d'érosion Profil-30	
	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
<b>COUCHES / <math>d_{50}=470 \mu\text{m}</math> / <math>U = 31.0 \text{ cm s}^{-1}</math></b>										
Couche de transport en suspension	45,39	-	49,59	-	41,25	-	49,51	-	49,59	-
Sous-couche fluide	-	-	-	-	-	-	-	-	1,18	-
Couche supérieure du transport par charriage	11,21	0,838	11,21	0,807	14,75	0,779	9,44	0,728	5,90	0,875
Couche intermédiaire du transport par charriage	2,36	0,120	2,95	0,137	1,77	0,075	1,18	0,023	3,54	0,139
Sous-couche d'inflexion	37,76	-	37,17	-	38,35	-	41,89	-	41,89	-
Couche inférieure du transport par charriage	-	-	1,77	-	2,95	-	1,77	-	-	-
c	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )
	Couche supérieure du transport par charriage									
	1,79	0,63	1,79	0,63	1,82	0,81	1,84	0,51	1,86	0,32
d	$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	
	1,338		1,389		1,893		1,297		0,674	
d	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
	Couche inférieure du transport par charriage									
1,81	0,0437	1,82	0,0490	1,83	0,0471	1,83	0,0494	1,84	0,0495	

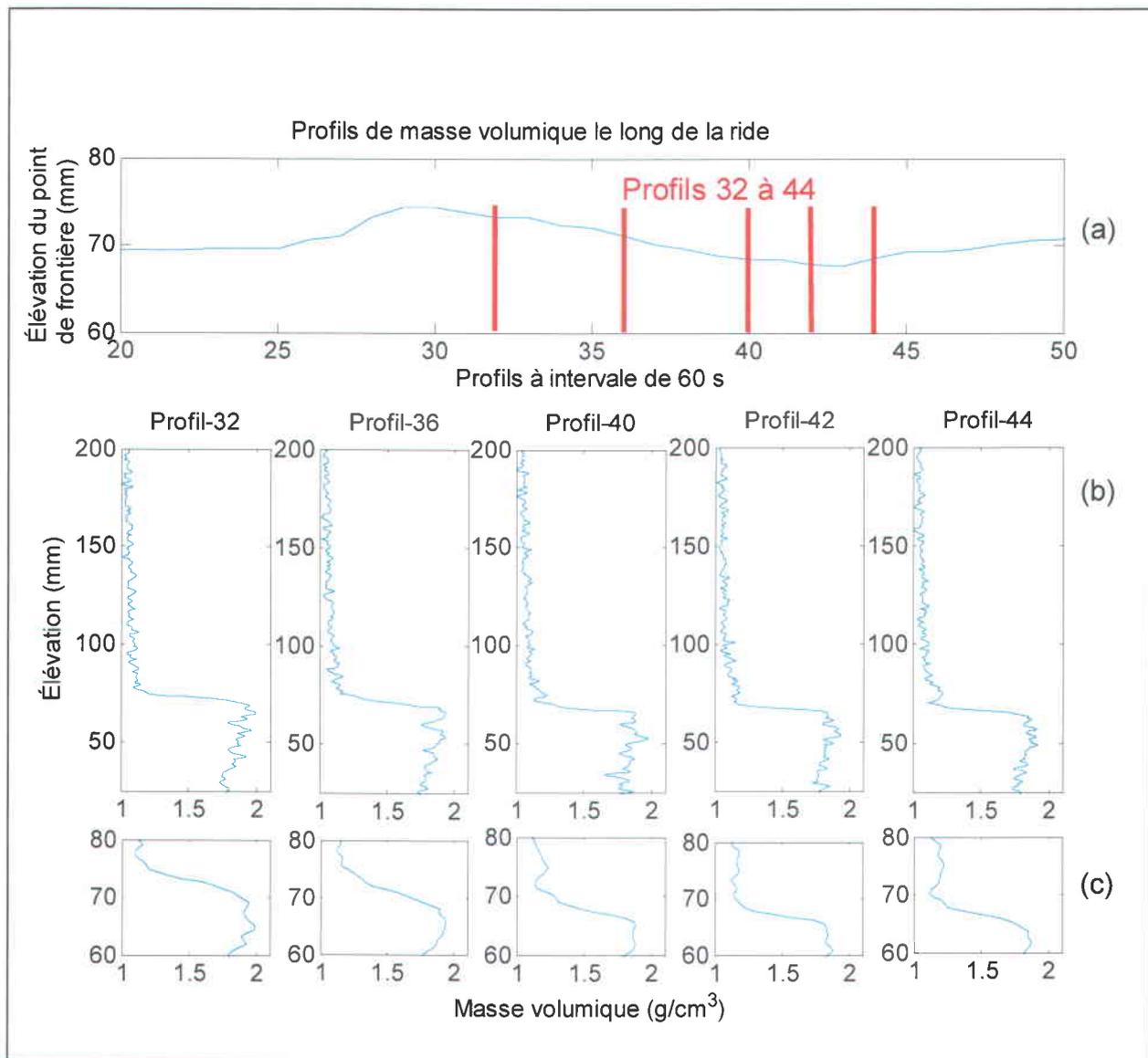
Les colonnes d'eau des profils 32 à 40 présentent des courbes de concentration du transport en suspension de forme aussi linéaire évoluant vers une forme aussi logarithmique renfermant des parties non homogènes, et une diminution de la concentration (Fig. 73 ; Profil-40). Le profil suivant (Profil-42) n'est plus de forme logarithmique en raison d'une densité constante à l'approche du point de frontière. Cette constance de la densité entre 80.7 et 70.8 mm se termine avec un point de frontière à  $1.146 \text{ g cm}^{-3}$  (Tab. 12). Le Profil-44 présente une diminution de la densité de la base de la couche de transport en suspension de  $1.223 \text{ g cm}^{-3}$ . Cette diminution est d'une épaisseur de 4.72 mm, mais n'est pas représentative d'une diminution rapide ou

abrupte (Tab. 12). Enfin, le Profil-40 renferme lui aussi une diminution de la densité mais elle n'est pas associée au même modèle ou à la même forme de transition entre la suspension et le charriage.

#### *Préambule à la discussion*

Comme dans le cas de l'expérience 1, les profils situés sur le dos de la ride, sur le flanc d'érosion, présentent des différences de densité entre les points de frontière et les points de concentration maximale de  $0.840$  à  $0.700 \text{ g cm}^{-3}$  (vitesse de courant de  $U = 31.0 \text{ cm s}^{-1}$ ) comparativement à des valeurs se situant entre  $1.063$  et  $0.774 \text{ g cm}^{-3}$  pour une vitesse de courant de  $U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}$ . Comme précédemment, les formes des sédiments internes à la couche inférieure de transport par charriage semblent moins affectées (présence de variation) lorsque le courant est plus faible. Aussi, la densité moyenne de la couche inférieure de transport par charriage a une valeur située entre  $1.82$  à  $1.84 \text{ g cm}^{-3}$  et un écart-type variant de  $0.049$  à  $0.067 \text{ g cm}^{-3}$  indiquant un mobilité comparable. La plus grande valeur est située sur le profil le plus proche de la partie sommitale de la ride, Profil-32.

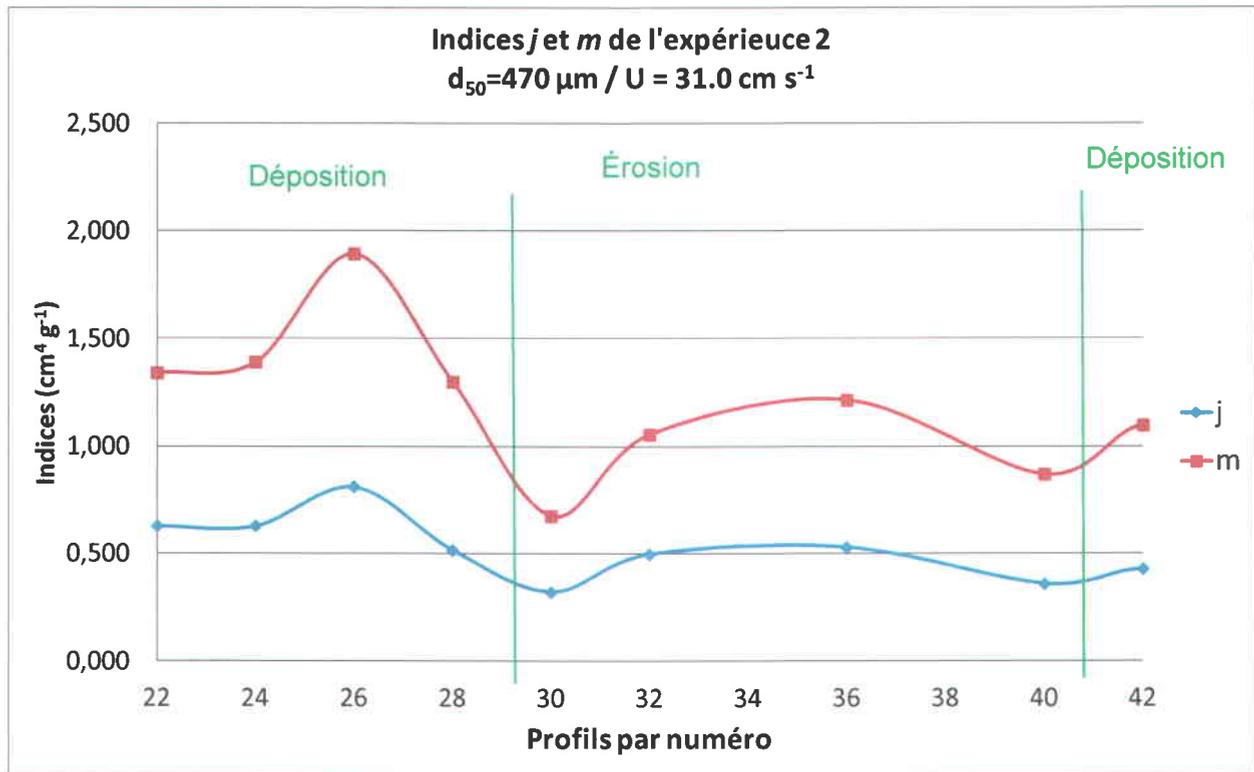
La figure 74 présente les indices  $j$  et  $m$  en fonction des numéros de profils, ce qui permet d'observer une augmentation des valeurs à l'intérieure même des zones de la ride. Ainsi, la valeur la plus basse est localisée sur le sommet de la ride et la valeur la plus importante est située dans le flanc de progradation, dans la zone d'avalanches. Une seconde augmentation est aussi présente au Profil-36, dans la zone d'érosion. Donc, dans le passage entre la déposition et l'érosion, il y a une diminution des deux indices. Il y a aussi une similarité entre le milieu de la déposition (près de la zone d'avalanches) et le milieu de l'érosion (près du point de rattachement du fluide, qui est suivie du vortex (base du flanc d'érosion)). Ces courbes sont plus cohérentes que celle de l'expérience 1 en raison de l'échelle de temps.



**Figure 73.** Les profils de densité 32 à 44 de l'expérience 2 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 31.0$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage.

**Tableau 12 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 32 à 44 de l'expérience 2. La vitesse du fluide utilisée est de  $31.0 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre  $d_{50}$  est de  $0.470 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densités entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.**

a	Flanc d'érosion Profil-32		Flanc d'érosion Profil-36		Flanc d'érosion Profil-40		Flanc d'érosion Profil-42		Flanc d'érosion Profil-44		
	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	
	<b>POINTS / <math>d_{50}=470 \mu\text{m}</math> / <math>U = 31.0 \text{ cm s}^{-1}</math></b>										
Limite supérieure de transport en suspension	126,80	1,112	129,20	1,050	136,30	1,064	134,50	1,062	133,90	1,067	
Limite supérieure de la sous-couche fluide	-	-	-	-	74,93	1,229	-	-	75,52	1,223	
Point de frontière	77,88	1,102	75,52	1,154	71,98	1,133	70,80	1,146	70,80	1,125	
Point d'inflexion	-	-	68,44	1,859	-	-	65,49	1,818	65,49	1,715	
Point de densité maximale	69,03	1,942	66,08	1,932	65,49	1,880	63,13	1,846	63,72	1,852	
Limite inférieure de basse densité	67,26	1,906	59,59	1,756	59,59	1,769	62,54	1,827	62,54	1,847	
b	Flanc d'érosion Profil-32		Flanc d'érosion Profil-36		Flanc d'érosion Profil-40		Flanc d'érosion Profil-42		Flanc d'érosion Profil-44		
	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	
	<b>COUCHES / <math>d_{50}=470 \mu\text{m}</math> / <math>U = 31.0 \text{ cm s}^{-1}</math></b>										
Couche de transport en suspension	48,92	-	53,68	-	64,32	-	63,70	-	63,10	-	
Sous-couche fluide	-	-	-	-	2,95	-	-	-	4,72	-	
Couche supérieure du transport par charriage	8,85	0,840	9,44	0,778	6,49	0,747	7,67	0,700	7,08	0,727	
Couche intermédiaire du transport par charriage	1,77	0,036	6,49	0,176	5,90	0,111	0,59	0,019	1,18	0,005	
Sous-couche d'inflexion	42,48	-	34,81	-	34,81	-	37,76	-	37,76	-	
Couche inférieure du transport par charriage	-	-	2,36	-	-	-	2,36	-	1,77	-	
c	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	
	<b>Statistiques</b>										
	Couche supérieure du transport par charriage										
$m$ : rapport entre l'épaisseur et $\Delta\rho$	1,79	0,49	1,79	0,53	1,82	0,36	1,8	0,43	1,84	0,38	
$j$ : rapport entre l'épaisseur et $\rho$ moy	$\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$		$\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$		$\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$		$\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$		$\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$		
	1,054		1,213		0,869		1,096		0,974		
d	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	
	<b>Statistiques</b>										
	Couche inférieure du transport par charriage										
	1,84	0,0674	1,84	0,0552	1,83	0,0586	1,82	0,0507	1,83	0,0485	



**Figure 74.** Représentation graphique des indices  $j$  et  $m$  de l'expérience 2. L'évolution des indices est présentée en fonction des numéros de profils. L'indice  $j$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la variation de la densité dans la couche. L'indice  $m$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la densité moyenne dans la couche.

### 3.2.3 Expérience 3

L'expérience 3 (Fig. 75) est réalisée avec une granulométrie plus fine ( $d_{50} = 0.250$  mm), mais la vitesse du courant ( $U = 31.1$  cm s<sup>-1</sup>) est la même qu'à l'expérience 2. Le lit sédimentaire a été remplacé et aplani entre les expériences 2 et 3. Enfin, les intervalles de temps entre les mesures (profils) sont de 30 secondes.

Les colonnes d'eau des profils 10 à 40 présentent des couches de transport en suspension de forme logarithmique qui possède, progressivement, de parties non homogènes indiquées par une diminution de concentration. Toutes fois, les diminutions apparaissant dans les profils 20 à 40 ne présentent pas de faible valeur de concentration au point de frontière 1.176 à 1.196 g cm<sup>-3</sup> et ne sont pas similaires à celles précédemment mesurées à l'approche des parties sommitales de la ride (Tab. 13). En effet, les diminutions mesurées ici sont localisées dans la section d'érosion de la ride. Le dernier profil (Profil-50) est aussi de forme logarithmique, mais il n'y a pas de diminution clairement définie. Les couches de transport en suspension de ces profils sont d'épaisseurs variant de 28.32 mm (Profil-50) jusqu'à 30.1 mm (Profil-40).

#### *Préambule à la discussion*

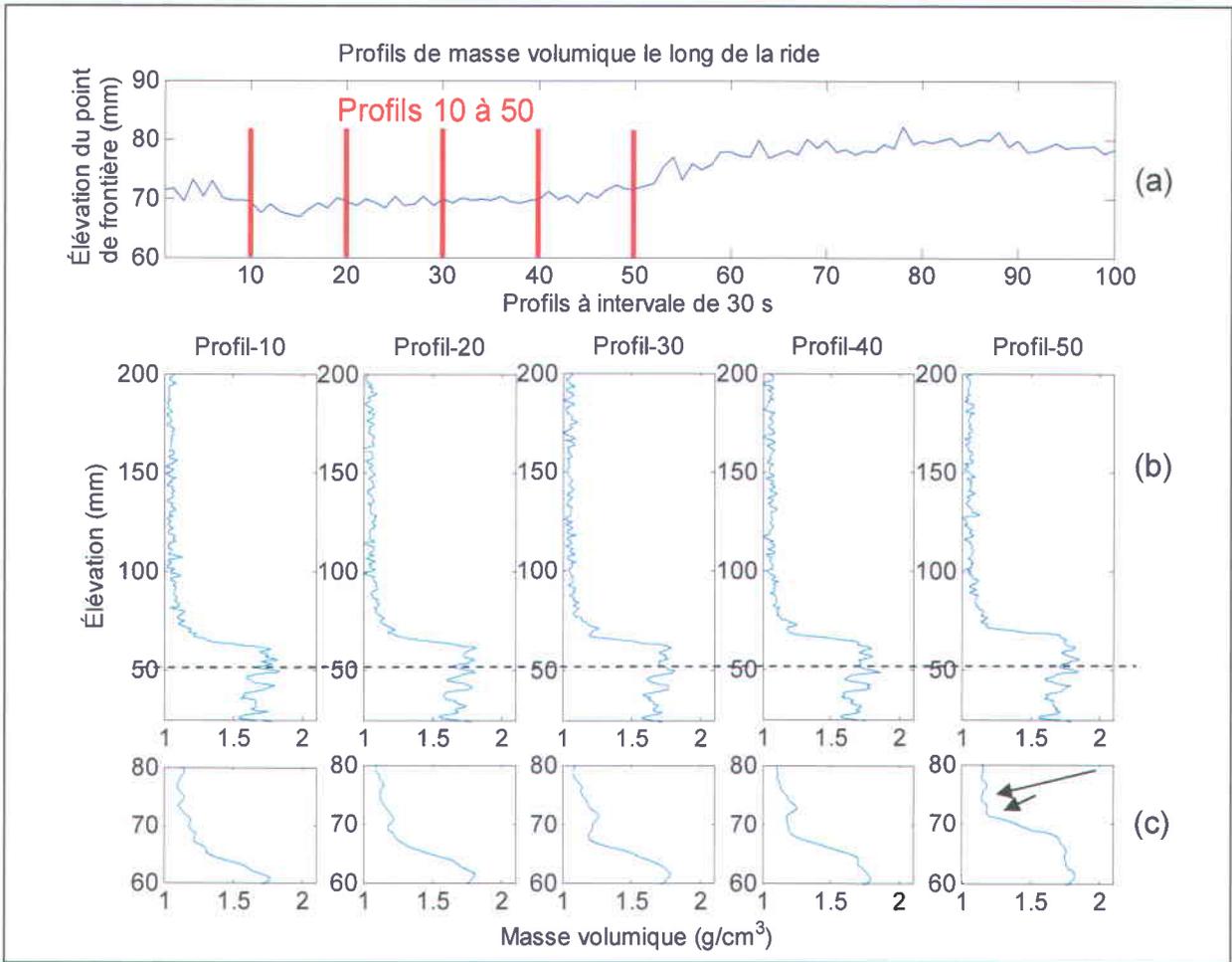
Les profils 10 à 30 présentent des pentes de transition similaires à celle des profils précédemment mesurées à la base du flanc d'érosion. De plus, les densités maximales en fin de transition sont de valeurs similaires à celles mesurées lors de l'expérience 2, soient des densités ou concentration respectivement de 1.767, 1.816 et 1.791 g cm<sup>-3</sup>. Ainsi, pour une même vitesse de courant, une corrélation apparaît entre les densités maximales de la couche supérieure de transport par charriage et seront définis plus loin. Comme dans les expériences précédentes, la section de déposition du flanc de progradation présente des transitions montrant des discontinuités<sup>4</sup> (Fig. 75 ; flèche).

---

<sup>4</sup> Dans cette étude, la transition ou le passage entre le point de frontière et le point de densité maximale est faite rapidement (sur une faible épaisseur). Il y a discontinuité, lorsqu'à l'approche du point de densité maximale, l'épaisseur de la transition augmente soudainement entraînant le point de densité maximale plus profondément dans la ride.

Dans cette expérience, la couche intermédiaire de transport par charriage ne semble pas présenter de corrélation en relation avec la position sur la ride.

La densité moyenne dans la couche inférieure de transport par charriage est située entre 1.69 et 1.72 g cm<sup>-3</sup> et l'écart-type des valeurs variant entre 0.059 et 0.076 g cm<sup>-3</sup>. L'écart-type de ces profils tend à diminuer lors de la progression de la ride et durant le phénomène de compaction qui s'en suit. De plus, (Fig. 75 b) ; pointillé) l'absence de déformation du lit sédimentaire existe sous la ligne pointillé. Ce phénomène a été observé avec une granulométrie plus grande ( $d_{50} = 0.470$  mm) et sous une même vitesse de courant.



**Figure 75.** Les profils de densité 10 à 50 de l'expérience 3 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.250 \text{ mm}$  et  $U = 31.1 \text{ cm s}^{-1}$ . (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Les flèches indiquent des transitions à l'approche du point de frontière.

**Tableau 13 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 10 à 50 de l'expérience 3. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 31.1 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.250 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.**

a	Flanc d'érosion Profil-10		Flanc d'érosion Profil-20		Flanc d'érosion Profil-30		Flanc d'érosion Profil-40		Flanc d'érosion Profil-50	
	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
<b>POINTS / <math>d_{50}=250 \mu\text{m}</math> / <math>U = 31.1 \text{ cm s}^{-1}</math></b>										
Limite supérieure de transport en suspension	99,12	1,051	99,71	1,046	96,17	1,069	100,90	1,075	100,30	1,049
Limite supérieure de la sous-couche fluide	-	-	-	-	-	-	72,57	1,260	-	-
Point de frontière	69,03	1,209	69,62	1,176	67,26	1,196	70,80	1,177	71,98	1,177
Point d'inflexion	-	-	63,72	1,639	-	-	64,31	1,706	67,85	1,694
Point de densité maximale	60,77	1,767	63,36	1,816	61,36	1,791	60,77	1,794	65,49	1,762
Limite inférieure de basse densité	59,00	1,699	59,00	1,731	59,59	1,716	59,59	1,729	64,31	1,745
b	Flanc d'érosion Profil-10		Flanc d'érosion Profil-20		Flanc d'érosion Profil-30		Flanc d'érosion Profil-40		Flanc d'érosion Profil-50	
	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
<b>COUCHES / <math>d_{50}=250 \mu\text{m}</math> / <math>U = 31.1 \text{ cm s}^{-1}</math></b>										
Couche de transport en suspension	30,09	-	30,09	-	28,91	-	30,10	-	28,32	-
Sous-couche fluide	-	-	-	-	-	-	1,77	-	-	-
Couche supérieure du transport par charriage	8,26	0,558	6,26	0,640	5,90	0,595	10,03	0,617	6,49	0,585
Couche intermédiaire du transport par charriage	1,77	0,068	4,36	0,085	1,77	0,075	1,18	0,065	1,18	0,017
Sous-couche d'inflexion	30,68	-	30,68	-	31,27	-	31,27	-	35,99	-
Couche inférieure du transport par charriage	-	-	0,36	-	-	-	3,54	-	2,36	-
c	$\rho$ moy	$j$								
	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )
<b>Statistiques</b>										
Couche supérieure du transport par charriage	1,68	0,49	1,72	0,36	1,66	0,36	1,71	0,59	1,67	0,39
<i>m: rapport entre l'épaisseur et <math>\Delta\rho</math></i>										
	$m$		$m$		$m$		$m$		$m$	
	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	
	1,480		0,978		0,992		1,626		1,109	
<i>j: rapport entre l'épaisseur et <math>\rho</math> moy</i>										
d	$\rho$ moy	$\sigma$								
	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )
<b>Statistiques</b>										
Couche inférieure du transport par charriage	1,69	0,0756	1,69	0,0720	1,70	0,0591	1,70	0,0700	1,72	0,0704

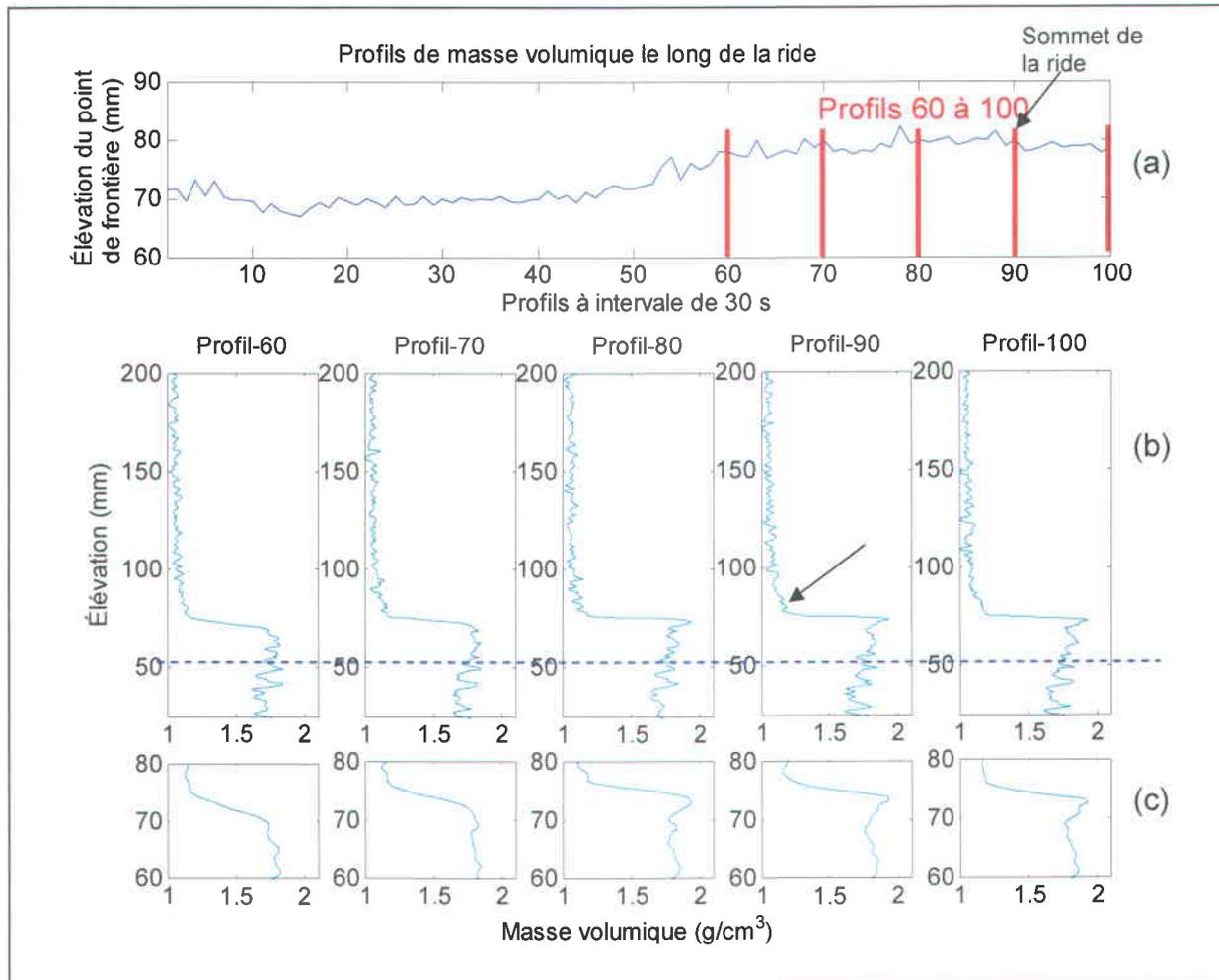
Les colonnes d'eau des profils 60 à 100, au flanc d'érosion, renferment des profils de transport en suspension de type logarithmique où apparaissent des parties non homogènes devenant peu significatives aux profils 70 à 90. Seul le Profil-90 semble contenir un début de diminution à l'approche du point de frontière ( $1.151 \text{ g cm}^{-3}$ ), d'une épaisseur de 1.18 mm et d'une valeur de densité avant la transition de  $1.195 \text{ g cm}^{-3}$  (Fig. 76 ; flèche). De plus, l'épaisseur de la couche de transport en suspension du Profil-60 (28.92 mm) est la plus élevée comparativement aux profils 70 à 100, qui présentent des épaisseurs variant entre 23.05 et 25.94 mm (Tab. 14).

Les profils 60 et 70 présentent aussi des transitions de la couche supérieure de transport par charriage ayant des discontinuités. Ces profils dans les couches supérieures de transport par charriage, dans la zone de déposition, ont une épaisseur de 8.85 et 10.03 mm pour des densités variant de 1.73 à 1.75 g cm<sup>-3</sup>. Les profils 80 à 100, mesurés durant le passage de la partie sommitale de la ride et sur le milieu du flanc d'érosion, présentent des pentes de transition aplaties avec des densités au point de frontière respectives de 1.106, 1.151 et 1.162 g cm<sup>-3</sup>. Ces densités sont associées aux points de densité maximale (1.937, 1.937 et 1.931 g cm<sup>-3</sup>) et ont des épaisseurs respectives de 6.49, 5.31 et 6.49 mm.

#### *Préambule à la discussion*

La couche inférieure de transport par charriage à une densité moyenne plus élevée que sur les profils 10 à 50 (Fig. 75) mais, tout de même inférieure aux résultats des précédentes expériences, variant entre 1.74 et 1.76 g cm<sup>-3</sup> et leurs écart-type variant entre 0.061 et 0.067 g cm<sup>-3</sup>. La figure 76b (ligne pointillée) met en évidence l'absence de variation de densité à l'intérieur du lit sédimentaire, phénomène observé sous la ligne pointillée (à 52 mm). Au-dessus de cette ligne, le lit sédimentaire est en construction.

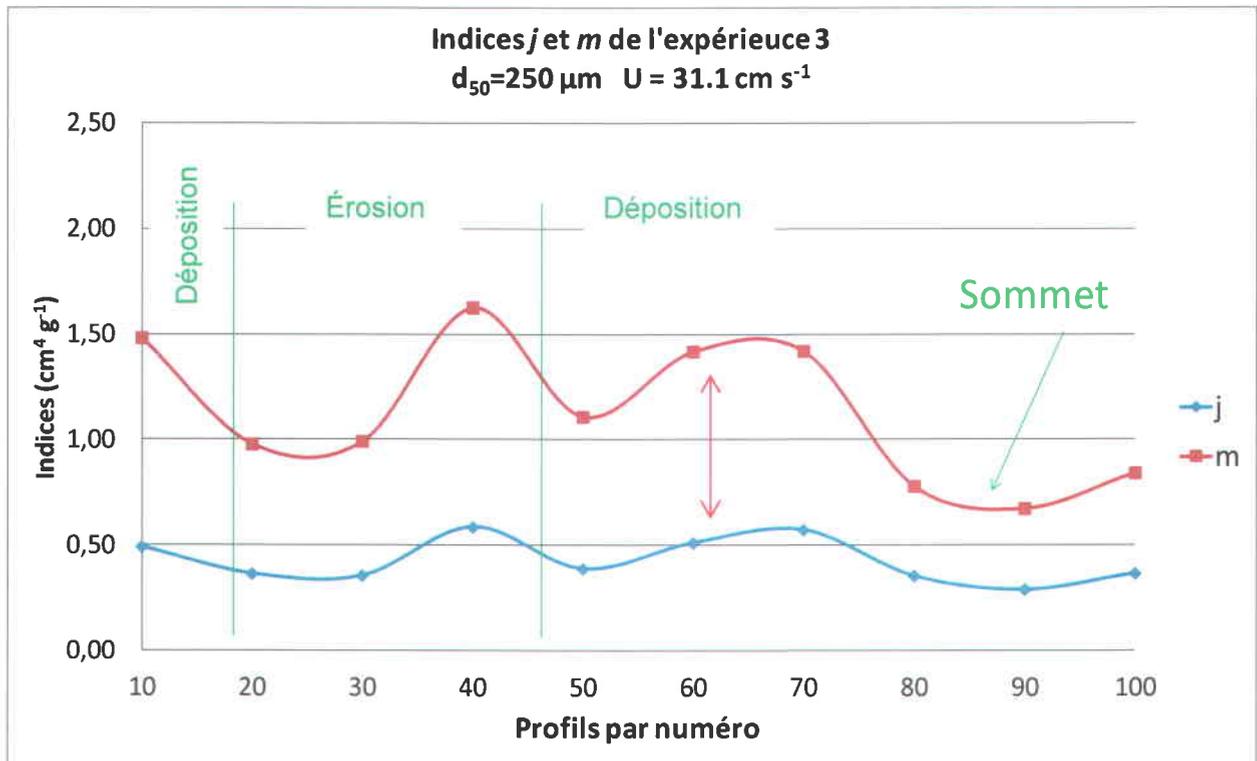
Les indices  $j$  et  $m$  permettent d'observer une augmentation des valeurs à l'intérieure même des zones de la ride (Figure 77). La valeur la plus basse de  $m$  est localisée sur le sommet de la ride et les valeurs les plus importantes sont situées dans le flanc de progradation, dans la zone d'avalanche et dans la partie basse du flanc d'érosion. Pour cette expérience, contrairement au précédente, la valeur de l'indice  $j$  demeure, sans fluctuation importante, au environ de 0.47 mais certaines parties sont décalées (Figure 77 ; flèche rouge)



**Figure 76.** Les profils de densité 60 à 100 de l'expérience 3 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.250$  mm et  $U = 31.1$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. La flèche indique un point de frontière avec une régression typique du sommet de la ride. La ligne pointiller délimite la zone active (dessus) de la zone inactive.

**Tableau 14 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 60 à 100 de l'expérience 3. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 31.1 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.250 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.**

a	Flanc d'érosion Profil-60		Flanc d'érosion Profil-70		Flanc de progradation Profil-80		Flanc de progradation Profil-90		Flanc de progradation Profil-100	
	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
<b>POINTS / <math>d_{50}=250 \mu\text{m}</math> / <math>U = 31.1 \text{ cm s}^{-1}</math></b>										
Limite supérieure de transport en suspension	106,80	1,099	105,00	1,089	102,70	1,070	102,10	1,093	105,00	1,068
Limite supérieure de la sous-couche fluide	-	-	-	-	-	-	79,65	1,195	-	-
Point de frontière	77,88	1,124	79,06	1,119	79,65	1,106	78,47	1,151	79,06	1,162
Point d'inflexion	-	-	71,98	1,748	-	-	-	-	-	-
Point de densité maximale	69,03	1,748	69,03	1,825	73,16	1,937	73,16	1,937	72,57	1,931
Limite inférieure de basse densité	67,26	1,732	67,26	1,772	70,21	1,768	67,85	1,758	71,39	1,867
b	Flanc d'érosion Profil-60		Flanc d'érosion Profil-70		Flanc de progradation Profil-80		Flanc de progradation Profil-90		Flanc de progradation Profil-100	
	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
<b>COUCHES / <math>d_{50}=250 \mu\text{m}</math> / <math>U = 31.1 \text{ cm s}^{-1}</math></b>										
Couche de transport en suspension	28,92	-	25,94	-	23,05	-	23,63	-	25,94	-
Sous-couche fluide	-	-	-	-	-	-	1,18	-	-	-
Couche supérieure du transport par charriage	8,85	0,624	10,03	0,706	6,49	0,831	5,31	0,786	6,49	0,769
Couche intermédiaire du transport par charriage	1,77	0,016	1,77	0,053	2,95	0,169	5,31	0,179	1,18	0,064
Sous-couche d'inflexion	38,94	-	38,94	-	41,89	-	39,53	-	43,07	-
Couche inférieure du transport par charriage	-	-	2,95	-	-	-	-	-	-	-
c	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$
	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )
	Couche supérieure du transport par charriage									
	1,73	0,51	1,75	0,57	1,83	0,35	1,83	0,29	1,77	0,37
d	$m$		$m$		$m$		$m$		$m$	
	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	
<i>m</i> : rapport entre l'épaisseur et $\Delta\rho$ <i>j</i> : rapport entre l'épaisseur et $\rho$ moy										
	1,4183		1,4207		0,7810		0,6756		0,84	
d	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$
	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )
Couche inférieure du transport par charriage										
	1,74	0,0628	1,75	0,0605	1,76	0,0625	1,75	0,0644	1,75	0,0665



**Figure 77.** Représentation graphique des indices  $j$  et  $m$  de l'expérience 3. L'évolution des indices est présentée en fonction des numéros de profils. L'indice  $j$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la variation de la densité dans la couche. L'indice  $m$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la densité moyenne dans la couche.

### 3.2.4 Expérience 4

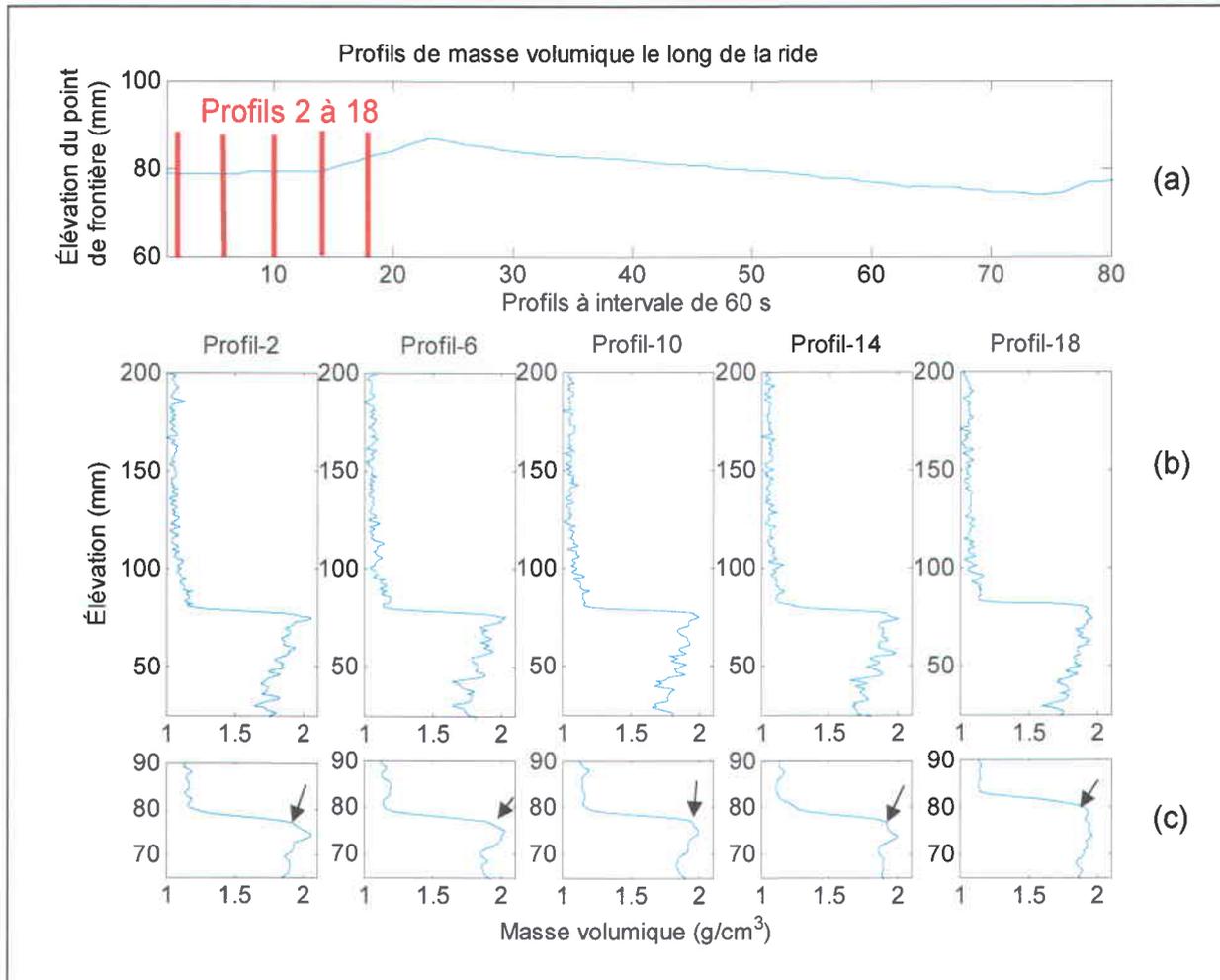
L'expérience 4 (Fig. 78-80) est réalisée avec un sédiment dont la granulométrie est de  $d_{50} = 0.200$  mm, et la vitesse du courant de  $U = 34.7$  cm s<sup>-1</sup>. Cette granulométrie correspond donc à un sable moyen dont le diamètre se situe entre 0.470 mm et 0.120 mm. Les intervalles de temps entre les mesures sont de 60 secondes.

Les colonnes d'eau des profils 2 à 14 (Fig. 78) possèdent une couche de transport en suspension présentant une forme de régression et un changement rapide de la densité au point de frontière. Le dernier profil (Profil-18) est de même forme, mais il n'y a pas de diminution de concentration visible à l'approche du point de frontière. La diminution apparaissant dans le Profil-6 présente une valeur de faible densité au point de frontière  $1.108$  g cm<sup>-3</sup>, comparativement au Profil-14 qui présente une densité à la frontière de  $1.142$  g cm<sup>-3</sup> (Tab. 15). Ces diminutions des valeurs ne sont pas similaires ainsi que leur position sur la ride. Les diminutions mesurées sont localisées dans la section d'érosion (Profil-6) et dans la section de déposition (Profil-14) de la ride. La couche de transport en suspension de ces profils a une épaisseur variant de 34.77 mm (Profil-2) jusqu'à 41.26 mm (Profils 6, 10 et 18).

Les quatre premiers profils sont de forme similaire et possèdent des densités similaires ( $\sim 1.15$  g cm<sup>-3</sup>), au point de frontière à l'exception du Profil-2 dont la densité maximale est plus élevée. La densité maximale observée sur les profils 2 à 18 tend à diminuer, passant de  $2.059$  g cm<sup>-3</sup> à  $1,927$  g cm<sup>-3</sup>. Aussi (Fig. 78, pointillé), la densité maximale tend à disparaître au fur et à mesure de la progradation de la ride. Sous ce point de densité maximale, la différence de densité et l'épaisseur de la couche intermédiaire de transport par charriage fluctuent (Tab. 15 b) et ne peuvent pas être corrélées à la forme du profil ou à sa position sur la ride.

Un point d'inflexion présent dans la transition de la couche supérieure de transport par charriage est localisé pour les quatre premiers profils à une élévation de 76.7 mm avec une densité moyenne de  $1.922$  g cm<sup>-3</sup> (écart-type de  $0.024$  g cm<sup>-3</sup>). La couche inférieure de transport par charriage, qui ne semble pas conserver la même forme au fil du temps, possède tout de même une densité moyenne de  $1.79$  g cm<sup>-3</sup> (écart-type des profils  $\sim 0.102$  g cm<sup>-3</sup>) avec un écart-type des densités moyennes entre les profils de  $0.009$  g

$\text{cm}^{-3}$ . Le point d'inflexion (Fig. 78 ; flèches) situé à l'approche du point de densité maximale, tend à augmenter sous l'effet de la compaction formée par des avalanches s'approchant plus du domaine continue que du domaine discret.



**Figure 78.** Les profils de densité 2 à 18 de l'expérience 4 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.200 \text{ mm}$  et  $U = 34.7 \text{ cm s}^{-1}$ . (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Les flèches pointent l'évolution du point d'inflexion.

**Tableau 15 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 2 à 18 de l'expérience 4. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 34.7 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.200 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.**

a	Flanc d'érosion Profil-2		Flanc d'érosion Profil-6		Flanc d'érosion Profil-10		Flanc de progradation Profil-14		Flanc de progradation Profil-18	
	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
POINTS / $d_{50}=200 \mu\text{m}$ / $U = 34.7 \text{ cm s}^{-1}$										
Limite supérieure de transport en suspension	115,60	1,047	121,50	1,071	121,50	1,070	120,90	1,100	124,50	1,102
Limite supérieure de la sous-couche fluide	-	-	-	-	-	-	87,32	1,169	-	-
Point de frontière	80,83	1,150	80,24	1,142	80,24	1,165	84,37	1,108	83,19	1,145
Point d'inflexion	76,70	1,916	76,70	1,897	76,70	1,955	76,70	1,919	-	-
Point de densité maximale	74,34	2,059	74,93	2,028	74,93	1,996	73,75	1,998	79,06	1,927
Limite inférieure de basse densité	71,98	1,926	70,21	1,849	73,16	1,937	70,80	1,859	77,29	1,911
b	Flanc d'érosion Profil-2		Flanc d'érosion Profil-6		Flanc d'érosion Profil-10		Flanc de progradation Profil-14		Flanc de progradation Profil-18	
	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
COUCHES / $d_{50}=200 \mu\text{m}$ / $U = 34.7 \text{ cm s}^{-1}$										
Couche de transport en suspension	34,77	-	41,26	-	41,26	-	36,53	-	41,31	-
Sous-couche fluide	-	-	-	-	-	-	2,95	-	-	-
Couche supérieure du transport par charriage	6,49	0,909	5,31	0,886	5,31	0,831	10,62	0,890	4,13	0,782
Couche intermédiaire du transport par charriage	2,36	0,133	4,72	0,179	1,77	0,059	2,95	0,139	1,77	0,016
Sous-couche d'inflexion	43,66	-	41,89	-	44,84	-	42,48	-	48,97	-
Couche inférieure du transport par charriage	2,36	-	1,77	-	1,77	-	2,95	-	-	-
c	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$
	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )
	Couche supérieure du transport par charriage	1,96	0,33	1,95	0,27	1,83	0,29	1,90	0,56	1,88
<i>m</i> : rapport entre l'épaisseur et $\Delta\rho$	$m$		$m$		$m$		$m$		$m$	
<i>j</i> : rapport entre l'épaisseur et $\rho$ moy	( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	
	0,714		0,599		0,639		1,193		0,528	
d	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$
	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )
Statistiques										
Couche inférieure du transport par charriage	1,79	0,1029	1,79	0,0946	1,80	0,1070	1,80	0,1008	1,81	0,1071

Les colonnes d'eau des Profil-23 et Profil-55 (Fig. 79) présentent une couche de transport en suspension de forme linéaire, avec une densité à la base du profil de concentration de 1.161 et 1.191  $\text{g cm}^{-3}$  et renfermant une diminution de la concentration au point de frontière avec des valeurs respectives de 1.097 et 1.141  $\text{g cm}^{-3}$  (Tab. 16). Le profil suivant (Profil-45) est logarithmique, mais avec une légère diminution au point de frontière (1.215  $\text{g cm}^{-3}$ ), et une concentration de sédiments en suspension supérieure aux valeurs précédemment mesurées. La diminution s'atténue entre le Profil-23 et le Profil-45, pour disparaître au Profil-55 et au Profil-65. Ces deux derniers profils présentent des formes logarithmiques mais les fluctuations augmentent à

l'approche (dans le temps) du Profil-65. L'épaisseur de la couche créée par la diminution de densité à l'approche du point de frontière diminue de 4.13 mm au Profil-23 à 1.18 mm au Profil-45.

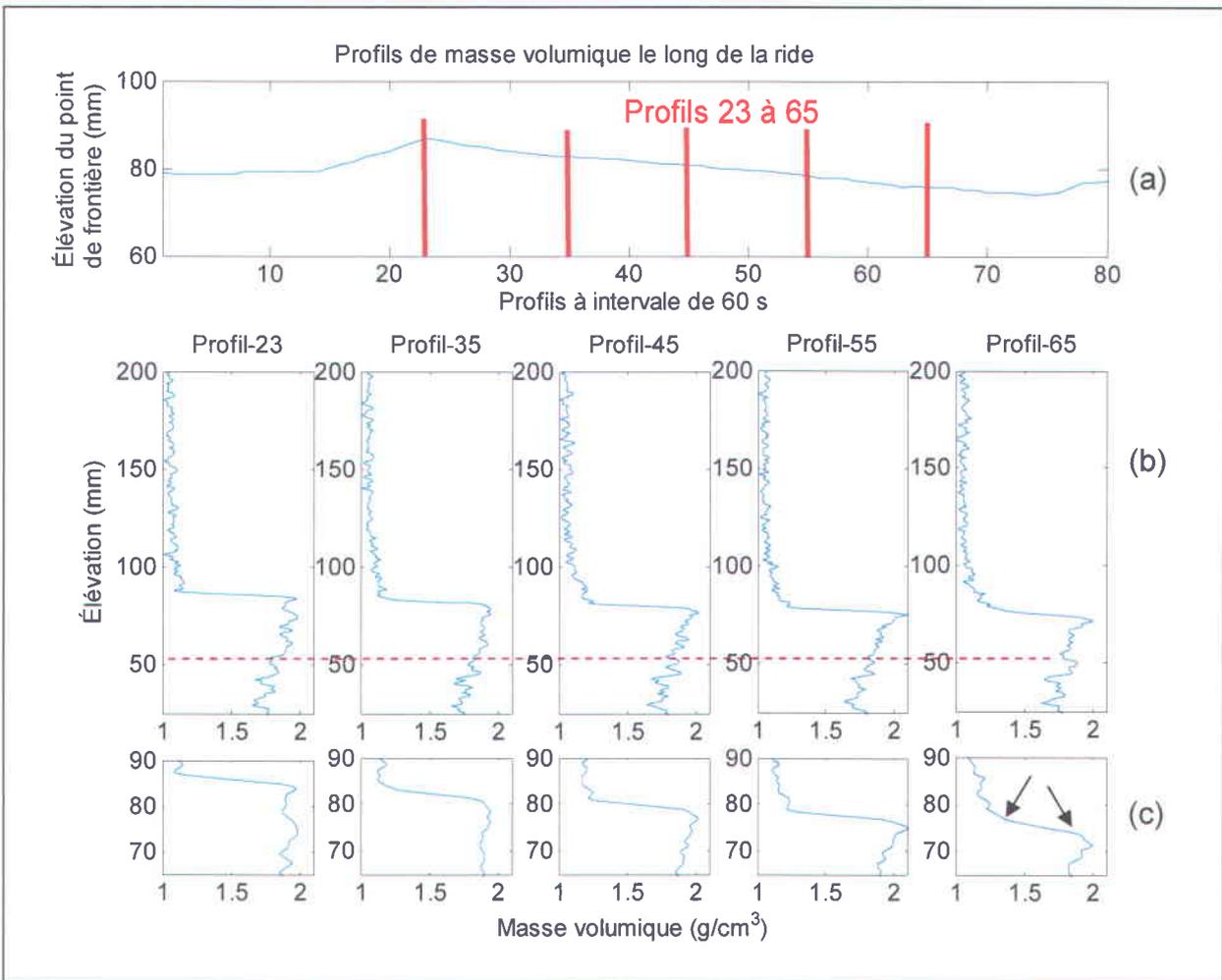
Le Profil- 23 est située au sommet de la ride et les profils 35 et 45 sont situés sur le dos de la ride. Ils montrent tous une diminution<sup>5</sup> de la densité au point de frontière. Ces valeurs de densité au point de frontière augmentent de 1.097 à 1.215 g cm<sup>-3</sup> et sont associées à une augmentation de la densité maximale de 1.937 à 2.024 g cm<sup>-3</sup>.

La transition de densité du Profil-55 est particulière et se termine avec une densité de 2.089 g cm<sup>-3</sup>, densité maximale la plus importante de l'ensemble des profils. C'est à cette position que se situe le point de rattachement du fluide. Il est aussi observé, conséquemment aux profils de la couche de transport en suspension, une augmentation dans la pente de la transition. Elle est aplatie au Profil-23 et devient abrupte au Profil-65. Il y a aussi des discontinuités dans la transition de la pente du Profil-65 (Fig. 79 c ; flèche).

Sur le haut du flanc d'érosion (Fig. 79 b ; pointillé), la couche inférieure de transport par charriage montre une conservation de la forme du lit qui est présente seulement sous les 50 mm. Par contre, la densité moyenne de la couche diminue de 1.81 à 1.77 g cm<sup>-3</sup> et l'écart-type dans les couches demeure autour de 0.105 g cm<sup>-3</sup> avec la plus grande valeur (0.116 g cm<sup>-3</sup>) au Profil-55. Enfin, les profils 45 à 65, avec l'augmentation de la densité maximale, tendent à dessiner des profils de lit sédimentaire de forme exponentielle.

---

<sup>5</sup> La diminution est localisée à la base du profil de concentration. Cette diminution caractérise une réduction soudaine et temporaire de la valeur de la densité à l'approche du point où la transition devient définitive.



**Figure 79.** Les profils de densité 23 à 65 de l'expérience 4 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.200 \text{ mm}$  et  $U = 34.7 \text{ cm s}^{-1}$ . (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Les flèches indiquent les discontinuités dans la transition de la couche supérieure de transport par charriage.

**Tableau 16 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 23 à 65 de l'expérience 4. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 34.7 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.200 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.**

a	Flanc d'érosion Profil-23		Flanc d'érosion Profil-35		Flanc d'érosion Profil-45		Flanc d'érosion Profil-55		Flanc d'érosion Profil-65	
	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
<b>POINTS / <math>d_{50}=200 \mu\text{m} / U = 34.7 \text{ cm s}^{-1}</math></b>										
Limite supérieure de transport en suspension	119,20	1,088	125,10	1,080	122,70	1,076	123,90	1,058	122,10	1,075
Limite supérieure de la sous-couche fluide	92,04	1,160	88,50	1,191	82,60	1,254	-	-	-	-
Point de frontière	87,91	1,097	86,14	1,141	81,42	1,215	79,06	1,216	79,65	1,241
Point d'inflexion	-	-	-	-	78,47	1,957	-	-	73,75	1,905
Point de densité maximale	83,78	1,937	78,47	1,946	76,70	2,024	75,52	2,089	71,39	2,002
Limite inférieure de basse densité	79,06	1,872	77,29	1,923	75,52	1,959	71,39	1,992	69,62	1,916
b	Flanc d'érosion Profil-23		Flanc d'érosion Profil-35		Flanc d'érosion Profil-45		Flanc d'érosion Profil-55		Flanc d'érosion Profil-65	
	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
<b>COUCHES / <math>d_{50}=200 \mu\text{m} / U = 34.7 \text{ cm s}^{-1}</math></b>										
Couche de transport en suspension	31,29	-	38,96	-	41,28	-	44,84	-	42,45	-
Sous-couche fluide	4,13	-	2,36	-	1,18	-	-	-	-	-
Couche supérieure du transport par charriage	4,13	0,840	7,67	0,805	4,72	0,809	3,54	0,873	8,26	0,761
Couche intermédiaire du transport par charriage	4,72	0,065	1,18	0,023	1,18	0,065	4,13	0,097	1,77	0,086
Sous-couche d'inflexion	50,74	-	48,97	-	47,20	-	43,07	-	41,30	-
Couche inférieure du transport par charriage	-	-	-	-	1,77	-	-	-	2,36	-
c	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$
	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )
	Couche supérieure du transport par charriage									
<i>m: rapport entre l'épaisseur et <math>\Delta\rho</math></i>										
<i>j: rapport entre l'épaisseur et <math>\rho</math> moy</i>										
Statistiques										
Couche inférieure du transport par charriage										
d	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$
	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )
Statistiques										
Couche inférieure du transport par charriage										

Les colonnes d'eau du Profil-66 et du Profil-76 (Fig. 80) présentent une couche de transport en suspension de type logarithmique, excepté une diminution de la densité au point de frontière, seul le Profil-74 est différent. Il présente une cassure à  $90^\circ$  dans la forme du profil de concentration, à l'approche du point de frontière (Fig. 80; Profil-74; flèche). Cette cassure ne présente pas de diminution de la densité.

Les profils, quoique présentant quelques fluctuations (Profils 66 à 70), sont relativement similaires, tel ceux à la base du flanc d'érosion. L'épaisseur de la couche de transport en suspension augmente des profils 66 (39.57 mm) à 70 (46.01 mm) pour ensuite

diminuer à 41.30 mm (Profil-74) et 36.60 mm (Profil-76) et ne présentent pas de diminution de la densité à l'approche du point de frontière (Tab. 17).

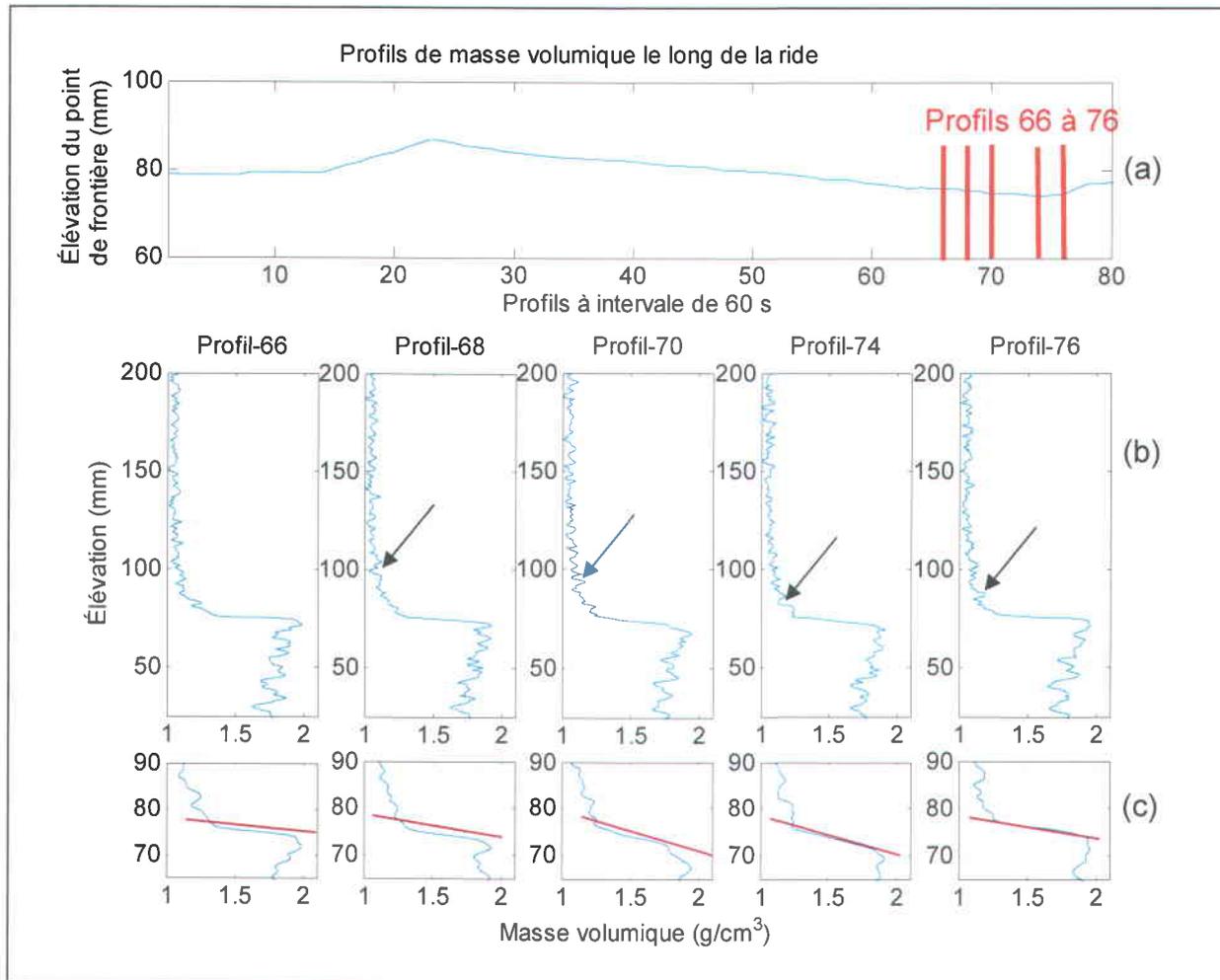
La transition de la densité présente une augmentation de la pente de transition suivie d'une diminution. Le changement s'opère lors du passage du point le plus bas du flanc d'érosion, sous le vortex.

#### *Préambule à la discussion*

Pour les profils 66 à 74, une augmentation de la pente de la transition (Fig. 80 c) est accompagnée de l'apparition de discontinuités similaires aux profils mesurés dans la partie basse du flanc d'érosion. La pente du Profil-76 reprend une forme aplatie à la fin de la transition avec un double maximum qui semble caractériser la déposition à la base du flanc de progradation. Ainsi, l'augmentation de la pente semble être en corrélation avec la section du flanc d'érosion où sont localisés les vortex.

Il est à noter que tous ces profils de cette expérience ont une couche inférieure de transport par charriage qui diminue depuis de la densité du sommet du lit sédimentaire ( $\sim 1.95 \text{ g cm}^{-3}$ ) vers sa base ( $\sim 1.75 \text{ g cm}^{-3}$ ) et l'examen rapproché de certains profils laisse dessiner un lit sédimentaire de forme logarithmique.

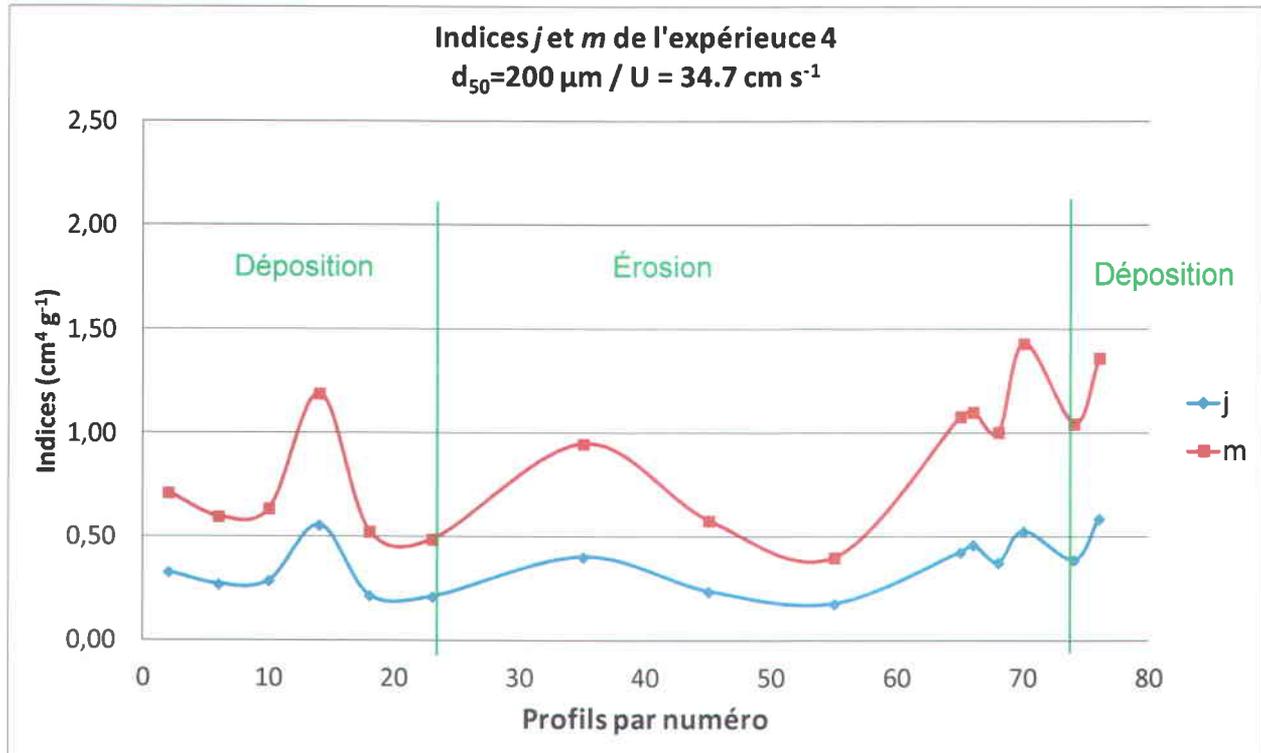
Les indices  $j$  et  $m$  (Figure 81) possèdent les valeurs maximales et minimales aux mêmes endroits que les précédentes expériences. La valeur la plus basse de  $m$  et  $j$  sont localisées sur le sommet de la ride et les valeurs les plus importantes sont situées dans le flanc de progradation, dans la zone d'avalanches et dans la partie basse du flanc d'érosion. Pour cette expérience la valeur de l'indice  $j$  demeure relativement sous les 0.50.



**Figure 80.** Les profils de densité 66 à 76 de l'expérience 4 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.200$  mm et  $U = 34.7$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Les flèches pointent des cassures dans les profils de suspension pouvant provenir du vortex responsable de l'érosion.

**Tableau 17 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 66 à 76 de l'expérience 4. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 34.7 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.200 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.**

a	Flanc d'érosion Profil-66		Flanc d'érosion Profil-68		Flanc d'érosion Profil-70		Flanc d'érosion Profil-74		Flanc de progradation Profil-76	
	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
<b>POINTS / <math>d_{50}=200 \mu\text{m}</math> / <math>U = 34.7 \text{ cm s}^{-1}</math></b>										
Limite supérieure de transport en suspension	120,40	1,065	120,90	1,071	123,30	1,052	118,00	1,052	119,20	1,075
Limite supérieure de la sous-couche fluide	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Point de frontière	80,83	1,183	78,47	1,228	77,29	1,252	76,70	1,238	82,60	1,136
Point d'inflexion	73,75	1,952	-	-	71,98	1,782	-	-	-	-
Point de densité maximale	71,98	1,982	71,39	1,928	67,26	1,949	69,62	1,911	71,39	1,955
Limite inférieure de basse densité	70,21	1,894	69,62	1,801	64,31	1,887	67,85	1,855	67,26	1,842
b	Flanc d'érosion Profil-66		Flanc d'érosion Profil-68		Flanc d'érosion Profil-70		Flanc d'érosion Profil-74		Flanc de progradation Profil-76	
	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
<b>COUCHES / <math>d_{50}=200 \mu\text{m}</math> / <math>U = 34.7 \text{ cm s}^{-1}</math></b>										
Couche de transport en suspension	39,57	-	42,43	-	46,01	-	41,30	-	36,60	-
Sous-couche fluide	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Couche supérieure du transport par charriage	8,85	0,799	7,08	0,700	10,03	0,697	7,08	0,673	11,21	0,819
Couche intermédiaire du transport par charriage	1,77	0,088	1,77	0,127	2,95	0,062	1,77	0,056	4,13	0,113
Sous-couche d'inflexion	41,89	-	41,30	-	35,99	-	39,53	-	38,94	-
Couche inférieure du transport par charriage	1,77	-	-	-	4,72	-	-	-	-	-
c	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$	$\rho$ moy	$j$
	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )
	Couche supérieure du transport par charriage									
	1,90	0,47	1,86	0,38	1,89	0,53	1,80	0,39	1,89	0,59
d	$m$		$m$		$m$		$m$		$m$	
	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	
<i>m: rapport entre l'épaisseur et <math>\Delta\rho</math> j: rapport entre l'épaisseur et <math>\rho</math> moy</i>										
	1,108		1,011		1,439		1,052		1,369	
d	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$	$\rho$ moy	$\sigma$
	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )
Couche inférieure du transport par charriage										
	1,75	0,0930	1,76	0,0843	1,76	0,0880	1,77	0,0862	1,76	0,0860



**Figure 81.** Représentation graphique des indices  $j$  et  $m$  de l'expérience 4. L'évolution des indices est présentée en fonction des numéros de profils. L'indice  $j$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la variation de la densité dans la couche. L'indice  $m$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la densité moyenne dans la couche.

### 3.2.5 Expérience 5

L'expérience 5 (Fig. 82-84) est réalisée avec un sable fin ayant une granulométrie de  $d_{50} = 0.120$  mm. La vitesse du courant utilisée ( $U = 28.6$  cm s<sup>-1</sup>) est comparable aux expériences 2 et 3 (31.0 cm s<sup>-1</sup> et 31.1 cm s<sup>-1</sup>). Les intervalles de temps entre les mesures sont de 30 secondes.

Les colonnes d'eau des profils 2 à 18 (Fig. 82) présentent des profils de la couche de transport en suspension de forme logarithmique jusqu'au point de frontière. Par contre, les profils 10 à 18 présentent des fluctuations de concentration qui tendent à transformer les profils logarithmiques en profils linéaires. Le Profil-14 et le Profil-18 sont les plus marqués par ces fluctuations.

Les valeurs de densité au point de frontière sont comprises entre 1.160 et 1.205 g cm<sup>-3</sup> pour les profils 2 à 14 et sont légèrement inférieures pour le Profil-18 avec 1.153 g cm<sup>-3</sup> (Tab. 18). Le Profil-14 présente une partie non homogène (Fig. 82 ; flèche) qui tend à s'atténuer au Profil-18. La couche de transport en suspension de ces profils est d'une épaisseur variant de 33.63 mm (Profil-10) jusqu'à un maximum de 44.81 mm (Profil-6).

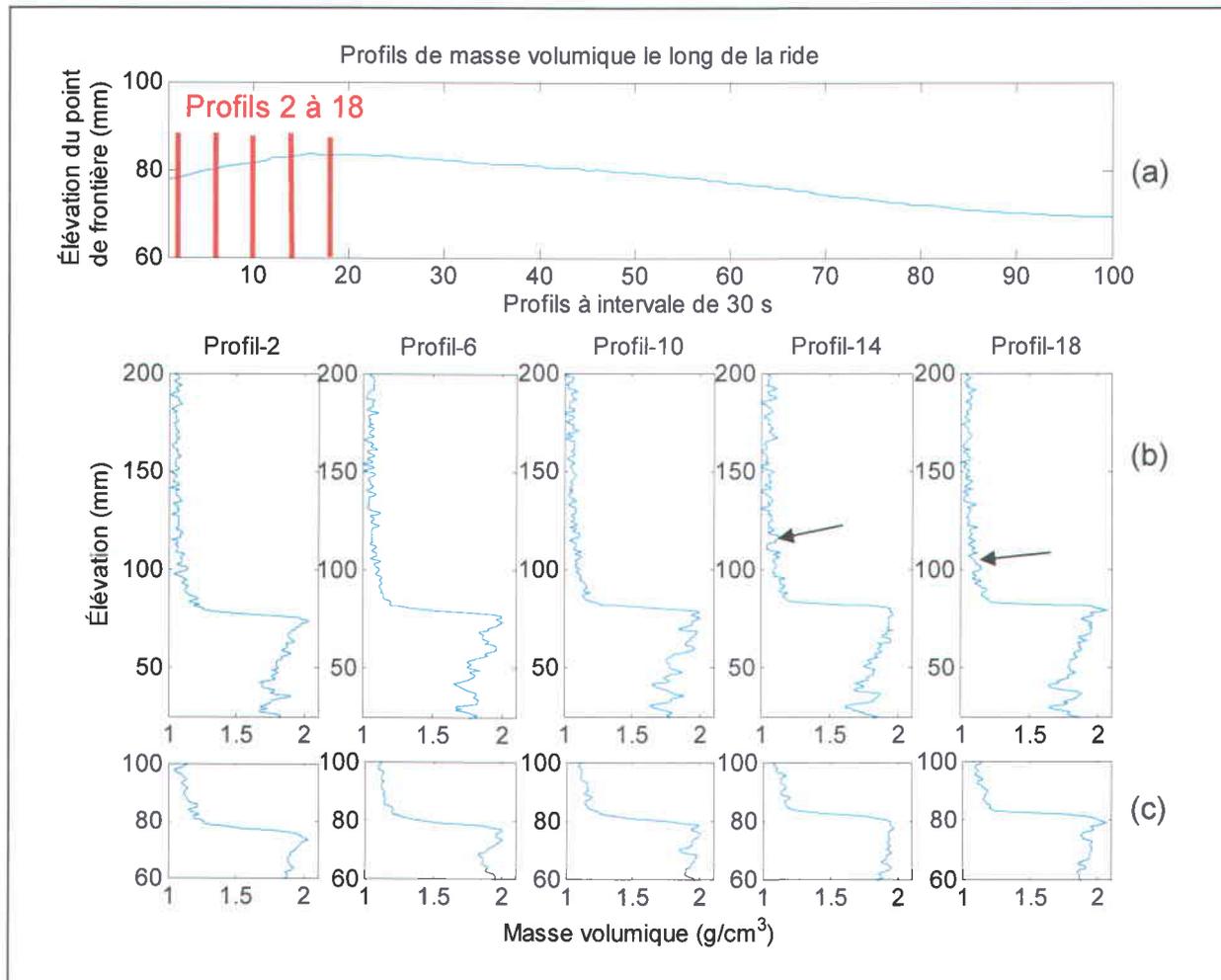
#### *Préambule à la discussion*

Les trois profils (2, 6 et 10), sur le flanc de progradation, ont des densités au point de frontière respectives de 1.191, 1.205 et 1.160 g cm<sup>-3</sup> (Tab. 18) et ces valeurs sont plus élevées que celles valeurs obtenues avec le sédiment grossier ( $d_{50} = 0.470$  mm) de vitesse comparable soit (1,126 à 1.147 g cm<sup>-3</sup>) (Tab. 11). Les densités maximales associées sont respectivement de 2.017, 1.995 et 1.996 g cm<sup>-3</sup>. Les couches formées par ces points ont des épaisseurs respectives de 7.67, 6.49 et 6.49 mm et des densités respectivement de 0.826, 0.790 et 0.836 g cm<sup>-3</sup>.

Le Profil-14, situé au dessus du flanc de progradation, possède une couche supérieure de transport par charriage de 10.03 mm d'épaisseur car elle est composée de sédiments denses déposés durant l'intervalle de temps entre le Profil-2 et le Profil-14.

La densité moyenne de la couche inférieure de transport par charriage augmente progressivement de 1.79 g cm<sup>-3</sup> (Profil-2) à 1.84 g cm<sup>-3</sup> (Profil-18).

Le Profil-18, situé sur la partie sommitale de la ride, possède une densité de la transition de  $0.916 \text{ g cm}^{-3}$ , valeurs supérieures à celles des profils précédents (Tab. 18). L'augmentation de la densité de transition pour les profils 2 à 18 ainsi que la valeur de la densité maximale sont similaires à celles des valeurs observées au flanc de progradation de la ride. Aussi, entre le Profil-14 et le Profil-18, la plus grande compaction, marquée d'un changement en corrélation avec le passage entre le flanc d'érosion et le flanc de progradation, séparent l'érosion de la déposition.



**Figure 82.** Les profils de densité 2 à 18 de l'expérience 5 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.120 \text{ mm}$  et  $U = 28.6 \text{ cm s}^{-1}$ . (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Les flèches pointent sur les parties non-homogènes du profil de concentration.

**Tableau 18 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 2 à 18 de l'expérience 5. La vitesse du fluide utilisée est de  $U=28.6 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.120 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.**

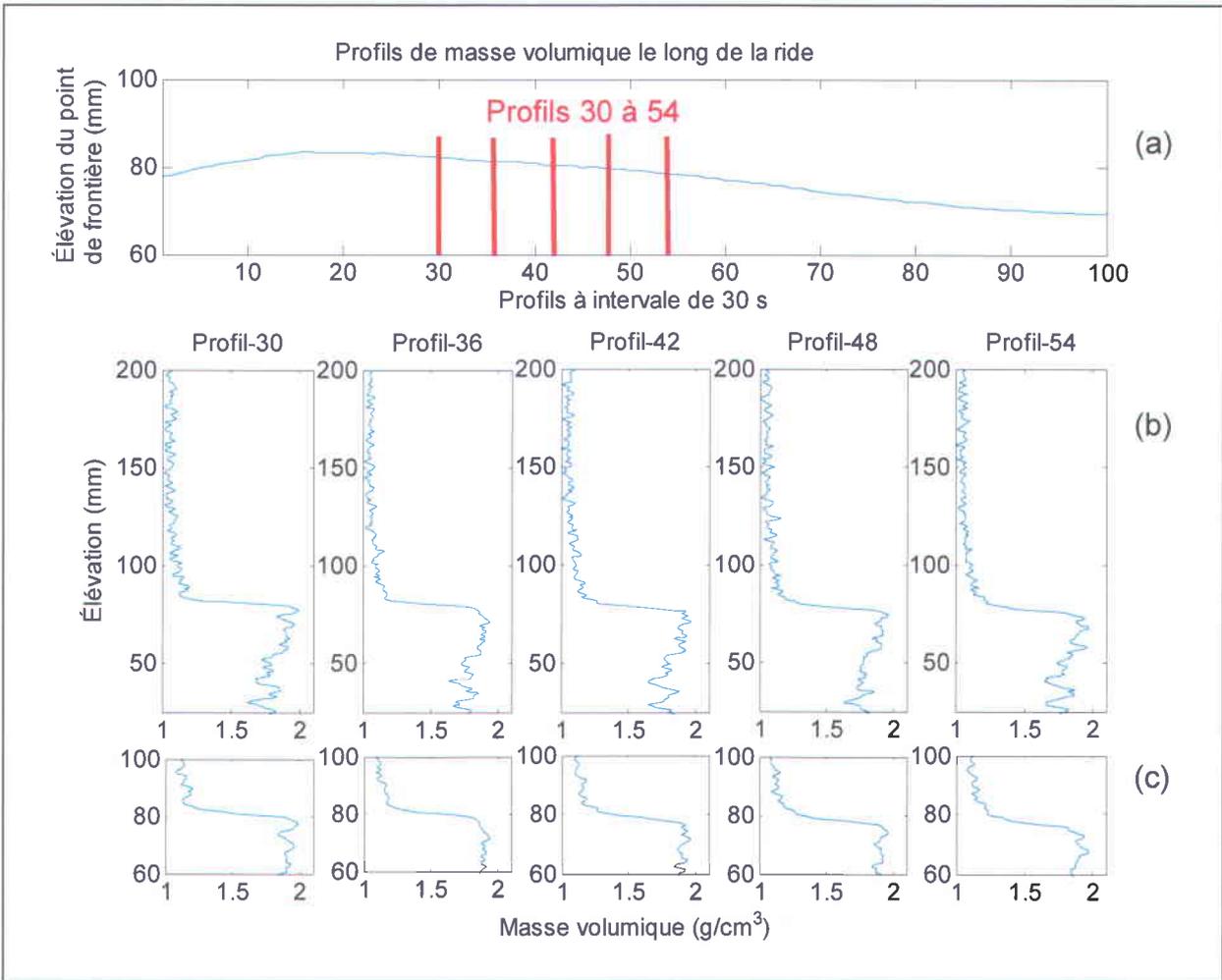
a	Flanc d'érosion Profil-2		Flanc d'érosion Profil-6		Flanc d'érosion Profil-10		Flanc d'érosion Profil-14		Flanc d'érosion Profil-18	
	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
	POINTS / $d_{50}=120 \mu\text{m}$ / $U = 28.6 \text{ cm s}^{-1}$									
Limite supérieure de transport en suspension	116,80	1,105	128,00	1,085	118,00	1,113	129,80	1,073	122,10	1,093
Limite supérieure de la sous-couche fluide	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Point de frontière	81,42	1,191	83,19	1,205	84,37	1,160	87,32	1,190	87,32	1,153
Point d'inflexion	74,93	1,970	-	-	-	-	-	-	-	-
Point de densité maximale	73,75	2,017	76,70	1,995	77,88	1,996	77,29	1,969	79,06	2,069
Limite inférieure de basse densité	67,26	1,891	74,93	1,956	77,29	1,947	74,93	1,931	77,88	1,952
b	Flanc d'érosion Profil-2		Flanc d'érosion Profil-6		Flanc d'érosion Profil-10		Flanc d'érosion Profil-14		Flanc d'érosion Profil-18	
	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
	COUCHES / $d_{50}=120 \mu\text{m}$ / $U = 28.6 \text{ cm s}^{-1}$									
Couche de transport en suspension	35,38	-	44,81	-	33,63	-	42,48	-	34,78	-
Sous-couche fluide	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Couche supérieure du transport par charriage	7,67	0,826	6,49	0,790	6,49	0,836	10,03	0,779	8,26	0,916
Couche intermédiaire du transport par charriage	6,49	0,126	1,77	0,039	0,59	0,049	2,36	0,038	1,18	0,117
Sous-couche d'inflexion	1,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Couche inférieure du transport par charriage	38,94	-	46,61	-	48,97	-	46,61	-	49,56	-
c	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )
	Statistiques									
	Couche supérieure du transport par charriage	1,86	0,41	1,86	0,35	1,92	0,34	1,84	0,55	1,90
$m$ : rapport entre l'épaisseur et $\Delta\rho$	$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	
$j$ : rapport entre l'épaisseur et $\rho$ moy	0,929		0,822		0,776		1,288		0,902	
d	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
	Statistiques									
	Couche inférieure du transport par charriage	1,79	0,0709	1,82	0,0889	1,82	0,0926	1,83	0,0914	1,84

Dans les colonnes d'eau des profils 30 à 54 (Fig. 83) les couches de transport en suspension sont de forme logarithmique se terminant avec des points de diminution de la densité pour le Profil-30 et le Profil-36. Il y a, pour les profils 30 à 54, une évolution lors de la progression de la ride. Un point de diminution de la densité est présent au sommet de la ride et tend à disparaître à l'approche de la section d'érosion, section où le Profil-54 devient logarithmique sans diminution. Pour le Profil-30, la densité du point de frontière diminue à  $1.138 \text{ g cm}^{-3}$ , pour une valeur à la base du profil de concentration de  $1.200 \text{ g cm}^{-3}$  (Tab. 19). Par contre, les profils 42 à 54 présentent des valeurs de

densité au point de frontière respectivement de  $1.165 \text{ g cm}^{-3}$ ,  $1.156$  et  $1.207 \text{ g cm}^{-3}$ . L'épaisseur de la couche de transport en suspension reste stable et elle fluctue seulement de  $41.93 \text{ mm}$  à  $33.02 \text{ mm}$ . L'épaisseur de la couche formée par la diminution de densité entre la base du profil de concentration et le point de frontière est de  $3.54 \text{ mm}$ .

#### ***Préambule à la discussion***

Le Profil-30 possède une pente de transition aplatie (épaisseur de  $8.26 \text{ mm}$  ; densité de la transition de  $0.844 \text{ g cm}^{-3}$ ) qui s'apparente aux autres pentes observées sur le haut du flanc d'érosion. La pente augmente dans le temps en raison de l'érosion qui attaque la ride. En effet, l'élévation du point de densité maximale des profils 30 à 54 passent de  $77.88$  à  $72.57 \text{ mm}$  pour des densités maximales respectives de  $1.982$  à  $1,948 \text{ g cm}^{-3}$ . Pour l'ensemble de ces profils, la densité moyenne de la couche inférieure de transport par charriage est quasi constante à  $1.82 \text{ g cm}^{-3}$ , comparativement aux valeurs supérieures dans les couches inférieures de transport par charriage des profils précédents, ce qui indique une stabilité dans la couche inférieure en dépit de l'érosion présente en surface de la ride (Fig. 83).



**Figure 83.** Les profils de densité 30 à 54 de l'expérience 5 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.120 \text{ mm}$  et  $U = 28.6 \text{ cm s}^{-1}$ . (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage.

**Tableau 19 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 30 à 54 de l'expérience 5. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 28.6 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.120 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.**

a	Milieu du flanc d'érosion Profil-30		Milieu du flanc d'érosion Profil-36		Milieu du flanc d'érosion Profil-42		Milieu du flanc d'érosion Profil-48		Milieu du flanc d'érosion Profil-54		
	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	
<b>POINTS / <math>d_{50}=120 \mu\text{m}</math> / <math>U = 28.6 \text{ cm s}^{-1}</math></b>											
Limite supérieure de transport en suspension	126,30	1,082	116,80	1,103	126,30	1,074	122,70	1,069	118,00	1,068	
Limite supérieure de la sous-couche fluide	89,68	1,200	-	-	-	-	-	-	-	-	
Point de frontière	86,14	1,138	83,78	1,162	84,37	1,165	85,55	1,156	82,60	1,207	
Point d'inflexion	-	-	78,47	1,829	-	-	76,11	1,912	74,93	1,825	
Point de densité maximale	77,88	1,982	71,39	1,942	76,70	1,926	73,75	1,966	72,57	1,948	
Limite inférieure de basse densité	73,75	1,839	69,62	1,873	75,52	1,897	71,98	1,901	70,80	1,879	
b	Milieu du flanc d'érosion Profil-30		Milieu du flanc d'érosion Profil-36		Milieu du flanc d'érosion Profil-42		Milieu du flanc d'érosion Profil-48		Milieu du flanc d'érosion Profil-54		
	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	
<b>COUCHES / <math>d_{50}=120 \mu\text{m}</math> / <math>U = 28.6 \text{ cm s}^{-1}</math></b>											
Couche de transport en suspension	40,16	-	33,02	-	41,93	-	37,15	-	35,40	-	
Sous-couche fluide	3,54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Couche supérieure du transport par charriage	8,26	0,844	12,39	0,780	7,67	0,761	11,80	0,810	10,03	0,741	
Couche intermédiaire du transport par charriage	4,13	0,143	1,77	0,069	1,18	0,029	1,77	0,065	1,77	0,069	
Sous-couche d'inflexion	-	-	7,08	-	-	-	2,36	-	2,36	-	
Couche inférieure du transport par charriage	45,43	-	41,30	-	47,20	-	43,66	-	42,48	-	
c	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	
	1,88	0,44	1,82	0,68	1,83	0,42	1,86	0,63	1,82	0,55	
<i>m: rapport entre l'épaisseur et <math>\Delta\rho</math> j: rapport entre l'épaisseur et <math>\rho</math> moy</i>											
d	$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
	0,979	1,82	0,0756	1,82	0,0756	1,82	0,0846	1,81	0,0752	1,82	0,0856

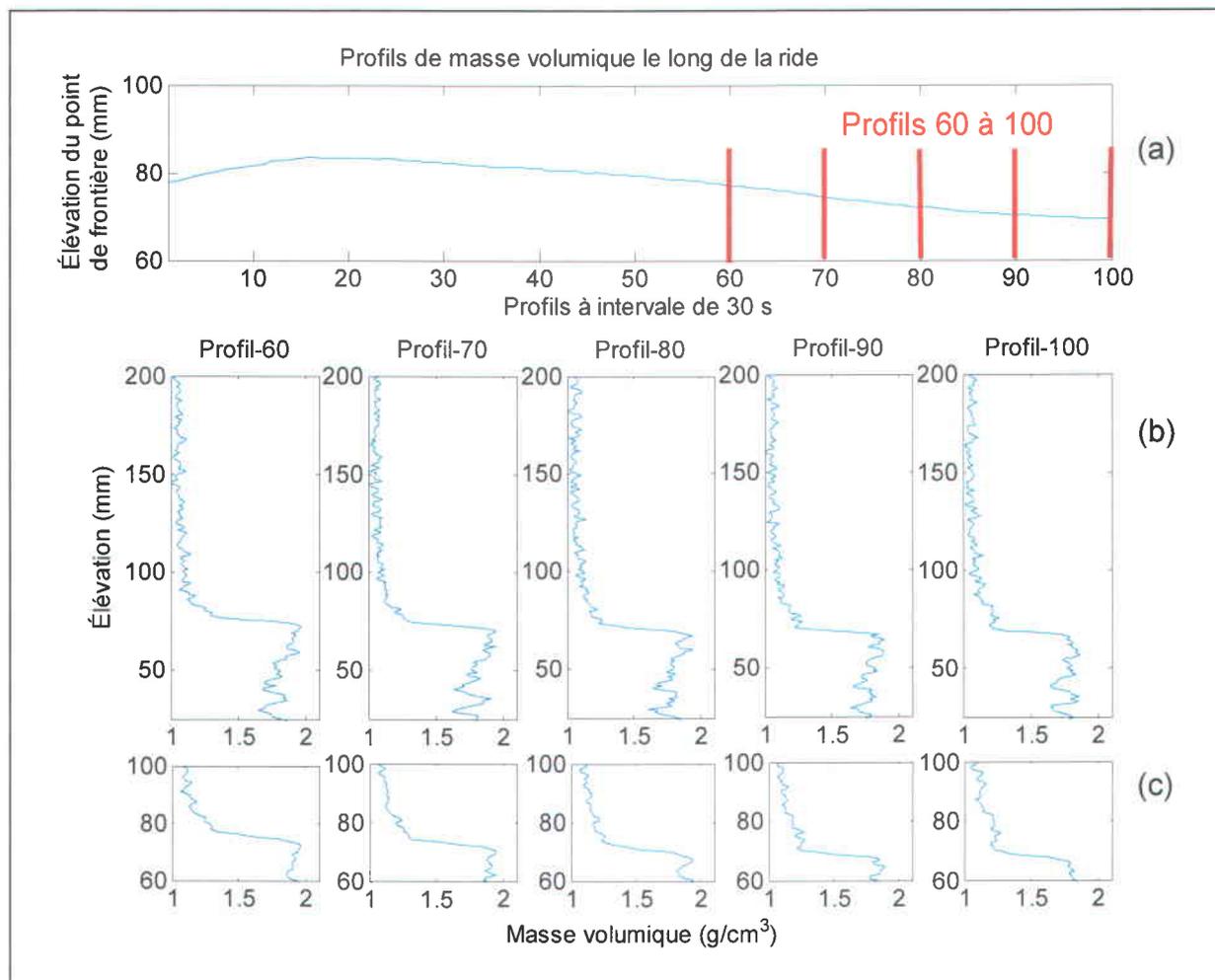
Les colonnes d'eau des profils 60 à 100 (Fig. 84) présentent des couches de transport en suspension d'apparence logarithmiques qui tendent à se déformer au fil du temps. Les déformations se présentent comme des variations de la densité à l'approche du lit sédimentaire. Ces variations ont pour effet d'augmenter la densité du point de frontière entre 1.193 et 1.222  $\text{g cm}^{-3}$  (Profils 70 à 100), contrairement à 1.128  $\text{g cm}^{-3}$  au Profil-60 (Tab. 20). Entre les profils 80 à 100, l'augmentation de la densité à la base du profil indique une augmentation de la concentration de matériel en suspension, ceci étant défini par l'augmentation de la densité du point de frontière. L'épaisseur de la couche de transport en suspension fluctue de 50.76 mm et 37.75 mm pour le Profil-60 et le Profil-

70, est de 44.25 mm et 45.40 mm pour le Profil-80 et le Profil-90 et est de 38.20 mm pour le Profil-100.

#### ***Préambule à la discussion***

Les profils 60 à 100 présentent l'évolution de l'érosion en fonction du temps. Le Profil-60 et le Profil-70 s'inscrivent dans la même forme que les profils présentés à la figure 83. De plus, les profils 60 à 100 présentent une diminution de la différence de densité ( $\Delta\rho$ ) dans la zone de transition. Ceci est causé par une diminution importante du point de densité maximale ( $1.789 \text{ g cm}^{-3}$ ). Cette diminution importante n'ayant pas été observée pour des granulométries plus grossières, indique qu'il existe une corrélation entre la densité mesurée au point de frontière et la granulométrie. De plus, la forme des profils 80 à 100 indique une diminution de la densité de la couche inférieure de transport par charriage avec des densités moyennes respectives de 1.78, 1.78 et  $1.77 \text{ g cm}^{-3}$ , comparativement à des valeurs de 1.82 et  $1.81 \text{ g cm}^{-3}$  pour les deux profils précédents. Aussi, une homogénéisation de la couche est présente en raison de la réduction de l'écart-type passant de  $0.087 \text{ g cm}^{-3}$  pour le Profil-70 jusqu'à  $0.069 \text{ g cm}^{-3}$  pour le Profil-100. En accord avec les valeurs de cette couche, la densité moyenne de la couche supérieure de transport par charriage est d'une valeur plus faible qu'avec les autres granulométries soit entre 1.70 et  $1.78 \text{ g cm}^{-3}$ .

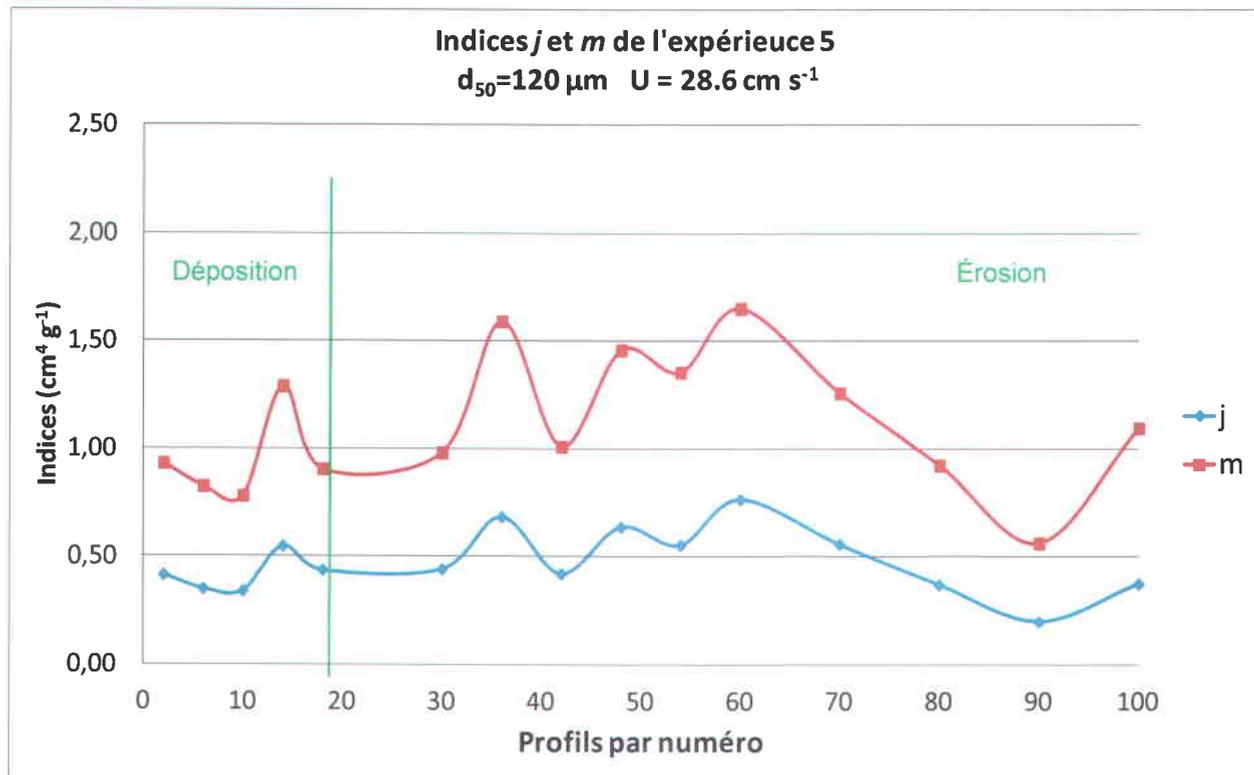
Les indices  $j$  et  $m$  (Figure 85) possèdent les valeurs maximales et minimales aux mêmes endroits que les précédentes expériences. La valeur la plus basse de  $m$  et  $j$  sont comme précédemment localisées sur le sommet de la ride et sont situées dans le flanc de progradation, dans la zone d'avalanches et dans la partie basse du flanc d'érosion. La valeur de l'indice  $j$ , autour de 0.50, suit la forme et l'amplitude de l'indice  $m$ .



**Figure 84.** Les profils de densité 60 à 100 de l'expérience 5 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.120$  mm et  $U = 28.6$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage.

**Tableau 20 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 60 à 100 de l'expérience 5. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 28.6 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.120 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.**

a	base du flanc d'érosion Profil-60		base du flanc d'érosion Profil-70		base du flanc d'érosion Profil-80		base du flanc d'érosion Profil-90		base du flanc d'érosion Profil-100	
	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
POINTS / $d_{50}=120 \mu\text{m}$ / $U = 28.6 \text{ cm s}^{-1}$										
Limite supérieure de transport en suspension	136,90	1,079	117,40	1,055	118,00	1,063	116,20	1,061	110,20	1,164
Limite supérieure de la sous-couche fluide	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Point de frontière	86,14	1,128	79,65	1,193	73,75	1,231	70,80	1,222	72,00	1,196
Point d'inflexion	-	-	-	-	-	-	-	-	67,30	1,698
Point de densité maximale	72,57	1,951	70,21	1,943	67,26	1,935	67,26	1,853	65,50	1,789
Limite inférieure de basse densité	68,44	1,912	67,26	1,881	64,31	1,837	66,08	1,759	62,00	1,771
b	base du flanc d'érosion Profil-60		base du flanc d'érosion Profil-70		base du flanc d'érosion Profil-80		base du flanc d'érosion Profil-90		base du flanc d'érosion Profil-100	
	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
COUCHES / $d_{50}=120 \mu\text{m}$ / $U = 28.6 \text{ cm s}^{-1}$										
Couche de transport en suspension	50,76	-	37,75	-	44,25	-	45,40	-	38,20	-
Sous-couche fluide	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Couche supérieure du transport par charriage	13,57	0,823	9,44	0,750	6,49	0,704	3,54	0,631	6,50	0,593
Couche intermédiaire du transport par charriage	4,13	0,039	2,95	0,062	2,95	0,098	1,18	0,094	3,50	0,018
Sous-couche d'inflexion	-	-	-	-	-	-	-	-	1,80	-
Couche inférieure du transport par charriage	40,12	-	38,94	-	35,99	-	37,76	-	33,68	-
c	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )
	Statistiques									
	Couche supérieure du transport par charriage	1,78	0,76	1,70	0,56	1,76	0,37	1,78	0,20	1,74
$m$ : rapport entre l'épaisseur et $\Delta\rho$	$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	
$j$ : rapport entre l'épaisseur et $\rho$ moy	1,649		1,259		0,922		0,561		1,096	
d	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
	Statistiques									
Couche inférieure du transport par charriage	1,82	0,0850	1,81	0,0871	1,78	0,0770	1,78	0,0687	1,77	0,0691



**Figure 85.** Représentation graphique des indices  $j$  et  $m$  de l'expérience 5. L'évolution des indices est présentée en fonction des numéros de profils. L'indice  $j$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la variation de la densité dans la couche. L'indice  $m$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la densité moyenne dans la couche.

### 3.2.6 Expérience 6

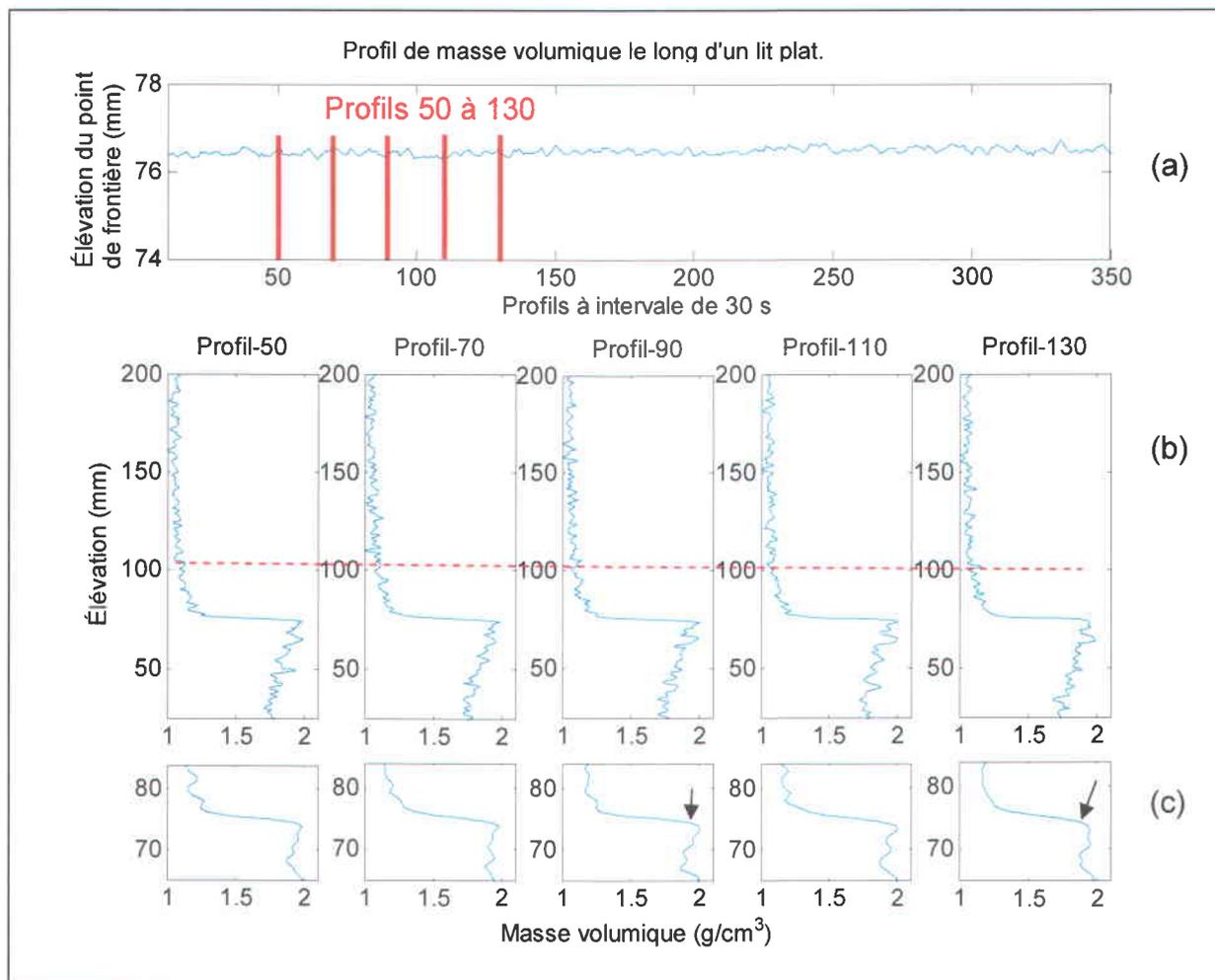
L'expérience 6 (Fig. 86-88) est réalisée avec le même sable fin que l'expérience 5 ( $d_{50} = 0.120$  mm). La vitesse du courant utilisé ( $U = 21.9$  cm s<sup>-1</sup>) est inférieure par rapport aux valeurs de l'expérience 5 et les intervalles de temps entre les mesures sont de 30 secondes.

Les colonnes d'eau des profils 50 à 130 (Fig. 86) présentent des couches de transport en suspension logarithmique similaire d'un profil à l'autre. Par contre, le Profil-130 diffère des autres par un point de frontière élevé (82.60 mm). Le Profil-50 et le Profil-110 montrent des diminutions de la densité au-dessus des points de frontière (respectivement de 1.277 g cm<sup>-3</sup> et 1.222 g cm<sup>-3</sup>). Les points de frontière sont de densités respectives de 1.243 et 1.176 g cm<sup>-3</sup> (Tab. 21). Les épaisseurs de la couche produite par la diminution de densité sont respectivement de 2.95 et 4.72 mm.

L'épaisseur de la couche de transport en suspension est d'environ 33.65 mm, à l'exception des Profil-80 et Profil-110 où l'épaisseur est de 43.70 mm. Ceci indique donc une constance des profils dans le temps.

#### *Préambule à la discussion*

Les profils dans la couche supérieure de transport par charriage présentent des différences subtiles dans la pente de la transition, des variantes importantes dans la différence de densité de la transition et dans la valeur de la densité maximale. Par exemple, le Profil-90 (2.001 g cm<sup>-3</sup>) a une densité maximale plus importante que le Profil-130 (1.950 g cm<sup>-3</sup>) (Tab. 21 et Fig. 86 c). Ces profils, espacés de 20 minutes, diffèrent, ce qui indique un changement dans la composition de la ride. Le Profil-130 est en corrélation avec des profils que l'on retrouve soit sur le flanc de progradation, soit à la base du flanc d'érosion. Enfin, le transport par suspension est présent (Fig. 86, ligne pointillée).



**Figure 86.** Les profils de densité 50 à 130 de l'expérience 6 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.120$  mm et  $U = 21.9$  cm s<sup>-1</sup>. (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. Contrairement aux autres expériences, cette formation est un lit plat. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage. Les flèches pointent sur les variations subtiles, à la fin de la transition.

**Tableau 21 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 50 à 130 de l'expérience 6. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 21.9 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.120 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.**

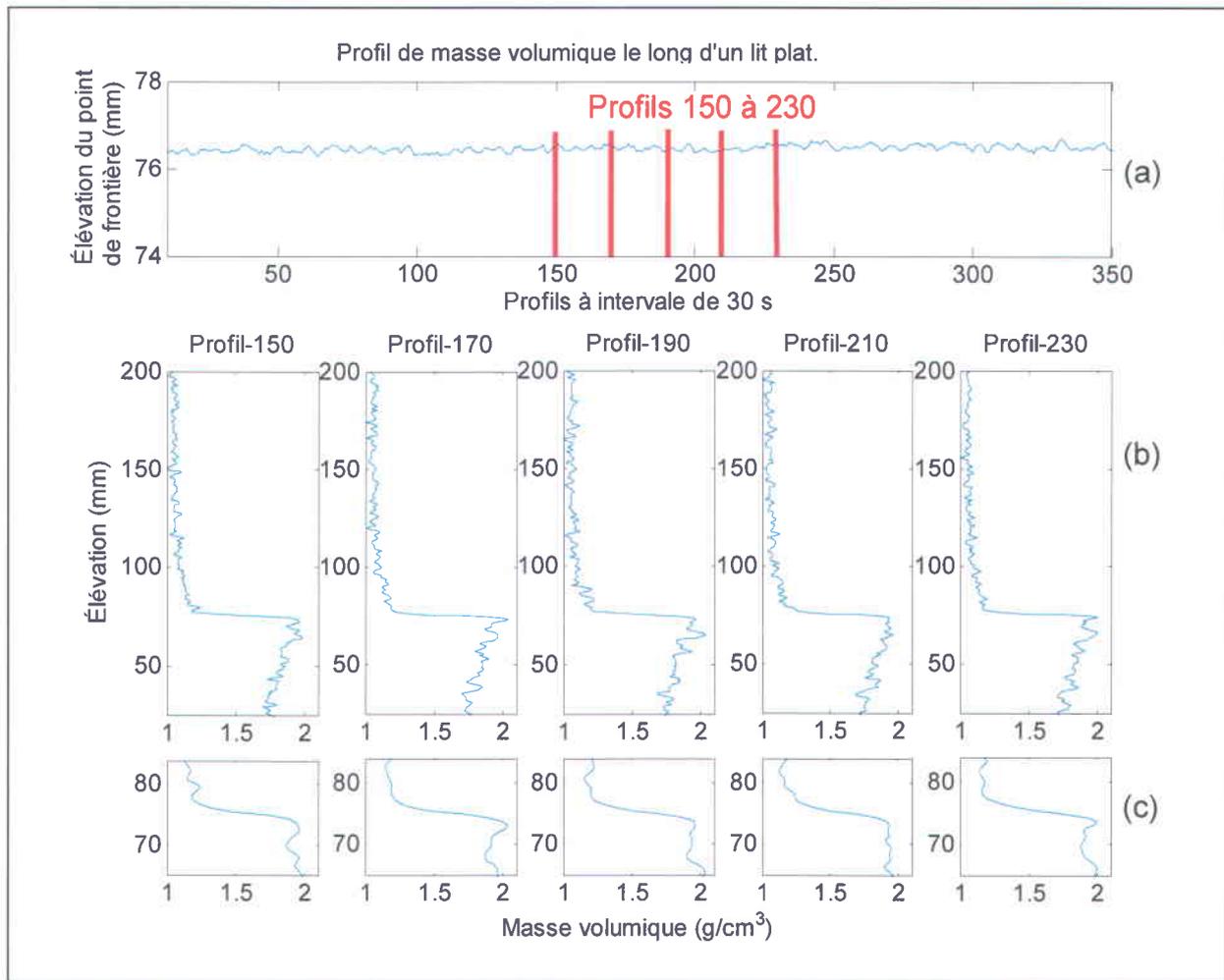
a	Profil-50		Profil-70		Profil-90		Profil-110		Profil-130	
	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
<b>POINTS / <math>d_{50}=120 \mu\text{m} / U = 21.9 \text{ cm s}^{-1}</math></b>										
Limite supérieure de transport en suspension	110,30	1,097	112,70	1,091	120,40	1,052	111,50	1,061	113,30	1,068
Limite supérieure de la sous-couche fluide	77,88	1,277	-	-	-	-	79,06	1,222	-	-
Point de frontière	76,70	1,243	79,06	1,184	76,70	1,243	77,88	1,176	82,60	1,165
Limite inférieure de basse densité	71,98	1,953	70,21	1,898	71,39	1,960	71,39	1,916	71,98	1,934
Point d'inflexion	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Point de densité maximale	73,75	1,988	73,75	1,980	73,75	2,001	73,16	2,001	73,16	1,950
b	Profil-50		Profil-70		Profil-90		Profil-110		Profil-130	
	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
<b>COUCHES / <math>d_{50}=120 \mu\text{m} / U = 21.9 \text{ cm s}^{-1}</math></b>										
Couche de transport en suspension	33,60	-	33,64	-	43,70	-	33,62	-	30,70	-
Sous-couche fluide	2,95	-	-	-	-	-	4,72	-	-	-
Couche supérieure du transport par charriage	2,95	0,745	5,31	0,796	2,95	0,758	4,72	0,825	9,44	0,785
Couche intermédiaire du transport par charriage	1,77	0,035	3,54	0,082	2,36	0,041	1,77	0,085	1,18	0,016
Sous-couche d'inflexion	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Couche inférieure du transport par charriage	44,84	-	43,07	-	44,25	-	44,25	-	44,84	-
c	$\rho$ moy	$j$								
	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )
	1,91	0,15	1,85	0,29	1,90	0,16	1,91	0,25	1,91	0,49
	$m$		$m$		$m$		$m$		$m$	
<i>m</i> : rapport entre l'épaisseur et $\Delta\rho$ <i>j</i> : rapport entre l'épaisseur et $\rho$ moy										
	( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	
	0,396		0,667		0,389		0,572		1,203	
d	$\rho$ moy	$\sigma$								
	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )	( $\text{g cm}^{-3}$ )
Couche inférieure du transport par charriage	1,83	0,0732	1,83	0,0705	1,83	0,0739	1,84	0,0733	1,83	0,0700

Le Profil-150 est de forme logarithmique avec une diminution de la densité à sa base. La densité à la base du profil est de  $1.242 \text{ g cm}^{-3}$  et la densité du point de frontière est de  $1.185 \text{ g cm}^{-3}$ . La sous-couche créée dans l'intervalle entre ces profils est d'une épaisseur de 1.77 mm. Le Profil-170 et le Profil-210 sont de formes similaires avec des densités à la frontière respectivement de  $1.146$  et  $1.152 \text{ g cm}^{-3}$ . Le Profil-190, comme le Profil-150, possède une diminution de la densité à l'approche du point de frontière. Le Profil-190 possède aussi une diminution avec une densité de  $1.222 \text{ g cm}^{-3}$  et un point de frontière de  $1.152 \text{ g cm}^{-3}$ , entraînant une sous-couche d'une épaisseur de 1.77 mm. Le Profil-130 présente, à la base du profil de forme logarithmique, une cassure à  $90^\circ$

localisée au point de frontière, avec une densité de  $1.162 \text{ g cm}^{-3}$ . Au-dessus, l'épaisseur de la couche de sédiments en suspension est d'environ 70 mm, à l'exception du Profil-170 où elle est de 36.00 mm. Entre le Profil-150 et le Profil-170, la densité maximale passe de  $1.967 \text{ g cm}^{-3}$  à  $2.040 \text{ g cm}^{-3}$ . Après 10 minutes, elle revient à  $1.967 \text{ g cm}^{-3}$  pour diminuer de nouveau (Profil-210;  $1.936 \text{ g cm}^{-3}$ ) et augmenter jusqu'à une valeur de  $2.005 \text{ g cm}^{-3}$  (Tab. 22).

#### ***Préambule à la discussion***

Les variations et les changements dans la forme de la couche supérieure et intermédiaire de transport par charriage sont en corrélation avec les différentes observations réalisées sur les expériences précédentes, Voir les figures (60 et 61) pour des exemples.



**Figure 87.** Les profils de densité 150 à 230 de l'expérience 6 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.120 \text{ mm}$  et  $U = 21.9 \text{ cm s}^{-1}$ . (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage.

**Tableau 22 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 150 à 230 de l'expérience 6. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 21.9 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.120 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.**

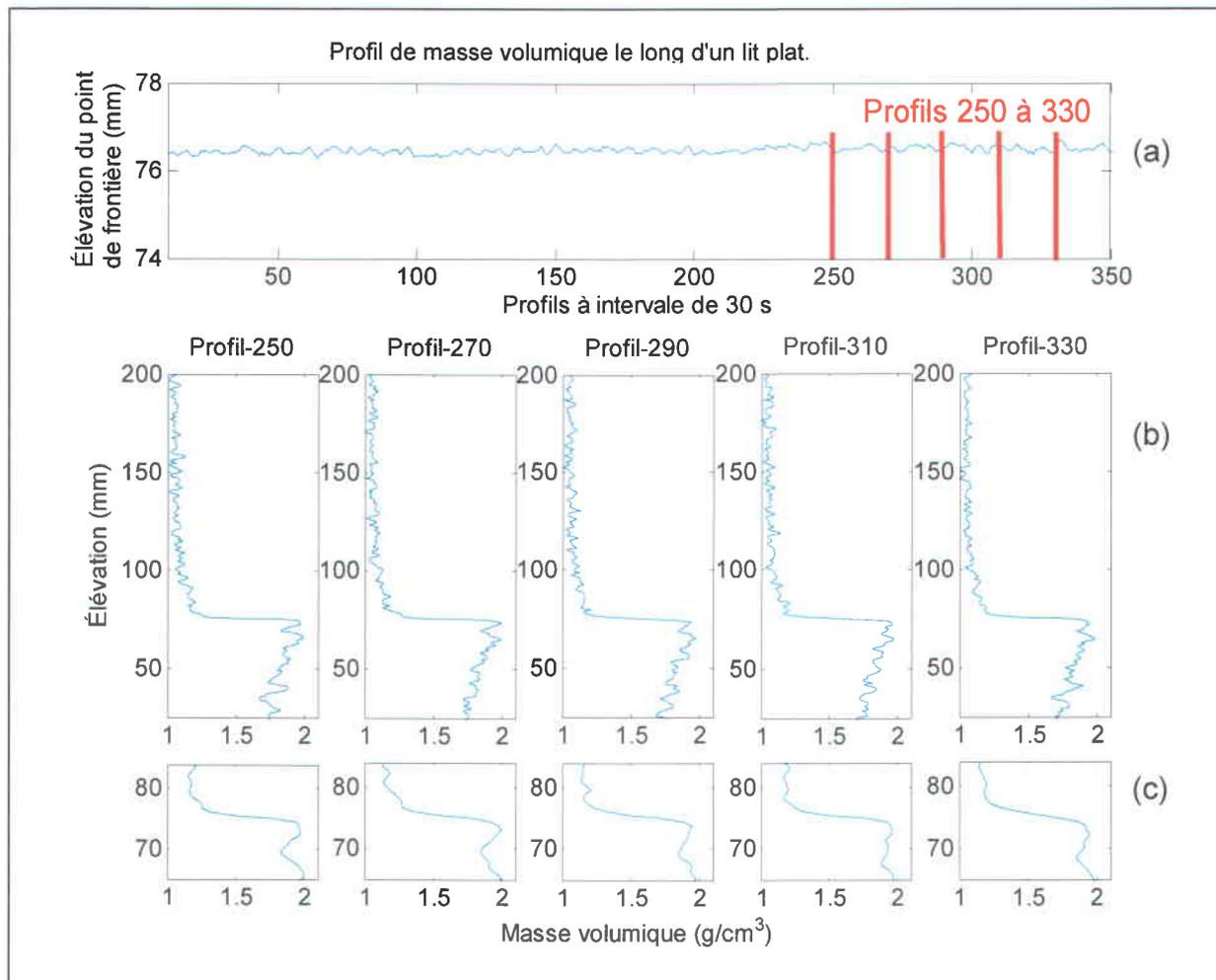
a	Profil-150		Profil-170		Profil-190		Profil-210		Profil-230		
	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	
<b>POINTS / <math>d_{50}=120 \mu\text{m} / U = 21.9 \text{ cm s}^{-1}</math></b>											
Limite supérieure de transport en suspension	107,40	1,059	118,60	1,081	112,70	1,071	109,10	1,159	109,10	1,074	
Limite supérieure de la sous-couche fluide	79,65	1,242	-	-	82,60	1,222	-	-	-	-	
Point de frontière	77,88	1,185	82,60	1,146	80,83	1,152	79,70	1,161	78,47	1,162	
Point d'inflexion	74,34	1,881	-	-	-	-	-	-	-	-	
Point de densité maximale	72,57	1,967	73,16	2,040	73,16	1,967	73,20	1,936	73,75	2,005	
Limite inférieure de basse densité	70,21	1,877	68,44	1,876	71,39	1,925	72,60	1,927	71,98	1,905	
b	Profil-150		Profil-170		Profil-190		Profil-210		Profil-230		
	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	
<b>COUCHES / <math>d_{50}=120 \mu\text{m} / U = 21.9 \text{ cm s}^{-1}</math></b>											
Couche de transport en suspension	29,52	-	36,00	-	31,87	-	29,40	-	30,63	-	
Sous-couche fluide	1,77	-	-	-	1,77	-	-	-	-	-	
Couche supérieure du transport par charriage	5,31	0,782	9,44	0,894	7,67	0,815	6,50	0,775	4,72	0,843	
Couche intermédiaire du transport par charriage	2,36	0,090	4,72	0,164	1,77	0,042	0,60	0,009	1,77	0,100	
Sous-couche d'inflexion	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Couche inférieure du transport par charriage	43,07	-	41,30	-	44,25	-	45,46	-	44,84	-	
c	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{ g}^{-1}$ )	
	Statistiques		Statistiques		Statistiques		Statistiques		Statistiques		
	Couche supérieure du transport par charriage		Couche supérieure du transport par charriage		Couche supérieure du transport par charriage		Couche supérieure du transport par charriage		Couche supérieure du transport par charriage		
$m$ : rapport entre l'épaisseur et $\Delta\rho$		$m$		$m$		$m$		$m$			
$j$ : rapport entre l'épaisseur et $\rho$ moy		$j$		$j$		$j$		$j$			
0,679		1,056		0,941		0,839		0,560			
d	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	
	Statistiques		Statistiques		Statistiques		Statistiques		Statistiques		
Couche inférieure du transport par charriage		Couche inférieure du transport par charriage		Couche inférieure du transport par charriage		Couche inférieure du transport par charriage		Couche inférieure du transport par charriage			
1,83		0,0721		1,83		0,0719		1,84		0,0696	

Les profils 250 à 330 sont tous de formes différentes même si l'espacement temporel est le même que précédemment. Le Profil-250 et le Profil-270 sont de forme logarithmique. Par contre, le Profil-290 présente un profil linéaire avec une cassure avec un angle (dans le profil) d'environ  $90^\circ$  et une légère diminution de la densité au point de frontière de  $1.153$  et  $1.209 \text{ g cm}^{-3}$ , donnant une sous-couche d'une épaisseur de  $1.88 \text{ mm}$  (Tab. 23). Le Profil-310 présente lui aussi une diminution de la densité de  $1.162$  vers  $1.209 \text{ g cm}^{-3}$  sur une épaisseur de  $1.88 \text{ mm}$ . Le Profil-330 reprend la forme du Profil-250 mais avec une valeur de densité à la transition de  $1.183 \text{ g cm}^{-3}$ .

### *Préambule à la discussion*

Pour les 15 profils de cette expérience, Il est donc impossible de déterminer la position des profils sur la ride à l'aide de la topographie. Pour le moment, il est donc difficile, malgré un intervalle de temps entre les profils de 30 secondes, de faire la différence entre le flanc de progradation et où le flanc d'érosion. Par contre, l'étude des profils montre des similitudes entre les parties internes des profils de cette expérience et ceux des autres expériences.

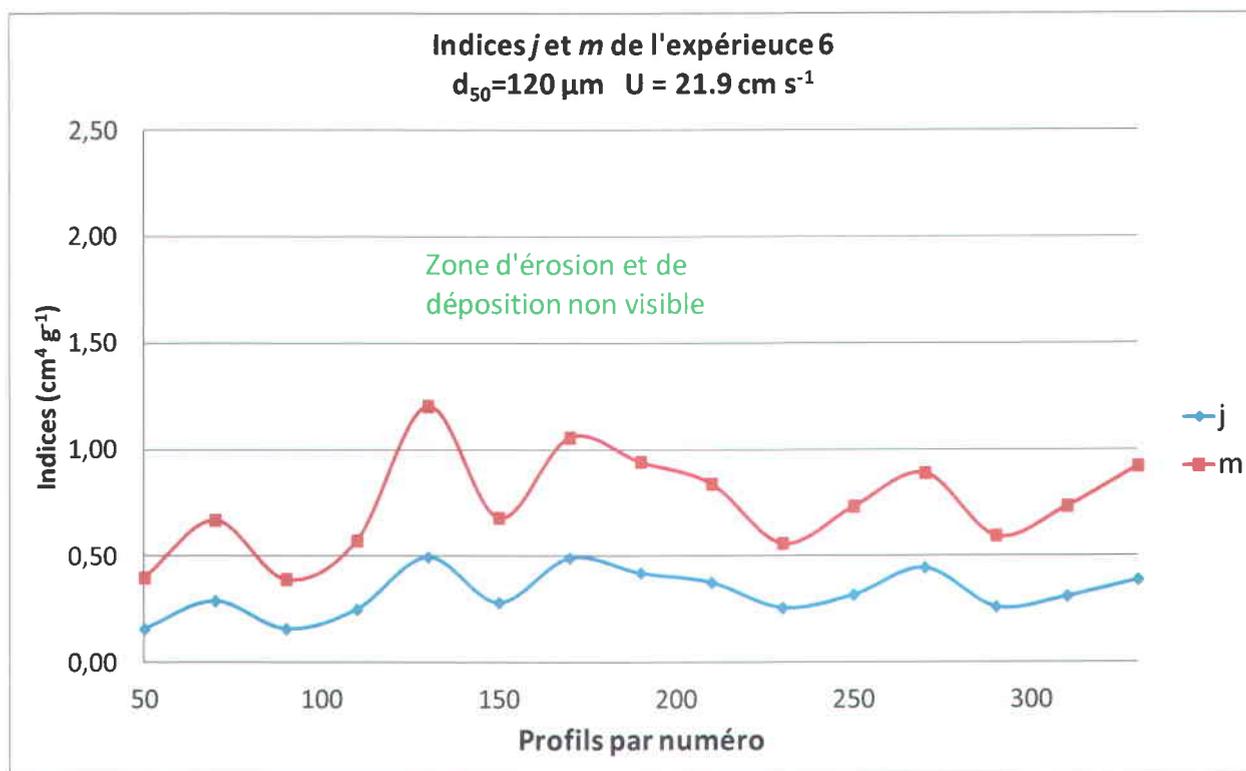
Les indices  $j$  et  $m$  (Figure 89) possèdent des valeurs maximales et minimales même en l'absence de topographie distincte. Les courbes de  $m$  et  $j$  sont de forme comparable à celles des expériences précédentes. La valeur de l'indice  $j$ , pour le plus petit courant, est inférieure à 0.50 et suit la forme et l'amplitude de l'indice  $m$ . Les indices de cette expérience présentent des similitudes avec les indices de l'expérience 4 permettant éventuellement de définir la localisation de l'érosion et de la déposition, même en l'absence de topographie distincte.



**Figure 88.** Les profils de densité 250 à 330 de l'expérience 6 sont mesurés avec les caractéristiques suivantes :  $d_{50} = 0.120 \text{ mm}$  et  $U = 21.9 \text{ cm s}^{-1}$ . (a) Élévation du point de frontière montrant la topographie de la ride, incluant en rouge les marqueurs de positions des profils. (b) Profils de densité de la colonne d'eau et du lit sédimentaire. (c) Profils de densité ne montrant que la couche de transition entre le transport en suspension et le transport par charriage.

**Tableau 23 : (a) Position et densité des points formant les paramètres sédimentologiques des profils 250 à 330 de l'expérience 6. La vitesse du fluide utilisée est de  $U = 21.9 \text{ cm s}^{-1}$  et le diamètre des sédiments est de  $d_{50} = 0.120 \text{ mm}$ . (b) Épaisseur des couches et différences de densité entre les points formant les couches. (c) Densité moyenne, indice de pente  $m$  et  $j$ , indice du rapport épaisseur sur densité moyenne de la partie supérieure de la colonne sédimentaire (d) Densité moyenne et écart-type de la partie inférieure de la colonne sédimentaire.**

a	Profil-250		Profil-270		Profil-290		Profil-310		Profil-330	
	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	élévation (mm)	$\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
POINTS / $d_{50}=120 \mu\text{m}$ / $U = 21.9 \text{ cm s}^{-1}$										
Limite supérieure de transport en suspension	113,30	1,062	117,40	1,076	110,90	1,078	117,40	1,055	116,80	1,063
Limite supérieure de la sous-couche fluide	-	-	-	-	79,65	1,209	79,65	1,209	-	-
Point de frontière	79,65	1,164	80,83	1,132	78,47	1,153	78,47	1,162	79,06	1,183
Point d'inflexion	-	-	-	-	-	-	74,34	1,922	74,34	1,866
Point de densité maximale	73,75	1,969	73,16	1,995	73,75	1,945	72,57	1,965	71,98	1,951
Limite inférieure de basse densité	73,16	1,962	69,62	1,848	69,03	1,841	71,39	1,913	68,44	1,855
b	Profil-250		Profil-270		Profil-290		Profil-310		Profil-330	
	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Épaisseur (mm)	$\Delta\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
COUCHES / $d_{50}=120 \mu\text{m}$ / $U = 21.9 \text{ cm s}^{-1}$										
Couche de transport en suspension	33,65	-	36,57	-	32,43	-	38,93	-	37,74	-
Sous-couche fluide	-	-	-	-	1,18	-	1,18	-	-	-
Couche supérieure du transport par charriage	5,90	0,805	7,67	0,863	4,72	0,792	5,90	0,803	7,08	0,768
Couche intermédiaire du transport par charriage	0,59	0,007	3,54	0,147	4,72	0,104	1,18	0,052	3,54	0,096
Sous-couche d'inflexion	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Couche inférieure du transport par charriage	46,02	-	42,48	-	41,89	-	44,25	-	41,30	-
c	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$j$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )
	1,87	0,32	1,73	0,44	1,82	0,26	1,91	0,31	1,83	0,39
	$m$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )		$m$ ( $\text{cm}^4 \text{g}^{-1}$ )	
<i>m</i> : rapport entre l'épaisseur et $\Delta\rho$										
<i>j</i> : rapport entre l'épaisseur et $\rho$ moy										
	0,733		0,889		0,596		0,735		0,922	
d	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\rho$ moy ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$\sigma$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )
	1,83	0,0790	1,83	0,0684	1,83	0,0680	1,83	0,0690	1,83	0,0705



**Figure 89.** Représentation graphique des indices  $j$  et  $m$  de l'expérience 6. L'évolution des indices est présentée en fonction des numéros de profils. L'indice  $j$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la variation de la densité dans la couche. L'indice  $m$  est le rapport entre l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et la densité moyenne dans la couche.

### 3.2.7 Regroupement des profils de densité par localisation sur la ride

Dans les figures qui suivent, les profils des expériences 1 à 5 sont regroupés en fonction de leur position sur la ride. Ceci dans le but d'observer, dans une même figure, les différences et ressemblances des profils selon les vitesses et les granulométries.

Sur la figure présentant les profils de densité localisée à la base du flanc d'érosion (Fig. 90), les profils, même pour des rides faisant partie de la même expérience, ne présentent pas de profils directement corrélés donc ayant des formes propres à une zone de la ride. Les valeurs de point de frontière, de densité maximale et la couche supérieure de transport par charriage diffèrent d'un profil à l'autre, et ceci sur l'ensemble des expériences. Par contre, il est possible d'observer à la fin de la transition qu'un point d'inflexion est présent sur l'ensemble des mesures et que les changements se produisent sur de courts intervalles de temps. Ces variations sont causées par le vortex d'érosion<sup>6</sup>, phénomène dynamique associé à des fluctuations qui se présentent sous forme de turbulences qui entourent le vortex.

Par conséquent, une section sera dédiée à l'étude des profils présents à la base du flanc d'érosion afin de trouver une corrélation entre les profils de mesure pendant le passage du vortex.

Les profils de la Fig. 91 c présentent un accroissement de la densité maximale de 1.910 vers 2.007 g cm<sup>-3</sup>, car le Profil-54 est localisé sur un point de déposition du flanc de progradation, ce qui indique l'augmentation de densité due à la compaction.

La pente de la transition dans la couche supérieure de transport par charriage augmente de façon significative lorsque que la base du flanc d'érosion approche la fenêtre de mesure. La réduction de la granulométrie entraîne une augmentation de l'indice de pente (Fig. 91). En (a), l'indice de pente passe de 1.496 à 2.304 cm cm<sup>3</sup> g<sup>-1</sup> pour un rapport 1.54 (Tab. 7) et, en (e), elle passe de 0.561 à 1.096 cm cm<sup>3</sup> g<sup>-1</sup> pour un rapport 1.95 (Tab. 20). Ces mesures présentent une corrélation inverse entre la

---

<sup>6</sup> Le vortex d'érosion est le vortex principal, responsable de l'érosion de la base, creux, du flanc d'érosion.

granulométrie et la quantité d'eau dans le mélange eau-sédiments présent dans la couche.

La comparaison entre les profils à  $t_{0s}$  et le profil suivant montre l'introduction du vortex d'érosion. Les effets montrent que la courbe met en évidence : une augmentation de la concentration, une augmentation de la pente de la transition, l'apparition d'un point d'inflexion et une diminution de la densité maximale, diminution qui s'étend dans le lit sédimentaire.

Les profils de la partie sommitale, au sommet du flanc d'érosion, présentent des points de frontière ayant des densités inférieures en (a) et (b) (Fig. 92 a et b) avec respectivement  $1.011$  et  $1.021 \text{ g cm}^{-3}$  (Tab. 6 et 10), comparativement à des valeurs variant entre  $1.097$  et  $1.153 \text{ g cm}^{-3}$  pour le reste (Tab. 10, 11, 14, 16 et 18). À ces points de frontières sont associés des points de densité maximale variant entre  $1.930$  et  $2.088 \text{ g cm}^{-3}$  (Tab. 6, 10, 11, 14, 16 et 18) en corrélation seulement avec la position sur la ride et non avec la vitesse ou la granulométrie.

Par contre, la pente de la transition dans la couche supérieure de transport par charriage (indice  $m$ ) est respectivement de  $0.385$  et  $0.383 \text{ cm cm}^3 \text{ g}^{-1}$  pour (a) et (b) et les valeurs pour une vitesse inférieure (entre  $28.8$  et  $34.7 \text{ cm s}^{-1}$ ) varient entre  $0.674$  et  $0.902 \text{ cm cm}^3 \text{ g}^{-1}$ . Donc, sur la partie sommitale d'une ride, la valeur de la pente n'est jamais supérieure à  $1.000 \text{ cm cm}^3 \text{ g}^{-1}$ . L'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage est plus mince à  $42.3 \text{ cm s}^{-1}$  qu'à  $31.0 \text{ cm s}^{-1}$  (Fig. 92 a, b et c ; pointillés). Les épaisseurs de cette couche en (a) et en (b) sont respectivement de  $3.54$  et  $4.07$  mm, comparativement à  $5.9$  mm en (c) (Tab. 6, 10 et 11).

La progression de l'érosion dans les profils localisés sur le milieu du flanc d'érosion est caractérisée par un point d'inflexion<sup>7</sup> dans la transition de la couche supérieure de

---

<sup>7</sup> Le point d'inflexion est localisé sur la transition entre le point de frontière et le point de densité maximale. Il détermine l'endroit sur le profil où la pente de la transition change radicalement. Ce changement est généralement près du point de densité maximal.

transport par charriage. L'inflexion est accompagnée d'une baisse de la densité maximale. Ainsi, les profils en (a), (c), (d) et (e) de la figure 92 présentent des densités maximales respectives de 1.907 et 1.867 g cm<sup>-3</sup>, de 1.880 et 1.846 g cm<sup>-3</sup>, de 2.089 et 2.002 g cm<sup>-3</sup>, puis de 1.935 et 1.853 g cm<sup>-3</sup>.

En comparant les profils de densité se situant sur le flanc de progradation soit ; le Profil-10 et le Profil-11 (Fig. 93 a) et le Profil-32 et le Profil-34 (Fig. 93 b) avec le Profil-24 et le Profil-28 (Fig. 93 c) il ressort que la compaction est plus faible que dans le Profil-24 et le Profil-28. La densité maximale des quatre premiers profils est respectivement de 1.965, 1.950, 1.948 et 1.964 g cm<sup>-3</sup> (Tab. 6 et Tab. 9), comparativement à des valeurs plus faible, de 1.932 et 1.875 g cm<sup>-3</sup> pour le Profil-24 et le Profil-28 (Tab. 11). Pour ces mêmes profils, il y a moins de variations de densité dans le lit sédimentaire et ces variations sont de moins grande amplitude. Les écart-types de la couche inférieure de transport par charriage sont respectivement pour les quatre premiers profils de 0.107, 0.107, 0.094 et 0.102 g cm<sup>-3</sup>, comparativement à des valeurs de 0.049 et 0.049 g cm<sup>-3</sup> pour le Profil-24 et le Profil-28, où la vitesse du courant est de 31.0 cm s<sup>-1</sup>, comparativement à 42.3 cm s<sup>-1</sup> pour les quatre premiers profils.

En générale, l'indice  $m$  (pente de la transition) est plus importante à la base du flanc de progradation  $\sim 2 \text{ cm cm}^3 \text{ g}^{-1}$  et diminue avec l'apparition du sommet du flanc de progradation  $\sim 0.3 \text{ cm cm}^3 \text{ g}^{-1}$  (Tab. 6, 9 et 11). L'indice  $m$ , la pente de la transition, est un indicateur de la compaction lors de déposition par avalanches successives.

En comparant le Profil-24 et le Profil-28 (Fig. 93 c) avec le Profil-60 et le Profil-70 (Fig. 93 d), la compaction est moins importante en surface de la ride, les densités maximales étant respectivement de 1.932 et 1.875 g cm<sup>-3</sup> en (c) et de 1.748 et 1.828 g cm<sup>-3</sup> en (d) (Tab. 14). Par contre, en (e) (Tab. 15), les densités maximales demeurent élevées (1.996 et 1.927 g cm<sup>-3</sup>) et elles le demeurent sur l'ensemble des profils de l'expérience.

La densité maximale observée sur le Profil-2 et le Profil-14 ( $d_{50} = 0.120 \text{ mm}$ ) (Fig. 93 f) est supérieure à celles obtenues précédemment avec les densités respectives de 2.017 et 1.969 g cm<sup>-3</sup> (Tab. 18). Ceci s'explique par une compaction en surface inversement proportionnelle à la granulométrie. Entre (c) et (f) l'accroissement des sédiments en suspension est inversement proportionnelle à la granulométrie (Fig. 93 c et f ; cercle).

En (d) et (f), pour des vitesses de courant similaires, une différence est observée dans la déposition de surface, qui est plus compacte et homogène pour une granulométrie de 0.120 mm que 0.200 mm. La compaction est diminuée de façon plus significative lorsque la granulométrie atteint 0.470 mm (Fig. 93 c).

Profils de masse volumique représentant la base de l'érosion

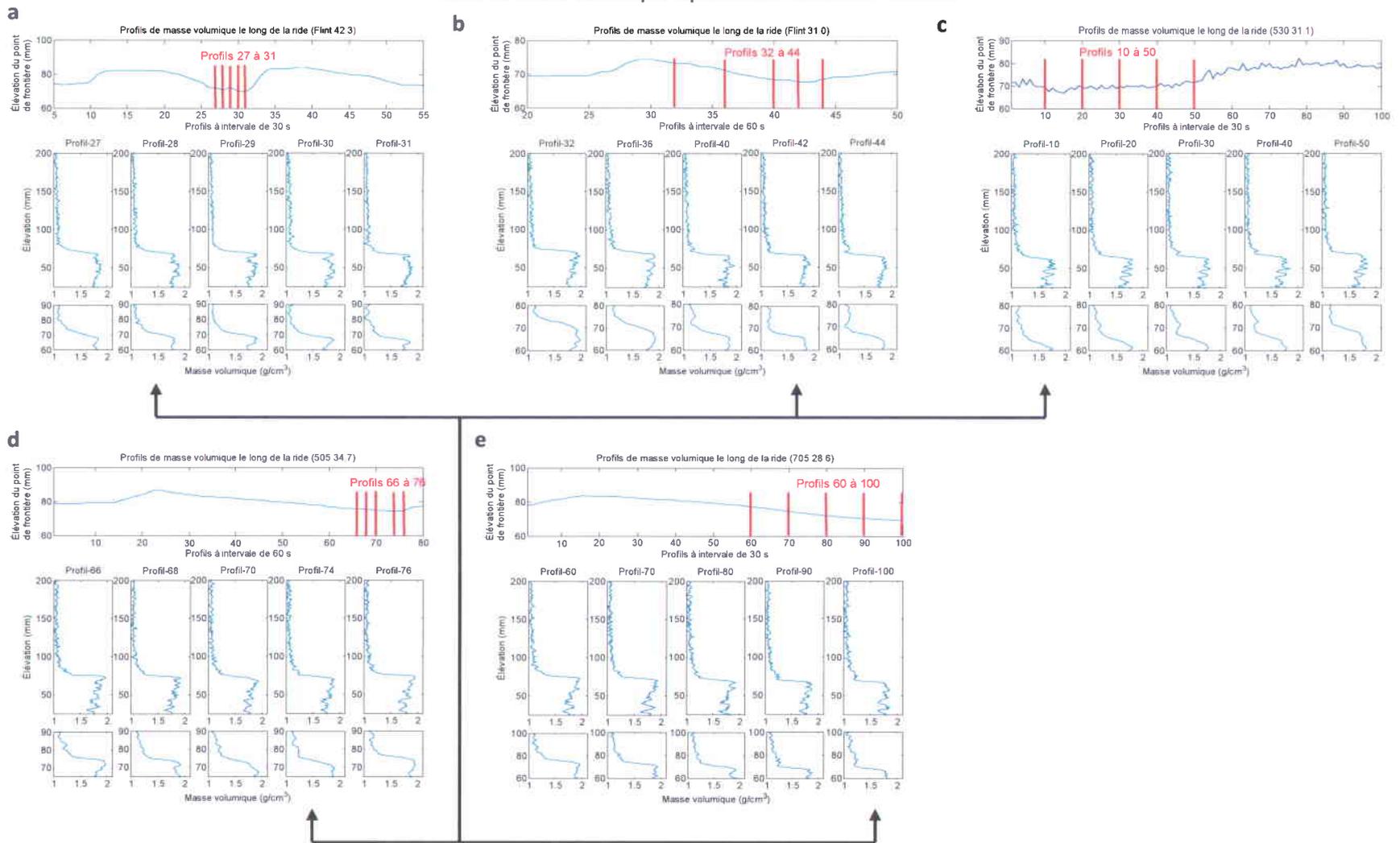
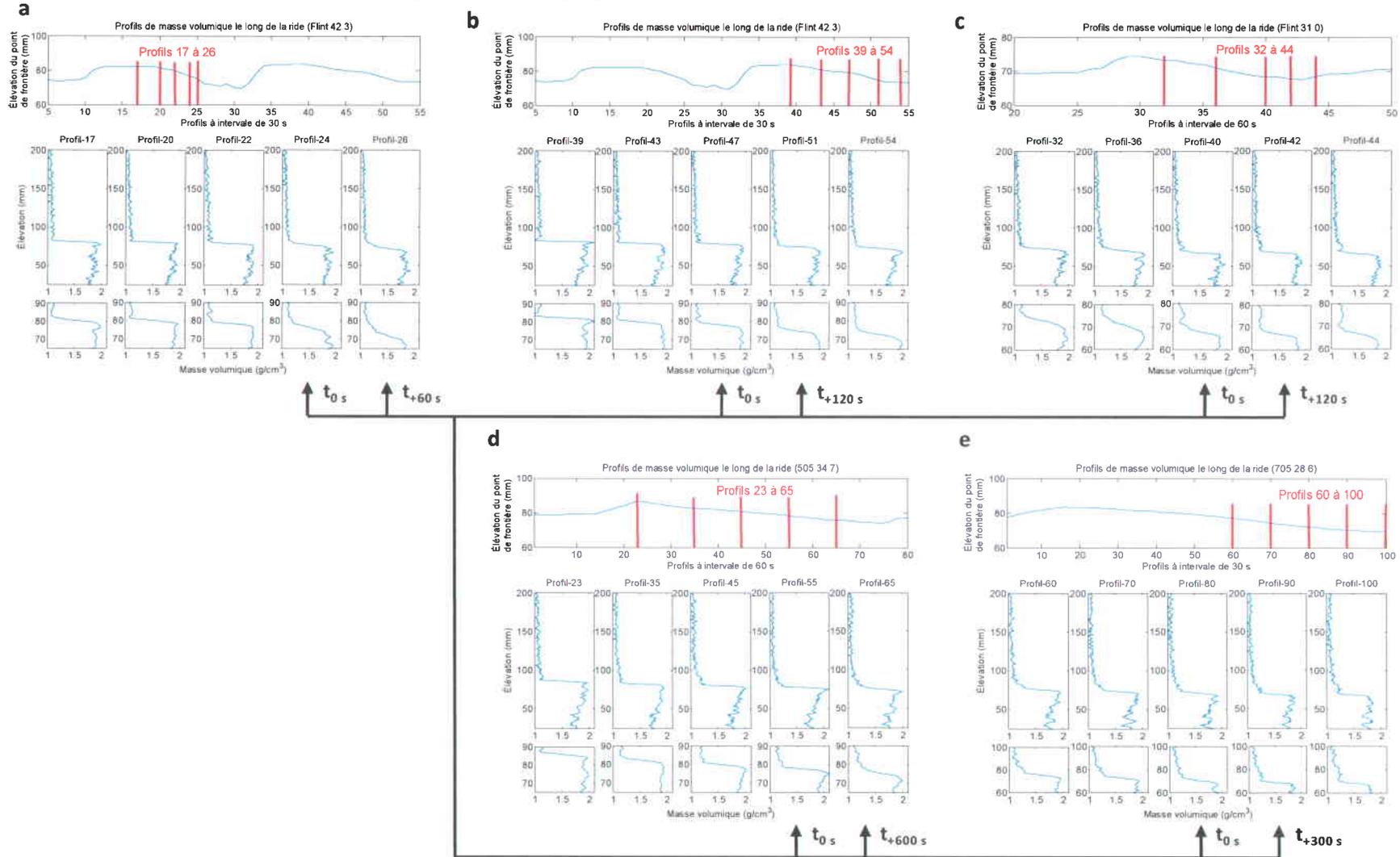


Figure 90. Figure synthèse des profils de densité représentant l'érosion à la base du flanc d'érosion, pour l'ensemble des granulométries et des vitesses de courant des expériences 1 à 5. (a) expérience 1, (b) expérience 2, (c) expérience 3, (d) expérience 4 et (e) expérience 5.

**Profils de masse volumique exprimant la progression de l'érosion du milieu vers la base du flanc d'érosion**



**Figure 91. Figure synthèse des profils de densité exprimant la progression de l'érosion du milieu vers le bas du flanc d'érosion, dans un intervalle de temps, pour l'ensemble des granulométries et des vitesses de courant des expériences 1-2 et 4-5. (a et b) expérience 1, (c) expérience 2, (d) expérience 4 et (e) expérience 5.**

Profils de masse volumique représentant la partie sommitale de l'érosion

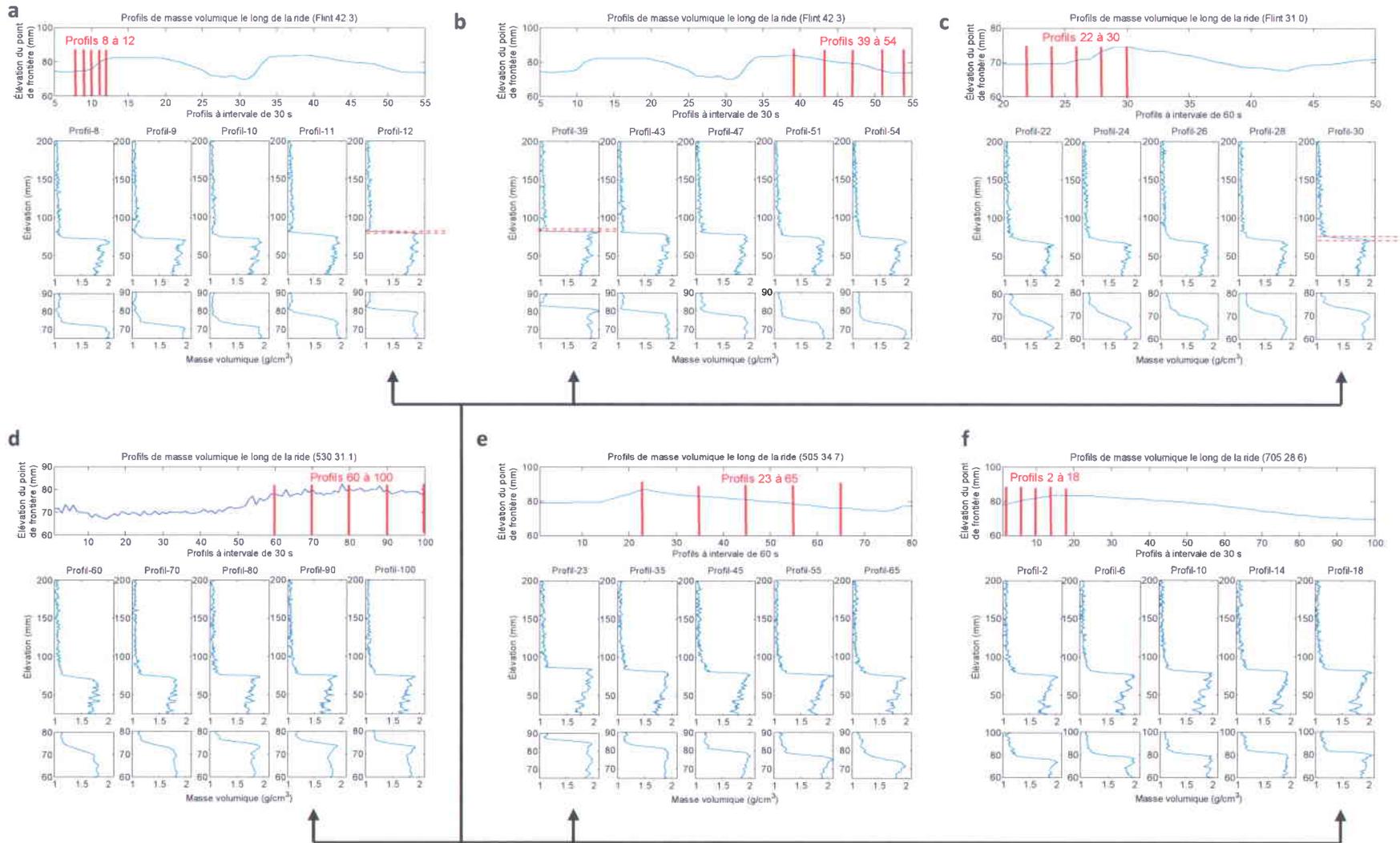
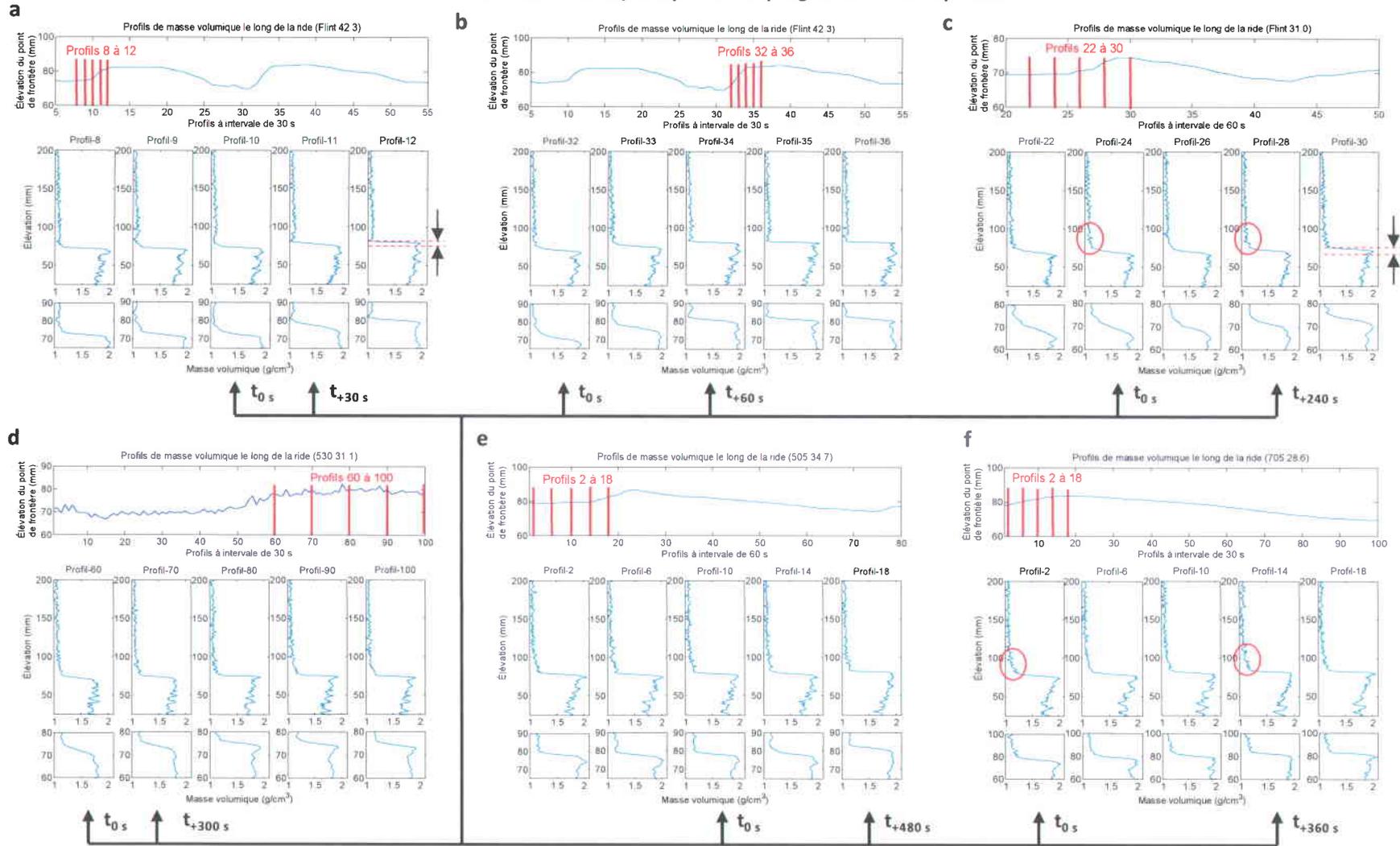


Figure 92. Figure synthèse des profils de densité représentant l'érosion de la partie sommitale, pour l'ensemble des granulométries et des vitesses de courant des expériences 1 à 5. (a et b) expérience 1, (c) expérience 2, (d) expérience 3, (e) expérience 4 et (f) expérience 5.

### Profil de masse volumique exprimant la progression de la déposition



**Figure 93.** Figure synthèse des profils de densité exprimant la progression de la déposition dans un intervalle de temps, pour l'ensemble des granulométries et des vitesses de courant des expériences 1 à 5. (a et b) expérience 1, (c) expérience 2, (d) expérience 3, (e) expérience 4 et (f) expérience 5.

### **3.3 Mesure des profils de densité à la base du transport**

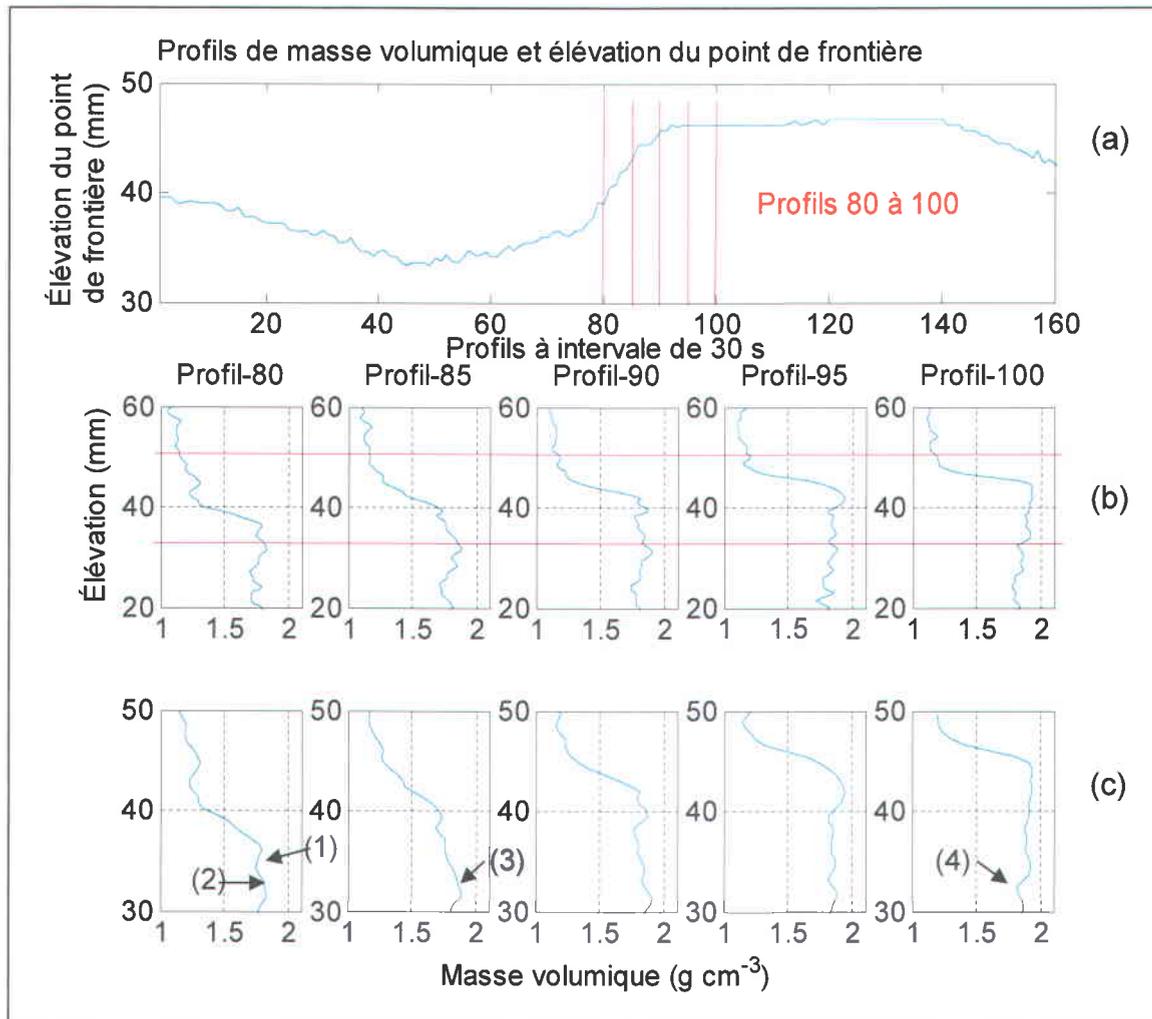
#### **3.3.1 Introduction**

Suivant les mesures réalisées sur les profils, il est apparu, à la base du flanc d'érosion que la densité maximale du profil diminuait et que l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage est à son épaisseur maximale. Par conséquent, cette section de la ride sera étudiée afin de déterminer les causes de cette réduction de densité, s'opérant en profondeur via la couche de transport par charriage.

Afin de raffiner l'analyse des profils de densité localisés à la base du flanc d'érosion, un jeu de données indépendant ayant une granulométrie et une vitesse similaire à l'expérience 2 est étudié. L'intervalle de temps, séparant les profils, est de 30 secondes, comparativement à 60 secondes pour l'expérience 2. Ce qui permet une meilleure résolution temporelle.

#### **3.3.2 Flanc d'avalanches**

Les profils 80 à 100 mesurés sur le flanc d'avalanches permettent de constater que la déposition de sédiments est caractérisée par une augmentation de la densité du point maximal de  $1.737 \text{ g cm}^{-3}$  au Profil-85 jusqu'à une valeur de  $1.932 \text{ g cm}^{-3}$  au Profil-100. Lors de la progradation de la ride, il y a compaction de la colonne sédimentaire (profils 80 à 100) sur toute son épaisseur (Profil-100). Une homogénéisation de la colonne sédimentaire entre le Profil-95 et le Profil-100 indique que l'eau est expulsée par la progradation. Par contre, une partie du fluide est poussée plus profondément dans la ride, flèches 3 et 4 (Fig. 94 c), phénomène probablement induit par l'inertie et la masse du fluide.



**Figure 94.** Profils de densité 80 à 100 mesurée dans la zone de recirculation, à la base du flanc d'érosion avec  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 29.7$  cm s<sup>-1</sup>. Les profils (a) sont séparés par un intervalle de temps de 30 secondes et présentés par des pas de 5, pour un espacement de 150 secondes entre les mesures présentées en (b) et (c), où (1 à 4) pointent la pénétration de l'eau dans la matrice sédimentaire. Les lignes horizontales en (b) délimitent la zone de recirculation.

### 3.3.3 Flanc de progradation

Entre la base du flanc d'avalanches et la base du flanc de progradation se trouvent les profils 55 à 75. Les profils 55 à 65 présentent une évolution de la forme de la couche de transport en suspension (Fig. 95 c) indiquant des fluctuations dans la colonne d'eau. De plus, la couche supérieure de transport par charriage varie en fonction des avalanches. Entre le Profil-60 et le Profil-65, il y a un transfert dans le milieu hydraulique caractérisé par une réduction des sédiments en suspension et une augmentation de l'épaisseur de

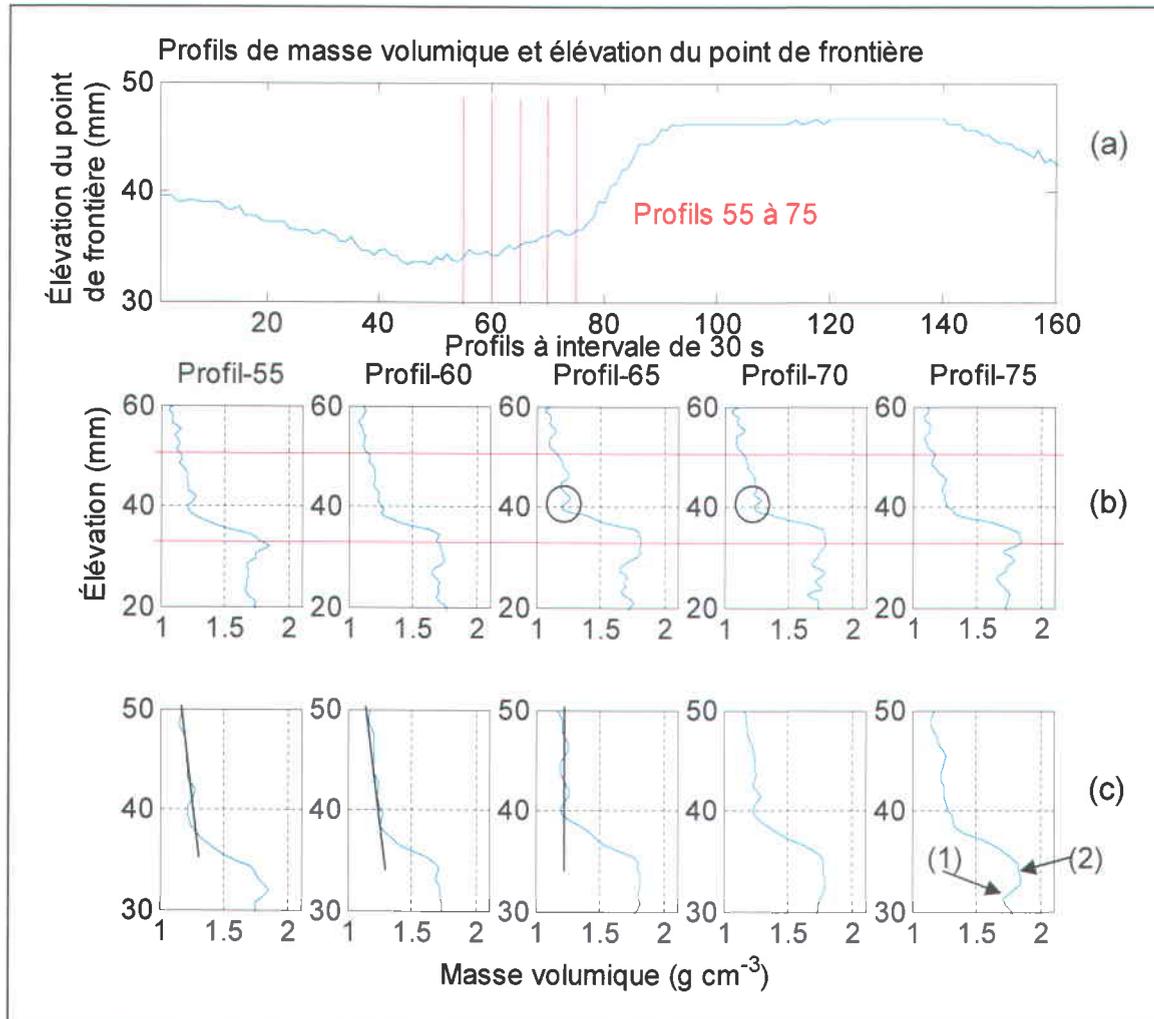
la couche supérieure de transport par charriage qui contient les sédiments nouvellement déposés. Le passage entre ces profils laisse apparaître une diminution de la densité au point de frontière de 1.249 à 1.192 g cm<sup>-3</sup>. Cette diminution est accompagnée d'une augmentation de la densité du point de densité maximale (Fig. 96 a). Le dépôt sédimentaire est associé à une élévation de la surface de la ride *stricto sensu* et ce même si le point de frontière est de densités similaires variant entre 1.204 et 1.249 g cm<sup>-3</sup>. Une compaction des sédiments apparaît entre le Profil-60 et le Profil-62, sur une durée de 60 secondes qui se traduit ensuite par une élévation de la surface de la ride, accompagnée d'une augmentation de la densité (1.709 à 1.788 g cm<sup>-3</sup>). L'ensemble de ces phénomènes indiquent une diminution de la quantité d'eau dans le sédiment et par conséquent à l'augmentation de la compaction observée à la Fig. 94.

#### ***Préambule à la discussion***

À la figure 96, la déposition de sédiments entre le Profil-62 et le Profil-64 est accompagnée d'une augmentation de la densité de 1.709 vers 1.788 g cm<sup>-3</sup>. La densité dans la couche de transport en suspension augmente jusqu'à 1.311 g cm<sup>-3</sup> sur 4.13 mm. À partir de ce profil, le vortex intervient dans la dynamique de création de la ride.

Durant les 150 secondes séparant le Profil-70 et le Profil-75, une augmentation de la densité du point maximal se produit. Elle passe de 1.781 à 1.829 g cm<sup>-3</sup> et est associée à une baisse de l'élévation du point de 34.81 à 34.22 mm. Sous ce point, la densité de la couche intermédiaire de transport par charriage diminue à 1.713 g cm<sup>-3</sup>, indiquant une augmentation du volume d'eau dans la matrice sédimentaire.

Les fluctuations de densité dans la couche inférieure de transport par charriage entre le Profil-80 (Fig. 94) et le Profil-75 (Fig. 95) indiquent une migration du fluide caractérisée par une faible densité du mélange eau-sédiments se dirigeant de l'élévation 1 (Fig. 95 c; flèche) vers l'élévation 2 (Fig. 94 c; flèche).



**Figure 95.** Profils de densité 55 à 75 mesurée dans la zone de recirculation, à la base du flanc d'érosion avec  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 29.7$  cm s<sup>-1</sup>. Les profils (a) sont séparés par un intervalle de temps de 30 secondes et présentés par pas de 5, pour un espacement de 150 secondes entre les mesures présentées en (b) et (c). Les lignes horizontales en (b) délimitent la zone de recirculation. Les barres noires montrent l'évolution de la suspension. En 1, l'eau pénètre dans la matrice par rapport au profil précédant et en 2, il y a compaction du lit, au dessus de l'eau présent dans la matrice.

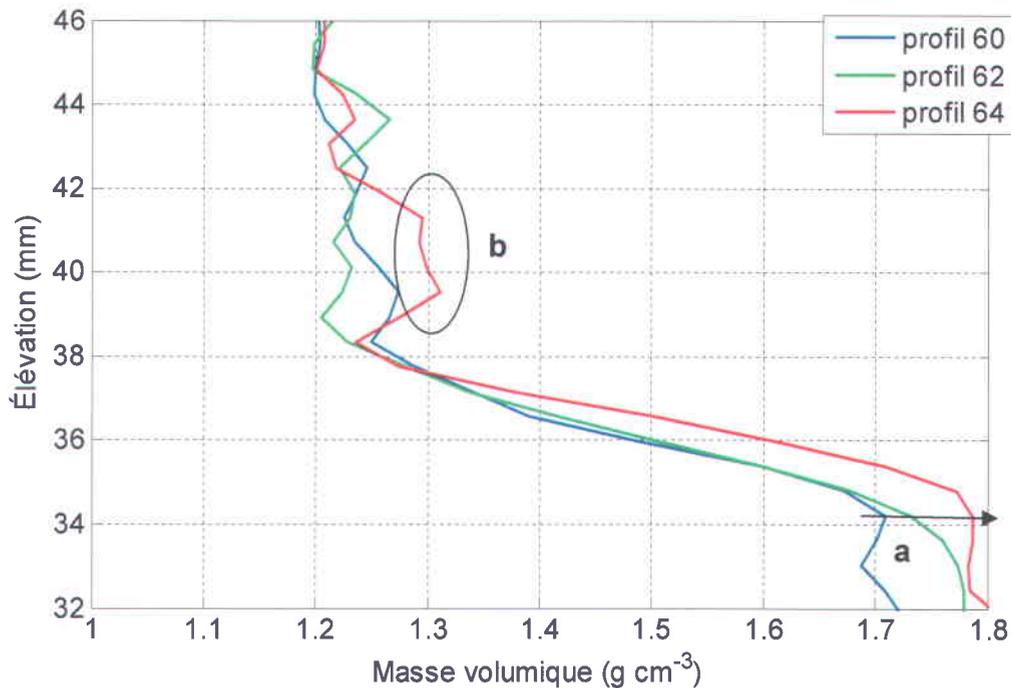
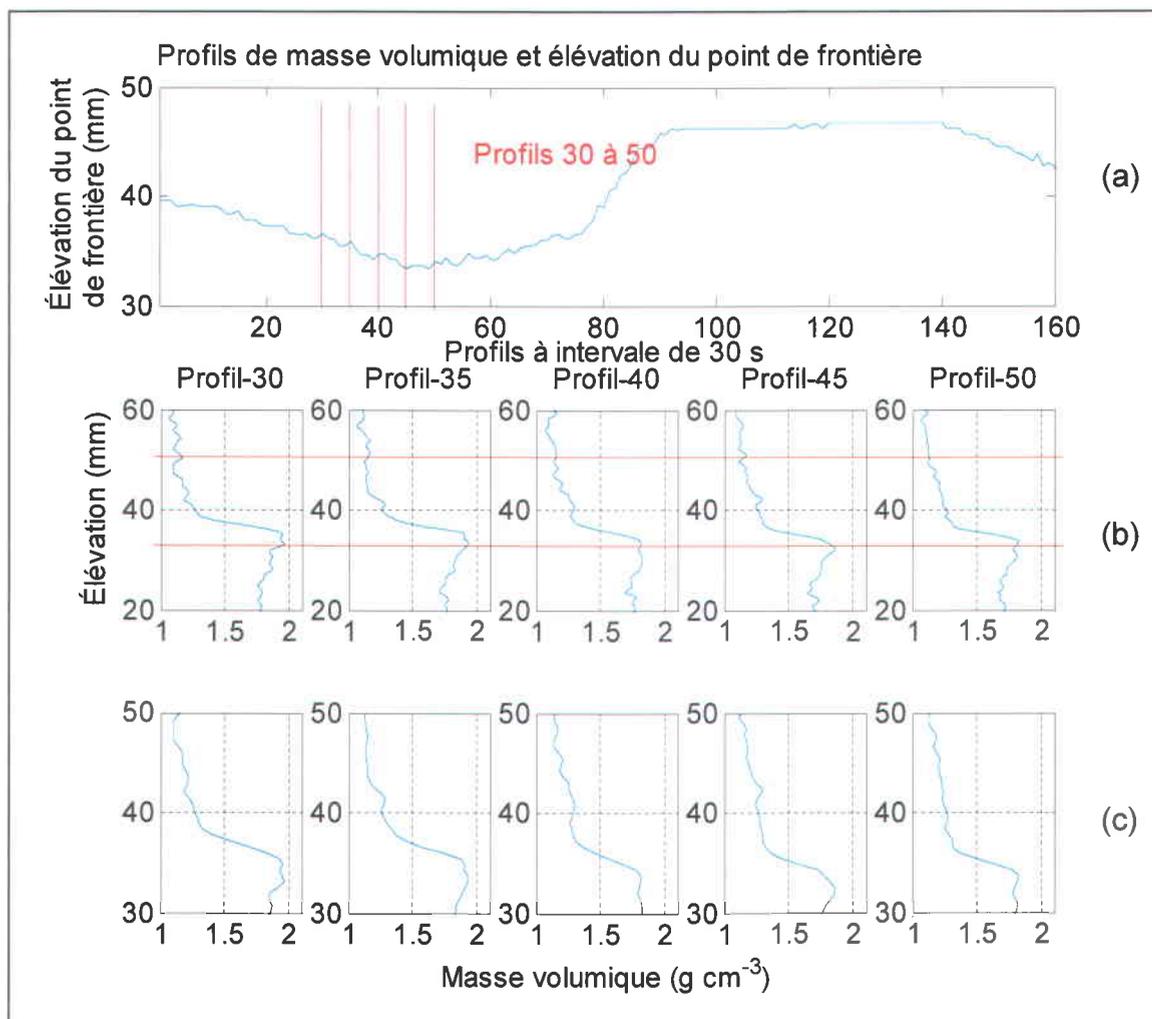


Figure 96. Profils de densité 60, 62 et 64, mesurés à droite de la partie creuse de la zone de recirculation, à la base du flanc d'érosion avec  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 29.7$  cm s<sup>-1</sup>. Les profils sont séparés de 60 secondes. (a) Déposition de sédiments entre le Profil-62 et le Profil-64, accompagnée d'une augmentation de la densité de 1.709 vers 1.788 g cm<sup>-3</sup>. (b) Augmentation de la densité à la base de la couche de transport en suspension (1.311 g cm<sup>-3</sup>) sur une épaisseur de 4.13 mm.

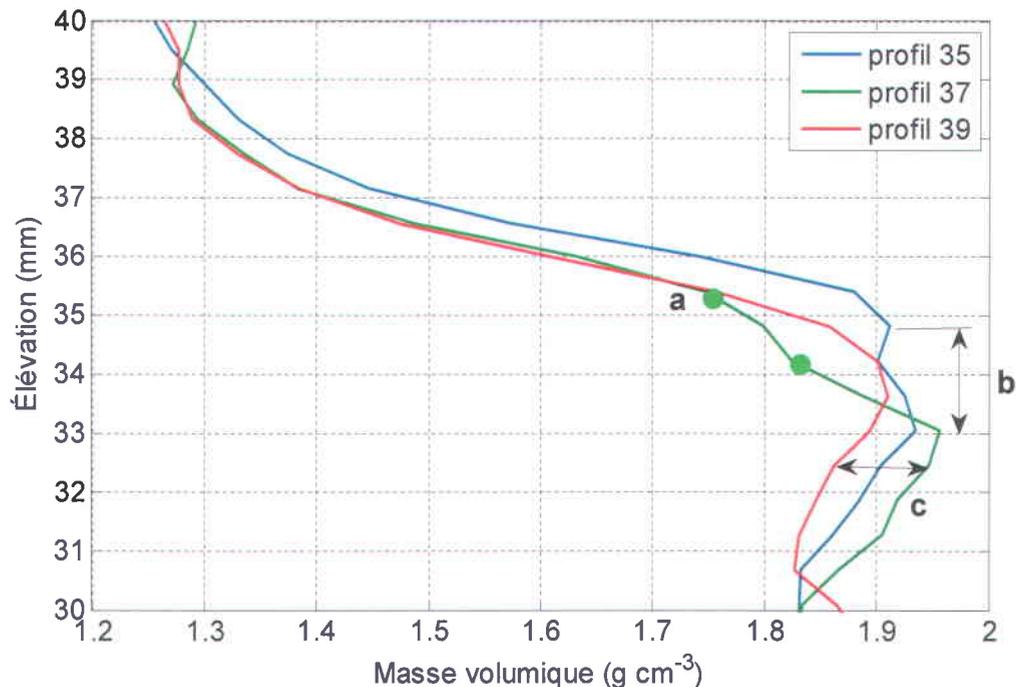
### 3.3.4 Flanc d'érosion

Les profils de densité 30 à 50 s'arrêtent sur la limite entre le flanc d'érosion et le flanc de progradation. La limite est localisée sur le Profil-45 (Fig. 97), où le point de frontière et le point de densité maximale sont à leur plus bas (33.4 mm et 29.0 mm). Le Profil-35 et du Profil-40 révèlent une érosion rapide de la ride. Une analyse plus précise (Fig. 98) révèle que l'érosion entre les profils 35 à 37 n'est pas constante le long de la transition entre le point de frontière et le point de densité maximale. Le point de densité maximale localisée à 34.81 mm (1.913 g cm<sup>-3</sup>) descend jusqu'à 33.04 mm (1.956 g cm<sup>-3</sup>) (Fig. 98 b). De plus, le profil d'érosion présent au Profil-37 renferme un double point d'inflexion (Fig. 98; point vert), indiquant une baisse de la densité en rapport avec une entrée d'eau dans la matrice sédimentaire.

Entre le Profil-37 et le Profil-39, l'érosion est absente dans la couche supérieure de transport par charriage jusqu'à l'atteinte d'une densité de  $1.757 \text{ g cm}^{-3}$  et d'une élévation de 35.4 mm (Fig. 98; point vert en a). Ainsi passé le point (a) la densité du point de densité maximale du Profil-37 ( $1.956 \text{ g cm}^{-3}$ ) diminue durant les 60 secondes le séparant du Profil-39. Cette diminution de la densité est associée à une élévation du point qui passe de 33.04 mm à 33.69 mm. Ce phénomène est accompagné de la disparition du point d'inflexion double et d'une diminution de la densité dans la couche intermédiaire de transport par charriage (Fig. 98 c).



**Figure 97.** Profils de densité 30 à 50 mesurée dans la zone de recirculation, à la base du flanc d'érosion avec  $d_{50} = 0.470 \text{ mm}$  et  $U = 29.7 \text{ cm s}^{-1}$ . Les profils (a) sont séparés par un intervalle de temps de 30 secondes et présentés par pas de 5, pour un espacement de 150 secondes entre les mesures présentées en (b) et (c). Les lignes horizontales en (b) délimitent la zone de recirculation.



**Figure 98.** Profils de densité 35, 37 et 39 mesurée à gauche de la partie creuse de la zone de recirculation, à la base du flanc d'érosion avec  $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 29.7$  cm s<sup>-1</sup>. Les profils sont séparés par 60 secondes. (a) Absence d'érosion entre le Profil-37 et Profil-39 jusqu'à l'atteinte de densité de 1.757 g cm<sup>-3</sup> à une élévation de 35.4 mm et apparition d'un double point d'inflexion (point vert). (b) Diminution du point de densité maximale de 1.14 mm. (c) Fluctuations de la densité entre les profils 37, 35 et 39 (entre 1.862 et 1.947 g cm<sup>-3</sup>).

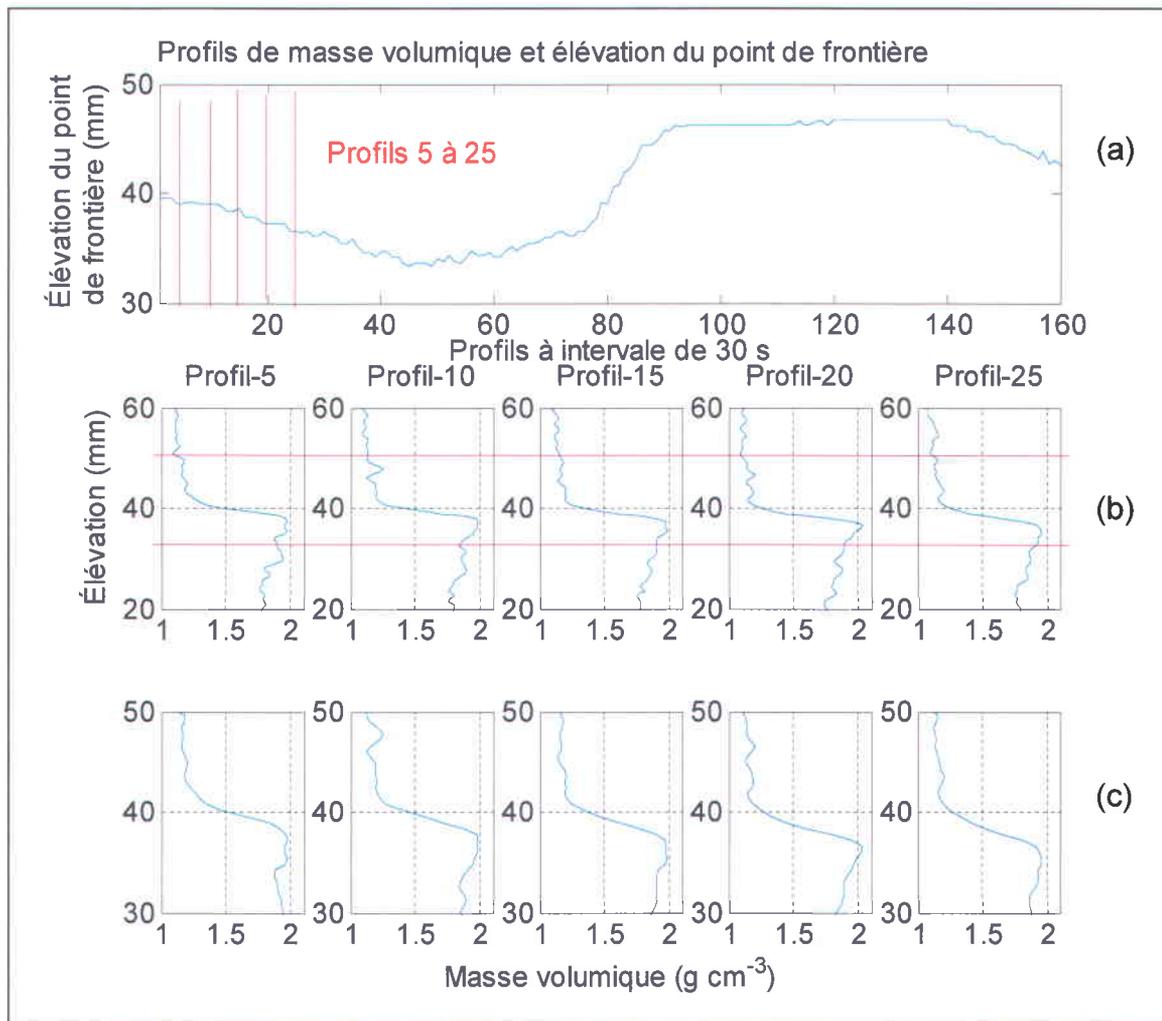
Les profils 5 à 15 (Fig. 99) mettent en évidence des transitions de densité de la couche supérieure de transport par charriage similaire entre 0.873 et 0.907 g cm<sup>-3</sup>. Par contre, la densité du point de frontière (1.070 à 1.062 g cm<sup>-3</sup> en passant par 1.038 g cm<sup>-3</sup>) indique des fluctuations associées à une baisse de la concentration du matérielle en suspension au-dessus de la couche supérieure de transport par charriage. Au Profil-20 et au Profil-25, une première diminution de la valeur du point de densité maximale s'observent, elle passe de 1.931 et 1.917 g cm<sup>-3</sup>.

#### *Préambule à la discussion*

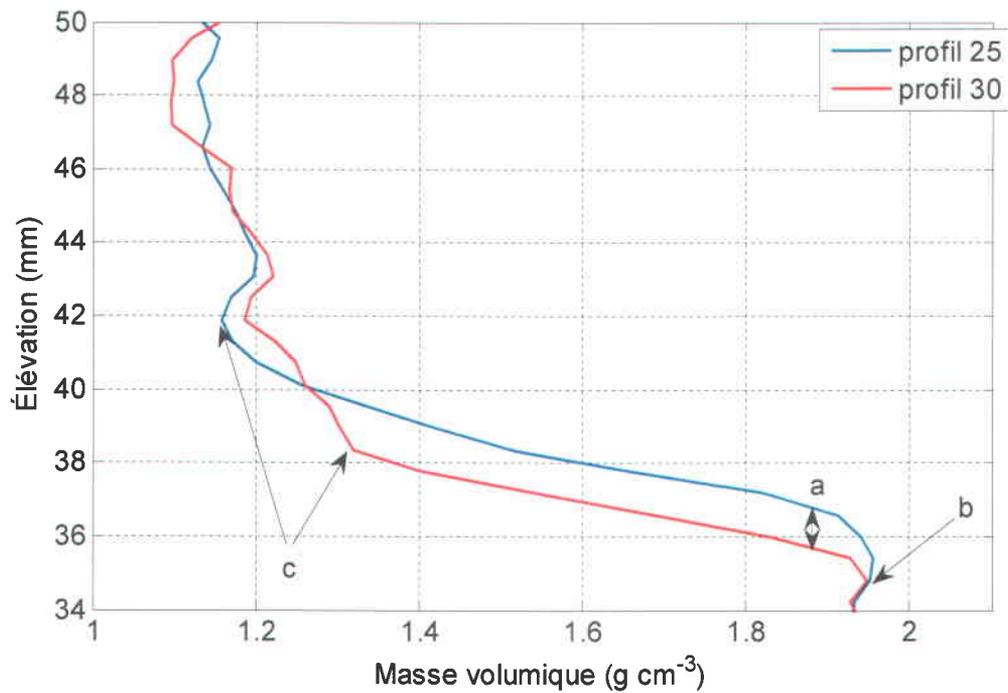
Durant les 150 secondes séparant le Profil-25 et le Profil-30 (Fig. 100), une érosion sur une épaisseur de 1.27 mm se produit, à l'extrémité de la couche de transport par charriage (Fig. 100 (a)). La densité indiquée par la flèche (b) indique que la densité demeure à 1.952 g cm<sup>-3</sup>, ce qui correspond à une stabilité de la couche de transport par

charriage intermédiaire, et ce même si l'élévation du point de frontière diminue de 41.89 mm pour atteindre une élévation de 38.35 mm. Cet abaissement de l'élévation est combiné à une augmentation de densité au point de frontière, passant de 1.158 vers 1.318 g cm<sup>-3</sup>. Ces dernières valeurs indiquent un accroissement de la quantité de sédiments dans la couche de transport en suspension sans toutefois affecter à la surface de la ride *stricto sensu*.

Sur l'ensemble des profils mesurés se présente une variation de la densité en forme de zigzag située entre le point de densité maximale et la base du canal. Ces variations sont causées soit par la construction de nouvelle ride par-dessus les rides précédentes ou soit par la force d'entraînement du fluide agissant profondément dans la ride.



**Figure 99.** Profils de densité 5 à 25 mesurée dans la zone de recirculation, à la base du flanc d'érosion. Les profils (a) sont séparés par un intervalle de temps de 30 secondes et présentés par pas de 5, pour un espacement de 150 secondes entre les mesures présentées en (b) et (c). Les lignes horizontales en (b) délimitent la zone de recirculation.



**Figure 100.** Profils de densité 25 à 30, mesurée au début de la zone de recirculation, à la base du flanc d'érosion. Les profils sont séparés de 150 secondes. (a) Érosion de 1.27 mm dans la couche de transport par charriage. (b) Densité constante ( $1.952 \text{ g cm}^{-3}$ ). (c) Diminution de l'élévation du point de frontière (41.89 mm vers 38.35 mm) et augmentation de sa densité ( $1.158$  vers  $1.318 \text{ g cm}^{-3}$ ).

## 3.4 Localisation du point de densité maximale

### 3.4.1 Introduction

L'analyse des profils de densité localisés sur le flanc d'avalanches, à la base du flanc de progradation et à la base du flanc d'érosion indique que l'évolution de l'élévation du point de densité maximale se fait de manière discontinue mais similaire d'une ride à l'autre.

### 3.4.2 Résultats

Pour l'expérience 7 (Fig. 101), l'élévation du point de densité maximale décroît le long de la ligne de tendance jusqu'à atteindre une discontinuité au Profil-30, après 900 secondes. Ensuite, l'élévation du point décroît rapidement (b) jusqu'à une élévation minimale de 32.6 mm. Puis l'élévation forme un plateau (c) constant, d'environ 240 secondes, sur la zone la plus basse de la ride, sous le vortex. Ensuite, la tendance (d) s'inverse et l'élévation du point augmente en fonction du temps sur une période d'environ 660 secondes. Cette période correspond à la base du flanc de progradation, proche de la base du flanc d'avalanches. La figure 101 (dans le cercle e) présente une discontinuité dans la variation de la profondeur du point de densité maximale de la zone d'avalanches. Par contre, elle n'est pas apparente au point de frontière.

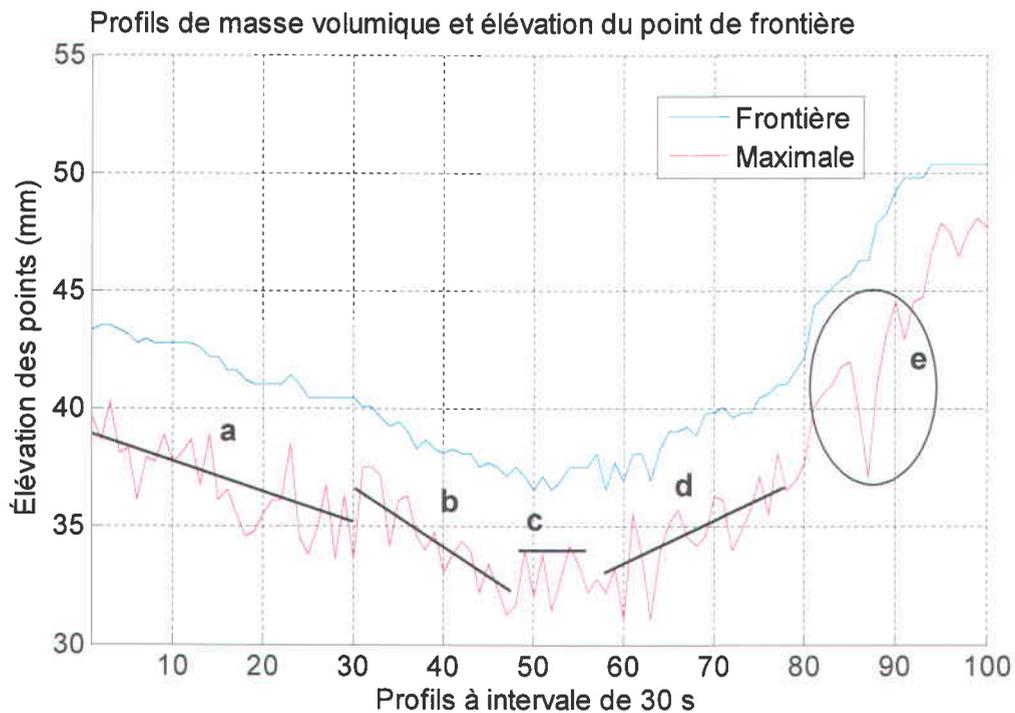
L'analyse des expériences 1, 4 et 5 (Fig. 102 à 104) confirme que l'élévation du point de densité maximale tend à évoluer suivant les quatre tendances (a, b, c et d) qui apparaissent indépendamment de la granulométrie ou de la vitesse du fluide.

La comparaison des expériences 1 et 7, met en évidence que pour une même granulométrie, mais pour des vitesses de courant différentes, les taux de variation de l'élévation en fonction du temps exprimé par la pente  $m$  en  $\text{mm s}^{-1}$  est beaucoup plus importante à  $0,067 \text{ mm s}^{-1}$  qu'à  $0.04 \text{ mm s}^{-1}$ , ce qui est en corrélation avec les courants respectifs de  $42.3 \text{ cm s}^{-1}$  et  $29.7 \text{ cm s}^{-1}$  (Tab. 24) et en accord avec la migration de la ride.

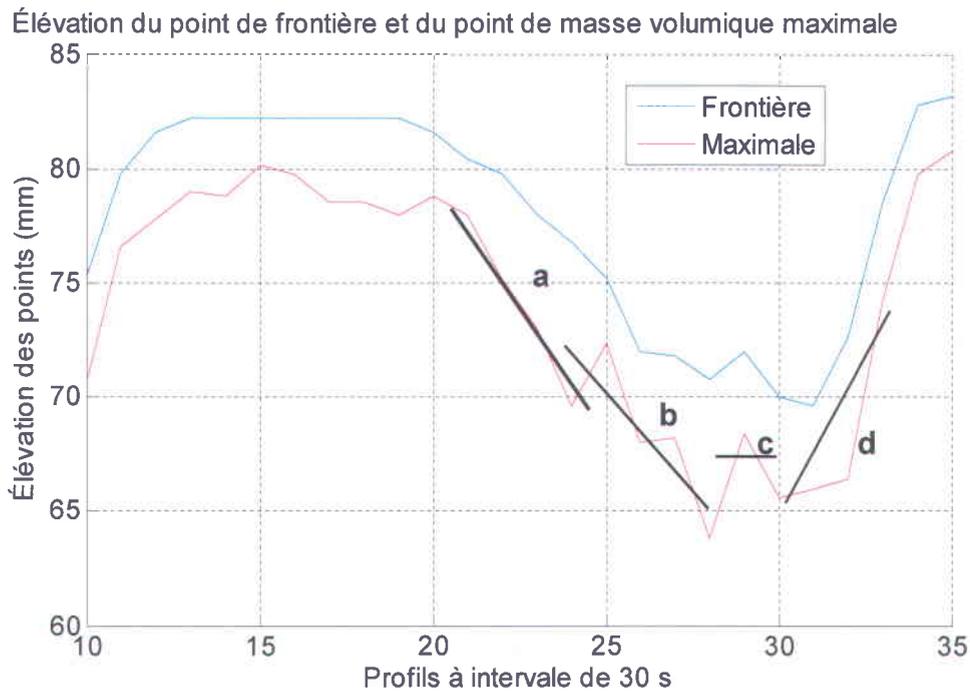
La discontinuité dans la section d'avalanches de la ride (e) et le plateau (c) seront discutés car plus tard ils se retrouvent dans plusieurs expériences et ne semblent pas s'expliquer du point de vue topographique mais plutôt du point de vue hydraulique.

**Tableau 24 : Mesure de la différence d'élévation  $\Delta h$ , de la différence de temps  $\Delta t$ , ainsi que la pente  $m$  pour les quatre types de tendance présentés aux figures 101 à 104.**

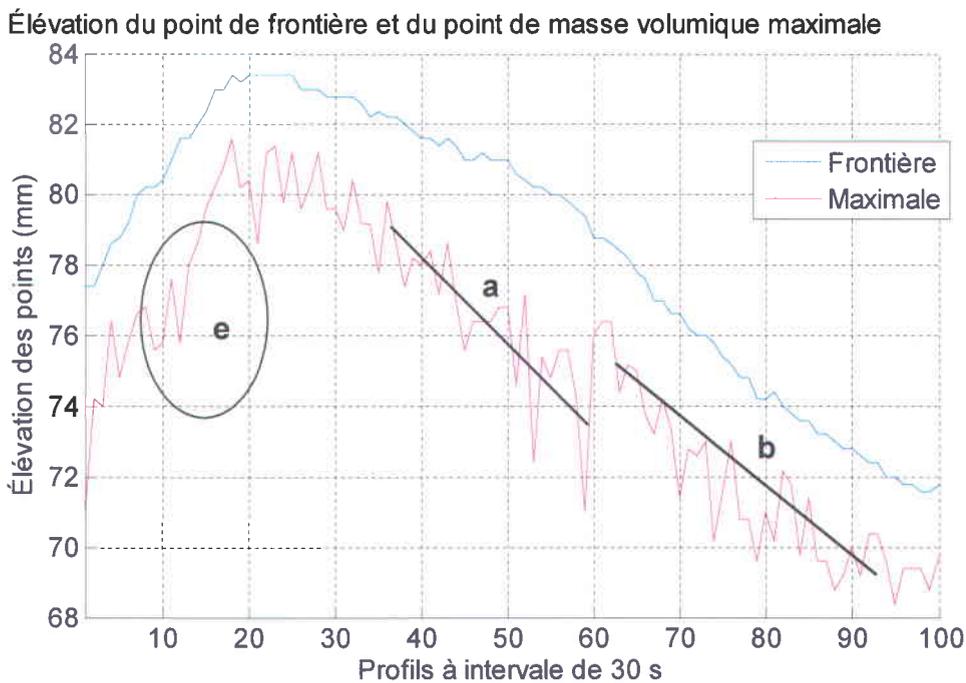
Expérience	$d_{50}$ (mm)	$U$ (cm s <sup>-1</sup> )	a			b			c			d		
			$\Delta h$ (mm)	$\Delta t$ (s)	$m$ (mm s <sup>-1</sup> )	$\Delta h$ (mm)	$\Delta t$ (s)	$m$ (mm s <sup>-1</sup> )	$\Delta h$ (mm)	$\Delta t$ (s)	$m$ (mm s <sup>-1</sup> )	$\Delta h$ (mm)	$\Delta t$ (s)	$m$ (mm s <sup>-1</sup> )
1	0,470	42,3	8	120	0,067	6	120	0,050	0	60	0,000	9	90	0,100
4	0,200	34,7	5	840	0,006	10	1980	0,005	0	300	0,000	1	120	0,008
5	0,120	28,6	5,5	720	0,008	6	1050	0,006	0	150	0,000	n/d	n/d	n/d
7	0,470	29,7	4	900	0,004	4	510	0,008	0	300	0,000	4	960	0,004



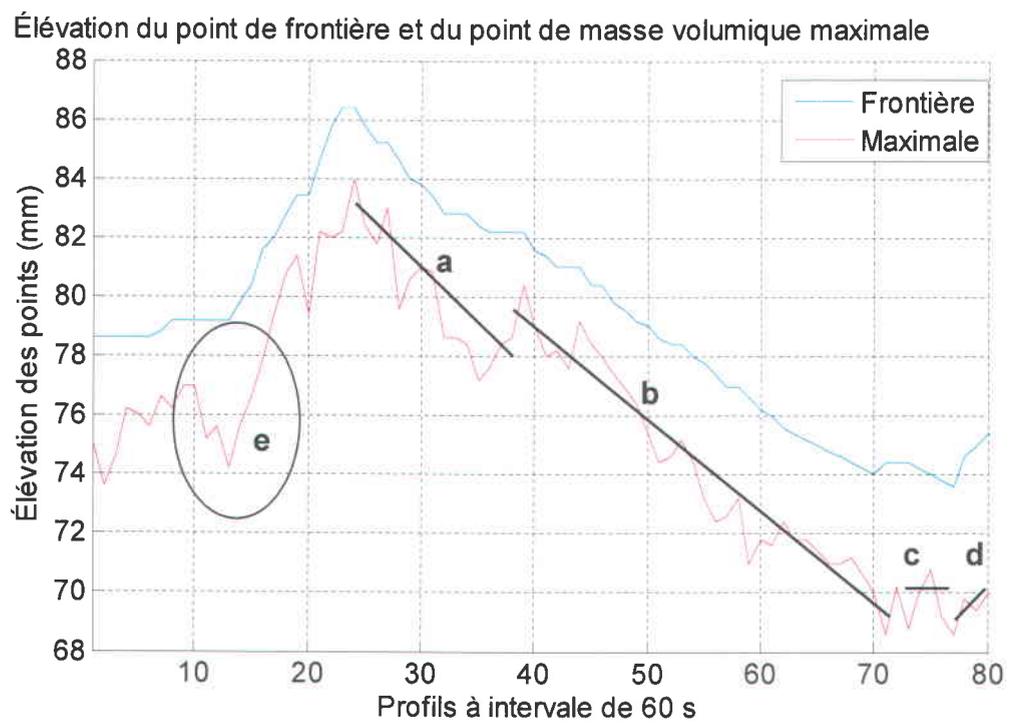
**Figure 101. Représentation graphique de l'élévation du point de frontière et du point de densité maximale de l'expérience 7. La granulométrie est de 0.470 mm et la vitesse de 29.7 cm s<sup>-1</sup>. Les lignes noires sont des indicateurs visuels permettant de définir des zones d'évolution mais aussi des discontinuités qui se répètent sur toutes les expériences. Le cercle indique une variation typique qui se retrouve au flanc de progradation.**



**Figure 102.** Représentation graphique de l'élévation du point de frontière et du point de densité maximale de l'expérience 1. La granulométrie est de 0.470 mm et la vitesse de  $42.3 \text{ cm s}^{-1}$ .



**Figure 103.** Représentation graphique de l'élévation du point de frontière et du point de densité maximale de l'expérience 5. La granulométrie est de 0.120 mm et la vitesse de  $28.6 \text{ cm s}^{-1}$ .



**Figure 104.** Représentation graphique de l'élévation du point de frontière et du point de densité maximale de l'expérience 4. La granulométrie est de 0.200 mm et la vitesse de 34.7 cm s<sup>-1</sup>.

## 3.5 Valeur du point de densité maximale

### 3.5.1 Introduction

Une expérience conduite par Montreuil (2006) sous un courant stationnaire de  $U = 25 \text{ cm s}^{-1}$ , et une granulométrie  $d_{50} = 0.370 \text{ mm}$ , à l'intérieur d'un canal à boucle fermée a révélé un point de densité maximale élevé à un point spécifique de la rive (Fig. 105). Le scanographe est utilisé selon la technique de mesure de volume global.

Le point de densité maximale le plus élevé, mesuré à la base de la couche supérieure de transport par charriage, augmente de  $1.68 \text{ g cm}^{-3}$  à la base du flanc d'érosion jusqu'au point maximum de  $2.06 \text{ g cm}^{-3}$  ("*Maximumpoint*"). Ce point est situé là où la pression hydraulique est maximale (Middleton & Southard, 1977) (Fig. 7). Pour le reste du flanc d'érosion, la densité du point diminue jusqu'à  $1.760 \text{ g cm}^{-3}$ , jusqu'au point de rupture (moyenne de  $1.840 \text{ g cm}^{-3}$  et écart-type de  $0.072 \text{ g cm}^{-3}$ ). Entre les points de rupture et la base de la sédimentation, la densité se stabilise entre deux séquences d'avalanches (moyenne  $1.766 \text{ g cm}^{-3}$  et écart-type de  $0.030 \text{ g cm}^{-3}$ ). Entre le point sommital et le point de rupture, la densité varie (valeur min :  $1.720 \text{ g cm}^{-3}$ , valeur max :  $1.840 \text{ g cm}^{-3}$  : et une valeur moyenne de  $1.766 \text{ g cm}^{-3}$ ).

Les mesures suivantes permettront de discuter si le point est ponctuel<sup>8</sup> et le cas échéant de sa pertinence.

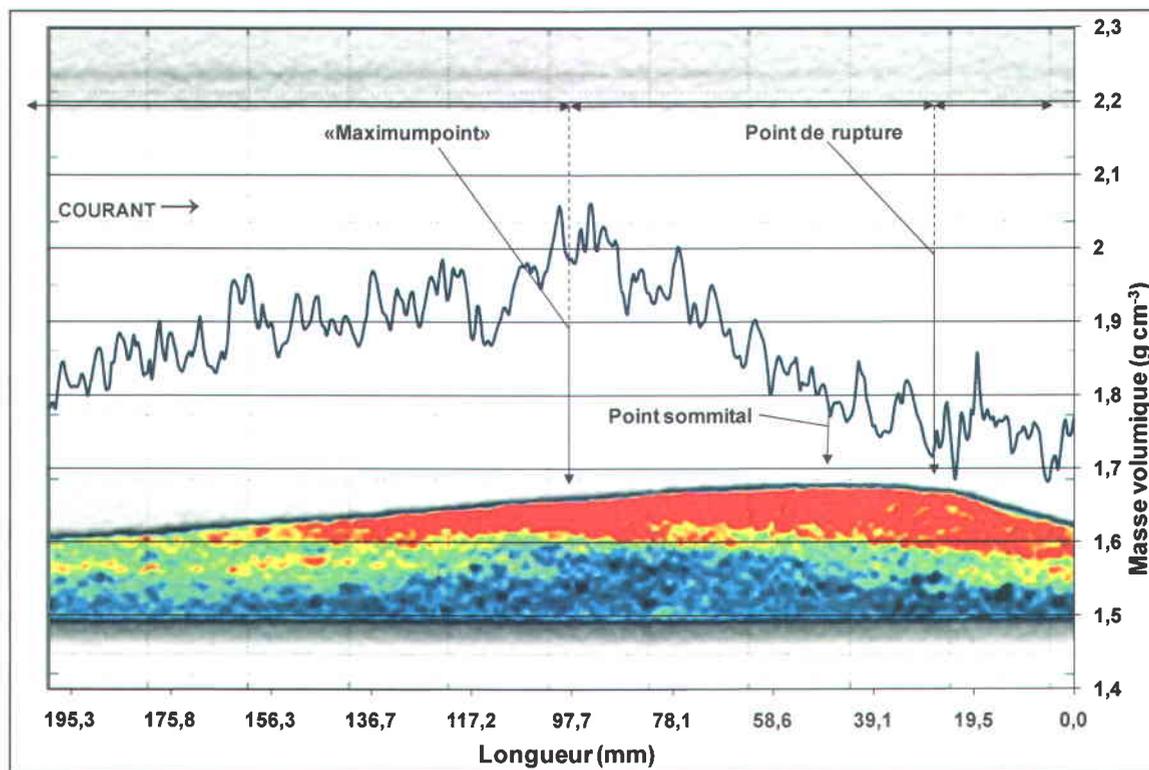
### 3.5.2 Résultats

Les mesures de Montreuil, (2006) utilisant un courant stationnaire de  $U = 35 \text{ cm s}^{-1}$  et une granulométrie de  $d_{50} = 0.370 \text{ mm}$ , indiquent un point de densité maximale le plus élevé (Fig. 106) de  $1.73 \text{ g cm}^{-3}$ , à la base du flanc d'érosion, jusqu'au point maximum de  $2.01 \text{ g cm}^{-3}$ , situé là où la pression hydraulique est maximale (Fig. 105). Passé ce point, la densité du point de densité maximale diminue jusqu'à  $1.82 \text{ g cm}^{-3}$  au point de rupture (moyenne de  $1.86 \text{ g cm}^{-3}$  et écart-type de  $0.074 \text{ g cm}^{-3}$ ). Entre les points de rupture et la base du flanc de progradation, la densité fluctue, sa valeur moyenne est de

---

<sup>8</sup> Qui porte sur un point, un lieu, un milieu précis ou n'existe qu'en un nombre restreint de cas.

1.70 g cm<sup>-3</sup> et son écart-type de 0.110 g cm<sup>-3</sup>. Entre le point sommital et le point de rupture, la densité varie (valeur min : 1.60 g cm<sup>-3</sup>, valeur max : 1.83 g cm<sup>-3</sup>). Enfin, des variations de compaction existent dans la section d'avalanches.

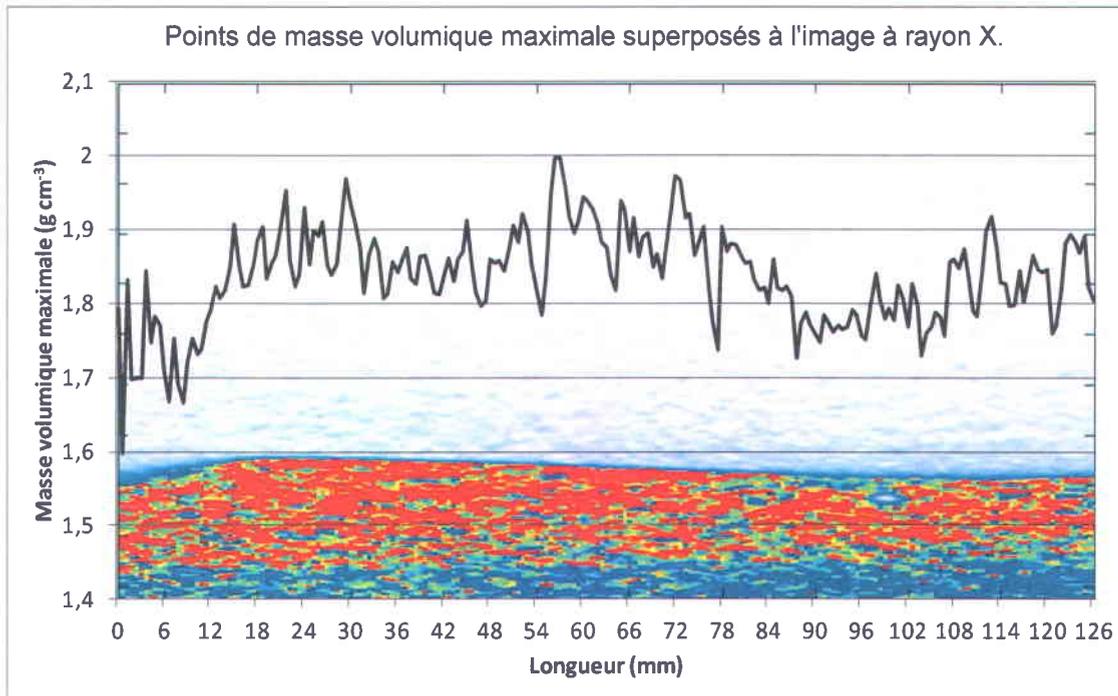


**Figure 105.** Densité maximale, localisée sur la fin de la transition de la couche supérieure du transport par charriage, mesurée dans les profils résultant d'une technique de mesure de volume global. La courbe de densité est superposée sur l'image à rayon X de la ride. Les couleurs représentent la densité mais à titre indicatif seulement.

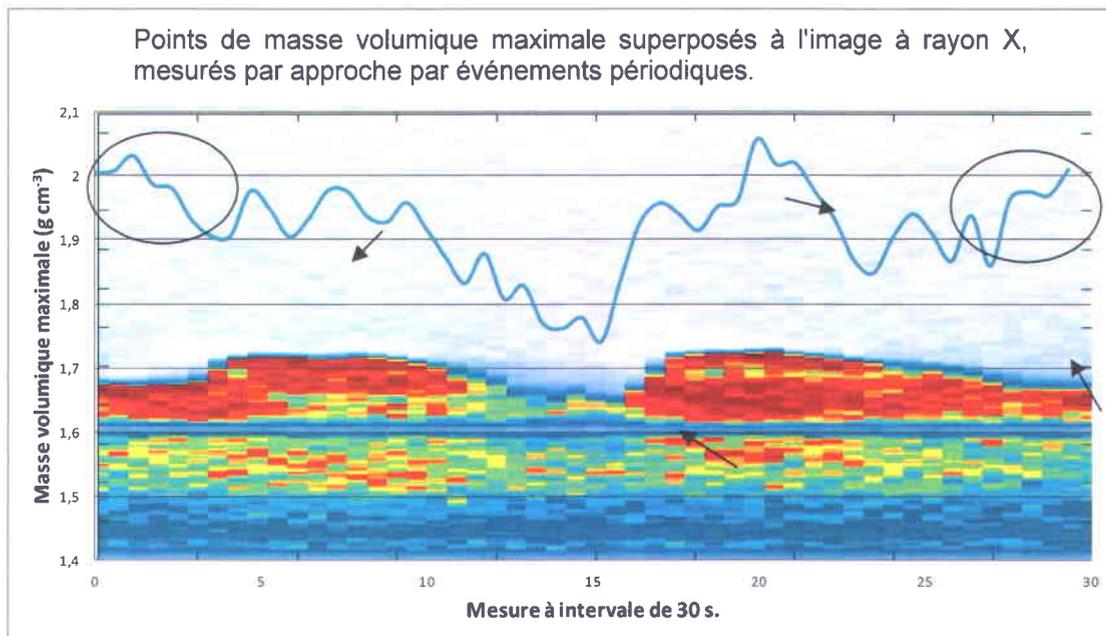
La densité maximale de l'expérience 1 (Fig. 66, 67, 69, 70 ou 71), ( $U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}$  et  $d_{50} = 0.470 \text{ mm}$ ), est exprimée sous forme graphique (Fig. 107). Ces valeurs de densité maximale sont mesurées avec l'approche de mesure par événement périodique sur une période de 15 minutes.

Des points maximums sont présents sur la partie supérieure du flanc d'érosion avec  $1.98 \text{ g cm}^{-3}$ , après 210 secondes et  $2.05 \text{ g cm}^{-3}$ , après 600 secondes.

Les valeurs présentes dans les cercles (Fig. 107) sont causées par l'érosion, un point d'inflexion qui entraîne la mesure de densité maximale résiduelle ou rémanente enfouie plus profondément dans la ride.



**Figure 106.** Densité maximale, localisée sur la fin de la transition de la couche supérieure du transport par charriage. La courbe de densité est superposée sur l'image à rayon X de la ride.



**Figure 107.** Densité maximale, localisée sur la fin de la transition de la couche supérieure du transport par charriage, mesurée dans les profils résultant de l'expérience 1. La courbe de densité est superposée sur l'image à rayon X de la ride. La technique de mesure au scanographe utilisée est celle de l'approche de mesure par événement périodique.

## **3.6 Mesure de la porosité des couches formant la ride**

### **3.6.1 Introduction**

Par définition, la porosité totale d'un milieu poreux est le rapport du volume des pores par rapport au volume total d'un échantillon représentatif. La porosité est une grandeur sans dimension et exprimée comme une fraction décimale.

La porosité moyenne des lits sédimentaires des expériences (1, 2, 5 et 6) est calculée pour fin de comparaison avec les résultats obtenus par Wheatcroft (2002) (Fig. 19; Tab. 2) et cette étude (Fig. 108 à 111; Tab. 25) mais aussi pour corroborer les profils obtenues par rayon X.

Afin d'obtenir des résultats comparables, la porosité est calculée sur une épaisseur de sédiments de 1 et 10 mm, localisée entre 10 mm et la base (établie à 100 mm chez Wheatcroft, 2002) (Fig. 18). La valeur de référence au haut du profil, est déterminée comme étant le point où la valeur de porosité devient inférieure à 0.60, telle qu'utilisée par Wheatcroft (2002).

Les résultats sont déterminés en utilisant des profils de densités converties en porosité suivant les équations (20) et (21). Les profils choisis sont localisés sur le sommet des rides et dans le creux de celles-ci. Ceci permettra de discuter la forme des profils de Wheatcroft (2002) (Fig. 18) avec ceux obtenus dans cette étude (figures 108 à 111).

### **3.6.2 Résultats**

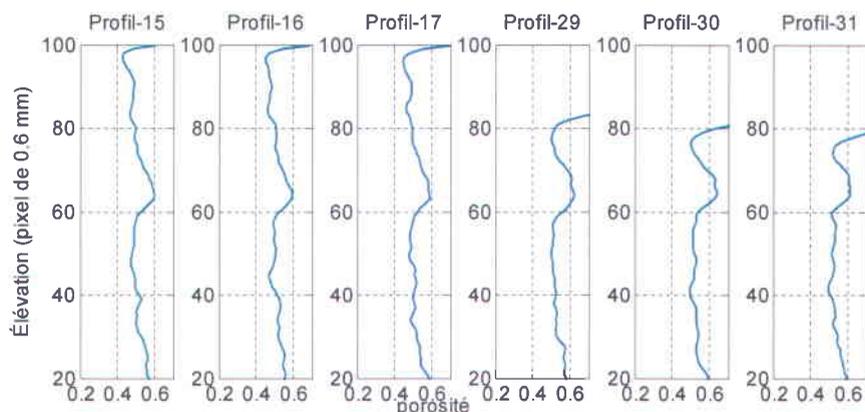
Trois profils situés au sommet et trois profils situés dans le creux de la ride sont présentés aux figures 108 à 111. Les profils extraits des expériences 1, 2 et 5 présentent, pour les profils de la partie sommitale, un passage, de forme exponentielle, de la porosité de 0.60 à 0.46, valeur la plus faible (entre 1 et 10 mm). Sous la valeur de faible porosité, la porosité atteint une valeur moyenne, entre 10-100 mm, de 0.52 (Tab. 25). Les porosités moyennes dans les couches de 1-10 mm et de 10-100mm sont respectivement de 0.47 et 0.52 avec des écart-types de 0.07 et 0.03.

Les profils situés dans le creux de la ride, à la base du flanc d'érosion, sont de forme exponentielle et renferment un point d'inflexion où la porosité passe de 0.60 à 0.51. Cette valeur est la plus faible de la couche entre 1 et 10 mm (Tab. 25). En dessous de

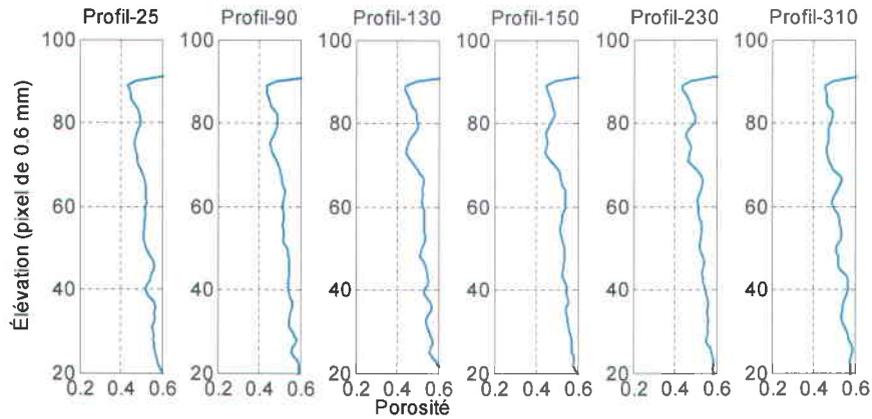
cette valeur de faible porosité, la porosité augmente pour atteindre une valeur moyenne entre 10-100 mm de 0.53 (Tab. 25). Les porosités moyennes dans les couches (1-10 mm et 10-base mm) du creux de la ride sont respectivement de 0.52 et 0.53 avec des écart-types similaires de 0.03.

**Tableau 25 : Mesures de porosité moyenne pour le sommet et le creux des rides des expériences 1, 2, 5 et 6, incluant la moyenne des trois expériences et les valeurs obtenues par le profileur par résistivité (Wheatcroft, 2002).**

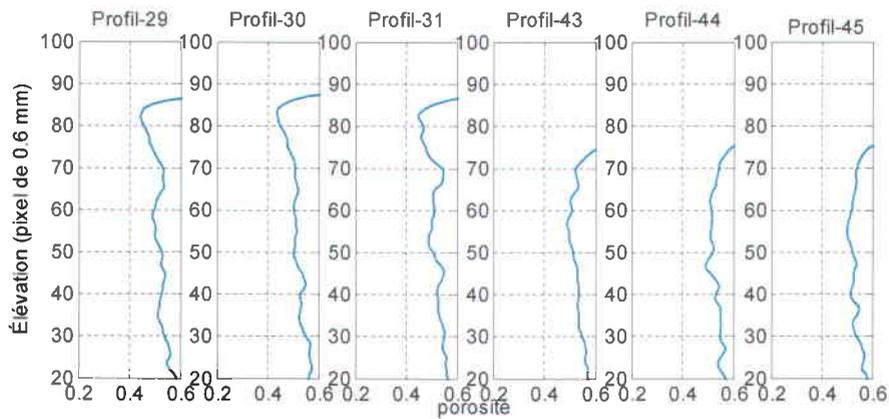
		Sommet de la ride					Creux de la ride						
		Wheatcroft (Fig. 18) $d_{50}=0.400$ mm	EXP 1 (Fig. 117) $d_{50}=0.470$ mm	EXP 2 (Fig. 118) $d_{50}=0.470$ mm	EXP 5 (Fig. 119) $d_{50}=0.120$ mm	EXP 6 (Fig. 120) $d_{50}=0.120$ mm	Moyenne EXP 1-2- 5-6	Wheatcroft (Fig. 18) $d_{50}=0.400$ mm	EXP 1 (Fig. 117) $d_{50}=0.470$ mm	EXP 2 (Fig. 118) $d_{50}=0.470$ mm	EXP 5 (Fig. 119) $d_{50}=0.120$ mm	EXP 6 (Fig. 120) $d_{50}=0.120$ mm	Moyenne EXP 1-2- 5-6
1-10 (mm)	maximum	0.43	0.49	0.49	0.45	0.48	0.48	0.52	0.56	0.55	0.52	0.49	0.53
	minimum	0.38	0.48	0.48	0.43	0.47	0.46	0.40	0.53	0.54	0.52	0.48	0.52
	moyenne	0.41	0.48	0.49	0.44	0.48	0.47	0.44	0.54	0.55	0.52	0.49	0.52
	écart-type	0.03	0.05	0.07	0.08	0.05	0.06	0.06	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04
10 à la base (mm)	maximum	0.38	0.52	0.52	0.51	0.53	0.52	0.39	0.55	0.53	0.52	0.53	0.53
	minimum	0.36	0.52	0.52	0.51	0.53	0.52	0.30	0.54	0.53	0.52	0.53	0.53
	moyenne	0.38	0.52	0.52	0.51	0.53	0.52	0.37	0.54	0.53	0.52	0.53	0.53
	écart-type	0.01	0.03	0.02	0.04	0.04	0.03	0.01	0.04	0.02	0.03	0.04	0.03



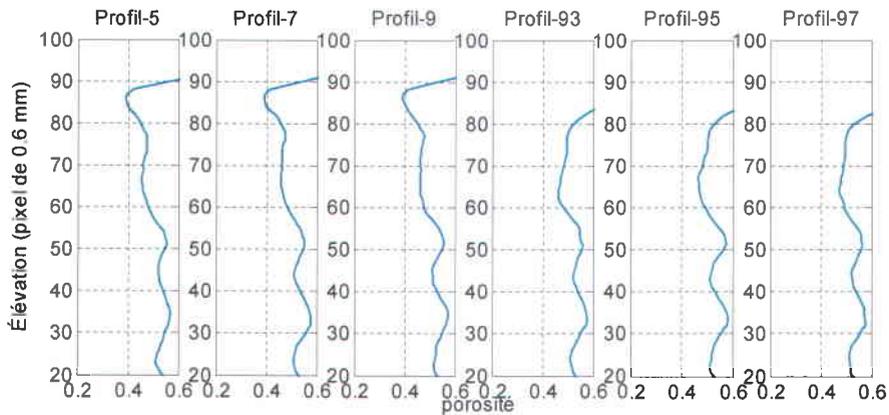
**Figure 108. Profils de porosité moyenne au sommet de la ride (15, 16 et 17) et profils de porosité du creux de la ride (29, 30 et 31). Profils de porosité obtenus des profils de densité de l'expérience 1 ( $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 42.3$  cm s<sup>-1</sup>).**



**Figure 109.** Profils de porosité moyenne au sommet de la ride (25, 90 et 130) et profils de porosité du creux de la ride (150, 230 et 310). Profils de porosité obtenus des profils de densité de l'expérience 2 ( $d_{50} = 0.470$  mm et  $U = 31.0$  cm s<sup>-1</sup>).



**Figure 110.** Profils de porosité moyenne au sommet de la ride (29, 30 et 31) et profils de porosité du creux de la ride (43, 44 et 45). Profils de porosité obtenus des profils de densité de l'expérience 2 ( $d_{50} = 0.120$  mm et  $U = 28.8$  cm s<sup>-1</sup>).



**Figure 111.** Profils de porosité moyenne au sommet de la ride (5, 7 et 9) et profils de porosité du creux de la ride (93, 95 et 97). Profils de porosité obtenus des profils de densité de l'expérience 2 ( $d_{50} = 0.120$  mm et  $U = 21.9$  cm s<sup>-1</sup>).

### 3.7 Calcul des profils de viscosité dynamique

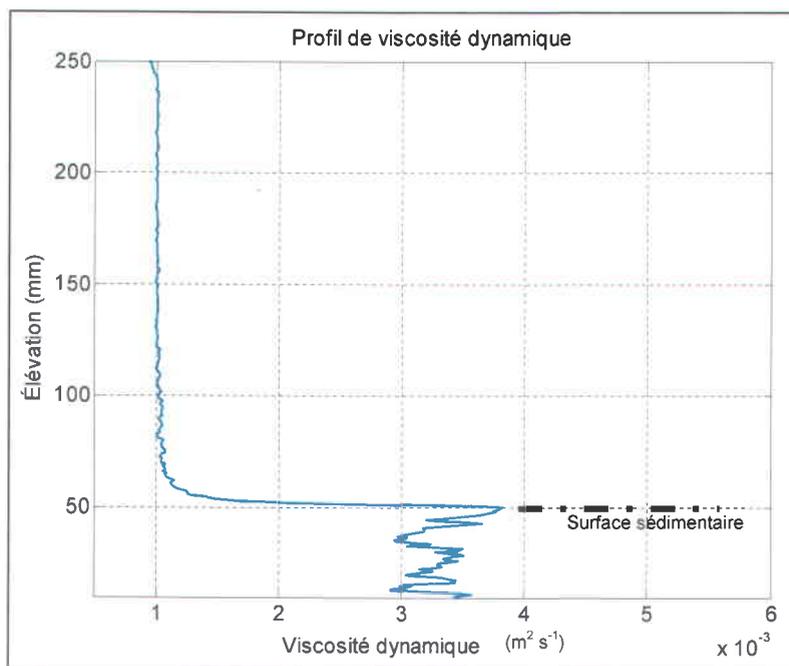
La viscosité dynamique entre dans le calcul de la contrainte de cisaillement, ainsi deux profils-types de viscosité sont présentés. Ils seront utilisés dans la discussion pour déterminer la contrainte de cisaillement et ses fluctuations le long d'une ride.

La viscosité mesurée a été déduite des profils de densité convertie en utilisant l'équation (3) de Bridge & Demicco (2008).

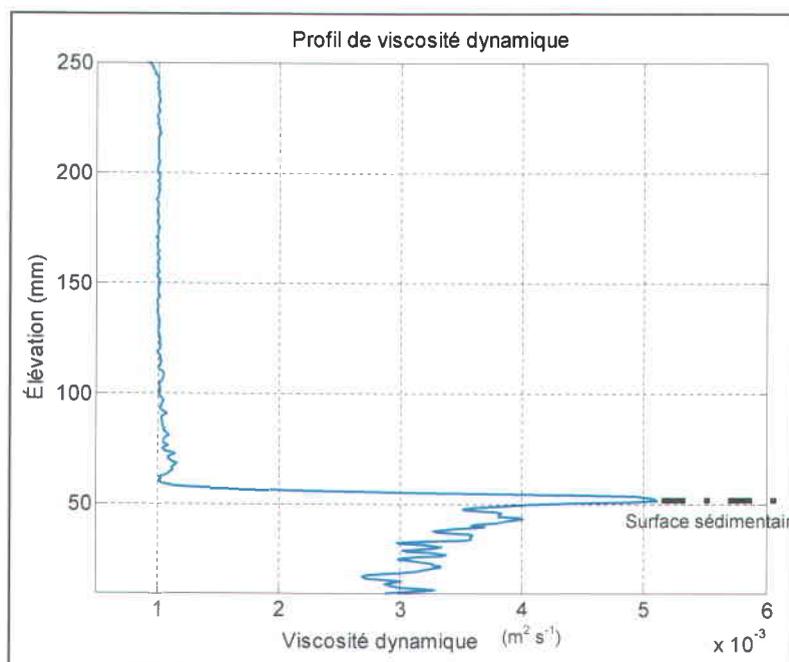
Sur la section d'érosion (bas du flanc d'érosion) le profil de viscosité de la couche de transport en suspension est de forme logarithmique sur une épaisseur de la couche supérieure du transport par charriage soit d'environ 10.3 mm d'épaisseur. Cette viscosité dynamique augmente de  $1.27 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  à  $3.79 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  près de la surface de la ride (Fig. 112).

La contrainte de cisaillement résultante est donc plus faible, en raison de la viscosité. Par contre, sur le haut du flanc d'érosion, la viscosité près de la surface augmente à  $5.06 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , mais l'épaisseur de la couche supérieure du transport par charriage est plus mince (7.35 mm) (Figure 113).

La viscosité dynamique dans la couche de transport en suspension, au-dessus de 75 mm, présente une viscosité dynamique constante jusqu'à la surface (à 243.1 mm). La viscosité est plus importante à la base de la couche de transport par charriage que dans le reste du lit et la transition entre la suspension et le charriage n'est pas de même forme selon l'emplacement sur la ride.



**Figure 112. Profil de viscosité dynamique sur la partie haute de flanc d'érosion.**



**Figure 113. Profil de viscosité dynamique sur la partie basse du flanc d'érosion.**

## CHAPITRE 4. DISCUSSION

### 4.1 Introduction

La méthode de mesure innovatrice, utilisant le scanographe, est discutée afin d'évaluer la validité des résultats en les corrélant à d'autres types d'instrument de mesure.

La faible visibilité des stratifications à l'intérieure de la ride est discutée afin de déterminer pourquoi les stratifications visibles dans la nature et rapportées dans la littérature sont invisibles au scanographe.

La terminologie des paramètres sédimentaires est revue et bonifiée d'après Montreuil (2006), afin de mieux répondre aux effets des phénomènes hydrauliques observés sur et dans les rides sableuses.

Par la suite des points et des couches de transport sont définis en fonction des différentes transitions présentes dans la couche de transport par charriage. Ceci permettra une meilleure caractérisation et une meilleure description des composantes du charriage, présent dans cette couche.

Le fluide circulant sur le lit sédimentaire influence la forme du lit, qui lui-même influence la circulation du fluide, qui influence à son tour le lit sédimentaire. Ce phénomène de rétroaction atteint l'équilibre lorsque le lit se présente sous forme de ride sous un écoulement stationnaire et qu'ils sont conformes à la littérature (Beadnell, 1910; King, 1916, 1918; Hume, 1925; Nikuradse, 1933; Bagnold, 1937; Sidwell & Tanner, 1938; Melton, 1940; Einstein & Barbarossa, 1952; Bagnold, 1954b, 1966, 1973, 1977; Nomicos, 1956; Cooper, 1958; Schlichting, 1960; Gessler, 1965; Hoyt, 1966; Inman et al., 1966; Sharp 1966; Cooper 1958, 1967; Klein 1963; Happel & Brenner, 1965; Reynolds, 1965; Chuna, 1967; Alam & Kennedy, 1969; Williams, 1969; Smith, 1970; Graf, 1971; Krinsley & Doornkamp, 1973; Blumberg & Curl, 1974; Costello, 1974; Reineck & Singh, 1975; Middleton & Southard, 1977; Davis and Sutherland, 1980; Southard et al., 1980; Barnes, 1980; Allen, 1984; van Rijn, 1984; Yang, 1986; Julien & Raslan, 1988; Garde, 1994; Karim, 1995; Huppert et al., 1995). La section 4.7 est donc consacrée à l'effet du fluide sur le lit sédimentaire, principalement sur le transport par charriage.

La surface de la ride reconnue comme définissant sa topographie est discutée en prenant en compte l'étude des transitions entre le transport en suspension et le transport par charriage mais aussi en considérant le point séparant le transport en suspension du transport par charriage. Ceci permettra d'établir la surface *stricto sensu* de la ride sableuse.

Enfin, la contrainte de cisaillement est étudiée en introduisant dans une équation existante, les paramètres sédimentologiques de la couche de transport par charriage. La contrainte de cisaillement est étudiée afin d'en déterminer l'équation en fonction de la position sur la ride en déplacement.

## 4.2 Méthodologie

Le scanographe est un outil qui permet une mesure continue, entière et simultanée du transport par suspension et par charriage sans interférence sur le fluide ou sur les sédiments. La mesure réalisée au scanographe donne une matrice pouvant atteindre 512 x 512 x 1500 voxels dont les dimensions sont de 0.59 mm x 0.59 mm x 0.60 mm.

Pour cette étude, deux techniques de mesure au scanographe sont utilisées : une pseudo instantanée de l'ensemble (Lagrange) et une périodique, au même endroit (Euler). La première technique, appelée l'approche globale de mesure du transport (AGVT), utilise le scanographe pour une mesure d'un large volume 3D donnant une image du champ de rides à un moment précis dans le temps (Lagrange). Le résultat est un ensemble de tranches continues permettant d'observer le champ de rides de façon pseudo instantanée, c'est-à-dire que la mesure est d'une durée de 90 s pour un lit sédimentaire d'une longueur de 1500 mm. Cette technique est utilisée pour comparer l'ensemble des profils densitométriques formant la figure sédimentaire (ride). L'inconvénient de cette méthode de mesure est qu'elle entraîne des discontinuités spatiales quant à l'état du lit sédimentaire entre le début de la mesure (0 mm à 0 sec.) et la fin de la mesure (par exemple : 1500 mm après 90 sec.). Ces mesures permettent cependant une vision globale du lit sédimentaire. Elle est utilisée pour la visualisation de la stratigraphie lorsque l'intérieur du lit à l'état sec ou humide. Afin d'améliorer cet aspect du scanographe, cette méthode est utilisée avec des courants de faible intensité

et fonction de la granulométrie dans le sens de l'écoulement et avec une vitesse de déplacement rapide du statif coulissant.

La seconde technique utilisée est l'approche de mesure par événements périodiques (AMÉP) qui implique l'utilisation du scanographe en mode stationnaire. Avec cette méthode, l'appareil demeure toujours au même endroit par rapport au canal fournissant une représentation eulérienne. Cette technique permet de mesurer simultanément trente tranches de dimensions de 300 mm x 300 mm x 0.60 mm, pour un volume total de 300 mm x 300 mm x 18 mm, permettant d'observer la migration de la ride. Cette technique rend possible l'observation de la construction d'une ride suivie de sa destruction tout en observant l'évolution de l'architecture interne du lit et les sédiments en suspension. Il s'agit d'une technique non destructive et non intrusive, efficace pour la caractérisation des formations sédimentaires en milieu hydraulique actif. Cette méthode est dépourvue des artéfacts de mouvements, le statif étant stationnaire.

### 4.3 Validation de la forme des profils du scanographe

Afin de valider les profils obtenus avec le scanographe, des recherches ont été faites dans la littérature pour trouver des profils comparables provenant d'une autre méthode de mesure. La méthode retenue est celle utilisant un profileur de résistivité *in situ* en eau peu profonde permettant de mesurer la porosité des sables marins, sur une épaisseur allant jusqu'à 8 cm, en causant un minimum de perturbation. Cette méthode de profilage est retenue en raison des profils de porosité obtenus *in situ* contenant peu de perturbations et pouvant être comparés aux profils de densité en utilisant les équations de Bridge & Demicco (2008)

$$C = \frac{\rho_{mix} - \rho}{\rho_s - \rho} \quad (19)$$

où  $\rho_{mix}$  est la densité du mélange eau-sédiments,  $\rho_s$  est la densité des sédiments et  $\rho$  est la densité de l'eau à la température mesurée lors de l'expérience. Ainsi, de l'équation (19), il est possible de déterminer la porosité

$$\varepsilon = 1 - C \quad (20)$$

Les profils de porosité obtenue par les mesures au scanographe correspondent à ceux obtenus avec le profileur de résistivité (Fig. 114).

Les résultats obtenus démontrent hors de tout doute que la différence de forme entre les profils mesurés au sommet d'une ride et ceux mesurés à sa base sont bel et bien réels. Les résultats obtenus avec le profileur de résistivité présentent, pour le sommet de la ride, une transition aboutissant à une porosité minimale, porosité minimale aussi mesurée sur le Profil-17 (Fig. 114). Au creux de la ride, sur les mesures du profileur et sur les mesures du scanographe, il y a apparition d'un point de diminution soudaine (Fig. 114 : flèche rouge), vers la fin de la transition, suivi en-dessous, par une augmentation immédiate de la porosité (Fig. 114 : flèche bleue).

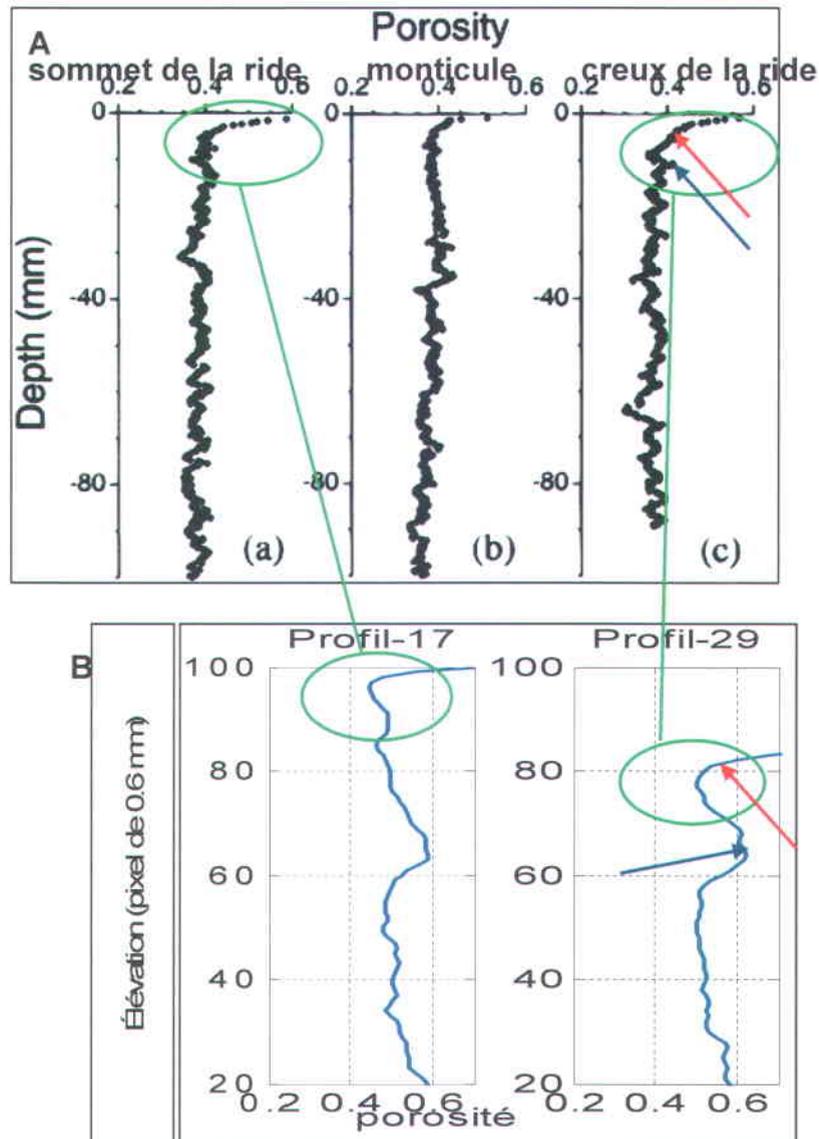


Figure 114. (A) Profils de porosité représentant les trois types emplacements de mesure. (a) Le sommet de la ride. (b) Un monticule. (c) Le creux de la ride. Modifiée de Wheatcroft (2002). (B) Profils de porosité (au tomographe) mesurés au sommet d'une ride (Profil-17) et mesurée dans le creux d'une ride (Profil-29) lors de l'expérience 2. Les flèches et les cercles indiquent les similitudes entre les profils en A et B.

Ces résultats permettent de corroborer la forme des profils obtenus. Par contre, les valeurs de porosité obtenue par Wheatcroft (2002) sont plus faibles que celles obtenues au scanographe. Lors des mesures au scanographe, les valeurs de porosité les plus faibles ont été obtenues alors que le courant était le plus faible. Conséquemment,

Wheatcroft (2002) indique que les mesures ont été réalisées par un plongeur, au moment où les courants étaient minimaux. Ceci porte à penser que la présence d'un courant a pour conséquence une augmentation de la porosité sur une profondeur allant jusqu'à 8 cm.

Une hypothèse explique cette différence de porosité. Si la présence du courant entraîne une infiltration de l'eau dans la matrice sédimentaire, il est possible que cette dernière soit moins influencée par l'effet de compaction, tel que décrit par Meade (1966) et Skempton (1970). Ceci expliquerait une porosité supérieure à la valeur de 0.40 retrouvée dans la littérature. Les valeurs de porosité reconnues sont situées entre 0.25 et 0.53 avec une moyenne de 0.43 pour le sable fin et entre 0.31 et 0.46 avec une moyenne de 0.39 pour les sables grossiers (McWorter & Sunada, 1977). De façon plus générale, Freeze & Cherry (1979) propose pour le sable une valeur variant entre 0.25 et 0.50.

Pour cette étude, les profils de la partie sommitale présentent une porosité de 0.60 à 0.46, valeur la plus faible (entre 1 et 10 mm). La porosité atteint une valeur moyenne, entre 10-100 mm, de 0.52 (Tab. 25). Les porosités moyennes dans les couches de 1-10 mm et de 10-100 mm sont respectivement de 0.47 et 0.52.

Les profils situés dans le creux de la ride, à la base du flanc d'érosion présentent une porosité de 0.60 à 0.51, entre 1 et 10 mm (Tab. 25). En dessous, la porosité a une valeur moyenne de 0.53 entre 10-100 mm (Tab. 25). Les porosités moyennes dans les couches (1-10 mm et 10-base mm) du creux de la ride sont respectivement de 0.52 et 0.53.

Enfin, dans la présente étude, les profils de densité mesurée le long de la ride pour différents paramètres environnementaux permettent de conclure, comme les résultats de Wheatcroft (2002), que la porosité du lit varie en fonction de l'emplacement où elle est mesurée. De plus, la porosité est fonction de la vitesse du courant. Ceci est notable particulièrement à la base du flanc d'érosion et lors de la formation du flanc de progradation. Maintenant, grâce au tomographe, il est possible de mesurer sans aucune perturbation ou intrusion dans le milieu.

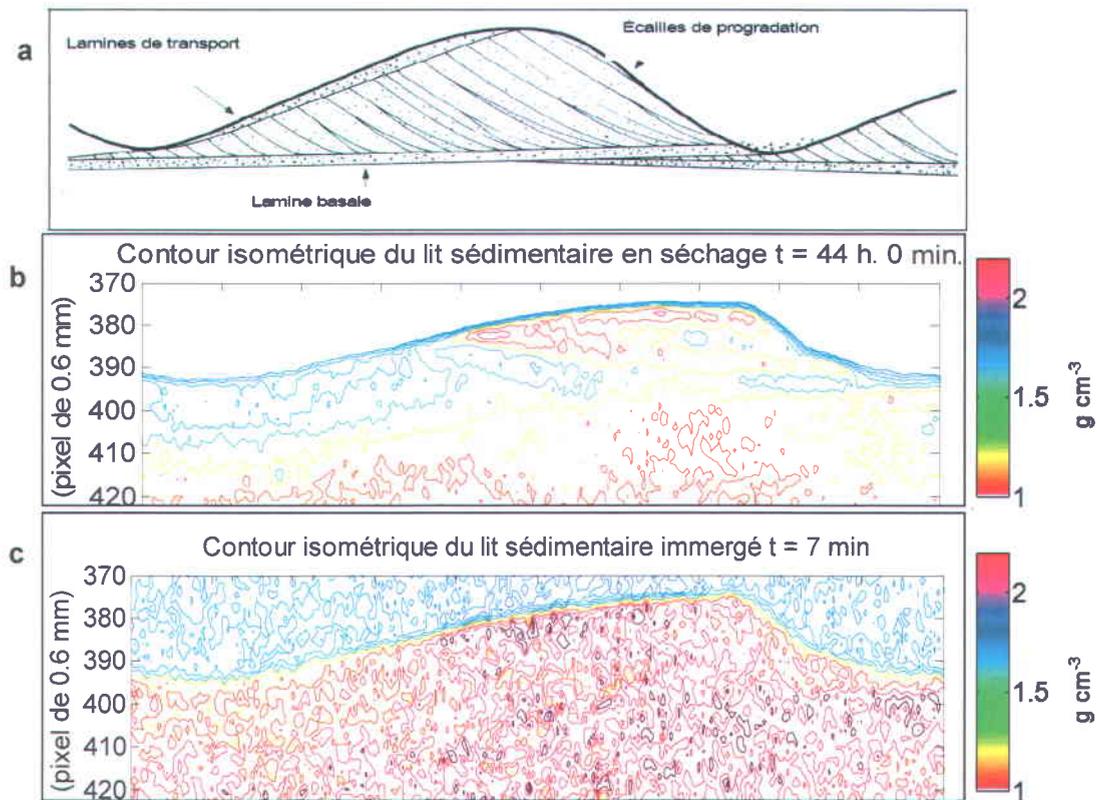
#### **4.4 Visualisation de la stratification d'une ride au scanographe**

Dans les mesures de la section 3.1, il est constaté que la visualisation de la stratification d'une ride n'est pas possible en milieu immergé. Par contre, lors des mesures sur le sable d'Ottawa, de couleur rose, ce dernier présentait les traces donc l'existence de stratification (Montreuil, 2006). Ces stratifications ne sont pas visibles sur les mesures des expériences réalisées avec le canal à surface libre ou en boucle fermée. La présence de stratifications dans les premières mesures réalisées par Montreuil en 2006 était due à une seconde population, dont la source était des écailles de peinture brisées, et à un trie granulométrique en lien avec la détérioration de la peinture des grains de couleur rose. Cette peinture a probablement une densité et un numéro atomique différents qui créent un effet de contraste qui met en évidence les stratifications de la ride. Par conséquent, l'utilisation de deux sédiments de même densité mais de numéro atomique différent permettrait de faire le suivi de particules spécifiques. Il serait aussi intéressant de tester un sable ayant une faible radioactivité afin d'obtenir un effet de contraste similaire aux liquides de contraste médicaux iodés hydrosolubles (numéro atomique 53) qui absorbent les rayons X (Tranquart et al., 2007). L'utilisation d'un tel procédé permettrait de confirmer le chemin parcouru par les grains lors du transport sédimentaire sous forme de rides, comme décrit par Middleton & Southard (1977) et Yalin (1992).

Par contre, lors de la mesure des champs de rides en cours de séchage (vidange du canal), les formations internes de la ride apparaissent dans les mesures au scanographe (Fig. 115 b). La visualisation des stratifications est rendue possible par les différences de densité du mélange eau-sédiments causée par des couches de perméabilité plus faible conséquence d'un meilleur arrangement des grains qui réduit le déplacement de l'eau entre les grains. De plus, le contraste est augmenté par la différence de densité entre un mélange air-sédiments par rapport au mélange eau-sédiments. La différence de densité relative, en HU, entre les composants du mélange eau-sédiments est plus faible que celui du mélange air-sédiments, la différence entre l'air et l'eau étant de 1000 HU. Donc, les formations existent bien, sont mesurables et peuvent être observées après le retrait de l'eau. Par contre, lors des études

dynamiques, seuls quelques traces sont perceptibles (Fig. 115 c), les autres étant invisibles en raison de l'injection et la circulation de l'eau dans la matrice sédimentaire.

La lamine de transport n'est pas distinctement percevable, probablement en raison du transport qui n'a pas été interrompu naturellement (par interruption du courant du  $30 \text{ cm s}^{-1}$  vers  $\sim 0 \text{ cm s}^{-1}$ ). L'interruption est suivie d'un faible courant causé par la vidange du canal et des réservoirs. La mesure des lamines dans le lit submergé, compte tenu de la résolution en usage dans le protocole de mesure, demeure extrêmement difficile en raison du manque de contraste causé par l'homogénéité des matériaux et du mouvement dans la matrice (Fig. 115 c). Les laminations mesurées correspondent aux laminations telles qu'observées par Reineck & Singh (1975). Ils ont fait leurs observations en régime statique, après le retrait de l'eau, selon la méthode d'observation (Fig. 10 et Fig. 115 a). Les écailles de progradation existent sous le scanographe, mais elles ne sont pas aussi clairement visibles qu'avec une coupe dans le matériel non immergé (Fig. 10). Une lamine basale est visible sous la ride (Fig. 115). Elle n'est pas horizontale, mais semble se diriger plus profondément à la base du flanc d'érosion. Elle semble être déformée sous l'effet du vortex.



**Figure 115. (a) Description des lamines et des écailles selon Reineck & Singh (1975). (b) Contours isométriques du lit sédimentaire à t = 44 heures. (c) Contours isométriques du lit sédimentaire à t = 7 min.**

## 4.5 Paramètres sédimentologiques

### 4.5.1 Introduction

Les paramètres sédimentologiques sont définis afin de diviser les profils de densité en couches distinctes séparées par des points charnières. Ceci permet l'obtention de paramètres comparables d'un endroit à l'autre d'une ride, mais aussi d'une ride à une autre sous un courant différent et possédant aussi une granulométrie différente. Ces paramètres ont été introduits en 2006 par Montreuil. Cette étude faisant suite à ces travaux, les paramètres sédimentologiques sont redéfinis suite aux recommandations de Montreuil (2006). Il recommandait entre autre de vérifier l'influence de la vitesse du courant et de la granulométrie sur chacun des paramètres. La définition des paramètres est donc exhaustive, tout en évitant une surenchère terminologique.

Les profils sédimentaires obtenus durant les différentes expériences ont permis de produire un profil-type présentant une coupe transversale du lit sédimentaire et contenant l'ensemble des paramètres (Fig. 116 et 117). Par contre, chacun des paramètres est sensible aux variables de l'environnement : la position sur la ride, la granulométrie et la vitesse du courant. Les paramètres sont présentés de façon générale puis étudiés selon les variables de l'environnement.

#### 4.5.2 Profils typiques et terminologie

Le profil-type débute près de la surface de l'eau (Fig. 116 (a)). Sous la surface, se trouve la colonne d'eau qui se divise en une couche de fluide contenant des particules en suspension permanente ("*washload*") (Einstein & Banks, 1950). Sous cette couche, se trouvent la couche de transport en suspension qui est définie, en haut, par la limite supérieure de transport en suspension (b) et en bas par le point de frontière (d).

Le point de frontière (d) est établi comme étant le point où la densité commence à augmenter irréversiblement pour atteindre la concentration maximale (l). Le point de frontière, limite basse de la suspension, est aussi la limite supérieure du transport par charriage. Ainsi, la limite entre la suspension et le charriage peut être déterminé avec exactitude le long de la ride. Par conséquent, il est le point utilisé comme référence de concentration ( $C_a$ ) dans le profil de concentration (Liu, 2001) (Fig. 118).

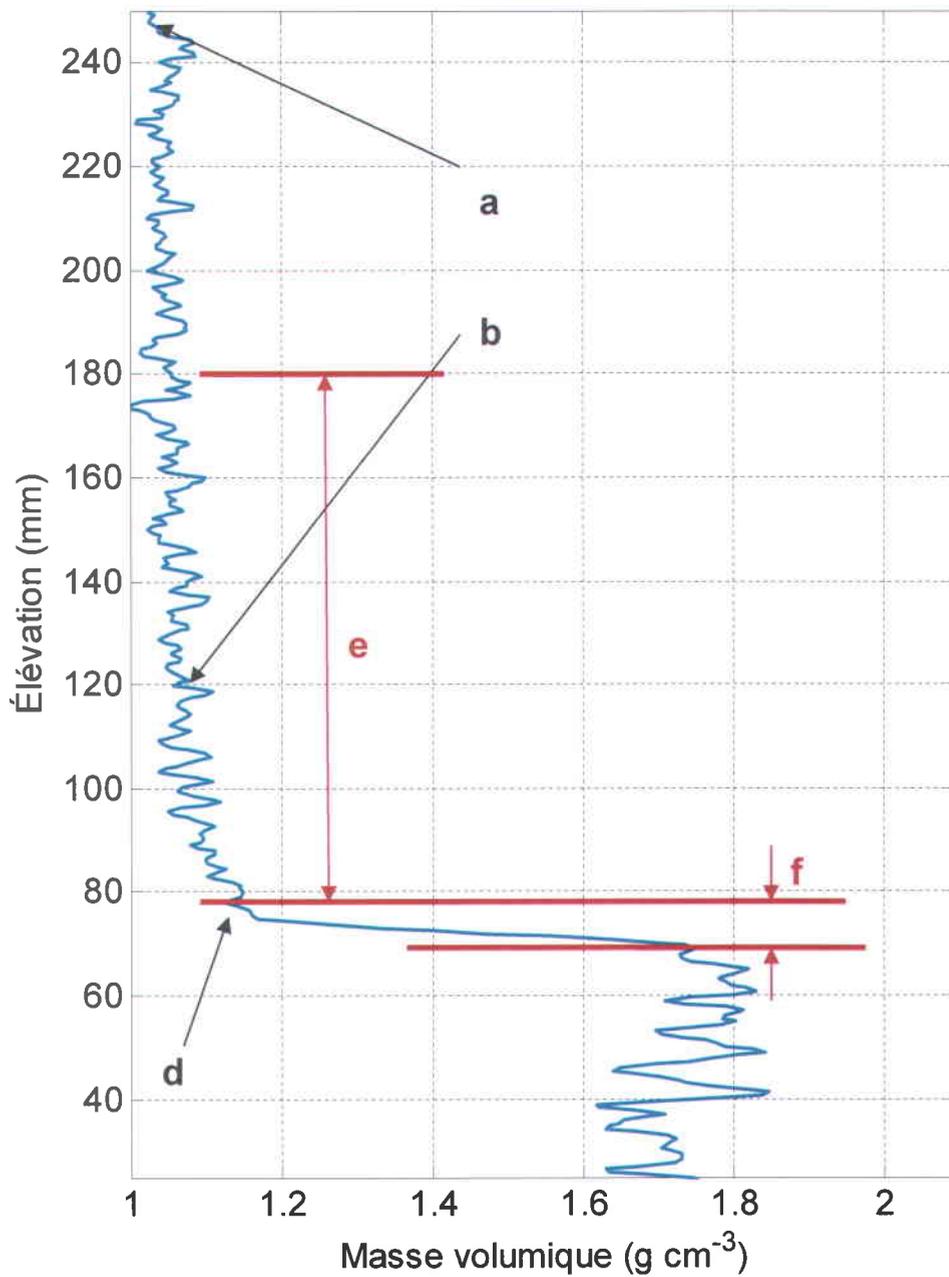
Entre le point de frontière et le point de densité maximale, se trouve la couche supérieure de transport par charriage (Fig. 116; f et Fig. 117; entre d et l). Cette couche est une composante de la surface de la ride qui est active. Elle change de forme en fonction des variables de l'environnement. Cette couche existe sous deux formes : la première, lorsqu'elle est composée d'une transition de densité proportionnelle à l'augmentation de l'épaisseur de la couche (Fig. 117) ; la seconde forme présente une discontinuité<sup>9</sup> qui se manifeste sous la forme d'un point d'inflexion (Fig. 119; k). Ce point

---

<sup>9</sup> La discontinuité consiste en un changement brusque et important de l'évolution de la densité, localisée près du point de densité maximale.

est créé par une division dans la couche supérieure de transport par charriage conduisant à l'apparition d'une sous-couche d'inflexion qui divise la couche supérieure de transport par charriage en deux couches distinctes (Fig. 119; g et h). L'épaisseur de la transition (Fig. 119; f) ainsi que la différence de densité entre le point de frontière et le point de densité maximale forme la pente de la transition. Ainsi, cette pente, aussi appelée l'indice  $m$ , est proportionnel au transport sédimentaire. Ceci est valide pour la base du flanc d'érosion et de progradation. Pour le sommet de la ride, la pente indique un déplacement du sédiment. La couche supérieure de transport par charriage se termine avec le point de densité maximale (I), appelée aussi la surface *stricto sensu* de la ride. Avec cette densité élevée (1.90 à 2.20 g cm<sup>-3</sup>), c'est à cette profondeur que la friction entre les grains est suffisamment importante pour prétendre à un transport de masse dans le lit sédimentaire plus ou moins important. En-dessous de cette couche, la couche intermédiaire de transport par charriage est un intermédiaire entre la composante active, la couche supérieure de transport par charriage, et la partie réputée immobile du lit sédimentaire. Cette couche intermédiaire de transport par charriage est délimitée en haut par le point de densité maximale et en-dessous par la limite inférieure de basse densité. Le point de basse densité marque le retour de la densité à la valeur que prend le reste du lit sédimentaire, ce qui implique qu'au-dessus la traction est de moins en moins importante jusqu'à atteindre un point de non transport. La partie immobile est nommée la couche inférieure de transport par charriage. Elle est nommée ainsi car elle est soumise à l'effet du vortex à la base du flanc d'érosion mais aussi qu'elle est soumise à la pression à la surface du lit causant un déplacement des grains à l'intérieur de celui-ci, tel que démontrés par Madsen & Durham (2007). La forme en zigzag de la couche inférieure de transport par charriage présente pour des profils situés dans le creux de la ride et à la base du flanc d'érosion sont de forme exponentielle avec des porosités passant de 0.60 à 0.51. Plus en profondeur la porosité augmente pour atteindre une valeur moyenne (entre 10-100 mm) de 0.53. Aux creux des rides, les porosités moyennes aux profondeurs (1-10 mm et 10-base mm) sont respectivement de 0.52 et 0.53.

Ainsi, si le courant est faible et pour un faible transport (Fig. 116), le profil de densité du lit est plutôt perpendiculaire au lit. Si le courant est plus important (Fig. 117) alors le profil de densité du lit est de forme exponentielle jusqu'au point de densité maximale (l). Avant de terminer la définition terminologique des points et des zones, un retour s'impose sur le point de frontière. Le passage entre la suspension et le charriage ne s'opère pas de la même manière le long de la ride. Le point de frontière à la base d'une couche de transport en suspension de forme logarithmique (Fig. 116) est différent de la forme linéaire accompagnée d'une diminution subite comme à la figure 117. Le passage entre la suspension et le charriage de la figure 116 est continu comparativement à celui de la figure 117, qui est soumis à une diminution de la densité à l'approche de la surface active de la ride. Cette diminution du point de frontière (d) forment une sous-couche de fluide dont la limite supérieure est appelée limite supérieure de sous-couche de fluide. Ce point se substitue au point de frontière pour devenir la référence du profil de concentration ( $C_a$ ) (Liu, 2001). Cette substitution entraîne une discrimination entre la suspension et le charriage faisant de ces points, deux paramètres distincts.



**Figure 116.** Profil de forme typique de la partie basse du flanc d'érosion et du flanc de progradation. (a) Limite de la surface de l'eau. (b) Limite supérieure de transport en suspension. (d) Point de frontière. (e) Couche de transport en suspension. (f) Couche supérieure de transport par charriage.

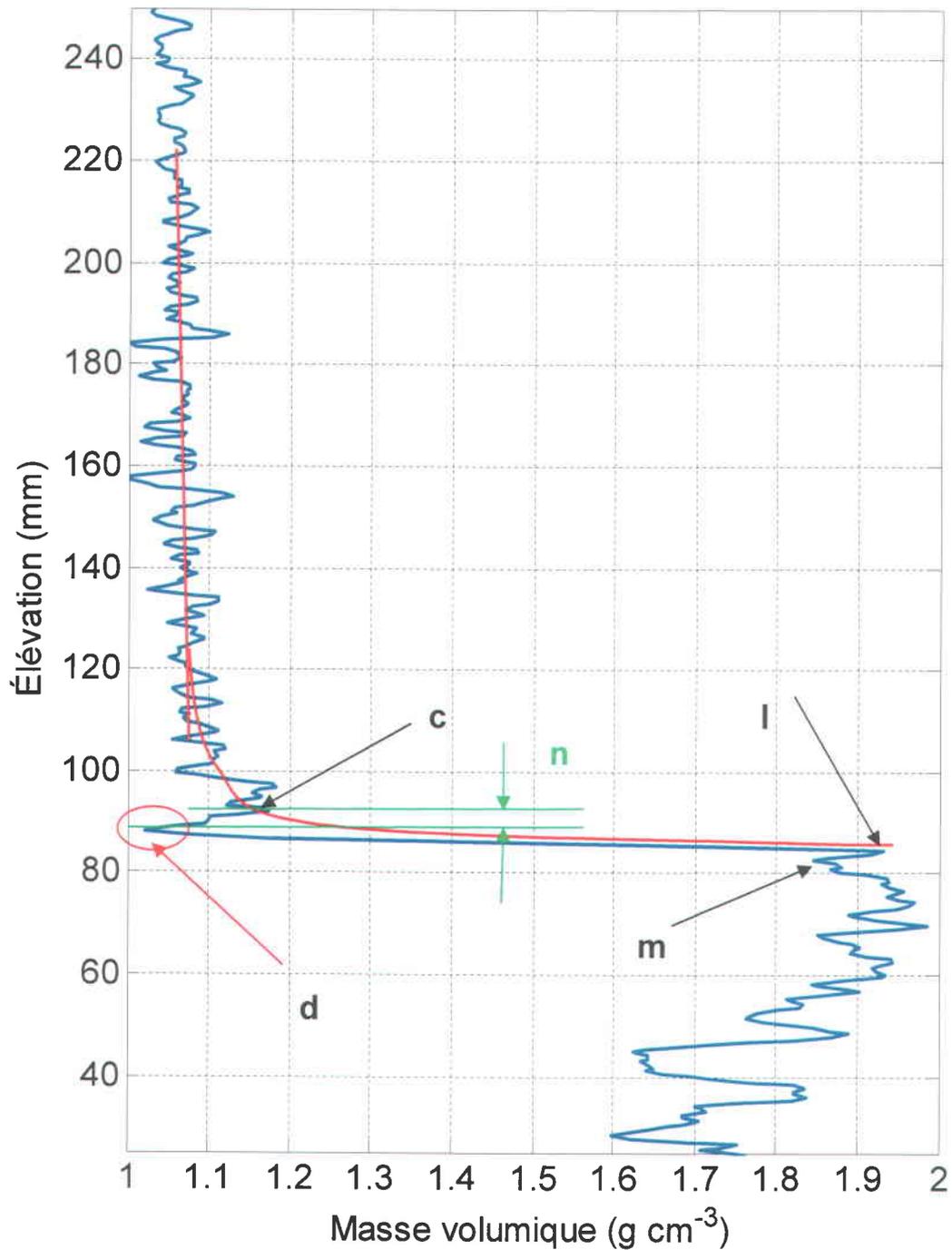


Figure 117. Profil de forme typique de la partie sommitale du flanc d'érosion. En rouge, forme logarithmique typique d'un profil de suspension. (c) Limite supérieure de la sous-couche de fluide. (d) Point de frontière de faible densité, est aussi la limite inférieure de la sous-couche fluide. (l) Point de densité maximale. (m) Limite inférieure de basse densité.

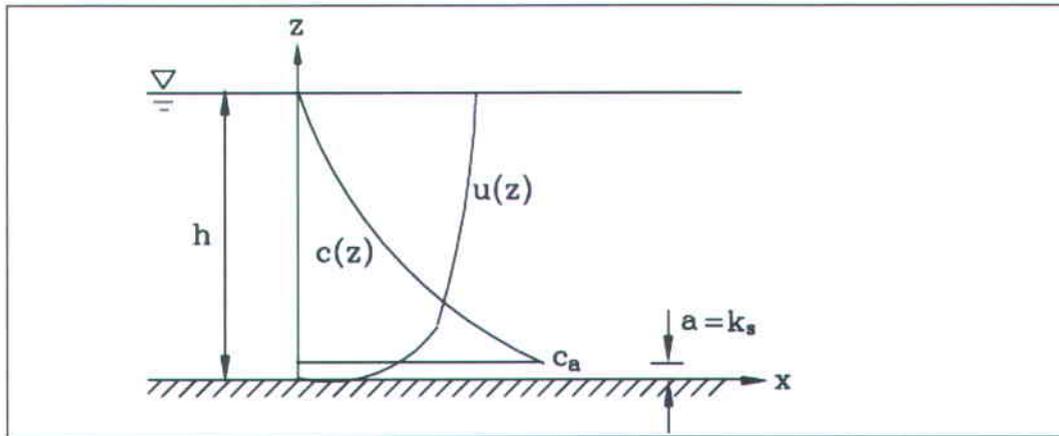


Figure 118. Illustration des profils verticaux de vitesses et de concentrations de sédiments en suspension. D'après Liu (2001).

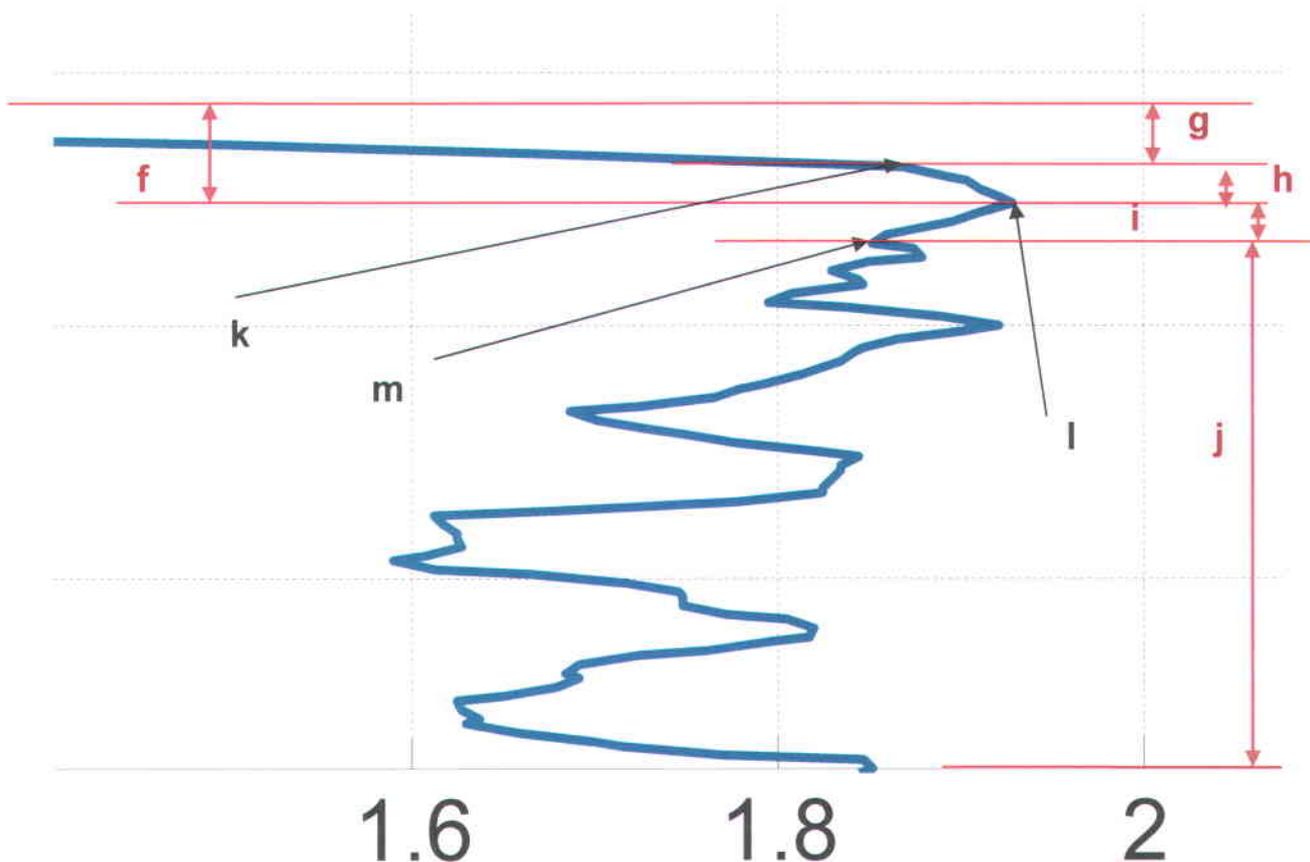


Figure 119. Agrandissement de la couche d'inflexion de la figure 113 (g) et le point d'inflexion (k) scindant la couche supérieure de transport par charriage (f) en deux parties (g et h). (l) Point de densité maximale. (m) Limite inférieure de basse densité. (i) Couche intermédiaire de transport par charriage. (j) Couche inférieure de transport par charriage.

Le tableau 26 présente une synthèse des paramètres sédimentologiques précédemment énumérés. Il renferme aussi les références aux figures décrivant les profil-types.

**Tableau 26 : Synthèse des paramètres sédimentologiques en relation avec les profils-types décrit aux figures 116, 117 et 119.**

Identification sur les figures 116, 117 et 119	Définition du point ou de la couche	Description du point ou de la couche
<b>a</b>	Surface du fluide	Point de surface de la colonne d'eau
<b>b</b>	Limite supérieure de transport en suspension	Point à l'intérieur de la colonne d'eau qui sépare la colonne d'eau où la suspension est continue (" <i>washload</i> ") de la couche de transport par suspension.
<b>d</b>	Point de frontière	Point séparant le transport en suspension du transport par charriage. Point où la densité quitte irréversiblement la suspension pour atteindre la surface solide du lit sédimentaire. Point utilisé comme référence au profil de concentration.
<b>e</b>	Couche de transport en suspension	Couche contenant les sédiments en suspension et présentant le profil de concentration en sédiments.
<b>n</b>	Sous-couche fluide	Située sous la couche de transport en suspension, sous-couche définie par sa faible densité (faible concentration en sédiments) séparant le transport en suspension du transport par charriage. Cette sous-couche est présentée pour la première fois par cette étude.
<b>c</b>	Limite supérieure de la sous-couche fluide	Limite remplaçant le point de frontière comme référence au profil de concentration.

Identification sur les figures 116, 117 et 119	Définition du point ou de la couche	Description du point ou de la couche
l	Point de densité maximale	Point où la densité du profil est la plus élevée. Point qui est la base de la couche supérieure du transport par charriage et de la surface solide de la ride, la surface <i>stricto sensu</i> .
m	Limite inférieure de basse densité	Point qui présente une diminution de la densité, située sous la couche supérieure du transport par charriage. Ce point trace les différences de densité des laminations du lit. Il est enfin associé à l'hypothèse du transport en profondeur dans la couche inférieure du transport par charriage.
f	Couche supérieure du transport par charriage	Couche mesurée pour la première fois, débutant avec le point de frontière et se terminant avec le point de densité maximale. Elle renferme la majorité du transport par charriage. Elle est aussi une couche active importante dans la détermination de la contrainte de cisaillement et l'estimation du transport sédimentaire.
i	Couche intermédiaire du transport par charriage	Couche débutant avec le point de densité maximale et se terminant avec la limite inférieure de basse densité. Elle est active à la base du flanc d'érosion avec possiblement un transport par charriage par roulement.
j	Couche inférieure du transport par charriage	Couche formée d'une succession de variation causée par les laminations. Elle est réputée immobile malgré l'injection d'eau du vortex modifiant sa porosité. Elle est associée à l'hypothèse du transport en profondeur dans cette dernière.
k	Point d'inflexion	Point indiquant une discontinuité dans la transition entre le point de frontière et le point de densité maximale. Il sépare les modes de transport par charriage (saltation et roulement) et caractérise l'activité de la section d'avalanches.

Identification sur les figures 116, 117 et 119	Définition du point ou de la couche	Description du point ou de la couche
g-h	Sous-couche d'inflexion	Sous-couche renfermant le mode de transport par charriage en roulement. Elle indique, pour le flanc de progradation, l'état de la compaction.

## 4.6 Étude des points et des couches

### 4.6.1 Couche de transport en suspension

Cette couche est étudiée sommairement, car cette étude se concentre sur le transport par charriage et la structure interne de la ride lors du transport. La concentration exacte de sédiments en suspension n'a donc pas été étalonnée avec les résultats de densités relatives en unité HU, mais sera déterminée lors de travaux futurs.

La couche de transport en suspension se présente sous différentes formes réparties le long de la ride. À la base du flanc d'érosion, les profils de la couche sont logarithmiques en conformité avec la littérature (Liu, 2001). Par contre, ceux localisés dans la zone d'influence du vortex (Fig. 96 ; Profil-64) présentent à la base de la couche de transport en suspension une diminution soudaine de la densité au point de frontière. Il sera vu plus loin que cette diminution est associée à une forme de profil de concentration contenant une grande quantité de sédiments en suspension, sur une épaisseur plus importante que dans les autres sections de la ride.

Lorsque la vitesse augmente ( $U$  de 31.0 à 42.3 cm s<sup>-1</sup>) pour une même granulométrie la densité globale de la couche de transport en suspension augmente (Fig. 91 et 90). De plus, pour des vitesses similaires entre ( $U$  de 31.0 cm s<sup>-1</sup> et 28.6 cm s<sup>-1</sup>), mais pour une granulométrie réduite ( $d_{50}$  de 0.470 à 0.120 mm), la densité globale est supérieure pour la granulométrie la plus fine soit de 0.120 mm.

Une autre forme de profils est présente entre le point de rattachement du fluide et la partie sommitale de la ride (Fig. 92). Elle se caractérise par une densité plus faible accompagnée d'une diminution de la densité au point de frontière située entre le point

sommital et le point de rupture. La chute de pression et la décélération du fluide provoque une accumulation des sédiments engendrant le dépôt à la base de la formation de la partie sommitale de la ride. Le profil de concentration du transport en suspension de la partie sommitale diminue alors que la densité dans la couche de charriage augmente indiquant un transfert dans le mode de transport. Ce transfert de sédiments d'un mode à l'autre démontre bien leur complémentarité et leur indivisibilité, qui est une conséquence de la conservation de la masse durant le transport le long de la ride.

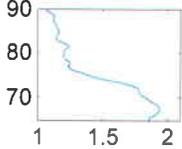
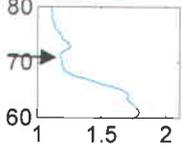
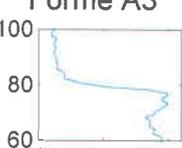
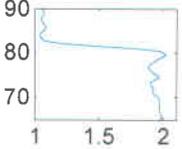
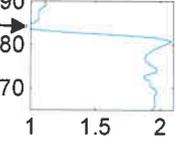
#### **4.6.2 Point de passage entre la suspension et le charriage**

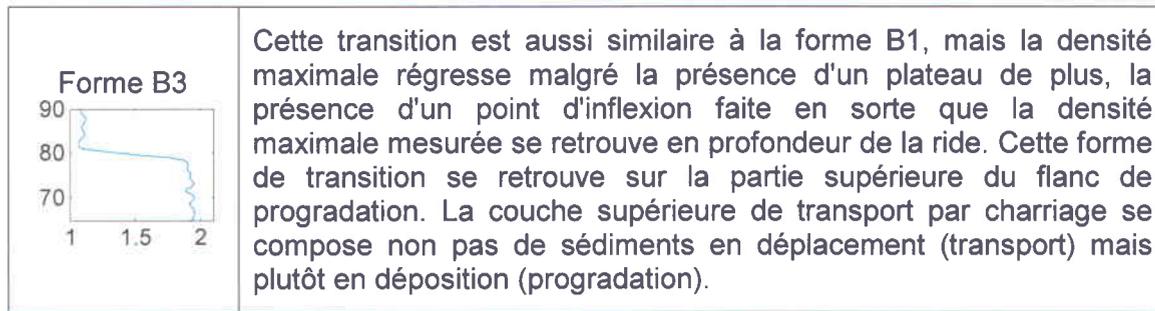
La limite entre le transport en suspension et le transport par charriage est une limite dynamique le long de la ride, fonction de la position sur la ride. La limite est donc établie comme la surface mobile de la ride, qui est définie par le point de frontière. Ce choix s'appuie sur l'usage de la référence de concentration  $C_a$  comme base de la suspension (Liu, 2001). Sur la figure 118, la base de la suspension s'arrête à une épaisseur  $a=ks$  de la surface de la ride. Selon Bijker (1992)  $a$  est l'épaisseur de la frontière entre la suspension et la surface du lit. Il est suggéré d'utiliser la rugosité du lit  $ks$  comme valeur de  $a$ , ce qui relie  $C_a$  au transport par charriage (Bijker, 1992). Il est donc pertinent de définir le point de frontière comme la séparation des deux modes de transport. Ce point qui délimite les deux modes est dynamique et est fonction de la position sur la ride.

#### **4.6.3 Couches de transport par charriage**

Ayant établi une limite dynamique entre la suspension et le charriage, il est maintenant possible d'étudier le charriage proprement dit. L'analyse des résultats des figures 93 à 100 permet d'établir une classification des types de transitions qui décrivent l'évolution de la couche supérieure de transport par charriage selon les variables environnementales (Tab. 27). L'analyse générale de l'ensemble des profils a révélé que la transition dans la couche supérieure du transport par charriage, des profils situés à la base du flanc d'érosion change de forme sur une très courte distance ( $\sim 2.4$  mm pour les paramètres de l'étude) indiquant un changement rapide dans la dynamique d'érosion. Les formes typiques des différentes transitions sont répertoriées au tableau 27.

**Tableau 27. Tableau regroupant les six types de transitions se retrouvant à l'intérieur de la couche supérieure de transport par charriage.**

<p>Forme A1</p> 	<p>Cette transition est surplombée d'une couche de transport en suspension de forme logarithmique se terminant sans diminution. La transition contient une discontinuité caractérisée par un point d'inflexion qui a comme résultat l'augmentation de l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage. Malgré l'épaisseur importante de la couche, la valeur de la densité maximale demeure élevée (<math>\sim 1.9 \text{ g cm}^{-3}</math>). Cette transition se retrouve à la base du flanc d'érosion et peut même demeurer présente jusqu'à la base du flanc de progradation. Cette forme de transition implique un dédoublement de la couche supérieure de transport par charriage.</p>
<p>Forme A2</p> 	<p>Cette transition, similaire à la forme A1, possède une diminution soudaine de la densité au point de frontière (flèche), juste au-dessous d'une couche de transport en suspension logarithmique. Cette transition renferme aussi un point d'inflexion mais, contrairement à la forme A1, la densité maximale est nettement plus faible (<math>\sim 1.7 \text{ g cm}^{-3}</math>). Cette forme de transition se retrouve uniquement à la base du flanc d'érosion.</p>
<p>Forme A3</p> 	<p>Cette transition, située sous une couche de transport en suspension logarithmique, possède un passage continu entre la suspension et le charriage. Pour cette forme, la densité maximale est importante (<math>\sim 2 \text{ g cm}^{-3}</math>). La fin de la transition est caractérisée par un point de densité maximale séparée de quelques millimètres (<math>\sim 3 \text{ mm}</math>). Ces deux points se retrouvent entre le bas du flanc d'érosion et la base du flanc de progradation, lorsque le courant est important ou lorsque la granulométrie est fine. Ainsi, il est localisé dans la section de recirculation du flanc de progradation ou à l'approche du point de rattachement, c'est-à-dire de l'autre côté du vortex d'érosion, à la sortie de la zone de recirculation (Fig. 14).</p>
<p>Forme B1</p> 	<p>Cette transition est en forme de plateau avec un passage à angle droit entre la couche de transport en suspension et la couche supérieure de transport par charriage. Cette forme se retrouve entre le point de rattachement du fluide et le sommet de la ride. La transition se termine par un point de densité maximale élevée (<math>\sim 2 \text{ g cm}^{-3}</math>) jumelé à une faible suspension.</p>
<p>Forme B2</p> 	<p>Cette transition possède les caractéristiques de la forme B1. Par contre, il y a une diminution soudaine de la densité au point de frontière indiquant la présence d'une sous-couche de fluide de l'ordre du millimètre d'épaisseur (flèche), formée par la présence d'une mince couche laminaire de faible densité donc faible teneur en sédiments. Cette transition, qui possède une faible densité au point de frontière (<math>\sim 1.0 \text{ g cm}^{-3}</math>) et une très grande densité maximale (<math>\sim 2.1 \text{ g cm}^{-3}</math>), ne se retrouve que sur la partie sommitale de la ride.</p>



Pour résumer, lorsque la vitesse du courant augmente et que la granulométrie est la même, la transition de la couche supérieure de transport par charriage passe de la forme A1 à A2. De la forme A1 à A2, il y a diminution de leur densité maximale et l'épaisseur de la couche augmente alors que la densité du point d'inflexion diminue. Ceci implique la présence de discrimination entre les deux sous-couches à l'intérieur de la couche supérieure de transport par charriage. Considérant que ces formes de transition sont localisées dans la partie basse du flanc d'érosion, il est possible que la variation de vitesse, qui influence l'intensité du vortex, cause la diminution de densité moyenne de la couche, ce qui facilite le déplacement des grains.

Pour différentes granulométries l'augmentation de l'épaisseur de la couche est inversement proportionnelle à la médiane des grains, indiquant que le déplacement des grains de taille plus faible est plus facile et se fait sur une profondeur plus importante pouvant atteindre l'ordre du centimètre. Il serait intéressant, dans le futur, de réaliser une expérience avec des sédiments dont la densité est supérieure à celle du quartz afin de vérifier si la densité maximale diminuera en association avec l'épaississement de la couche.

La forme A3 est particulière car elle possède une couche de transport en suspension logarithmique ayant un passage continu jusqu'à la densité maximale, de quelque millimètre, apparaît sans corrélation avec la granulométrie. De plus, ce passage n'a pas été identifié sous de faibles courants (expérience 6). Cette forme marque les limites de la zone de recirculation du fluide (Fig. 14).

Les profils de forme B sont situés uniquement entre le point de rattachement du fluide et la partie sommitale de la ride sur la partie haute du flanc d'érosion. Les transitions en forme de plateau (B1 et B2) indiquent que la couche supérieure de transport par charriage est mince et que le mélange eau-sédiments renferme peu d'eau. Entre le point sommital et le point de rupture, le profil prend la forme B3. Il commence à perdre son plateau indiquant une augmentation de la quantité d'eau dans la couche. De plus, la densité maximale diminue et un point d'inflexion se forme entraînant une augmentation très importante de l'épaisseur de la couche (jusqu'à ~12 mm). Cette augmentation tient au fait que les sédiments sous cette couche sont ceux déposés lors de la progradation de la ride et, par conséquent, sont soumis au processus actif de compaction.

Les paramètres sédimentologiques mesurés sur le flanc de progradation indiquent une complémentarité des phénomènes hydrauliques communs au flanc de progradation et au flanc d'érosion. Ainsi, la couche de transport en suspension du flanc de progradation présente une densité plus importante à la base qu'au point de rupture. Ceci est causé par les avalanches qui entraînent une émulsion non combinée à l'écoulement du fluide sur la couche limite du flanc de progradation (Blumberg & Curl, 1974). La couche supérieure du transport par charriage du flanc de progradation reflète la présence d'une activité discontinue pendant la construction de la ride, soit la progradation par étape discrète et discontinue. Aussi, la couche supérieure du transport par charriage présente des discontinuités conséquentes à la présence du point d'inflexion. Par contre, le point d'inflexion représente la mesure d'une progradation dynamique sous forme d'avalanche. La section de la ride en construction renferme une double et parfois triple couche d'avalanches qui contient les nouveaux clinofformes de densités non homogènes telles qu'indiquées par le point d'inflexion. Cette succession de couches est comparable une séquence bouma (Bouma, 1962), décrivant un lit sédimentaire (sédiments-eau) classique déposé par des courants de turbidité. Chacun des cinq lits décrits par Bouma a une lithologie spécifique. Néanmoins, le flanc de progradation, en raison du processus de progradation, est une représentation à échelle réduite de la formation d'une véritable séquence de Bouma, où certains lits peuvent être absents. Ceci est dû à la progression discrète ou pulsative du processus d'avalanches à la

différence de la taille par rapport à l'avalanche cataclysmique. Ce phénomène explique l'épaisseur, la forme discontinue et non homogène de certains flancs de progradation ainsi que l'angle de dépôt parfois non conforme aux lamines de progradation (Reineck & Singh, 1975).

La densité de la couche supérieure du transport par charriage située au flanc de progradation présente des résultats spécifiques (Tab. 7 ;  $U = 42.3 \text{ cm s}^{-1}$  et  $d_{50} = 0.470 \text{ mm.}$ ), corrélés à la granulométrie qui cause des avalanches plus volumineuses (Allen, 1970). Ces avalanches contiennent une plus grande quantité de sédiments à la base de la suspension, et une valeur plus basse du point de densité maximale indiquant une plus grande quantité d'eau captive dans le lit, corroborée par une densité moyenne de la transition, plus basse.

L'activité de la couche supérieure du transport par charriage est un indicateur de la mesure d'une avalanche active ou non compacté. La discontinuité dans la transition causée par l'avalanche est située à la fin de la transition, près du point de densité maximale. Elle crée une double couche dans la compaction. La discontinuité ainsi mesurée est fondée sur la loi de Stokes mais appliquée dans le lit (Young et al., 2007). Elle est le résultat d'un mouvement gravitaire causant une limitation de compactage fonction de la vitesse de chute des sédiments (Yalin, 1992; Moore, 2004; Long et al., 2004) et pouvant être associée à un phénomène de remaniement dynamique des sédiments (turbidite).

#### **4.7 Effets du fluide sur la densité de la couche supérieure de transport par charriage**

Au cours des mesures réalisées sur les profils de densité, il a été constaté qu'à la base du flanc d'érosion, la densité maximale du profil était nettement plus faible. Au même endroit, l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage atteint son épaisseur maximale. Cette section de la ride est donc étudiée afin d'expliquer les différences de formes dans les transitions A1 à A3.

La contribution des vortex à l'érosion des sédiments est incontestable, mais la profondeur de leurs actions sur le charriage n'avait pas été mesurée jusqu'à présent, ce qui constitue une innovation. La mesure au scanographe révèle une faible densité à la

base du flanc d'érosion indiquant l'effet des vortex sur l'intégrité structurale du lit et de la couche de charriage. Le vortex au-dessus d'un flanc d'érosion est divisé en trois parties : le flux descendant, le flux longitudinal et le flux montant, auquel s'ajoute la partie rattachement du fluide (Fig. 7). Avec cette division, le vortex peut être analysé dans le temps (Euler), sur un emplacement fixe, tout en suivant l'évolution de l'architecture de charriage. Les trois sections de transport de la ride sont déterminées en utilisant le concept de section, selon la définition de Reineck & Singh (1975). Afin d'établir les limites physiques du vortex en tant qu'écoulement de recirculation irrégulier (Blumberg & Curl, 1974), la section d'érosion est positionnée entre le point de non-retour (Reineck & Singh, 1975) et le point de rattachement du fluide (Reineck & Singh, 1980 et Baas, 2003).

Il est reconnu que les sédiments qui se déplacent dans un fluide influencent les caractéristiques de ce dernier (Allen, 1984 et Bridge & Demicco, 2008). L'effet dominant des sédiments sur le fluide est localisé près du lit, à la base du vortex, là où la référence de concentration et l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage sont maximales.

Plus précisément, pendant la phase d'intrusion de l'eau dans la colonne sédimentaire, la densité diminue (1.941 à 1.816 g cm<sup>-3</sup>) dans la colonne de sédiments du flanc d'érosion, tout en conservant intacte l'architecture interne de la ride. L'architecture sédimentaire est affectée au cours de la phase d'expulsion du fluide, entraînant une phase d'érosion intense, qui apparaît dans la couche supérieure de transport par charriage.

L'expérience conduite concernant le retrait de l'eau (Fig. 115) corrobore la théorie des phases d'injection, de migration et d'expulsion du l'eau affectant la base du flanc d'érosion. En effet, la partie basse du flanc d'érosion conserve l'empreinte des laminations parallèles à la surface en raison de la phase de migration de l'eau due au vortex (Fig. 115 b). La formation conserve aussi les écailles de progradation initiales (Fig. 115 a) avec une lamine basale visible (Fig. 115 b). Par contre, la lamine de transport (Fig. 115 a) n'est pas en accord avec l'imagerie en condition immergée (Fig.

115 b) qui présente, comme les mesures dynamiques, une lamine de transport beaucoup plus épaisse à la base du flanc d'érosion.

La division de la rotation du vortex en trois flux permet d'établir des zones d'activité. Le vortex étant principalement situé sur la partie inférieure du flanc d'érosion de la ride, son action nécessite une division en trois phases exprimant la circulation du fluide dans la matrice sédimentaire sous vortex : une phase d'intrusion (I), une phase de migration (M) et une phase d'expulsion (E). À ces phases, s'ajoute la section de rattachement du fluide (R) circulant au-dessus du vortex (Fig. 120 et Fig. 121).

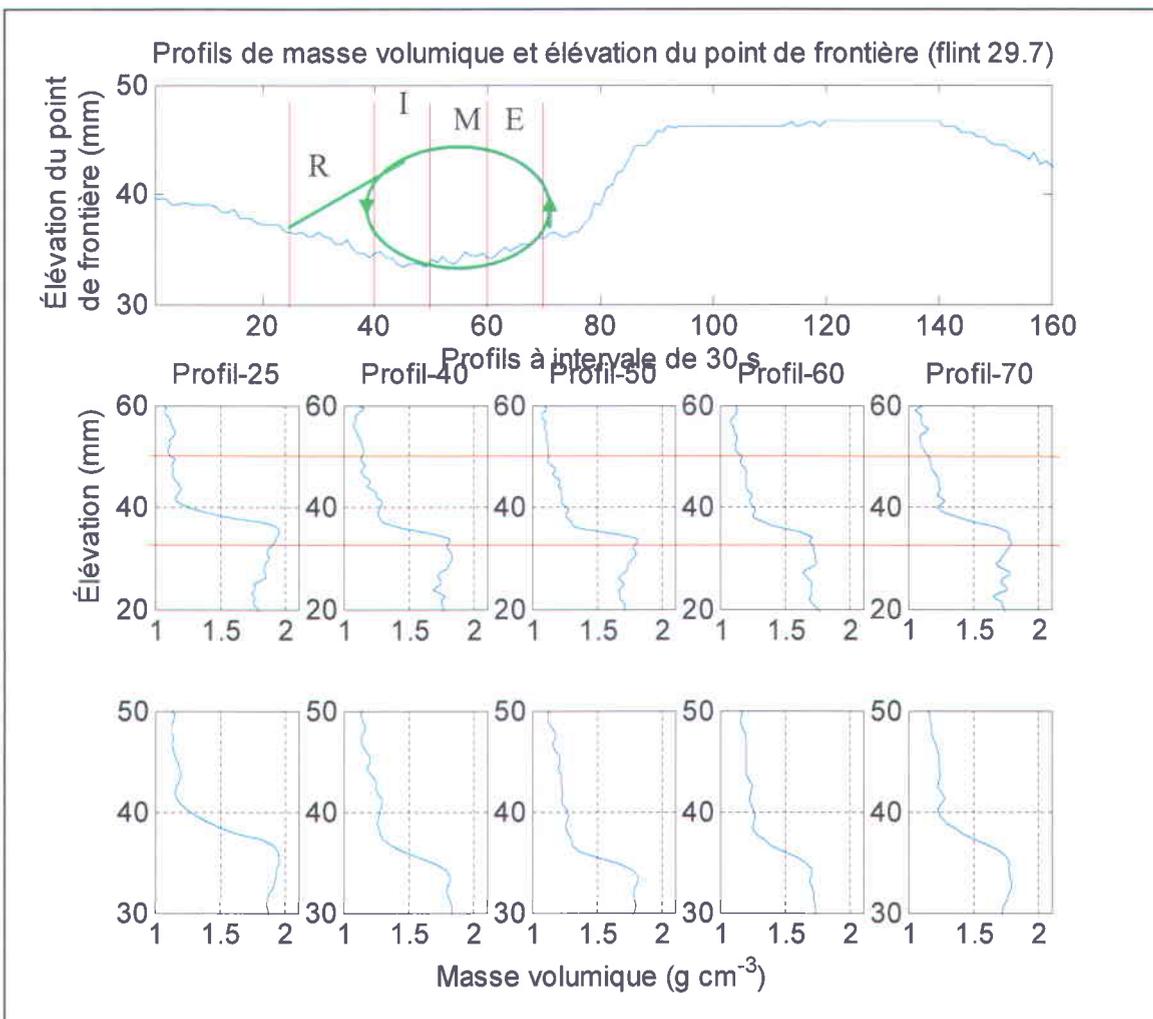
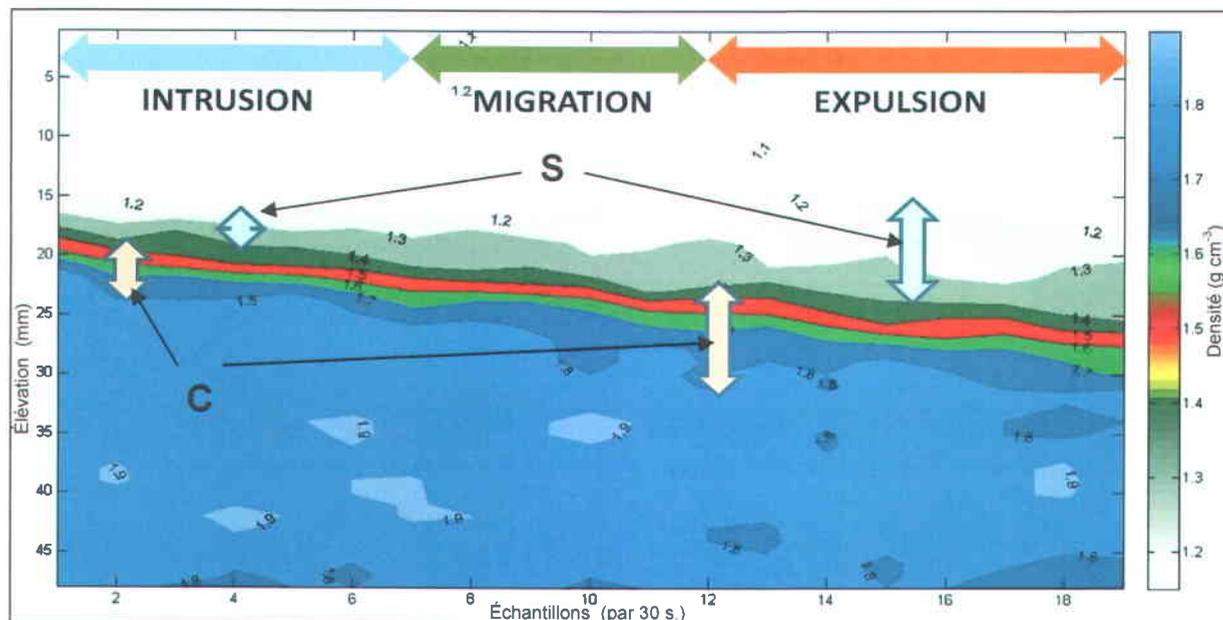


Figure 120. Profils de densité dans la partie basse du flanc d'érosion et position du vortex au-dessus du lit, en fonction des influences de ce dernier sur le lit sédimentaire.

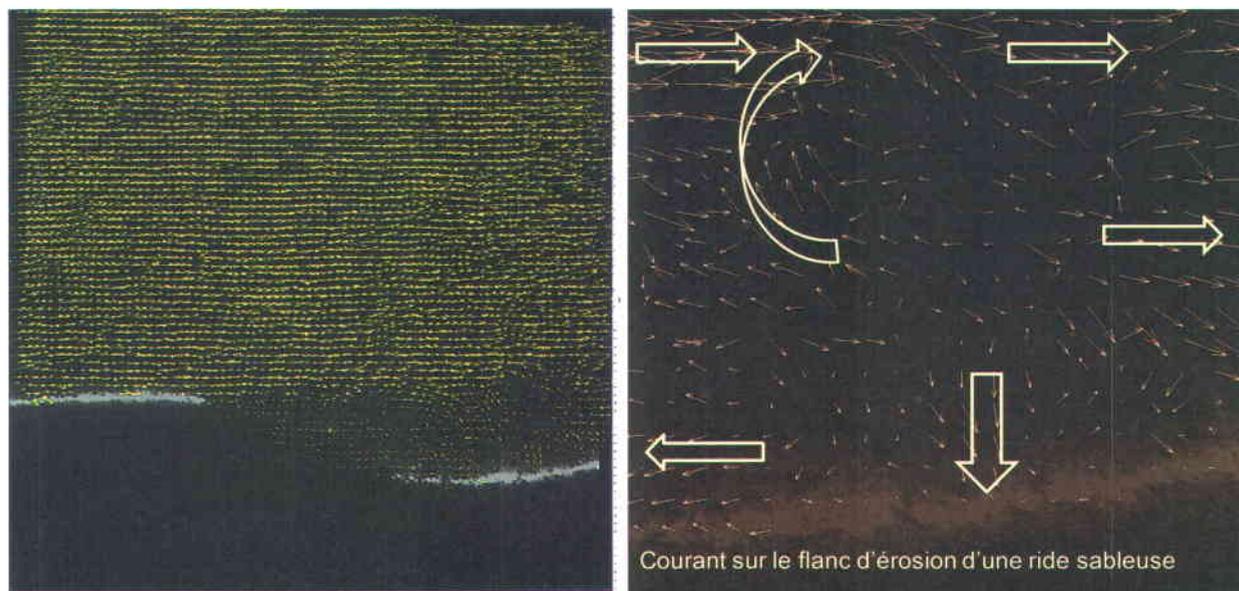


**Figure 121.** Mesure des couches par densité incluant la zone d'intrusion, de migration et d'éjection du fluide ainsi que l'épaisseur de la couche de transport en suspension (S) et de la couche supérieure de transport par charriage (C). (Montreuil & Long, 2011).

Les mesures montrent que la densité de la zone d'intrusion diminue. Cette diminution est le résultat de l'augmentation du rapport eau-sédiments dans les voxels composant le profil. L'hypothèse de l'injection est basée sur l'augmentation de l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage et de la réduction simultanée de la densité à l'endroit où le flux du vortex est descendant. Le flux descendant applique une force perpendiculaire au lit qui s'additionne à la gravité. Ces forces entraînent l'injection de l'eau dans la matrice sédimentaire (Fig. 120 ; Profils 40-50) diminuant la friction intra granulaire.

Le flux transversal circule horizontalement et en sens inverse du courant, entraînant la rétention de l'eau dans la matrice et la migration du fluide, qui se répand dans la matrice sédimentaire (Fig. 120 ; Profils 50-60). Entre les profils 60-70, la densité du lit sédimentaire augmente, ce qui confirme que l'eau est expulsée de la matrice sédimentaire. Il est aussi possible que le phénomène d'expulsion soit concomitant à la pression appliquée par la progradation, phénomène qui chasse l'eau du lit par compaction et qui s'accompagne d'une baisse de la force perpendiculaire du vortex. Cette complémentarité est conforme aux composants hydrauliques présents dans la

zone de recirculation, tels que définis par Blumberg & Curl (1974). De plus, Les mesures au PIV ("*Particule Image Velocimetry*") réalisées par le laboratoire de tomographie (Équipe du Professeur Long) présentent des courants dans la partie basse du flanc d'érosion concordant avec les phases d'intrusion, de migration et d'expulsion de l'eau dans la ride sableuse.



**Figure 122. Mesures des vecteurs de vitesse présentes au-dessus du flanc de progradation et de la base du flanc d'érosion. (Crédit : Équipe du Professeur Bernard Long)**

Ces observations soulèvent une question en ce qui concerne le vortex. Ce dernier est-il responsable à lui seul de l'érosion ? Il semble que non, car la recirculation du fluide entraîne les sédiments en sens inverse de celui de la migration de la ride. Il semble donc que le vortex, par sa rotation inverse, refoule les sédiments à la base du flanc de progradation et en expulse une partie dans l'écoulement turbulent tranquille, structurant l'écoulement (Fig. 7, 12, 13 et 14). Ceci explique l'accumulation, en plateau, des sédiments à la base de la ride, accumulation qui forme la base du flanc de progradation. Il semble aussi que l'érosion soit causée par les turbulences, par définition instables (Garde, 1994), localisées dans la section de rattachement du fluide. Cette hypothèse s'appuie sur la division en trois phases de l'influence du vortex

(intrusion, migration et expulsion) et sur l'observation de discontinuités de la densité sur le milieu du flanc d'érosion (Fig. 101 à 104), qui coïncide avec le rattachement du fluide. Lors de l'analyse de la profondeur du point de densité maximale des profils, une observation inattendue et innovante a révélé que la position de ce point n'est pas continue le long de la ride. Les profils présentés dans les résultats indiquent clairement que le point de densité maximale descend plus profondément dans la ride, à la base du flanc d'érosion. Ceci démontre une pénétration d'eau supplémentaire dans le mélange eau-sédiments formant le lit. La profondeur, telle qu'obtenue à la figure 123, diminue en se déplaçant de la base vers le sommet de la ride. Mais, là où se trouve le point de rattachement, une discontinuité est présente et cela pour l'ensemble des rides étudiées. Après vérification, ces discontinuités dans la profondeur ne sont pas des artéfacts reliés aux parois du canal car la position physique ne change pas pour une même expérience alors que la ride se déplace. De plus, la fenêtre de mesure n'est pas la même d'une ride à l'autre et d'une expérience à l'autre. C'est aussi au point de rattachement du fluide que se retrouve le point où la densité maximale est la plus élevée sur la ride (Fig. 105-107). Le point de rattachement, au point où l'écoulement laminaire, plus rapide que le fluide en recirculation, entraîne un changement rapide de la pression appliquée près du lit ce qui entraîne cette discontinuité. La discontinuité est associée à l'apparition de la sous-couche de fluide. Mon hypothèse d'une sous-couche de fluide permet d'expliquer la présence sporadique d'une sous-couche de fluide dans la zone turbulente de l'écoulement de recirculation.

La discontinuité entre les points (a) et (b) (Fig. 123) cause une seconde phase d'érosion caractérisée par la partie arrondie du dessus de la ride (Fig. 4) (Reineck & Singh, 1975). Le début de l'arrondi du sommet de la ride, coïncide aussi avec la position où la lamine de transport est la plus épaisse (Fig. 4) (Reineck & Singh, 1975). Le point d'arrondi indique donc une autre phase du transport de la ride causant l'érosion du haut du flanc d'érosion. Sans ce point, la forme de la ride serait parfaitement triangulaire, triangle formé par les points bas et le point de non-retour.

Les lames de transport de Reineck & Singh (1975) sont des lames mesurées après le retrait de l'eau donc suivi d'une compaction et d'une sédimentation. Du point de vue

dynamique, la lamine de transport se compose d'une lamine dorsale soumise à l'influence de l'écoulement de recirculation située dans de la zone de turbulences précédant le rattachement de la couche d'écoulement laminaire. Passé ce point, la lamine de transport est dite sommitale, car elle devient plus compacte, pour atteindre le point de rupture, où les sédiments compacts progressent sur une sous couche fluide de plus en plus mince jusqu'au point de rupture de la ride. La discontinuité du point de densité maximale au point d'arrondi sépare donc la lamine de transport dorsale de la lamine de transport sommitale. Cette division permet d'associer les phénomènes hydrauliques du rattachement du fluide et les changements de géométrie de la ride.

#### **4.8 Surface de la ride**

L'analyse des résultats obtenus dans la couche supérieure de transport par charriage détaillent les différences dans l'observation de la surface d'une ride sans courant, en l'absence d'eau et d'une surface dynamique lors de la présence d'eau. La surface dynamique évolue dans l'espace et le temps sous l'influence du fluide. Cette surface en mouvement renferme le transport par charriage. Elle débute avec le point de frontière délimitant le transport en suspension du transport par charriage et se termine par la surface *stricto sensu*, au point de densité maximale. Cette limite de la surface dense composée du point de densité maximale présente une densité plus grande sur la partie sommitale et plus faible dans le bas du flanc d'érosion. Ces changements de densité le long de la formation sableuse ont été corroborés par les résultats de Aucoin et al., (2011) suivant des mesures au lidar bathymétrique. Ces changements dans la composition de la surface de la ride ont aussi été mesurés par Wheatcroft (2002), entre le sommet et le creux d'une ride.

La nouvelle définition de la surface de la ride (Fig. 124-125) entraîne l'introduction de la notion de base de la ride comme référence ("*datum*"). En effet, l'estimation du transport sédimentaire se fait en utilisant comme volume total transporté celui estimé suivant la forme géométrique de la ride (Kinoshita, 1967; Yalin, 1977; Reineck & Singh, 1980; Seka, 2000; Baas, 2003). Cette méthode estime le volume de la ride en prenant la hauteur entre la base et le sommet et sur une ride active, la référence de concentration

Ca. L'utilisation de ce point a donc pour effet la sous-estimation de la hauteur réelle d'une ride en migration et du transport par charriage.

Liu (2001) et Bijker (1992) présentent  $a=ks$  (Fig. 118) comme l'épaisseur de la surface de la ride. Ainsi, il est possible d'associer cette épaisseur  $a=ks$  avec la couche supérieure de transport par charriage tel que défini dans cette étude. Aussi, en se basant sur la notion de couche limite et de sous-couche visqueuse (Etheridge & Kemp, 1979; Bridge, 2003b), qui font appel à la base solide du lit sédimentaire, il est possible d'associer cette dernière à la base de la couche supérieure de transport par charriage.

Dans cette étude, la base du lit sédimentaire est établie au niveau du point de densité maximale. À partir de cette notion, il est possible d'associer la couche supérieure de transport par charriage à la sous-couche visqueuse qui est fonction de la contrainte de cisaillement (Bridge & Demicco, 2008) (Fig. 21).

La définition de la surface du flanc d'érosion s'accompagne d'une seconde discontinuité localisée au bas de la pente d'avalanches. Cette pénétration de l'eau dans la matrice sédimentaire est causée par la rencontre de deux phénomènes. Soit : le déplacement de l'eau en recirculation et le déplacement de l'eau causé par la compaction sous le flanc de progradation. (Fig. 123 ; flèches vertes). La limite entre ces deux phénomènes définit la limite entre le flanc d'érosion et le flanc de progradation. Cette limite prend en considération la rétroaction du vortex sur la base de l'avalanche, composant qui participe à l'érosion et au transport. Cette limite concorde avec la définition de la base du flanc d'avalanche de Reineck & Singh (1975) mais n'est pas aussi élevée que la limite de Yalin (1992) et elle est en désaccord avec Tucker (2001) le situant au point le plus bas. La figure 123 synthétise la circulation du fluide à l'intérieure de la ride. Le vortex injecte l'eau dans la ride réduisant sa densité et initiant l'érosion. Le sédiment gorgé d'eau se déplace vers le sommet de la ride (b). Au point de rattachement du fluide (ligne verte), le transport (couche supérieure de transport par charriage) devient plus épaisse, poussée par la pression du contact avec l'écoulement laminaire. Ceci cause une discontinuité (flèche noire) correspondant au point d'arrondi de la ride et au point de rattachement du fluide. La couche supérieure de transport par charriage s'amincit et se densifie jusqu'au sommet de la ride (a). Sur le flanc de progradation, la couche

supérieure de transport par charriage est d'épaisseur plutôt constante. Mais à la base, dans la zone d'avalanches, une discontinuité (e) est présente à la rencontre du vortex et de l'avalanche. L'eau est donc poussée par le reflux du vortex et la compaction de la ride en mouvement. Cette discontinuité de la couche supérieure de transport par charriage est la limite entre l'érosion et la déposition et démontre la continuité entre les deux phénomènes.

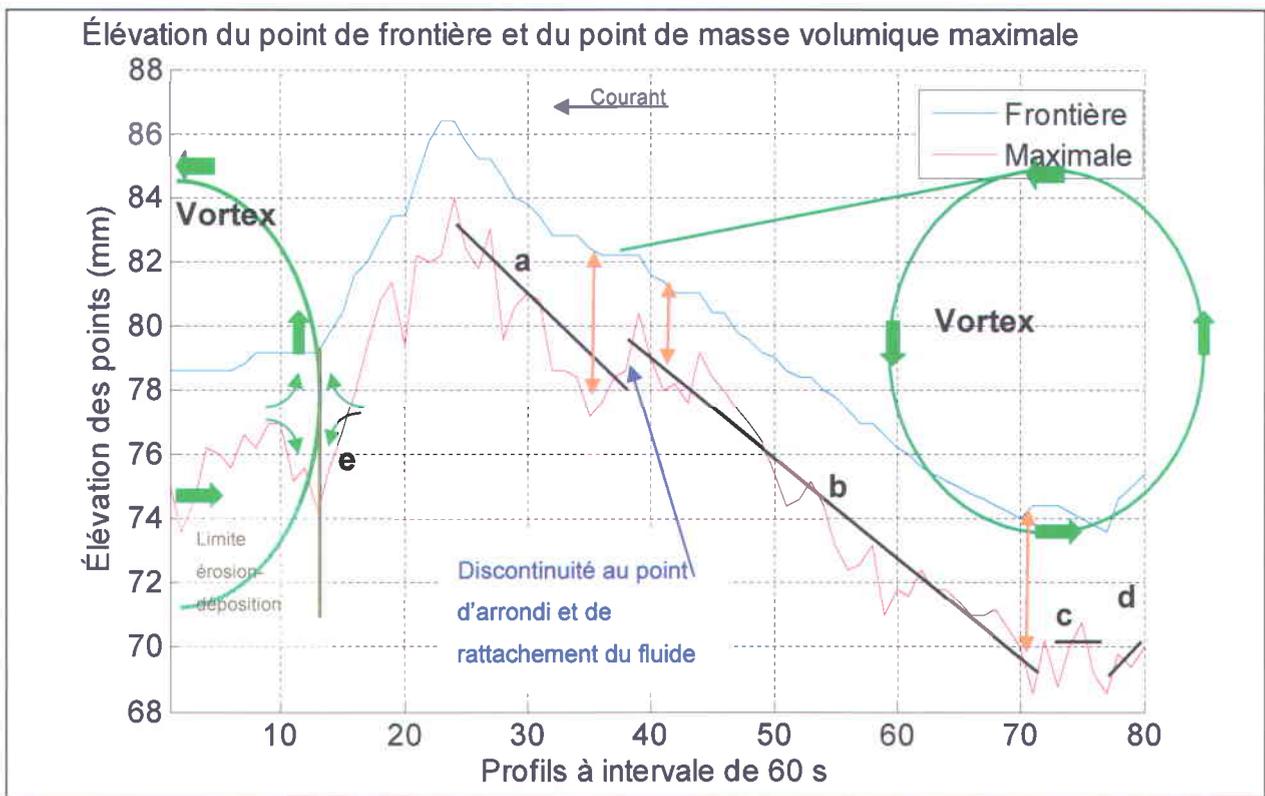


Figure 123. Représentation graphique de l'élévation du point de frontière et du point de densité maximale de l'expérience 4. Cette expérience est réalisée avec une granulométrie ayant une médiane de 0.200 mm et une vitesse de 34.7 cm s<sup>-1</sup>.

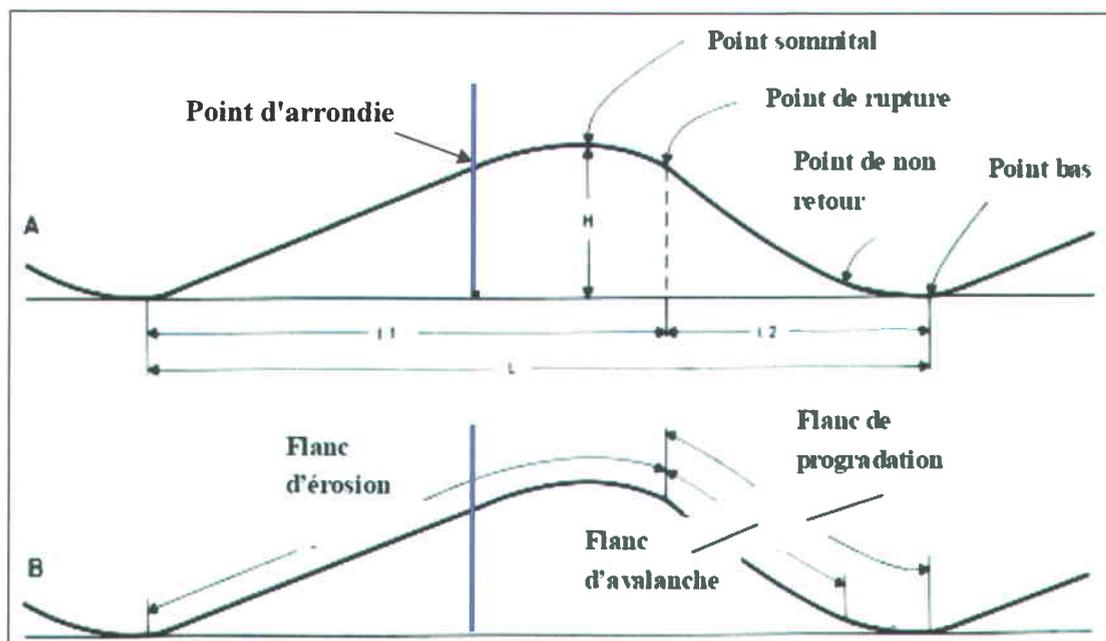


Figure 124. Définition des sections d'une ride modifiée de Reineck & Singh (1975). En A s'ajoute le point d'arrondie, où la ride linéaire amorce un rayon de courbure formant le sommet de la ride.

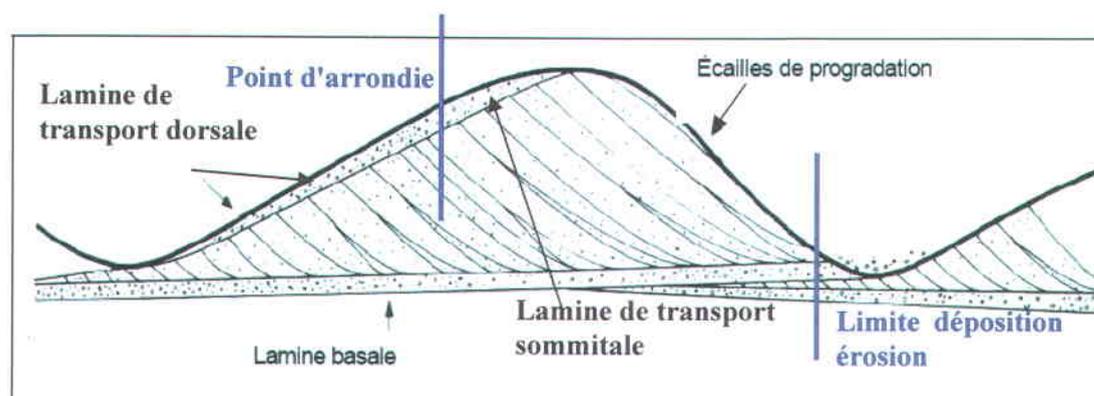


Figure 125. Définition des couches internes d'une ride, modifiée de Reineck & Singh (1975). L'architecture interne de la ride est caractérisée par trois types de couches, soit : les lames de transport dorsale et sommitale, les écailles de progradation et la lamine basale.

## 4.9 Étude de la contrainte de cisaillement

Un fluide composé d'eau et de sédiments se déplaçant le long d'une surface solide induit une contrainte de cisaillement entre le fluide visqueux et la surface solide de la ride (Nakayama & Boucher, 1999; Yalin, 1992), formant une couche. La condition de non-glissement stipule que la vitesse du fluide à la surface est nulle et qu'elle augmente jusqu'à devenir équivalente à la vitesse du fluide. La couche ainsi formée est la couche limite. La contrainte de cisaillement  $\tau_w$  est présente dans cette couche limite en raison de l'évolution de la vitesse et peut être exprimée par l'équation :

$$\tau(y) = \varepsilon \frac{\partial u}{\partial y} \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3)$$

où  $\mu$  est la viscosité dynamique du fluide,  $u$  est la vitesse du fluide le long de la frontière, et  $y$  est l'épaisseur de la couche limite.

Tel que démontré précédemment, le transport par charriage le long de la ride sableuse, et plus précisément la couche supérieure de transport par charriage, n'est pas une surface solide. Ceci implique que la viscosité dynamique du fluide  $\mu$  doit être remplacée par la viscosité interne de charriage  $\mu_i$ . L'utilisation de la viscosité du mélange eau-sédiments  $\mu_i$  déplace plus profondément dans la couche de transport, la condition de non-glissement. La notion de rugosité du lit devra être prise en compte. Ainsi, lorsque la surface théorique est remplacée par une couche de sable. L'épaisseur de la couche limite est mesurée à partir de la surface *stricto sensu* de la ride, ce qui correspond au point de densité maximale, limitant la base de la couche supérieure du transport par charriage (Fig. 117). L'étude des profils de viscosité dynamique démontre que  $\mu$  n'est ni linéaire ni constant le long des profils de la ride (Fig. 126). Ceci implique que la courbe de la contrainte de cisaillement, telle que définie par Yalin (1992), ne prend pas en compte la viscosité de la couche de transport en suspension ainsi que la composante de viscosité de la couche supérieure du transport par charriage, qui est assimilable à une surface dynamique de ride. La formulation graphique de la contrainte de cisaillement doit prendre en compte la viscosité de la couche supérieure du transport par charriage (Fig. 127 et 128). Pour cette étude, la contrainte de cisaillement est arrêtée au point de densité maximale, tout en étant conscient qu'un faible mouvement

est présent dans la couche intermédiaire du transport par charriage (Madsen & Durham, 2007).

Cette modification nécessite de reconsidérer  $\mu$ , dans l'équation (3), comme un paramètre variant selon la position le long de la ride et selon l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage (Fig. 127). Les deux profils de viscosité dynamique sont typiques de la base du flanc d'érosion et de la partie sommitale de la ride et montre bien que la viscosité évolue.

Le profil de viscosité entre la base du flanc d'érosion et le point de rattachement du fluide est logarithmique et présente peu de fluctuation entre la limite supérieure de transport en suspension et le point de densité maximale. Enfin, la viscosité qui évolue le long de la ride est obtenue des profils de densité et donc présente la même diversité que la couche supérieure de transport par charriage et de la couche de transport en suspension.

Ceci étant établie, une nouvelle définition de la contrainte de cisaillement s'impose. Elle doit prendre en compte la pénétration de l'eau dans les sédiments et, par conséquent, l'augmentation de la profondeur à laquelle le transport des sédiments doit être mesuré, tel que défini par les paramètres sédimentologiques. Deux contraintes de cisaillement doivent être définies : la contrainte de cisaillement externe et la contrainte interne au lit sédimentaire (transport par charriage). Ceci est valable entre la base de la ride et le point de rattachement du fluide.

La nouvelle définition proposée se subdivise en trois parties : la partie linéaire de la contrainte de cisaillement turbulente  $\tau_t$  (Gyr & Hoyer, 2006; Liu, 2001) (Fig. 127 et Fig. 128) qui est définie par l'équation

$$\tau_t = \tau_0 \left( \frac{1-y}{d} \right) \quad (39)$$

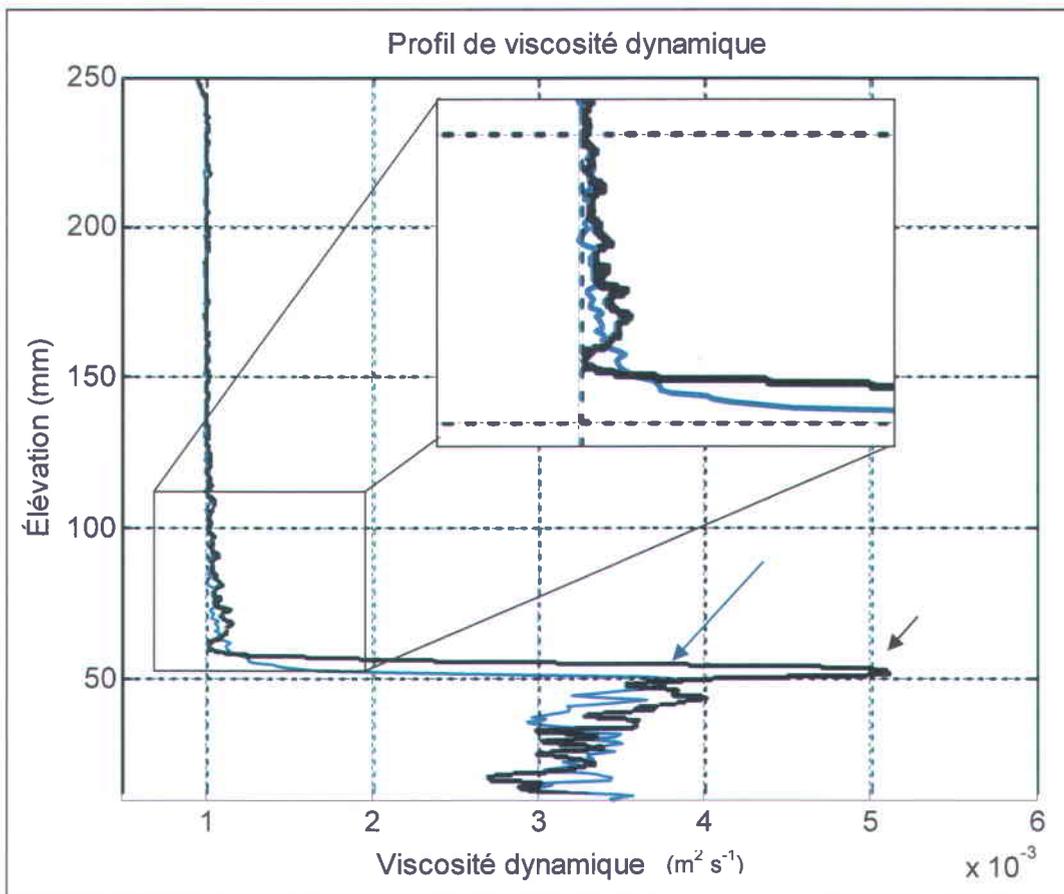
où  $y$  est l'élévation et  $d$  la profondeur d'eau.

La seconde partie, est composée de la contrainte de cisaillement visqueuse  $\tau_v$ , qui est de forme logarithmique en raison de la forme (théorique) imposée par la variation de la viscosité  $\mu$  et a comme équation de la partie visqueuse

$$\tau_v = \tau_0 \log\left(\frac{y}{d}\right) \quad (40)$$

qui est valide entre le point supérieur de transport par suspension et le point de frontière. Ceci donne une nouvelle forme graphique à la contrainte de cisaillement (Fig. 129). L'usage de cette équation nécessite une approche microscopique ou explosée de la ride.

Lors de l'entrée dans la couche supérieure de transport par charriage, la contrainte de cisaillement interne devient entre 3 et 5 fois plus élevée. Cela se produit en raison de l'augmentation, sous forme logarithmique, de la viscosité de la valeur nominale de l'eau  $1.007 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  jusqu'à des valeurs, dans la couches supérieure de transport par charriage, allant de  $3.79 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  jusqu'à  $5.06 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  (Fig. 126), valeurs calculées selon l'équation (21) de Bridge & Demicco, 2008.



**Figure 126. Profils de viscosité dynamique sur la partie basse du flanc d'érosion (bleu) et sur la partie sommitale (noir).**

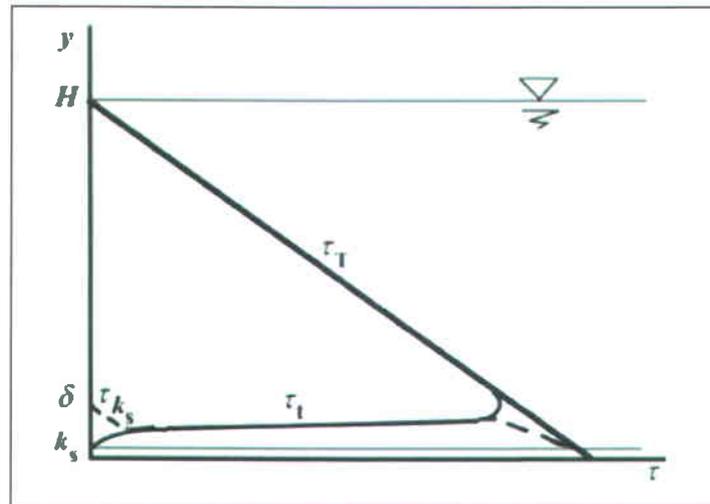


Figure 127. La contrainte de cisaillement total  $\tau_T$  dans un canal à surface libre est une fonction linéaire fonction de la profondeur. Au-delà de la hauteur  $\delta$ , le transfert d'énergie est donné seulement par la contrainte de cisaillement  $\tau_t$ . À proximité du fond, la contrainte de cisaillement est donnée par la rugosité du lit  $k_s$ , qui est essentiellement fonction de la topographie du lit. (Gyr & Hoyer, 2006).

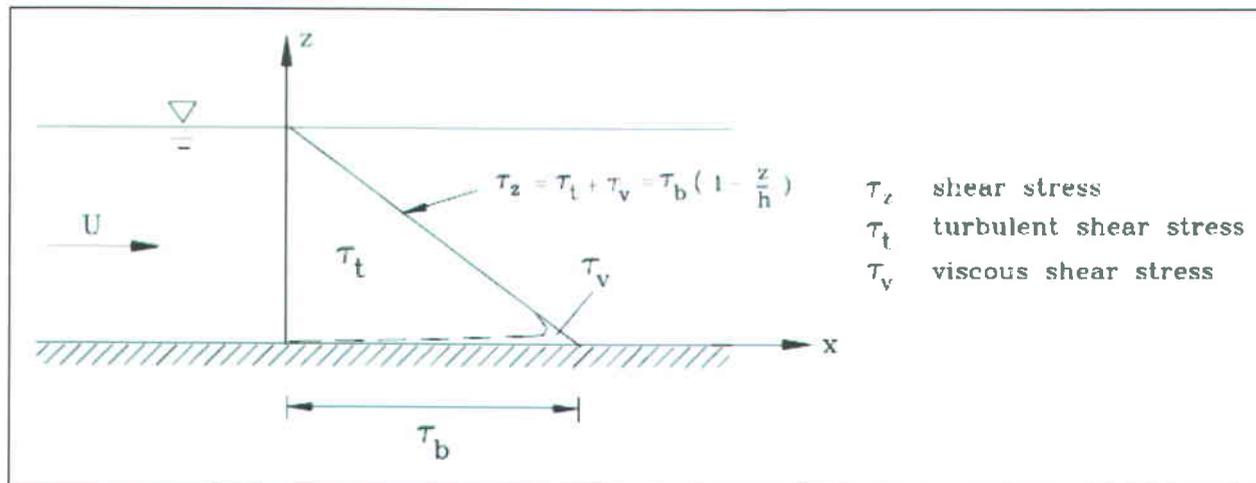
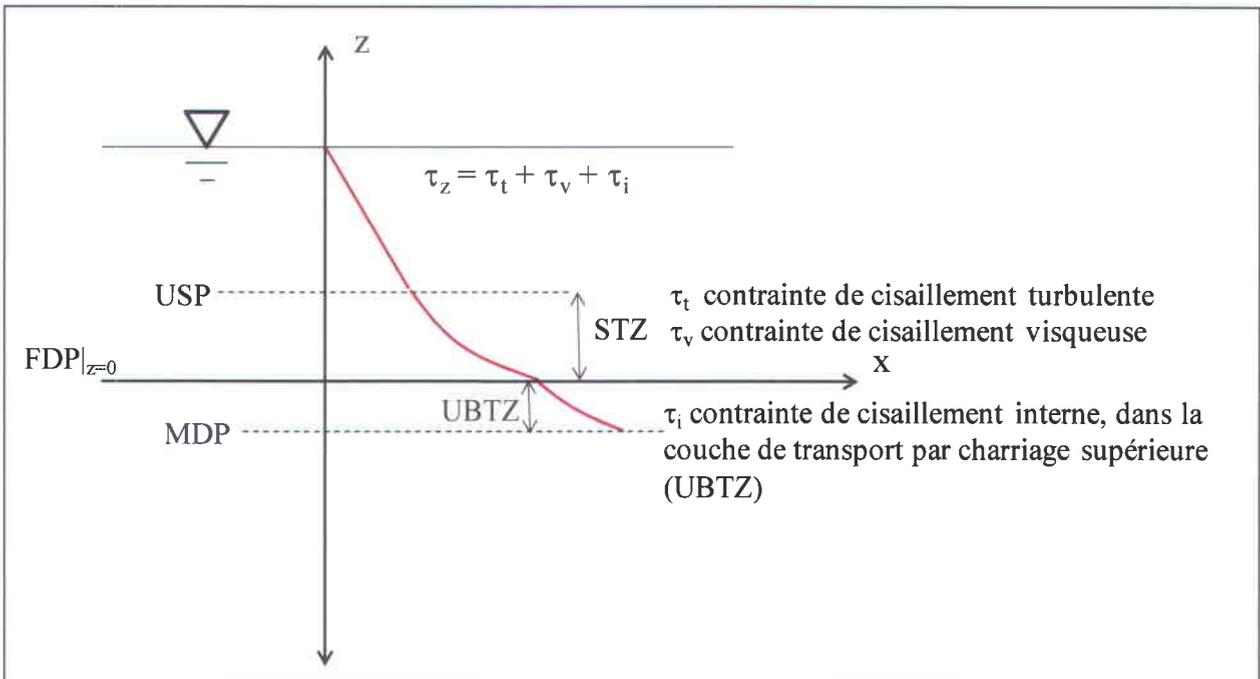


Figure 128. La contrainte de cisaillement total  $\tau_t$  est une fonction linéaire fonction de la profondeur. (Liu, 2001).



**Figure 129. Nouvelle définition de la contrainte de cisaillement qui comprend la pénétration d'eau dans les sédiments et l'augmentation de la profondeur à laquelle le transport des sédiments est mesuré en fonction des paramètres sédimentologiques actifs. USP : limite supérieure de la suspension, STZ : zone de transport par suspension, FDP : point de frontière, MDP : point de densité maximale et UBTZ : couche supérieure de transport par charriage.**

Passé le point de rattachement du fluide, le profil logarithmique est discontinu, incluant une diminution<sup>10</sup>. La transition dans la couche supérieure du transport par charriage est beaucoup plus mince et possède une différence de viscosité plus importante ( $3.79 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  au haut du flanc d'érosion qu'au bas  $5.06 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ). Ainsi, une grande viscosité dynamique  $\mu$  entraîne une grande contrainte de cisaillement  $\tau$  conférant aux sédiments une tendance à l'immobilité causée par la friction intra granulaire. Par contre, à l'inverse au bas du flanc d'érosion la diminution de la viscosité dynamique  $\mu$  entraîne une plus faible contrainte de cisaillement. La courbe de contrainte de cisaillement résultant de l'étude des profils de viscosité dynamique appliqués à une équation de la forme de l'équation (21), proposé par Bridge & Demicco (2008), donne une courbe

<sup>10</sup> La diminution se définit ici par la diminution contraire à la tendance de la courbe.

prenant en compte l'effet de la variation de viscosité dans la contrainte de cisaillement. Ainsi, dans la couche de transport en suspension, la contrainte de cisaillement s'infléchit<sup>11</sup> et augmente plus rapidement en raison de la présence de sédiments en suspension. Une autre inflexion se produit au point de frontière (surface dynamique de la ride) entraînant une contrainte de cisaillement interne qui rejoint la surface solide de la ride (point de densité maximale). Ce raisonnement conduit à vérifier l'influence de la forme de la couche supérieure du transport par charriage sur une équation de la contrainte de cisaillement pour une application locale dans la ride. L'équation de calcul de la contrainte de cisaillement  $\tau_0$  (Richardson et al., 2001) sur un fond sableux est donnée par

$$\tau_0 = \frac{\rho V^2}{\left[5.75 \log\left(12.27 \frac{y_0}{K_s}\right)\right]^2} \quad (7)$$

où  $\tau_0$  est la contrainte de cisaillement à une élévation  $y_0$  du fond,  $V$  est la vitesse moyenne du fluide dans le canal,  $\rho$  est la densité de l'eau et  $K_s$  est la rugosité du lit sédimentaire établie, pour un lit plat, en fonction de la granulométrie et pour une ride en fonction de sa hauteur. Les valeurs en usage dans cette équation sont entre  $d_{84}$  et 3.5 fois  $d_{84}$ , respectivement pour un lit de sable pur et pour les sédiments grossiers. La valeur  $K_s$  dans l'analyse d'une longueur d'onde de ride considère la surface comme une couche de sable solide et immobile dont la rugosité est seulement  $K_s$ .

Les mesures obtenues démontrent qu'une hauteur de rugosité évolue le long de la ride en raison de l'épaisseur de la couche supérieure du transport par charriage et de la compaction de la surface solide de la ride. Ainsi, la première modification à l'équation (7) est l'ajout de la contribution de la couche supérieure du transport par charriage, en modifiant  $K_s$  par  $K_{UBTZ}$  donnant une hauteur de rugosité basée sur un paramètre mesurable. La contrainte de cisaillement résultante s'écrit

---

<sup>11</sup> L'inflexion est ici définie par une modification brusque du taux de variation de la valeur de densité.

$$\tau_0 = \frac{\rho V^2}{\left[5.75 \log\left(\frac{y_0}{K_{UBTZ}}\right)\right]^2} \begin{cases} 5.09 \text{ mm} < K_{UBTZ} < 18.29 \text{ mm, base du flanc d'érosion} \\ 1.17 \text{ mm} < K_{UBTZ} < 5.90 \text{ mm, dessus du flanc d'érosion} \\ 1.18 \text{ mm} < K_{UBTZ} < 14.75 \text{ mm, flanc de progradation} \end{cases} \quad (41)$$

où  $\tau_0$  est la contrainte de cisaillement à une élévation  $y_0$  de la surface solide du lit (PDM),  $V$  est la vitesse moyenne du fluide dans le canal,  $\rho$  est la densité de l'eau à 24°C et  $K_{UBTZ}$  qui n'est pas un coefficient, mais une mesure de l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage le long de la ride de sable de quartz.

$K_{UBTZ}$  est fonction du courant (entre 0 et 42.3 cm s<sup>-1</sup>), de la position sur la ride et de la granulométrie (entre 0.120 et 0.470 mm), ce qui lui confère un lien avec ses origines conceptuelles. De plus, l'utilisation de l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage dans la contrainte de cisaillement s'inscrit comme une suite logique de l'hypothèse qu'une baisse du point de référence ("*datum*") soit à l'origine d'une sous-estimation du transport sédimentaire.  $K_{UBTZ}$  est affecté par la forme des grains car le réaménagement des grains réduit la porosité et donc la pénétration de l'eau en profondeur limitant la couche de transport par charriage.

L'équation de la contrainte de cisaillement permet d'établir la valeur de la contrainte de cisaillement  $\tau_0$  le long de la formation sableuse. Ces valeurs indiquent que, plus la couche supérieure du transport par charriage est épaisse, plus la contrainte de cisaillement est faible, ce qui exprime qu'une plus forte contrainte de cisaillement existe sur le haut du flanc d'érosion que sur le bas. L'innovation apportée par le tomographe permet de bonifier le travail de Middleton & Southard (1977). Il est désormais possible de mesurer en détail la contrainte de cisaillement sur l'ensemble de la surface d'une ride.

Dans cette étude il est considéré qu'au point de densité maximale, la friction entre les grains est telle que le mouvement est imperceptible dans l'échelle de temps utilisée. Ceci permet d'obtenir, à cette profondeur, une surface solide. Par contre, Madsen & Durham (2007) ont démontrés la présence d'un déplacement interne du lit résultat de la pression appliquée sur le lit. Il serait donc important d'étudier ce déplacement en s'appuyant sur les profils de densité (Fig. 114). Ces résultats indiquent une corrélation

entre la densité du lit sédimentaire et le déplacement des structures internes mesurées par Madsen & Durham (2007).

## CONCLUSION

La tomographie axiale ("CT-Scanner") est une technique non intrusive et non destructive générant des images numériques correspondant parfaitement à l'étude de la densité relative d'un mélange de sable et d'eau. Les données, produites sous forme de matrice numérique, représentent ainsi l'évolution des paramètres sédimentologiques selon la variation de la densité, de la concentration, de la porosité et de viscosité du mélange eau-sédiments. Les résultats ainsi obtenus, pour chacune des sections d'une ride, fournissent les points charnières et les couches clés. Ces couches de transport évoluent longitudinalement sous la forme de structures sédimentaires qui varient dans leurs propriétés, le long de la ride.

Cette étude ouvre de nouvelles perspectives dans l'analyse de l'évolution architecturale en 4D du transport par charriage. La variation de la densité du mélange eau-sédiments obtenue lors de la migration sous un régime d'écoulement stationnaire est corrélée avec la rétroaction entre le fluide hydraulique et le sable, influençant la forme et la masse du transport sédimentaire.

Cette approche est utilisée pour décrire le transport sédimentaire par charriage le long de la ride sableuse en fonction de la taille des sédiments et de la vitesse d'écoulement qui développent trois sections de transport : la section d'érosion, la section de charriage et la section de déposition. La section d'érosion contenant le vortex est elle-même subdivisée en trois phases : la phase d'intrusion, la phase de migration et la phase d'expulsion du fluide.

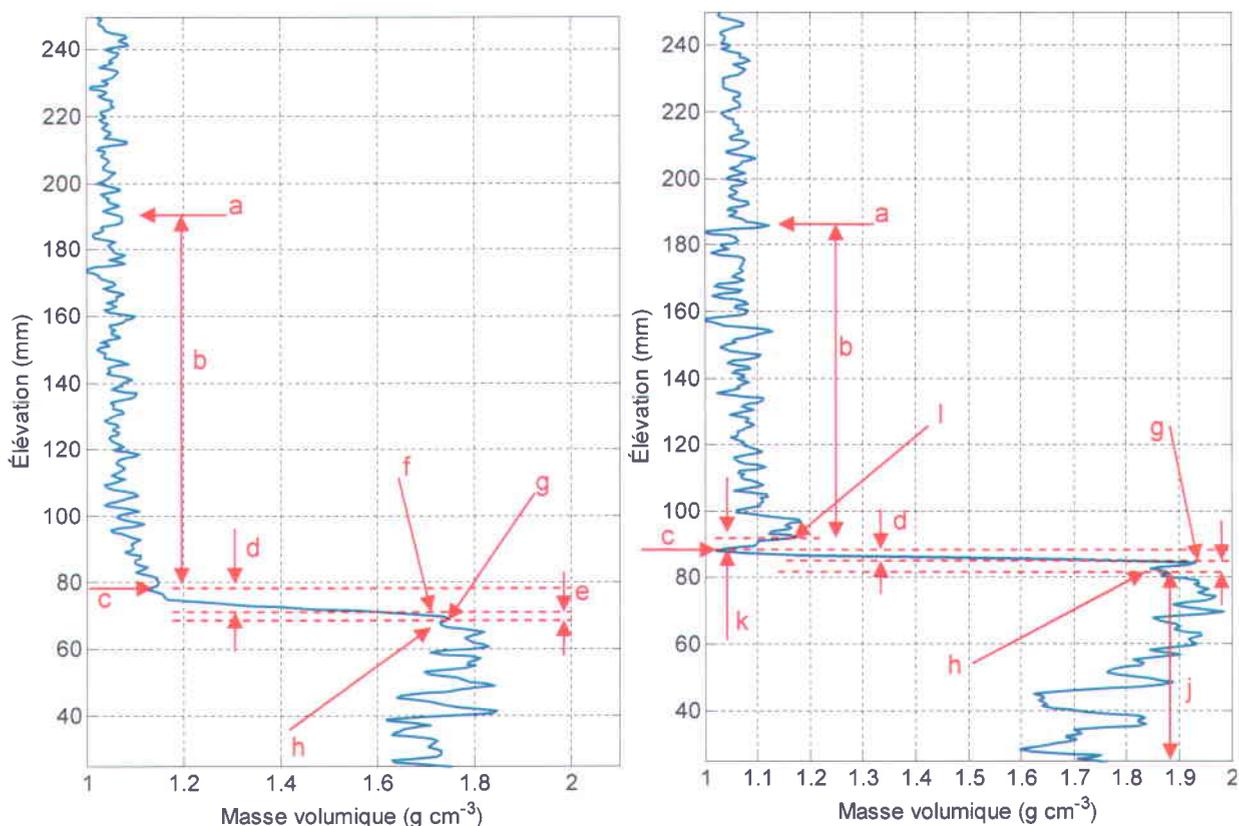
Il est aussi possible de visualiser la présence de certaines laminations dans le lit sédimentaire. Par contre, la saturation en eau du mélange eau-sédiments du lit rend difficile l'observation dynamique des laminations. La vidange et le séchage a eu comme résultat l'accentuation du contraste par le remplacement de l'eau par de l'air. Par conséquent, l'augmentation du contraste par l'ajout d'un produit de contraste dans le fluide permettrait de visualiser les laminations durant la migration de la ride ainsi que la circulation de l'eau dans la ride.

Les profils de densité mesurés ont permis d'établir une terminologie décrivant l'architecture de la ride. Il a été montré que la migration d'une ride se fait sous forme de couches et de sous-couches délimitées par des points (Fig. 130). Les couches et leurs limites se présentent ainsi :

- Couche supérieure de transport en suspension
  - Limite supérieure de transport en suspension
  - Point de frontière
- Sous-couche fluide
  - Limite supérieure de sous-couche fluide
  - Point de frontière
- Couche supérieure de transport par charriage
  - Point de frontière
  - Point de densité maximale
  - Sous-couche d'inflexion
    - Point d'inflexion
- Couche intermédiaire de transport par charriage
  - Point de densité maximale
  - Limite inférieure de basse densité
- Couche inférieure de transport par charriage
  - Limite inférieure de basse densité
  - Fond du canal

Le point de frontière ou la limite supérieure de sous-couche fluide identifie la limite séparant la suspension du charriage. Cette limite est en accord avec la littérature, car la référence de concentration est reconnue comme la base de la suspension. Ainsi, à l'exception de la sous-couche fluide, elle représente aussi le début du charriage. Conséquemment à cette limite, le transport par charriage se trouve localisé entre la base de la suspension et la surface du lit. La surface du lit est définie dans cette étude comme le point où la densité est maximale forme une surface solide. Cette surface solide est considérée dans cette étude comme immobile. Mais pour les deux derniers

points, la présence de transport devrait être corroborée en collaboration avec Madsen & Durham, (2007).



**Figure 130.** Profil de forme typique de la partie basse du flanc d'érosion et du flanc de progradation. (a) Limite supérieure de transport en suspension. (b) Couche de transport en suspension. (c) Point de frontière. (d) Couche supérieure de transport par charriage (e) Sous couche d'inflexion. (f) Point d'inflexion. (g) Point de densité maximale. (h) Limite inférieure de basse densité (i) Couche intermédiaire de transport par charriage. (j) Couche inférieure de transport par charriage. (k) Sous couche fluide. (l) Limite inférieure du transport par suspension (seulement en présence d'une sous couche fluide).

La surface *stricto sensu* de la ride et la base de la suspension étant ainsi définie, il est possible d'établir que la couche supérieure de transport par charriage contient des informations importantes relatives au transport par charriage. Elle peut aussi intégrer l'épaisseur de la rugosité du lit  $a=ks$ .

La couche supérieure de transport par charriage est composée de six transitions types décrivant l'épaisseur et la densité du charriage le long de la ride en fonction des variables d'environnementales. Suite aux variations observées dans la couche

supérieure de transport par charriage se trouvant à la base du flanc d'érosion, l'analyse spécifique de cette section de la ride a indiquée l'injection de fluide dans le lit sédimentaire. Le fluide étant injecté par le flux descendant du vortex. Ensuite, sous l'influence du flux latéral du vortex, le fluide migre vers le flanc de progradation. Le fluide est ensuite expulsé sous l'influence combinée du flux ascendant du vortex et de la compaction causée par la progradation de la ride (Fig. 123). Cette innovation met en lumière une dynamique à l'intérieure de la structure de la ride.

À l'avant du vortex, où se trouve la zone turbulente de rattachement, l'épaisseur et la densité de la couche supérieure de transport par charriage passe des valeurs typiques obtenues au vortex à des valeurs décroissantes en épaisseur mais croissant en densités. Ces changements sont indépendants de la vitesse du fluide (si  $U >$  vitesse d'entraînement) et conduisent au point d'arrondi.

Au point d'arrondi, le rattachement de la couche laminaire, de vitesse supérieure entraîne, une seconde phase d'érosion, confirmant que ce point est déterminant pour la continuité du charriage et l'évolution du rapport densité épaisseur. Passé le rattachement de la couche laminaire, il y a formation d'une sous-couche fluide qui se propage jusqu'au sommet de la ride.

Les mesures réalisées durant cette étude indiquent que la surface de la ride est plus basse que celle définie par la référence de concentration  $Ca$ . En conséquence, la surface de la ride est redéfinie à la profondeur où la densité et la friction sont maximales. Cette nouvelle surface a pour conséquence l'augmentation du volume géométrique de la ride en migration par rapport aux limites émises par la littérature et entraînant dorénavant une estimation plus considérable du transport sédimentaire par charriage.

La couche supérieure de transport par charriage, lorsque assimilée à l'épaisseur de la rugosité du lit  $a=ks$ , permet d'établir un lien avec la contrainte de cisaillement. La contrainte de cisaillement peut ainsi être obtenue en fonction de l'épaisseur de la couche supérieure de transport par charriage. De plus, le lien entre la couche supérieure de transport par charriage et la contrainte de cisaillement est corroboré par

les changements de viscosité dynamique du mélange eau-sédiments dans cette couche qui entre dans le calcul de la contrainte de cisaillement.

L'examen plus complet et la mise en place d'une terminologie contenant les paramètres sédimentaires ont permis d'innover et de découvrir les phases d'injection, de migration et d'expulsion de l'eau. Ces phases indiquent la présence d'un transport plus profondément dans la ride. Elles ont conduit à une nouvelle définition de la surface de la ride ("*datum*"). Cette nouvelle surface, mise en relation avec le point de frontière, a révélée la concomitance entre la couche supérieure de transport par charriage et la rugosité du lit. Ceci a permis d'émettre une équation (41) de la contrainte de cisaillement modulant cette dernière en fonction de l'évolution de l'épaisseur du transport par charriage mesuré au tomographe.

$$\tau_0 = \frac{\rho V^2}{\left[5.75 \log\left(\frac{y_0}{K_{UBTZ}}\right)\right]^2} \quad (41)$$

Néanmoins, il est recommandé pour la suite de ces travaux, d'élaborer un protocole de mesure au scanographe incluant l'usage de fluide de contraste. La présence d'un liquide de contraste permettra l'étude des laminations en présence d'un courant. De plus, si l'injection du fluide dans le canal se fait après la mise en marche et la formation des rides, il sera possible d'établir avec précision la circulation du fluide à l'intérieur de la matrice sédimentaire. Il est aussi recommandé de créer un second protocole de mesure utilisant un sédiment de même densité mais ayant un numéro atomique différent, ce qui permettra de suivre le déplacement des grains. Il sera donc possible de déterminer s'il y a un mouvement ou un cisaillement des couches de transport par charriage en plaçant une couche verticale de sédiment comme traceur, parallèlement à l'expérience de Madsen & Durham (2007). De plus, cette méthode de contraste pourrait permettre de confirmer avec exactitude la nouvelle surface de ride définie par cette étude.

L'exploration d'un dernier protocole de mesure sous scanographe utilisant un grain unique de sédiment radioactif (à la fin de sa demi-vie pour éviter la saturation des capteurs) permettrait de suivre le grain à l'intérieur du cycle de migration d'un champ de ride et raffinerait les résultats obtenus aux traceurs radioactifs.

Cette étude réalisée sous scanographe ouvre plusieurs pistes de recherche en transport sédimentaire tout en démontrant l'innovation et l'immense potentiel de l'imagerie par rayon X en 4 dimensions.

## BIBLIOGRAPHIE

- ACR-NEMA (2004) *DICOM : Digital imaging and communication in medicine*. <http://medical.nema.org/>.
- Aïtcin PC (1983) *Technologie des granulats*. Édition du Griffon d'argile, Sainte-Foy, 372 p.
- Alam AMZ & Kennedy JF (1969) Friction factors for flow in sand bed channels. *Proc. ASCE* 95 (HY6), 1109–1127.
- Allen GP & Posamentier HW (1994) Transgressive facies and sequence architecture in mixed tide- and wave-dominated incised valleys: example from the Gironde estuary, France. In: Dalrymple, R. W., Zaitlin, B. A. & Boyd, R. (eds) *Incised valley systems: origin and sedimentary sequences*, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publications, 51: 225–240.
- Allen JRL (1968) *Current ripples: their relation to patterns of water and sediment motion*. Amsterdam, North-Holland.
- Allen JRL (1968b) The diffusion of grains in the lee of ripple, dunes and sand deltas. *Journal of sedimentary Petrology* 38: 621-633.
- Allen JRL (1970) The Avalanching of granular solids on dune and similar slopes *The Journal of Geology* Vol. 78, No. 3: 326-351.
- Allen JRL (1984) *Sedimentary structures-their character and physical basis*. Elsevier Publishers, Amsterdam, 1256 p.
- Alquier M, Courtois G, Gruat G & Andsausay G (1970) La notion de bon mélange dans l'emploi de traceurs. *La Houille Blanche* : 25 (7) :643-650.
- Amos CL, Beaver D & Heffler DE (1992) *Hudson cruise--sable. island bank. Internal Cruise Report*, Bedford Institute of Oceanography. 14 p.
- Amos CL, Sutherland TF, Radzjewski B & Doucette M (1996) A rapid technique to determine bulk density of fine-grained sediments by X-ray computed tomography. *Journal of Sedimentary Research*, 66, 5: 1023-1039.
- Amoudry LO & Souza AJ (2011) Deterministic coastal morphological and sediment transport modeling: a review and discussion, *Rev. Geophys.*, 49, RG2002, doi:10.1029/2010RG000341.
- Andrews D & Bennett A (1981) Measurements of diffusivity near the sediment-water interface with a fine-scale resistivity probe. *Geochimica Cosmochimica Acta* 45: 2169–2175.
- ASTM (1992) Standard guide for computed tomography (CT) imaging, ASTM Designation E 1441 - 92a. In: *1992 Annual Book of ASTM Standards, Section 3 Metals Test Methods and Analytical Procedures*. ASTM, Philadelphia, 690-713.
- Aucoin F, Long BF & Xhardé R (2011) Using airborne lidar bathymetry to map coastal hydrodynamic processes. *Proceedings Coastal Sediments '11 Conference*, ASCE, Miami, FL, in press.
- Baas JH (2003) Ripple, ripple mark, ripple structure. In: *Encyclopedia of Sediments and Sedimentary Rocks* (Ed. by G.V. Middleton), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 565-568.

- Bagnold RA (1935) The movement of désert sand. *Geographical Journal*, 85: 342- 369.
- Bagnold RA (1937) The size-grading of sand by wind: *Proceedings of the Royal Society of London*, v. A163: 250-264.
- Bagnold RA (1954a) *The physics of blown sand and desert dunes*. Methuen, London.
- Bagnold RA (1954b) Experiments on gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proc. R. Soc. A225*: 49–63.
- Bagnold RA (1956) The flow of cohesionless grains in fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 249(964): 235-297.
- Bagnold RA (1966) An approach to the sediment transport problem for general physics. *US Geological Survey Professional Paper* 422-I. Washington DC.
- Bagnold RA (1973) The nature of saltation and of "bed-load" transport in water. *Proceedings of the Royal Society of London A* 332(1591): 473-504.
- Bagnold RA (1977) Bed load transport by natural rivers. *Water Resources Research* 13: 303-312.
- Barnes HH (1967) Roughness characteristics of natural channels: *U.S. Geological Survey Water- Supply Paper* 1849, 213 p.
- Barnes HA (1980) *Dispersion rheology*:. *Royal Society of Chemistry*, Industrial Division, London.
- Barrett JF & Keat N (2004) Artifacts in CT: Recognition and avoidance, *radiographics*, Volume: 24 Issue (6): 1679-1691.
- Beadnell HJL (1910) The sand dunes of Libyan desert. *Geograph. J.*, 35: 379-395.
- Beard DC & Weyl PK (1973) Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand, *Bull. amer. Assoc. Petroleum Geol.*, 57: 349-369.
- Beckmann EC (2006) CT scanning the early days. *The British Journal of Radiology* 79 (937): 5–8.
- Beer A (1852) Bestimmung der absorption des rothen lichts in farbigen flüssigkeiten (Determination of the absorption of red light in colored liquids), *Annalen der Physik und Chemie*, vol. 86: 78-88.
- Bijker EW (1992) Mechanics of sediment transport by the combination of waves and current. *Proceedings 23rd International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 147-173.
- Bennett SJ & Best JL (1995) Mean flow and turbulence structure over fixed, two-dimensional dunes: implication for sediment transport and dune stability. *Sedimentology* 42: 491-514.
- Bennett PC, Siegel DE, Baedeker MJ & Hult MF (1993) Crude oil in a shallow sand and gravel aquifer—I. Hydrogeology and inorganic geochemistry Original Research Article, *Applied Geochemistry*, Volume 8, Issue 6, November 1993: 529-549.
- Bennett RH, Fisher K, Huon Li, Baerwald R, Hulbert MH, Yamamoto T & Badiely M (1990) In situ porosity and permeability of selected carbonate sediment: Great Bahama Bank. Part 2: Microfabric, *Marine Geotechnology* 9: 29-42.
- Bernoulli D (1738) *Hydrodynamica. sumptibus Johannis Reinholdi Dulseckeri*. 323 p.
- Blauch ME, Venditto JJ, Rothman E & Hyde P (1992) Core analysis and CT imaging improve shale completions. *Oil and Gas Journal*: 45-49.

- Blondeaux P (1990) Sand ripples under sea waves Part 1. Ripple formation. *Journal of Fluid Mechanics*, 218: 1-17 doi:10.1017/S0022112090000908.
- Blumberg PN & Curl RL (1974) Experimental and theoretical studies of dissolution roughness, *Journal of Fluid Mechanics* 65: 735–751.
- Boespflug X, Long BFN & Occhietti S (1995) Cat-scan in marine stratigraphy: a quantitative approach. *Marine Geology*, 122: 281-301.
- Bolch T, Menounos B & Wheate R (2010) Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985-2005. *Remote Sens. Environ.* 114: 127-137.
- Bonnefille R (1963) Essais de synthèse des lois de début d'entraînement des sédiments sous l'action d'un courant en régime continu. Essais de synthèse des lois de début d'entraînement des sédiments sous l'action d'un courant en régime uniforme. *Bull. Du CREC*, Nr. 5, Chatou,
- Bos MG (1989) *Discharge measurement structures, 3rd edition*, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Publication 20, Wageningen, The Netherlands,
- Bos MG, Replogle JA & Clemmens AJ (1991) *Flow measuring flumes for open channel systems*, John Wiley & Sons, 1984, and American Society of Agricultural Engineers, New York, 1991.
- Bouma AH (1962) *Sedimentology of some flysch deposits, a graphic approach to facies interpretation*; Amsterdam: Elsevier. 168 p.
- Bridge JS (2003a) *Rivers and floodplains: forms, processes, and sedimentary record*. Oxford: Blackwell.
- Bridge JS (2003b) In: Church, M. Coniglio, M. Hardie, L.A. Longstaffe, F.J. Middleton V. *Encyclopedia of sediments sedimentary rocks* (Encyclopedia of Earth Sciences) Springer, 610-619.
- Bridge JS & Bennett SJ (1992) A model for the entrainment and transport of sediment grains of mixed sizes, shapes and densities. *Water Resources Researches*. 28: 337-363.
- Bridge J & Demicco R (2008) *Earth surface processes, landforms and sediment deposits*. Cambridge University Press, New York, 830 p.
- Briggs K, Jackson K, Holyer R, Flint JR, Sandidge JC & Young DK (1998) Two-dimensional variability in porosity, density and electrical resistivity of the eckernforde bay sediment, *Continental Shelf Res.*, vol. 18, no. 14/15: 1939-1964.
- Brooks RA & Di Chiro G (1975) Theory of Image Reconstruction in Computed Tomography, *Computed Tomography*, vol 117: 561-715.
- Brown R (1828) A brief account of microscopical observations made in the months of June, July and August, 1827, on the particles contained in the pollen of plants; and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies, *Phil. Mag.* 4: 161-173.
- Brush LM (1965) Sediment sorting in alluvial channels. In: *Middleton, G.V., ed., Primary sedimentary structures and their hydrodynamic interpretation, Special Publication 12*: 25-33. Tulsa Oklahoma: Soc. Econ. Paleontol. Mineral.
- Bucher WH (1919) On ripples and related sedimentary surface forms and their paleogeographic interpretations. *Am. J. Sci.* 47: 149-210, 241-269.

- Cabadi L (1984) *Mise au point en laboratoire d'un système d'évaluation des épaisseurs de sable par absorption de rayons gamma*. Rapport interne C.E.N. Saclay. ORIS/SAR/84-17/C275, 37p.
- Carmenen B & Larson M (2004) A general formula for non-cohesive bed load sediment transport, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 63 (2005): 249–260.
- Carter TG, Liu PLF & Mei CC (1973) Mass transport by waves and offshore sand bedforms. *J. Waterway Harb. Coast. Eng. Div. ASCE* 99:165–84.
- Champanet JM, Durand J, Long B & Labeyrie B (1989) Apport du scanner à la définition géométrique des réservoirs non-consolidés. *Bulletin du Centre d'Exploration-Production d'Elf-Aquitaine*, 13, 1: 167-174.
- Chanson H (2004) *Hydraulics of open channel flow: An introduction*. Butterworth-Heinemann. 650 p.
- Cheong H-F, Abdul Khader MH, Yang C-J & Radhakrishnan R (1992) The dispersion of radioactive tracers along the east coast of Singapore, *Coastal Engineering*, Volume 17, Issues 1-2, May 1992: 71-92, ISSN 0378-3839, DOI: 10.1016/0378-3839(92)90014-L.
- Chow VT (1959) *Open channel hydraulics*: New York, McGraw-Hill, 680 p.
- Christensen ED, Deigaard R & Fredsøe J (1994) Sea bed stability on a long straight coast. In *Proc. Int. Conf. Coast. Eng., ASCE, 24th*, Kobe, Jpn: 1865–79.
- Chuna LV (1967) About the roughness in alluvial channels with comparative coarse bed material. *Proc. 14th Congr. IAHR* 1: 76–84.
- Clos-Arceuduc A (1967) La direction des dunes et ses rapports avec celle du vent. *C. R. Acad. Sci., Paris Ser. D* 264: 1393–1396.
- Clos-Arceuduc A (1969) Essai d'explication des formes dunaires sahariennes.- Institut Géographique National, Paris, *Études de photo-interprétation*, no. 4, 66 p.
- Coleman JM (1969) Brahmaputra river: channel processes and sedimentation, *Sediment. Geol.* 3: 129-239.
- Collin A, Archambault P & Long B (2008) Mapping the shallow water seabed habitat with the shoals. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 46(10): 2947-2955.
- Controlotron Corporation (2006) *Field manual system 1010N NEMA 4X*, Hauppauge NY, 229 p.
- Cooper WS (1958) Coastal sand dunes of Oregon and Washington. *Geol. Soc. Amer., Mem.* 72: 169 p.
- Cooper WS (1967) Coastal dunes of California, *Geol. Soc. Amer., Mem.* 104, 131 p.
- Cornish V (1897) On the formation of sand dunes, *Geogr. Jour.*, vol. 9: 278-309.
- Cornish V (1914) *Wave of sand and snow*, Fisher, Unwin, London.
- Costello WR (1974) Development of bed configurations in coarse sands. Mass. Inst. Technol., Dep. Earth Planet. Sci., Rep. No. 74-1.
- Crémer JF, Long BF, 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. *Revue Canadienne de Géotechnique*, vol. 39: 440-450.

- Crickmore MJ & Lean HG (1962) The measurement of sand transport by means of radioactive racers. *Proc. R. Soc. Lond.* A266: 402–421.
- Damgaard JS & Soulsby RL (1996) Longshore bedload transport. *Proceedings: 25th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, (3): 3614-3627.
- Darwin GH (1884) On the formation of ripple-marks. *Proc. R. Soc. London* 36: 18-43.
- Davies TR & Southerland AJ (1980) Resistance to flow past deformable boundaries. *Earth Surface Processes* 5: 175-179.
- Dean RG (1977) Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. Dept of Civil Engineering, *Ocean Engineering* Rept No.12, University of Delaware.
- Dean RG & Dalrymple RA (2002) *Coastal processes with engineering applications*. Cambridge University Press, United Kingdom, 475 p.
- DeHaan HC (1998) *Large river sediment transport and deposition: An annotated bibliography*. U.S. Geological Survey, Environmental Management Technical Center, Onalaska, Wisconsin, April 1998. LTRMP 98-T002. 85 p.
- De Man B, Nuyts J, Dupont P, Marchal G & Suetens P (1998) Metal streak artifacts in X-ray computed tomography : a simulation study, *Nuclear Science Symposium, 1998. Conference Record. 1998 IEEE*, vol.3: 1860 - 1865.
- Dietrich WE (1982) Settling velocity of natural particles. *Water Resources. Res.*, 18(6): 1615–1626.
- Dillo H-G (1960) *Sandwanderungen in tideflüssen*. mitt. franzius Inst. Grund-Wasserbau, T-H Hannover, 17: 135-253.
- Dixon M (1991) Benefits of high resolution computed tomography in core analysis. SCA Conference, 9127, 8 p.
- Dubai L & Wiggl U (1977) Tomochemistry of the Brain, *Journal of Computer Assisted Tomography* 1(3).
- Duchesne MJ, Long BF, Labrie J & Simpkin PG (2006) On the use of computerized tomography scan analysis to determine the genesis of very high resolution seismic reflection facies, *J. Geophys. Res.*, 111, B10103, doi: 10.1029/2006JB004279.
- Duliu OG (1999) Computer axial tomography in geosciences: an overview. *Earth-Science Reviews* 48: 265–281.
- Einstein HA & Banks RB (1950) Fluid resistance of composite roughness. *Transactions, American Geophysical Union* 31.
- Einstein HA & Barbarossa NL (1952) River channel roughness. *Proc. ASCE* 92(HY2): 315–326.
- Einstein HA & Krone RB (1962) Experiments to determine modes of cohesive sediment transport in salt water. *Journal of Geophysical Research*, v. 67, p.
- Etheridge DW & Kemp PH (1979) Velocity measurements downstream of re-award facing steps with reference to bed stability. *J.Hyd. Res.* vol.17, No.2: 107-119.
- Familian Northwest (2005) *Stainless steel lined resilient seated knife gate valve*, Portland, 4 p.
- Folk RL (1976) Rollers and ripples in sand, streams and sky: rhythmic alteration of transverse and longitudinal vortices in three orders. *Sedimentology* 23: 649-669.
- Folk RL (1977) Folk's bedform theory – reply. *Sedimentology* 24: 864–874.

- Forbes DL, Shaw J & Taylor RB (1997) *Climate change impacts in the coastal zone of Atlantic Canada, In Climate Impacts and Adaption, Canada Country Study, Atlantic Regional Report*. Environment Canada, Bedford, N.S.
- Fredsøe J & Deigaard R (1994) *Mechanics of coastal sediment transport*. Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 3. (World Scientific Publication).
- Freeze RA & Cherry JA (1979) *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, NJ. 604 p.
- Froude WW (1877) Experiments upon the effect produced on the wave-making resistance of ships by length of parallel middle body, *Trans. Inst. of Naval Arch.*, London U.K. Vol 18.
- Gagné O (1989) *Détermination des figures sédimentaires et évolutions du transport de sédiment au niveau d'un champ de la ride à l'aide d'une jauge nucléaire*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 157 p.
- Gaither A (1953) A study of porosity and grain relationships in experimental sands: *Jour Sedimentary Petrology*, v. 23: 180–195.
- Gaither VU (1956) Index of wells shot for velocity – fourth supplement: *Geophysics*, v. 21(1): 156-178.
- Garde RJ (1994) *Turbulent flow*, John Wiley & Sons, New Delhi, 287 p.
- Gerland S, Richter M, Villinger H & Kuhn G (1993) Non-destructive porosity determinations of Antarctic marine sediments derived from resistivity measurements with an inductive method, *Marine Geophysical Researches*, 15 (3): 201-218.
- Gessler J (1965) Der geschiebetrieb bei mischungen untersucht an natürlichen bplästerungserscheinungen in Kanälen, *Mitt. Der VAW, ETHZ* 69.
- Gessler J (1971) Critical shear stress of sediment mixtures. In: *Proceedings of the 14th Congress IAHR*, vol. 3(C1). Paris.
- Gillie RD (1984) Evaluations of measurement techniques. *Canadian Coastal Sediment Study Rep. C2S2-9*.
- Glennie KW (1970) *Desert sedimentary environments*. Elsevier, Amsterdam. 222 p.
- Gnos E, Hofmann B, Franchi IA, Al-Kathiri A, Hauser M & Moser L (2002) Sayhal Uhaymir 094: A new martian meteorite from the Oman desert. *Meteoritics and Planetary Science*, 37: 835-854.
- Gordon L & Cox J (2000) *Acoustic doppler velocimeter performance in a laboratory flume*. Report for National Sedimentation Laboratory, Mississippi.
- Gordon ND, McMahon TA, Finlayson BL, Gippel CJ & Nathan RJ (2004) *Stream hydrology : an introduction for ecologists*, 2 ed, John Wiley & Sons, 429 p.
- Graf W (1971) *Hydraulics of sediment transport*, McGraw-Hill, New York.
- Grass AJ (1970) Initial instability of fine sand beds. *J. Hydraul. Div., ASCE*, 96: 619-32.
- Grigg NS (1970) Motion of single particles in alluvial channels, *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers* 96: 2501-2518.
- Guy HP, Simons DB & Richardson EV (1966) Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956-1961. *US Geol. Surv. Prof Pap.* 462-L
- Gyr A & Hoyer K (2006) *Sediment transport a geophysical phenomenon*, Springer, Dordrecht, 286 p.

- Hamilton DG, Ebersole BA, Smith ER & Wang P (2001) *Development of a large-scale laboratory facility for sediment transport research*, Technical Report ERDC/CHL TR-01-22, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- Happel J & Brenner H (1965) *Low reynolds number hydrodynamics*, Prentice-Hall,
- Heijs AWJ, Ritsema CJ & Dekker LW (1996) Three-dimensional visualization of preferential flow patterns in two soils, *Geoderma* 70: 101-116.
- Hicks PJ, Deans HA & Narayanan KR (1992) Distribution of residual oil in heterogeneous carbonate cores using X-ray CT. *SPE Formation Evaluation*: 235-240.
- Honarpour MM, Cromwell V, Hatton D & Satchwell R (1985) Reservoir rock description using computed tomography. *SPE 60th annual technical conference and exhibition*, Las Vegas, 8 p.
- Hounsfield GN (1973) Computerised transverse axial scanning (tomography) Part 1: Description of system, *British Journal of Radiology*, 46: 1016-1022,
- Hounsfield GN (1972) Computerized transverse axial scanning (tomography). *British Journal of Radiology*, 46: 1016-1022.
- Hsieh J (2003) *Image artifacts: appearances, causes and corrections. Computed tomography: principles, design, artifacts and recent advances*. Bellingham, Wash: SPIE Press, 167-240
- Hudier E (1986) *Mise au point de la jauge nucléaire : applicabilité à l'étude du transport sédimentaire dans la zone de déferlement*. Mémoire de maîtrise, UQTR, 133 p.
- Huettel M, Ziebis W & Forster S (1996) Flow-induced uptake of particulate matter in permeable sediments. *Limnol. Oceanogr.* 41(2): 309–322.
- Hjulstrom F (1935) Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. Bulletin of the Geological Institute University of Uppsala, 25: 221-527.
- Hume WF (1925) The geology of Egypt. *Geological Survey Department*, Egypt.
- Hunt AR (1904) The descriptive nomenclature of ripple-mark. *Geol. Mag.* 1: 410-418.
- Hunt PK, Engler P & Bajsarowicz C (1988a) Computed tomography as a core analysis tool: Applications, Instrument evaluation and Image improvement techniques. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, 8 p.
- Hunt PK, Engler P & Bajsarowicz C (1988b) Computed tomography as a core analysis tool: applications, instrument evaluation, and image improvement techniques: *Journal of Petroleum Technology*, 40: 1203-1210.
- Huppert HE, Turner JS & Hallworth MA (1995) Sedimentation and entrainment in dense layers of suspended particles stirred by an oscillating grid. *J. Fluid Mech.* 289: 463–493.
- Hodgins DO, Sayao OJ, Kinsella ED & Morgan PW (1986) Nearshore sediment dynamics – Beaufort Sea. The 1986 Monitoring program. *Environmental Studies Revolving Funds Report 054*, Ottawa, 195 p.
- Houghton JT, Meira Filho LG, Callander BA, Harris N, Kattenberg A & Maskell K (1996) (sous la dir. de.) *Changements climatiques 1995*. Contribution du GTI au Deuxième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ; GIEC.
- Hoyt, J. H., (1966) Air and sand movements to the lee of dunes. *Sedimentology*, 7: 137–143.

- Iler RK (1979) *The chemistry of silica: solubility, polymerization, colloid and surface properties and biochemistry of silica*. New York, John Wiley and Son, 896 p.
- Ilovea M, Oaie G, Duluiu OG, Neagu M & Mateiasi G (2006) Digital radiography and X-ray computer tomography investigations of unconsolidated geological samples (Danube River, Danube Delta and Black Sea sediments), *Geophysical Research Abstracts*, 8, abstract # 03165
- Inman DL, Ewing GC & Corliss JB (1966) Coastal sand dunes of Guerrero Negro, Baja California, Mexico. *Geol. Soc. Am., Bull.*, 77: 787-802.
- Jackson RG (1976) Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows. *J. Fluid Mech.* 77: 531-560.
- Jackson PD, Taylor-Smith D & Stanford PN (1978) Resistivity-porosity-particle shape relationships for marine sands. *Geophysics*, 43(6): 1250-1268.
- Jadu FM, Hill ML, Yaffe MJ & Lam EWN (2011) Optimization of exposure parameters for cone beam computed tomography, *Sialography Dentomaxillofac Radiol.* 40: 362-368.
- Jaffry P & Heuzel M (1960) Emploi de traceurs radioactifs pour l'étude du transport solide dans les cours d'eau • *IAHS Publ.* 52: 559-567, FR, RB,
- Jimenez JA & Madsen OS (2003) A simple formula to estimate settling velocity of natural sediments, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 129, No. 2, March 1, 2003. ©ASCE, ISSN 0733-950X/2003/2-70-78
- Jopling AV (1961) Origin of regressive ripples explained in terms of fluid-mechanic processes. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 424-D: 15-17.
- Jopling AV (1963) Hydraulic studies on the origin of bedding, *Sedimentology*, 2: 115-121. doi: 10.1111/j.1365-3091.1963.tb01205.x.
- Jopling AV (1965) Hydraulic factors controlling the shape of laboratory deltas. *Sediment. Petrol.* 35: 777-791.
- Jopling AV (1967) Origin of laminae deposited by the movement of ripples along a streambed: A laboratory study, *J. Geol.* 75: 287-305.
- Julien PY & Raslan Y (1988) Upper-regime plane bed, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 11: 1086-1096.
- Kak AC & Slaney M (1999) *Principles of computerized tomographic imaging*, IEEE PRESS, New York, 329 p.
- Kamphuis JW (2006) Beyond the limits of coastal engineering, *Proc. 30th ICCE*, San Diego: 1938-1950.
- Kantzas A, Marentette D & Jha KN (1992) Computer-assisted tomography: from qualitative visualisation to quantitative core analysis. *The Journal of Canadian Petroleum Technology*. 255-267.
- Karim F (1995) Bed configuration and hydraulic resistance in alluvial-channel flow. *J. Hydr. Eng.* 121: 15-25
- Kastaschuk R & Villard P (2001) *Turbulent sand suspension over dunes. Fluvial Sedimentology VI*. Blackwell Science. 478 p.

- Kawamura T (1990) Nondestructive, three dimensional density measurements of ice core samples by X-Ray computed tomography. *Journal of Geophysic Research*, 95: 12407-12412.
- Kermabon A, Gehin C & Blavier P (1969) A deep sea electrical sediments. *Geophysics*, Vol. 34, No. 4: 554-571.
- Ketcham RA & Carlson WD (2001) Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences, *Computers & Geosciences* 27: 381-400.
- Kindle EM (1917) Recent and fossil ripple-mark. *Museum Bull. Geol. Surv. Canada*, 25, 121 p.
- King DB Jr (2005) *Influence of grain size on sediment transport rates with emphasis on the total longshore rate*, US Army Corps of Engineers, ERDC/CHL CHETN-II-48, 24 p.
- King WJH (1916) 'The nature and formation of sand ripples and dunes'. *Geographical Journal*, 47: 189-209.
- King WJH (1918) Study of a dune belt. *Geograph. J.*, 51: 16-33.
- Kinoshita R (1967) An analysis of the movement of flood waters by aerial photography; concerning characteristics of turbulence and surface flow. *Photographic Surveying*, 6: 1-17 (in Japanese).
- Klein GdeV (1963) Bay of Fundy intertidal sediments. *J. Sediment. Petrol.*, 33: 844-854.
- Kline SJ, Reynolds WC, Schraub FA & Runstadler PW (1967) The structure of turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.*, 30: 741-773.
- Kogel JE, Nikhil CT, James MB & Stanley TK (2006) *Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and uses, Seventh Edition*. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Komar PD (1996) Entrainment of sediments from deposits of mixed grain sizes and densities. In: Carling. P.A. and Dawson. M.R. (eds.). *Advances in Fluvial Dynamics and Stratigraphy*. Wiley: 127-181.
- Koutitonski VG & Long BF (1991) Rivière Moisie. Étude du milieu physique. Vol. 6 : Dynamique de l'estuaire ; section A : Hydrodynamique; section B : Morphosédimentologie; section C : Annexes. INRS-Océanologie, Rimouski; rapport à Vice-présidence Équipement de production et édifices, Hydro-Québec, Montréal, pagination multiple.
- Krinsley DH & Doornkamp JC (1973) *Atlas of quartz sand surface textures*. Cambridge University. Press.
- Langhorne DN (1978) *Offshore engineering and navigational problems - The relevance of sandwave research*. Published by the Society for Underwater Technology in Conjunction with the Institute of Oceanographic Sciences. 21 p.
- Langhorne DN (1981) An evaluation of Bagnold's dimensionless coefficient of proportionality using measurements of sandwave movement. (*Mar. Geol.*) 43: 49-64
- Lavelle JW, Young RA, Swift DJP & Clarke TL (1978) Near bottom sediment concentration and fluid velocity measurements on the inner continental shelf, New York. *Journal of Geophysical Research* 83.
- Leeder MR (1977) Folk's bedform theory. *Sedimentology*, 24: 863-864.
- Leeder MR (1982) *Sedimentology, process and product*, Allen & Unwin, Boston, 344 p.

- Long BF & Chapalain G (1985) Les variations topographiques des barres d'avant-côte : mise en évidence des mouvements par utilisation d'une jauge nucléaire: 73-88. In D. L. Forbes, edit., *Canadian Coastal Conference*. St. John.
- Long BF & Dufour D (1995) Mise au point d'une jauge nucléaire directionnelle pour l'étude du transport sédimentaire par charriage. IAEA ed., *International symposium on the use of isotope technique in water resources development*, Vienna, 18-23 mars 1995: 236-237.
- Long BF & G Drapeau (1983) Évolution du transport sédimentaire par traceurs radioactifs sur la zone infralittorale de la Basse Côte Nord du Saint-Laurent. *Comptes rendus Conf. Can. Littoral*, 1983. CNR, p. 201-215.
- Long BF & Hudier E (1987a) Les jauges nucléaires en dynamique sédimentaire : un exemple d'emploi dans l'étude du déferlement: 647-661. In: *International Symposium on the Use of Isotopes Techniques in Water Resource Development*. Vienne, IAEA.
- Long B & Montreuil S (2011) Evolution of ripple field architecture during sediment transport, as measured by CT scanning, *Sediment Transport*, Silvia Susana Ginsberg (Ed.), ISBN: 978-953-307-189-3, InTech.
- Long BF, Moore F & Duchesne MJ (2004) Porosity CAT-scan signature changes related to variations of sedimentation rate: theoretical and physical modeling versus field deposits. *American Association of Petroleum Geologists*, 18-21 April 2004, Dallas, Texas. CD 5 p.
- Long BF & Robitaille V (2009) Use of a multi-beam autonomous portable laser equipment (MAPLE) to measure the reflectance of shallow water facies and habitats - a new tool o calibrate airborne laser bathymetry instruments. In: *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> FUDOTERAM Workshop* (Québec, Canada).
- Long B, Aucoin F, Montreuil S, Robitaille V & Xhardé R (2011) Airborne LIDAR bathymetry applied to coastal hydrodynamic processes. *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering, North America, 1*, Available at: <http://journals.tdl.org/ICCE/article/view/1206>.
- Liu Z (2001) *Sediment transport*, Laboratoriet for Hydraulik og Havnebygning, Instituttet for Vand, Jord og Miljøteknik. Aalborg Universitet, 71 p.
- Madsen OS & Durham WM (2007) Pressure-induced subsurface sediment transport in the surf zone. *Proceedings Coastal Sediments '07 Conference*, ASCE, New Orleans, LA, 1: 82-95.
- Marcus WA, Roberts K, Harvey L & Tackman G (1992) An evaluation of methods for estimating Manning's n in small mountain streams: *Mountain Research and Development*, 12: 227-239.
- McKee ED (1953) Report on studies of stratification in modern sediments and in laboratory experiments, Office of Naval Research, Project Nonr. 164(00), Nr. 081 123, 61 p.
- McKee ED (1957) Primary structures in some recent sediments. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists* 41: 1704-1747.
- McLean SR (1983) Turbulence and sediment transport measurements in a North Sea tidal inlet (The Jade). In *North Sea Dynamics*, ed. J. Sundermann, W. Lang: 436-452. Berlin: Springer-Verlag
- McWhorter D & Sunada DK (1977) Ground-water hydrology and hydraulics, *Water Resources Publications*. Fort Collins, CO.

- Meade RH (1966) Factors influencing the early stages of the compaction of clays and sands-review: *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 36: 1085–1101.
- Mees F, Swennen R, Van Geet M & Jacobs P (2003) Applications of X-ray computed tomography in the geosciences. *Geological Society of London Special Publication*, 215 p.
- Melton FA (1940) A tentative classification of sand dunes-its application to dune history in the Southern High Plains: *Jour. Geology*, v. 48: 113-174.
- Megga (2003) MEGGA models PCT and PCF, Specification manual, 61 p.
- Middleton GV & Southard JB (1977) *Mechanics of sediment movement*, S.E.P.M. Short Course Number 3, Binghamton.
- Miller HC (1998) Comparison of storm longshore transport rates to predictions,"*Proceedings of the 26th Conference on Coastal Engineering*: 2954-2967, ASCE.
- Montreuil S & Long B (2011) Relationship between vortex activity and pseudo liquefaction at a lower stoss-side ripple surface, *Proceedings Coastal Sediments '11 Conference*, ASCE.
- Montreuil S, Long B & Kamphuis JW (2008) Surface density variations along a sand ripple under stationary flow measured by CT-Scanning. *Proceedings Coastal Engineering '08 Conference* CERC and ASCE, Hamburg, Germany.
- Montreuil S & Long B (2007) Flume experiments under CAT-Scan to measure internal sedimentological parameters during sediment transport, *Proceedings Coastal Sediments '07 Conference*, ASCE, New Orleans, LA, 1: 124-136.
- Montreuil S (2006) *Évolution densimétrique des structures de rides en déplacement sous un courant stationnaire mesuré sous scanographe dans un canal en boucle verticale*. Mémoire de maîtrise, 121 p. Inst. Nat. de la Rech. Sci., Centre Eau, Terre, Environ, Québec, (unpub.).
- Moore F (2004) *Application de la scanographie à l'étude de la déposition consolidation : Modélisation physique et théorique*, Mémoire de maîtrise, 131 p., Inst. Nat. de la Rech. Sci., Centre Eau, Terre, Environ., Québec, (unpub.).
- Morgan CL (1983) *Basic Principles of Computed Tomography*, Baltimore, University Park Press.
- Mori Y, Iwama K, Maruyama T & Mitsuno T (1999) Discriminating the influence of soil texture and management - induced changes in macro pore flow using soft X-rays. *Soil Science*, 164: 467-482.
- Morneau F, Michaud M, Lecours F, Côté L & Roy D (2001) Étude d'impact sur l'environnement : Projet de protection des berges le long de la route 132 autour de la péninsule gaspésienne. Gouvernement du Québec, ministère des Transports du Québec, 84 p.
- Mooney SJ (2002) Three -dimensional visualization and quantification of soil macro porosity and water flow patterns using computed tomography, *Soil Use and Management*, 18: 142-151.
- Nakayama Y & Boucher RF (1999) *Introduction to fluid mechanics*, Butterworth-Heinemann, Woburn, 344 p.
- Nezu I & Nakagawa H (1989) Self forming mechanism of longitudinal sand ridges and troughs in fluvial open-channel flows. *Proc. of 23rd IAHR congress*, Ottawa, Canada: B65-B72.

- Nezu I & Nakagawa H (1993) Turbulence in open channel flow. *IAHR*, edited by A. A. Balkema, Rotterdam.
- Ng K (1999) Treatment of greenhouse recirculation water: *biosand filtration*. *Irrigation factsheet (July)*. Ministry of Agriculture, Food and Fisheries: British Columbia .
- Nickel M & Beckmann F (2002) The 3-dimensional sponge skeleton: Synchrotron x-ray computed microtomography enables new insights into functional morphology. In: Krell U, Schneider JR, von Zimmermann M (Eds.) *HASYLAB Annual Report 2002*. Part I: 919-920.
- Nikuradse J (1933) *Stromungsgesetz in rauhen rohren, vdi-forschungsheft 361*. (English translation: *Laws of flow in rough pipes*), 1950. Technical report, NACA Technical Memo 1292. National Advisory Commission for Aeronautics, Washinton, DC.
- Nomicos GN (1956) Effects of sediment load on the velocity field and friction factor of turbulent flow in an open channel. Dissertation (Ph.D.), California Institute of Technology.
- Nummedal D, Riley GW & Templet PL (1993) High-resolution sequence architecture: a chronostratigraphic model based on equilibrium profile studies. In: Posamentier, H. W., Summerhayes, C. P., Haq, B. U. & Allen, G. P. (eds) *Sequence Stratigraphy and Facies Associations*, International Association of Sedimentologists, Special Publications, 18: 55-68.
- Peters EJ & Afzal N (1992) Characterization of heterogeneities in permeable media with computed tomography imaging. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 7: 283-296.
- Peters EJ, Gharbi R & Afzal N (1996) A look at dispersion in porous media through computed tomography imaging. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 15: 23-31.
- Pettijohn FJ & Potter PE (1964) *Atlas and glossary of primary sedimentary structures*, Berlin-Gottingen-Heidelberg-New-York: Springer. 370 p.
- Petrovic AM, Siebert JE & Rieke PE (1982) Soil bulk-density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning, *Soil Science Society of American Journal* 46: 445-450.
- Pham Van Bang D, Sergent P, Hissel F, Debaillon P, Montreuil S, Long B & Ouahsine A (2009) Vagues et érosion des sédiments générées par le passage des bateaux de navigation intérieure : mesures in situ et analyses. *Revue Technique Maritime et Fluviale* 2: 18-24.
- Prandtl L (1952) *Essential of fluid dynamics*, London, Blackie & Son. 452 p.
- Prandtl L (1956) *Stromungslehre*, Braunschweig, Friedrich Vieweg & Sohn. 407 p.
- Rathbun RE & Guy HP (1967) US geol. Surv., Fort Collins, ColoJ. Measurement of hydraulic and sediment transport variables in a recirculating flume. *Wat. Resources Res.*, USA, 3(1): 107-122.
- Raudkivi AJ (1963) Study of sediment ripple formation. *ASCE J. Hydraul. Div.*, 89: 15-33.
- Reineck HE (1961) Sedimentbewegungen an kleinrippen im Watt, *Senckenbergiana Lethaea* 42: 51-61.
- Reineck H-E & Singh IB (1975) *Depositional sedimentary environments*, Springer study edition, New York, 439 p.
- Reineck HE & Singh IB (1980) *Depositional sedimentary environments*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 549 p.

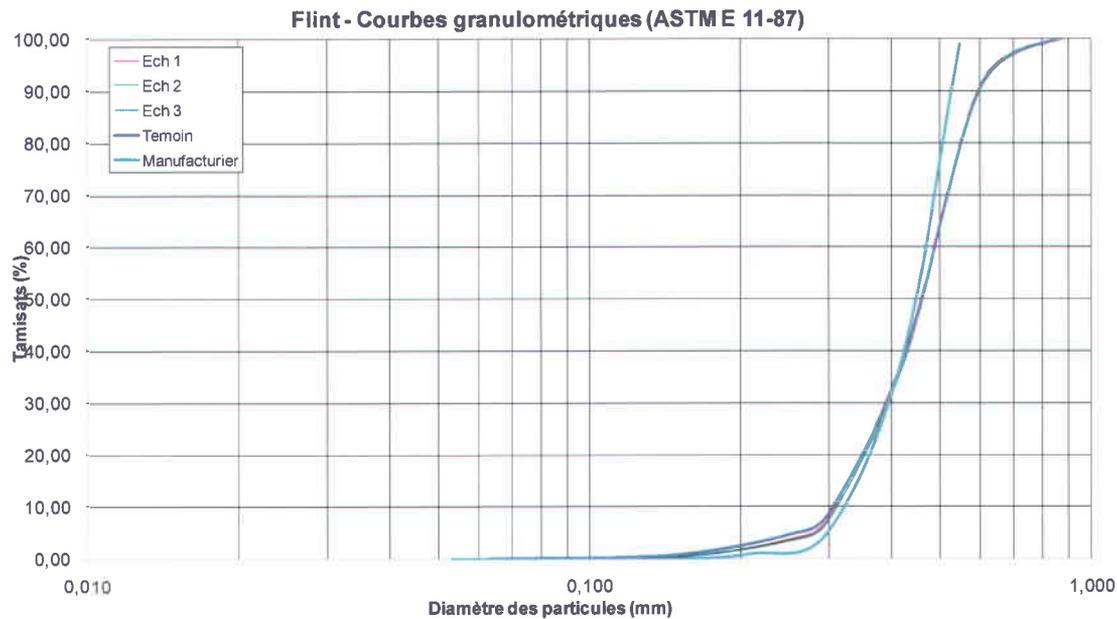
- Reynolds AJ (1965) Waves on the bed of an erodible channel, *J. Fluid Mech.*, 22: 113-133.
- Richard H, Bennett RH, Li H, Lambert DN, Fisher KM & Walter DJ (1990) In situ porosity and permeability of selected carbonate sediment: Great Bahamas bank, part 1: Measurement, *Marine Geotechnol.*, vol 9(1): 1-28.
- Richardson EV, Simons DB & Lagasse PF (2001) River engineering for highway encroachments - highways in the river environment, Report No. FHWA-NHI-01-004, *Federal Highway Administration, Hydraulic Design Series No. 6*, Washington, D.C.
- Rijn LC van (1984) Bedform and alluvial roughness. *J. Hydr. Div. ASCE* 110: 1733-1754.
- Rijn LC van (1986) *Manual sediment transport measurements*. Delft, The Netherlands: Delft Hydraulics Laboratory.
- Rijn LC van (2007) *Manual sediment transport measurements in rivers, estuaries and coastal seas*, Aquapublications, The Netherlands. 500 p.
- Robert J-L (2007) *Systèmes hydrauliques*, Communication personnel. 173 p.
- Rowe T, Ketcham RA, Denison C, Colbert M, Xu X & Currie PJ (2001) Forensic palaeontology: The archaeoraptor forgery. *Nature*, 410: 539-540.
- Rutherford RA, Pullan BR & Lisherwood I (1976a) Measurement of effective atomic number and electron density using an EMI scanner, *Neuroradiology* 11: 15-21.
- Rutherford RA, Pullan BR & Lisherwood I (1976b) Calibration and response of an EMI scanner, *Neuroradiology* 11: 7-13.
- Sauzay G (1969) *Méthode de bilan des taux de comptage d'indicateurs radioactifs pour la détermination de débit de charriage de lits sableux*, Rapport CEA-R-3431.
- Schlichting H (1960) Boundary layer theory (tr. J. Kestin), 4th ed. New York: *McGraw-Hill Book Co., Inc.*
- Schillinger S & Long B (2001) Détermination de l'évolution du littoral à partir de l'analyse de l'architecture 3D d'une flèche sableuse intertidale. *Conférence canadienne sur le littoral 16-19 Mai 2001*, 13 p.
- Schmidt W & Gyr A (1998) Stability of an erodible bed of lead granulates at low wall shear stress. In: Rys, F.S., Gyr, A. (eds.) *Physical Processes and Chemical Reactions in Liquid Flows*, p. 93-208. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Schneider U, Pedroni E & Lomax A (1996) The calibration of CT Hounsfield units for radiotherapy treatment planning, *Phys. Med. Biol.* 41: 111-124.
- Seka J (2000) *Étude de l'initiation du mouvement des figures sédimentaires dans l'estuaire de la rivière Moisie à l'aide d'une jauge nucléaire*, Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski.
- Sellin RHJ (1969) *Flow in channels*, London, Macmillan. 149 p.
- Sevenet L (1943) *Bull. Inst. Fr. Afr. Noire*, 5: 1-26.
- Sharp RP (1966) Kelso dunes, Mohave Desert, California, *Bulletin of the Geological Society of America* 77: 1045-74.
- Shrock RR (1948) *Sequence in layered rocks*, New York, McGraw-Hill. 507 p.
- Sidwell R & Tanner WP (1938) Quaternary dune building in central Kansas, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 49, 139 (abstract).

- Siegbahn K (1968) *Alpha, beta and gamma ray spectroscopy*, North Holland, Amsterdam.
- Siemens (2001) Online operator manual Volume Access.
- Siemens (2004) SOMATOM Sensation 64 Application Guide, Germany, 364 p.
- Siemens (2007) Personal communications.
- Simons DB, Richardson EV & Albertson ML (1961) Flume studies using medium sand (0.45 mm). *US Geol. Surv. Prof. Pap.*, 1498-A.
- Simons DB & Richardson EV (1962) Resistance to flow in aluvial channels. *Am. Soc. Civ. Engrs.*, Trans 127: 927-953.
- Skempton AW (1970) The consolidation of clays by gravitational compaction. *J. Geol Soc.* 125: 373-411.
- Smith JD (1970) Stability of a sand bed subjected to a shear flow of low Froude number. *Journal of Geophysical Research*, 75(30): 5928-5940.
- Smith HJ (2011) Computed tomography  
[http://www.medcyclopaedia.com/library/radiology/chapter04/4\\_2.aspx](http://www.medcyclopaedia.com/library/radiology/chapter04/4_2.aspx)
- Soma C (1985) Réalisation d'une jauge nucléaire pour mesurer in situ et en continu les variations de hauteur des formes sédimentaires. Rapport interne ORIS/SAR/S195-16, 33 p.
- Stehr E (1975) *Grenzschicht-theoretische Studie über die Gesetze der Strombank und Riffelbildung*. Hamburger Küstenforschung Heft 34
- Sundborg A (1956) The river Klaralven. A study of fluvial processes, *Geogr. Annlr* 38: 127-316.
- Southard JB & Dingler JR (1971) Flume study of ripple propagation behind mounds on flat sand beds. *Sedimentology*, 16(3/4): 251-263.
- Southard JB, Boguchwal LA & Romea RD (1980) Test of scale modelling of sediment transport in steady unidirectional flow. *Earth Surface Processes*, 5: 17-23. doi: 10.1002/esp.3760050103.
- Sternberg RW (1967) Measurements of sediment movement and ripple migration in a shallow marine environment. (*Mar. Geol.*) 5: 195-205.
- Teeter AM & Pankow W (1989) *Deposition and erosion testing on the composite dredged material sediment sample from New Bedford harbour, Massachusetts*, Technical report HL-89-11, US Army Corps of Engineers, Washington, 61 p.
- Terzaghi K & Ralph BP (1948) *Soil mechanics in engineering practice*, John Wiley and Sons, New York.
- Terzaghi K & Ralph BP (1948) *Soil mechanics in engineering practice*, John Wiley and Sons, New York, The second edition by Ralph B. Peck, 1967.
- Thibault R (1984) Mise au point d'un appareil de mesure des variations du fonds marin. Un rapport interne INRS-océanologie, Rimouski, Québec.
- Thomas CW (2008) Stream gaging, in *AccessScience*, McGraw-Hill Companies, <http://www.accessscience.com/content/Stream-gaging/659300>
- Tranquart F, Correas J-M, Bouakaz A, Morel M, Boutry N, Musielak-Zanetti C & Cotten A (2007) Échographie de contraste en pathologie musculo-squelettique, Springer Paris, *Medicine & Public Health*, p. 219-229.

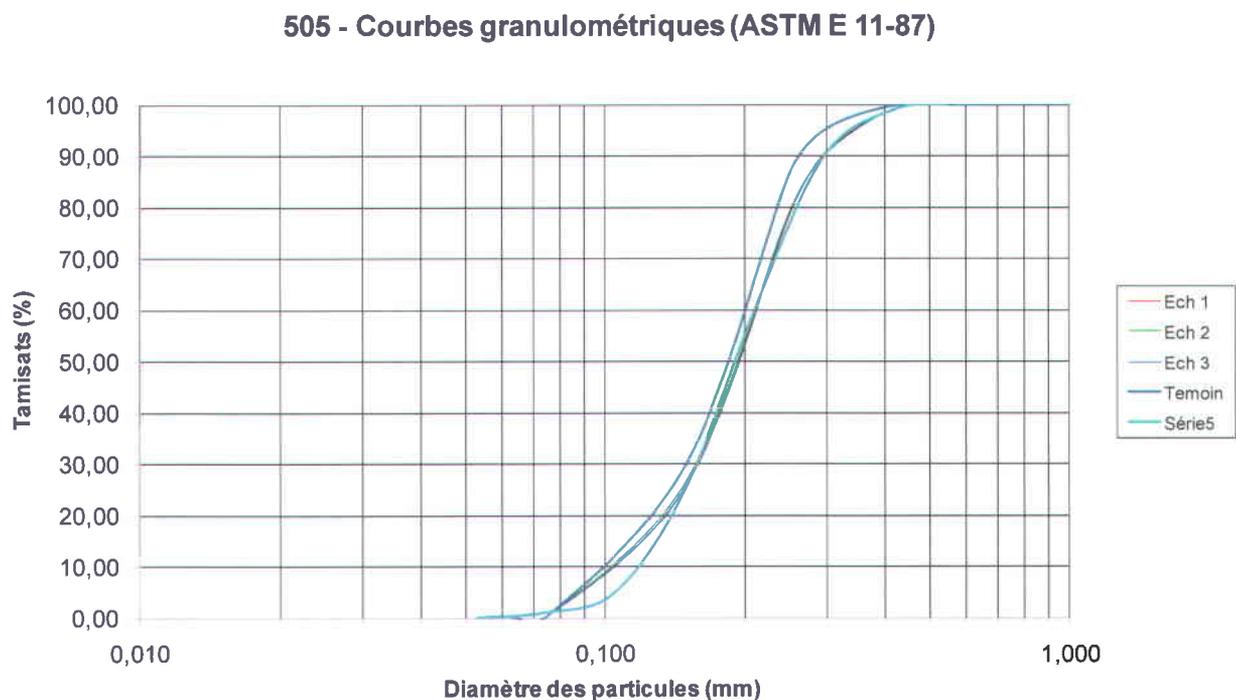
- Truckenbrodt E (1968) *Stromungsmechanik, Grundlagen und technische Anwendungen*, 532 p. Berlin-Heidelberg-New-York, Springer.
- Tucker ME (2001) *Sedimentary Petrology*, 3ed, Blackwell Science. 262 p.
- USACE-WES (1935) Studies of river bed materials and their movement with special reference to the lower Mississippi River, U.S. Army Corps Eng., *Waterw, Exp. Stn.*, Pap. No. 17.
- Valentina R & Regine H (2011) Regionally differentiated contribution of mountain glaciers and ice caps to future sea-level rise, *Nature Geoscience*, vol. 4, (2): 91-94.
- Van Den Berg JH (1987) Bedform migration and bedload transport in some rivers and tidal environment. *Sedimentology*, 34: 681-698.
- Van Rijn LC, Van Rossum H & Termes PP (1989) Field verification of 2D and 3D suspended sediment models, Submitted to *Journal of Hydr. Eng.* ASCE.
- Vanoni VA & Hwang LS (1967) Relation between bedforms and friction in streams. (Journal of the Hydraulics Division), ASCE, vol. 93, No. HY3: 121-144.
- Vanoni VA (1975) *Sedimentation Engineering*, ASCE task committee for the preparation of the manual on sedimentation of the sedimentation committee of hydraulic division (reprinted 1977).
- Vanoni VA (1978) "Predicting sediment discharge in alluvial channels," *Water Supply and Management*, Pergamon Press, Oxford, p. 399-417.
- Van Wagoner JC (1995) Sequence stratigraphy and marine to non-marine facies architecture of foreland basin strata, Book Cliffs, Utah, U.S.A. In: Van Wagoner, J. C. & Bertram, G. T. (eds) Sequence Stratigraphy of Foreland Basin Deposits, *American Association of Petroleum Geologists Memoirs*, 64: 137-223.
- Verbanck MA (2004) Sediment-laden flows over fully developed bed forms: First and second harmonics in a shallow, pseudo-2D turbulence environment. In: *Jirka, Uijtewaal (eds.) ShallowFlows*. Balkema, Rotterdam.
- Vinegar HJ (1986) X- Ray CT and NMR imaging of rocks. *Journal of Petroleum Technology*, 38: 257-259.
- Wellington SL & Vinegar HS (1987) X-Ray computerized tomography. *Journal of Petroleum Technology*, 39, (8): 885-898.
- Wheatcroft RA (2002) In situ measurements of near-surface porosity in shallow-water marine sands. *IEEE journal of oceanic engineering*, vol. 27, no. 3
- Wilcock PR & McArdell BW (1997) Partial transport of sand-gravel sediment. *Water Resources Research*. 33: 233-245.
- Wilkinson RH, Moore EJ & Salkield AP (1985) Photogrammetry in sediment transport studies. In *Underwater Photography and Television for Scientists*, ed. J. D. George, G. I. Lythgoe, J. N. Lythgoe, p. 109-21. Oxford: Clarendon. 184 p.
- Williams PB & Kemp PH (1971) Initiation of ripples on flat sediment beds, *J. Hydraul. Div.*, Proceedings of ASCE, 97: 505-522.
- Williams PB & Kemp PH (1972) Initiation of ripples by artificial disturbances. *J. Hydraul. Div.*, ASCE 98: 1057-1070.

- Williams PF (1969) Notes on some deformation structures of sedimentary origin in the Little Haven—Amroth coalfield, Pembrokeshire. *Geological Magazine*, 106: 395-411  
doi:10.1017/S0016756800058799.
- Wilson D & Siegel E (2008) Evaluation of current and wave measurements from a coastal buoy, *Oceans 2008*, Quebec.
- Wilson IG (1972a) Aeolian bedforms—their development and origins. *Sedimentology*, 19: 173-210.
- Wilson IG (1972b) Universal discontinuities in bedforms produced by the wind. *Sedimentary Petrology*, 42: 667-669.
- Wilting JE & Timmer J (1999) Artifacts in spiral-CT images and their relation to pitch and subject morphology. *Eur Radiol* 9: 316-322.
- Winsauer WO, Shearing HM Jr, Masson PH & Williams M (1952) Resistivity of brine saturated sands in relation to pore geometry. *AAPG Bulletin* 36 (2): 253–277.
- Xharde R, Long BF & Forbes DL (2011) Short-term beach and shoreface evolution on a cusped Foreland with airborne topographic and bathymetric Lidar, *Journal of Coastal Morphodynamics; Sediment Transport; Coastal Erosion; Sediment Budget. J. Coastal Research, Spec. issue* (62): 50-61.
- Yalin MS (1964) Geometrical properties of sand waves. *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, 90, (HY5): 105–119.
- Yalin MS (1992) *River mechanics*. Pergamon Press. 235 p.
- Yalin MS (1977) *Mechanics of sediment transport* 2ed. Pergamon Press. 298 p.
- Yang CT (1973) Incipient motion and sediment transport, *ASCE Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 99, (HY7): 919 – 934.
- Yang CS (1986) On Bagnold's sediment transport equation in tidal marine environments and the practical definition of bedload. *Sedimentology*, 33: 465-486.
- Young DF, Munson BR, Okiishi TH & Huebsch WW (2007) *A brief introduction to fluid mechanics*, 4ed, John Wiley & Sons, 502 p.
- Zanke U (1982) *Grundlagen der sedimentbewegung*. Berlin-Heidelberg-New York, Springer-Verlag 1982. XII, 402 S., 188 Abb., DM 58.
- Znamenskaya NS (1962) Calculation of dimensions and speed of shifting of channel formations. *Soviet Hydrology* (American Geophysics Union) No. 5.
- Znamenskaya NS (1969) Morphological principle of modeling of river bed processes. In: *Proceedings of the 13 th Congress IAHR*, Kyoto. vol. 5 p.1.

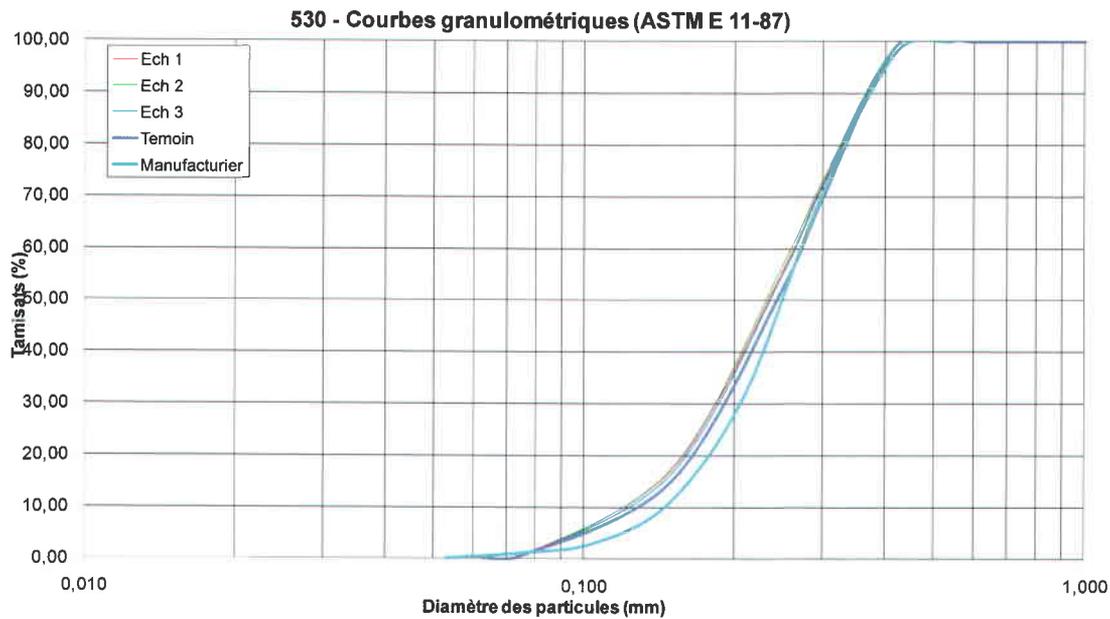
## ANNEXE 1 : GRANULOMÉTRIE DES SABLES



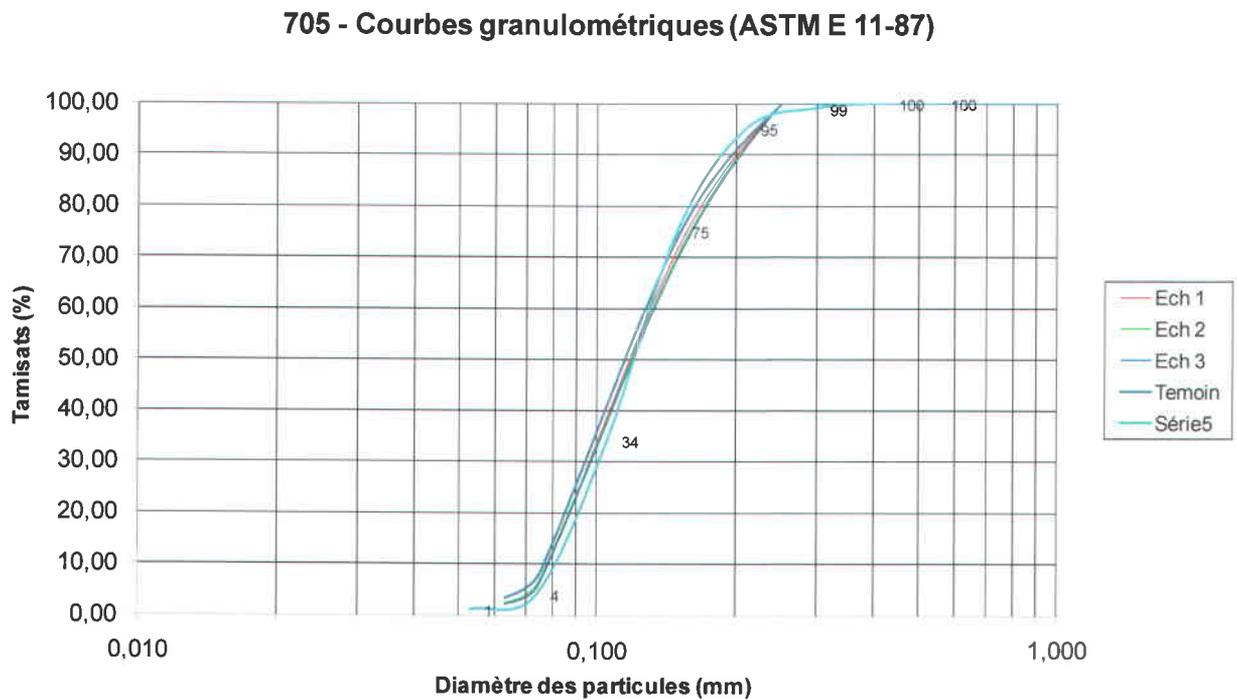
**Figure 131.** Courbes granulométriques, du sable identifié comme Flint Silica de la Bell & Mackenzie Co Ltd, réalisées selon le standard (ASTM E 11-87).



**Figure 132.** Courbes granulométriques, du sable identifié comme No 505 de la Bell & Mackenzie Co Ltd, réalisées selon le standard (ASTM E 11-87).



**Figure 133. Courbes granulométriques, du sable identifié comme No 530 de la Bell & Mackenzie Co Ltd, réalisées selon le standard (ASTM E 11-87).**



**Figure 134. Courbes granulométriques, du sable identifié comme No 705 de la Bell & Mackenzie Co Ltd, réalisées selon le standard (ASTM E 11-87).**

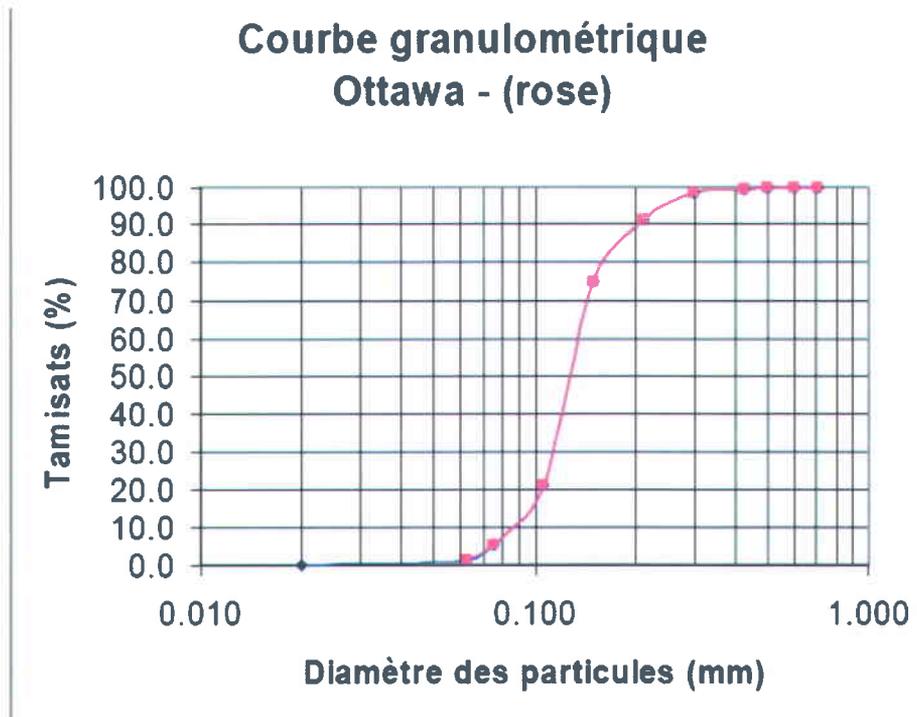


Figure 135. Courbes granulométriques, du sable identifié comme sable d'Ottawa de couleur rose (fournisseur inconnu), réalisées selon le standard (ASTM E 11-87).

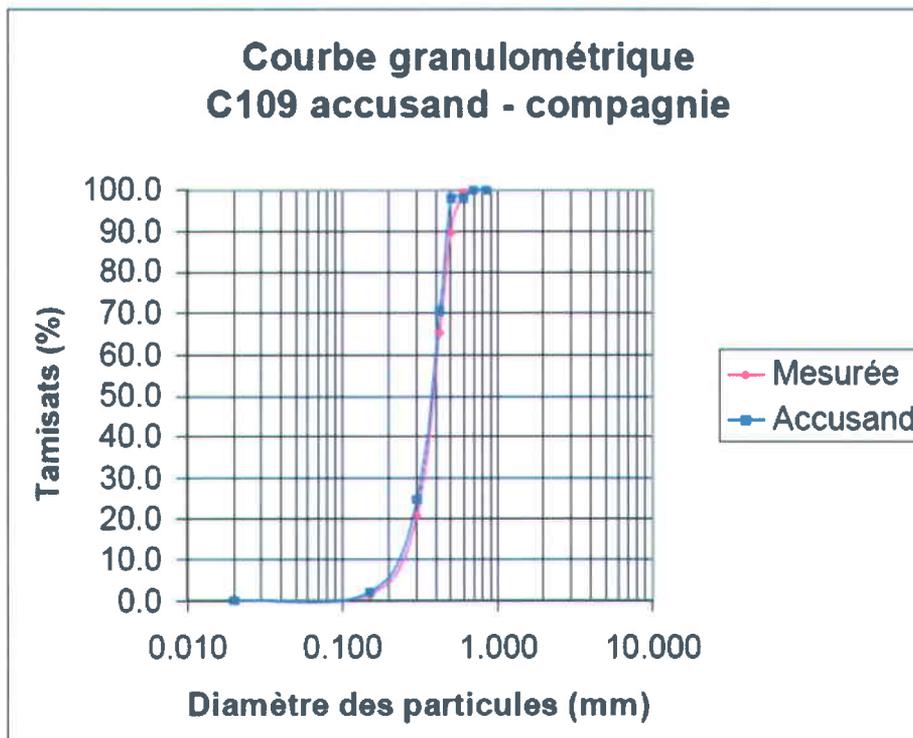


Figure 136. Courbes granulométriques, du sable identifié comme C-109 de la Cie Accusand, réalisées selon le standard (ASTM E 11-87).

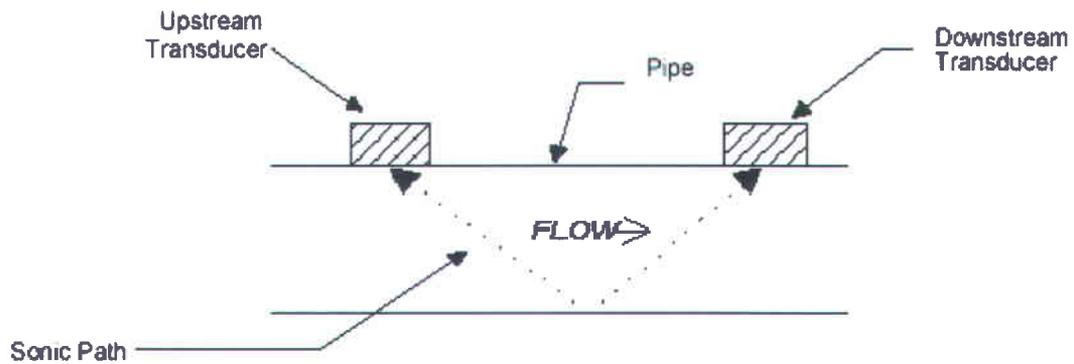
## ANNEXE 2 : CANAUX HYDRAULIQUES

La vitesse du courant est mesurée et enregistrée par un courantomètre Controlotron System 1010N couplé un capteur à effet Doppler fixé dans la section descendante du canal (Fig. 137).

Le principe de mesure de ce capteur repose sur l'utilisation de l'effet Doppler. Une particule se déplaçant avec le fluide et recevant un train d'ondes ultrasoniques de fréquence connue envoie sur le récepteur un écho à une fréquence décalée par l'effet Doppler (Fig. 138).



Figure 137. Capteur Doppler de la partie descendante du canal



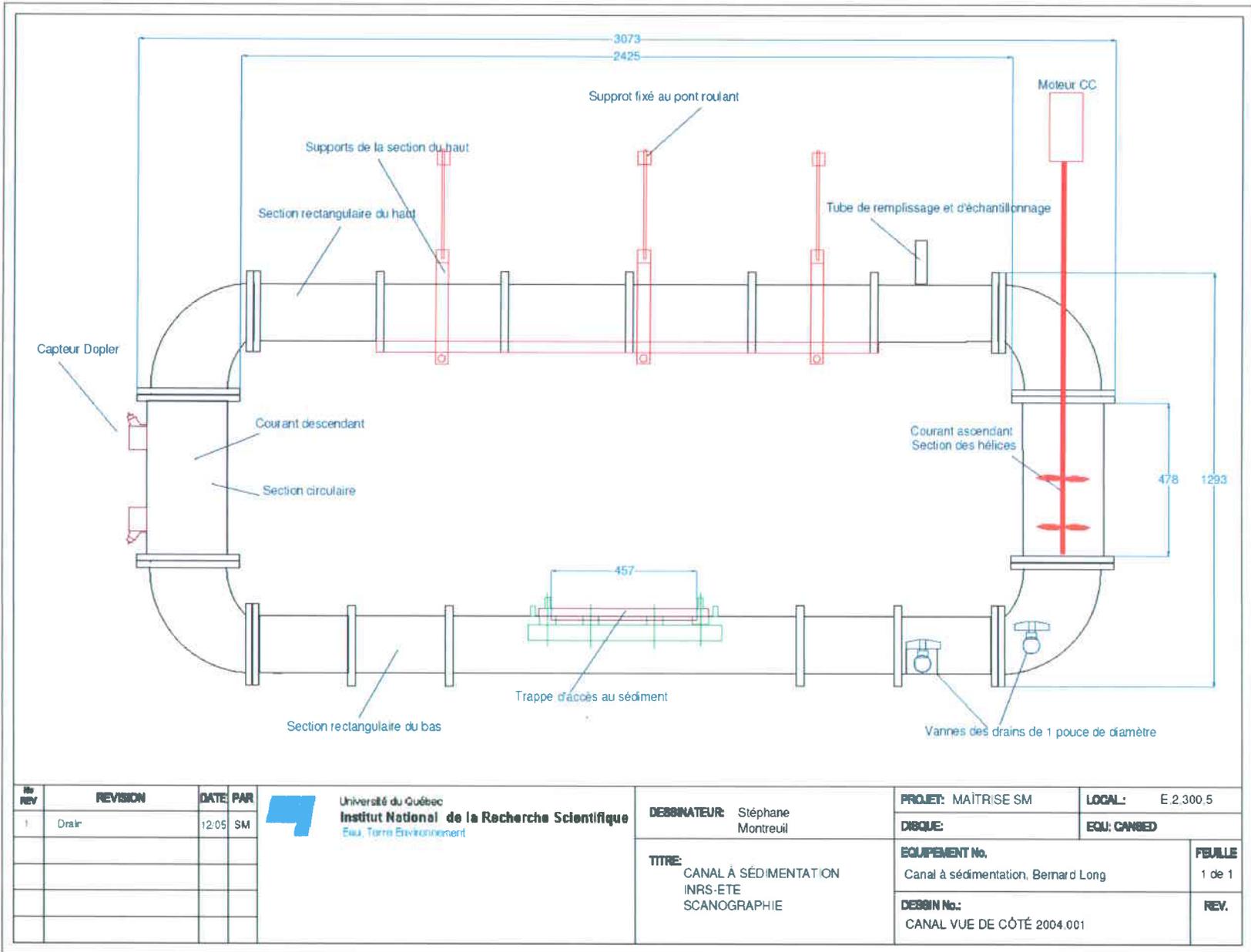
**REFLECT MOUNT**

*(Pipe shown in Top View for ease in visualizing sonic path)*

**Figure 138. Capteur Doppler et trajectoire de l'onde sonore (Controlotron, 2006).**

Cette mesure de décalage correspond à la mesure de la vitesse de la particule dans le fluide. Cette vitesse est assimilée à la vitesse du fluide. Par contre, elle est valable si le fluide contient au moins 30 ppm de particules ou de bulles d'air, (Controlotron, 2006).

Figure 139. Schéma du canal en boucle verticale



No REV	REVISION	DATE	PAR
1	Drain	12:05	SM



Université du Québec  
**Institut National de la Recherche Scientifique**  
 Eau, Terre Environnement

DESSINATEUR: Stéphane  
 Montreuil

TITRE:  
 CANAL À SÉDIMENTATION  
 INRS-ETE  
 SCANOGRAPHIE

PROJET: MAÎTRISE SM

LOCAL: E 2.300.5

DISQUE:

EQU: CANBED

EQUIPEMENT No.

Canal à sédimentation, Bernard Long

FEBLLE

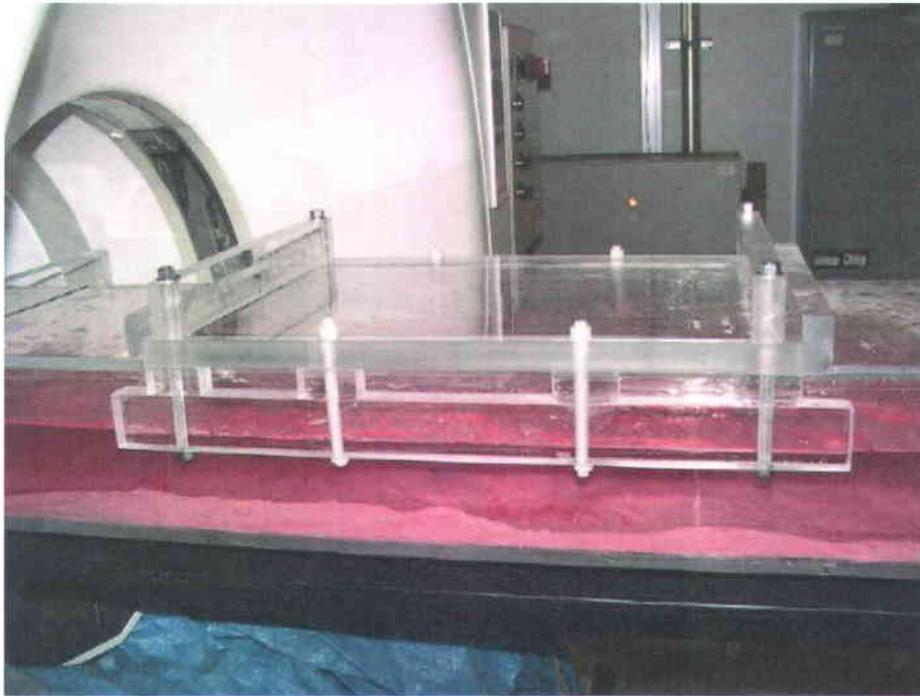
1 de 1

DESSIN No.:

CANAL VUE DE CÔTÉ 2004.001

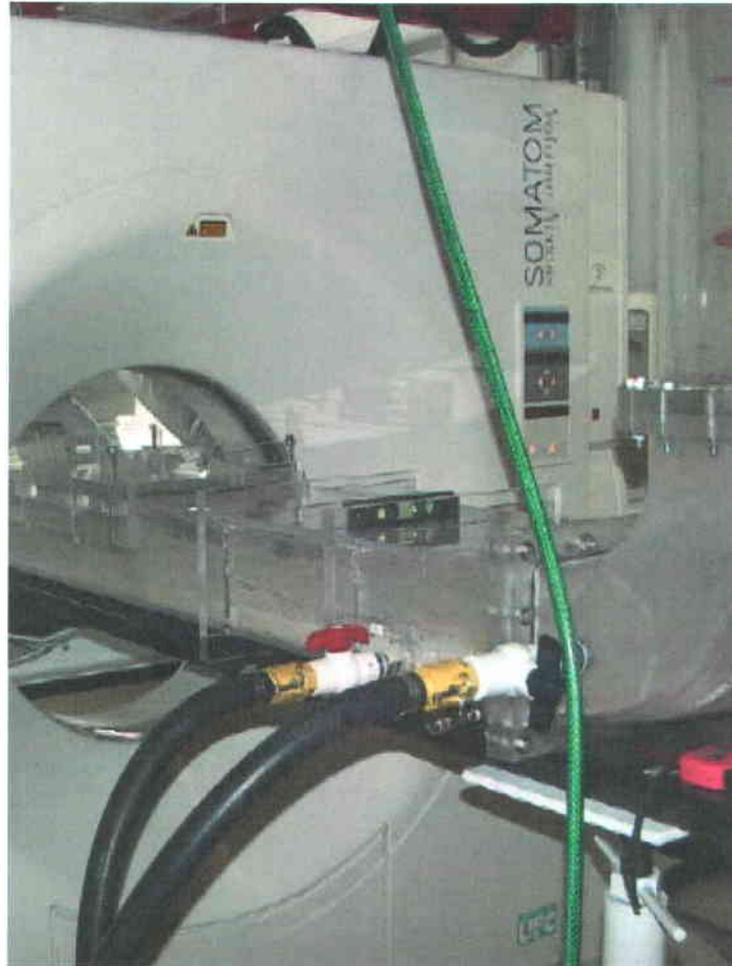
REV.

Le canal en boucle verticale est rempli par un tube de remplissage et d'échantillonnage sur le dessus du canal. Les sédiments (Fig. 140) sont insérés et retirés par la trappe d'accès, puis conservés pour l'analyse des dépôts sédimentaires après le retrait du fluide.



**Figure 140. Canal en boucle verticale : (1) trappe d'accès aux sédiments de 457 mm X 380 mm ; (2) dispositifs de retenue en nylon ; (3) couche de sédiments.**

La vidange du fluide se fait par les deux vannes (Fig. 141). La première est localisée dans le coude et n'évacue que le fluide, permettant ainsi un second remplissage sans affecter les dépôts sédimentaires. La seconde vanne évacue le fluide en entier incluant une fraction des sédiments. Lors de l'expérience avec le canal, un support supplémentaire est ajouté pour réduire les déformations sur le canal. Ce support est ajustable et est conçu pour s'insérer dans les rails du support principal. Le dessus du canal est attaché au pont roulant fixé au plafond afin de répartir la charge sur l'ensemble de la structure du bâtiment et d'éviter une déformation des joints du canal.



**Figure 141.** Canal en boucle verticale : dispositifs de drainage à deux niveaux et statif coulissant. Vanne à poignée noire de 2.5 cm de diamètre utilisée pour la vidange du fluide et vanne à poignée rouge utilisée pour l'évacuation des fluides et d'une partie des sédiments.

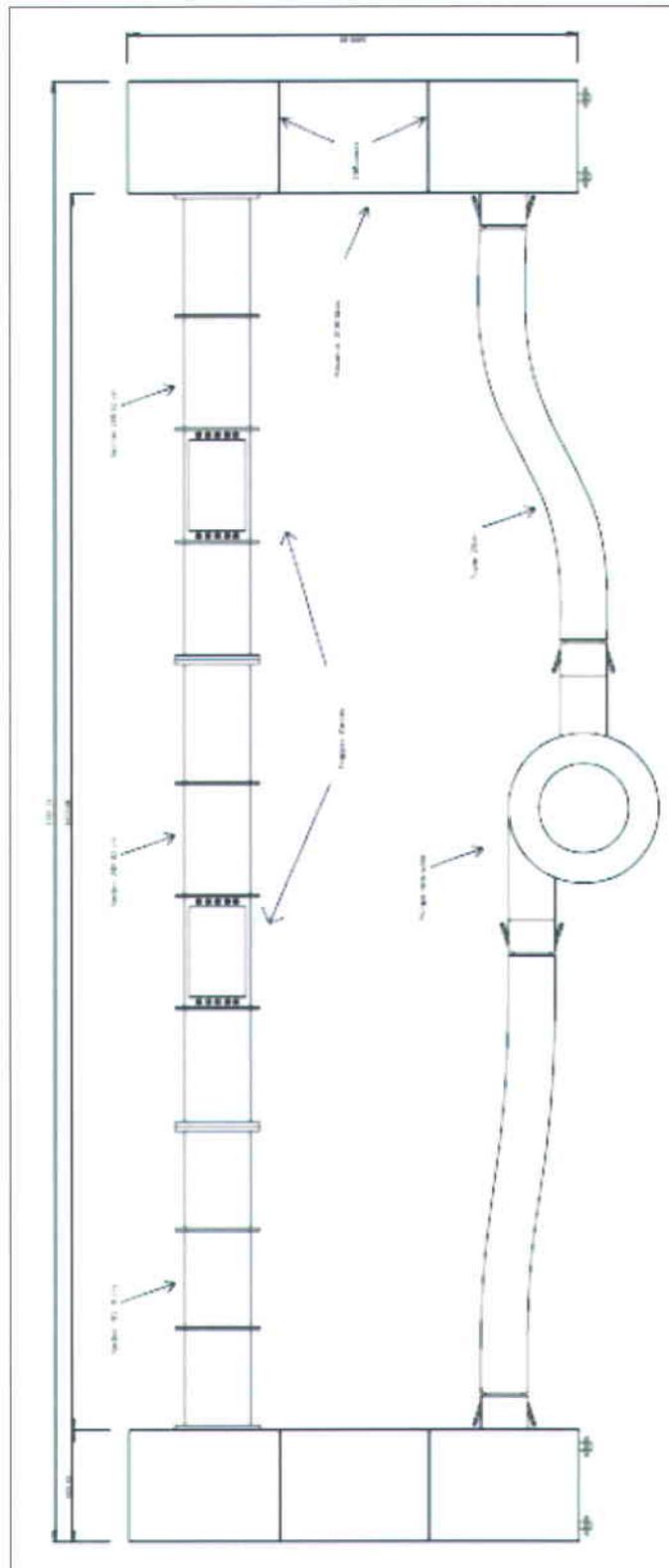
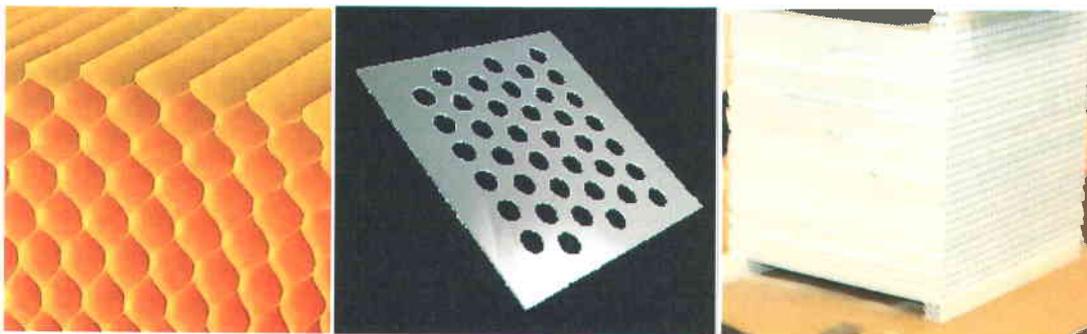


Figure 142. Dessin du canal à surface libre projeté et réalisé. (Conception : S. Montreuil ; Dessin : P. Labonté)

## ANNEXE 3 : CANAL HYDRAULIQUE À SURFACE LIBRE

Le volume des réservoirs a été fixé à  $2 \text{ m}^3$  afin d'obtenir un espace suffisant pour l'entretien des diffuseurs et de la réduction des turbulences. Plusieurs diffuseurs ont été testés afin de déterminer celui qui permet l'écoulement le moins turbulent possible, à coût raisonnable. En effet, malgré la présence de demi-parois séparant le réservoir en deux parties, limitant ainsi la dispersion des turbulences à la sortie de la pompe, dans le canal en amont, un diffuseur demeure nécessaire en raison des turbulences lors de son utilisation de grande vitesse. Deux types de diffuseurs ont été retenus afin de réduire la propagation des turbulences dans le canal : celui perforé de trous ronds et celui perforé sous forme d'alvéoles, avec plusieurs grosseurs d'ouvertures (Fig. 143). Par contre, le diffuseur à alvéoles mis à l'essai n'était pas suffisamment rigide et subissait des déformations nuisant à son fonctionnement. De plus, il était très difficile d'adapter son pourtour à la forme parfaitement carrée du canal. Aussi, le diffuseur perforé à trous circulaires n'était pas suffisamment long pour atténuer les turbulences présentes dans l'écoulement. Le choix final est un diffuseur avec des perforations carrées d'une longueur de 300 mm. Ce dernier est suffisamment rigide pour résister aux turbulences engendrées en sortie de la pompe et suffisamment long pour atténuer les turbulences du réservoir et permettre un écoulement relativement calme au niveau du canal.



**Figure 143.** Matériaux disponibles pour la réalisation des diffuseurs. De gauche à droite, fibres de carton alvéolées plastifiées, feuilles de plastique perforées de trous d'un diamètre de 20 mm, feuilles de plastique d'alvéoles carrées de 5mm coupées et regroupées pour obtenir un cube de 300mm x 300mm x 300mm.

La pompe a été choisie en fonction d'un courant maximal de  $50 \text{ cm s}^{-1}$  dans le canal à surface libre, sans sédiment. La taille du canal étant de  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  pour une surface d'écoulement de  $900 \text{ cm}^2$  et un courant de  $50 \text{ cm s}^{-1}$ . Un débit de  $0.045 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  passe dans le canal, soit un débit de  $2.7 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$  ou de  $713 \text{ USGPM}$ . La pompe retenue est une pompe de marque MEGGA™ série PC Model PCF-4L pouvant débiter  $510 \text{ USGPM}$  avec une colonne d'eau de  $420 \text{ mm}$  de hauteur (Fig. 144). Le débit d'opération nominal nécessaire aux expériences, en présence de sédiments, est de  $1.26 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$  ou de  $332.89 \text{ USGPM}$ .

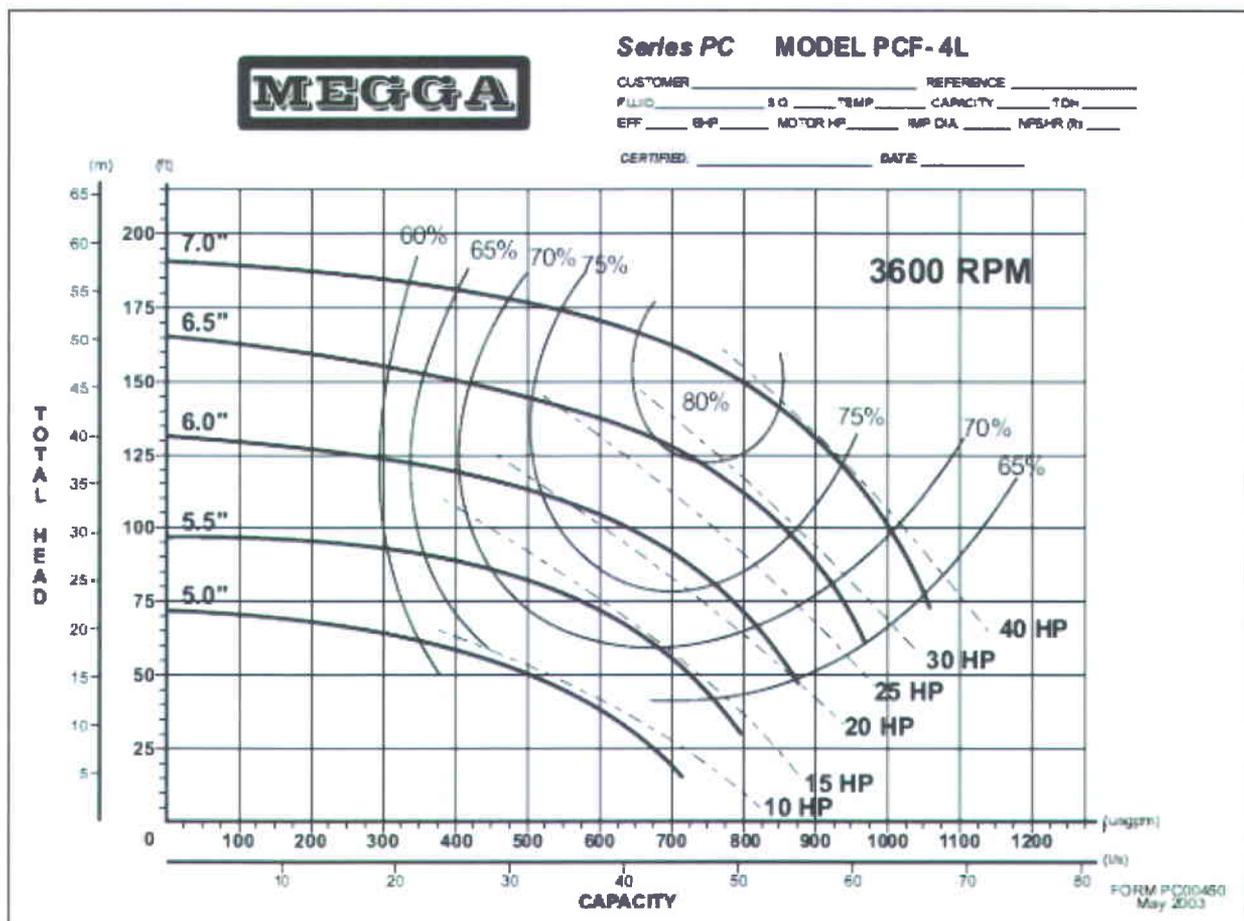
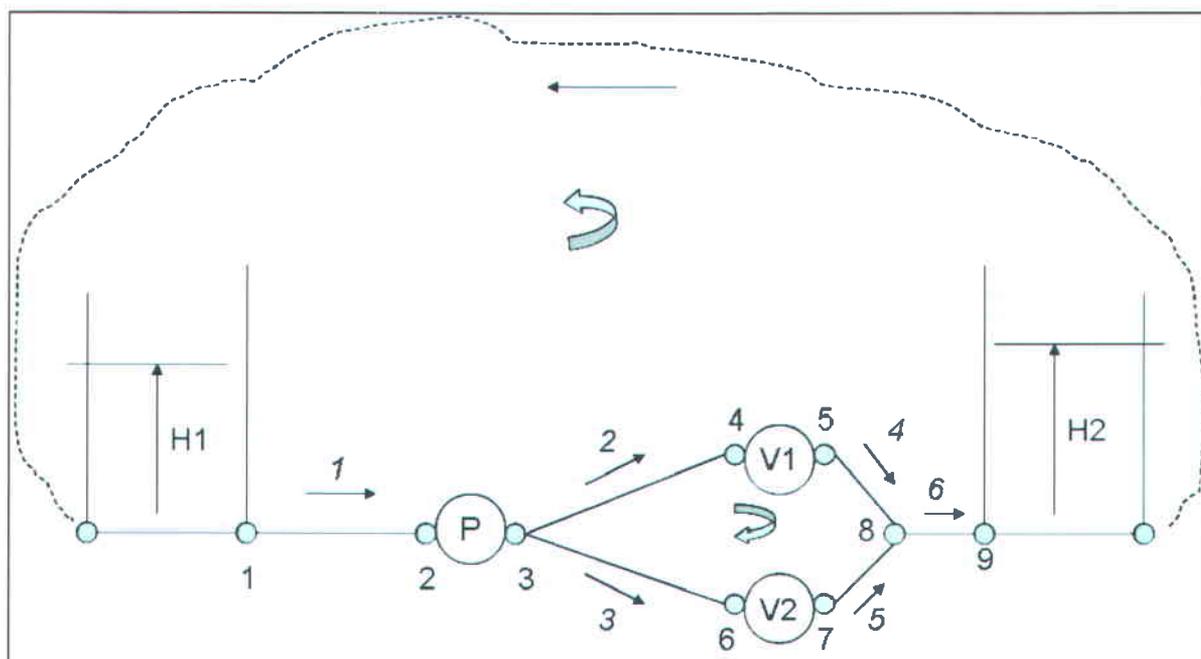


Figure 144. Courbe de la pompe MEGGA PCF-4L, 10 HP, 5 pouces, (Megga, 2003)

Considérant que la variation de la vitesse de la pompe par l'utilisation d'un variateur de vitesse entraîne un décalage de la courbe de pompe suivant l'axe de la hauteur de tête, une perte de la capacité lors de l'utilisation à faible hauteur de tête est prévisible. La hauteur de tête maximale étant de 120 mm, une vanne de régulation de type guillotine est utilisée en raison de son faible coût par rapport aux autres types de vannes, de sa simplicité d'opération mais, surtout, pour sa résistance à l'abrasion encourue par la présence de sable dans le fluide.

Le circuit hydraulique (Fig. 145) se compose de deux réservoirs couplés par une pompe en série avec deux vannes de contrôle en parallèle. La petite vanne de régulation est accessoire et elle peut être installée en cas de manque de précision sur la vanne principale. Les réservoirs sont munis de déversoir. Les réservoirs sont aussi mis en boucle fermée via un canal à surface libre dont les dimensions internes sont de 300 mm x 300 mm. Les débits circulant dans les conduits (branches) sont en italique et les nœuds utilisés pour la sommation des courants sont en numérotation arabe (normal) et symbolisés par de petits cercles.



**Figure 145.** Circuit hydraulique, en boucle fermée, du système de recirculation utilisé dans le calcul des débits

Deux types d'équations sont utilisés pour la réalisation du calcul de débits dans chacune des conduites, calcul conduisant au choix du type de conduits, de vannes et de pompe. Premièrement, les équations de continuités sur le débit entrant et sortant des 9 nœuds (Fig. 145) formant la boucle de recirculation du système sont

$$Qr1 - Qc1 = 0 \quad (42)$$

$$Qc1 - Qp = 0 \quad (43)$$

$$Qp - Qc2 - Qc3 = 0 \quad (44)$$

$$Qc2 - Qv1 = 0 \quad (45)$$

$$Qv1 - Qc4 = 0 \quad (46)$$

$$Qc3 - Qv2 = 0 \quad (47)$$

$$Qv2 - Qc5 = 0 \quad (48)$$

$$Qc4 + Qc5 - Qc6 = 0 \quad (49)$$

$$Qc6 - Qr2 = 0 \quad (50)$$

où  $Q_{rn}$  est le débit d'un réservoir,  $Q_{cn}$  est le débit d'une conduite,  $Q_p$  est le débit de la pompe et  $Q_{vn}$  est le débit dans une vanne. La numérotation suivant les variables indique respectivement le numéro du réservoir, le numéro de la conduite, le numéro de la pompe et le numéro de la vanne.

Le deuxième type d'équations est basé sur l'énergie en tenant compte des pertes pouvant survenir dans le montage. Les expressions mathématiques permettant de paramétrer le comportement du système (Tab. 28) utilisent les équations d'énergie basées sur les pertes de charge dans chacune des pièces d'équipement qui sont utilisées dans la réalisation du montage.

$$hc1 + (-hp) + hc2 + hv1 + hc4 + hc6 + (Hr1 - Hr2) = 0 \quad (51)$$

$$hc1 + (-hp) + hc3 + hv2 + hc5 + hc6 + (Hr1 - Hr2) = 0 \quad (52)$$

$$-hc2 - hv1 - hc4 + hc3 + hv2 + hc5 = 0 \quad (53)$$

où  $h_{cn}$  est la perte de charge locale dans une conduite,  $h_p$  est la perte de charge (gain) dans la pompe selon la (Fig. 146),  $h_{vn}$  est la perte de charge dans une vanne et  $H_{rn} -$

$H_{rn+1}$  est la perte de charge entre les réservoirs. La relation utilisée dans le calcul des pertes de charge est

$$h = RQ|Q| \text{ avec } R = 8 f L / \pi^2 g D^5 \quad (54)$$

où  $Q$  est le débit  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ,  $R$  est le rayon hydraulique,  $f$  est le facteur de frottement,  $L$  est la longueur de la conduite en mètre,  $D$  est le diamètre intérieur de la conduite en mètre et  $g$  est l'accélération gravitationnelle ( $9.81 \text{ m s}^{-2}$ ).

**Tableau 28. Tableau des calculs des paramètres locaux de chacun des équipements**

Description	Abréviation	Longueur	diamètre	f	R
reservoir1	r1	0	1	0,02	0,0
conduit1	c1	3	0,0508	0,02	14658,4
pompe	p	0	0,0508	0,02	0,0
conduit2	c2	1	0,0508	0,02	4886,1
vanne1	v1	0,01	0,0508	393700787362	961837683674853,0
conduit4	c4	0,7	0,0508	0,02	3420,3
conduit6	c6	2	0,0508	0,02	9772,3
conduit3	c3	1	0,0508	0,02	4886,1
vanne2	v2	0,01	0,0508	24,727	60409,0
conduit5	c5	0,5	0,0508	0,02	2443,1
reservoir2	r2	0	1	0,02	0,0

La courbe de pompe nécessaire est définie à l'aide de MS Excel™ par le calcul des débits préalablement définis (Tab. 28). De plus, la courbe de la vanne est obtenue avec l'information du manufacturier (Fig. 147). Les spécifications du manufacturier concernant la seconde vanne, plus petite, ne sont pas disponibles. Par contre, les informations techniques nécessaires à l'achat de cette dernière ont déjà été insérées dans le modèle. Elle est continuellement fermée pour les besoins de la simulation.

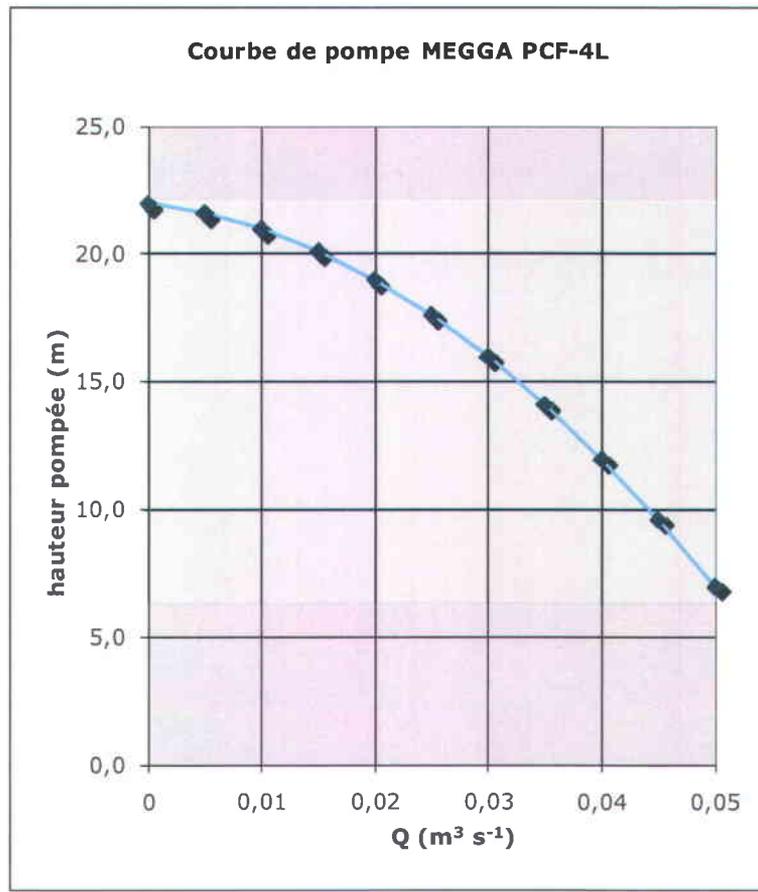


Figure 146. Courbe de la pompe définie selon les spécifications du manufacturier. (Megga, 2003)

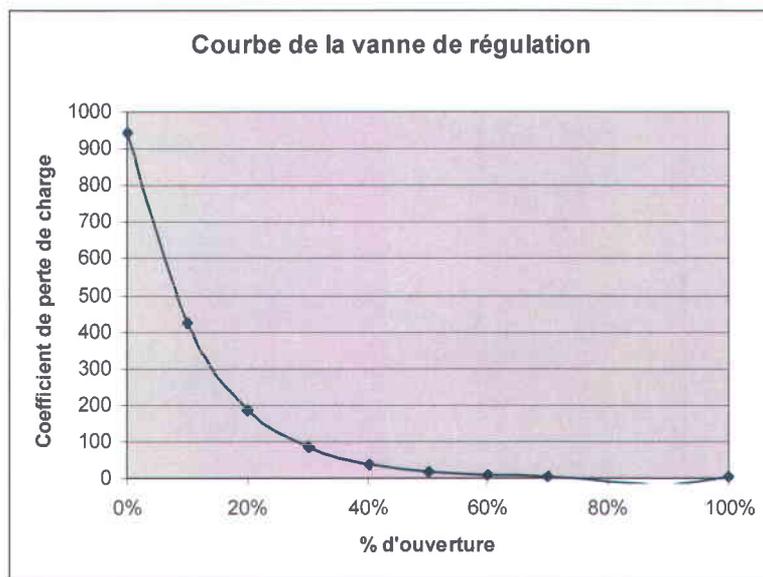


Figure 147. Courbe de perte de charge de la vanne principale, "stainless steel lined resilient seated knife gate valve" (Familian Northwest, 2005).

La méthode de calculs utilisée est la méthode par itérations dans MS Excel<sup>MC</sup>. Le tableau 29 présente les résultats des calculs des débits dans la conduite principale, soit la conduite 1 ou 6, qui déterminent le débit de fluide qui circule en fonction de l'ouverture de la vanne de contrôle. Les paramètres  $Q$  et  $R$  sont recalculés dans le tableau 28, qui contient une itération logicielle dans la matrice de calcul du tableau 30.

**Tableau 29 : Matrice de calculs des débits dans chacune des composantes du circuit hydraulique.**

r1	c1	p	c2	v1	c4	c6	c3	v2	c5	r2	Q1	=
1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01478791	0
0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01478791	0
0	0	1	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0,01478791	0
0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	1,241E-07	0
0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	1,241E-07	0
0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	1,241E-07	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0,01478791	0
0	0	0	0	0	1	-1	0	0	1	0	0,01478779	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-1	0,01478779	0
0	216,787	123,940	0,001	119363316,162	0,000	144,511	0	0	0	0	0,01478779	21,988
0	0	0	-0,001	-119363316,162	0,000	0	72,255	893,315	36,128	0	0,01478791	0

Le calcul de la pente du canal est fait en tenant compte de la vitesse d'écoulement maximale désirée et des dimensions maximales du canal à surface libre ( $H1-H2$ ). Les résultats sont présentés au tableau 30. Ce dernier renferme les résultats de la meilleure des simulations réalisées : une pente de 11.5 mm pour une longueur effective de canal de 6300 mm, une colonne d'eau de 150 mm, une épaisseur de sédiments de 50 mm, un courant de  $40.3 \text{ cm s}^{-1}$  et un coefficient de Manning de 0.03 (Nakayama & Boucher, 1999; Robert, 2007; Young et al, 2007). Le coefficient de Manning  $n$  est un coefficient empirique, qui dépend principalement de la rugosité du fonds et des parois du canal ainsi que de la sinuosité de ce dernier. La valeur choisie prend en compte un fonds sableux, des parois lisses et longitudinales (Chow, 1959; Young et al, 2007). Afin de d'obtenir mécaniquement la pente dans la partie acrylique du canal, des joints d'étanchéités déformables sont utilisés entre la section de d'acrylique et les réservoirs (Fig. 148). Ces joints, d'une épaisseur de 25.4 mm, peuvent être compressés non uniformément jusqu'à 3.5 mm afin d'obtenir l'angle désiré entre le canal d'acrylique et le réservoir.

**Tableau 30 : Tableau de calculs de différence de niveau entre les réservoirs, constituant l'écoulement du canal à surface libre**

<b>Débit</b>	Q	0,018 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	287,446 USGPM
Cte frottement selon le n de Manning	n	0,030	Manning avec ride sableuse
Profondeur	y	0,150 m	Colonne d'eau avec sed
Largeur	b	0,300 m	
<b>Vitesse</b>	V	0,403 m s <sup>-1</sup>	40,30 cm s <sup>-1</sup>
Surface	Air	0,045 m <sup>2</sup>	
Périmètre mouillé	P	0,600 m	
Rayon hydraulique	Rh	0,150	
FOND CANAL	S0	0,002	
gravité	g	9,807	
y critique	yc	0,072	
y normal	yn	0,150	
A normal	An	0,045	
P normal	Pn	0,600	
Rh normal	Rhn	0,075	
Frottement normal	f(yn)	0,007	
longueur du canal	L	6,300 m	
delta H reservoir	Ha- Hb	0,012	11,55 mm

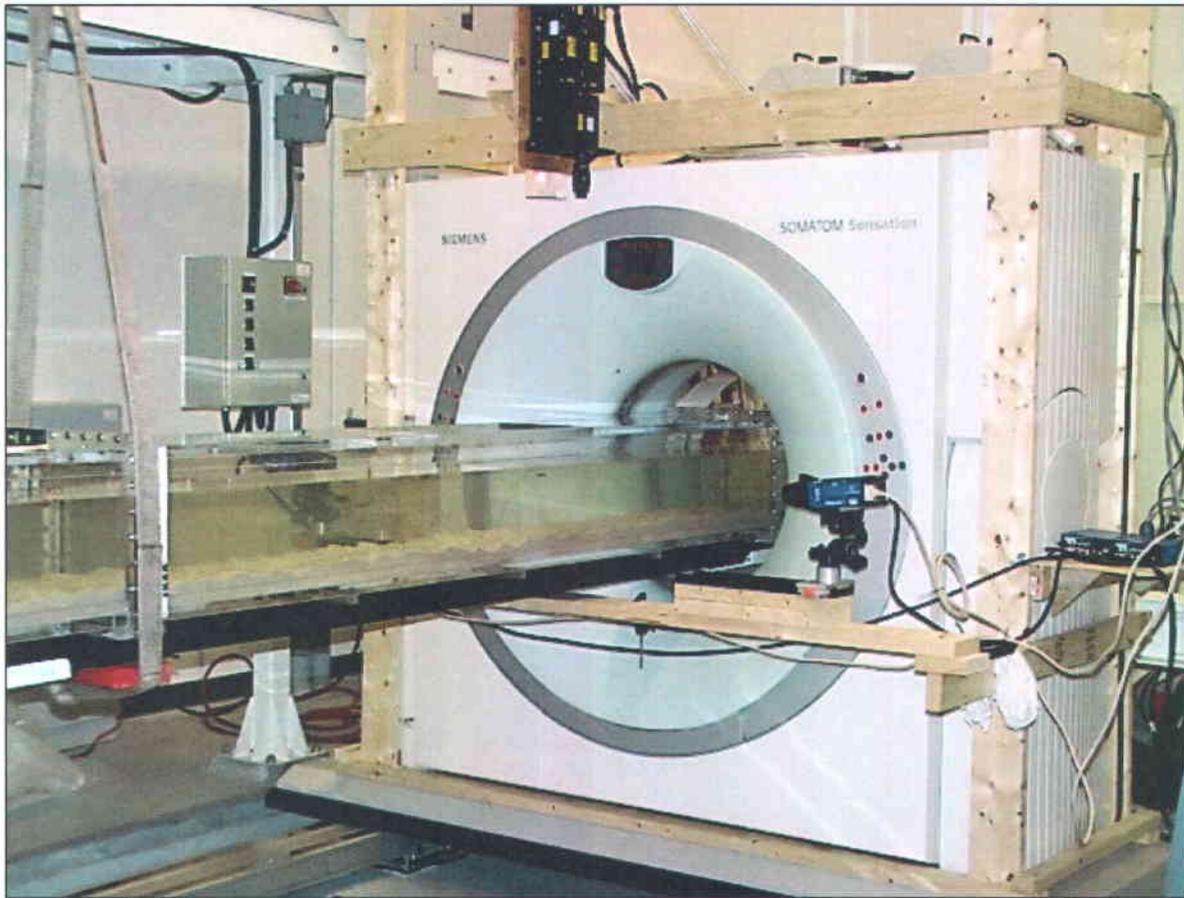
La liaison entre le canal à surface libre et le circuit hydraulique s'obtient en insérant la vitesse du circuit hydraulique obtenue des calculs du tableau 29 à l'intérieur du calcul du canal à surface libre du tableau 30. La hauteur  $\Delta H$  est ensuite réintroduite dans le calcul du circuit hydraulique pour fin d'itérations et cela jusqu'à l'obtention d'une valeur convergente.



**Figure 148.** Photographie du joint d'étanchéité déformable de 25.4 mm installé entre la partie d'acrylique et le réservoir.

Après l'obtention de valeur convergente, et afin d'évaluer les performances du canal, des essais théoriques de variations des paramètres sont réalisés. La largeur du canal étant une constante est imposée par l'espace circulaire disponible dans la statif et l'anneau de sécurité. La dimension hors tout du canal est de 415 x 415 mm pour une dimension intérieure de 300 x 300 mm. La longueur du canal est fixée à 7010 mm, ce qui permet une utilisation optimale de la salle de tomographie (Fig. 149).

Plusieurs essais ont été réalisés sur le modèle afin de déterminer les longueurs critiques. Les résultats obtenus pour les pentes sont à l'intérieur des ajustements disponibles sur le canal. Un dispositif est prévu afin d'obtenir une pente de canal fonction de la vitesse et du débit de l'écoulement. La colonne d'eau est un paramètre critique, car sa diminution, pour un même débit à la pompe, entraîne une compensation de vitesse du canal à surface libre qui risque d'endommager le lit sédimentaire. Un contrôleur avec dispositif d'amortissement programmable dans l'automate programmable industriel est donc prévu afin de palier à une chute soudaine des niveaux des réservoirs. Ce dispositif empêche toute variation rapide lors d'opérations de changement de consigne de vitesse sur l'interface utilisateur.



**Figure 149. Statif coulissant du scanographe se déplaçant sur quatre rails parallèles le long du canal à surface libre, qui repose sur la table d'examen.**

De plus, une simulation de l'effet de l'ouverture de la vanne sur la vitesse du courant dans le canal à surface libre est présentée à la figure 150. La plage d'opération inclut la fermeture complète jusqu'à une ouverture de 60%. Les différences observées entre la courbe théorique et la courbe pratique sont principalement dues à la rugosité des conduites flexibles installées (Fig. 151). Par contre, ces différences n'influencent pas l'aspect opérationnel du canal à surface libre. Enfin, le type de rides obtenues lors des essais était conforme à la littérature (Fig. 152).

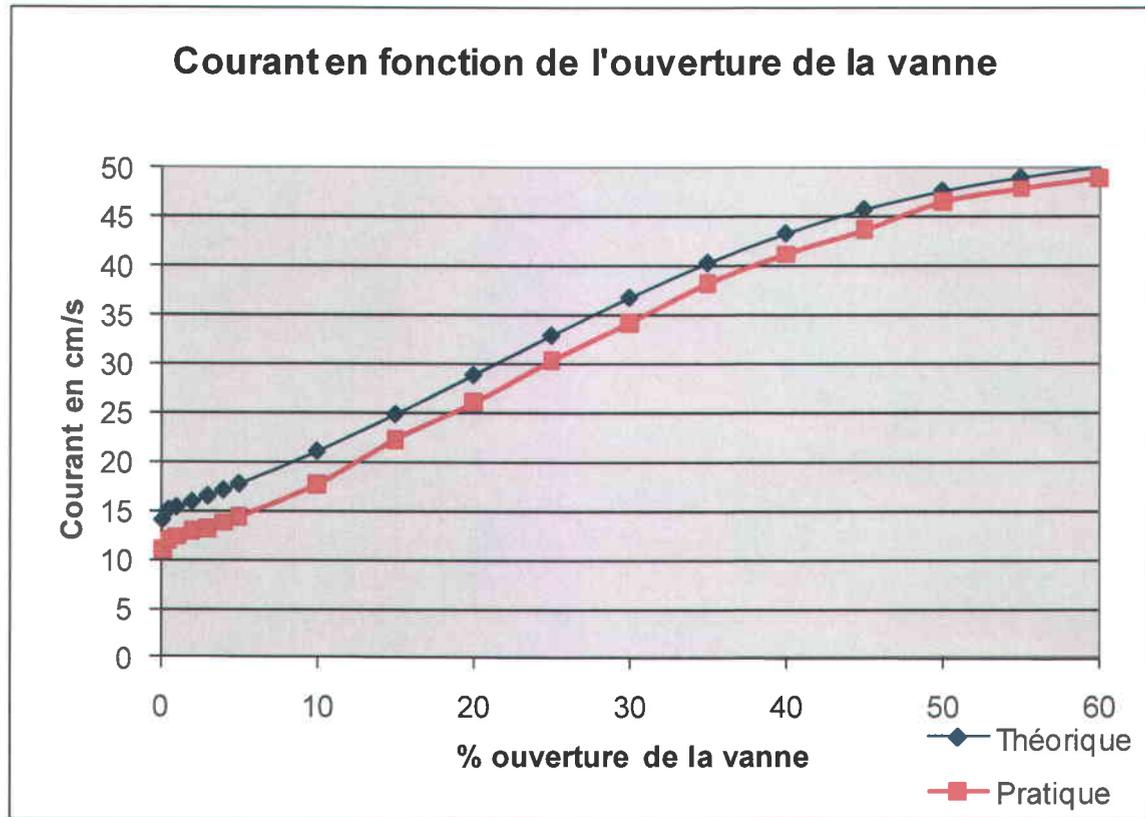


Figure 150. Courbe du courant théorique et pratique en fonction de l'ouverture de la vanne principale dans la plage d'opération.



Figure 151. Photographie représentant les conduites flexibles installées dans la boucle de recirculation de la pompe.

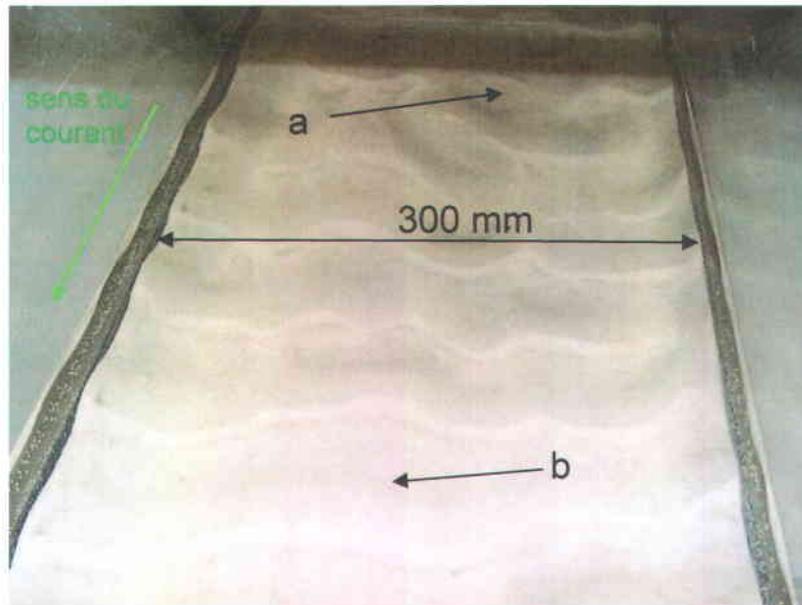


Figure 152. Photographie représentant le canal d'acrylique à surface libre ainsi que le champ de rides obtenu avec le sable de quartz ( $d_{50} = 0.120 \text{ mm}$ ) et un courant d'environ  $30 \text{ cm s}^{-1}$ . (a) section de l'écoulement instable, en sortie du diffuseur et (b) section stabilisé de l'écoulement, où se trouve le volume mesuré par le scanographe.

## ANNEXE 4 : PARAMÈTRES DICOM

**Tableau 31 : Tableau résumé des principaux paramètres disponibles dans l'entête d'un fichier DICOM, paramètres permettant la mise en contexte de l'image à travers l'ensemble de la mesure.**

No DICOM	Titre et valeur du paramètre	Description
0008,0008	Image Type: ORIGINAL\PRIMARY\AXIAL\CT_SOM5 SEQ	Type d'image utilisé par l'appareil de l'INRS
0008,0020	Study Date: 20090505	Date de l'étude
0008,0021	Series Date: 20090708	Date de la série d'images
0008,0022	Acquisition Date: 20090505	Date acquisition de l'image
0008,0023	Image Date: 20090505	Date de l'image
0008,0030	Study Time: 102920.812000	Heure de l'étude de l'ensemble
0008,0031	Series Time: 154012.796000	Heure de la série d'images
0008,0032	Acquisition Time: 103331.765015	Heure du début de l'acquisition
0008,0033	Image Time: 103331.765015	Heure de l'image dans la série
0008,0070	Manufacturer: SIEMENS	Nom du manufacturier
0008,0080	Institution Name: INRS-Scanographie	Nom de l'utilisateur (institution)
0008,0081	Institution Address: Parc Technologique	Adresse de l'institution
0008,1030	Study Description: Abdomen^newstephAbdomenSeq (Adult)	Description de l'étude, entrée par l'utilisateur
0008,103E	Series Description: 530_2_82_1 0.6 B20s	Description de la série entrée par l'utilisateur
0008,1090	Manufacturer's Model Name: Sensation 64	Modèle de l'appareil utilisé
0010,0010	Patient's Name: B20^STEPHANE_MONTREUIL	Nom du patient identifiant le client utilisant l'appareil
0010,0020	Patient ID: CANAL	Identité du patient utilisé pour fins d'identification de l'objet sujet à l'étude
0018,0015	Body Part Examined: ABDOMEN	Parties du corps examinées, l'abdomen étant utilisé pour les larges volumes
0018,0050	Slice Thickness: 0.6	Épaisseur d'une tranche

<b>No DICOM</b>	<b>Titre et valeur du paramètre</b>	<b>Description</b>
0018,0060	kVp: 140	Tension maximale appliquée au tube à rayons X lors de l'examen, 140 kVp (" <i>Peak kilovoltage</i> ")
0018,1020	Software Versions(s): syngo CT 2007S	Version est mise à jour du logiciel
0018,1030	Protocol Name: newstephAbdomenSeq	Nom du protocole de reconstruction utilisé
0018,1100	Reconstruction Diameter: 300	Diamètre de la reconstruction (300 mm)
0018,1140	Rotation Direction: CW	Sens de rotation du tube et des détecteurs de l'appareil
0018,1150	Exposure Time: 1000	Durée de l'exposition en (ms)
0018,1151	X-ray Tube Current: 472	Courant circulant dans le tube en milliampères secondes (mAs)
0018,1152	Exposure: 472	Courant mesuré, circulant dans le tube en milliampères secondes (mAs)
0018,1160	Filter Type: 0	Aucun filtre appliqué à la sortie du tube
0018,1200	Date of Last Calibration: 20090424	Date de la dernière calibration de l'appareil
0018,1201	Time of Last Calibration: 083530.000000	Temps écoulé depuis la dernière calibration de l'appareil
0018,1210	Convolution Kernel: B20s	Filtre de l'algorithme de reconstruction, B20s signifiant une filtration basse fréquence et un lissage doux. (B20 " <i>smooth</i> ")
0020,0011	Series Number: 1	Numéro de la série est incrémenté lorsque plusieurs séries sont réalisées sur un même patient
0020,0012	Acquisition Number: 1	Numéro de l'acquisition est incrémenté lorsque plusieurs acquisitions sont réalisées sur un même patient

<b>No DICOM</b>	<b>Titre et valeur du paramètre</b>	<b>Description</b>
0020,0013	Image Number: 20	Numéro de l'image dans la série (20 de 30)
0020,0032	Image Position (Patient): -149.70703125\324.70703125\460.7	Position du Scanographe dans l'espace (mm)
0020,1041	Slice Location: -460.7	Position de la tranche suivant l'axe des x, le déplacement de l'appareil se faisant suivant une progression négative dans l'axe (mm)
0020,4000	Image Comments:	Commentaires pouvant être ajoutés à l'image
0028,0004	Photometric Interpretation: MONOCHROME2	Mode de représentation photométrique signifiant que les fortes densités seront claires et que les faibles densités foncées (noire)
0028,0010	Rows: 512	Nombre de pixels dans la rangée
0028,0011	Columns: 512	Nombre de pixels dans la colonne
0028,0030	Pixel Spacing: 0.5859375\0.5859375	Dimension d'un pixel en (mm)
0028,0106	Smallest Image Pixel Value: 0	Valeur du pixel le plus faible (HU)
0028,0107	Largest Image Pixel Value: 2071	Valeur du pixel le plus élevé (HU)
0028,1052	Rescale Intercept: -1024	Les valeurs contenues dans le fichier varient entre 0 et 4095, afin d'obtenir la valeur standardisée (DICOM) la valeur de l'ordonnée à l'origine (-1024) doit être additionné aux valeurs de la matrice contenue dans le fichier

# ANNEXE 5 : COMPOSITION DES SABLES

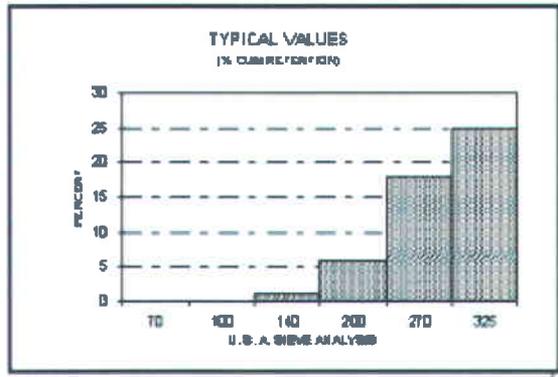


## SIL-CO-SIL® 106

GROUND SILICA

PLANT OTTAWA, ILLINOIS

### PRODUCT DATA



MESH	MICRONS	% RETAINED		% PASSING
		INDIVIDUAL	CUMULATIVE	CUMULATIVE
70	212	0.0	0.0	100.0
100	150	0.0	0.0	100.0
140	106	1.0	1.0	99.0
200	75	4.9	5.9	94.1
270	53	11.7	17.6	82.4
325	45	7.5	25.1	74.9

### TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES

HARDNESS (Mohs) ..... 7  
 MELTING POINT (Degrees F) ..... 3100  
 MINERAL ..... QUARTZ  
 pH ..... 7

REFLECTANCE (%) ..... 79.5  
 YELLOWNESS INDEX ..... 4  
 SPECIFIC GRAVITY ..... 2.65

### TYPICAL CHEMICAL ANALYSIS, %

SiO<sub>2</sub> (Silicon Dioxide) ..... 99.7  
 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Iron Oxide) ..... 0.021  
 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Aluminum Oxide) ..... 0.12  
 TiO<sub>2</sub> (Titanium Dioxide) ..... 0.009  
 CaO (Calcium Oxide) ..... 0.009  
 MgO (Magnesium Oxide) ..... <0.01  
 Na<sub>2</sub>O (Sodium Oxide) ..... <0.01  
 K<sub>2</sub>O (Potassium Oxide) ..... 0.02  
 LOI (Loss On Ignition) ..... 0.1

April 27, 2010

**DISCLAIMER:** The information set forth in this Product Data Sheet represents typical properties of the product described; the information and the typical values are not specifications. U.S. Silica Company makes no representation or warranty concerning the Products, expressed or implied, by this Product Data Sheet.

**WARNING:** The product contains crystalline silica - quartz, which can cause silicosis (an occupational lung disease) and lung cancer. For detailed information on the potential health effect of crystalline silica - quartz, see the U.S. Silica Company Material Safety Data Sheet.

U.S. Silica Company

P.O. Box 187, Berkeley Springs, WV 25411-0187

(304) 258-2500

Figure 153. Feuille de données techniques typiques des sédiments de la formation Ottawa comprenant l'analyse chimique du minéral.

## ANNEXE 6 : ALGORITHME DE TRAITEMENT

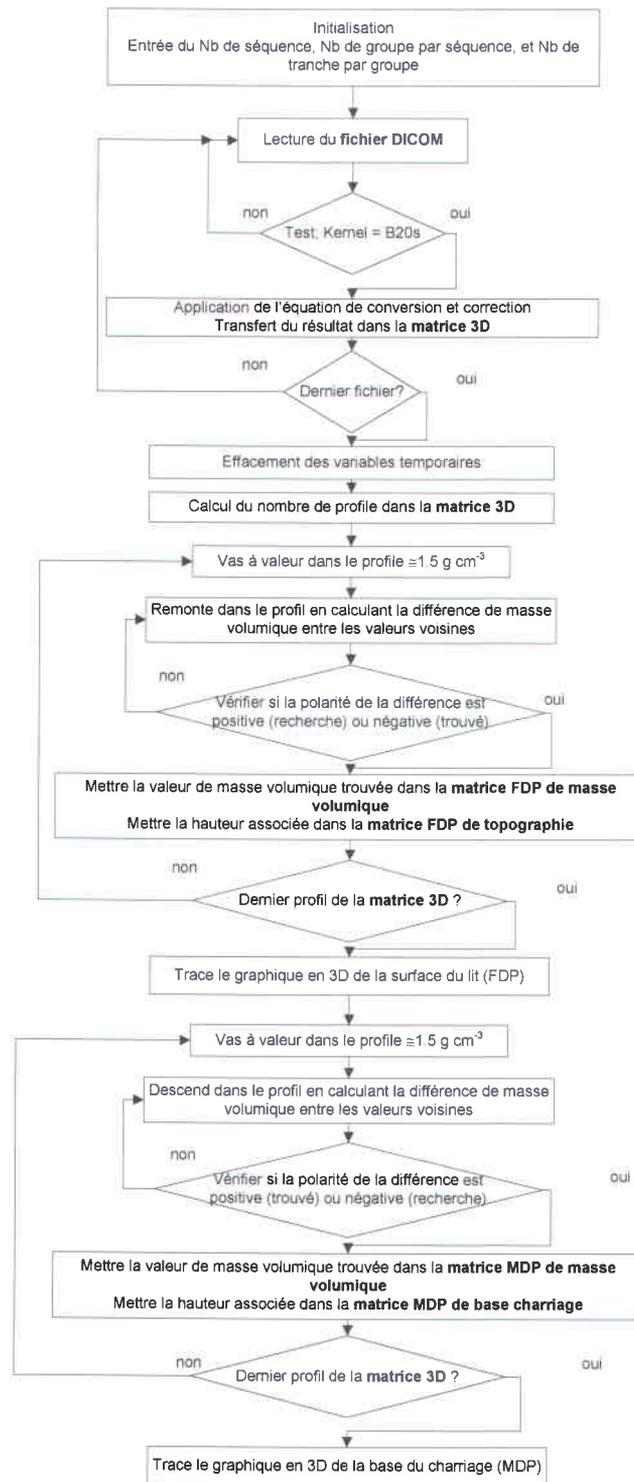


Figure 154. Algorithme type utilisé pour coder le programme d'ouverture, de traitement et d'analyse des points et couches.

## ANNEXE 7 : VITESSE DE TRANSPORT

**Tableau 32 : Résultats et paramètres utilisés dans le calcul de la vitesse d'initiation du transport suivant la méthode préconisée par Jimenez & Madsen (2003). Les sables utilisés sont identifiés par la dénomination du fournisseur soit : C-109, 705, 505, 530 et Flint Silica. Les granulométries sont disponibles à l'annexe 1 et leur composition à l'annexe 5.**

C-109			705			505			530			Flint Silica		
$d_{50} =$	0,0004	m	$d_{50} =$	0,0001	m	$d_{50} =$	0,0002	m	$d_{50} =$	0,0002	m	$d_{50} =$	0,0004	m
$\rho_s =$	2650	g/m <sup>3</sup>	$\rho_s =$	2650	g/m <sup>3</sup>	$\rho_s =$	2650	g/m <sup>3</sup>	$\rho_s =$	2650	g/m <sup>3</sup>	$\rho_s =$	2650	g/m <sup>3</sup>
$\rho =$	1025	g/m <sup>3</sup>	$\rho =$	1025	g/m <sup>3</sup>	$\rho =$	1025	g/m <sup>3</sup>	$\rho =$	1025	g/m <sup>3</sup>	$\rho =$	1025	g/m <sup>3</sup>
$s =$	2,585		$s =$	2,585		$s =$	2,585		$s =$	2,585		$s =$	2,585	
$v =$	0,000001	m <sup>2</sup> /s	$v =$	0,000001	m <sup>2</sup> /s	$v =$	0,000001	m <sup>2</sup> /s	$v =$	0,000001	m <sup>2</sup> /s	$v =$	0,000001	m <sup>2</sup> /s
$C_d =$	0,3352		$C_d =$	0,3352		$C_d =$	0,3352		$C_d =$	0,3352		$C_d =$	0,3352	
$S =$	6,9959		$S =$	1,0576		$S =$	1,8058		$S =$	2,5744		$S =$	7,7167	
$W_s =$	0,1513	m/s	$W_s =$	0,0806	m/s	$W_s =$	0,0963	m/s	$W_s =$	0,1084	m/s	$W_s =$	0,1563	m/s
<b>Vitesse =</b>	<b>15,13</b>	<b>cm/s</b>	<b>Vitesse =</b>	<b>8,06</b>	<b>cm/s</b>	<b>Vitesse =</b>	<b>9,63</b>	<b>cm/s</b>	<b>Vitesse =</b>	<b>10,84</b>	<b>cm/s</b>	<b>Vitesse =</b>	<b>15,63</b>	<b>cm/s</b>

