

**ÉVOLUTION DENSIMÉTRIQUE DES STRUCTURES DE
RIDES EN DÉPLACEMENT SOUS UN COURANT
STATIONNAIRE MESURÉ SOUS SCANOGAPHE DANS
UN CANAL EN BOUCLE VERTICALE**

MÉMOIRE DE MAÎTRISE

Présenté

À L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE,

Université du Québec

Pour l'obtention du grade de

MAÎTRES ÈS SCIENCES (GÉOLOGIE)

Par

Stéphane Montreuil

Octobre 2006

ÉVOLUTION DENSIMÉTRIQUE DES STRUCTURES DE RIDES EN DÉPLACEMENT SOUS UN COURANT STATIONNAIRE MESURÉ SOUS SCANOGAPHE DANS UN CANAL EN BOUCLE VERTICALE

MÉMOIRE DE MAÎTRISE

Présenté

À L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE,
Université du Québec

Pour l'obtention du grade de
MAÎTRES ÈS SCIENCES (GÉOLOGIE)

Par

Stéphane Montreuil

Présenté au comité d'évaluation :

- Dr Bernard Long, Professeur-chercheur à l'Institut National de Recherche Scientifique (Eau, Terre et Environnement) - Directeur de maîtrise
- Dr Brian Morse, Professeur-chercheur à l'Université Laval.
- Dr Yves Gratton, Professeur-chercheur à l'Institut National de Recherche Scientifique (Eau, Terre et Environnement)

Octobre 2006

Résumé

Le scanographe permet une grande variété de mesures de densité par rayon X. Les mesures sont exprimées en unités Hounsfield (HU) et la plage est de -1024 à $+3071$ HU. Les valeurs pour l'air et pour l'eau sont respectivement de -1000 HU et de 0 HU (Kak et Slaney, 1999).

Cette maîtrise vise, pour la première fois, l'analyse de la densité des sédiments se déplaçant sous forme de ride, sous un courant stationnaire, dans un canal en boucle verticale (Teeter et Pankow 1989, Teeter et Al. 1999), de 3048 mm par 1219 mm, dont la section rectangulaire intérieure, installée à l'intérieur du statif coulissant, mesure $152,4$ mm de hauteur et $304,8$ mm de largeur.

Une couche de sable de la Formation d'Ottawa de 30 mm d'épaisseur est placée dans la partie inférieure du canal par une trappe d'accès. Des mesures de densité au remplissage révèlent une compaction et une densification du sédiment en lien avec la pression de la colonne d'eau. Un écoulement constant est généré par des hélices couplées à un moteur. Le courant dans le canal est mesuré et enregistré par un courantomètre à effet Doppler, *Controlotron System 1010N*.

La formation et l'évolution des rides sont enregistrées suivant un pas temporel variable comprenant différents plateaux de vitesse de courant sur une période de 10 heures. Les coupes de profil des rides mesurent 200 mm avec une résolution de 512 mesures. Le sédiment utilisé est le sable de la Formation d'Ottawa (C-109), qui a un diamètre médian d_{50} de 370 μm .

La densité de la surface le long du profil de la ride augmente de 1100 HU à 1500 HU ($2,124$ à $2,524$ mg cm^{-3}). La ride atteint sa densité maximale sur la crête. Le front de progradation présente une diminution de la densité caractérisée par un mélange sédiment-eau. L'intérieur de la ride montre une densité inférieure à celle de la crête tout en conservant un litage caractéristique des rides présentes antérieurement.

Étudiant

Directeur de recherche

Remerciements

Je tiens particulièrement à remercier le Dr Bernard Long pour la confiance qu'il a su m'accorder et l'enthousiasme qu'il m'a transmis.

Je désire remercier aussi le programme FCI (Fond Canadien d'Innovation) pour l'acquisition du scanographe et du canal, la compagnie Siemens pour leur collaboration scientifique, le RCNE (Réseau des Centres Nationaux d'Excellence) pour leur appui financier dans le cadre du programme GÉOIDE.

Je remercie également le CERC-USACE pour sa collaboration en matière hydraulique et, en particulier, le Dr Parchure.

Je remercie aussi Monsieur Jacques Labrie de l'INRS-ETE pour son support en informatique et les nombreuses discussions et critiques.

Enfin, un merci particulier à Tommy et Caroline pour leur support tout au long de cette maîtrise.

Table des matières

RÉSUMÉ	III
REMERCIEMENTS	IV
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX	XIII
LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES	XIV
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 – MATÉRIEL ET MÉTHODE	3
1.1. RAYON X	3
1.2. PRINCIPE DU RAYON X	4
1.3. GÉOMÉTRIE DU SYSTÈME	5
1.4. CARACTÉRISTIQUES DU SCANOGRAPHE	6
1.5. ANALYSE D’IMAGES EN MILIEU SÉDIMENTAIRE	6
1.6. ENVIRONNEMENT LOGICIEL	7
1.7. FORMAT D’IMAGE RAYON X	8
1.8. IMAGERIE ET ARTÉFACTS	10
1.8.1. <i>L’effet de volume partiel</i>	11
1.8.2. <i>Le durcissement de faisceau</i>	12
1.8.3. <i>Les artéfacts circulaires</i>	12
1.9. LE CANAL HYDRAULIQUE EN BOUCLE VERTICALE	13
1.9.1. <i>Conception</i>	13
1.9.2. <i>Calcul de la masse du canal</i>	19
CHAPITRE 2 : CARACTÉRISTIQUES SÉDIMENTOLOGIQUES	22
CHAPITRE 3 : RÉSULTATS	24
3.1. VITESSE DE DÉPLACEMENT D’UNE RIDE HORS SCANOGRAPHE	24

3.2.	PRÉSENCE DU LITAGE DANS LES DONNÉES SCANOGRAPHIQUES _____	25
3.3.	DÉTERMINATION DES ENVIRONNEMENTS SCANOGRAPHIQUES D'UNE RIDE ____	26
3.4.	ÉQUATION DU PROFIL DE DENSITÉ D'UNE RIDE SABLEUSE. _____	30
3.5.	ESTIMATION DU RAPPORT EAU-SÉDIMENTS DANS LES ZONES DE TRANSPORT__	31
3.6.	ÉVOLUTION DENSIMÉTRIQUE DURANT LE REMPLISSAGE _____	33
3.7.	MODE DE DÉPOSITION ET FORME INITIALE DU LIT SÉDIMENTAIRE _____	35
3.8.	FORMATION INITIALE DES RIDES SABLEUSES _____	37
3.9.	ÉVOLUTION DE LA DENSITÉ EN SURFACE DE LA RIDE _____	40
3.10.	MILIEU STATIQUE VERSUS DYNAMIQUE. _____	41
3.11.	VARIATION HORIZONTALE DE LA DENSITÉ _____	42
3.12.	VARIATION VERTICALE DE DENSITÉ _____	44
3.12.1.	<i>Partie basse du flanc d'érosion</i> _____	45
3.12.2.	<i>Le long du flanc d'érosion</i> _____	47
3.12.3.	<i>Partie sommitale de la ride sableuse</i> _____	49
3.12.4.	<i>Du point bas vers le bas du flanc d'érosion</i> _____	51
3.12.5.	<i>Sur le flanc d'avalanche</i> _____	53
3.12.6.	<i>Sur le point de non retour et le point bas</i> _____	54
3.12.7.	<i>Pente des profils de densité et d'épaisseur des couches de transport</i> __	55
CHAPITRE 4 : DISCUSSION _____		59
4.1.	UTILISATION DU SCANOGAPHE _____	59
4.2.	UTILISATION DU CANAL _____	60
4.3.	EFFET DES PAROIS DU CANAL SUR LES MESURES _____	60
4.4.	ÉPAISSEUR DE LA COUCHE SÉDIMENTAIRE _____	61
4.5.	PROBLÉMATIQUE DE L'INTERFACE EAU-SÉDIMENT _____	61
4.6.	ÉVOLUTION DENSIMÉTRIQUE _____	62
4.6.1	<i>Zone de transport par suspension et par charriage</i> _____	62
4.6.2	<i>Épaisseur du transport par suspension</i> _____	63
4.6.3	<i>Pente de la zone de charriage et profondeur du lit sédimentaire</i> _____	63
4.6.4	<i>Épaisseur du transport par charriage</i> _____	64
4.6.5	<i>Pointe de densité maximale du profil de densité</i> _____	64

4.6.6	<i>Variation de densité dans l'axe Z</i>	64
4.6.7	<i>Point maximum</i>	65
4.6.8	<i>Point sommital et zone sommitale</i>	65
4.7.	AMÉLIORATION TECHNIQUE DU CANAL	66
CONCLUSION		68
RÉFÉRENCES		71
ANNEXE A – CALCUL DE LA MASSE DU CANAL		73
ANNEXE B – PHOTOGRAPHIE D'UNE RIDE EN MOUVEMENT		74
ANNEXE C - GRANULOMÉTRIE DES SÉDIMENTS		78
ANNEXE D – SPÉCIFICATIONS DU SABLE C-109 D'ACCUSAND		80
ANNEXE E - PROGRAMME DE TRAITEMENT DES IMAGES DICOM DANS MATLAB		81
	PROGRAMME MATLAB E.1 - GÉNÉRATEUR DE PROFILS COMPRESSÉS DE 512 À 256 COLONNES	81
	PROGRAMME MATLAB E.2 - TRACEUR DE SURFACE DU SÉDIMENT	82
	PROGRAMME MATLAB E.3 - EXTRACTEUR DE DENSITÉ MAXIMALE EN SURFACE DE LA RIDE	84
	PROGRAMME MATLAB E.4 - GÉNÉRATEUR DE FICHIER INDEX D'UN GROUPE D'IMAGE DICOM	86
ANNEXE F – PROTOCOLE D'INSTALLATION DU CANAL SOUS SCANOGAPHE		90
F.1.	PROCÉDURE	90
F.2.	ÉVACUATION DU FLUIDE	105

Liste des figures

FIG. 1.1 – SCANOGRAPHE AVEC SOURCE ET DÉTECTEURS ROTATIFS. _____	4
FIG. 1.2 – DIFFUSION DE L'ÉLECTRON DANS L'EFFET COMPTON. SOURCE : MOORE 2004 _	6
FIG. 1.3 – IMAGE D'UNE MATRICE DE RIDE DANS LE TABLEUR MICROSOFT EXCEL. _____	8
FIG. 1.4 – IMAGE SCANOGRAPHIQUE BIDIMENSIONNELLE DE LA SECTION INFÉRIEURE. ____	9
FIG. 1.5 – IMAGE SCANOGRAPHIQUE TRIDIMENSIONNELLE DE LA SECTION DU CANAL. ___	10
FIG. 1.6 - IMAGE SCANOGRAPHIQUE DU CANAL : IMAGE ORIGINALE EN 256 COULEURS. 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. _____	11
FIG. 1.7 - IMAGE SCANOGRAPHIQUE. LES ARTÉFACTS CIRCULAIRES SONT VISIBLES MÊME EN L'ABSENCE DE MATIÈRE DANS LE SCANOGRAPHE. _____	12
FIG. 1.8 - CAPTEUR DOPPLER DE LA PARTIE ASCENSIONNELLE DU CANAL. _____	14
FIG. 1.9 – CAPTEUR DOPPLER ET TRAJECTOIRE DE L'ONDE SONIQUE (CONTROLOTRON 2006). _____	14
FIG. 1.10 – ASSEMBLAGE DU CAPTEUR DOPPLER DE LA PARTIE ASCENSIONNELLE DU CANAL (CONTROLOTRON 2006). _____	16
FIG. 1.11 - SCHÉMA DU CANAL EN BOUCLE VERTICALE. _____	17
FIG. 1.12 - VUE DE CÔTÉ DE LA SECTION DU BAS DU CANAL. _____	18
FIG. 1.13 - LABORATOIRE DE SCANOGRAPHIE : 1. SUPPORT DE LA TABLE D'EXAMEN ; 2. COMMANDE DU PONT ROULANT ; 3. STATIF COULISSANT DU SCANOGRAPHE. _____	19
FIG. 1.14 - 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 SÉDIMENT. _	20
FIG. 1.15 - 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 DU SÉDIMENT. _____	21
FIG. 2.1 - PARAMÈTRES D'UNE RIDE D'APRÈS REINECK ET SINGH (1975). _____	22

FIG. 2.2 - DÉFINITION DES DIFFÉRENTES STRUCTURES D'UNE RIDE. _____	23
FIG. 2.3 – EMPLACEMENT DU POINT MAXIMUM. _____	23
FIG. 3.1 - PHOTOGRAPHIE #1 UTILISÉE DANS LE CALCUL DE LA VITESSE DE DÉPLACEMENT DU SYSTÈME DE RIDE. PHOTO MONTRANT LA POSITION DE LA RIDE AU TEMPS T_0 (LIGNE VERTICALE). _____	24
FIG. 3.2 - PHOTOGRAPHIE #21 UTILISÉE DANS LE CALCUL DE LA VITESSE DE DÉPLACEMENT DU SYSTÈME DE RIDE. LA PHOTOGRAPHIE A ÉTÉ PRISE 10 MINUTES APRÈS LE DÉBUT DE L'EXPÉRIENCE. _____	25
FIG. 3.3 - PHOTO D'UNE RIDE PRISE 24 HEURES APRÈS LA VIDANGE DU CANAL SUPERPOSÉE À L'IMAGE SCANOGRAPHIQUE D'UNE RIDE L'IMAGE SCANOGRAPHIQUE EST EN UNITÉ PIXELS. _____	26
FIG. 3.4 - IMAGE SCANOGRAPHIQUE ENTIÈRE D'UNE COUPE : 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 AU SÉDIMENT (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). _____	27
FIG. 3.5 – PROFIL DE DENSITÉ DU CANAL : LA SECTION EN A DÉFINI LA TRAPPE D'ACCÈS DU CANAL COMPOSÉ D'ACRYLIQUE. 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. _____	28
FIG. 3.6 – 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 SÉDIMENT DANS LE FLUIDE. LE POINT C INDIQUE LE POINT DE DENSITÉ MAXIMALE DU PROFIL. _____	29
FIG. 3.7 – 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. _____	29
FIG. 3.8 – 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. _____	30
FIG. 3.9 – 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. _____	30
FIG. 3.10 – POURCENTAGE DE SÉDIMENTS DANS UNE RIDE. LA COURBE EN BLEU REPRÉSENTE UN SÉDIMENT SEC, SANS EAU, DANS LE CANAL ET LA COURBE EN ROUGE REPRÉSENTE LE SÉDIMENT IMMERGÉ DANS LA COLONNE DU FLUIDE. _____	32
FIG. 3.11 – POURCENTAGE DE SÉDIMENTS DANS UNE RIDE. LA COURBE EN ROUGE REPRÉSENTE LE SÉDIMENT IMMERGÉ DANS LA COLONNE DU FLUIDE ET LA COURBE EN VERT REPRÉSENTE LE SÉDIMENT IMMERGÉ DANS LA COLONNE DU FLUIDE APRÈS UN DÉLAI DE 25 MINUTES. LES VARIATIONS DE DENSITÉ CORRESPONDENT À UNE MIGRATION DE L' AIR DANS LA COLONNE SÉDIMENTAIRE. _____	33
FIG. 3.12 - PROFILS DE DENSITÉ DU SÉDIMENT C-109 MESURÉS LORS DU REMPLISSAGE DU CANAL. _____	34
FIG. 3.13 – PROFILS DE DENSITÉ DE LA COUCHE DE SÉDIMENTS LORS D'UN DÉPÔT AVEC UNE MANIPULATION PAR RÂTEAU. _____	36
FIG. 3.14 – PROFILS DE DENSITÉ DE LA COUCHE DE SÉDIMENTS LORS D'UN DÉPÔT GRAVITAIRE PAR COUCHE. _____	36
FIG. 3.15 – MOUVEMENT DU FLUIDE AU ABORD DE LA RIDE POUR UN ÉCOULEMENT LAMINAIRE. (SOURCE : YALIN, 1977). _____	37
FIG. 3.16 – MOUVEMENT DU FLUIDE AU ABORD D'UNE RIDE POUR $Fr > 1$. (SOURCE : YALIN, 1977). _____	38

FIG. 3.17 – RAPPORT Λ/D EN FONCTION DE LA GROSSEUR DES GAINS DANS LE NOMBRE DE REYNOLD POUR DES MATÉRIAUX SIMILAIRES MAIS DANS DES CANAUX DIFFÉRENTS. (SOURCE : YALIN, 1977).	38
FIG. 3.18 – FORMATION ET TRANSITION ENTRE LES RIDES ET LES DUNES EN FONCTION DE LA RELATION Λ_D ET Λ_R . (SOURCE : YALIN. 1977).	40
FIG. 3.19 – DENSITÉ MAXIMALE DU SÉDIMENT À LA SURFACE DE LA RIDE.	41
FIG. 3.20 – SYSTÈME D’AXE UTILISÉ DANS L’ÉTUDE DE LA RIDE.	42
FIG. 3.21 – PROFILS DE DENSITÉ DE LA RIDE SELON L’AXE DES Z. LE DÉPLACEMENT EN Z EST DE 1,8075 MM.	43
FIG. 3.22 – IMAGES DES TROIS COUPES EN Z ÉTUDIÉES. L’ESPACE ENTRE LES COUPES EST DE 0,6025 MM.	44
FIG. 3.23 - PROFILS VERTICAUX DE DENSITÉ D’UNE RIDE, SELON LE SENS DU MOUVEMENT, DANS LA PARTIE BASSE DU FLANC D’ÉROSION. L’IMAGE REPRÉSENTE UNE PARTIE D’UNE IMAGE DE 512 X 512 PIXELS.	47
FIG. 3.24 - PROFILS VERTICAUX DE DENSITÉ D’UNE RIDE, SELON LE SENS DU MOUVEMENT, LE LONG DU FLANC D’ÉROSION. L’IMAGE EST UNE SECTION D’UNE IMAGE DE 512 X 512 PIXELS.	48
FIG. 3.25 – PROFILS DE DENSITÉ SUR LE SOMMET DE LA RIDE SABLEUSE. L’IMAGE EST UNE SECTION D’UNE IMAGE DE 512 X 512 PIXELS.	51
FIG. 3.26 - PROFILS VERTICAUX DE DENSITÉ D’UNE RIDE, SELON LE SENS DU MOUVEMENT, DU POINT BAS VERS LE BAS DU FLANC D’ÉROSION. L’IMAGE EST UNE SECTION D’UNE IMAGE DE 512 X 512 PIXELS.	52
FIG. 3.27 - PROFILS VERTICAUX DE DENSITÉ D’UNE RIDE, SELON LE SENS DU MOUVEMENT, SUR LE FLANC D’AVALANCHE. L’IMAGE EST UNE SECTION D’UNE IMAGE DE 512 X 512 PIXELS.	53
FIG. 3.28 – PROFILS DE DENSITÉ AU POINT DE NON RETOUR ET AU POINT BAS DE LA RIDE SABLEUSE. L’IMAGE EST UNE SECTION D’UNE IMAGE DE 512 X 512 PIXELS.	55
FIG. 4.1 – SCHÉMA DE LA SECTION RECTANGULAIRE INFÉRIEURE MODIFIÉE DU CANAL, ZONE DU LIT SÉDIMENTAIRE ABAISSÉE DE 30 MM.	67
FIG. B.1 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 1 DE 20.	74
FIG. B.2 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 2 DE 20.	74

FIG. B.3 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 3 DE 20.	74
FIG. B.4 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 4 DE 20.	74
FIG. B.5 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 5 DE 20.	74
FIG. B.6 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 6 DE 20.	74
FIG. B.7 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 7 DE 20.	75
FIG. B.8 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 8 DE 20.	75
FIG. B.9 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 9 DE 20.	75
FIG. B.10 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 10 DE 20.	75
FIG. B.11 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 11 DE 20.	75
FIG. B.12 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 12 DE 20.	75
FIG. B.13 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 13 DE 20.	76
FIG. B.14 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 14 DE 20.	76
FIG. B.15 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 15 DE 20.	76
FIG. B.16 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 16 DE 20.	76
FIG. B.17 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 17 DE 20.	76
FIG. B.18 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 18 DE 20.	76
FIG. B.19 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 19 DE 20.	77
FIG. B.20 – PHOTOGRAPHIE NUMÉRO 20 DE 20.	77
FIG. C.1 - COURBE GRANULOMÉTRIQUE DU SABLE D’OTTAWA UTILISÉ POUR VALIDER LE CANAL ET LE SCANOGRAPHE.	78
FIG. C.2 - COURBES GRANULOMÉTRIQUES DU SABLE C-109 UTILISÉ POUR L’ÉTUDE DES RIDES SOUS LE SCANOGRAPHE.	79
FIG. D.1 – CARACTÉRISTIQUES DU SABLE C-109.	80
FIG. F.1 – ATTACHES DE FIXATION DU CANAL AU PONT ROULANT.	90
FIG. F.2 – BOULONS DU CANAL.	91
FIG. F.3 – FIXATION ET PARTIE SUPÉRIEURE DU CANAL.	91
FIG. F.4 – SUPPORT D’APPOINT ET TABLE D’EXAMEN.	92
FIG. F.5 – SUPPORT D’APPOINT ET TABLE D’EXAMEN.	93
FIG. F.6 – PARTIE INFÉRIEURE DE CANAL AVANT ASSEMBLAGE.	93
FIG. F.7 – PARTIE INFÉRIEURE DE CANAL APRÈS LA MISE EN PLACE.	94
FIG. F.8 – CAPTEUR DOPPLER MONTÉ SUR LE CANAL.	95

FIG. F.9 – TUBE VERTICAL ET MOTEUR. _____	95
FIG. F.10 – CANAL ASSEMBLÉ DANS LE SCANOGRAPHE. _____	97
FIG. F.11 – TUBE VERTICAL ET MOTEUR. _____	98
FIG. F.12 – VARIATEUR DE VITESSE RACCORDÉ MOTEUR. _____	99
FIG. F.13 – COURANTOMÈTRE CONTROLOTRON. _____	99
FIG. F.14 – FENÊTRE DE CONFIGURATION HYPERTERMINAL POUR LA COMMUNICATION AVEC LE COURANTOMÈTRE CONTROLOTRON. _____	100
FIG. F.15 – FENÊTRE DE CONFIGURATION DU MODE ASCII DANS HYPERTERMINAL POUR LA COMMUNICATION AVEC LE COURANTOMÈTRE CONTROLOTRON. _____	101
FIG. F.16 – CONDUIT DE REMPLISSAGE/LAVAGE DANS LE TUBE DE MESURE SUR LA PARTIE SUPÉRIEURE DU CANAL. _____	101
FIG. F.17 – RACCORDEMENT AU RÉSEAU DU DRAINAGE DE SURFACE. _____	102
FIG. F.18 – DISPOSITIF DE DRAINAGE DE SURFACE. _____	102
FIG. F.19 – VANNES DU DISPOSITIF DE DRAINAGE. _____	103
FIG. F.20 – TRAPPE D’ACCÈS, SÉDIMENTS ET OUTIL DE TRAVAIL. _____	104
FIG. F.21 – DISPOSITIF DE DRAINAGE DE SURFACE AVEC ÉVIER. _____	106

Liste des tableaux

TAB. 3.1 – RÉSUMÉ DES PROFILS DE LA FIGURE 3.23 _____	47
TAB. 3.2 – RÉSUMÉ DES PROFILS DE LA FIGURE 3.24. _____	48
TAB. 3.3 – RÉSUMÉ DES PROFILS DE LA FIGURE 3.25. _____	51
TAB. 3.4 – RÉSUMÉ DES PROFILS DE LA FIGURE 3.26. _____	52
TAB. 3.5 – RÉSUMÉ DES PROFILS DE LA FIGURE 3.27. _____	54
TAB. 3.6 – RÉSUMÉ DES PROFILS DE LA FIGURE 3.28. _____	55
TAB. 3.7 - CALCULS DES PENTES LINÉAIRES _____	57
TAB. 3.8 - CALCULS DES PENTES PAR LES EXTRÉMITÉS. _____	57
TAB. 3.9 – CALCULS DE L’ÉPAISSEUR DE LA COUCHE DE TRANSPORT PAR SUSPENSION. _	58
TAB. A.1 – CALCUL DE LA MASSE DU CANAL, DE L’ACRYLIQUE, DE L’EAU ET DES ACCESSOIRES. _____	73

Liste des acronymes, des symboles et des sigles

Symbole	unité	Description
a	Ø	Pente de l'interface d'un profil
α	m	rayon de l'électron
b	Ø	Point de séparation suspension charriage
c	Ø	Courbure dans un profil de la suspension
CC	A	Courant Continu
d	Ø	Début du transport par suspension
d	HU	densité relative
d_{50}	m	diamètre médian des grains
D	m	diamètre des grains
D	m	diamètre du conduit
$D_{mesuré}$	HU	densité relative mesurée
D_{air}	HU	densité relative de l'air
D_{quartz}	HU	densité relative du quartz
D_{eau}	HU	densité relative de l'eau
Δf	Hz	décalage de fréquence Doppler
e	Ø	Courbure statique/dynamique dans le profil
f	Ø	Intensité du transport par suspension
fJ	10^{-5} J	femtojoule
FOV	mm	<i>Field Of View</i>
f_T	Hz	fréquence du transmetteur
Fr	Ø	Nombre de Froude
H	m	Hauteur de la ride
HU	Ø	<i>Hounsfeild</i>
HP	HP	<i>Horse Power</i>
h_{sed}	mm	épaisseur de sédiments sur le lit
I	$W m^{-2}$	intensité
I_0	$W m^{-2}$	intensité initiale
K	Ø	constante fonction des unités

Symbole	unité	Description
KeV	Ø	Kilo électronVolt (énergie de radiation)
L	m	longueur de la ride
Λ	m	longueur de la ride
Λ_r	m	longueur de la ride
Λ_d	m	longueur de la dune
mA	Ø	milliampère
μ	cm ⁻¹	Coefficient d'absorption linéaire
μ_i	cm ⁻¹	Coefficient d'absorption linéaire initial
ppm	Ø	partie par million
ρ	g cm ⁻³	Masse volumique
θ_T	degré	angle du faisceau du transmetteur
θ	degré	angle de f_T entrant dans le liquide
θ	degré	angle du flanc de progradation de la ride
r_0^2	m	rayon classique de l'électron
σ_c	m ²	section efficace
US	Ø	<i>United States</i>
V_F	m s ⁻¹	vitesse du fluide
V_M	m s ⁻¹	vitesse moyenne du fluide mesurée dans la section cylindrique
V_R	m s ⁻¹	vitesse moyenne réelle du fluide dans la section rectangulaire
V_S	m s ⁻¹	vitesse sonique du fluide
V_T	m s ⁻¹	vitesse sonique dans le matériel
x	m	distance parcourue par le rayon X
x_i	m	distance indicelle parcourue par le rayon X
Z	Ø	profondeur sans dimension
Ω	strad	angle solide du photon diffusé

INTRODUCTION

L'étude du transport sédimentaire couvre un vaste champ de spécialités. La sismique marine, le laser aéroporté, le LiDAR, et le traceur radioactif représentent une diversité de mesures qui déterminent le type d'analyse et la nature des résultats obtenus.

Les méthodes existantes en laboratoire, visuelles et laser, sont des mesures intégratives à travers l'ensemble qui ne permettent qu'une mesure sur la colonne ou sur épaisseur de 1 cm. Cela ne permet pas l'appréciation de la couche limite et le passage entre la couche en suspension et la couche de charriage, qui sont de l'ordre de 3 à 10 mm. En plus, elles ne permettent pas d'étudier l'intérieur de la couche mobile de charriage. La technique qui suit a pour but la mesure densimétrique, dans la colonne de fluide sur toute l'épaisseur, de la couche sédimentaire.

Le laboratoire de scanographie de l'INRS-ETE, jumelé à un laboratoire multiservice, permet la réalisation des granulométries, de l'assemblage mécanique et de l'entretien et de la réparation des équipements électroniques. Le laboratoire d'usage non médical est équipé d'un scanographe à statif coulissant et est sollicité en ingénierie civile et en sédimentologie. Le scanographe fournit une image pseudo-instantannée en trois dimensions de la ride sableuse en déplacement. L'image présente la densité des rides sableuses dans leur environnement dynamique.

L'objectif de ce travail consiste à mettre au point le système hydraulique et d'obtenir des mesures afin d'analyser l'évolution de la densité des sédiments se déplaçant sous forme de rides sous un courant stationnaire. L'environnement sédimentaire est à l'intérieur d'un canal hydraulique en boucle verticale, installé à l'intérieur de l'anneau du scanographe. Il est ainsi possible d'observer le transport de particules et de caractériser les différents coefficients des équations de transport dont les valeurs ont été estimées à des valeurs fixes. L'atteinte des objectifs nécessite la maîtrise du fonctionnement du scanographe et

des logiciels de traitement de données, la réalisation et la mise au point d'un canal hydraulique fermé permettant l'observation des rides de sable par le scanographe et la mise en place d'un protocole d'expérimentation sécuritaire pour le personnel et l'équipement. Le sédiment utilisé pour l'expérimentation est un quartz commercial C-109 dont le diamètre médian d_{50} est de $370\mu\text{m}$.

Enfin, il est important de souligner que des travaux ultérieurs devraient préciser les différentes phases du transport sédimentaire afin de répondre aux questions laissées en suspend.

CHAPITRE 1 – MATÉRIEL ET MÉTHODE

Le présent chapitre introduit et explique le matériel utilisé ainsi que les méthodes de mesure et de traitement des résultats. Le scanographe à rayon X est utilisé pour la mesure des rides sableuses dans le canal en boucle verticale

1.1. Rayon X

Le concept de scanographie repose sur 3 éléments : une source de rayon X, un objet au travers duquel les rayons X voyagent et une série de détecteurs qui mesurent l'atténuation du signal. La scanographie de 3^{ème} génération utilise une série de détecteurs en rotation autour de l'objet comparativement à la radiographie conventionnelle, qui utilise une source et un détecteur fixe.

Les données scanographiques sont utilisées pour créer une image 2D, nommée coupe (*slice*). Plusieurs coupes sont regroupées pour former une image en 3D.

La source de rayon X (fig. 1.1) du scanographe possède un spectre d'énergie permettant une pénétration contrôlée dans le matériel. Une onde hautement énergétique pénétrera les matériaux denses, mais la sensibilité aux variations subtiles de densité et de composition sera moins bonne. L'intensité du rayon X influence le rapport signal à bruit nuisant à la clarté de l'image.

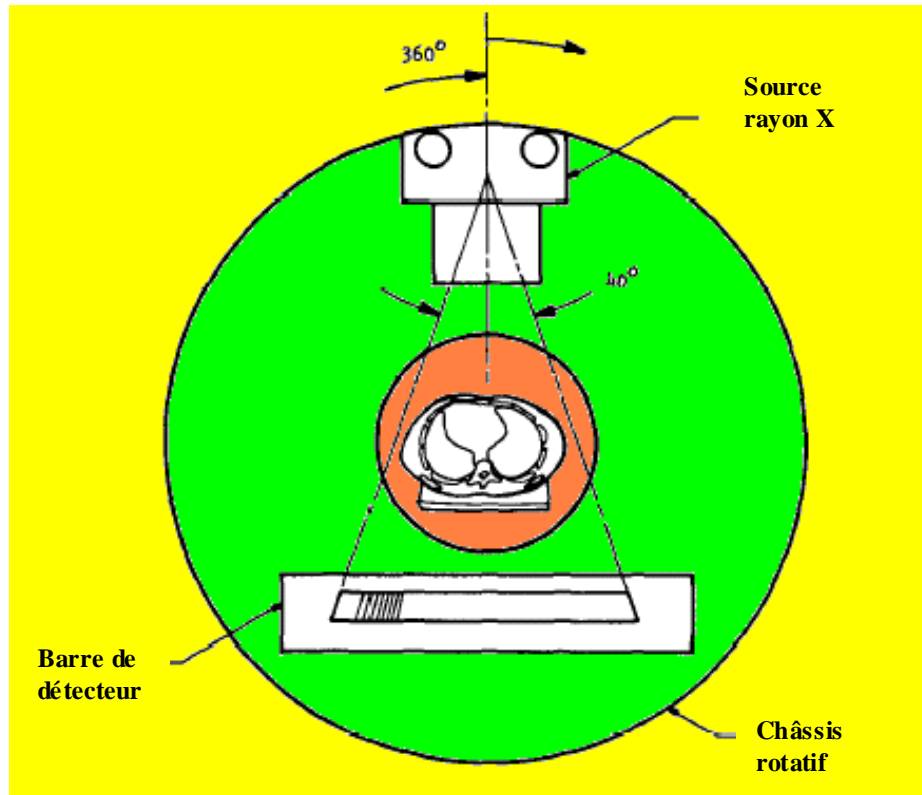


Fig. 1.1 – Scanographe avec source et détecteurs rotatifs.

1.2. Principe du rayon X

L'intensité énergétique crête est exprimé et mesuré en kilo électron Volt (keV). La conversion en SI est obtenue par $1\text{fJ} (=10^{-15} \text{ J}) = 6,241 \times 10^3 \text{ eV}$. Par contre, l'unité traditionnel keV est conservé afin de respecter les équations citées.

Le rayon X qui passe au travers d'un objet est atténué par l'absorption ou par la diffraction (*scattering*) du rayon. La loi de Beer donne l'atténuation d'un rayon à spectre simple dans un matériel homogène :

$$I = I_0 \exp[-\mu x] \quad (1.1)$$

où I_0 est l'intensité initiale du rayon X, μ 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 l'équation 1.1 devient

$$I = I_0 \exp\left[\sum -\mu_i x_i\right] \quad (1.2)$$

où la variable i représente les différents matériaux qui composent l'objet.
La majorité des algorithmes de reconstruction utilise l'équation (1.2).

1.3. Géométrie du système

Selon Moore (2004), l'atténuation photoélectrique, l'effet Compton et la production de paires sont les principaux phénomènes physiques qui entraînent l'atténuation.

L'absorption photoélectrique survient lorsqu'un électron est éjecté à la suite d'un transfert énergétique entre le photon et l'électron. L'effet Compton (fig. 1.2) est dû à la déviation du photon suite au transfert d'une partie de son énergie à un électron éjecté de l'objet. Il se produit lorsque la longueur d'onde de la lumière est de l'ordre de l'espace entre les électrons et que les électrons sont libres ou faiblement liés. Le photon qui frappe l'électron absorbe une partie de l'énergie sous forme cinétique et réémet un photon de fréquence plus faible dans une direction θ . La section efficace différentielle d'absorption Compton à un angle θ est donnée par la formule de Klein-Nishina (Knoll 1989):

$$\frac{\partial \sigma_c}{\partial \Omega} = r_0^2 \left[\frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \right]^3 \left[1 + \frac{\alpha^2 (1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta) [1 + \alpha(1 - \cos \theta)]} \right] \quad (1.3)$$

En intégrant sur l'angle solide $d\Omega$ (fig. 1.2) qui est égale à $2\pi \sin \theta d\theta$ (Krane, 1988) :

$$\sigma_c = \frac{\pi r_0^2}{\alpha} \left\{ \left[1 - \frac{2(\alpha + 1)}{\alpha^2} \right] \ln(2\alpha + 1) + \frac{1}{2} + \frac{4}{\alpha} - \left(\frac{1}{2(2\alpha + 1)^2} \right) \right\} \quad (1.4)$$

La section efficace d'absorption par effet Compton est indépendante du numéro atomique. Cette équation dépend de l'énergie du photon et de l'angle de diffusion du photon.

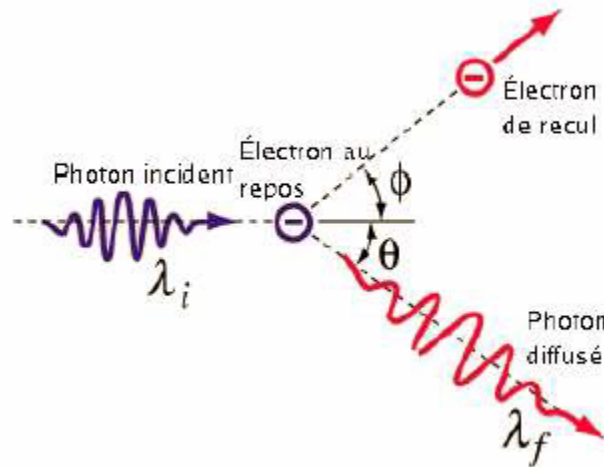


Fig. 1.2 – Diffusion de l'électron dans l'effet Compton. Source : Moore 2004

Dans la production de paires, le photon interagit avec un nucléide et il se transforme en une paire positron-électron.

1.4. Caractéristiques du scanographe

Le scanographe, un Somatom Volume Access de 3^{ème} génération, est fabriqué par Siemens. La taille de l'ouverture du statif est de 800 mm et la taille de l'image digitalisée est entre 50 et 500 mm. Les densités relatives mesurées sont en unités Hounsfield (HU). La plage standard de densité est de -1024 à 3071 HU et la plage étendue de -10240 à 30710 HU. La plage étendue permet un spectre de densité dix fois supérieure, mais la résolution en est réduite d'autant. En général, dans la plage standard, l'air et l'eau présentent respectivement une valeur de -1000 HU et 0 HU (Kak et Slaney, 1999). Le traitement logiciel de Siemens est « *spine spi* ». Il est utilisé en raison des sédiments qui possèdent une densité proche l'ossature de la colonne vertébrale se situant entre 1477 et 1609 HU (Schneider *et al.*, 1996).

1.5. Analyse d'images en milieu sédimentaire

Dans le sédiment, l'effet photoélectrique est dominant pour une énergie de rayon X entre 50 et 100 keV. L'effet Compton devient dominant entre 5 et 10 MeV. Par la suite, la production de paire domine. Le scanographe utilisé pour cette maîtrise est ajusté à 140

keV pour maximiser la pénétration sur un volume important. L'atténuation photoélectrique est dominante.

À partir du coefficient d'atténuation mesuré par le scanographe, l'algorithme de reconstruction transfère le résultat de densité relative en HU. Par convention, le scanographe médical donne les informations en HU. L'air est de -1000 HU et l'eau de 0 HU. Le scanographe industriel est calibré avec l'air à 0, l'eau à 1000 et l'aluminium à 2700. 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 influence le numéro atomique (Moore, 2004). Avec le scanographe utilisé, le facteur *rescalintercept* (-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. La densité de l'eau est donc de $1,024 \text{ g cm}^{-3}$ et l'air est presque nulle.

La valeur réelle de densité est obtenue à partir de la valeur en HU. La valeur pratique est obtenue par mesure au scanographe et correspond la moyenne net additionnée à l'effet de volume partiel et à l'atténuation photoélectrique. L'énergie de 140 keV utilisée entraîne majoritairement une erreur sur l'ensemble du profil liée à l'atténuation photoélectrique.

De plus, Moore (2004) indique pour un sable de la Formation d'Ottawa, une densité en HU moyen du quartz de 723,8 HU ($1,74 \text{ g cm}^{-3}$) avec un écart type de 54,4. La densité matériel et 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 (HU) est près de la densité (g cm^{-3}) et une correction supplémentaire doit être apportée en utilisant les densités connues des matériaux.

1.6. Environnement logiciel

Les logiciels utilisés pour la visualisation des images scanographiques et des profils de densité qui en résultent sont Osiris (Ligier (2004)) et Microsoft Excel. Le logiciel d'opération du scanographe de Siemens est aussi utilisé pour les rotations des matrices

d'images 3D. Enfin, les filtrations et les traitements d'images sont réalisés avec Matlab et le « *imaging toolbox* ».

Un fichier Microsoft Excel est un tableau de 256 colonnes par 65536 lignes (fig. 1.3). Pour utiliser le fichier Excel, la matrice DICOM est réduite et filtrée pour atténuer le bruit et, par la suite, un profil sur deux est transféré à la matrice de traitement Excel. Il y a un profil tous les 0,7812 mm pour un total de 254 profils sur une distance de 198,4 mm. Le calcul des moyennes sur les profils des extrémités n'est pas réalisé car ces profils peuvent être influencés par l'effet des parois du canal.

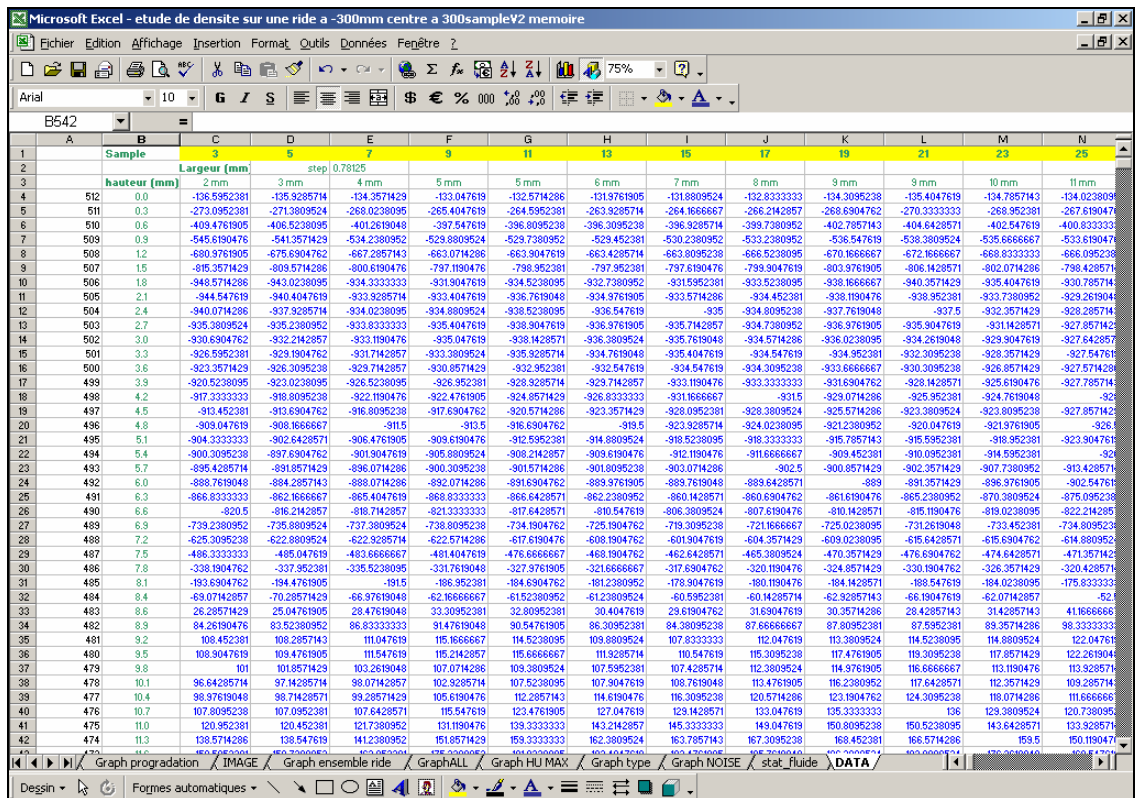


Fig. 1.3 – Image d'une matrice de ride dans le tableur Microsoft Excel.

1.7. Format d'image rayon X

Le format d'une image est défini par le standard DICOM. Une image est composée de 512 X 512 pixels. À chaque pixel est attribué une valeur de densité relative brute. La plage de valeurs est de 0 à 4096. Pour obtenir la valeur en HU, le paramètre

RescaleIntercept est additionné à la matrice. Le *Somatom Volume Access* fonctionne en MONOCHROME1. Sur une image, les densités faibles sont noires et les densités hautes sont claires.

L'image scanographique obtenue est composée par une matrice de 512 X 512 valeurs de densité relative et la dimension physique est fonction de la taille du champ de vision, FOV (*Field Of View*). Le FOV est ajusté entre 50 mm X 50 mm et 500 mm X 500 mm. Une image scanographique bidimensionnelle de la section inférieure du canal, incluant la trappe d'accès aux sédiments et la table d'examen utilise un FOV de 538,5 mm X 538,5 mm (fig. 1.4). Le FOV utilisé dans la présente étude est de 308,5 mm X 308,5 mm et l'image tridimensionnelle est composée de 200 coupes.



Fig. 1.4 – Image scanographique bidimensionnelle de la section inférieure.

Une image tridimensionnelle composée de 300 coupes bidimensionnelle (*slice*) de 1 mm d'épaisseur (fig. 1.5) représente un volume mesuré de 308,5 mm X 308,5 mm X 300 mm. Le nombre maximal de coupes est limité par la durée d'exposition au rayon X, qui est de 99 secondes à une amplitude de 140 keV. Le temps nécessaire à l'obtention du volume

est fonction de l'intensité du courant (mA) et de l'énergie (keV) à la lampe. Ces paramètres sont déterminants dans l'échauffement du scanographe et dans la dose de rayon X transmise à l'objet.

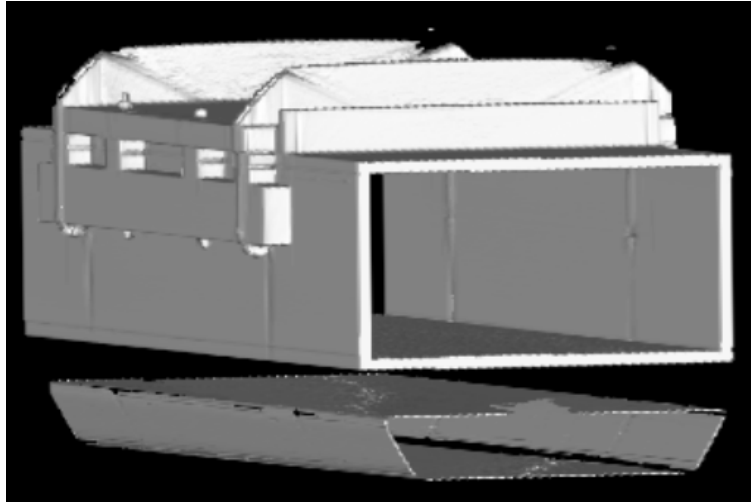


Fig. 1.5 – Image scanographique tridimensionnelle de la section du canal.

1.8. Imagerie et artéfacts

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

La présence d'un objet carré ou de forte densité (fig. 1.6) entraîne l'apparition d'artéfacts dans l'image scanographique.

L'observation des profils obtenus directement du fichier DICOM 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 emprisonné dans le sédiment. 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.

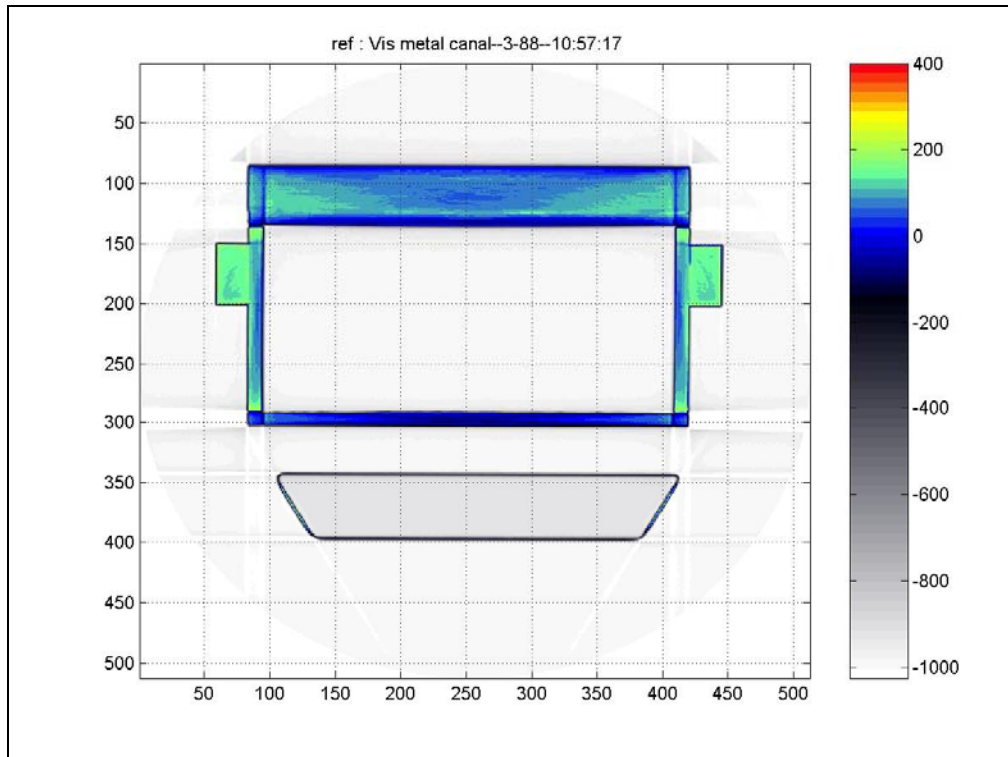


Fig. 1.6 - Image scanographique du canal : Image originale en 256 couleurs. Effet du durcissement de faisceau et effet Compton. L'image montre, dans le haut, l'attache de la trappe, dans les côtés les ancrages et en bas la table d'examen.

Dans un volume qui contient plusieurs substances ayant des propriétés différentes, 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 le sédiment, le sédiment 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 et le type de transport sédimentaire.

1.8.1. L'effet de volume partiel

L'effet le plus important à l'interface eau-sédiment est l'effet de volume partiel (*Partial-Volume effects*). 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 des substances. Ceci explique l'absence de coupure nette dans les profils de densité.

1.8.2. Le 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 (fig. 1.6). Afin de minimiser le durcissement de faisceau, le volume réalisé est examiné avec une rotation de 90 degrés dans le plan horizontal. Cette rotation est utilisée pour l'analyse des rides sableuses.

1.8.3. Les artéfacts circulaires

Les artéfacts circulaires (*Ring artefacts*) (fig. 1.7) sont causés par la dilatation thermique ou un défaut de la barre de capteur.

Lors de la reconstruction, un chevauchement est nécessaire pour combler l'espace entre les capteurs. La dilatation thermique des capteurs les rapproche et le chevauchement du logiciel est exagéré. L'image présente des cercles concentriques plus denses centrés sur l'axe de rotation du scanographe. Un réétalonnage fréquent du scanographe réduit les artéfacts circulaires.

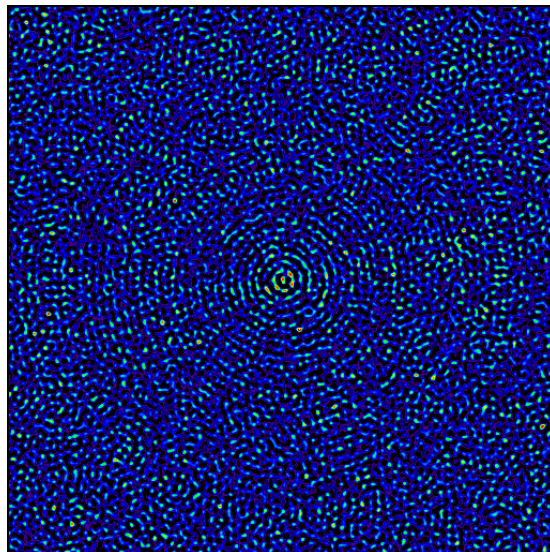


Fig. 1.7 - Image scanographique. Les artéfacts circulaires sont visibles même en l'absence de matière dans le scanographe.

1.9. Le canal hydraulique en boucle verticale

Le canal utilisé est conçu pour fournir un écoulement laminaire exempt de turbulences pour des courants inférieurs à 30 cm s^{-1} . Les résultats sont obtenus par mesure visuelle avec des particules en suspension et l'injection de colorant alimentaire rouge. Pour un courant supérieur à 30 cm s^{-1} , l'écoulement devient turbulent. Pour cette raison, dans cette étude, la vitesse du courant est limitée à 30 cm s^{-1} car, pour des vitesses supérieures, les vortex présents aux parois influencent l'écoulement jusqu'au centre du canal. Les mesures sont réalisées dans de l'eau à 20 °C avec une variation de $0,4 \text{ °C}$ en cours d'expérience.

1.9.1 Conception

Le concept de base du canal 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. Le canal, le premier à être couplé à un scanographe, est adapté pour le scanographe par la réduction de la présence de métal réduisant au minimum l'effet des artéfacts. La vitesse du courant est mesurée et enregistrée par un courantomètre *Controlotron System 1010N* couplé un capteur à effet Doppler (fig. 1.8).

Le principe de mesure du capteur repose sur l'utilisation de l'effet Doppler. Une particule se déplaçant avec le fluide et recevant un train d'onde ultrasonique de fréquence connue envoie sur le récepteur un écho à une fréquence décalée par l'effet Doppler (fig. 1.9).



Fig. 1.8 - Capteur Doppler de la partie ascensionnelle du canal.

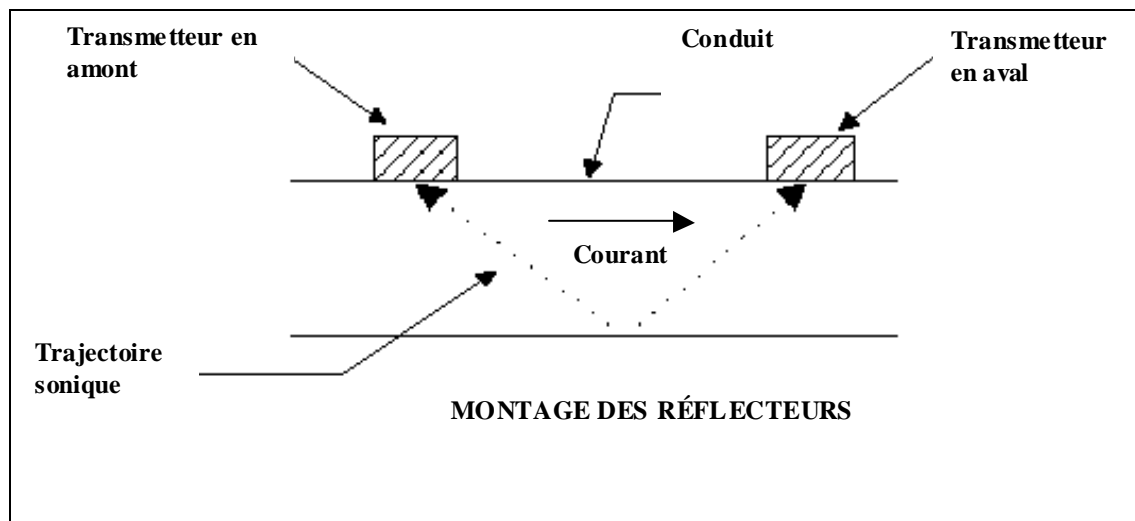


Fig. 1.9 – Capteur Doppler et trajectoire de l'onde sonore (Controlotron 2006).

Cette mesure correspond à la mesure de la vitesse de la particule dans le fluide. Cette vitesse est assimilée à la vitesse du fluide. Elle est valable si le fluide contient au moins

30 ppm de particules ou de bulles d'air. Or, le mélange fluide altère la mesure dans le conduit tel que décrit par l'équation de base :

$$\Delta f = 2f_T \sin \theta \bullet \frac{V_F}{V_S} \quad (1.5)$$

ou en utilisant la Loi de Snell

$$\sin \frac{\theta_T}{V_T} = \sin \frac{\theta}{V_S} \quad (1.6)$$

par la combinaison des équations (1.5) et (1.6), l'équation obtenue est :

$$V_F = \frac{\Delta f}{f_T} \bullet \frac{V_T}{\sin \theta_T} = K\Delta f \quad (1.7)$$

où V_T est la vitesse sonique dans le matériel, θ_T est l'angle du faisceau du transmetteur, K est une constante fonction des unités, V_F est la vitesse du fluide, Δf est le décalage de fréquence Doppler, V_S est la vitesse sonique du fluide, f_T est la fréquence du transmetteur et θ est l'angle de f_T entrant dans le liquide.

L'équation (1.7) indique que la vitesse du fluide est une fonction linéaire du décalage de la fréquence Doppler. Connaissant le diamètre du conduit D , il est possible de déterminer le volume en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (Flood, J. 1997), comme suit. :

$$K \bullet V_F \bullet D^2 \quad (1.8)$$

À l'assemblage des capteurs, la distance entre le transmetteur et le récepteur doit être déterminée initialement et devient constante. L'index d'installation doit être respecté en cours d'assemblages (fig. 1.10).

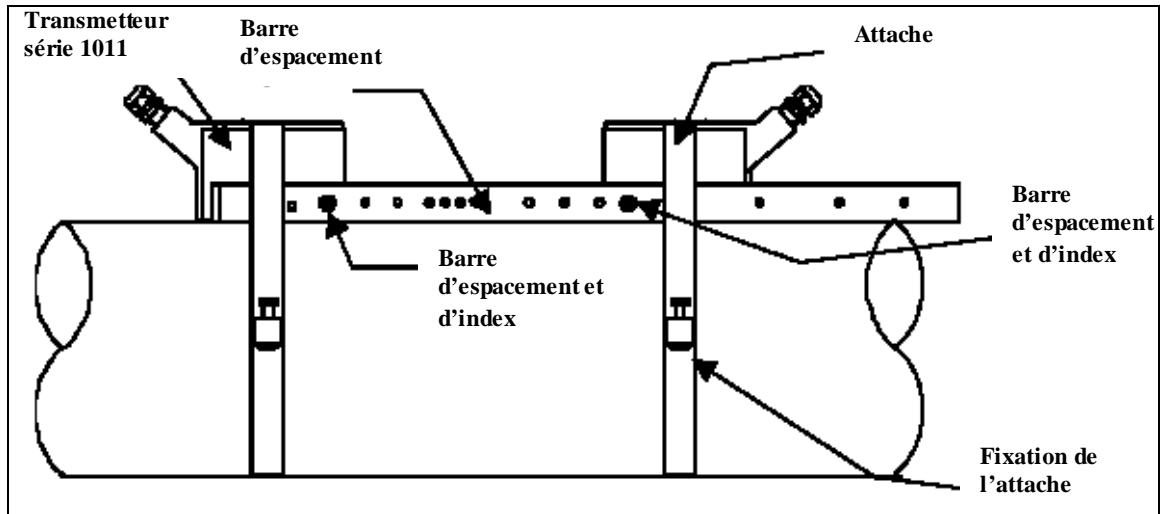


Fig. 1.10 – Assemblage du capteur Doppler de la partie ascensionnelle du canal (Controlotron 2006).

Le canal (fig. 1.11) est composé de deux sections rectangulaires. La section du bas est utilisée pour la mise en place du sédiment 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. Le volume du canal est de 352 litres et la surface sédimentaire est de $0,92 \text{ m}^2$. Le courant est généré par deux hélices à 3 pales montées sur un arbre de 25,4 mm de diamètre qui sont attachées à un moteur CC à aimant permanent de 1 HP, alimenté par un variateur de vitesse à courant continu KBWD-240 de *Penta Powers*. Le courantomètre *Controlotron* est programmé pour mesurer le courant dans un conduit d'acrylique de 242,25 mm de diamètre ayant une épaisseur de 12,75 mm. Le fluide programmé dans le courantomètre est de l'eau potable ayant des particules solides en suspension. L'afficheur et le graphique intégrés au courantomètre ont une résolution de $0,01 \text{ m s}^{-1}$. Les données brutes sont transmises à un ordinateur portable par communication RS-232. La résolution des données brutes est de $0,001 \text{ m s}^{-1}$.

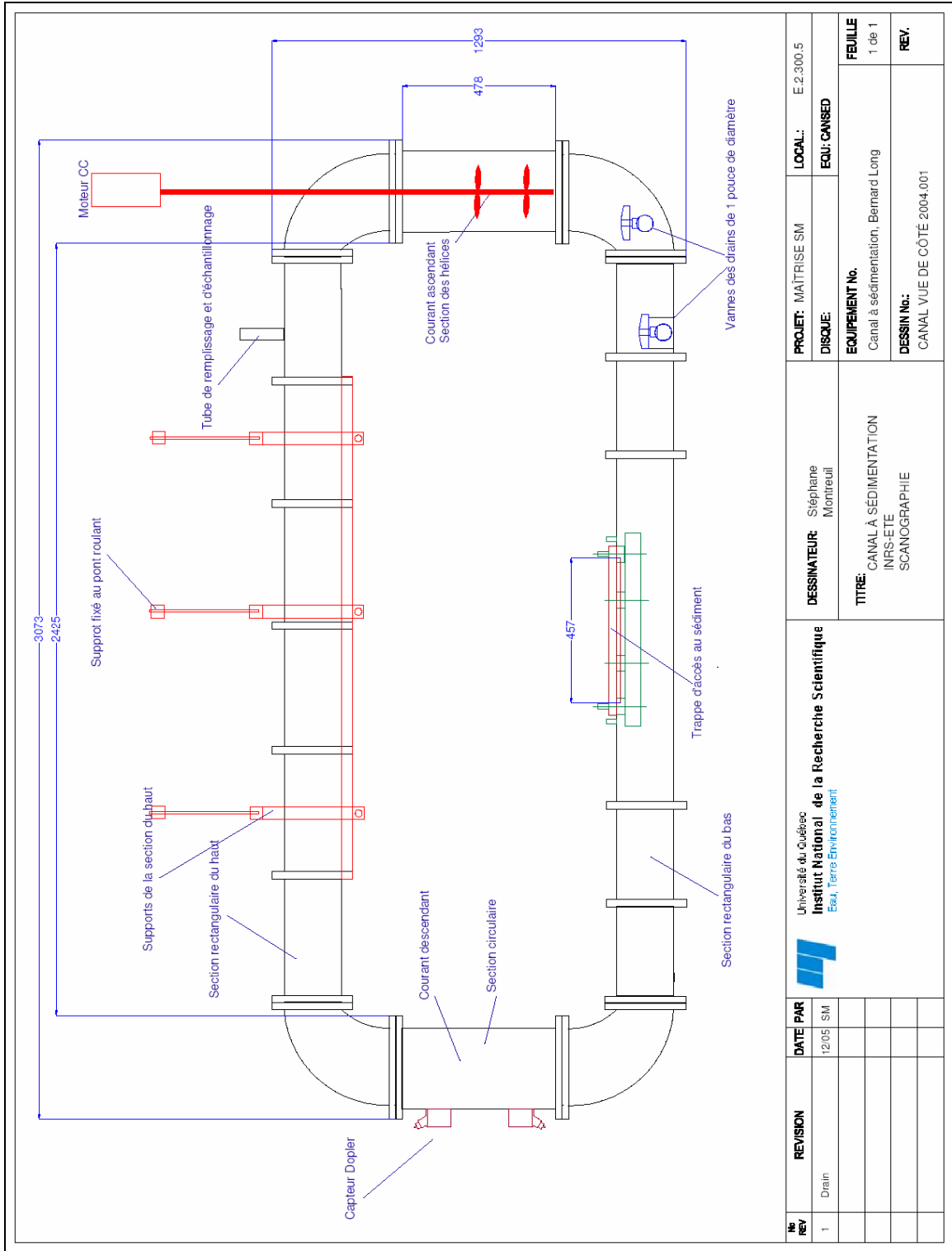


Fig. 1.11 - Schéma du canal en boucle verticale.

No REV	REVISION	DATE PAR	UNIVERSITÉ DU QUÉBEC INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE EAU, TERRE ENVIRONNEMENT	DESSINATEUR:	PROJET:	LOCAL:	FEUILLE
1	Drain	12/05 SM	Stéphane Montreuil TITRE: CANAL À SEDIMENTATION INFR-ÉTE SCANOGRAPHIE	MAÎTRISE SM DISQUE: EQUIPEMENT No. Canal à sédimentation, Bernard Long	E.2.300.5 EQU: CANSED	1 de 1 REV.	
							DESSIN No.: CANAL VUE DE CÔTÉ 2004.001

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 en fonction de la section du canal et de l'épaisseur moyenne du sédiment. L'épaisseur moyenne du sédiment est obtenue par intégration du sédiment sous l'interface sédiment-eau.

$$V_R = V_M \times \frac{70.882}{12 \left(6 - \frac{h_{\text{sed}}}{2.54} \right)} \quad (1.9)$$

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.

La variation de vitesse est ajustée pour un courant hydraulique maximal de 1 m s^{-1} . Le variateur est aussi ajusté afin de fournir un courant électrique inférieur à 2 A, courant nominal du moteur.



Fig. 1.12 - Vue de côté de la section du bas du canal.

1.9.2 Calcul de la masse du canal

La masse du canal incluant l'eau, le canal et les accessoires est de 513,76 kg (annexe A). La masse est calculée afin de vérifier l'impact sur les supports et la structure. L'ajout d'un support auxiliaire est nécessaire pour maintenir l'intégrité de la table d'examen (Fig. 1.13).

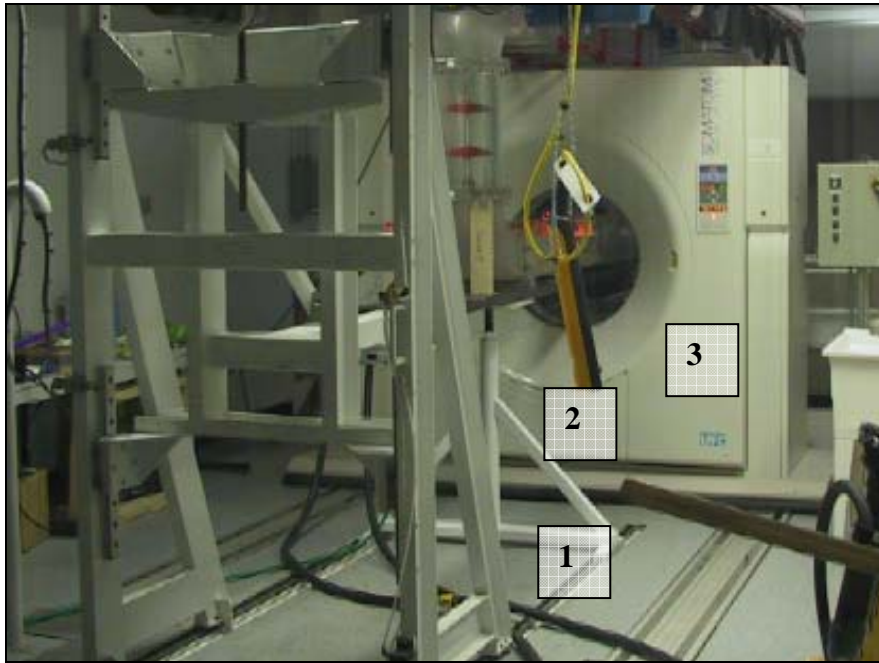


Fig. 1.13 - Laboratoire de scanographie : 1. support de la table d'examen ; 2. Commande du pont roulant ; 3. Statif coulissant du scanographe.

Le canal est rempli par un tube de remplissage et d'échantillonnage sur le dessus du canal. Le sédiment (fig. 1.14) est inséré et retiré par la trappe d'accès, puis conservé pour l'analyse des dépôts sédimentaires après le retrait du fluide.

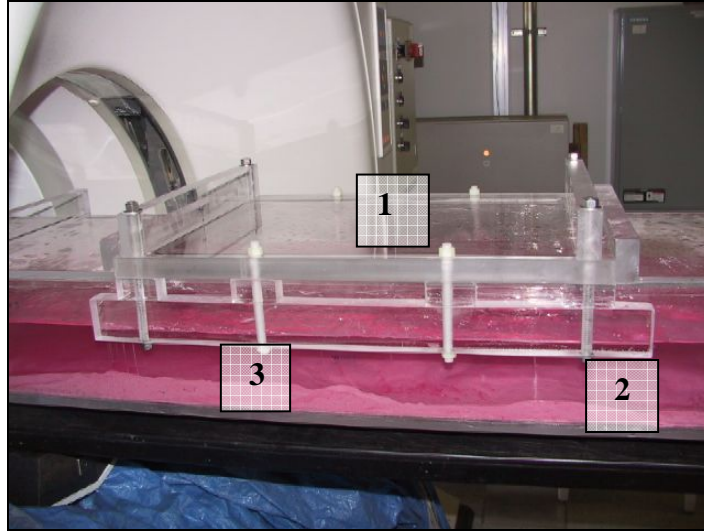


Fig. 1.14 - Canal en boucle verticale : (1) trappe d'accès aux sédiments de 457 mm X 380 mm; (2) dispositifs de retenu en nylon; (3) couche de sédiment.

La vidange du fluide se fait par les deux vannes (fig. 1.15). 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 du sédiment. Lors de l'expérimentation avec le canal, un support supplémentaire (fig. 1.13) est ajouté pour réduire les déformations sur le canal. Ce support est ajustable et il 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.

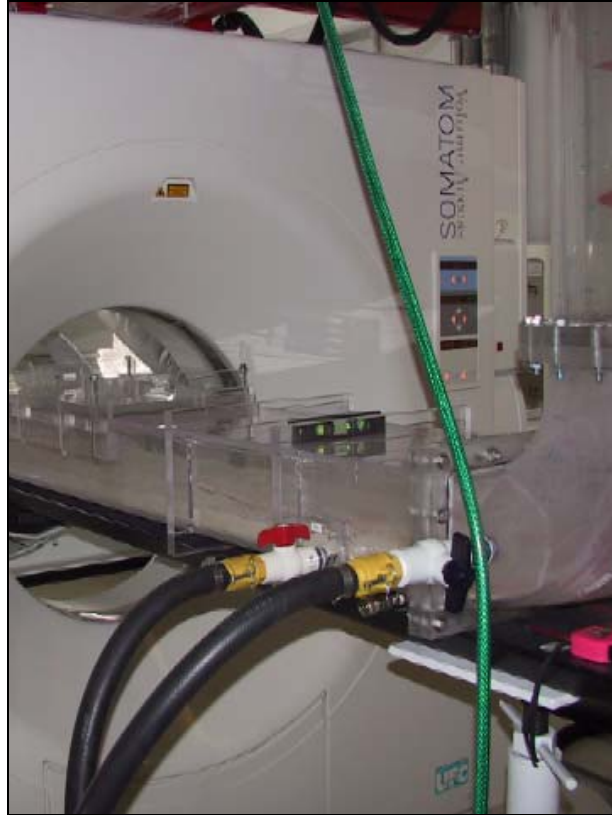


Fig. 1.15 - Canal en boucle verticale : dispositifs de drainage à deux niveaux et statif coulissant. Vanne à poignée noire de 2,5 cm de diamètre utilisée pour la vidange du fluide et vanne à poignée rouge utilisée pour l'évacuation des fluides et d'une partie du sédiment.

CHAPITRE 2 : CARACTÉRISTIQUES SÉDIMENTOLOGIQUES

Le travail est basé sur la description d'une ride sédimentaire type tel que définies par Reineck et Singh (1975).

Reineck et Singh (1975) décrivent une ride comme étant une combinaison complexe limitée par des points représentatifs. La ride est ainsi divisée en section (fig. 2.1) : la longueur de la ride L , la hauteur de la ride H . Le point sommital (*summitpoint*) est le point le plus élevé de la ride. Le point de non retour (*toe point*) correspond à la limite entre le flanc d'avalanche (*slipface*) et la zone de dépôt due aux turbulences à la base de la ride. Le point de rupture (*brinkpoint*) est le point limite entre l'entraînement par charriage et le début du mouvement gravitaire, il sépare le flanc de progradation (*leeside*) du flanc d'érosion (*stoss-side*) de la ride. Le point bas (*troughpoint*) est le point le plus bas de la ride. Le flanc de progradation est la surface inclinée entre le point de rupture et le point bas. Il représente le front de la ride. Le flanc d'érosion délimite le point bas de la ride précédente et le point de rupture. Il représente le dos de la ride.

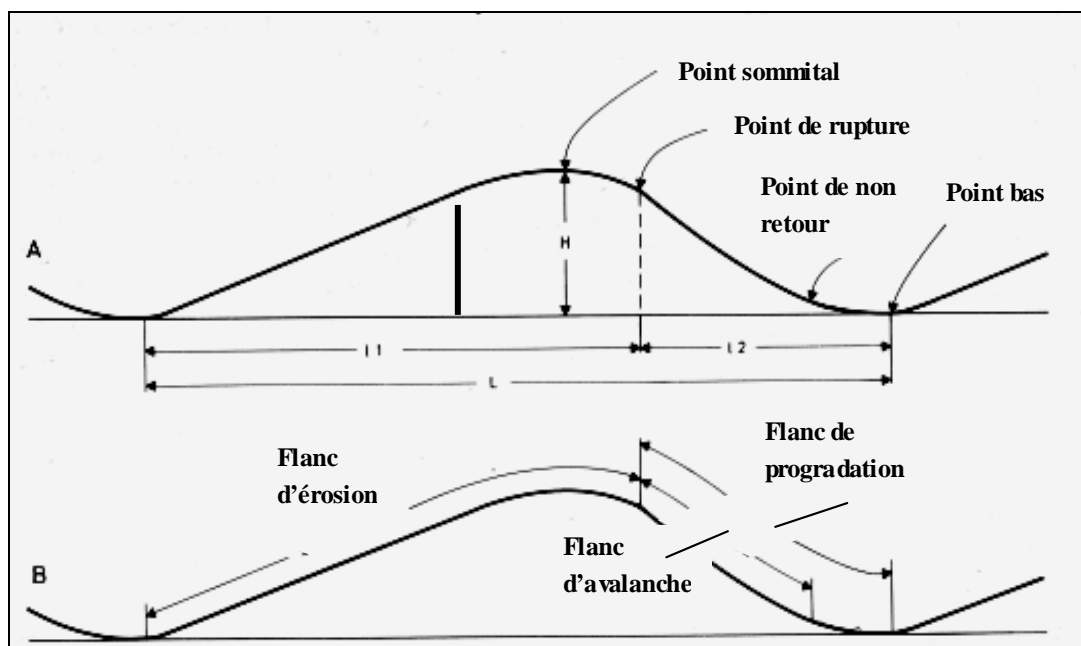


Fig. 2.1 - Paramètres d'une ride d'après Reineck et Singh (1975).

La surface de glissement est située entre le point de rupture et le point de non retour. La structure interne de la ride (fig. 2.2) est constituée de lamines de progradation et est définie comme les lamines de transport (*stoss-side laminae*), les lamines basales (*bottom set laminae*) et les écailles de progradation (*fore set laminae*).

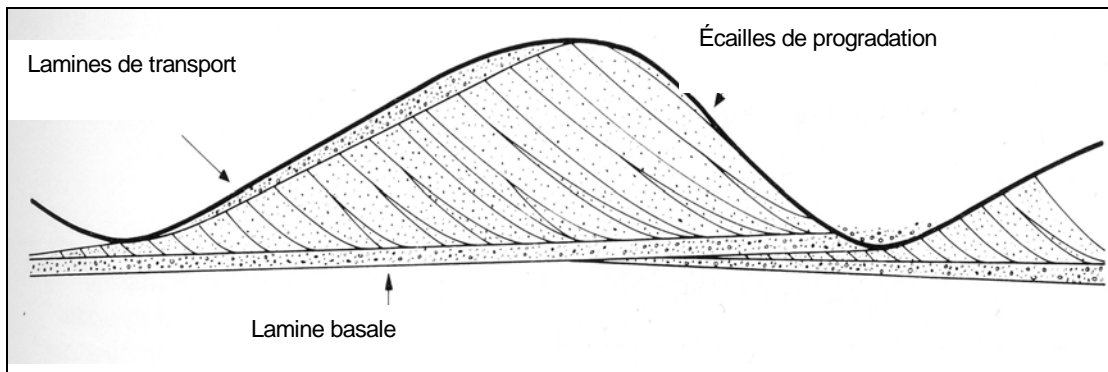


Fig. 2.2 - Définition des différentes structures d'une ride.

Selon les mesures de densité maximale en surface de la ride, l'ajout d'un point nouveau est nécessaire. Le point maximum est le point où la densité en surface de la ride est maximal et il coïncide avec l'emplacement où l'épaisseur des lamines de transport est à son maximum (fig. 2.3). Si la ride est en formation et non en déplacement, le point se déplace en avant ou en arrière selon la déposition et l'érosion du sédiment formant la ride. Cette caractéristique sera démontrée dans le présent travail et sera discutée ultérieurement.

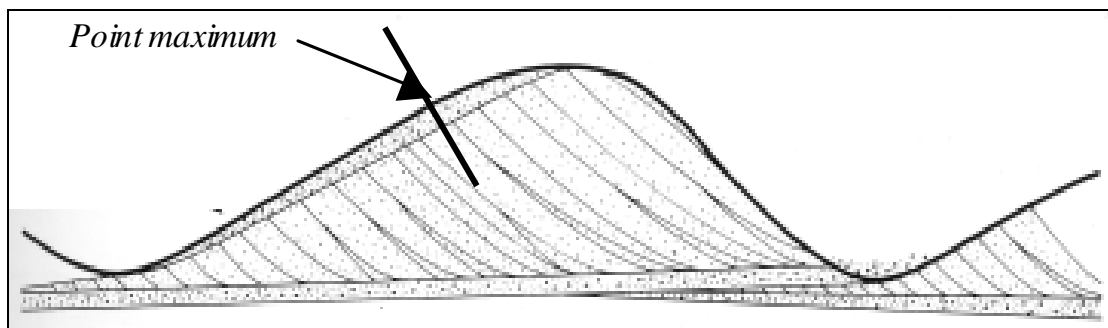


Fig. 2.3 – Emplacement du point maximum.

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS

3.1. Vitesse de déplacement d'une ride hors scanographe

L'objectif de ces mesures est de connaître la vitesse de déplacement des rides pour un sédiment donné. Ceci permet d'établir un protocole d'examen scanographique adapté à la vitesse de passage des rides dans la section de mesure du canal. Le système de rides (fig. 3.1 et 3.2) est représenté par 21 photographies (annexe B) prises à intervalles de 30 secondes sur une période de 10 minutes avec un appareil Canon PowerShot pro90i monté sur trépied. Les photographies du canal couvrent une zone de 540 mm de long et mettent en évidence un déplacement du système de ride de 327 mm en 9 minutes. La vitesse de déplacement de la ride étudiée est $0,061 \text{ cm s}^{-1}$ pour un courant de 24 cm s^{-1} . La température de l'eau est de $20,6 \text{ °C}$ et le sédiment est un sable de la Formation d'Ottawa de couleur rose avec un diamètre médian d_{50} de $130 \text{ }\mu\text{m}$ (annexe C).

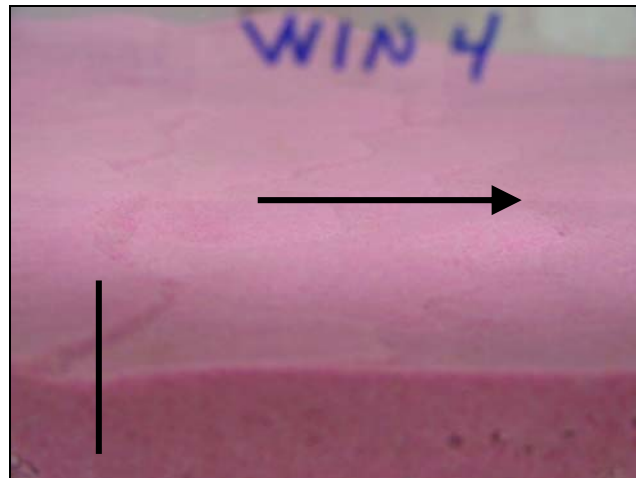


Fig. 3.1 - Photographie #1 utilisée dans le calcul de la vitesse de déplacement du système de ride. Photo montrant la position de la ride au temps t_0 (ligne verticale).

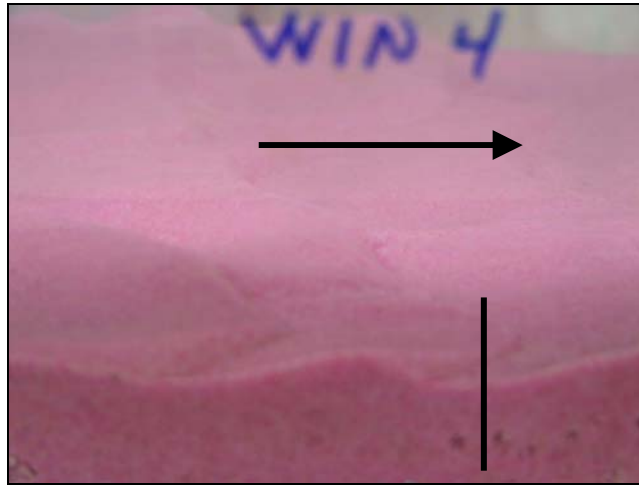


Fig. 3.2 - Photographie #21 utilisée dans le calcul de la vitesse de déplacement du système de ride. La photographie a été prise 10 minutes après le début de l'expérience.

3.2. Présence du litage dans les données scanographiques

La surface de la ride débute au point de rupture entre la colonne sédimentaire transportée en suspension et les sédiments transportés par charriage. Dans la colonne de sédiments en suspension, la densité HU varie de 0 HU (0 HU correspond à de l'eau ayant une masse volumique ρ de $1,024 \text{ g cm}^{-3}$) à 150 HU, qui correspond à une masse volumique de $1,174 \text{ g cm}^{-3}$ soit un mélange eau-sédiments. La mesure à sec du volume de sable étudié est de $1,519 \text{ g cm}^{-3}$. L'image densimétrique de la ride (fig. 3.3) présente, dans la colonne sédimentaire, une densité moyenne de 925 HU ($1,949 \text{ g cm}^{-3}$) avec une variation comprise entre 700 et 1100 HU ($1,724$ et $2,124 \text{ g cm}^{-3}$). Dans le flanc d'érosion, la densité moyenne est de 975 HU ($1,999 \text{ g cm}^{-3}$) et elle varie entre 950 à 1000 HU ($1,974$ et $2,024 \text{ g cm}^{-3}$).

Les lamines de transport présentent une mince couche d'une densité comprise entre 900 et 950 HU ($1,924$ et $1,974 \text{ g cm}^{-3}$). Enfin, la surface de la ride présente une densité qui varie de 500 à 700 HU ($1,524$ et $1,724 \text{ g cm}^{-3}$) causée par l'effet de volume partiel. En 2 (fig. 3.3), la photographie d'un système de ride hors scanographe, prise 24 heures après la

vidange du canal, présente une couche de sédiments avec des variations de perméabilité importantes, couleur pâle et drainage du fluide. Une couche de sédiments à faible perméabilité présente une teinte foncée par l'eau retenue. La porosité fermée dans les sédiments compactés est plus présente. La densité de l'image scanographique est en rapport avec le degré de porosité du sédiment.

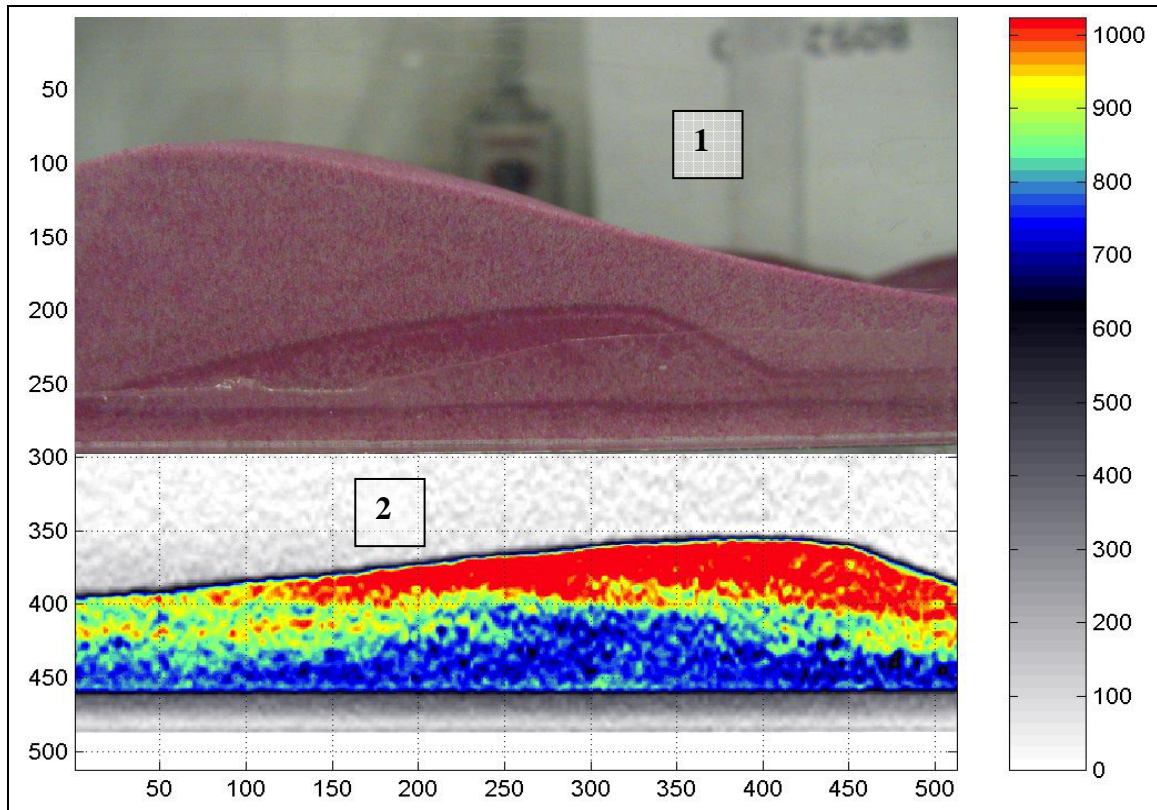


Fig. 3.3 - Photo d'une ride prise 24 heures après la vidange du canal superposée à l'image scanographique d'une ride L'image scanographique est en unité pixels.

3.3. Détermination des environnements scanographiques d'une ride

La détermination des environnements scanographiques d'une ride oblige la définition précise des zones de transport classiques, car différentes phases physiques apparaissent par scanographie. L'image scanographique (fig. 3.4) d'une coupe est composée des parois supérieures et inférieures du canal, du sédiment et du fluide. La ride sableuse est

étudiée dans la zone de pixels située entre les pixels 50 et 450. Cinq cents-douze (512) profils de densité de cinq cents-douze (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 ride. Les différentes zones du transport sédimentaire (fig. 3.4 à 3.9) varient en fonction de la position le long de la ride.

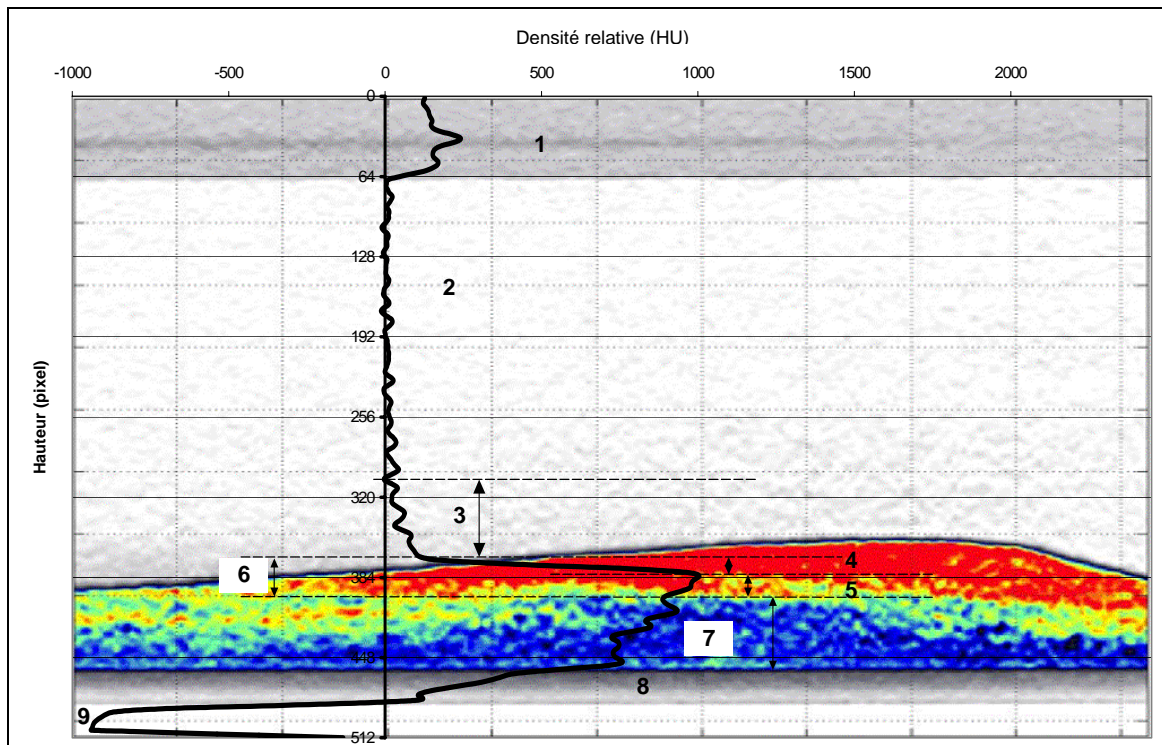


Fig. 3.4 - Image scanographique entière d'une coupe : Le profil vertical de densité présenté est réalisé à l'emplacement de l'axe des y. Le profil densité est composé de la trappe d'accès au sédiment (1), de la zone d'écoulement du fluide (2), de la zone de transport sédimentaire en suspension (3), de 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).

Ainsi, la coupe de la ride (fig. 3.4) 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 ($2,124 \text{ g cm}^{-3}$) qui correspond au point de rupture entre le sédiment en suspension et celui transporté par charriage. Par la suite, la concentration augmente brutalement dans la zone de transition (6) pour atteindre à 1,5 mm de profondeur 500 HU ($1,524 \text{ g cm}^{-3}$) et 975 HU ($1,999 \text{ g cm}^{-3}$) à 3 mm de profondeur.

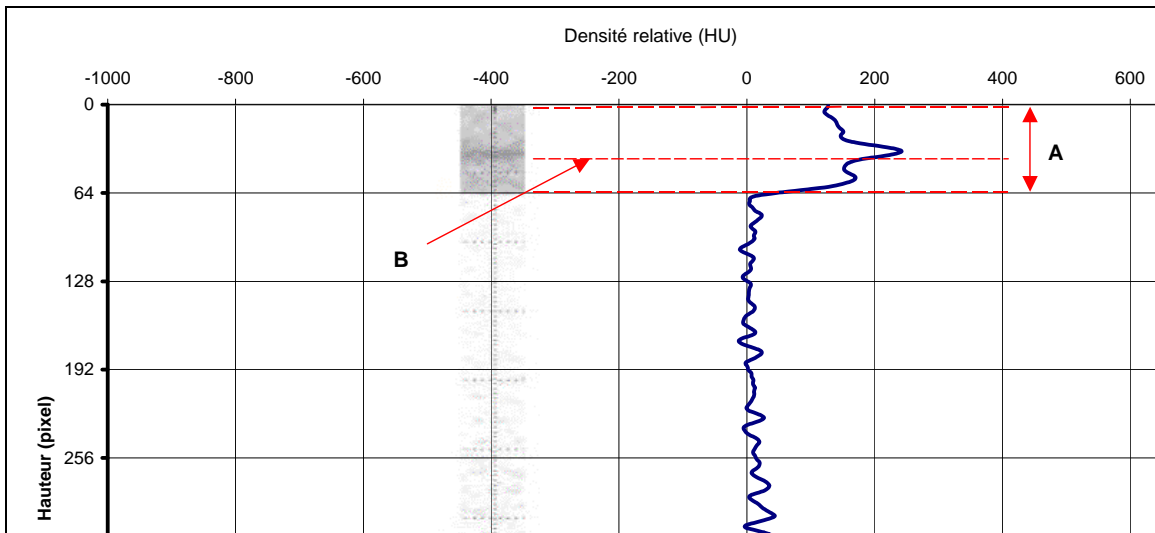


Fig. 3.5 – Profil de densité du canal : La section en A définit la trappe d'accès du canal composé d'acrylique. En B, l'augmentation de densité au centre de la trappe est causée par la colle qui joint les deux panneaux d'acrylique qui forment la trappe.

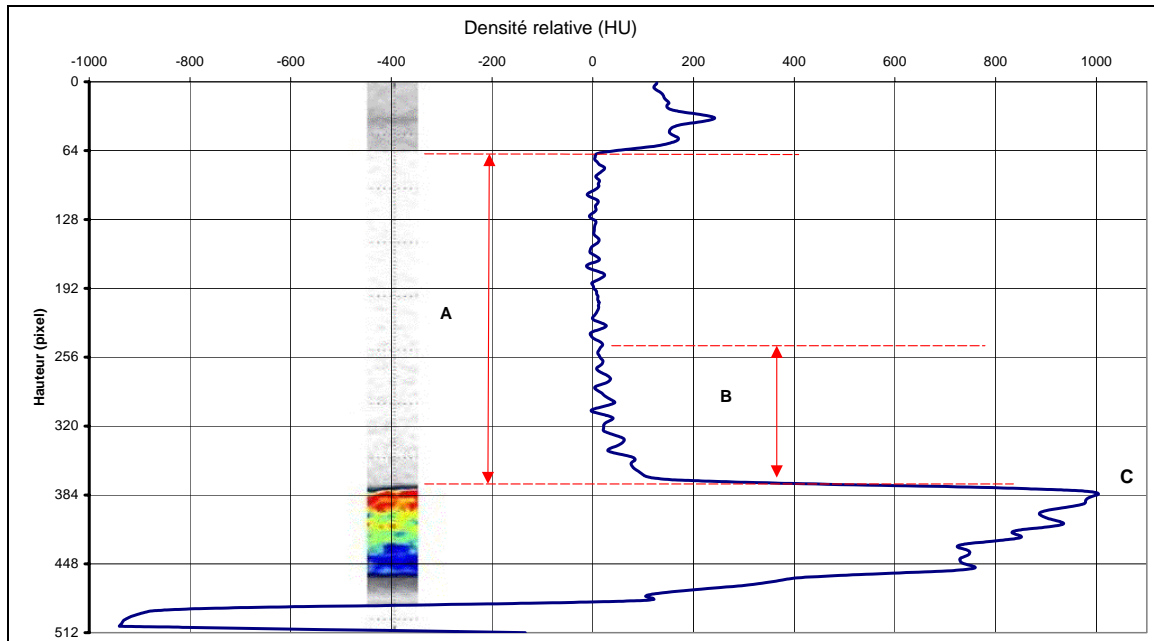


Fig. 3.6 – Profil de densité de la zone de fluide : La section A représente la zone de déplacement du fluide dans le canal et la section B indique la zone de transport par suspension. La zone de suspension débute lorsque la densité moyenne dans le fluide devient supérieure à 0 HU ce qui indique la présence de sédiment dans le fluide. Le point C indique le point de densité maximale du profil.

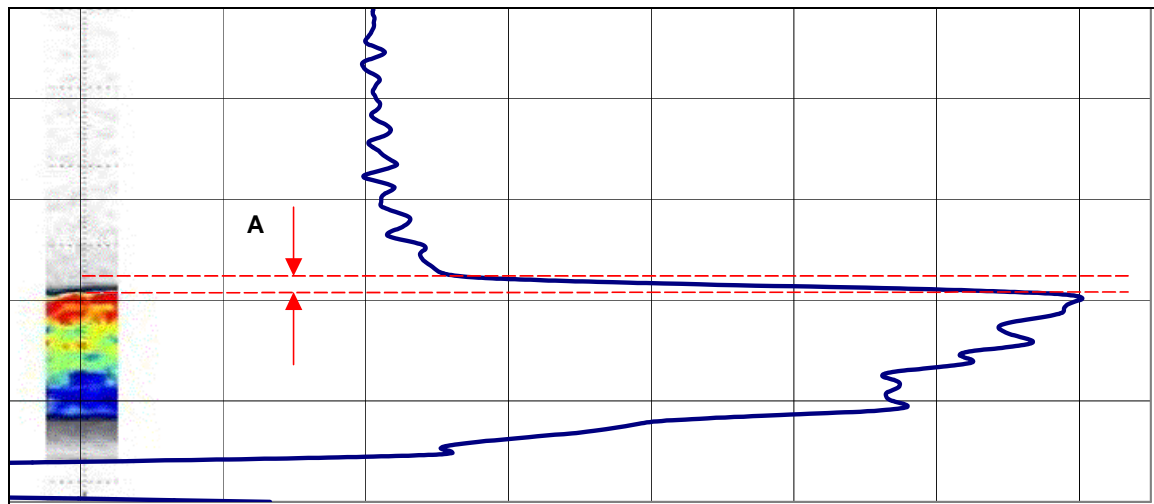


Fig. 3.7 – Profil de densité d'une ride : La section A indique la zone de transport mixte ou zone de passage du transport par suspension vers le transport par charriage. C'est cette zone qui est définie comme le début du transport par charriage ou zone supérieure de charriage.

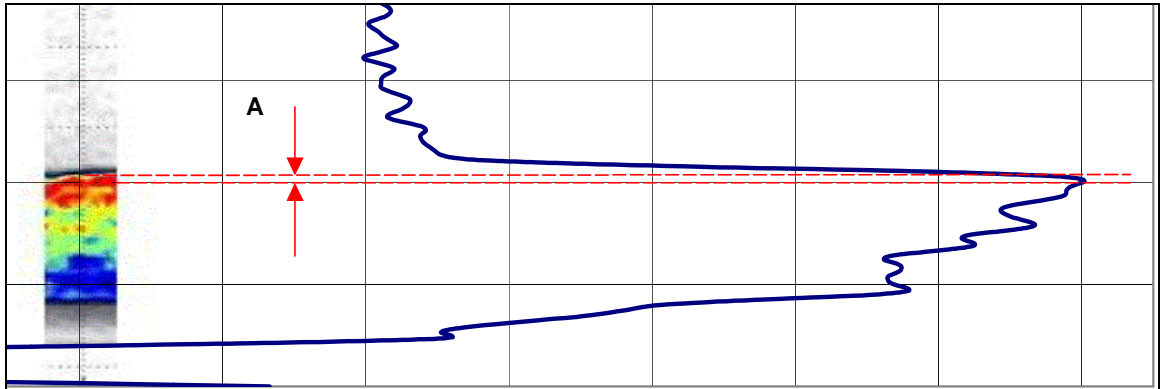


Fig. 3.8 – Profil de densité d’une ride : La section A indique la zone de transport par traction où la densité atteint son maximum. Cette zone est délimitée par la cassure dans la pente du profil et le point de densité maximale du profil.

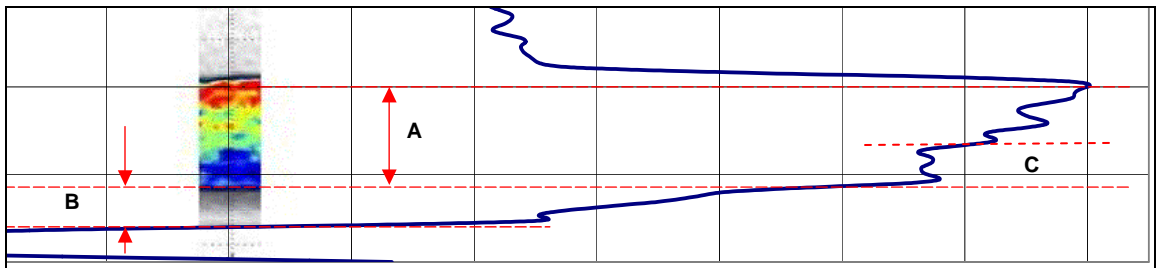


Fig. 3.9 – Profil de densité d’une ride : La section A représente la zone de chargement du lit sédimentaire. Cette zone est formée par la mise en place des sédiments et, ensuite, par déposition dans le transport. Le remplissage du canal est réalisé couche par couche avec un râteau. La section B représente le fond du canal constitué d’acrylique. La section C indique probablement la présence des lamines basales.

3.4. Équation du profil de densité d’une ride sableuse.

Le profil de densité (fig. 3.6) présente, pour la partie comprise entre le sommet de A et le point C, une équation de type logarithmique

$$y = [a \ln(x)+b] + [c \ln(x)+d] + [e \ln(x)+f] \quad (3.1)$$

où a est la pente interface, b est le point de séparation suspension charriage, c est la courbure de la suspension, d est le début du transport par suspension, e est la courbure statique/dynamique et f est l'intensité du transport par suspension. Cette équation permet de distinguer l'influence des zones de transport et des points de transition entre les modes de transport sédimentaire.

3.5. Estimation du rapport eau-sédiments dans les zones de transport

Le rapport eau-sédiment est un indicateur de transport. En effet, il permet de déterminer la quantité de sédiments en suspension dans la colonne de fluide. Il permet aussi de déterminer la saturation en eau de la ride sableuse. Deux équations sont utilisées, une équation (3.2) pour le sédiment sec (faible taux d'humidité) et l'équation (3.3) pour le sédiment immergé sous une colonne de fluide.

$$\% \text{ de sédiments à sec} = \frac{D_{mesurée} - D_{air}}{D_{Quartz} - D_{air}} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\% \text{ de sédiments dans l'eau} = \frac{D_{mesurée} - D_{eau}}{D_{Quartz} - D_{eau}} \times 100 \quad (3.3)$$

où $D_{mesuré}$ est mesuré en HU, D_{air} est de 24HU, D_{eau} est de 1024 HU et D_{quartz} est de 2650 HU. Les résultats obtenus (fig. 3.10) indiquent un pourcentage de sédiments dans l'air. Cet artefact (A) est causé par le durcissement de faisceau des parois du canal. Par contre, sur la colonne de fluide (B) l'effet du durcissement de faisceau est réduit par la présence de l'eau qui modifie l'interface. Le sédiment subit un remaniement de surface de 1,1 mm lorsqu'il est mis en présence de l'eau (C). De plus, le pourcentage de sédiments augmente indiquant un remaniement jusqu'à 3 mm sous la surface de la ride. Enfin, le pourcentage de sédiments de la colonne sédimentaire présente des fluctuations importantes qui sont causées par la présence d'air emprisonné dans le sédiment.

Le calcul de l'air emprisonné dans la colonne sédimentaire est réalisé en utilisant un volume normalisé de la colonne sédimentaire. Le volume normalisé (0,64 mm X 25,625 mm X 1 mm) est de 16,4 mm³. De l'équation (3.2), il résulte une répartition de 58,8% pour le sédiment et 41,2% d'air. De l'équation (3.3), il résulte une répartition de 54,5% pour le sédiment et 45,5% d'eau. Ainsi, le volume de sédiments (sec) est de 9,65 mm³, le volume d'eau théorique (air entièrement remplacé par de l'eau) est de 6,76 mm³ et le volume d'eau mesuré est de 6,47 mm³.

$$\text{Volume d'air} = \text{Volume théorique} - \text{Volume mesuré} \quad (3.4)$$

L'air résiduel présente dans la colonne sédimentaire est donc de 0,29 mm³. Ceci représente environ 4,3% de la colonne sédimentaire et cet air est en migration verticale dans le sédiments (fig. 3.11).

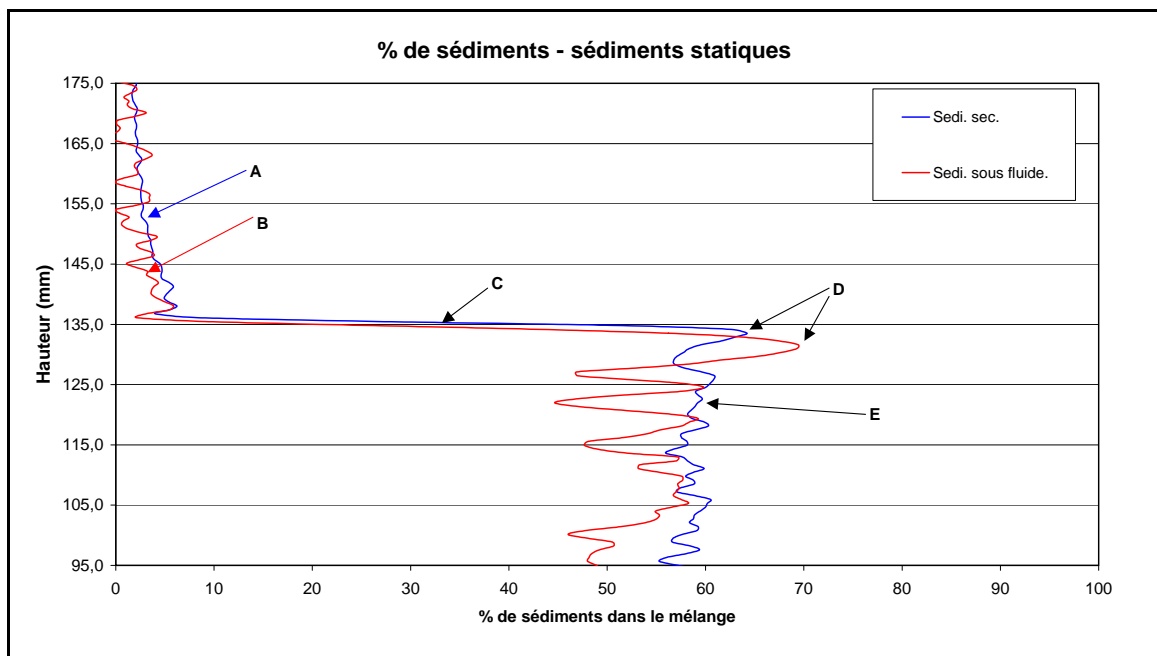


Fig. 3.10 – Pourcentage de sédiments dans une ride. La courbe en bleu représente un sédiment sec, sans eau, dans le canal et la courbe en rouge représente le sédiment immergé dans la colonne du fluide.

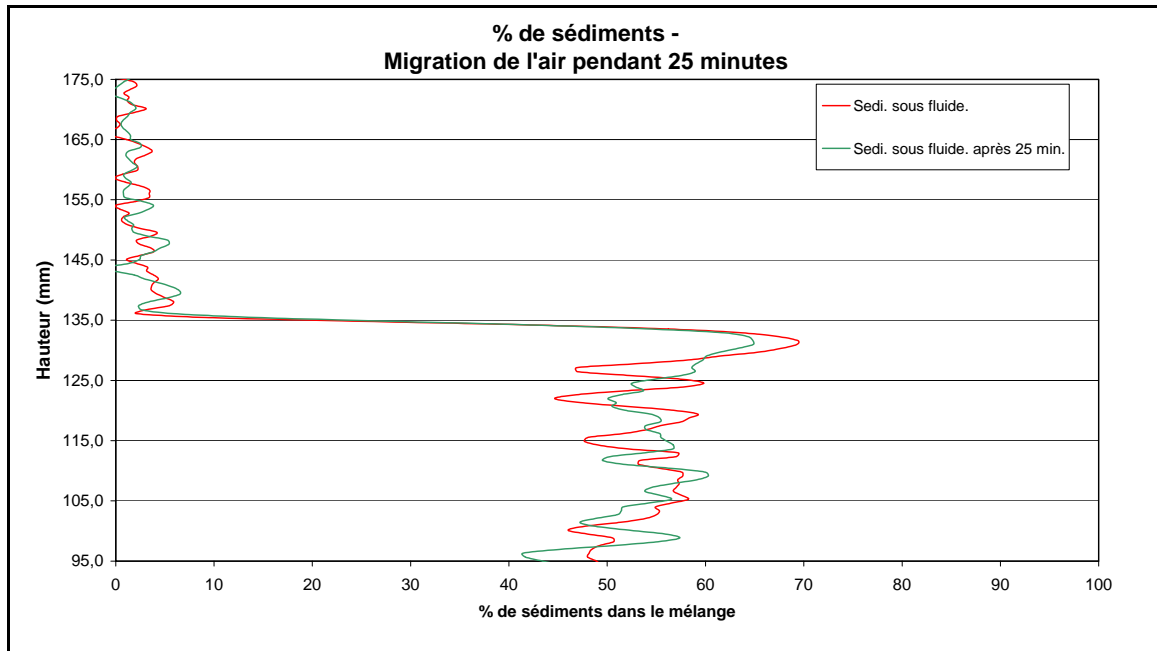


Fig. 3.11 – Pourcentage de sédiments dans une ride. La courbe en rouge représente le sédiment immergé dans la colonne du fluide et la courbe en vert représente le sédiment immergé dans la colonne du fluide après un délai de 25 minutes. Les variations de densité correspondent à une migration de l'air dans la colonne sédimentaire.

3.6. Évolution densimétrique durant le remplissage

Afin de contrôler l'influence de la méthode utilisée pour effectuer le remplissage sableux, une étude a été réalisée et sera exposée ultérieurement.

Durant le remplissage (eau) du canal contenant une couche de sédiment C-109 (annexe D) de 30 mm (fig. 3.12), 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-sédiment est de 529 HU ($1,553 \text{ g cm}^{-3}$). La densité moyenne du sédiment immergé par 10 cm d'eau est de 915 HU ($1,939 \text{ g cm}^{-3}$) avec un maximum en surface de 1175 HU ($2,199 \text{ g cm}^{-3}$). 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 $1,927 \text{ g cm}^{-3}$) avec un maximum en surface de 1252 à 1285 HU

(2,276 à 2,309 g cm⁻³) 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.

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 mm³ et l'équation (3.3), 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 mm³, pour 60 cm de fluide de 0,114 mm³ et de 0,092 mm³ pour une colonne d'eau de 120 cm.

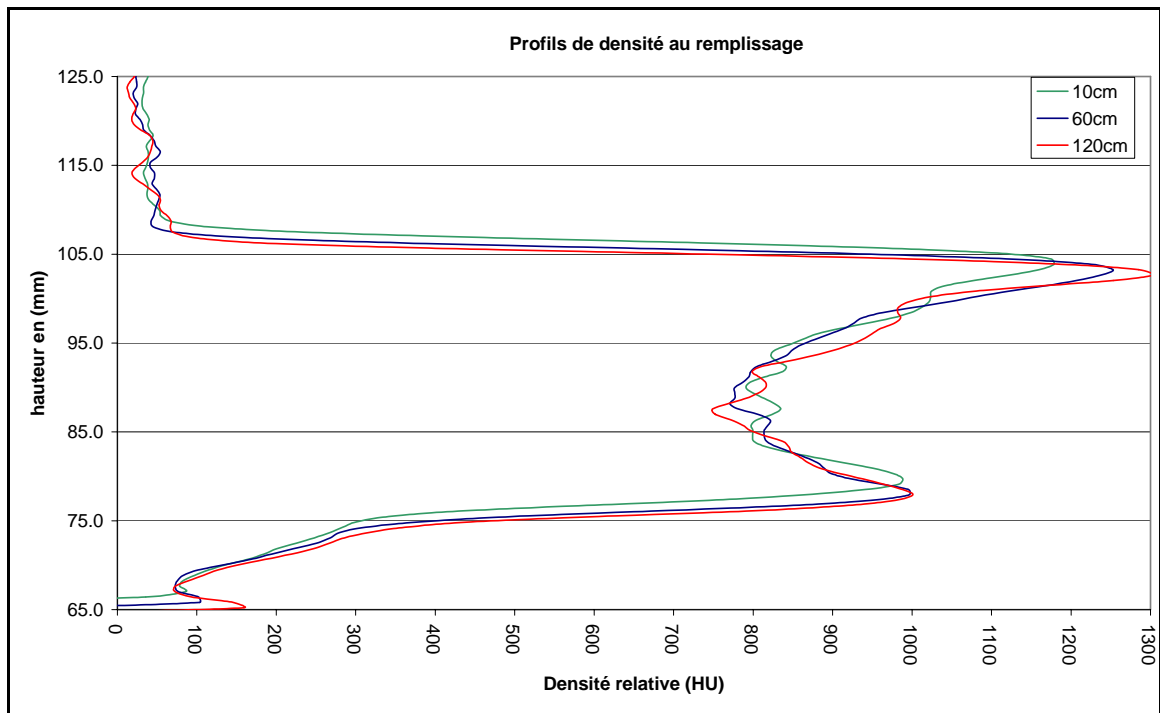


Fig. 3.12 - Profils de densité du sédiment C-109 mesurés lors du remplissage du canal.

3.7. Mode de déposition et forme initiale du lit sédimentaire

La mise en place du sédiment est responsable des formations présentes dans la couche sédimentaire. Afin de contrôler l'effet de la méthode utilisée pour effectuer le remplissage sableux, deux méthodes sont expérimentées. La déposition du sédiment en utilisant un râteau (fig. 3.13) indique une densité moyenne à sec de 551 HU ($1,757 \text{ g cm}^{-3}$) avec une augmentation en surface jusqu'à 680 HU ($1,704 \text{ g cm}^{-3}$), causé par le raclage de finition de la surface sédimentaire. La déposition du sédiment, dite saupoudrée, présente une densité moyenne de 710 HU ($1,734 \text{ g cm}^{-3}$), 158 HU ($1,182 \text{ g cm}^{-3}$) supérieure à la méthode du râteau. La présence de couche déposée successivement lors du dépôt est visible (fig. 3.14). La densité de la couche de surface est elle aussi plus élevée (960 HU ou $1,984 \text{ g cm}^{-3}$) en raison du tassement plus élevé de la déposition de fine couche pour la finition.

Dans les deux cas, l'ajout jusqu'à saturation d'eau à 20 °C augmente la densité de la couche sédimentaire de façon quasi uniforme. Les discordances, augmentations de densité plus faible sur certains points du profil, sont causées par l'air emprisonné dans le sédiment. Le remplissage complet par le fluide entraîne une migration vers la surface d'une partie de l'air emprisonné dans la couche sédimentaire. Ceci modifie le profil par une augmentation de la valeur moyenne de la densité d'environ 10 à 20 HU.

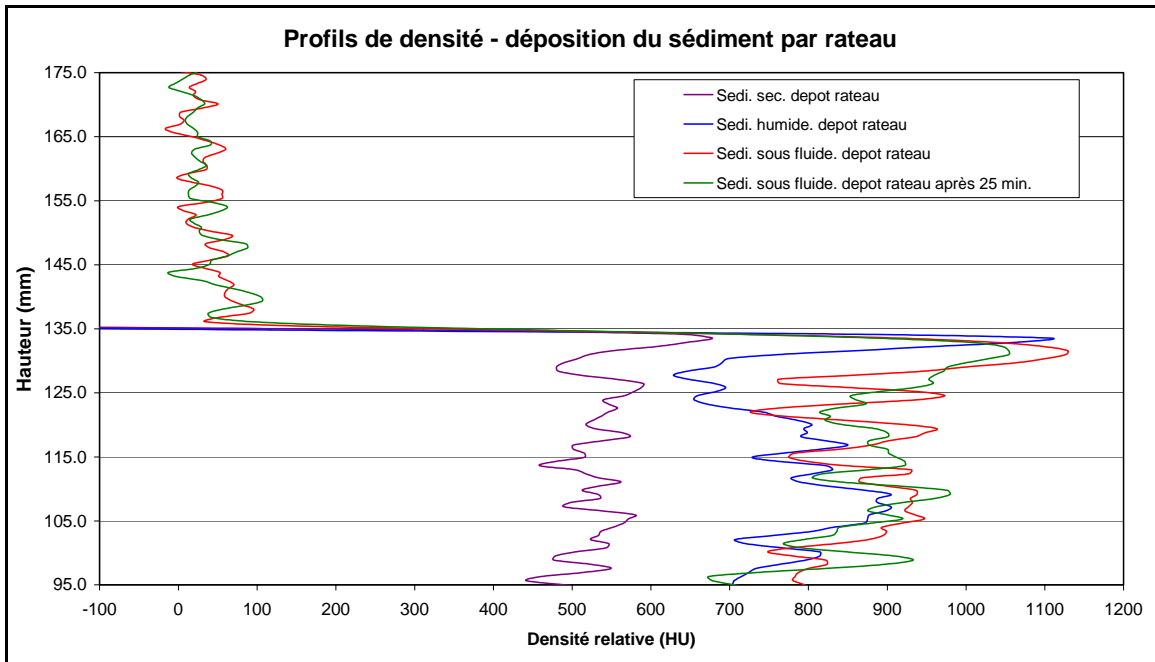


Fig. 3.13 – Profils de densité de la couche de sédiments lors d'un dépôt avec une manipulation par râseau.

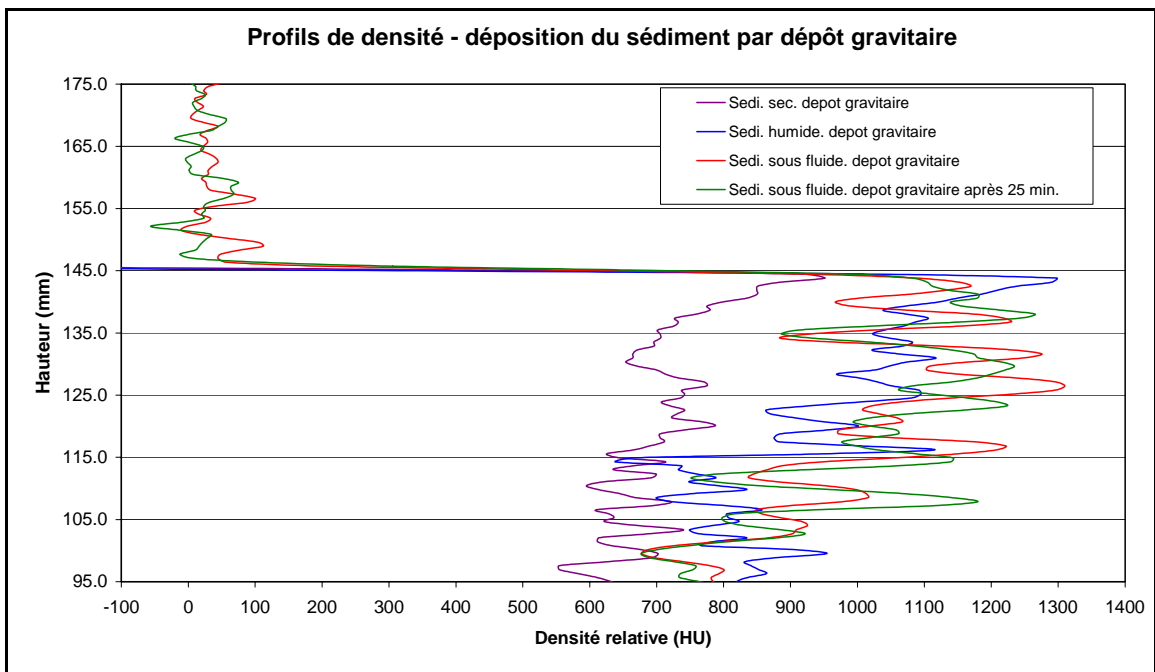


Fig. 3.14 – Profils de densité de la couche de sédiments lors d'un dépôt gravitaire par couche.

Lors d'un dépôt gravitaire, l'écart de densité dans la colonne sédimentaire est plus élevé en raison de la présence de plus de 10 couches de déposition. Un dépôt par râteau met en place une ou deux couches contrairement au dépôt gravitaire. Dans la présente étude, le sédiment est déposé par la méthode du râteau avec les caractéristiques présentes précédemment.

L'observation effectuée avec un délai de 25 minutes entre deux mesures présente une migration de l'air ou de l'eau dans le sédiment. Par contre, une partie de l'air emprisonné au départ demeure dans la colonne sédimentaire, même après migration.

3.8. Formation initiale des rides sableuses

L'environnement se compose d'une hauteur d'eau mesurée du dessus du canal jusqu'au niveau moyen du sédiment. La vitesse du courant sur le dos de la ride augmente jusqu'au sommet de la ride. Le flanc de progradation possède un angle θ où le sédiment tombe par gravité. Au même moment, un vortex attaque la base de la ride. La longueur de la ride Λ se mesure entre deux bases de la ride.

Les paramètres des rides sableuses retenues sont définis pour un écoulement calme, Nombre de Froude, $Fr < 1$ (Fig. 3.15) car les formes obtenues pour un écoulement dont le $Fr > 1$ se présentent sous forme d'anti-dune (fig. 3.16).

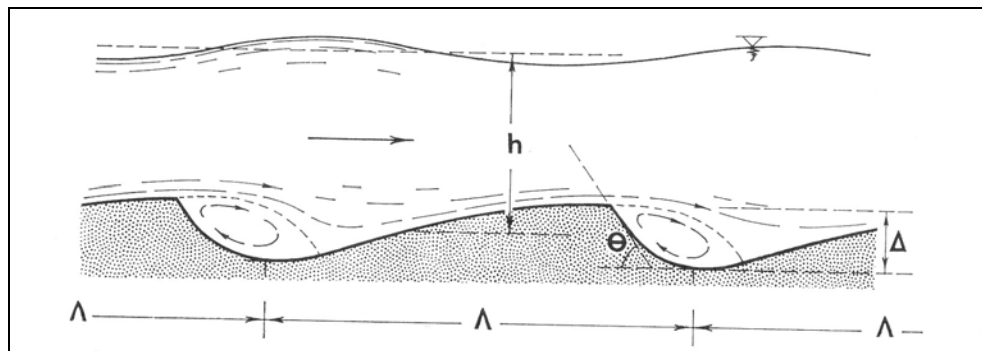


Fig. 3.15 – Mouvement du fluide au abord de la ride pour un écoulement laminaire. (source : Yalin, 1977).

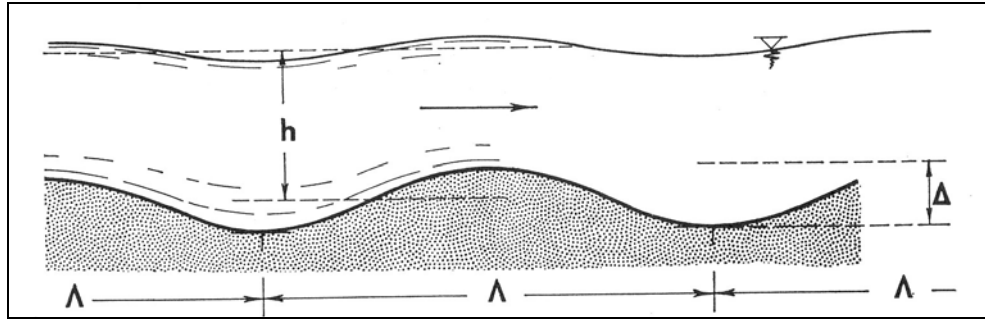


Fig. 3.16 – Mouvement du fluide au bord d'une ride pour $Fr > 1$. (source : Yalin, 1977).

La relation longueur/diamètre médian des grains (Λ/D) (fig. 3.17) correspond à différents canaux avec le même matériel sédimentaire. La courbe 3 est mesurée le long des parois et la courbe 4 sur le centre du canal. Pour les fins de comparaison, les rides sélectionnées dans cette étude sont localisées dans la section centrale du canal (Yalin, 1977).

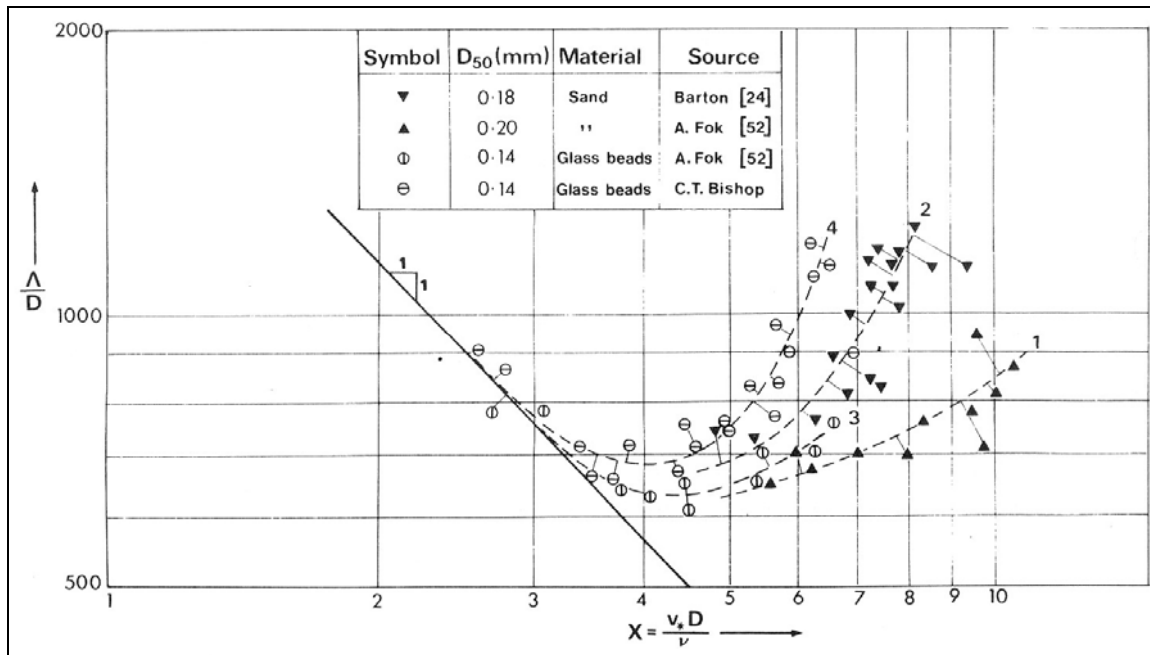


Fig. 3.17 – Rapport Λ/D en fonction de la grosseur des grains dans le nombre de Reynolds pour des matériaux similaires mais dans des canaux différents. (source : Yalin, 1977).

L'apparition simultanée de ride et de dune s'explique si la longueur de la dune est similaire à celle de la hauteur d'eau moyenne ($\Lambda_d \sim h$) et si elle est plus grande que la longueur de la ride et la grosseur des grains $\Lambda_r \sim D$.

Cela peut être le cas si la profondeur

$$Z = \frac{h}{D} \quad (3.5)$$

est plus grande pour

$$\frac{\Lambda_d}{\Lambda_r} \approx \frac{h}{D} = Z \quad (3.6)$$

L'expérience démontre que l'existence des deux figures de dune et ride, est possible si Z est suffisamment grand et impossible, si Λ_d et Λ_r sont comparables (fig. 3.18). Ce phénomène est visible lors des changements de vitesse en échelons. Il est considéré comme un régime transitoire et les mesures sont réalisées après la stabilisation (régime permanent).

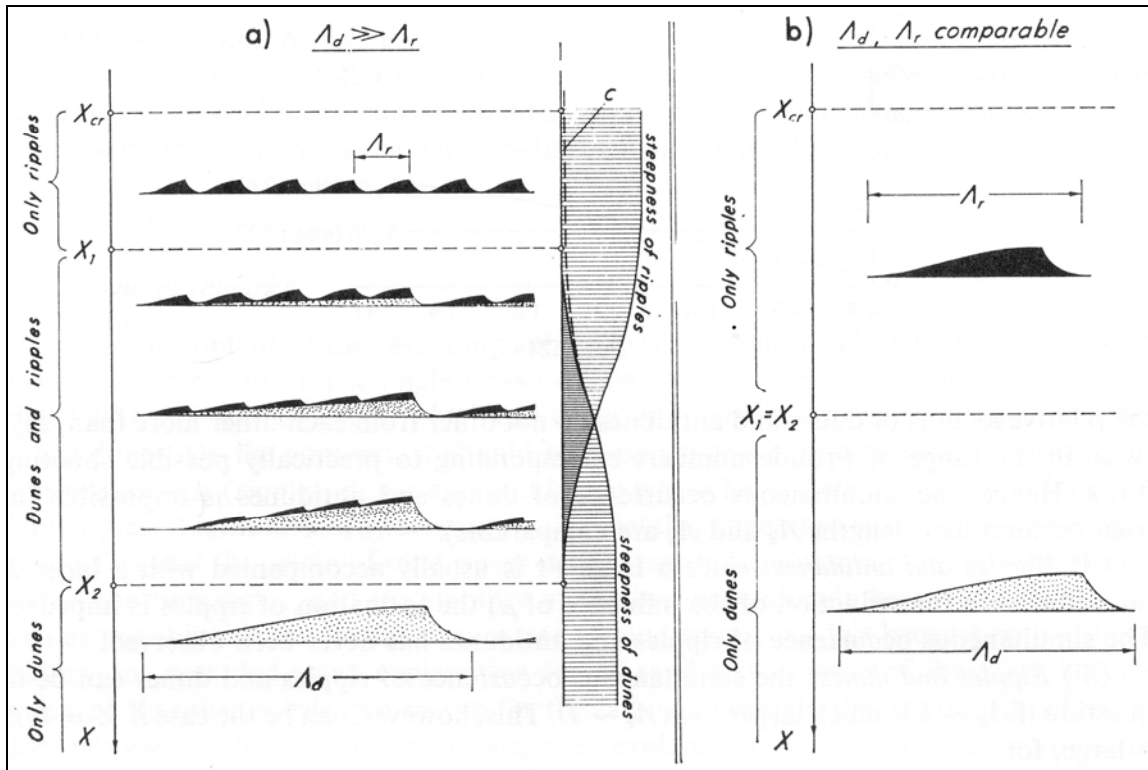


Fig. 3.18 – Formation et transition entre les rides et les dunes en fonction de la relation Λ_d et Λ_r . (source : Yalin. 1977).

Selon Yalin (1977), la formation de ride débute au cours de discontinuités géométriques et, dans le cas présent, ces discontinuités géométriques sont causées par les irrégularités causées par le râteau utilisé lors de la mise en place du sédiment dans le canal. Donc, les propriétés de la ride qui se développent par la suite sont indépendantes des discontinuités d'origine et ainsi de la manière utilisée pour le remplissage.

3.9. Évolution de la densité en surface de la ride

Lors de la migration des rides sableuses (fig. 3.19), la densité de la couche mobile de sédiments augmente le long du flanc d'érosion jusqu'au point où le courant de retour (*backflow*) et les lamines de transport sont mis en place. Lorsque le courant de retour diminue, point de densité maximale, l'épaisseur des lamines de transport augmente. La densité sur le reste du flanc d'érosion diminue jusqu'au point sommital, où elle augmente

rapidement. Ensuite, le long du flanc de progradation la densité diminue jusqu'au point bas. À la surface de la ride, la fluctuation de densité de haute fréquence est probablement due à la migration de micro-rides ou de turbulences qui se forme en surface.

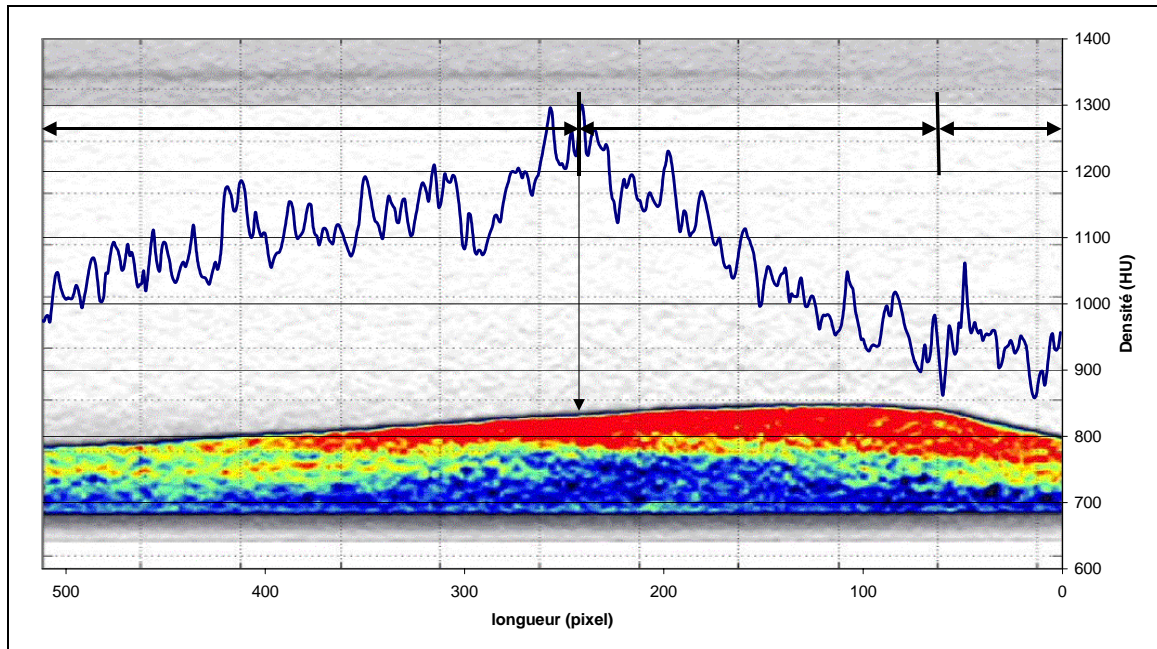


Fig. 3.19 – Densité maximale du sédiment à la surface de la ride.

3.10. Milieu statique versus dynamique.

En milieu statique (courant nul), le profil de densité de l'eau est entièrement vertical et le point d'inflexion correspond à l'interface entre l'eau et le sédiment. La densité du sédiment est entre 1100HU à 1300 HU ($2,124 \text{ g cm}^{-3}$ à $2,324 \text{ g cm}^{-3}$). Le profil de densité présente un plateau horizontal entre 0 et 1200 HU ($1,024 \text{ g cm}^{-3}$ et $2,224 \text{ g cm}^{-3}$) qui devrait dépendre de l'homogénéisation du sédiment et du fluide circulant.

En milieu dynamique (courant de 25 cm s^{-1} et sédiments en suspension), le profil de densité de l'eau s'inverse dans la partie dorsale. Il reflète alors l'intensité de la concentration de sédiments en suspension (entre 0 et 4%). Le point d'inflexion varie et correspond au passage entre le transport en suspension et le transport par charriage. Une

pente apparaît dans la couche mobile en charriage. Elle correspond probablement à la diminution de la teneur en eau dans la couche mobile et au réajustement des particules déplacées.

3.11. Variation horizontale de la densité

L'étude de la densité des coupes successives d'une ride selon l'axe Z (fig. 3.20) présente des profils similaires (fig. 3.21), mais indiquent aussi une migration horizontale de l'air dans les couches de déposition sédimentaires.

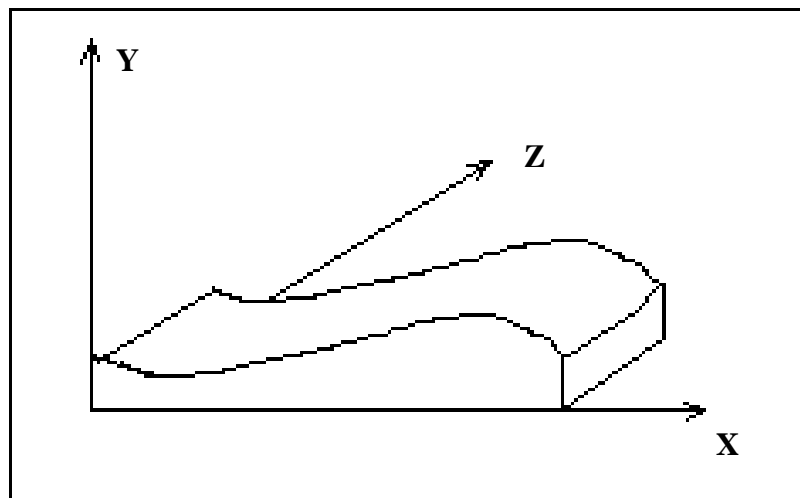


Fig. 3.20 – Système d'axe utilisé dans l'étude de la ride.

L'étude de trois coupes d'une ride sur 1,8075 mm en Z (fig. 3.22) indique un comportement similaire de la colonne de fluide. La zone de transport par suspension est aussi d'une épaisseur similaire. Par contre, la hauteur de la ride varie de 1 mm, car cette dernière n'est pas parfaitement perpendiculaire au canal. La densité maximale diminue de 993 à 924 HU ($2,017 \text{ g cm}^{-3}$ à $1,948 \text{ g cm}^{-3}$) en raison de la non perpendicularité de la ride des profils qui changent sur la base du flanc d'érosion de la ride. Dans la colonne sédimentaire, la présence d'air emprisonné dans le sédiment provoque, par endroit, des variations mineures de la densité 846 à 871 HU ($1,870 \text{ g cm}^{-3}$ à $1,895 \text{ g cm}^{-3}$).

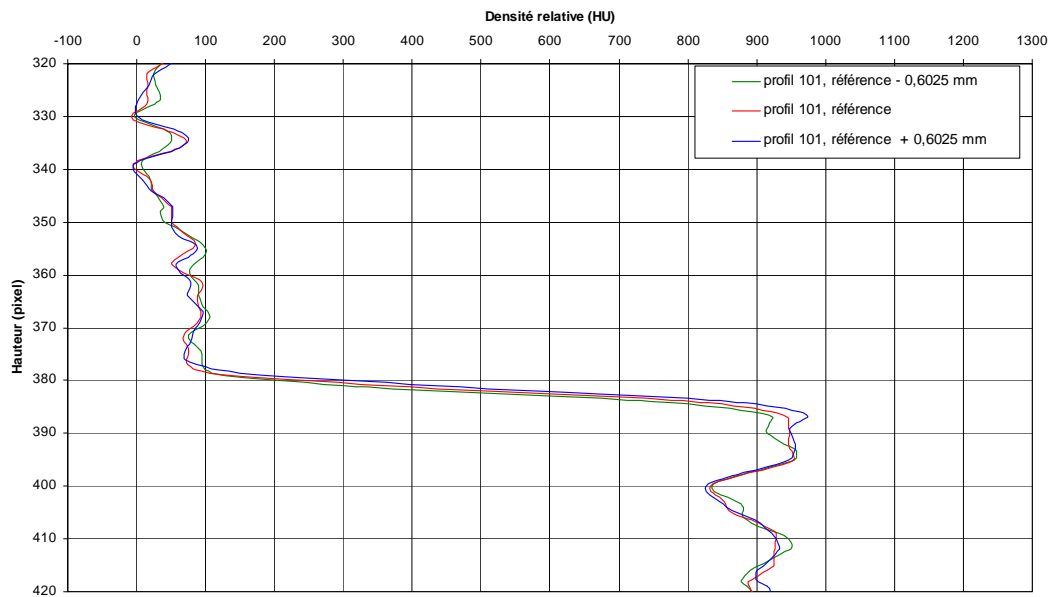


Fig. 3.21 – Profils de densité de la ride selon l'axe des Z. Le déplacement en Z est de 1,8075 mm.

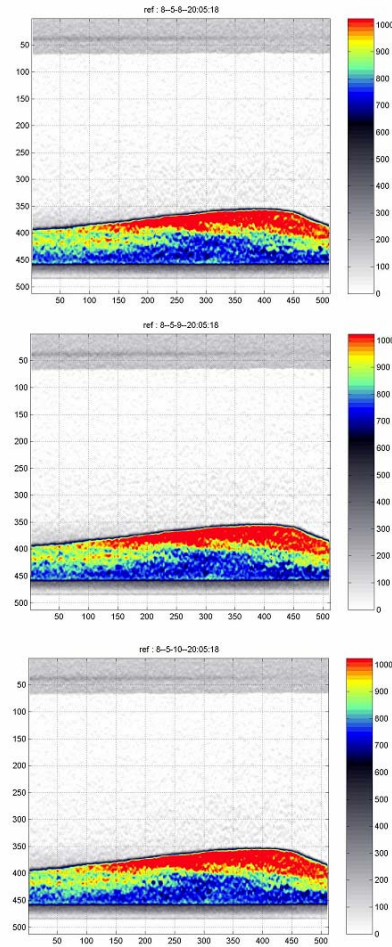


Fig. 3.22 – Images des trois coupes en Z étudiées. L'espace entre les coupes est de 0,6025 mm.

3.12. Variation verticale de densité

Dans les sous-chapitres suivants, les profils verticaux de la ride seront présentés de la partie basse du flanc d'érosion et sur le long du flanc d'érosion jusqu'au sommet de la ride pour terminer le long du flanc de progradation . Les résultats sont présentés pour la zone de transport en suspension, puis pour les zones de transport par charriage et traction. Pour les figures 3.23 à 3.28, la couche de déposition présente des densités caractérisant le litage de la ride ainsi que la localisation des profils de densité du graphique ayant chacun 512 points de mesures.

La présente étude se limite à l'étude des rides sableuses se déplaçant sous un courant stationnaire de 25 cm s^{-1} . L'épaisseur de la couche de transport par suspension est calculée sur le profil de densité entre le point de séparation de la colonne de fluide et le point où débute la pente du profil du transport par charriage.

L'épaisseur de la couche par charriage est calculée selon deux méthodes. La méthode par les extrémités calcule la pente entre le bas de la colonne du fluide et le sommet de la zone de transport, densité maximale. La méthode linéaire utilise les extrémités de la partie linéaire de la pente de la zone de charriage du profil.

La section du profil de densité entre les pixels 425 et 450 est non prise en compte dans l'étude, car elle est sous l'influence du durcissement de faisceau causé par la paroi inférieure du canal.

3.12.1. Partie basse du flanc d'érosion

Les variations de densité observées autour du point bas mettent en évidence (fig. 3.23 et tab. 3.1) que, dans la partie basale de la colonne d'eau, la distribution de la concentration de sédiments en suspension n'est pas uniforme dans la couche de transport en suspension. Ces variations reflètent probablement la présence de turbulences du milieu fluide proche de l'interface. Néanmoins, un gradient positif global existe sur cette pente du profil et le maximum de densité mesuré est de 144 HU ($1,168 \text{ g cm}^{-3}$).

Dans la partie basse du flanc d'érosion, il y a diminution de la couche de transport en suspension de 24,70 mm à 3,13 mm. L'épaisseur de la couche de charriage fluctue selon la concentration en eau du sédiment. Une densité de -56 HU ($0,968 \text{ g cm}^{-3}$) est présente à la limite de la couche de suspension et de la couche de charriage. Cette valeur négative indique qu'il y a probablement de l'air due à des phénomènes de cavitation dans les vortex du flanc de progradation .

La rupture de pente du profil située sous de la couche de transport en suspension représente le passage entre le transport en suspension et le transport par charriage.

En-dessous de la rupture de pente, débute la couche de transport par charriage. Cette couche est double. La pente sommitale correspond à la couche de déstabilisation du sédiment. Elle peut être appelée la zone supérieure de transport par charriage. Dans cette couche, l'eau pénètre de plus en plus à travers la matrice sédimentaire et doit faire passer le mouvement sédimentaire d'un stade de traction à celui de pseudo traction. La densité passe alors de 949 à 1087 HU ($1,973$ à $2,111$ g cm⁻³) dans la partie basale, à -56 à 64 HU ($0,968$ à $1,088$ g cm⁻³) dans la partie sommitale. Une deuxième couche, plus profonde, correspond à une zone d'entraînement des sédiments. Sa base correspond à la limite de l'entraînement des particules par charriage et est représenté par une couche de sédiments qui va de la partie haute, à la limite du mouvement par traction d'où une densité qui passe de 831 à 949 HU ($1,855$ à $1,973$ g cm⁻³).

La pente de la partie horizontale reste constante sur l'intervalle. Par contre, le maximum de densité varie. Il est de 938 HU ($1,962$ g cm⁻³) au niveau du point bas, puis augmente à 1016 HU ($2,040$ g cm⁻³) 25 pixels (9,77 mm) horizontaux plus loin, pour enfin redescendre à 941 HU ($1,965$ g cm⁻³) sur le flanc d'érosion.

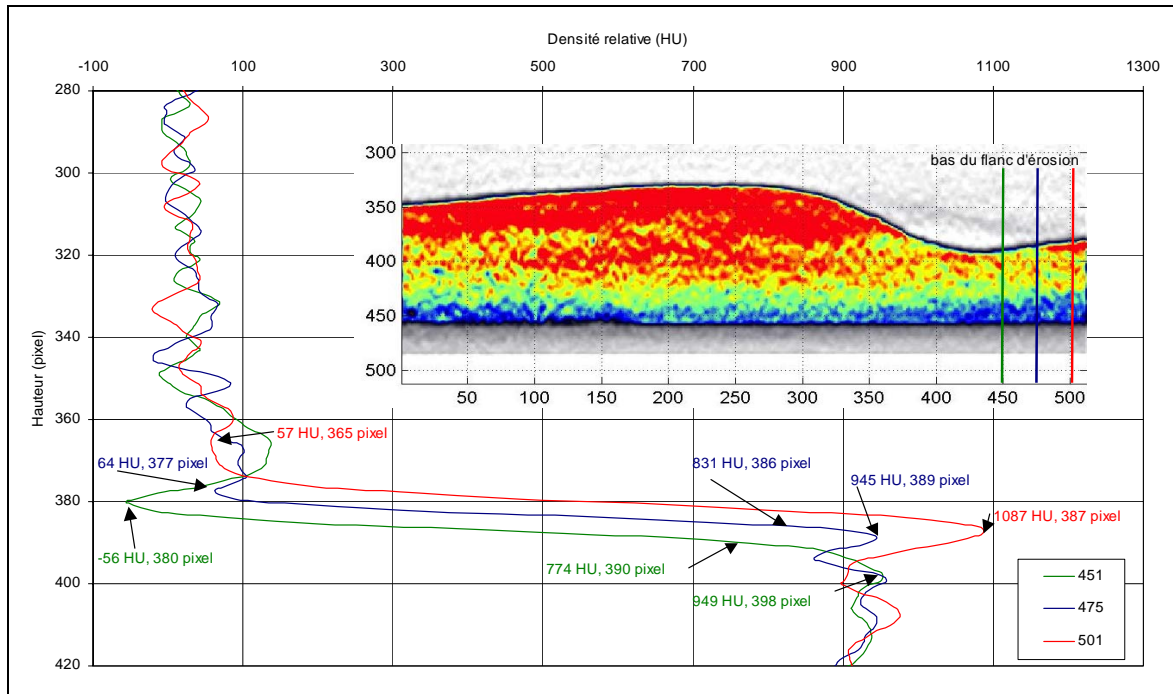


Fig. 3.23 - Profils verticaux de densité d'une ride, selon le sens du mouvement, dans la partie basse du flanc d'érosion. L'image représente une partie d'une image de 512 X 512 pixels.

Tab. 3.1 – Résumé des profils de la figure 3.23

Figure 3.23		Zone de suspension	Zone de charriage	Densité minimale	Densité maximale	Δ densité
Profil	451	Entre les pixels 330 et 380 Épaisseur de 30,13 mm	Entre les pixels 365 et 387 Épaisseur de 13,26 mm .	-56 HU	949 HU	1 005 HU
Profil	475	Entre les pixels 330 et 377, Épaisseur de 28,32 mm	Entre les pixels 377 et 389 Épaisseur de 7,23 mm .	64 HU	945 HU	881 HU
Profil	501	Entre les pixels 330 et 371 Épaisseur de 24,70 mm	Entre les pixels 380 et 398 Épaisseur de 10,85 mm .	57 HU	1 087 HU	1 030 HU

3.12.2. Le long du flanc d'érosion

Sous l'influence d'un courant stationnaire, les profils de densité observés autour du flanc de progradation mettent en évidence (fig. 3.24 et tab. 3.2) que la partie basale de la colonne d'eau présente une distribution semblable de l'ensemble des profils de la couche de transport en suspension.

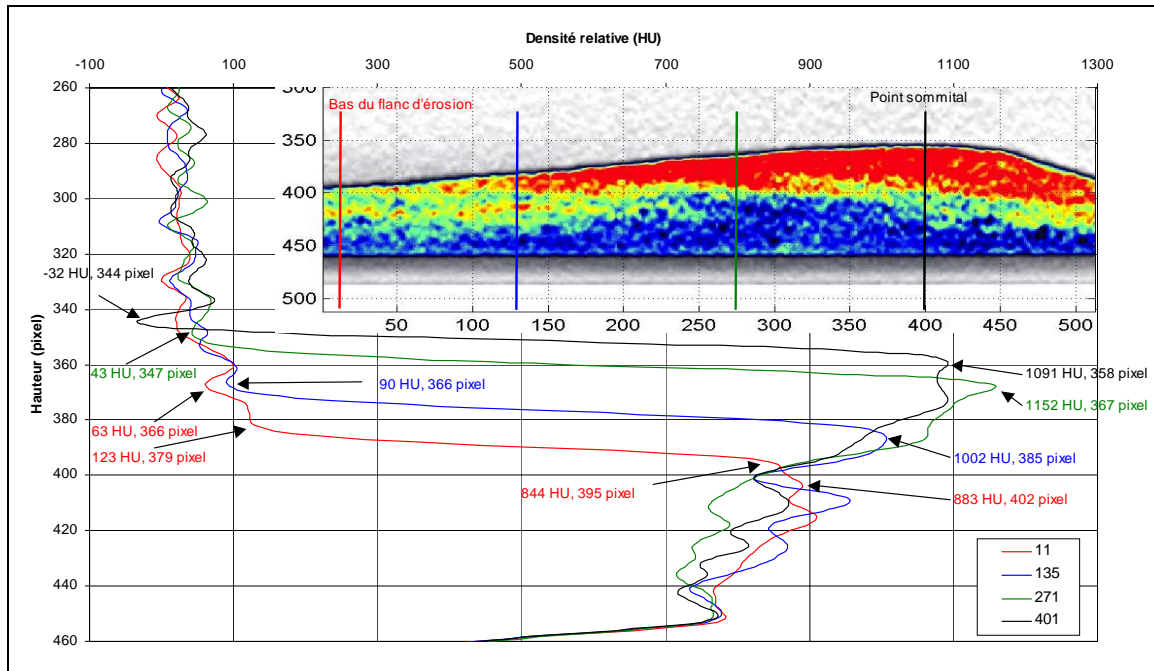


Fig. 3.24 - Profils verticaux de densité d'une ride, selon le sens du mouvement, le long du flanc d'érosion. L'image est une section d'une image de 512 X 512 pixels.

Tab. 3.2 – Résumé des profils de la figure 3.24.

Figure 3.24		Zone de suspension	Zone de charriage	Densité minimale	Densité maximale	Δ densité
Profil	11	Entre les pixels 342 et 379 Épaisseur de 22,29 mm .	Entre les pixels 379 et 402 Épaisseur de 13,86 mm .	123 HU	883 HU	760 HU
Profil	135	Entre les pixels 340 et 366 Épaisseur de 15,67 mm .	Entre les pixels 366 et 385 Épaisseur de 11,45 mm .	90 HU	1 002 HU	912 HU
Profil	271	Entre les pixels 347 et 367 Épaisseur de 7,83 mm .	Entre les pixels 347 et 367 Épaisseur de 12,05 mm .	43 HU	1 152 HU	1 109 HU
Profil	401	Entre les pixels 334 et 343 Épaisseur de 5,42 mm .	Entre les pixels 344 et 358 Épaisseur de 8,44 mm .	-32 HU	1 091 HU	1 123 HU

Les variations de densité reflètent les différents états du milieu fluide proche de l'interface. Lors de l'ascension du flanc d'érosion, le niveau de turbulence observé diminue à l'approche du point sommital. De plus, la couche de transport diminue du bas de la ride vers le point sommital. Le bas du flanc d'érosion (profil 11, fig. 3.24) présente

une couche de transport en suspension de 22,29 mm d'épaisseur. La pente du profil de 0,00789 indique que le transport par charriage s'effectue sur une épaisseur de 13,86 mm.

La rupture de pente, zone de transport mixte, est présente. Le profil 135 (fig. 3.24) indique un transport en suspension sur une épaisseur de 15,67 mm et la pente de 0,0088 indique une réduction du transport par charriage ainsi qu'une disparition de la zone mixte au profit d'un transport par traction. Le profil 271 (fig. 3.24) présente une réduction de l'épaisseur du transport en suspension à 7,83 mm. La pente 0,01147 indique aussi une réduction du transport par charriage. Le point sommital, profil 401 (fig. 3.24), est caractérisé par un transport en suspension et une couche de séparation -32 HU ($0,992 \text{ g cm}^{-3}$) entre la suspension et le charriage. La pente du transport par charriage indique une diminution du charriage et l'épaisseur de la couche passe de 12,05 à 8,44 mm. La couche de transport mixte est absente et indique majoritairement un transport en suspension.

Le long du flanc d'érosion, entre le bas du flanc d'érosion et le point sommital, l'épaisseur de la couche de transport en suspension diminue de bas en haut soit de 22,29 à 5,42 mm. L'épaisseur de la zone de transport par charriage diminue aussi, 13,86 à 8,44 mm, mais de façon moins importante que celle du transport en suspension. La différence de densité le long du flanc d'érosion augmente du bas vers le sommet de la ride 760 à 1123 HU ($1,784$ à $2,147 \text{ g cm}^{-3}$).

3.12.3. Partie sommitale de la ride sableuse

Les profils de densité de la partie sommitale de la ride sableuse, (fig. 3.25 et tab 3.3) sont représentés par le profil du pixel 205 (fig. 3.25). Ce dernier présente un point d'inflexion à partir duquel l'épaisseur du transport par suspension est de 13,86 mm et la colonne présente des vortex. La pente du profil de la zone de transport par charriage est de 0,00752 et son épaisseur de transport est de 7,23 mm. Le point de transport par traction (valeur de densité maximale), 990HU ($2,014 \text{ g cm}^{-3}$) indique la présence de deux couches de transport distinctes (charriage et traction) dans la zone d'aggradation. Le profil du point sommital (pixel 229, fig. 3.25), est similaire au profil du pixel 205 (fig. 3.25). Il indique la présence d'une zone sommitale plutôt qu'un point unique. En avant du point

sommital (pixel 275), l'épaisseur du transport en suspension (13,86 mm) et par charriage (7,23 à 9,64 mm) demeure similaire. Par contre, une zone de transport par traction-suspension (mixte) apparaît. Une rupture de pente des profils 275 et 325 (fig. 3.25) est caractéristique d'un transport mixte qui mute vers un transport gravitaire. Le profil 275 (fig. 3.25) indique le début du flanc de progradation et de la zone de progradation. Le point de rupture (profil 325, fig. 3.25) présente une augmentation de la couche de transport en suspension à 18,68 mm. La pente du profil 0,01003 indique une épaisseur de transport par charriage de 13,26 mm. La couche de transport mixte est encore présente, mais sa concentration diminue de la partie sommitale jusqu'à la rupture de pente du profil 325 (fig. 3.25).

Ainsi, sur l'ensemble de la partie sommitale de la ride sableuse, l'épaisseur de la couche de transport en suspension est stable à 13,86 mm jusqu'au point de rupture où elle augmente à 18,68 mm. La zone de transport par charriage augmente à l'approche du point de rupture pour atteindre 13,26 mm. La variation de densité demeure relativement constante (tab. 3.3).

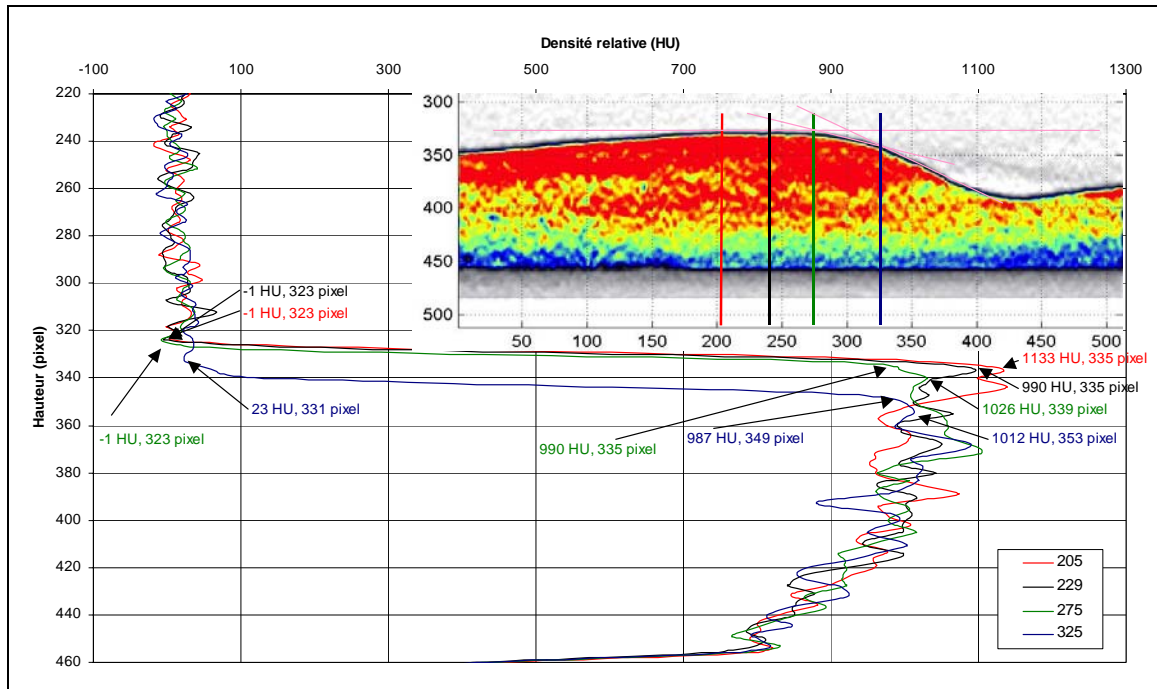


Fig. 3.25 – Profils de densité sur le sommet de la ride sableuse. L'image est une section d'une image de 512 X 512 pixels.

Tab. 3.3 – Résumé des profils de la figure 3.25.

Figure 3.25		Zone de suspension	Zone de charriage	Densité minimale	Densité maximale	Δ densité
Profil	205	Entre les pixels 300 et 323 Épaisseur de 13,86 mm.	Entre les pixels 323 et 335 Épaisseur de 7,23 mm.	-1 HU	990 HU	991 HU
Profil	229	Entre les pixels 300 et 323 Épaisseur de 13,86 mm.	Entre les pixels 323 et 335 Épaisseur de 7,23 mm.	-1 HU	990 HU	991 HU
Profil	275	Entre les pixels 300 et 323 Épaisseur de 13,86 mm.	Entre les pixels 328 et 339 Épaisseur de 9,64 mm.	-1 HU	1 026 HU	1 027 HU
Profil	325	Entre les pixels 300 et 331 Épaisseur de 18,68 mm.	Entre les pixels 331 et 353 Épaisseur de 13,26 mm.	23 HU	1 012 HU	989 HU

3.12.4. Du point bas vers le bas du flanc d'érosion

Sur la partie sommitale de la ride (fig. 3.26 et tab. 3.4), la fluctuation de densité de la couche de matériel migrant en suspension diminue, ce qui montre qu'à ce niveau peu de turbulence existe. Par contre, si les variations de densité restent identiques sur le sommet

où le matériel migre par charriage, la densité maximale diminue entre le point sommital 1092 HU ($2,116 \text{ g cm}^{-3}$) et le sommet de la ride 1053 HU ($2,077 \text{ g cm}^{-3}$). Une diminution de 39 HU existe, soit une diminution de $1,063 \text{ g cm}^{-3}$ de la densité durant le mouvement gravitaire. Ce type de mouvement entraîne un piégeage de l'eau dans le sédiment. Cette dernière se retrouve incluse dans la matrice sédimentaire.

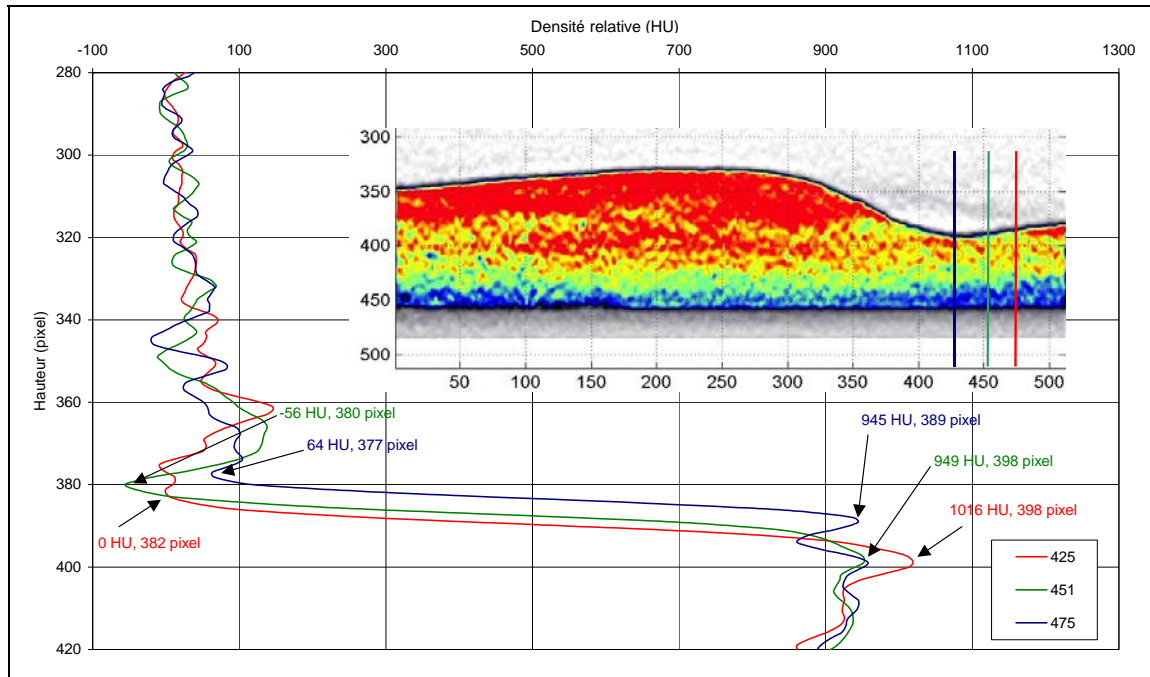


Fig. 3.26 - Profils verticaux de densité d'une ride, selon le sens du mouvement, du point bas vers le bas du flanc d'érosion. L'image est une section d'une image de 512 X 512 pixels.

Tab. 3.4 – Résumé des profils de la figure 3.26.

Figure 3.26		Zone de suspension	Zone de charriage	Densité minimale	Densité maximale	Δ densité
Profil	425	Entre les pixels 335 et 382 Épaisseur de 28,92 mm .	Entre les pixels 382 et 398 Épaisseur de 9,64 mm .	0 HU	1 016 HU	1 016 HU
Profil	451	Entre les pixels 342 et 380 Épaisseur de 22,90 mm .	Entre les pixels 380 et 398 Épaisseur de 10,85 mm .	64 HU	945 HU	881 HU
Profil	475	Entre les pixels 344 et 377 Épaisseur de 19,88 mm .	Entre les pixels 377 et 393 Épaisseur de 9,64 mm .	-56 HU	949 HU	1 005 HU

3.12.5. Sur le flanc d'avalanche

Sous un courant stationnaire, les profils de densité observés le long du flanc d'érosion mettent en évidence (fig. 3.27 et tab. 3.5) que la partie basale de la colonne d'eau présente une distribution similaire, d'un profil à l'autre, au-dessus des écailles de progradation. La densité maximale dans la couche de progradation est presque constante, entre 1010 et 1038 HU (2,034 et 2,062 g cm⁻³). Le profil du pixel 507 (fig. 3,27), situé au centre de la pente des écailles de progradation, présente couche dans laquelle une décroissance de la teneur en eau se produit dans la pente basale de la zone de charriage. Cette différence est probablement due à un transport gravitaire sur le front de progradation de la ride. Donc, durant une période de mouvement gravitaire formant l'écaille de progradation, la densité reste constante. Elle diminue par rapport à celle observée sur le sommet, car une certaine quantité d'eau est piégée par le mouvement gravitaire et l'arrangement des grains entre eux ne peut que très peu s'effectuer.

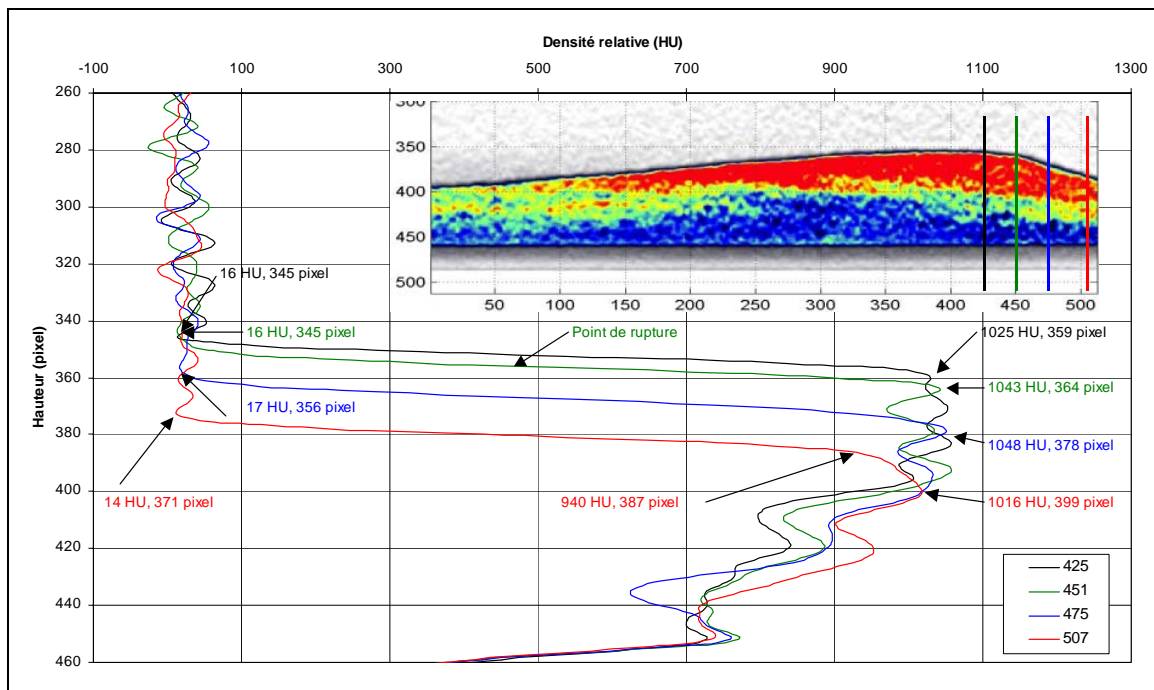


Fig. 3.27 - Profils verticaux de densité d'une ride, selon le sens du mouvement, sur le flanc d'avalanche. L'image est une section d'une image de 512 X 512 pixels.

Tab. 3.5 – Résumé des profils de la figure 3.27.

Figure 3.27		Zone de suspension	Zone de charriage	Densité minimale	Densité maximale	Δ densité
Profil	425	Entre les pixels 345 et 359 Épaisseur de 8,44 mm .	Entre les pixels 345 et 359 Épaisseur de 8,44 mm .	16 HU	1 025 HU	1 009 HU
Profil	451	Entre les pixels 345 et 364 Épaisseur de 11,45 mm .	Entre les pixels 345 et 365 Épaisseur de 12,05 mm .	16 HU	1 043 HU	1 027 HU
Profil	475	Entre les pixels 356 et 378 Épaisseur de 13,26 mm .	Entre les pixels 356 et 378 Épaisseur de 13,26 mm .	17 HU	1 048 HU	1 031 HU
Profil	507	Entre les pixels 371 et 399 Épaisseur de 16,87 mm .	Entre les pixels 371 et 399 Épaisseur de 16,87 mm .	14 HU	1 016 HU	1 002 HU

3.12.6. Sur le point de non retour et le point bas

En descendant le long du flanc de progradation , les densités entre le point de non retour (-67 HU, 0,957 g cm⁻³) et le point bas (-12 HU, 1,012 g cm⁻³) présentent une densité négative avec une inversion de la variation de l'épaisseur des couches de transport par suspension (10,85 à 8,44 mm) et de charriage (6,03 à 8,44 mm). La portion négative des profils indique une très forte turbulence dans laquelle de l'air correspondant probablement au vortex de densité faible, localisé à l'interstade. Il y a aussi une plus faible densité dans la couche qui capte beaucoup d'eau.

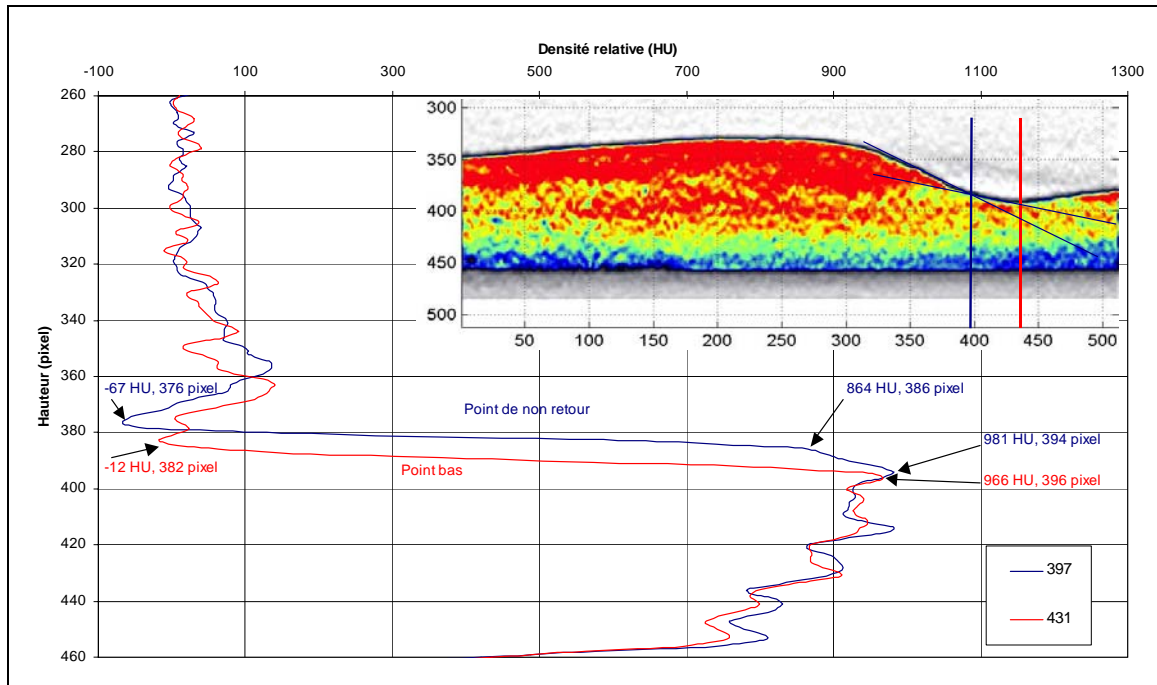


Fig. 3.28 – Profils de densité au point de non retour et au point bas de la ride sableuse. L'image est une section d'une image de 512 X 512 pixels.

Tab. 3.6 – Résumé des profils de la figure 3.28.

Figure 3.28		Zone de suspension	Zone de charriage	Densité minimale	Densité maximale	Δ densité
Profil	397	Entre les pixels 376 et 394 Épaisseur de 10,85 mm .	Entre les pixels 376 et 386 Épaisseur de 6,03 mm .	-67 HU	981 HU	1 048 HU
Profil	431	Entre les pixels 382 et 396 Épaisseur de 8,44 mm .	Entre les pixels 382 et 396 Épaisseur de 8,44 mm .	-12 HU	966 HU	978 HU

3.12.7. Pente des profils de densité et d'épaisseur des couches de transport

Le tableau 3.7 présente pour chaque profil de l'étude (PosPixel) des rides des fig. 3.18 à 3.23, les coordonnées (densité, pixel) des extrémités de la partie linéaire de la pente de charriage des profils. La pente de la zone de charriage du profil est calculée à partir des coordonnées (densité, pixel). L'épaisseur de la couche de transport par charriage est obtenue en multipliant le Δ pixel par la dimension d'un pixel (0,6025 mm). Le tableau 3.8 présente les mêmes calculs que le tableau 3.7, mais les coordonnées sont présentées aux points de densité minimale et maximale de la pente du profil de charriage. L'épaisseur de

la couche de transport par charriage est ici aussi calculée à partir du Δ pixel multiplié par 0,6025 mm.

Les calculs de la pente de la variation densimétrique de la couche de charriage et de l'épaisseur de la couche de transport sont réalisés sur la partie linéaire de la pente (tab. 3.7) et, ensuite sur la pente d'une extrémité à l'autre (tab. 3.8). Cela permet de distinguer l'épaisseur de la couche de transport par charriage de la concentration de sédiments dans le fluide. La couche de transport par charriage au bas du flanc d'érosion (1,81 mm) augmente sur le long du flanc d'érosion pour atteindre 4,22 mm. Elle diminue le long du flanc d'avalanche de 4,22 mm à 1,21 mm aux pieds du flanc de progradation. Les résultats sont similaires pour chacune des méthodes de calculs (tab. 3.7 et tab. 3.8).

Le calcul de l'épaisseur de la couche de transport par suspension (tab. 3.9) est réalisé en soustrayant le point où la courbe de densité de la colonne de fluide quitte la valeur de densité de l'eau à l'intérieure du canal (20 HU, $1,044 \text{ g cm}^{-3}$) et le second point de cette même courbe qui est déterminé en localisant le point où débute l'augmentation rapide de densité vers le sédiment (zone de transport par charriage). Le résultat est multiplié par 0,6025 mm/pixel. L'épaisseur de la couche de transport par suspension aux pieds du flanc d'érosion est de 24,70 à 30,13 mm. Elle diminue jusqu'au sommet de la ride sableuse (13,86 mm) pour ensuite augmenter légèrement sur le sommet (18,68 mm) et augmente ensuite dans la région du flanc de progradation (28,92 mm).

Tab. 3.7 - Calculs des pentes linéaires

	Pentes mesurées sur la section linéaire de la pente du profil et épaisseur de la couche de transport par charriage									
	Figure	PosPixel	HU 1	Pixel 1	HU 2	Pixel 2	Δ HU	Δ Pixel	Pente	Épaisseur
stoss-side bas	3.23	451	282	386	689	389	407	3	0,00737	1,81 mm
	3.23	475	311	382	719	385	409	3	0,00734	1,81 mm
	3.23	501	334	378	908	383	574	5	0,00871	3,01 mm
Long du stoss-side	3.24	11	105	348	865	354	760	6	0,00789	3,62 mm
	3.24	135	354	358	923	363	568	5	0,00880	3,01 mm
	3.24	271	306	374	829	380	523	6	0,01147	3,62 mm
	3.24	401	223	386	771	393	548	7	0,01277	4,22 mm
Sommet de la ride	3.25	205	179	327	969	332	790	5	0,00633	3,01 mm
	3.25	229	179	327	969	332	790	5	0,00633	3,01 mm
	3.25	275	127	328	898	333	771	5	0,00649	3,01 mm
Lee-side, stoss-side	3.26	325	145	340	736	345	591	5	0,00846	3,01 mm
	3.26	425	181	387	681	391	500	4	0,00800	2,41 mm
	3.26	451	382	386	689	389	307	3	0,00977	1,81 mm
Slippe-side	3.26	475	444	383	719	385	275	2	0,00727	1,21 mm
	3.27	425	228	350	920	356	692	6	0,00867	3,62 mm
	3.27	451	251	354	902	360	651	6	0,00922	3,62 mm
Toepts, troughs	3.27	475	193	364	840	371	647	7	0,01082	4,22 mm
	3.27	507	319	379	818	384	499	5	0,01003	3,01 mm
	3.28	397	113	380	740	384	627	4	0,00638	2,41 mm
	3.28	431	143	387	765	392	622	5	0,00804	3,01 mm
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 3.8 - Calculs des pentes par les extrémités.

	Pentes mesurées sur les extrémités et épaisseur de la couche de transport charriage									
	Figure	PosPixel	HU 1	Pixel 1	HU 2	Pixel 2	Δ HU	Δ Pixel	Pente	Épaisseur
stoss-side bas	3.23	451	137	375	1042	385	905	10	0,01105	6,03 mm
	3.23	475	118	380	896	387	778	7	0,00900	4,22 mm
	3.23	501	80	384	775	390	695	6	0,00863	3,62 mm
Long du stoss-side	3.24	11	105	348	1024	356	919	8	0,00871	4,82 mm
	3.24	135	145	355	1128	366	983	11	0,01119	6,63 mm
	3.24	271	148	371	939	382	791	11	0,01391	6,63 mm
	3.24	401	157	384	817	394	660	10	0,01515	6,03 mm
Sommet de la ride	3.25	205	100	326	898	332	798	6	0,00752	3,62 mm
	3.25	229	100	326	898	332	798	6	0,00752	3,62 mm
	3.25	275	100	328	898	333	798	5	0,00627	3,01 mm
	3.25	325	100	339	898	347	798	8	0,01003	4,82 mm
Lee-side, stoss-side	3.26	425	0	382	1016	398	1016	16	0,01575	9,64 mm
	3.26	451	-56	380	949	398	1005	18	0,01791	10,85 mm
	3.26	475	64	377	945	393	881	16	0,01816	9,64 mm
Slippe-side	3.27	425	71	348	920	356	849	8	0,00942	4,82 mm
	3.27	451	68	351	967	361	899	10	0,01112	6,03 mm
	3.27	475	79,5	362	895	372	815,5	10	0,01226	6,03 mm
	3.27	507	83	376	940	387	857	11	0,01284	6,63 mm
Toepts, troughs	3.28	397	23	378	865	386	842	8	0,00950	4,82 mm
	3.28	431	64	386	931	394	867	8	0,00923	4,82 mm
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 3.9 – Calculs de l'épaisseur de la couche de transport par suspension.

	Épaisseur de la couche de transport par suspension					
	Figure	PosPixel	Pixel 1	Pixel 2	Δ Pixel	Épaisseur
stoss-side bas	3.23	501	330	371	41	24,70 mm
	3.23	475	330	377	47	28,32 mm
	3.23	451	330	380	50	30,13 mm
Long du stoss-side	3.24	11	342	379	37	22,29 mm
	3.24	135	340	366	26	15,67 mm
	3.24	271	367	380	13	7,83 mm
	3.24	401	334	343	9	5,42 mm
Sommet de la rive	3.25	205	300	323	23	13,86 mm
	3.25	229	300	323	23	13,86 mm
	3.25	275	300	323	23	13,86 mm
	3.25	325	300	331	31	18,68 mm
Lee-side, stoss-side	3.26	425	335	383	48	28,92 mm
	3.26	451	342	380	38	22,90 mm
	3.26	475	344	377	33	19,88 mm
Slip-side	3.27	425	345	359	14	8,44 mm
	3.27	451	345	364	19	11,45 mm
	3.27	475	356	378	22	13,26 mm
	3.27	507	371	399	28	16,87 mm
Toepts, troughpts	3.28	397	376	394	18	10,85 mm
	3.28	431	382	396	14	8,44 mm
	-	-	-	-	-	

CHAPITRE 4 : DISCUSSION

4.1. Utilisation du scanographe

L'usage du scanographe a permis, pour la première fois, d'obtenir les profils de ride sableuse et les variations de densité à l'intérieur de la ride. Après plusieurs essais sur différents matériaux, il en ressort que les artéfacts de durcissement de faisceau, l'effet de volume partiel et l'effet Compton entraînent des erreurs dans la mesure des densités exactes. Par contre, les densités relatives mesurées en HU permettent d'obtenir une valeur juste de masse volumique en g cm^{-3} des variations de densité présentes dans la ride sableuse.

La technique utilisée pour vérifier la concordance des valeurs de densité HU avec la masse volumique g cm^{-3} consiste à analyser le sédiment seul déposé sur la table d'examen (500 HU, $1,524 \text{ g cm}^{-3}$). Le même sédiment est mesuré à l'intérieur du canal (520 HU, $1,544 \text{ g cm}^{-3}$). Les résultats sont comparés avec une mesure de densité à sec du volume de sable étudié. ($1,519 \text{ g cm}^{-3}$). Cette méthode n'est pas précise, mais elle permet d'obtenir une bonne appréciation de la densité réelle du mélange présent dans le canal. Une étude future permettra d'obtenir une équation de correction afin d'obtenir une valeur plus exacte et précise.

Le scanographe présentement en usage ne permet pas la prise de mesure sur de grand volume durant de très courts intervalles de temps. Les mesures dans un environnement Eulerien ne sont donc pas possibles en raison de l'échauffement de l'appareil. Par contre, le futur scanographe permettra de suivre une ride sableuse dans son évolution temporelle (4D). Cette étude est donc limitée à une analyse Lagrangienne des rides sableuses (3D). Enfin, il sera possible de modifier l'étalonnage du scanographe afin de l'adapter aux plages de densité présentes dans l'étude à réaliser et d'augmenter la résolution densimétrique des résultats.

4.2. Utilisation du canal

À partir des résultats obtenus avec le canal en boucle verticale, certaines lacunes apparaissent. En effet, le canal étant rectangulaire, l'effet Compton est très visible. De plus, l'asymétrie des parois cause un durcissement de faisceau affectant les coupes transversales du canal. Ce qui réduit la zone de mesure effective de 137,3 mm par 284,8 mm. La solution préconisée consiste à utiliser un canal de section circulaire centré dans l'axe du scanographe. Le parcours du faisceau de rayon-X sera toujours de même longueur réduisant ainsi l'effet Compton et les artefacts circulaires. Dans le but de suivre les rides sableuses sur une plus grande distance et d'éloigner la fenêtre de mesure des turbulences, il est nécessaire d'allonger le canal. Les dimensions présentées sont celles de l'*US Army Corps of Engineers* et elles n'utilisent pas le déplacement maximal du scanographe. Cette modification implique un accroissement de la masse du canal ce qui nécessite l'ajout de bras porteurs plus résistants et de supports supérieurs plus longs.

Afin de relier l'effet Compton et le durcissement de faisceau à l'aspect rectangulaire et asymétrique du canal, des mesures sans écoulement ont été réalisées sur une section de canal circulaire. Ces mesures ont révélées une réduction significative de l'effet Compton, du durcissement de faisceau et des artefacts circulaires. Les expérimentations futures devront être réalisées dans un canal entièrement circulaire et en utilisant la pleine course du scanographe.

4.3. Effet des parois du canal sur les mesures

L'analyse des mesures est réalisée uniquement dans la partie centrale de la coupe transversale du canal. Sur les parois latérales, la présence d'un effet de paroi influence le comportement hydrodynamique du fluide entraînant la formation de ride qui ne possède pas les caractéristiques de Reineck et Singh (1975). De plus, les résultats obtenus au bas de la colonne sédimentaire sont inutilisés, car ils sont influencés par le durcissement de faisceau de la paroi inférieure du canal. Néanmoins, à une distance supérieure à 10 mm des parois latérales, l'effet de paroi est diminué et les résultats sont considérés dans

l'analyse. Ceci procure une section utile de 137,3 mm par 284,8 mm. Aussi, la formation interne de la ride sableuse contient des dépôts de litage de précédentes rides, visibles à travers la paroi du canal.

4.4. Épaisseur de la couche sédimentaire

L'analyse de différent mode de déposition du sédiment, par râteau et gravitaire, sur le lit démontre que le profil de densité de la colonne sédimentaire résultant est de même forme que celle utilisé au dépôt par râteau. Le dépôt par râteau présente moins de couches de dépôt susceptible d'influencer le volume d'air emprisonné dans la ride. Afin d'éliminer l'effet de durcissement de faisceau de la paroi inférieure du canal, la colonne sédimentaire est négligée entre les pixel 425 et 450, pour une épaisseur de 15 mm. Pour obtenir les valeurs de densité exactes, les valeurs présentent dans cette plage nécessiteraient une correction tenant compte du durcissement de faisceau causé par la proximité de la paroi du canal.

4.5. Problématique de l'interface eau-sédiment

Un problème non résolu se présente sur le flanc de progradation de la ride sableuse, à l'interface entre l'eau et le sédiment. En effet, une couche de densité négative 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 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.

La présence d'air peut s'expliquer par certains phénomènes, soit la cavitation causée par la dépression due au changement de diamètre du canal, changement causé par la forme de la surface du lit sédimentaire; soit par l'emprisonnement dans les vortex de l'air présente à l'origine dans le lit sédimentaire; soit par un autre phénomène non identifié pour le moment. Ces phénomènes devront être étudiés avec précision afin de déterminer l'effet

de la vitesse du courant dans l'amplitude des vortex et ainsi déterminer si l'origine de l'air est indigène ou si elle est fonction du courant du fluide.

4.6. Évolution densimétrique

4.6.1 Zone de transport par suspension et par charriage

Les profils de densité obtenus pour des vitesses nulles (statique) procurent une courbure à l'interface eau-sédiment qui est utilisée pour l'analyse de la couche de transport par suspension. La courbure du profil statique est utilisée comme référence. Lorsque la vitesse du fluide est inférieure à 15 cm s^{-1} , la courbure demeure la même. Lorsque la vitesse du fluide devient supérieure à 15 cm s^{-1} , il y a initiation du transport sédimentaire par suspension et la courbure du profil se modifie. La courbure augmente en hauteur et en largeur, dans la colonne de fluide, en fonction de l'importance du transport. Ce phénomène de transport par suspension est visuellement observable dans le canal. Par contre, cette observation n'a pu être quantifiée. Il serait donc important de mesurer par laser la quantité de sédiments en suspension, ce qui permettra l'obtention d'une équation, indépendante du durcissement de faisceau, permettant d'établir la quantité de sédiments en suspension à partir des profils de densité.

Pour les vitesses supérieures à 30 cm s^{-1} , les profils de densité indiquent un transport sur toute la colonne de fluide. Ces résultats sont inutilisables car l'effet de la paroi supérieure, qui doit se comporter comme une surface libre, influence la colonne de fluide et, par le fait même, la colonne sédimentaire.

La pente des profils indiquant la zone de transport par charriage varie en amplitude et l'agitation du sédiment en surface de la ride augmente avec la pente du profil. Ici aussi, il serait important de mesurer par laser la quantité de sédiment en mouvement en surface de la ride, car ceci reliera la pente du profil au transport par charriage.

4.6.2 Épaisseur du transport par suspension

L'épaisseur de la couche de transport par suspension est maximale à la base du flanc de progradation et dans le bas du flanc d'érosion (~ 30 mm), zone où le sédiment de la ride précédente se dépose et où la ride suivante est érodée par les vortex. La couche de matériel en suspension diminue sur le sommet de la ride. Il y a donc déposition d'une partie du sédiment en suspension. Le sédiment forme ainsi les lamines de transport de la ride sableuse. C'est sur le sommet de la ride que l'épaisseur de la couche de transport par suspension est minimale (~ 13 mm). La couche restante indique un transport des grains sur plusieurs rides de distance.

4.6.3 Pente de la zone de charriage et profondeur du lit sédimentaire

L'analyse de la couche sédimentaire indique la présence d'air sur l'ensemble de la colonne sédimentaire et cet air demeure emprisonné jusqu'au remodelage de la partie active de la colonne sédimentaire par le fluide, qui se situe au-dessus du niveau du point bas. Le reste de la colonne sédimentaire, quoi qu'inactive, montre une migration de l'air vers la surface et le long des couches horizontales de déposition initiale du sédiment.

La couche de sédiment présente une densité supérieure dans le haut de la colonne sédimentaire. Ce phénomène, observé dans la zone de charriage, est fonction de la concentration en eau dans le sédiment, et donc de la porosité entre les grains de la colonne sédimentaire. En effet, les grains formant la couche supérieure de sédiments situés sous la couche de transport par charriage, sont vraisemblablement tassés mécaniquement les uns contre les autres, formant une couche de grains plus compacte et ainsi plus dense. Dans une prochaine étude, il serait nécessaire de faire un carottage et de l'observer au microscope afin d'examiner l'arrangement des grains. L'étude du pourcentage de sédiments présente dans l'eau démontre bien le phénomène. La présence d'air peut être éliminée par mélange de l'eau et du sédiment. Par contre, des lits sédimentaires naturels présentent de l'air dans la colonne sédimentaire, c'est pourquoi l'air emprisonnée, dans la colonne sédimentaire a été laissé en place.

4.6.4 Épaisseur du transport par charriage

L'épaisseur de la couche de transport par charriage est maximale le long du flanc de progradation et dans le bas du flanc d'érosion (~ 10 mm), zone où le sédiment de la ride précédente se dépose par gravité ou par glissement (zone du flanc d'avalanche) et où la ride suivante est érodée par les vortex, l'épaisseur de la zone de charriage est de l'ordre de 5 mm. Ceci laisse entrevoir que le transport par suspension est maximal et le charriage minimal, ce qui serait caractéristique des vortex. La couche de charriage diminue (~ 4 mm) sur le sommet de la ride où il y a accumulation du sédiment. C'est sur le sommet de la ride que l'épaisseur des couches de transport en suspension et par charriage sont minimales. Elles sont respectivement de 13 mm et 4 mm. Ceci concorde avec le mécanisme de formation et de migration des rides sableuses définies par Reineck et Singh (1975). Par contre, la présence d'air dans le mélange eau-sédiment reste à approfondir.

4.6.5 Pointe de densité maximale du profil de densité

La densité maximale présente dans les profils de densité indique probablement la présence d'une fine couche de transport par traction. Le tassement des grains et la faible teneur en eau du sédiment dans cette couche explique une mesure de densité plus élevée et elle correspond à l'arrangement le plus poussé qui puisse être effectué par le sédiment consolidé.

4.6.6 Variation de densité dans l'axe Z

L'analyse des profils de densité dans l'axe Z (latérale) de la ride démontre une constance dans la forme de la ride. Par contre, une variation de la densité de la colonne sédimentaire varie en fonction des formations gazeuses emprisonnées dans les couches des écailles de progradation. Ceci tend à démontrer que l'air présente dans les vortex demeure emprisonné dans les formations de la ride.

Une variation dans la hauteur de la ride, pour un même axe de profil, indique que la crête de la ride est de forme sinusoïdale. Cette forme est directement reliée à l'effet des parois du canal sur le gradient de vitesse du fluide. Par contre, pour cette étude, seule la vitesse moyenne est prise en compte.

4.6.7 Point maximum

L'analyse des résultats indique la présence d'un nouveau point, de densité maximale, qui apparaît sur le flanc d'érosion de la ride sableuse. Elle démontre, sur plusieurs rides sableuses, que le point maximum se localise le long du flanc d'érosion et se situe où la lamine de transport atteint son épaisseur maximale. La localisation de ce point est donc fonction de la forme de la ride et particulièrement la courbure du dos de la ride. La densité de surface maximale est probablement reliée aux pressions hydrauliques exercées sur le dos de la ride ce qui impliquerait que la hauteur d'une ride serait fonction de la vitesse du courant. Ceci expliquerait pourquoi, pour une vitesse déterminée, les rides atteignent une hauteur optimale. La densité augmente jusqu'au point maximum, qui correspond aussi à une réduction de la pente du dos de la ride. Après ce point, la densité décroît jusqu'au flanc de progradation et montre quelques fluctuations sur le point de rupture, point où débute le flanc d'avalanche. Ces comportements sont probablement reliés aux caractéristiques hydrauliques du canal qui devront être étudiées plus en profondeur et ceci pour exclure l'effet canal du comportement de la ride sableuse.

4.6.8 Point sommital et zone sommitale

Le profil (pixel 205) de la figure (3.25) présente deux maximum à 990HU ($2,014 \text{ g cm}^{-3}$), ce qui indique que le transport par traction s'effectue en deux couches dans la zone d'aggradation. Cette double couche se caractérise par une pente en début de zone de charriage et une autre à l'autre extrémité de la pente de charriage. La signature ou l'effet d'un dépôt ancien est à exclure, car les sédiments concernés sont au-dessus du niveau moyen des sédiments à l'origine de la ride, ils ont donc été remaniés. Le point sommital, profil du pixel 229 (fig. 3.25), est similaire au profil du pixel 205 (fig. 3.25), ce qui

indique que toute la zone sommitale est concernées. Cette zone est caractérisée par le changement de pente de la ride sableuse et indique un mode de transport probablement par accrétion au-dessus d'une zone progradante. Ce travail devra être approfondi dans une étude ultérieure.

4.7. Amélioration technique du canal

Une simplification des futures études dans le canal est possible en modifiant le lit sédimentaire du présent canal (fig. 4.1). Le lit sédimentaire devra être modifié par l'ajout d'une section en forme de bassin d'une profondeur de 30 mm. Le sédiment est déposé dans cette section jusqu'au niveau zéro. Cette modification réduit le changement de vitesse entre la section circulaire et la section rectangulaire (lit sédimentaire). Cette modification éviterait une accélération du fluide à proximité de la zone de mesure. De plus, les perturbations présentes dans les premiers centimètres du lit sédimentaire devraient être éliminées et ainsi réduire la distance du régime transitoire.

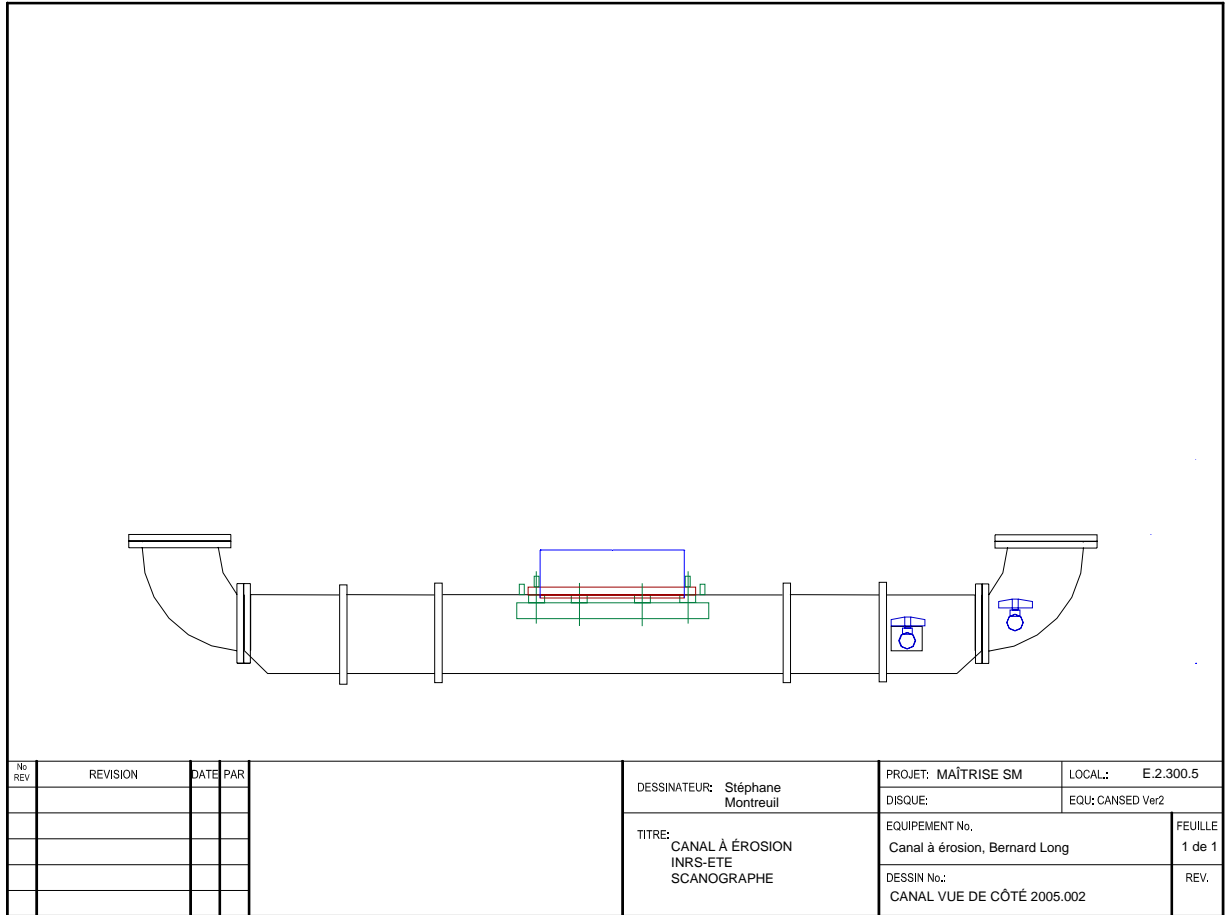


Fig. 4.1 – Schéma de la section rectangulaire inférieure modifiée du canal, zone du lit sédimentaire abaissée de 30 mm.

CONCLUSION

Ce travail préliminaire permet de caractériser le transport sédimentaire en 3D du matériel sableux sous un courant stationnaire. Les différents stades du déplacement ont été mis en évidence pour un type de sédiment et une vitesse de courant.

Le principe utilisé, le rayon X, procure une image en 3D de laquelle sont extraits des profils de densité relative ou de masse volumique. La plage de densité obtenue pour l'air et l'ossature, soit -1024 à 3071 HU, pourra être, dans le futur, optimisé par un nouvel étalonnage eau et sédiment de -1024 à 3071 HU permettant ainsi une résolution densimétrique adaptée aux matériels utilisés.

Les artefacts inhérents au système utilisé peuvent être mis à contribution dans l'analyse avec l'effet de volume partiel, qui tient lieu de filtre à l'interface. Par contre, le durcissement de faisceau demande une équation de correction qui tient compte de l'épaisseur des parois et du parcours du rayon X. Il pourrait néanmoins être calculé empiriquement, au repos, en utilisant plusieurs types de sédiments secs, saturés ou à partir de carotte.

Les caractéristiques sédimentologiques de Reineck et Singh (1975) ont permis d'établir le vocabulaire de référence nécessaire à l'étude, de mettre en évidence l'importance de chacun des points et des couches et de déterminer un nouveau point de densité maximale, là où la lamine de transport est à son épaisseur maximum.

Les images scanographiques d'une ride permettent, pour la première fois, d'observer le litage au cœur de la ride et cela sans affecter le système. Pour mieux analyser les profils de densité de la ride, un environnement scanographique a été mis en place. Il définit la zone de transport par suspension, par charriage et par traction. Cet environnement délimite les zones de transport permettant d'en définir l'épaisseur tout au long de la ride. Les mesures révèlent que le transport par suspension est élevé (~ 30 mm) au niveau du flanc de progradation et diminue en épaisseur le long du flanc d'érosion (~ 13 mm). Le

transport par charriage montre un comportement similaire (~10 mm à ~4 mm) au transport en suspension, ce qui indique une migration sur le long de la lamine de transport. L'épaisseur de la couche jumelée à l'augmentation de densité indique la présence d'un transport par traction. Le sédiment ainsi acheminé sur le sommet de la ride de déverse le long du flanc d'avalanche. La présence de vortex contenant de l'air (HU négative) dans la partie inférieure du flanc d'érosion explique la grande quantité de sédiments en suspension. En effet, c'est dans cette zone où la concentration de sédiments en suspension est la plus importante. Elle diminue ensuite le long du flanc d'érosion pour atteindre son minimum sur la partie sommitale de la ride. Au-delà de la partie sommitale de la ride (point sommital), le sédiment du sommet de la ride est entraîné sur le flanc d'avalanche et forme les écailles de progradation. Ce milieu est très dynamique car quelques millimètres plus loin, le flanc d'érosion de la ride suivante est érodée. L'analyse de la variation de densité horizontale, axe Z, indique une continuité dans l'érosion de la partie sommitale de la ride et une migration de l'air emprisonné dans le litage sédimentaire.

Afin de préciser de manière plus fine ces processus, il est recommandé 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. Ensuite, un réservoir pour le sédiment devrait être ajouté afin de réduire les turbulences causées par le changement de vitesse du courant. Ce dernier est provoqué par la réduction de la section du canal, qui est déterminée par la présence du sédiment.

Enfin, des essais hydrodynamiques devraient être réalisés afin d'évaluer les performances d'un canal de section entièrement circulaire et centrée sur l'axe de rotation du scanographe.

L'utilisation combinée d'un canal en boucle verticale et d'un scanographe a permis de réaliser une expérience innovatrice. Cette approche doit être prolongée afin de pouvoir établir des équations de transport en courant stationnaire pour différent type de sédiments et différents courants. Ces expériences devraient être aussi effectuées en courant

transitoire. De plus, une définition plus juste des environnements scanographiques peut être obtenue en combinant des mesures par laser du sédiment en suspension ou en combinant de nouvelle innovation en matière de transport sédimentaire.

Enfin, la même expérience devrait être refaite afin de vérifier les travaux présentés.

RÉFÉRENCES

- ACR-NEMA (2004). DICOM : *Digital imaging and communication in medicine*. En ligne. <http://medical.nema.org/>.
- Aïtcin, Pierre-Claude, 1983. *Technologie des granulats*. Édition du Griffon d'argile, Sainte-Foy, 372 p.
- Ambardar Ashok, 1999. *Analog and digital processing 2nd ed.* Brooks/Cole, Pacific Grove.
- Controlotron Corporation (2006). *Field manual system 1010N NEMA 4X*, Hauppauge NY, 229 p.
- Flood John (1997). *Ultrasonic Flowmeter Basics*, Sensors Magazine Online, Saddle Brook.
- Jaafar W, Fisher S. and Bekkour K. (2001). *Mesures de turbulence par vélocimétrie ultrasonore Doppler pulse dans un fluide chargé*, Strasbourg.
- Kak A. C. and Slaney M. (1999). *Principles of computerized tomographic imaging*, IEEE PRESS, New York, 329 p.
- Ketcham R.A. and Carlson W.D. (2001). *Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences*, Computers & Geosciences 27 (2001) p.381– 400.
- Knoll, Glenn F. (1989). *Radiation detection and measurement*, Wiley, New York, 754 p.
- Ligier, Y. (2004). *Osiris imaging software*.
En ligne. <http://www.expasy.org/www/UIN/html1/projects/osiris/osiris.html>.
- Mari J.L., Glangeaud F. and Coppens F., (2001). *Traitement du signal pour géologues et géophysiciens techniques de base 2*, Ed Masson, Paris.
- Moore, Francis. (2004). *Application de la scanographie R. X. à l'étude de la sédimentation-consolidation : modélisation physique et théorique*, INRS Eau, Terre et Environnement. Québec.
- Ouellet Yvon, (2002), *Analyse spectrale note de cours*. INRS-ETE, Québec.

- Reineck H.-E. and Singh I.B. (1975). *Depositional Sedimentary Environments*, Springer study edition, New York, 439 p.
- Scheck and al, (1988). *Radiation dose and image quality in spiral computed tomography: multicentre evaluation at six institution*, The British Journal of Radiology.
- Siemens, (2000). *Volume Access/Volume Zoom planning guide*.
- Siemens, *Online operator manual Volume Access*, (2001).
- Snyder and Hesselink, (1985). *High speed optical tomography for flow visualisation*, Applied optics Vol. 24, No 23.
- Schneider Uwe, Pedroni Eros and Lomax Antony (1996). *The calibration of CT Hounsfield units for radiotherapy treatment planning*, Phys. Med. Biol. 41 (1996) 111–124.
- Teeter Allen M., Brister Doug, Parman Joe W. and Coleman Clara J. (1999). *Ashtubula River, Ohio, Sedimentation Study, Report 3, Erosion Experiments on Bed Sediments*, US Army Corps of Engineers, Buffalo, 45 p.
- Teeter Allen M. and Pankow Walter (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.
- Vaninier and al, (1985). *Three-dimensional surface reconstruction for industrial computed tomography*, Applied optics Vol. 24, No 23.
- Yalin, Mehmet Selin, (1977). *Mechanics of sediment transport 2nd Edition*, Pergamon of Canada Ltd, Toronto, Ontario, Canada. 298 p.

ANNEXE A – CALCUL DE LA MASSE DU CANAL

Tab. A.1 – Calcul de la masse du canal, de l'acrylique, de l'eau et des accessoires.

Volume intérieur du canal				
2	Cylindres	9.5 pcs	48.0 pcs	
		0.2 m	1.2 m	
		Volume cylindre =		0.1115 mètre cube
2	Rectangles	12.0 pcs	6.0 pcs	102.0 pcs
		0.3 m	0.2 m	2.6 m
		Volume rectangulaire =		0.2407 mètre cube
		Volume total du canal =		0.3522 mètre cube
				352.2 Litres
Masse d'eau à 24 C		351.50 kg		
Masse moteur		18.60 kg		
Masse supports d'acier		11.79 kg		
Arbre hélice		8.16 kg		
Raccords		0.91 kg		
Boulon et écrou		7.04 kg		
Volume de l'acrylique				
2	Cylindres	9.5 pcs	48.0 pcs	
		10.5 pcs	48.0 pcs	
		0.2 m	1.2 m	
		0.3 m	1.2 m	
		Volume cylindre =		0.024711334 mètre cube
2	Rectangles	12.0 pcs	6.0 pcs	102.0 pcs
		13.0 pcs	7.0 pcs	102.0 pcs
		0.3 m	0.2 m	2.6 m
		0.3 m	0.2 m	2.6 m
		Volume rectangle=		0.063516835 mètre cube
32	Renforts 1	0.5 pcs	16.0 pcs	1.5 pcs
32	Renforts 2	0.5 pcs	7.0 pcs	1.5 pcs
		0.0127 m	0.4064 m	0.0381 m
		0.0127 m	0.1778 m	0.0381 m
		Volume renfort =		0.009046 mètre cube
		Volume d'acrylique total		0.1158 mètre cube
Masse Acrylique		115.76 kg		
Masse Totale =		513.76 kg		

ANNEXE B – PHOTOGRAPHIE D'UNE RIDE EN MOUVEMENT



Fig. B.1 – Photographie numéro 1 de 20.



Fig. B.4 – Photographie numéro 4 de 20.



Fig. B.2 – Photographie numéro 2 de 20.



Fig. B.5 – Photographie numéro 5 de 20.



Fig. B.3 – Photographie numéro 3 de 20.



Fig. B.6 – Photographie numéro 6 de 20.



Fig. B.7 – Photographie numéro 7 de 20.



Fig. B.10 – Photographie numéro 10 de 20.



Fig. B.8 – Photographie numéro 8 de 20.



Fig. B.11 – Photographie numéro 11 de 20.



Fig. B.9 – Photographie numéro 9 de 20.



Fig. B.12 – Photographie numéro 12 de 20.



Fig. B.13 – Photographie numéro 13 de 20.



Fig. B.16 – Photographie numéro 16 de 20.



Fig. B.14 – Photographie numéro 14 de 20.



Fig. B.17 – Photographie numéro 17 de 20.



Fig. B.15 – Photographie numéro 15 de 20.



Fig. B.18 – Photographie numéro 18 de 20.



Fig. B.19 – Photographie numéro 19 de 20.



Fig. B.20 – Photographie numéro 20 de 20.

ANNEXE C - GRANULOMÉTRIE DES SÉDIMENTS

Deux sables de granulométrie différente sont utilisés comme sédiments. Les courbes granulométriques sont réalisées en respectant la norme NQ-2560-040, Aïtcin (1983).

Pour la mise en oeuvre initiale du canal et la mesure visuelle (photographique) des rides de sable, un sable de la Formation d'Ottawa de couleur rose ayant un diamètre médian d_{50} de 130 μm est utilisé (fig. C.1). Le temps de formation, la forme et la vitesse de déplacement des rides sont mesurés pour différents courants.

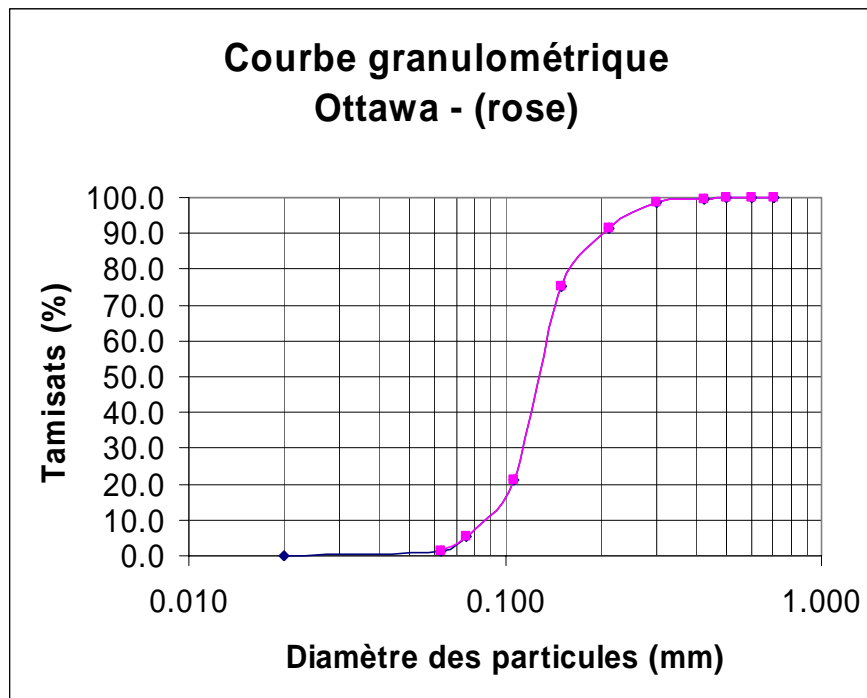


Fig. C.1 - Courbe granulométrique du sable d'Ottawa utilisé pour valider le canal et le scanographe.

Pour l'expérimentation principale, un sable C-109 de la compagnie Accusand, caractérisé comme étant du quartz blanc chimiquement pur possédant un d_{50} de 300 μm et une

densité sous forme compacte et à sec de 1569 à 1602 kg m⁻³ (annexe D), est utilisé. La courbe granulométrique (fig. C.1) réalisé sur le C-109 indique un diamètre médian d₅₀ de 370 µm soit un sable moyen.

L'analyse densimétrique du C-109 immergé dans de l'eau à 24 °C indique une densité relative du mélange eau-sédiment entre 900 et 1100 HU (1,924 et 2,124 g cm⁻³). Cet écart est représentatif de la porosité du sable.

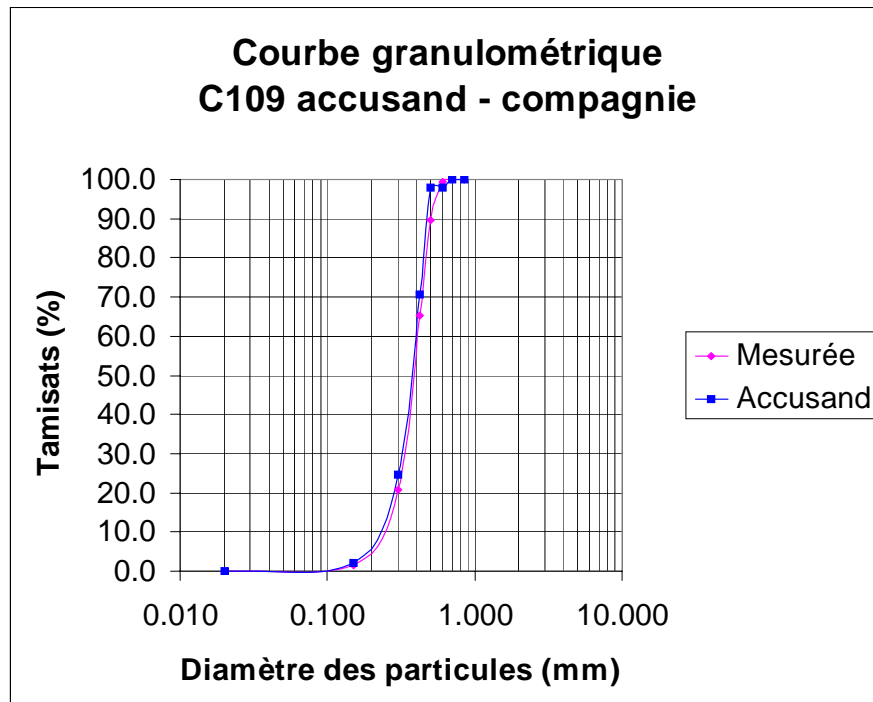


Fig. C.2 - Courbes granulométriques du sable C-109 utilisé pour l'étude des rides sous le scanographe.

ANNEXE D – SPÉCIFICATIONS DU SABLE C-109 D'ACCUSAND

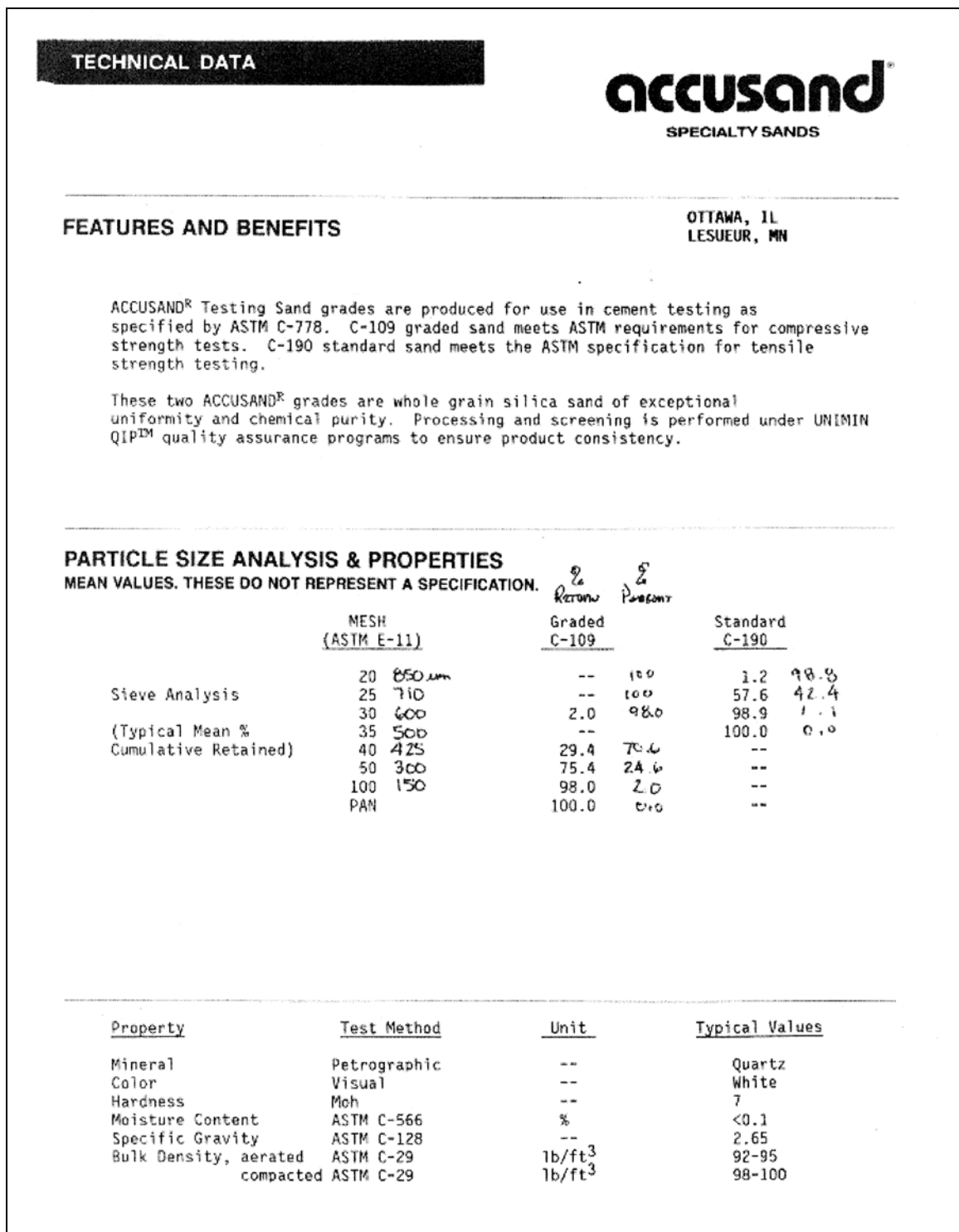


Fig. D.1 – Caractéristiques du sable C-109.

ANNEXE E - PROGRAMME DE TRAITEMENT DES IMAGES DICOM DANS MATLAB

Programme Matlab E.1 - Générateur de profils compressés de 512 à 256 colonnes

```
function Traitement = densite_moyen_image_coupee_V4
% Stephane Montreuil
% Institut national de la recherche scientifique eau, terre et
% environnement
% Octobre 2004
% Programme d'analyse mars 2005
% Mise en tableur des densités d'une image DICOM
%***** initialisation
clc;
clear;
pack;
SUPER_Matrice_densite_reelle = ones(1024,256);
warning off Images:genericDICOM;
%***** gestion des noms de fichier
nom_du_fichier_in = input('Nom du fichier entrée ? :','s')
for inc_nom = 5:5,
    inc_nom_char = num2str(inc_nom);
    nom_du_fichier = strcat(nom_du_fichier_in,inc_nom_char);
    Extension_graph = ' DATA ';
    Extension_fig_dicom_full = 'figDICOM full';
    Extension_fig_dicom_coupee = ' figDICOM coupee';
    Extension_fig_HU = ' courbeHU';
    Nom_de_fichier_fig_dicom_full = strcat(nom_du_fichier,Extension_fig_dicom_full);
    [Xmatrice_image, map] = dicomread(nom_du_fichier);
    info = dicominfo(nom_du_fichier);
    m = 1; n = 1; I = 1; J = 1; II = 1; JJ= 1; n2 = 0; Y = 0; YY = 0; Z = 0; III=0; JJJ=0;
    for II = 1:512,
        for JJ = 1:256,
            Xmatrice_image2(II,JJ) = Xmatrice_image(II,JJ);
        end %for
    end %for
end %for
```



```

end %for
for II = 1:512,
    for JJ = 257:512,
        III = II+512;
        JJJ = JJ-256;
        Xmatrice_image2(III,JJJ) = Xmatrice_image(II,JJ);
    end %for
end %for
%***** Genere la SUPER matrice *****
SUPER_Matrice_densite_reelle = Xmatrice_image2;
% Écriture du fichier de sortie des valeurs de la courbe
Nom_de_fichier_graphDATA = strcat(nom_du_fichier,Extension_graph);
wk1write(Nom_de_fichier_graphDATA,SUPER_Matrice_densite_reelle);
end % for
beep;

```

Programme Matlab E.2 - Traceur de surface du sédiment

```

%////////////////////////////////////
%/ INRS-ETE 880 Ste-Foy
%/ Modifié 25 février 2005 par SM
%/Stéphane Montreuil : stephane_montreuil@inrs-ete.quebec.ca
%/Recherche la surface et forme un fichier WK1
%***** initialisation
close(gcf);
pack;
clear;
ligne = 0;
lookformax = ones(25,1);
warning off Images:genericDICOM;
repertoire = pwd;
if repertoire(end) ~= '\'
    repertoire = [repertoire,'\'];
end
MatriceStructureDir = dir(repertoire);
%On commence a trois pour enlever les repertoires '.' et '..'

```

```

for i = 3:size(MatriceStructureDir,1)
    %On lit le fichier DICOM, si pas DICOM on continue au suivant
    try
        infostruct=dicominfo(MatriceStructureDir(i).name);
        infostruct.WindowWidth;
        nom_du_fichier = strcat(MatriceStructureDir(i).name)
        [Xmatrice_image, map] = dicomread(nom_du_fichier);
        Xmatrice_image = double(Xmatrice_image);
        for offsetI = 1:512,
            for offsetJ = 1:512,
                Matrice_constante(offsetI,offsetJ) = 1024;
            end %for
        end %for
        Matrice_constante = double(Matrice_constante);
        Xmatrice_image_real = Xmatrice_image - Matrice_constante;
        %//////////////////// find interface
        %////////////////////
        for colonne = 1:512
            %largeur de la radio
            for ligne = 100:400 % bits de hauteur
                next_ligne = ligne + 6;
                diff_matrix = Xmatrice_image_real(next_ligne,colonne) -
Xmatrice_image_real(ligne,colonne);% difference entre les valeurs
                if diff_matrix > 300 % recherche DELTA plus grand que 100HU
                    traceur(colonne,1) = ligne;
                    for a = 1:20
                        lignea = ligne+a;
                        lookformax(a,colonne) = Xmatrice_image_real(lignea,colonne);
                    end % épaisseur de 25 sur l'interface
                    ligne = 400; % termine la boucle while
                end %if
            end %while
        end %for
        matrice_max = max(lookformax);
        matrice_max = rot90(matrice_max);
        matrice_max = rot90(matrice_max);
        matrice_max = rot90(matrice_max);
    
```

```

windowSize = 5;
matfilter = filter(ones(1,windowSize)/windowSize,1,traceur)
figure(1);
plot(matfilter);grid;
set(gca,'YDir','reverse')
figure(2);
plot(traceur);grid;
set(gca,'YDir','reverse')
wklwrite('matrice_max',matrice_max);
wklwrite('traceur_surface',traceur);
% Écriture du fichier de sortie des valeurs de la courbe
figure(3)
plot(matrice_max);grid;
catch
    lasterr
end %try
end %for

```

Programme Matlab E.3 - Extracteur de densité maximale en surface de la ride

```

%/Stéphane Montreuil : stephane_montreuil@inrs-ete.uquebec.ca
%/Extrait les densités maximales à l'interface et les regroupe dans un fichier wkl
%//////////////////////////////////////////////////////////////////
%***** initialisation
close(gcf);
pack;
clear;
ligne = 0;
lookformax = ones(25,1);
warning off Images:genericDICOM;
repertoire = pwd;
if repertoire(end) ~= '\'
    repertoire = [repertoire,'\'];
end
MatriceStructureDir = dir(repertoire);
%On commence a trois pour enlever les repertoires '.' et '..'

```

```

for i = 3:size(MatriceStructureDir,1)
    %On lit le fichier DICOM, si pas DICOM on continue au suivant
    try
        infostruct=dicominfo(MatriceStructureDir(i).name);
        infostruct.WindowWidth;
        nom_du_fichier = strcat(MatriceStructureDir(i).name)
        [Xmatrice_image, map] = dicomread(nom_du_fichier);
        Xmatrice_image = double(Xmatrice_image);
        for offsetI = 1:512,
            for offsetJ = 1:512,
                Matrice_constante(offsetI,offsetJ) = 1024;
            end %for
        end %for
        Matrice_constante = double(Matrice_constante);
        Xmatrice_image_real = Xmatrice_image - Matrice_constante;
        %//////////////////// find interface
        %////////////////////
        for colonne = 1:512
            %largeur de la radio
            for ligne = 100:400 % bits de hauteur
                next_ligne = ligne + 6;
                diff_matrix = Xmatrice_image_real(next_ligne,colonne) -
Xmatrice_image_real(ligne,colonne); % difference entre les valeurs
                if diff_matrix > 300 % recherche DELTA plus grand que 100HU
                    traceur(colonne,1) = ligne;
                    for a = 1:20
                        lignea = ligne+a;
                        lookformax(a,colonne) = Xmatrice_image_real(lignea,colonne);
                    end % épaisseur de 25 sur l'interface

                    ligne = 400; % termine la boucle while
                end %if
            end %while
        end %for
        matrice_max = max(lookformax);
        matrice_max = rot90(matrice_max);
        matrice_max = rot90(matrice_max);

```

```

matrice_max = rot90(matrice_max);
windowSize = 5;
matfilter = filter(ones(1,windowSize)/windowSize,1,traceur)
figure(1);
plot(matfilter);grid;
set(gca,'YDir','reverse')
figure(2);
plot(traceur);grid;
set(gca,'YDir','reverse')
wklwrite('matrice_max',matrice_max);
wklwrite('traceur_surface',traceur);
% Écriture du fichier de sortie des valeurs de la courbe
figure(3)
plot(matrice_max);grid;
catch
    lasterr
end %try
end %for

```

Programme Matlab E.4 - Générateur de fichier index d'un groupe d'image DICOM

```

function fichierListe = generationListeCoupesDicom2(repertoire)
%/ INRS-ETE 880 Ste-Foy 27 aout 2004
%/ Création 10 février 2005 par Jacques Labrie
%/ Modifié 17 février 2005 par SM
%/ Modifié 25 février 2005 par SM
%/Jacques Labrie : jacques_labrie@inrs-ete.quebec.ca
%/Stéphane Montreuil : stephane_montreuil@inrs-ete.quebec.ca
%/ Programme de generation dans un fichier texte des
%/ fichiers dicom contenus dans un repertoire donné.
%/ Une classification des fichiers inscrits doit etre fait
%/ Modifiée generer fichier avec
%/ nom fichier date heure dicom et slice position
%/ Retourne le nom complet du fichier écrit
%/////////////////////////////////////
%/Pour utiliser sans trop a avoir a taper de nom de repertoire

```

```

% 1) au command line de Matlab taper : cd e:\
%On est a la base.
%2) Ensuite taper encore cd suivi d'un espace et appuyer sur TAB pour avoir la
%complétion des fichiers/repertoires disponibles dans le repertoire
%courant.
%commencer a taper les premieres lettres du repertoire que vous voulez et
%ré-appuyer sur TAB
%Refaites cette meme opération jusqu'a ce que vous ayez le nom du
%repertoire au complet
%3) Faites ENTER pour lancer la commande cd avec tout le nom de repertoire
%bien inscrits apres
%4) Lancez la fct generationListeCoupesDicom(pwd)
%pwd etant pour present working directory. la fct est lancée avec le nom du
%repertoire correctement inscrits.
%Si cette erreur apparait :
%??? Error using ==> fclose
%Invalid fid.
%Error in ==> E:\generationListeCoupesDicom.m
%On line 43 ==> fclose(fid);
%C'est que la fonction est executee dans un repertoire qui contient deja un
%fichier nomme TimeNamePosCommentDICOM.txt !!!! Effacer avant SVP
repertoire=pwd;
if repertoire(end) ~= '\'
    repertoire = [repertoire,'\'];
end
MatriceStructureDir = dir(repertoire);
fid = fopen('TimeNamePosCommentDICOM.txt','w');
%On commence a trois pour enlever les repertoires '.' et '..'
for i = 3:size(MatriceStructureDir,1)
    %On lit le fichier DICOM, si pas DICOM on continue au suivant
    try
        infostruct=dicominfo(MatriceStructureDir(i).name);
        %On ecrit dans le fichier, format nom fichier "tab" heure d'acquisition hh:mm:ss
        %"TAB" slice position
        fprintf(fid, strcat(num2str(infostruct.StudyTime(1:2)),':',num2str(infostruct.StudyTime(3:4)),':',num2str(infostruct.StudyTime(5:6)),\t',MatriceStructureDir(i).name,\t',\r',\n));
    catch

```

```

        lasterr
    end %try
end %for
fichierListe = strcat('TimeNamePosCommentDICOM.txt')
fclose(fid);
beep;

```

Programme Matlab E.5 - Générateur d'images couleurs

```

function b1 = Gen_axes_DICOM_V1;
% Traceur d'image couleur
% Stephane Montreuil
% Institut national de la recherche scientifique eau, terre et
% environnement
%
clear;
warning off Images:genericDICOM;
% ***** initialisation
% dlmwrite('test.iii',couleur,'\t')
% *****
DefColour = dlmread('kit_de_couleur_a_Steph5.RGB', '\t');
colormap(DefColour);
hauteur = 25;
inc_nom = 1;
nom_du_fichier_in = input('Nom du fichier entrée ? :','s')
for inc_nom = 1:1,          % plage de numero de fichier
    inc_nom_char = num2str(inc_nom);
    nom_du_fichier = strcat(nom_du_fichier_in,inc_nom_char);
    [Xmatrice_image] = dicomread(nom_du_fichier);
    info = dicominfo(nom_du_fichier);
    for I = 1:512,
        for J = 1:512,
            Matrice_constante(I,J) = 1024;
        end
    end
end
Xmatrice_image=double(Xmatrice_image);
Xmatrice_image_offset=Xmatrice_image-Matrice_constante;

```

```
figure(1);
CLIM =[0 1024];
figure(1);
imagesc(Xmatrice_image_offset,CLIM);
TITLE([' ref : ',nom_du_fichier]);GRID;
colorbar;
saveas(gcf, nom_du_fichier, 'jpg');
end
```


ANNEXE F – PROTOCOLE D'INSTALLATION DU CANAL SOUS SCANOGRAPHE

F.1. Procédure

La mise en place du canal demande le suivi d'une procédure afin d'éviter les bris et les fuites. La procédure décrite est celle utilisée pour les expérimentations de ce travail.

- 1) Préparation
 - i) Nettoyage des joints d'étanchéité et graissage au silicone des joints. **IL EST IMPORTANT DE METTRE DE GANTS** car le silicone retire l'adhérence de vos mains.

- 2) Fixation des supports de la section rectangulaire supérieure au pont roulant
 - i) Lors du boulonnage des supports, ne pas écraser le câble électrique qui circule sur la poutrelle du pont roulant.



Fig. F.1 – Attaches de fixation du canal au pont roulant.

- 3) Installation des coudes de la partie supérieure, réalisée en atelier.

- i) Mettre en place des joints d'étanchéité préalablement nettoyés et graissés
- ii) Boulonner les joints en débutant par le serrage de trois boulons décalés de 120° . Répéter l'opération avec un autre jeu de boulons. Ceci évitera de serrer d'un seul côté et de casser le joint par torsion.



Fig. F.2 – Boulons du canal.

- 4) Installation de la section rectangulaire supérieure
 - i) Mettre en place de la section sur le statif coulissant (fig. F.3) en n'oubliant pas de placer un carton protecteur afin de ne pas endommager le dessus du scanographe.



Fig. F.3 – Fixation et partie supérieure du canal.

- ii) Positionner et aligner les supports avec le pont roulant

- iii) Mettre en place des tiges filetées qui s'insèrent dans le support de la section rectangulaire et les supports attachés au pont roulant.
- iv) Positionner de la section afin que les tiges filetées soient verticales et ensuite ajuster la hauteur de la section pour obtenir un espacement de 2 cm entre la composante la plus basse du support de la section et le dessus du scanographe.
- v) Cadenasser le sectionneur (fig. F.4) qui alimente le pont roulant, localisé sur le mur gauche près de la fenêtre.



Fig. F.4 – Support d'appoint et table d'examen.

- 5) Étalonnage du scanographe, c'est à ce moment que début la période de mesure d'une durée de 48 heures avant le prochain étalonnage, qui nécessite le retrait de la partie inférieure du canal.
- 6) Positionnement du support d'appoint et de la table d'examen
 - i) Retirer la table d'examen. Cette opération nécessite deux personnes car le support doit être **déposé directement** sur les rails de glissement du bras porteur.



Fig. F.5 – Support d'appoint et table d'examen.

- 7) Installation des coudes de la partie inférieure
 - i) Mettre en place des joints d'étanchéité préalablement nettoyés et graissés
 - ii) Boulonner les joints en débutant par le serrage de trois boulons décalés de 120° . Répéter l'opération avec un autre jeu de boulons. Ceci évitera de serrer d'un seul côté et de casser le joint par torsion.

- 8) Installation de la partie inférieure sur la table d'examen
 - i) Mettre en place de la section inférieure (fig. F.6 et F.7) en évitant tout torsion de la structure. Contrairement à la fig. (F.6) l'installation de la section inférieure doit être réalisé avant l'installation du dispositif de drainage.



Fig. F.6 – Partie inférieure de canal avant assemblage.

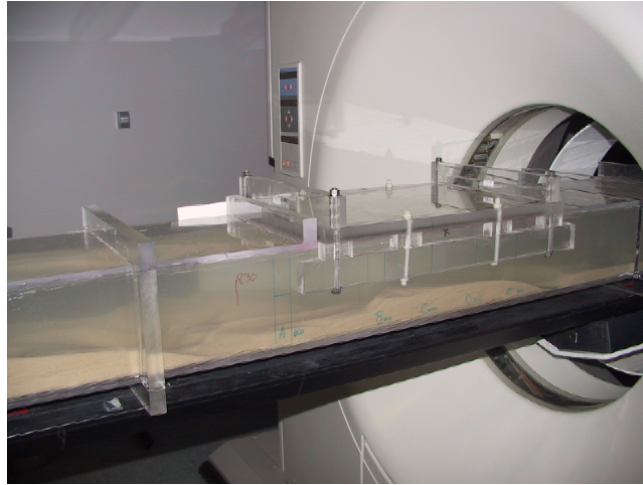


Fig. F.7 – Partie inférieure de canal après la mise en place.

- ii) Mettre en place des cales sur la semelle du support arrière ainsi que le pied de support auxiliaire.
 - iii) Mettre l'ensemble de la structure au niveau dans les trois axes.
- 9) Installation du tube vertical de mesure
- i) Mettre en place les joints d'étanchéité préalablement nettoyés et graissés
 - ii) Boulonner les joints en débutant par le serrage de trois boulons décalés de 120° . Répéter l'opération avec un autre jeu de boulons. Ceci évitera de serrer d'un seul côté et de casser le joint par torsion.
 - iii) Installer le capteur Doppler
 - (a) Mettre de la graisse pour système ultrasonique sur les parois du canal qui feront contact avec les capteurs. Positionner les capteurs et l'index en plaçant le capteur marqué UP en haut. Attacher les capteurs avec des bandes élastiques. Ne pas effectuer le raccordement électrique.



Fig. F.8 – Capteur Doppler monté sur le canal.

10) Installation du tube vertical de propulsion



Fig. F.9 – Tube vertical et moteur.

- i) Mettre en place les joints d'étanchéité préalablement nettoyés et graissés
- ii) Installer l'arbre à hélice dans le coude en laissant l'arbre dépasser vers le haut.

- iii) Mettre en place le tube vertical et laisser redescendre l'arbre à hélice et positionner le dans le support d'arbre inférieur.
 - iv) Boulonner les joints en débutant par le serrage de trois boulons décalés de 120°. Répéter l'opération avec un autre jeu de boulons. Ceci évitera de serrer d'un seul côté et de casser le joint par torsion.
 - v) Installer le support supérieur de l'arbre à hélice
 - vi) Vérifier que la rotation se fait librement
 - vii) Installer la poulie sur l'arbre à hélice et n'oubliant pas la clé et le chemin de clé nécessaire au blocage de la poulie sur l'arbre.
- 11) Descente de la partie supérieure sur la partie inférieure
- i) Installer des joints d'étanchéité du bas des tubes verticaux de propulsion et de mesure.
 - ii) Surveiller l'alignement
 - iii) Installer des boulons guides, utiliser trois boulons ordinaire et les pré placer dans leur emplacement afin de guider la mise en place.
 - iv) Cette opération est la plus critique. La table d'examen doit être positionnée afin que l'axe centrale du scanographe coïncide avec le centre du canal. Ensuite, descendre à l'aide des tiges filetées la partie supérieure sur la partie inférieure. En cour d'exécution, compenser l'affaissement de la table d'examen avec le support d'appoint. Vous devez impérativement déposer les parties de façon symétrique pour ne pas causer de contrainte mécanique sur le canal.

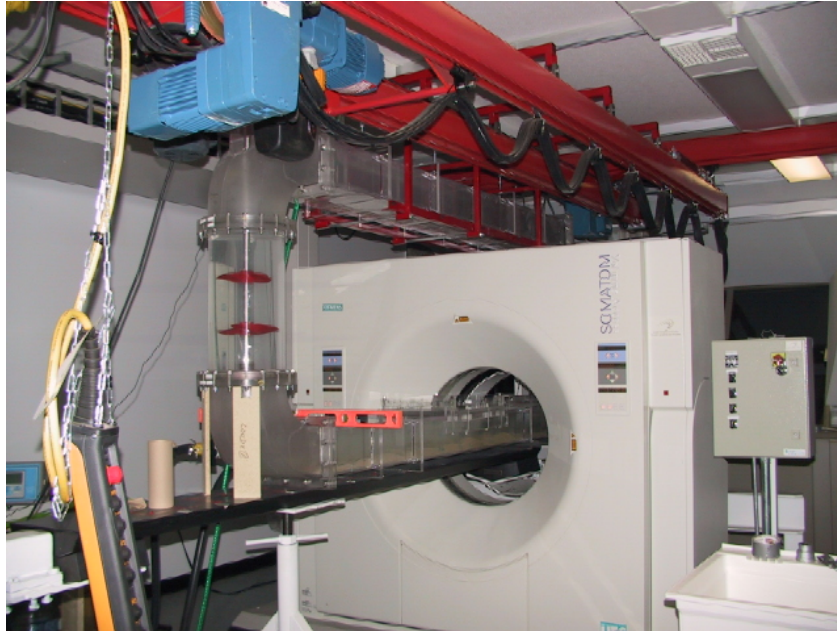


Fig. F.10 – Canal assemblé dans le scanographe.

- v) Boulonner des deux tubes avec la section inférieure. Assurez vous que les deux parties du canal reposent uniformément les une sur les autres. Boulonner les joints en débutant par le serrage de trois boulons décalés de 120° . Répéter l'opération avec un autre jeu de boulons. Ceci évitera de serrer d'un seul côté et de casser le joint par torsion.
- 12) Installation du support du moteur sur le pont roulant
- i) Installer la fixation du moteur au pont roulant en vous assurant de ne pas endommager le câble électrique qui circule à proximité.
- 13) Installation du moteur
- i) Installer le moteur à la fixation du moteur et ensuite fixer les deux parties du support de moteur pour compléter l'installation. ATTENTION le moteur est lourd et difficile à manipuler.



Fig. F.11 – Tube vertical et moteur.

- 14) Installation du variateur de vitesse, fig. F.12
- i) Attacher à l'aide de corde ou de bande élastique le variateur de vitesse au bras de support de la table d'examen.
 - ii) Mise sous tension, utiliser une alimentation 120Volts 60Hz avec une mise à la terre.
 - iii) Vérification du sens de rotation. Si le sens de rotation n'est pas adéquat, inverser les conducteurs d'alimentation du moteur (A_1 et A_2) dans le variateur de vitesse.
 - iv) Mettre en place de la courroie. La tension optimale de la courroie est obtenue lorsque une pression manuelle sans effort entre les deux courses de la courroie déplace la courroie de 1,5 cm.
 - v) Réaliser un essai de rotation et vérifier de la présence de vibration. La vibration indique une mauvais alignement entre la poulie du moteur et celle du canal.



Fig. F.12 – Variateur de vitesse raccordé moteur.

15) Installation du courantomètre Controlotron



Fig. F.13 – Courantomètre Controlotron.

- i) Raccorder les dispositifs électriques.
 - (a) Capteur Doppler. Raccorder les deux câbles coaxiaux en respectant l'ordre pour le capteur du haut et du bas.
 - (b) Alimentation électrique. Brancher le courantomètre dans une fiche 120 Volts 60Hz

- (c) Communication RS-232. Relier le courantomètre à l'ordinateur à l'aide d'un câble DB-9 d'une longueur maximale de 8 m et ayant la configuration série RS-232
 - (d) Attention à l'emplacement des conducteurs. Les conducteurs de mesures ne doivent en aucun cas croiser ou suivre les conducteurs d'alimentation.
- ii) Mettre en place la configuration (« *setup* ») INRS1. Consulter le manuel d'utilisation pour de plus ample information
 - iii) Lancer le logiciel Hyperterminal.
 - (a) Utiliser hyperterminal afin d'enregistrer les données transmises en temps réel par le courantomètre, configuration : (Fig. F.14 et F.15).

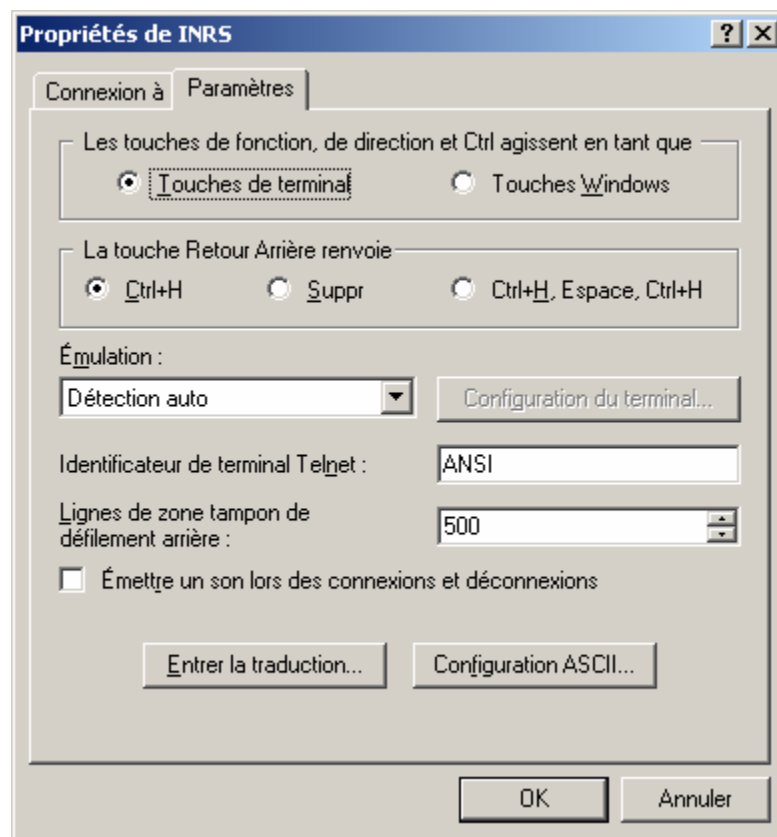


Fig. F.14 – Fenêtre de configuration Hyperterminal pour la communication avec le courantomètre Controlotron.

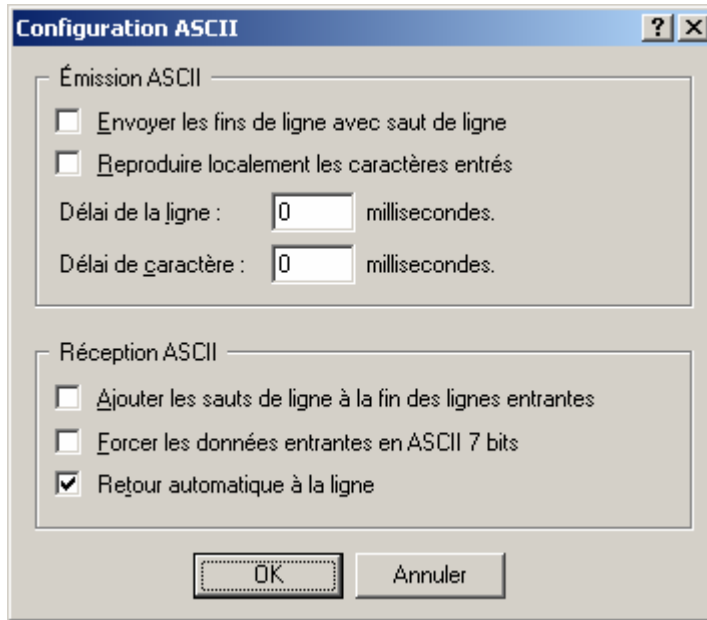


Fig. F.15 – Fenêtre de configuration du mode ASCII dans Hyperterminal pour la communication avec le courantomètre Controlotron.

- 16) Installation du conduit d'arrivée d'eau dans le tube de mesure et remplissage situé sur le dessus du canal. Il est important de retirer le bouchon lors de l'opération du canal.

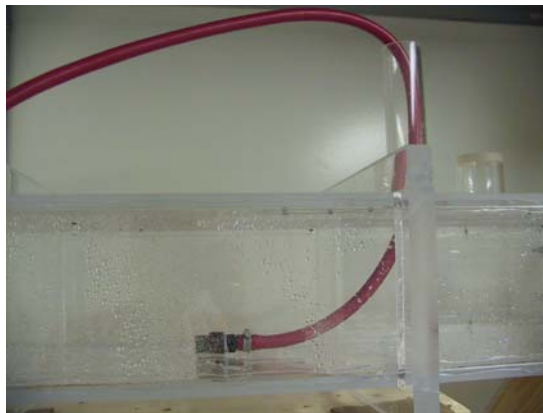


Fig. F.16 – Conduit de remplissage/lavage dans le tube de mesure sur la partie supérieure du canal.

17) Installation des conduits de drainage

- i) L'installation doit être réalisée en suivant l'ordre d'assemblage qui consiste à assembler le drain d'évacuation dans le plancher du laboratoire (fig. F.17) en se dirigeant vers les deux conduits verticaux de fin de ligne (fig. F.18). NE PAS COLLER LES JOINTS un serrage modéré des joints est suffisant car la pression est négligeable. L'installation de l'évier se fait à la fin et en respectant le décalage de niveau des plancher.



Fig. F.17 – Raccordement au réseau du drainage de surface.



Fig. F.18 – Dispositif de drainage de surface.



Fig. F.19 – Vannes du dispositif de drainage.

- 18) Retrait de la vis de purge pneumatique située sur le dessus du canal, sur le bouchon étanche dans la tête de l'arbre à hélice.
- 19) Remplissage initial par volume successif afin de vérifier s'il y a des déformations de la structure du canal et l'apparition de fuite au niveau des coudes.
- 20) Vérification en continu des fuites et des contraintes mécaniques
 - i) Réparer les fuites s'il y a lieu. Pour la réparation, vidanger le canal jusqu'au bas du point de fuite, colmater sur la ligne de fuite et remplir en surveillant la qualité de votre travail.
- 21) Test de propulsion et évacuation de l'air
 - i) Vidanger l'air par la vis de purge à l'opposée à l'arbre d'hélice.
 - ii) **REMETTRE CETTE VIS POUR L'OPÉRATION DU CANAL.**
- 22) Vérification du courantomètre
 - i) Lorsque le canal est rempli, mettre le moteur en marche et vérifier la présence d'une lecture sur l'afficheur du courantomètre. L'absence de lecture est liée à un mauvais raccordement des capteurs Doppler ou à un

manque de lubrifiant entre les capteurs Doppler et la paroi du canal. Une valeur anormalement élevée est entraînée par un défaut d'installation de l'index des capteurs Doppler.

- 23) Vidange du fluide
 - i) Utiliser les vannes de 2,5 cm de diamètre

- 24) Retraite de la trappe d'accès au sédiment pour la mise en place du sédiment à étudier.
 - i) Retirer les boulons de nylon en premier, les nettoyer et les ranger.
 - ii) Retirer les boulons de métal en dernier, les nettoyer et les ranger.

- 25) Mise en place du sédiment
 - i) Utiliser un râteau pour déplacer le sédiment sur l'ensemble de la surface du lit sédimentaire par la trappe d'accès (fig. F.20). NE PAS placer plus d'un demi sac de sable (25 kg) à la fois dans la trappe d'accès et ceci afin de ne pas trop charger un seul endroit du canal. ATTENTION les parois d'acryliques sont coupantes et peuvent entraîner les blessures.



Fig. F.20 – Trappe d'Accès, sédiments et outil de travail.

- 26) Installation de la trappe d'accès au sédiment

- i) Nettoyer le contour de la trappe
 - ii) Nettoyer et graisser le joint d'étanchéité avec de la graisse silicone
 - iii) Nettoyer le siège de la trappe pour retirer le sédiment renversé au remplissage
 - iv) Installer et serrer les boulons de métal et assurer vous que les berceaux qui travers le canal sont du bon sens.
 - v) Installer et serrer les boulons de nylon sans appliquer une pression exagérée. Resserrer à nouveau s'il y a une fuite.
- 27) Remplissage avec vérification de l'étanchéité de la trappe
- i) Surveiller les fuites et le cas échéant, vérifier le sens des berceaux et resserrer les boulons de métal puis les boulons de nylon.
- 28) Remplissage complet avec vérification de l'étanchéité générale
- i) Refaire les étapes 20 à 22.
- 29) Retrait de l'outillage
- 30) Mise en oeuvre
- i) Libérer l'espace de circulation du statif coulissant
 - ii) Il est important de libérer l'ensemble du plancher du statif coulissant et de la surface de circulation dans le laboratoire. Mesurer aussi la limite physique du statif car se dernier NE DOIT PAS entrer en collision avec le support de métal installé sous la table d'examen.

F.2. Évacuation du fluide

L'installation du canal dans le laboratoire de scanographie implique un volume de 352 litres d'eau dans un laboratoire dépourvu d'installation sanitaire. Un évier et des bouches

de drainage amovibles sont installés en surface. Ce drain est en mesure d'évacuer 200% du volume de fluide généré par la vidange par deux vannes du canal. L'évier permet de vidanger les conduits lors du démantèlement du canal.



Fig. F.21 - Dispositif de drainage de surface avec évier.