



**HAL**  
open science

# Etude expérimentale de la dynamique sédimentaire d'un système à forte pente soumis à des conditions hydrauliques faibles

Vito Bacchi

► **To cite this version:**

Vito Bacchi. Etude expérimentale de la dynamique sédimentaire d'un système à forte pente soumis à des conditions hydrauliques faibles. Sciences de la Terre. Université de Grenoble, 2011. Français. NNT : 2011GRENU020 . tel-00625381

**HAL Id: tel-00625381**

**<https://theses.hal.science/tel-00625381>**

Submitted on 21 Sep 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## THÈSE

Pour obtenir le grade de

## DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Science de la Terre et Univers, Environnement**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

**Vito BACCHI**

Thèse dirigée par **Mohamed NAAIM** et  
codirigée par **Alain RECKING**

préparée au sein du **Laboratoire CEMAGREF**  
dans l'**École Doctorale TERRE UNIVERS ENVIRONNEMENT**

# Etude expérimentale de la dynamique sédimentaire d'un système à forte pente soumis à des conditions hydrauliques faibles

Thèse soutenue publiquement le **23 Juin 2011**,  
devant le jury composé de :

**Monsieur, François, METIVIER**

Professeur, Université Paris Diderot (Président du jury, Rapporteur)

**Monsieur, Aronne, ARMANINI**

Professeur, Università degli Studi di Trento – Italia (Examineur)

**Monsieur, Dieter, RICKENMANN**

Professeur, WSL – Suisse (Rapporteur)

**Monsieur, Jonathan, LARONNE**

Professeur, Ben-Gurion University of the Negev – Israel (Examineur)

**Monsieur, Mohamed, NAAIM**

Directeur de Recherche, Cemagref de Grenoble (Directeur de Thèse)

**Monsieur, Alain, RECKING**

Chercheur, Cemagref de Grenoble (Encadrant)

**Monsieur, Frey, PHILIPPE**

Chercheur, Cemagref de Grenoble (Encadrant)





## SOMMAIRE

<b>RESUME .....</b>	<b>7</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>11</b>
<b>PARTIE 1 : BIBLIOGRAPHIE ET PROTOCOLE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>15</b>
<b>1. CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>17</b>
1.1. TRANSPORT SOLIDE PAR CHARRIAGE A FORTE PENTE .....	17
1.1.1. <i>Le principe d'équilibre .....</i>	17
1.1.2. <i>Généralités sur le transport solide par charriage .....</i>	18
1.1.3. <i>Loi de frottement et loi de transport : spécificités aux fortes pentes .....</i>	22
1.2. LE TRI GRANULOMETRIQUE : OBSERVATIONS .....	26
1.2.1. <i>Formes de fond .....</i>	26
1.2.2. <i>Les fluctuations de transport solide.....</i>	31
1.2.3. <i>Tri granulométrique à forte pente : dynamique sédimentaire et morphologies associées.....</i>	33
1.3. MODELISATION DU TRI GRANULOMETRIQUE.....	38
1.3.1. <i>Introduction .....</i>	38
1.3.2. <i>Modélisation empirique : masquage, surexposition et mobilité équivalente .....</i>	39
1.3.3. <i>Modélisation physique.....</i>	42
1.4. UN APPROFONDISSEMENT DES RESULTATS PLUS RECENTS .....	44
1.4.1. <i>Le concept d'efficacité de transport pour un système à granulométrie étendue.....</i>	44
1.4.2. <i>Un schéma conceptuel pour décrire les fluctuations de débit solide et de pente : Recking et al. 2009.....</i>	46
1.4.3. <i>La modélisation par compartiments : Recking (2006).....</i>	48
<b>2. CHAPITRE 2 : PROTOCOLE EXPERIMENTAL.....</b>	<b>51</b>
2.1. LA PLATEFORME EXPERIMENTALE.....	51
2.1.1. <i>Présentation générale du dispositif.....</i>	51
2.1.2. <i>Les matériaux utilisés .....</i>	52
2.1.3. <i>Le dispositif d'alimentation solide.....</i>	54
2.2. LE DISPOSITIF DE MESURE DU DEBIT SOLIDE PAR ANALYSE D'IMAGES .....	55
2.2.1. <i>Description de l'installation expérimentale pour la prise d'images en sortie du canal .....</i>	55
2.2.2. <i>Procédure d'acquisition et méthode d'analyse d'images .....</i>	57
2.2.3. <i>Procédure de calcul du débit solide et de la granulométrie .....</i>	58
2.3. GRANULOMETRIE ET MORPHOLOGIE DU LIT.....	60
2.3.1. <i>Généralités sur l'échantillonnage granulométrique.....</i>	61
2.3.2. <i>Les différentes méthodes pour la détermination de la granulométrie de surface.....</i>	62
2.3.3. <i>L'échantillonnage par photographie et le logiciel Digital Gravelometer<sup>TM</sup>.....</i>	64
2.3.4. <i>Test du logiciel Digital Gravelometer<sup>TM</sup>.....</i>	65
2.4. MESURES DE DEBIT LIQUIDE, PENTE ET VITESSE DE SURFACE DE L'ECOULEMENT.....	68
2.4.1. <i>Mesures de débit liquide .....</i>	68
2.4.2. <i>Mesures de la pente locale et de la pente moyenne du lit.....</i>	69
2.4.3. <i>Mesure de la vitesse de l'écoulement.....</i>	70
2.5. CHOIX D'ALIMENTATION CONSTANTE OU RECIRCULATION .....	71
2.5.1. <i>Conditions expérimentales.....</i>	71
2.5.2. <i>Résultats.....</i>	72
2.5.3. <i>Phénomènes observés .....</i>	75
2.5.4. <i>Analyse des résultats.....</i>	77
2.5.5. <i>Conclusion .....</i>	80
<b>PARTIE 2 : DYNAMIQUE A L'EQUILIBRE .....</b>	<b>81</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>83</b>
<b>3. CHAPITRE 3 : EXPERIENCE A FAIBLE TRANSPORT .....</b>	<b>87</b>

3.1. OBSERVATIONS DE LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE DU SYSTEME .....	88
3.1.1. <i>Bed-clusters et seuils dans le système</i> .....	90
3.1.2. <i>Pavage à forte pente et nappes de charriage</i> .....	93
3.1.3. <i>Synthèse sur les observations</i> .....	95
3.2. ANALYSE DES RESULTATS .....	97
3.2.1. <i>Généralités</i> .....	97
3.2.2. <i>Hydraulique du système</i> .....	98
3.2.3. <i>Pente et débit solide</i> .....	100
3.2.4. <i>Granulométrie de surface</i> .....	102
3.2.5. <i>Analyse locale : corrélation entre la pente, le débit solide et la granulométrie de surface</i> .....	105
3.2.6. <i>Conclusions</i> .....	108
3.3. ESSAI D'INTERPRETATION DE LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE .....	108
3.3.1. <i>Introduction</i> .....	108
3.3.2. <i>Echelles spatiales et temporelles des phénomènes érosifs observés dans le cas de l'expérience à « Faible Transport »</i> .....	108
3.3.3. <i>Analyse quantitative des familles d'érosions observées</i> .....	112
3.4. APPLICATION DU MODELE A COMPARTIMENTS A L'EXPERIENCE « FAIBLE TRANSPORT ».....	113
3.5. CONCLUSION GENERALE POUR L'EXPERIENCE A « FAIBLE TRANSPORT » .....	116
<b>4. CHAPITRE 4 : EXPERIENCE A FORT TRANSPORT .....</b>	<b>117</b>
4.1. OBSERVATIONS EXPERIMENTALES.....	118
4.2. ANALYSE DES RESULTATS .....	123
4.2.1. <i>Hydraulique du système</i> .....	123
4.2.2. <i>Pente Moyenne et Débit Solide</i> .....	125
4.2.3. <i>Evolution dans le temps de la Granulométrie de Surface</i> .....	129
4.2.4. <i>Corrélation entre la pente, la granulométrie de surface et le débit solide</i> .....	131
4.3. ESSAI D'INTERPRETATION DE LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE .....	133
4.3.1. <i>Les « nappes de charriage » comme mode principal de transport pour l'expérience « Fort Transport »</i> .....	133
4.3.2. <i>Un scénario pour calculer l'Amplitude de fluctuation du système</i> .....	137
4.4. APPLICATION DU MODELE PAR COMPARTIMENTS A « FORT TRANSPORT » .....	139
4.5. CONCLUSIONS POUR L'EXPERIENCE « FORT TRANSPORT » .....	142
<b>CONCLUSION DE LA PARTIE 2.....</b>	<b>144</b>
<b>PARTIE 3 : DYNAMIQUE HORS EQUILIBRE .....</b>	<b>153</b>
<b>CHAPITRE 5 : DYNAMIQUE HORS EQUILIBRE .....</b>	<b>155</b>
4.6. INTRODUCTION .....	155
4.7. CAS 1 : UN SYSTEME EN PHASE D'AGGRADATION.....	156
4.7.1. <i>Introduction et conditions expérimentales</i> .....	156
4.7.2. <i>Observations expérimentales</i> .....	156
4.7.3. <i>Résultats expérimentaux</i> .....	156
4.7.4. <i>Analyse du phénomène d'aggradation</i> .....	161
4.7.5. <i>Analyse des résultats : comportement différencié amont-aval</i> .....	163
4.7.6. <i>Analyse des résultats : débit solide</i> .....	166
4.7.7. <i>Conclusions</i> .....	168
4.8. CAS 2 : L'INFLUENCE DE SEUILS DE CORRECTION TORRENTIELLE SUR LA DYNAMIQUE DU SYSTEME....	169
4.8.1. <i>Introduction et conditions expérimentales</i> .....	169
4.8.2. <i>Observations expérimentales</i> .....	171
4.8.3. <i>Résultats globaux : pente et débit solide</i> .....	172
4.8.4. <i>Comparaison avec l'expérience à Fort Transport</i> .....	175
4.8.5. <i>Conclusions</i> .....	182
4.9. CONCLUSION GENERALE DE L'ETUDE HORS-EQUILIBRE .....	184
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>185</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>187</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>198</b>
<b>ANNEXE1 : COMPARAISON ENTRE LA METHODE DE COMPTAGE DES PARTICULES ET LE LOGICIEL DIGITALGRAVELOMETER™ .....</b>	<b>199</b>

**ANNEXE 2 : MESURES DE DEBIT SOLIDE CORRESPONDANT AUX PENTES MAXIMALE ET MINIMALE OBSERVEES AU COURS DE L'EXPERIENCE *FAIBLE TRANSPORT*..... 207**

**ANNEXE 3 : PENTE MOYENNE, DEBIT SOLIDE ET GRANULOMETRIE DE SURFACE MESURES EN PHASE DE REDEMARRAGE DANS LE CADRE DE L'EXPERIENCE *FORT TRANSPORT* . 209**



## RESUME

---

Cette thèse, à dominante expérimentale, tente de décrire, de comprendre et de quantifier le transport sédimentaire pour un système torrentiel caractérisé par une forte pente et des conditions hydrauliques faibles.

Une plateforme expérimentale a été mise en place et instrumentée. Elle permet de contrôler quatre paramètres du système : la pente du canal, le débit hydraulique, le débit solide et la granulométrie. La durée des expériences est suffisamment longue pour couvrir l'ensemble des fluctuations gouvernant le transport.

L'étude de l'évolution d'un même mélange granulaire soumis à un forçage hydraulique *fort*, ( $Shield = 1.37$   $Shield$  critique) ou à un forçage hydraulique *faible* ( $Shield = 0.94$   $Shield$  critique) a permis de mettre en évidence, au sein des structures sédimentaires observées, deux classes de comportement différentes.

Pour l'expérience à *Faible Transport*, le lit est globalement pavé au cours de la durée de l'expérience qui est de 110 heures. Des structures de type step-pools sont présentes et très stables, et contrôlent la dynamique de transport du système à court terme et à long terme. A court terme, le transport solide n'est pas uniforme mais s'effectue à travers des processus transitoires d'érosion et de dépôt « de proche en proche », associés respectivement à la destruction et à la formation de step-pools dans le système. A long terme, les step-pools conduisent à un pavage uniforme sur l'ensemble du canal. Des destructions périodiques de ce pavage de surface sont également observées et sont associées à une capacité de transport pour le système pouvant atteindre jusqu'à 15 fois le débit solide moyen.

Pour l'expérience à *Fort Transport*, d'une durée de 92 heures, la morphologie du lit fluctue entre deux états extrêmes. Un lit plat dont la surface est formée de particules fines, à forte capacité de transport et un lit pavé à forte pente et à faible capacité de transport. Les step-pools ne sont, ici, que des états éphémères associés à la phase de transition du système qui sont rapidement détruits par les nappes de charriage. Ces dernières sont le mode principal de transport pour le système et expliquent les évolutions cycliques mesurées à court et à long terme.

Enfin, nous avons étudié les conséquences des phénomènes décrits ci-dessus en conditions hors équilibre à forte pente. Nous avons pour cela réalisé deux expériences : une première expérience où nous étudions le cas d'un système en phase d'aggradation et une seconde où nous prenons le cas d'un système contrôlé par deux seuils de correction torrentielle. La première a nécessité une longue période afin que le système atteigne une condition d'équilibre dynamique : plus que 210 heures. L'équilibre local du système est atteint progressivement de l'amont vers l'aval, les parties les plus proches de l'alimentation atteignant en premiers l'état d'équilibre. De plus, pendant l'aggradation les fluctuations du système autour de la moyenne sont inférieures à celles mesurées pour un système à l'équilibre. La seconde expérience a montré que l'aménagement d'un système torrentiel avec des seuils peut avoir un impact non négligeable sur la quantité maximum de matériau transporté au cours d'un seul événement. Néanmoins, l'intensité maximale instantanée du transport et le comportement global du système à long terme ne sont en rien affectés par la présence de seuils.





## ABSTRACT

---

This experimental thesis aims to describe, understand and quantify the sediment dynamics of a torrential system, characterized by steep slope and low hydraulic conditions.

An experimental platform has been developed and instrumented for monitoring the channel slope, the water discharge, the feed solid discharge and the bed grain size distribution. The duration of the experiments were sufficiently long to cover all the fluctuations governing the bedload transport phenomenon.

Two flow conditions were considered, in order to observe the bed dynamic under different forcing. A strong hydraulic forcing capable to move the bed pavement (Shield parameter = 1.37 Critical Shield parameter) was compared to a low hydraulic forcing supposed to not disturb the bed pavement (Shield Parameter = 0.94 Critical Shield Parameter). We measured for each case the sediment dynamic and associated bedforms.

For the “Low Transport” experiment the bed was generally paved over all the duration of the experiment (110 hours). Bedforms similar to step-pools developed and were present for all the duration of the run. These macroforms seems to control the transport dynamic of the system in the short and long term. In the short term, bedload transport was not uniform. Instead, transient processes of erosion / deposition associated with the formation / destruction of step-pools were observed. In the long term, step-pools lead to the formation of a uniform paved bed on the whole channel length. Periodic destruction of bed pavement was also observed and associated with a transport capacity that could reach 15 times the value of average measured bedload transport.

For the “High Transport” experiment (92 hours) the channel morphology fluctuates between two extremes. A flat bed characterised by highly mobile fine sediments and high transport capacity, and a steep paved bed corresponding to a low transport capacity. For this experiment step-pools were just a transitory state associated with the transition between the two extremes and they are quickly destroyed by the bedload sheets propagation. Bedload sheets were the main transport mode for the system. Their formation and propagation can explain the cyclical evolution of the system in the short and long term.

We finally studied the consequences of the observed phenomena for non-equilibrium systems on steep slopes. We conducted two experiments: one in order to reproduce an aggradational system and the second to reproduce the dynamic of a system controlled by two check dams. A very long duration was necessary for reaching the dynamic equilibrium condition with the aggradational system (more than 210 hours). The local equilibrium was achieved gradually from upstream to downstream, with the flume sections closest to the feeding device attaining first the dynamic equilibrium. Experiments with check dams showed that this kind of slope correction can have a significant impact on the maximum amount of material transported during a single event. However, the maximum instantaneous transport and the long term sediment behaviour of the system are not affected by the presence of the check dams.



## INTRODUCTION

---

Les régions alpines ont connu un essor industriel au cours des XIX<sup>ème</sup> et XX<sup>ème</sup> siècles (barrages, mines, industries...) qui a bouleversé leur horizon. La construction de voies de communication permettant d'accéder à des vallées autrefois isolées et l'expansion de l'urbanisation en résultant ont impliqué une exposition croissante de la population et des infrastructures aux risques naturels. Dans ce contexte montagnard, où l'espace est limité et les risques nombreux, l'homme s'est souvent installé à proximité des cours d'eau et en particulier sur les cônes de déjection des torrents.

Le terme torrent, en Europe, est généralement utilisé pour définir un cours d'eau ayant une pente moyenne supérieure à 5% (Rickenmann, 2001). De tels cours d'eau sont le lieu de crues brutales, provoquées par des précipitations violentes et abondantes, comme, par exemple, des averses orageuses intenses (intensité de 100 mm/h), très localisées (les cellules pluvieuses ne font souvent que quelques kilomètres carré), de faible durée (de quelques dizaines de minutes à quelques heures) et caractérisées par une importante charge solide. Le transit de ces matériaux intervient principalement sous forme de laves torrentielles ou de charriage. Dans cette thèse, nous nous intéresserons uniquement au transport sédimentaire par charriage.

Le « charriage », très morphogène, est une forme de transport sédimentaire contrôlé par les forces de traînée et de portance exercées par l'écoulement sur les sédiments. Les grains se déplacent sur de courtes distances par roulement, glissement ou saltation. Au cours des dernières décennies, certaines manifestations du phénomène de transport solide par charriage en régions montagneuses se sont révélées très destructrices (par exemple, en France, les événements survenus dans le Queyras en 2000, ou, en Suisse, les inondations de la Saltina, en 1993). L'étude du charriage est donc très importante du point de vue sociétal (plusieurs millions d'euros de dommages dans les dernières années) et du point de vue scientifique, en raison de la complexité de la thématique en question (difficulté à modéliser les interactions solide - solide et solide - liquide).

Pour des matériaux à granulométrie uniforme (ou assimilés) et pour des conditions d'équilibre (état du système stable où la pente d'énergie de l'écoulement est compatible avec le flux sédimentaire à transporter), le transport solide par charriage est généralement modélisé par une relation semi-empirique assez simple basée sur le concept de la force tractrice : la quantité de matériau transporté dépend de l'excès de contrainte de cisaillement adimensionnelle par rapport à la contrainte minimale nécessaire à la mise en mouvement du matériau en question.

Dans le cadre de fortes pentes, plusieurs formulations empiriques ont été proposées afin d'estimer la quantité de volumes transportée au cours des crues. Ces formulations ont été développées ou calibrées sur la base d'études expérimentales (Meyer-Peter Muller, 1948; Schoklitsch, 1962; Rickenmann 1991; Rickenmann, 2001; Recking et al. 2008a) et donnent souvent de bons résultats pour des conditions hydrauliques fortes, associées à des crues importantes, quand le matériau du lit est entièrement mobilisé (Rickenmann, 2001). Dans ce cas, le matériau transporté est assimilable à un matériau uniforme.

Néanmoins, en condition de crue ordinaire les torrents sont caractérisés par des écoulements liquides et solides, en moyenne, très faibles (Lenzi, 2001). Les crues les plus fréquentes sont

généralement associées à des périodes de retour d'environ 1,5 - 3 ans (Lenzi et al., 2006). Le transport solide est très fluctuant. Des phases de transport intense sont généralement suivies de périodes sans transport (Lenzi, 2001 ; Lenzi et al., 2004) et par conséquent, les valeurs de débit solide mesurées peuvent être très supérieures ou très inférieures à celles prévues par les lois de transport à l'équilibre (Egashira et Ashida, 1991).

Dans de telles conditions, la mobilité du mélange granulaire est faible. On parle généralement de transport préférentiel de sédiments fins dans le système (Schmidt et Ergenzinger, 1992). Les matériaux qui composent le lit s'organisent alors en structures sédimentaires bien définies, notamment les séquences en marches d'escalier (nous utiliserons par la suite le terme *step-pools*) et les cascades sédimentaires (Montgomery et Buffington, 1997).

En raison de leur étroite influence sur la dynamique sédimentaire des systèmes à forte pente, les *step-pools* (Figure 1) ont fait l'objet de nombreuses études ces dernières années (Chin et Wohl, 2005; Church et Zimmerman, 2007).

Les *step-pools* semblent se développer dans les cours d'eau ayant une pente  $S$  supérieure à 2 % et inférieure à 24 % et sont souvent décrits, par analogie, comme étant des séquences en marches d'escalier. La marche (*step*) marque une dénivellation importante dans le profil longitudinal du cours d'eau (Zimmermann et Church, 2001) et est immédiatement suivie de la mouille, *pool*, à l'aval (Rosport, 1994). Cette dernière a des profondeurs en deçà de l'élévation moyenne du lit et est généralement comblée par des particules plus fines comme des graviers et des sables.



**Figure 1** : Photo de *step-pool* prise sur le torrent de Tacconnaz à Chamonix (P. Leduc, 2010).

Les *step-pools* influencent fortement la dynamique du système (Church et Zimmermann, 2007) et les modèles de frottement et de transport classiques ne semblent pas fonctionner dans ce type de système en raison des interactions très complexes entre phase solide et liquide (Comiti et al., 2007). L'objectif principal des recherches actuelles est la compréhension des mécanismes de formation et de destruction des *step-pools* (Church et Zimmermann, 2007).

Les *step-pools* sont souvent considérés comme un état d'équilibre pour le système torrentiel (Comiti et Lenzi, 2003 ; Lenzi, 2001). En effet, en raison de leur grande stabilité (ils peuvent persister dans un cours d'eau pour des périodes de retour supérieures à 50 ans d'après Grant et al. 1990, Chin, 1999, Lenzi, 2001), leur géométrie est souvent prise comme modèle pour des

interventions d'aménagement « durable » dans les torrents de montagne (Comiti et Lenzi, 2003 ; Lenzi, 2002).

La déstabilisation d'un step peut être suivie d'une longue période de transport intense (Turowski et al., 2009) Ces ruptures se produisent seulement pour des crues très fortes de période de retour supérieures à 20-30 ans (Crowe, 2002). Par conséquent, la destruction (ou stabilité) des structures à step-pools a généralement été étudiée pour des conditions hydrauliques fortes.

Néanmoins, des recherches récentes ont montré la dynamique sédimentaire à forte pente pouvait être très active pour des conditions hydrauliques faibles en raison du tri granulométrique (Recking, 2006 ; Recking et al., 2009). Notamment, pour une condition hydraulique donnée, un phénomène de formation et de destruction d'un pavage de surface est observé et mesuré sur des échelles spatiales (et temporelles) différentes. La capacité de transport du système change dans le temps : elle diminue pendant les phases de construction du pavage et elle augmente au cours des érosions. Celles-ci peuvent être très intenses et ont été associées à la production de « bedload sheets » (en français nappes de charriage) dans le système.

Dans la continuité de ces travaux, l'objectif de cette thèse est d'étudier expérimentalement l'influence du tri granulométrique pour des conditions hydrauliques proches du début de mouvement, typiques des torrents de montagne (granulométrie complexe, forte pente et faible transport). La question principale à laquelle nous chercherons de répondre est la suivante : est-ce que l'équilibre de transport pour un torrent est altéré seulement par des forçages hydrauliques capables d'en détruire entièrement la morphologie (Rickenmann, 2001) ou alors, est-il possible d'observer des phénomènes de transport intense, en raison seulement du tri granulométrique ? Dans le cas affirmatif, nous chercherons de comprendre à quelles échelles spatiales et temporelles et à quelles morphologies ces phénomènes sont associés et comment ils peuvent influencer la dynamique à long terme d'un système naturel.

L'étude expérimentale sera donc réalisée pour des conditions de transport faibles et pour des pentes fortes ( $S > 9\%$ ) ce qui est une démarche originale par rapport à toutes les autres études réalisées sur ce thème. Notamment les pentes utilisées pour l'étude seront supérieures à celles utilisées par Recking et al. (2009) et la granulométrie plus complexe. Le système sera alimenté constamment en débit solide alors que d'autres études expérimentales à forte pente ont été réalisées avec une alimentation solide nulle afin de « figer » le lit et de produire une morphologie stable dans le temps (Lenzi et Comiti, 2003).

Au cours de la thèse, un jeu de données expérimentales très important a été produit. Des expériences longues, de durée supérieure à 100 heures, ont été réalisées et analysées. Elles ont permis de montrer que des conditions de transport intense, associé à la destruction de step-pools ou du pavage, se produisent à haute fréquence sous le seul effet du tri granulométrique, pour une condition hydraulique donnée.

Cette thèse est organisée en trois parties. Dans la Partie 1, composée de deux chapitres, nous présenterons les résultats principaux des différents travaux de recherche sur le tri granulométrique et le charriage à forte pente (Chapitre 1) et la description du protocole expérimental et des dispositifs utilisés au cours de la thèse (Chapitre 2).

Dans la Partie 2, nous présenterons et analyserons les résultats de deux expériences de longue durée (environ 100 heures) qui reproduisent un système torrentiel soumis à des conditions de

transport soit en dessous (Chapitre 3) et soit au dessus (Chapitre 4) de la condition de la condition de début de transport. Les résultats obtenus montrent que la dynamique sédimentaire est très altérée selon que l'on se trouve juste en dessous ou juste au-dessus des conditions de mobilité du  $D_{84}$  du pavage de surface.

Enfin, dans le Chapitre 5, nous présenterons les résultats de deux études réalisées pour évaluer les effets du tri granulométrique dans un cadre de dynamique hors équilibre. Le Cas 1 reproduit un système en phase d'aggradation, le Cas 2 reproduit un système avec présence de seuils.

## **PARTIE 1 : BIBLIOGRAPHIE ET PROTOCOLE EXPERIMENTAL**

---





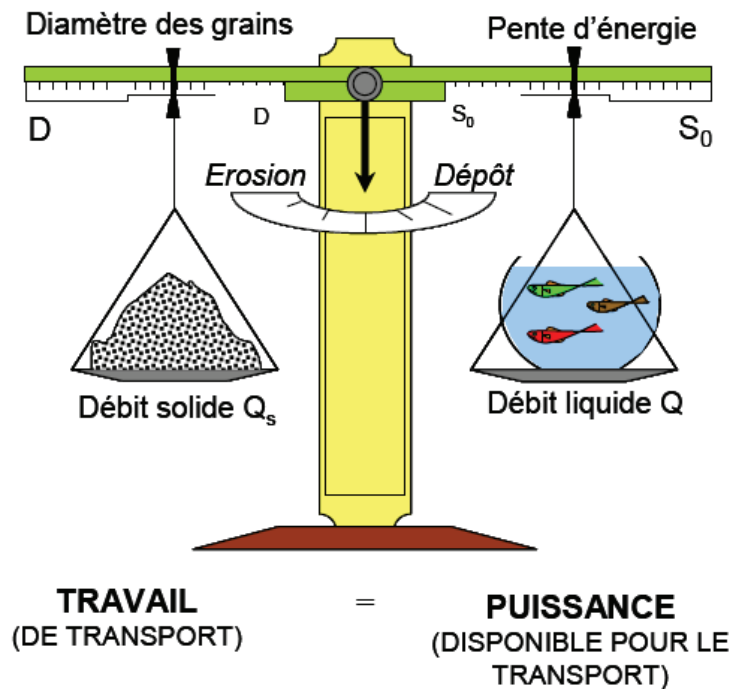
## 1. CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans le chapitre 1, nous présenterons les résultats de la synthèse bibliographique. L'objectif de cette recherche étant la compréhension du rôle du tri granulométrique sur la dynamique sédimentaire d'un système à forte pente, la recherche bibliographique a été axée sur deux thèmes principaux : le transport solide par charriage à forte pente et le tri granulométrique (observations et modélisation du phénomène). Une partie de généralités sur le transport solide ainsi qu'un zoom plus détaillé sur les résultats les plus récents qui sont à la base de ce travail seront présentés.

### 1.1. Transport solide par charriage à forte pente

#### 1.1.1. Le principe d'équilibre

A la base de toute modélisation hydraulique, il existe le concept d'équilibre. Le concept d'équilibre, appliqué à une granulométrie uniforme, a bien été formalisé par la balance de Lane (Lane, 1955) reportée sur la Figure 2.



**Figure 2 :** Schématisation de la balance de Lane (1955) d'après Recking (2006).

L'équilibre d'un système naturel ou artificiel est atteint quand on a l'égalité entre le taux de travail nécessaire pour transporter un certain débit solide  $Q_s$  de matériau de taille  $D$  et la puissance de l'écoulement disponible pour le transport, qui est proportionnelle au rapport entre le débit liquide  $Q$  et la pente énergétique d'écoulement uniforme du canal  $S_0$ .

Le principe d'équilibre implique que, pour un matériau donné de diamètre  $D$ , un débit solide donné  $Q_s$ , et un débit liquide donné  $Q$ , un système aura tendance à ajuster sa pente d'énergie  $S_o$  afin que la puissance produite par l'écoulement soit équivalente au taux de travail de transport à effectuer. Concrètement, en expérimentation de canal avec un système à alimentation constante (flux liquide et solide), la pente va s'ajuster jusqu'à ce que le débit solide sortant égale le débit solide injecté.

Toutes les expériences (ainsi que les mesures disponibles dans la bibliographie) tendent à montrer que la pente d'équilibre n'est jamais atteinte lorsque des matériaux non uniformes sont utilisés (Recking, 2006). Au lieu de cela, des fluctuations périodiques de débit solide sont mesurées, autour de la valeur qui serait obtenue si le concept d'équilibre était vérifié (Hoey et Sutherland, 1991 ; Iseya et Ikeda, 1987a ; Kuhnle et Southard, 1988 ; Recking et al. 2009). L'évidence des fluctuations de transport solide sur des échelles spatiales et temporelles différentes a mené à la conclusion que pour un système à granulométrie étendue la condition d'équilibre ne peut être que dynamique (Cudden et Hoey, 2003). L'équilibre dynamique est donc une condition du système pour laquelle, en moyenne, les paramètres du système ne varient pas.

A titre d'exemple, les morphologies décrites dans le paragraphe 1.2.1 représentent un état du lit à l'équilibre, c'est-à-dire un lit pour lequel la pente d'énergie, le débit liquide et le débit solide sont en moyenne constants.

### 1.1.2. Généralités sur le transport solide par charriage

Le transport solide par charriage est un phénomène complexe à modéliser. Les raisons de cette complexité sont principalement liées au manque de connaissances de l'interaction (« feedback ») entre les phases liquide et solide et des interactions à l'intérieur de la phase solide elle-même (Yalin, 1972).

Depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle, plusieurs efforts ont été faits pour modéliser et interpréter le phénomène du charriage. Deux nombres sans dimensions ont été introduits afin de décrire la phénoménologie observée : le nombre de Shields (Shields, 1936, Eq. 1) définit les conditions de mobilité des particules et le paramètre d'Einstein (Einstein, 1950) quantifie la quantité de matériau transporté (Eq. 3).

Le nombre de Shields (Shields, 1936) est le rapport entre les forces de traînée dues à l'écoulement (force motrice) et le poids déjaugé des particules (force de résistance) :

$$\theta = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho) \cdot D} \quad (1)$$

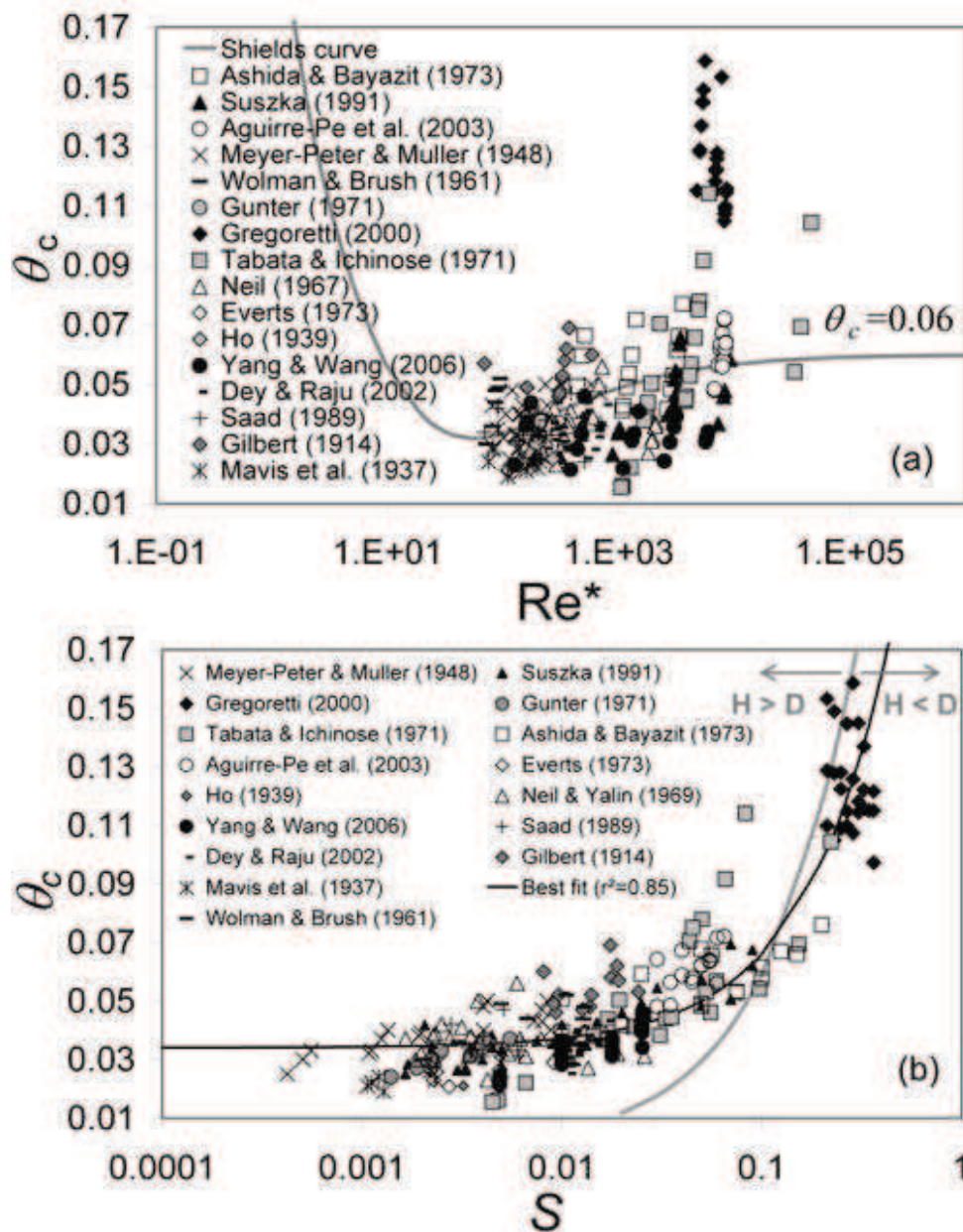
Où :

- $\tau$  [N/m<sup>2</sup>] est la contrainte moyenne sur le fond ;
- $g$  [m/s<sup>2</sup>] est l'accélération de gravité ;
- $\rho, \rho_s$  [Kg/m<sup>3</sup>] sont respectivement la densité de l'eau et du matériau solide transporté ;
- $D$  [m] est le diamètre du matériau transporté.

Les conditions hydrauliques d'un système sont souvent définies par le rapport  $\theta/\theta_c$  où  $\theta_c$  représente la valeur seuil de mise en mouvement du matériau du lit.

Néanmoins le choix de la valeur  $\theta_c$  est un problème complexe (Figure 3). Classiquement, deux méthodes sont utilisées (Wilcock, 1992) : la « méthode de référence » (Kuhnle, 1993; Parker and Klingeman, 1982; Parker et al., 1982; Wilcock and McArdeell, 1993; Wilcock and Southard, 1988) et la « méthode du plus gros grain » (Andrews, 1983).

Pour la « méthode de référence » la valeur de  $\theta_c$  est associée à la crue qui produit un débit solide adimensionnel dit de « référence ». Ce débit adimensionnel indique le débit minimal de matériau transporté à partir duquel on peut considérer qu'on est en condition de transport. Pour la « méthode du plus gros grain », la condition critique de mise en mouvement  $\theta_c$  représente le transport d'au moins une particule parmi les particules les plus grandes (en taille) observées dans le transport.



**Figure 3 :** a) Nombre de Shields critique en fonction du nombre de Reynolds particulaire  $Re^*$  (Eq. 2) et b) nombre de Shields critique en fonction de la pente  $S$  du système.

Le nombre de Reynolds particulaire (ou de frottement)  $Re^*$  (Figure 3a) est défini par l'équation. 2:

$$Re^* = \frac{u^* \cdot D}{\nu} \quad (2)$$

Où :

- $u^*$  [m/s] est la vitesse de frottement près du fond ;
- $D$  [m] est le diamètre du grain ;
- $\nu$  [m<sup>2</sup>/s] est la viscosité cinématique de l'eau (égale à  $1.01 \cdot 10^{-5}$  pour l'eau à 20°).

Une corrélation entre  $\theta_c$  et la pente moyenne du système ( $S$ ) a été mesurée (Figure 3b). Cette relation a été exprimée avec une équation empirique de mise en mouvement très simple (Recking et al., 2008b) qui sera présentée dans la suite (voir paragraphe 1.1.3).

La quantité de matériau transportée par un écoulement est indiquée par le paramètre d'Einstein (Einstein, 1950), donné par l'équation 3 :

$$\Phi = \frac{q_{sv}}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)gD^3}} \quad (3)$$

Où :

- $q_{sv} = \frac{Q_s}{W\rho_s} = \frac{[Kg/s]}{[m] \cdot [Kg/m^3]}$  est le transport solide volumique par unité de largeur ;
- $Q_s$  [Kg/s] est le débit solide ;
- $W$  [m] est la largeur de la section d'écoulement.

Pour modéliser le transport sédimentaire, de nombreuses formulations ont été proposées pour relier  $\theta$  et  $\Phi$  (Einstein, 1950 ; Brownlie, 1981 ; Karim et Kennedy, 1990). La plupart d'entre elles résultent d'une approche semi-empirique (probabiliste ou mécaniste) et concernent souvent le transport total (charriage et suspension).

Le transport solide par seul charriage est généralement modélisé par une relation semi-empirique assez simple basée sur le concept de la force tractrice, de la forme :

$$\Phi = A\theta^\alpha(\theta - \theta_c)^\beta \quad (4)$$

Où  $(\theta - \theta_c)$  est l'excès de contrainte responsable de l'intensité du transport et calculé par rapport à la valeur critique de début de mouvement  $\theta_c$ .

Des valeurs de  $A$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  ont été proposées par plusieurs auteurs et font encore l'objet de nombreuses recherches (Bathurst, 2002; Wong et Parker, 2006). Ces coefficients sont surtout calés sur des données de laboratoire du fait des difficultés à étudier le charriage in situ, et un jeu de coefficients est généralement valable pour des conditions hydrauliques restreintes (Recking et al., 2008a).

Par ailleurs, d'un point de vue pratique,  $\theta$  et  $\theta_c$  doivent être calculés à partir des données disponibles qui sont (dans le meilleur des cas) le débit liquide  $Q$ , le diamètre caractéristique des sédiments  $D$  et la pente du lit  $S_o$ . Une deuxième relation reliant  $\theta$  à ces différents paramètres est donc nécessaire : c'est la loi de frottement.

La loi de frottement relie les principales grandeurs de l'écoulement à l'énergie dissipée par frottement aux parois. Il est assez commun de calculer la perte de charge  $S$  par frottement aux parois d'un écoulement en canal (mais aussi en rivière) par extension de la loi de Darcy-Weisbach (Eq. 5) établie pour le calcul de la pente d'énergie  $E$  [m] par unité de longueur  $L$  [m] des écoulements en conduites :

$$S = \frac{dE}{L} = f \frac{1}{4R} \frac{U^2}{2g} \quad (5)$$

Où  $f$  [-] est le coefficient de frottement,  $U$  [m/s] est la vitesse moyennée sur la section et  $R$  [m] est le rayon hydraulique défini par le rapport entre la surface mouillée et le périmètre mouillé de la section d'écoulement. Pour les écoulements uniformes à surface libre, la pente d'énergie  $S$  est égale à la pente géométrique  $S_o$ , et cette relation est souvent exprimée sous la forme suivante :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{U}{\sqrt{gRS}} = \frac{U}{u^*} \quad (6)$$

Où  $u^*$  [m/s] est la vitesse de frottement.

Pour les écoulements bidimensionnels turbulents rugueux, Keulegan (1938) a exprimé l'équation 6 en intégrant la relation de Karman-Prandtl pour la distribution logarithmique du profil de vitesse (Eq. 7).

$$\frac{u(z)}{u^*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_o}\right) \quad (7)$$

Où  $z$  [m] est la hauteur de l'écoulement par rapport au fond du lit et  $z_o$  [m] est la hauteur des rugosités où la vitesse de l'écoulement s'annule et  $k$  [-] le coefficient de Von Karmann.

En faisant l'hypothèse que le profil logarithmique est une bonne approximation du profil de vitesse sur toute la hauteur d'écoulement (Cardoso et al., 1989 ; Song et al., 1995 ; Nikora et Smart, 1997 ; Smart, 1999), que  $R \gg z_o$ , ce qui devrait être le cas d'après Smart et al. (2002) dès que la profondeur relative est plus grande que 1, que  $k=0.4$  et que  $z_o$  est une fonction de la rugosité  $k_s$  du lit (Nikuradse, 1933),  $(8/f)^{1/2}$  peut s'écrire :

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = E + 5.75 \log\left(\frac{R}{k_s}\right) \quad (8)$$

Keulegan (1938) a montré que  $E$  pouvait varier avec la forme du canal, entre 6 et 6.25. De plus, pour les sédiments non uniformes, et conformément au concept introduit par Nikuradse,  $k_s$  a souvent été exprimé en fonction d'un diamètre représentatif  $d_x$  ( $k_s = \alpha d_x$ ). Avec cette approximation l'Eq. 8 peut être réécrite sous la forme (Eq. 9)

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \xi + 5.75 \log \left( \frac{R}{d_x} \right) \quad (9)$$

Avec

$$\xi = 6 + 5.75 \log \alpha \quad (10)$$

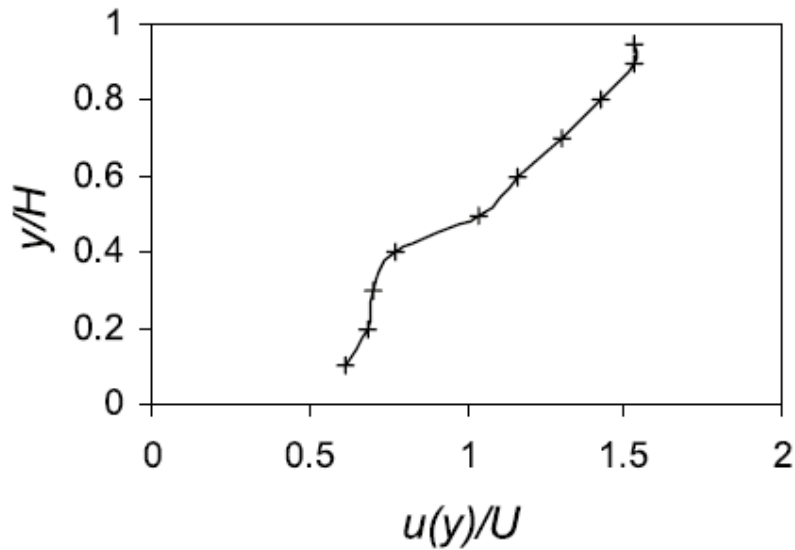
De nombreuses études ont été proposées pour quantifier  $\xi$  et  $d_x$  et une revue exhaustive a été reportée par Yen (2002). Ces modèles reposent sur l'hypothèse d'un profil de vitesse logarithmique. Cependant, des considérations « ad-hoc » sont nécessaires dans le cas des fortes pentes (voir paragraphe 1.1.3) où l'écoulement est rarement bidimensionnel et, par conséquent, le profil de vitesse diffère du profil logarithmique.

### 1.1.3. Loi de frottement et loi de transport : spécificités aux fortes pentes

#### **Lois de frottement**

Les lois de frottement reposent généralement sur la considération d'un profil de vitesse de l'écoulement logarithmique (Eq. 7) et sur une rugosité du fond qui est fonction d'un diamètre représentatif  $d_x$ . Ces hypothèses sont d'autant plus vraies pour des valeurs du rapport largeur / profondeur de l'écoulement ( $W/H$  [-]) supérieures à 5 et pour des valeurs du rapport  $R/D$  supérieures à 10 (Recking et al., 2008b). Cependant, dans le cas des torrents à forte pente ces conditions ne sont pas vérifiées. Notamment, l'écoulement est souvent tridimensionnel et les effets de bords sont importants ( $W/H < 5$  et les valeurs du rapport  $R/D$  sont généralement comprises entre 0 et 10).

Dans ces conditions un profil de vitesse plus complexe, appelé *S-shaped* profil (Figure 4), a été observé. Ce profil est composé d'une première zone proche du lit (nommée « roughness layer » ou « wake zone ») où la vitesse moyenne de l'écoulement est presque uniforme et d'une seconde zone, au dessus de la première, où le profil de vitesse est logarithmique. Dans la « roughness layer » l'énergie cinétique de l'écoulement est transformée en énergie turbulente à cause de l'interaction entre l'écoulement et les particules du fond (Recking et al., 2008). De plus, la « roughness layer » semble décomposée en deux parties (Nowell et Church, 1979; Nikora et al., 2004) : une première partie qui correspond à l'écoulement en dessous des particules qui composent la rugosité du lit et dans laquelle le frottement est contrôlé par la densité et la forme des éléments du lit ; et une seconde partie, au dessus de la première, produite par la dissipation turbulente.



**Figure 4 :** Profil *S-shaped* calculé à partir des données de Marchand et al., 1984, d'après Recking et al., 2008b.

Les propriétés du « roughness layer » sont pauvrement documentées en littérature et différents paramètres semblent influencer les dimensions et les propriétés de cette zone d'écoulement (Recking et al., 2008b). Cependant, pour les finalités de notre étude, nous retiendrons que les effets dissipatifs du « roughness layer » augmentent avec la diminution de la profondeur relative  $R/D$  (Carollo et al., 2005) et avec l'augmentation de la pente (Tsujiimoto, 1991), ce qui est le cas pour les torrents à forte pente.

Pour la suite, nous avons choisi d'utiliser le modèle de frottement proposé par Recking et al. (2008b) et reporté en équation 11:

$$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{U}{\sqrt{gRS}} = 6.25 + 5.75 \log\left(\frac{R}{\alpha_{RL} \alpha_{BR} D}\right) \quad (11)$$

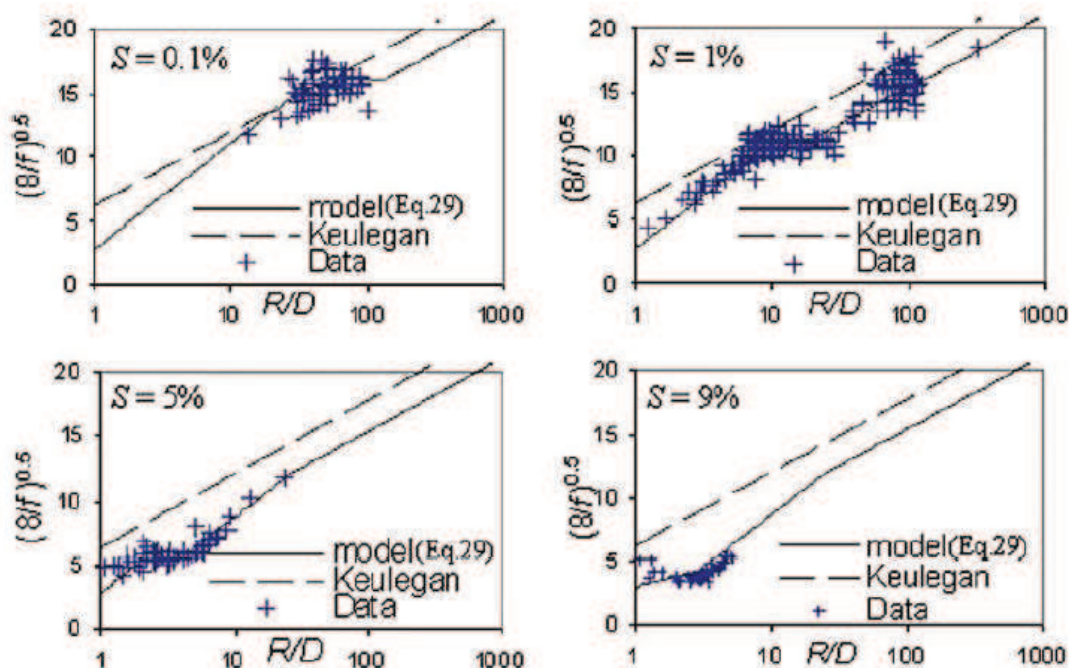
Où les coefficients  $\alpha_{RL}$  (Eq. 12) et  $\alpha_{BR}$  (Eq. 13) représentent respectivement l'influence du « roughness layer » et de l'intensité de transport « bedload roughness » sur le frottement (Recking et al., 2008b) :

$$\alpha_{RL} = 4 \left(\frac{R}{D}\right)^{-0.43} \quad (12)$$

$$\alpha_{BR} = 7S^{0.85} \frac{R}{D} \quad (13)$$

La loi de frottement reportée en équation 11 a été calibrée sur la base d'une large gamme de données expérimentales et de terrain et s'est avérée plus adaptée qu'un modèle classique (voir Figure 5) pour les conditions d'écoulement typiques des torrents à forte pente ( $1 < R/D < 10$ ).





**Figure 5** : Exemple d'application de la loi de frottement (Eq. 11) et comparaison avec la loi de Keulegan pour les fortes pentes, d'après Recking et al., 2008a ; en bleu les points expérimentaux mesurés en canal.

### Lois de transport

Plusieurs modèles de transport sont proposés pour les fortes pentes (Recking, 2010). Chaque modèle est valable pour les conditions auxquelles il a été validé. Nous reporterons ici quatre équations de transport très connues dans le domaine du transport solide à forte pente. Notamment, l'équation de Meyer-Peter Muller (1948), de Schoklitsch (1962) et de Rickenmann (1991). Ces équations sont valides pour des conditions hydrauliques fortes ( $\theta/\theta_c > 2$ ).

L'équation de Meyer-Peter Muller (1948), Eq. 14, a été formulée pour des pentes comprises entre 0.3 et 2.5% en laboratoire. Les auteurs ont introduit le rapport  $n'/n$  pour distinguer la part de l'énergie réellement utilisée par le transport «  $n'$  » de l'énergie totale «  $n$  » dissipée (par turbulence, macro rugosité au fond, etc...).

#### *Meyer-Peter Muller (1948)*

$$q_s [Kg / s / m] = 8\rho_s \sqrt{g(s-1)D_{50}^3} \left( \left( \frac{n'}{n} \right)^{\frac{3}{2}} \theta - 0.047 \right)^{3/2} \quad (14)$$

$$n' = D_{90}^{1/6} / 26 \quad (15)$$

$$n = S^{1/2} R^{2/3} / U \quad (16)$$

Où  $s$  est le rapport  $\rho_s / \rho$  égal à 2,65.

Le modèle de Schoklitsch (1962), valable pour des pentes supérieures à 1% et des crues fortes (d'après Bathurst et al. 1987) est reporté en Eq. 17 :

**Schoklitsch (1962)**

$$\begin{cases} q_s [Kg / s / m] = \frac{2.5}{\rho_s / \rho} S^{3/2} (q - q_c) \\ q_c [m^3 s^{-1} m^{-1}] = 0.0612 g^{0.5} D_{40}^{1.5} S^{-1.17} \end{cases} \quad (17)$$

Où  $q$  [ $m^3 s^{-1} m^{-1}$ ] est le débit liquide par unité de largeur et  $q_c$  est la valeur seuil de mise en mouvement du matériau.

Un autre modèle intéressant, toujours pour les fortes pentes, a été proposé par Rickenmann (1991). Le modèle (Eq. 18) a été testé pour une très large gamme de pentes, comprises entre 0.3 et 20% et pour des conditions hydrauliques fortes. La particularité de ce modèle est qu'il a été établi expérimentalement pour tenir compte des effets de la masse volumique de l'eau sur le transport par charriage.

**Rickenmann (1991)**

$$\begin{aligned} q_{sv} &= \frac{12.6}{(s-1)^{1.6}} \left( \frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0.2} (q - q_c) S^2 & S > 3\% \\ q_{sv} &= \frac{3.1}{(s-1)^{1.5}} \left( \frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0.2} (q - q_c) S^{1.5} & S < 3\% \\ q_c &= 0.065 (s-1)^{1.6} g^{0.5} D_{50}^{1.5} S^{-1.12} & (Bathurst, 1985) \end{aligned} \quad (18)$$

L'étude sur la loi de transport et de frottement a permis de mettre en évidence deux régimes de transport solide en fonction de la pente d'énergie du système (Recking et al., 2008b) : un régime à faible transport, pour lequel le débit solide est donné par l'équation 19, et un régime à fort transport (Eq. 20), pour lequel le taux de transport ne dépend plus du paramètre de Shields critique mais seulement de l'intensité de l'écoulement. Le modèle de transport est une version modifiée de la loi de Meyer-Peter Muller (1948) :

***Recking et al. (2008b)***

$$\Phi = 15.6(\theta - \theta_c)^2 \quad \theta < 0.65S^{0.41} \quad (19)$$

$$\Phi = 14\theta^{2.45} \quad \theta > 0.65S^{0.41} \quad (20)$$

$$\theta_c = 0.15S^{0.275} \quad \text{Recking, 2009} \quad (21)$$

La spécificité de cette équation (Eq. 21) est de faire varier la valeur du nombre de Shields critique aux fortes pentes, pour tenir compte des effets des variations dans le profil de vitesse (Recking, 2009).

**1.2. Le tri granulométrique : observations**

L'interaction entre grains, connue sous le terme « tri granulométrique », est un phénomène complexe qui peut se produire verticalement ou longitudinalement. Un mélange sédimentaire donné peut produire des lits complètement différents selon l'histoire hydrologique de la rivière.

Les formes de fond sont produites par l'interaction entre l'écoulement et le matériau qui compose le lit (Kuhnle, 1996, Lanzoni et Tubino, 1999) et par les interactions au sein du matériau lui-même (tri granulométrique). Plusieurs formes de fond sont observées et documentées dans la littérature, pour des mélanges granulaires complexes ou uniformes, et pour des conditions hydrauliques plus ou moins fortes. Leur formation dépend de l'étendue granulométrique du mélange ainsi que des caractéristiques de l'écoulement.

Une première partie présente différentes formes (1.2.1) : le « pavage », les « bed clusters », les « bed patchiness » et les « bedload sheets ». Ces morphologies sont observées pour des rivières à graviers et des conditions de transport dans la gamme d'étude ( $1 < \theta/\theta_c < 2$ ). La deuxième partie (1.2.2) a été consacrée au phénomène de fluctuations de transport solide, exemple marquant des effets du tri granulométrique.

La troisième partie (1.2.3) présente le rôle du tri granulométrique sur les « step-pools ». Cette morphologie semble représentative de la dynamique des systèmes à forte pente (Montgomery et Buffington, 1997).

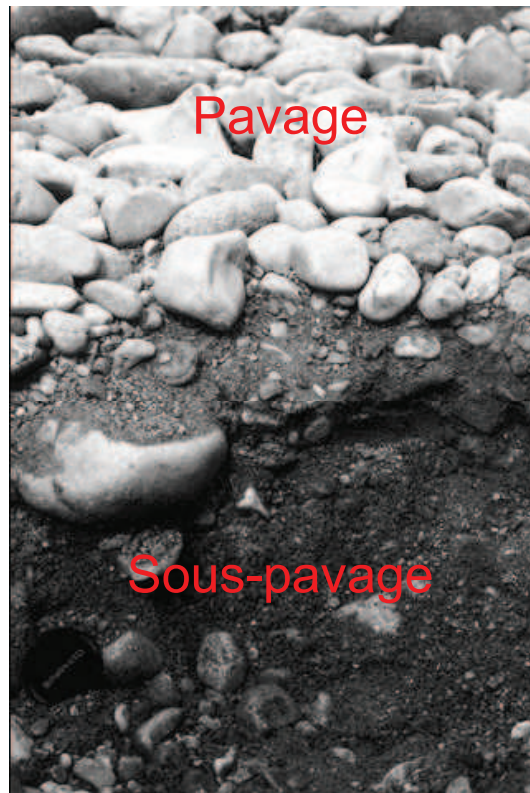
**1.2.1. Formes de fond****Pavage de surface et sous-pavage**

Un exemple classique de tri granulométrique dans une rivière à graviers est représenté par la formation d'un pavage de surface (Figure 6). Certains lits sont dits « pavés » car leur surface

est composée essentiellement des plus gros diamètres présents dans le mélange sédimentaire et le lit est « figé », stabilisé par cette couche de surface peu mobile. Lorsque la couche est totalement immobile, on parle d'armure. Le matériau présent dans la sous-couche de surface, composé de sédiments plus fins, est appelé sous-pavage.

Le pavage joue un rôle clé dans la dynamique sédimentaire et la constatation d'un lit « pavé » a poussé à la formulation de plusieurs théories sur la formation, la stabilité et la destruction du pavage (voir paragraphe 1.3).

Parfois la formation du pavage est associée au transport sélectif de la rivière (Dietrich et al., 1989 ; Gomez, 1994 ; Liébault et Piegay, 2001 ; Lisle, 1995 ; Paola et Seal, 1995) : les sédiments fins du mélange granulaire sont transportés plus facilement et la surface du lit qui en résulte est pavée. D'autres études ont montré que le pavage se formerait pour « égaliser » la mobilité du mélange granulaire au cours de crues faibles (Parker et Klingemann, 1982). Cette théorie, dite de la « mobilité équivalente », est très controversée. Elle sera détaillée plus précisément dans le paragraphe 1.3.



**Figure 6** : Lit pavé sur la rivière Wharfe, UK (Parker, 2004)

La destruction du pavage est également controversée. Certains auteurs ont suggéré que le pavage est détruit au cours des crues intenses (Parker et Klingemann, 1982 ; Rickenmann, 2001), pour se réformer rapidement à la fin de la crue (Parker et Klingemann, 1982). D'autres suggèrent qu'un pavage mobile persisterait également au cours de ces crues intenses (Church et Hassan, 2002 ; Haschenburger et Wilcock, 2003 ; Wilcock et DeTemple, 2005) et que cela n'indiquerait pas une immobilité du matériau du lit (armure), mais démontrerait qu'un lit pavé

coexiste avec le transport de toutes les fractions granulométriques du mélange granulaire (théorie de la mobilité équivalente).

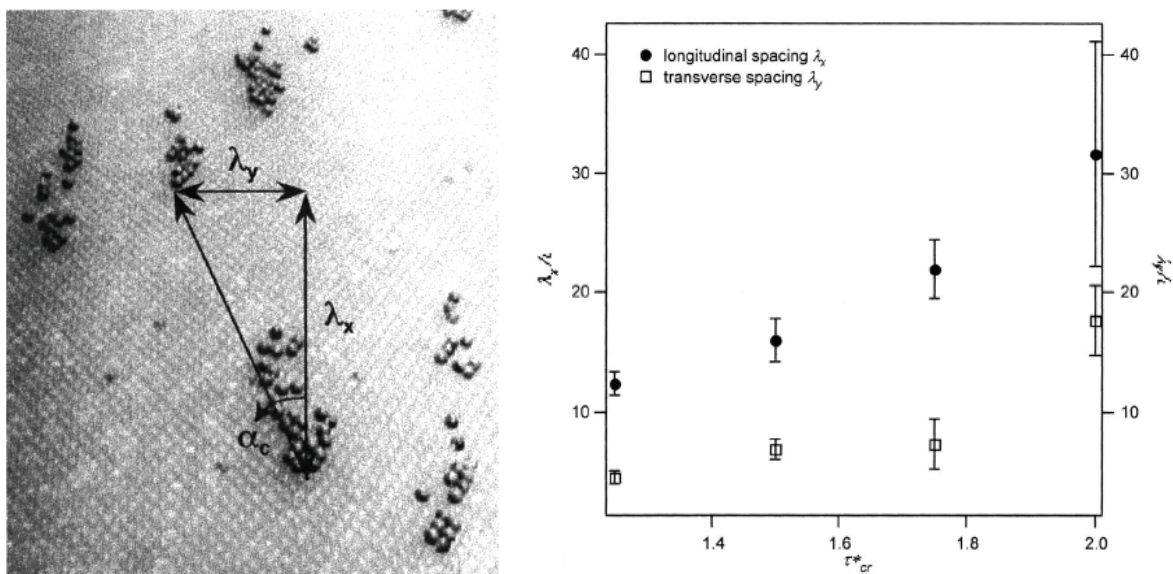
Pour finir, une étude récente (Recking et al., 2009) a illustré des cycles de formation/destruction du pavage de surface, où le tri granulométrique joue un rôle clé dans l'occurrence de ce phénomène. Ces études seront détaillées dans les paragraphes suivants (voir paragraphes 1.4.2 et 1.4.3).

### **Bed Clusters (amas de graviers)**

Les « bed clusters » ou « gravel cells » se produisent en raison d'une agglomération de gros blocs sur la surface du lit d'une rivière à graviers (Church et Hassan, 1988; Strom et al., 2004). Plus précisément, un bloc « barrage » (de taille comparable au  $D_{99}$  du matériau du lit d'après Church et Hassan, 1988), stable en raison de sa faible mobilité par rapport aux conditions d'écoulement est à l'origine d'une accumulation de particules imbriquées (de taille comparable au  $D_{84}$  du matériau du lit) autour de lui (Reid et al. 1992).

Les bed-clusters peuvent paraître sur le lit comme des structures isolées (Reid et al., 1992) ou comme un réseau interconnecté de groupes de particules (Church et al., 1998, Raudkivi, 1998, Hassan et Church, 2000). Dans ce cas, bien que considérés comme des microformes, les « bed-clusters » semblent présenter une sorte de « régularité » typique d'autres macroformes comme les step pools (Strom et al., 2004).

Hassand et Reid (1990) ont suggéré que les bed-clusters sont inter-espacés avec une longueur d'onde qui est proportionnelle (environ 20 fois) à la dimension du plus gros bloc du cluster. Strom et al. (2004) ont observé qu'un espacement longitudinal et transversal (par rapport à la direction d'écoulement) existe et qu'il augmente avec la contrainte hydraulique (Figure 7).



**Figure 7 :** Espacement longitudinal  $\lambda_x$  et transversal  $\lambda_y$  en fonction des conditions hydrauliques (définies en termes de nombre de Shields critique pour les particules qui composent le « cluster »), d'après Strom et al. 2004.

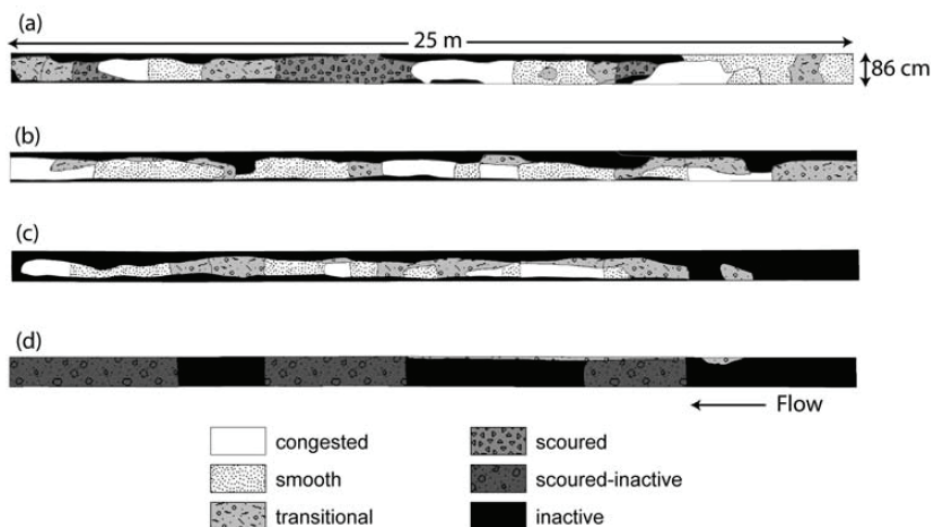
La distribution « régulière » ou « interconnectée » de « bed clusters » sur le lit pourrait correspondre à une condition de quasi-équilibre pour le système (Hassan et Reid, 1990).

Des observations de terrain et de laboratoire ont conduit à des résultats intéressants sur l'influence des « bed clusters » sur la stabilité du système et le transport. La présence de « bed-clusters » sur le terrain pourrait représenter des systèmes avec une faible capacité de transport et en conditions de transport partiel (Church et Hassan, 1998 ; Hassan et Church, 2000). Une étude expérimentale a permis d'identifier trois phases d'interaction entre « bed clusters » et transport solide en fonction des conditions hydrauliques du système (Strom et al., 2004). Une phase I (quand  $1.5 < \theta/\theta_c < 1.75$ ) dans laquelle le cluster agit comme une « trappe à sédiments » en diminuant la capacité de transport du système. Une phase II (quand  $2 < \theta/\theta_c < 2.25$ ), de transition, dans laquelle les clusters n'influencent pas la dynamique du système. Une phase III (quand  $\theta/\theta_c \geq 2.5$ ) dans laquelle les clusters sont une source de sédiments pour le système en raison de leur complète destruction.

Les « bed clusters » en raison de leur « propriété d'accumulation » de blocs sur la surface du lit de la rivière sembleraient aussi à la base du processus de formation du pavage de surface (Sutherland, 1991 ; Reid et al., 1992 ; Church et Hassan, 1998 ; Hassan et Church, 2000). Cependant, jusqu'à présent, il n'y a aucun modèle analytique capable de prédire leurs effets sur l'écoulement et sur le transport dans le système (Strom et al. 2004).

### **Bed Patchiness et nappes de charriage**

Les « bed patchiness » sont considérés comme des accumulations de sédiments de taille homogène sur la surface du lit (Laronne et al., 2001 ; Dietrich et Smith, 1984 ; Lisle et Madej, 1992 ; Seal et Paola, 1995 ; Buffington et Montgomery, 1999a). Elles sont situées généralement à l'aval des gros blocs (Laronne et al. 2001), de débris en bois (Buffington et Montgomery, 1999b) ou de bars (Laronne et Duncan, 1992). Leur formation semble associée à des zones d'ombre de l'écoulement (ou « wake zone ») qui se produisent en aval des gros éléments disposés sur le lit. Ces zones d'ombre favorisent l'accumulation du matériau en raison d'une diminution de la turbulence de l'écoulement (Laronne et al., 2001 ; Garcia et al., 2007 ; Vericat et al., 2008).



**Figure 8 :** Morphologie du lit pour les expériences réalisées dans différentes conditions d'alimentation solide, (a) 23.3, (b) 15.5, (c) 9 et (d) 0 g/min cm, d'après Nelson et al. 2009.

Contrairement aux « bed clusters », les « bed patchiness » correspondent à des zones très actives de la rivière. Le matériau du lit qui compose la « poche » semble être transporté de préférence au cours d'une crue ordinaire pour se déposer en aval dans une autre « poche ». Ce mécanisme de transport de « poche » en « poche » a été largement documenté dans la littérature (Vericat et al., 2008; Laronne et al., 2001). Ce comportement a mené à la définition d'une condition d'équilibre dynamique de transport pour les « poches » (Vericat et al., 2008) et à la conclusion que, pour des conditions de transport faible ( $\theta/\theta_c < 2$ ), les « poches » de sédiments fins sont la source principale du transport solide par charriage (Laronne et al., 2001).

Des observations expérimentales ont montré que des « bed patchiness » peuvent se former « naturellement » sans la présence d'obstacles dans l'écoulement (Nelson et al., 2009; Iseya et Ikeda, 1987a ; voir Figure 8) ou d'autres structures morphologiques. Les expériences ont été menées pour des valeurs des rapport largeur/hauteur de la section du canal [-] de environ égale à 4 afin d'empêcher la formation de structures méandriformes (Nelson et al., 2009). Ce résultat suggère que le phénomène de tri granulométrique serait à l'origine de la formation des bed patchiness (Nelson et al., 2009).

Les expériences en laboratoire (Nelson et al., 2009) ont été menées en modifiant le débit d'alimentation solide pour un même débit liquide (constant au cours de toute l'expérience). Quatre catégories de « bed patchiness » ont été distinguées, plus ou moins abondantes en fonction des conditions d'alimentation. Les auteurs ont proposé le terme de « congested patchiness » pour définir les accumulations de particules grossières, de « smooth patchiness » pour les particules fines et de « transitional patchiness » pour les fractions médianes de la courbe granulométrique. Ces trois structures contribuent au transport solide en condition d'équilibre dynamique. La formation de zones de lit pavé, « inactive patchiness », a également été observée. Ces zones sont très stables et ne contribuent pas au transport solide. En conclusion, sur la surface du lit, des zones mixtes, « scoured » et « scoured inactive », ont été observées. Ces zones sont constituées de dépôts de particules de distribution bimodale qui contribuent (« scoured ») ou pas (« scoured inactive ») au transport solide.

Deux résultats de l'étude menée par Nelson et al. (2009) semblent particulièrement intéressants. Premièrement, la distribution des « bed patchiness » dans le système dépend étroitement des conditions de transport. Une diminution de la capacité de transport a été associée à une augmentation de l'extension du pavage (« inactive patchiness ») sur la surface du lit (Figure 8). Deuxièmement, l'observation de fluctuations instantanées de débit solide est associée à la production et à la propagation de « free patches » ou « bedload sheets » (traduit au Cemagref par nappe de charriage par A. Recking, voir un exemple sur la **Figure 9**).

Les nappes de charriage ont été définies premièrement par Whiting et al. (1988) comme des « poches mobiles » ou « mobile patchiness » de faible amplitude (environ 3 fois le diamètre des grains grossières de leur front de propagation) et grande longueur, caractérisées par une couche de sédiments grossiers à fort impact qui se déplace à grande vitesse sur une sous-couche de sédiments fins. Les nappes de charriage ont été décrites variables à la fois en longueur et largeur, de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres, et leur morphologie diffère de celle des dunes par le ratio longueur sur hauteur qui serait dans une fourchette de valeurs comprises entre 25 et 300 au lieu de 15 et 40 (Recking, 2006).

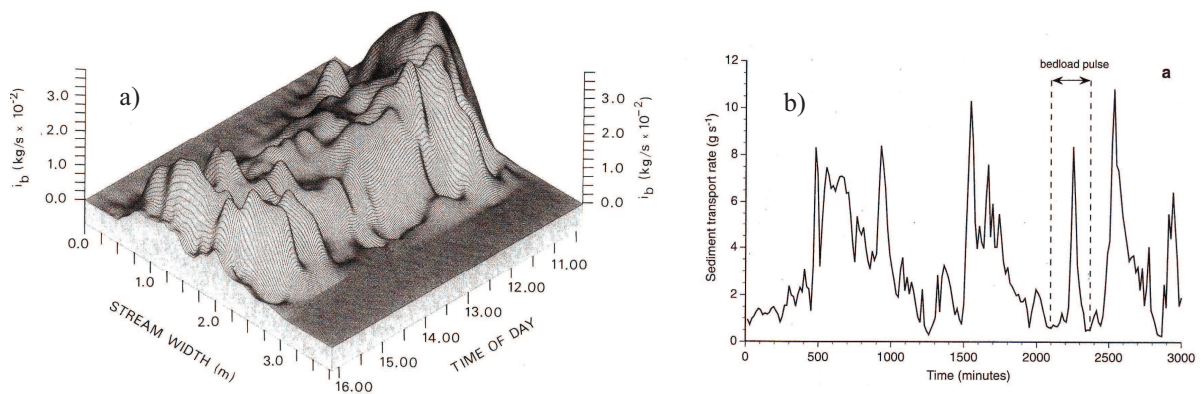
Les nappes de charriage ont été associées aux fluctuations de transport solide.



**Figure 9 :** Exemple de *Nappe de Charriage*, d'après Recking et al. (2009).

### 1.2.2. Les fluctuations de transport solide

L'exemple le plus marquant des effets du tri granulométrique sur le transport solide est que, pour des conditions hydrauliques parfaitement stationnaires (flux liquide et solide), de grandes fluctuations de transport solide et de pente sont observées (Iseya et Ikeda, 1987; Hubbel, 1987; Kuhnle et Southard, 1988; Recking et al. 2009; Nelson et al. 2009) (Figure 10). Le phénomène de fluctuations de transport solide a été identifié très tôt (Ehrenberger, 1931 ; Einstein, 1937 ; Mühlofer, 1933). Depuis, les observations et les analyses du phénomène ont progressivement augmenté (Gomez et al., 1989).

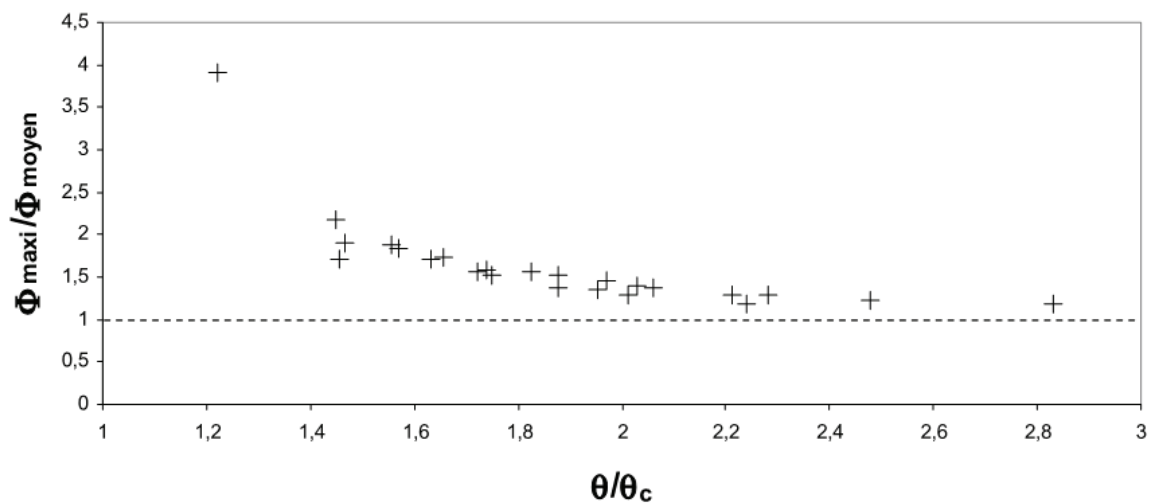


**Figure 10 :** Fluctuations de transport mesurées pour des conditions hydrauliques quasi-constantes sur le terrain a) (Gomez, 1983) et en laboratoire b) (Hoey et Sutherland, 1991).



Les fluctuations de transport solide ont été observées pour une vaste gamme de conditions hydrauliques, pour les faibles pentes (0.15 % pour (Whiting et al., 1988)) et pour les très fortes pentes (15 % pour (Frey et al., 2003)), pour des matériaux unimodaux (Kuhnle and Southard, 1988) ou bimodaux (Iseya and Ikeda, 1987; Recking et al., 2009), et pour des canaux linaires ou méandriiformes (Ashmore, 1988; Griffiths, 1979; Hoey and Sutherland, 1991; Kang, 1982).

Dans presque toutes les études, les fluctuations sont apparues de façon périodique, plusieurs périodes étant même mesurées pour une condition hydraulique donnée (Hoey, 1992; Kuhnle and Southard, 1988; Recking et al., 2009), ce qui implique que le phénomène ne serait pas la simple expression aléatoire d'un phénomène de nature stochastique (Cudden and Hoey, 2003).



**Figure 11** : Diminution des fluctuations de débit avec l'augmentation des conditions hydrauliques, d'après Recking (2006).

L'amplitude des variations de transport (notamment le rapport entre le maximum et le minimum du transport solide mesuré) est généralement élevée et peut atteindre des valeurs supérieures à dix (Hoey and Sutherland, 1991; Iseya and Ikeda, 1987; Kuhnle and Southard, 1988). De plus, les fluctuations semblent dépendre des conditions hydrauliques d'écoulement : elles diminuent en amplitude avec l'augmentation du rapport  $\theta/\theta_c$  et ont tendance à disparaître quand celui-ci est supérieur à 2 (Figure 11, Recking, 2006).

Différents expériences de terrain (Garcia et al., 2000; Gomez, 1983; Habersack et al., 2001; Jackson and Beschta, 1982; Kuhnle et al., 1989; Lekach and Schick, 1983; Madej and Ozaki, 1996; Meade, 1985; Paige and Hickin, 2000; Reid et al., 1985; Whiting et al., 1988) et de laboratoire (Ancy et al. 2008 ; Böhm et al. 2006 ; Frey et al. 2003 ; Iseya et Ikeda, 1987a ; Kuhnle et Southard, 1988 ; Nelson et al. 2009 ; Recking et al. 2009) ont permis d'observer le phénomène de fluctuations de transport solide.

Ces expériences ont mis en évidence une alternance de lits plats (smooth) et pavés (congested/inactive), associés à des phases d'aggradation et d'érosion locale, conduisant à une morphologie du lit hétérogène (voir Figure 8). Les pics de transport solide mesurés ont été

associés soit à l'augmentation de la mobilité des grosses particules en raison de leur glissement sur les parties du lit plat (Iseya et Ikeda, 1987a, Whiting et al. 1988) soit au front d'impact des nappes de charriage (Kuhnle et Southard, 1988). Cependant les deux effets (augmentation de la capacité de transport sur lit plat et impact des nappes de charriage) pourraient contribuer à la manifestation du pic de transport des grosses particules (Recking et al. 2009).

La production et la propagation de nappes de charriage dans le système semblent être le facteur clé pour expliquer les fluctuations de transport solide à court terme (Kuhnle et Southard, 1988 ; Whiting et al. 1988 ; Recking et al. 2009 ; Nelson et al. 2009) et à long terme (Recking et al. 2009).

En raison de leur dynamique de propagation, un pic de sédiments grossiers antécédent à celui de particules fines est normalement enregistré à la sortie du système (Kuhnle et Southard, 1988; Recking et al. 2009). Au cours de leur propagation, les nappes de charriage semblent disparaître progressivement à cause d'un échange (tri vertical et longitudinal) avec le pavage local (Recking et al., 2009). Celui-ci peut être localement déstabilisé ou détruit, et, à sa place, un lit plat affecté par des antidunes est observé (Recking et al. 2009).

### 1.2.3. Tri granulométrique à forte pente : dynamique sédimentaire et morphologies associées

Les torrents à forte pente sont des systèmes complexes. Leur complexité est liée à l'étendue granulométrique large du matériau du système et à la discontinuité (temporelle et spatiale) des apports sédimentaires et liquides dans le système (Montgomery et Buffington, 1997).

Deux régimes, ou « phases », de transport permettent de bien représenter la dynamique sédimentaire d'un torrent à forte pente (Bathurst, 1987). Une « Phase I » de transport ordinaire et une « Phase II » qui correspond à des conditions de transport intense.

La « Phase II » est associée à la destruction de la couche grossière du lit. Le système est alors en condition d'égale mobilité. Toutes les fractions qui composent le mélange granulaire du lit sont transportées par l'écoulement (1.3.2). D'après Rickenmann (2001), ces conditions sont vérifiées quand  $\theta/\theta_c > 3$ . Dans ce cas, le mélange granulaire peut être assimilé à un matériau uniforme et les formules de transport (1.1.3) sont bien adaptées à l'estimation du volume de matériau transporté (Rickenmann, 2001).

La « Phase I » est plus complexe. Cette phase représente les conditions de transport ordinaires du système. La surface grossière du lit est stable et le matériau transporté par l'écoulement est composé des fractions fines de la courbe granulométrique. Le système est en condition de transport partiel (voir 1.3.2). La quantité de matériau transporté par l'écoulement dépend de la « disponibilité » des sédiments fins à être transporté. Ceux-ci sont généralement masqués par les éléments grossiers du lit, considérés inamovible (Bathurst, 1987). Dans la suite, nous nous intéresserons seulement à la « Phase I » définie par Bathurst (1987).

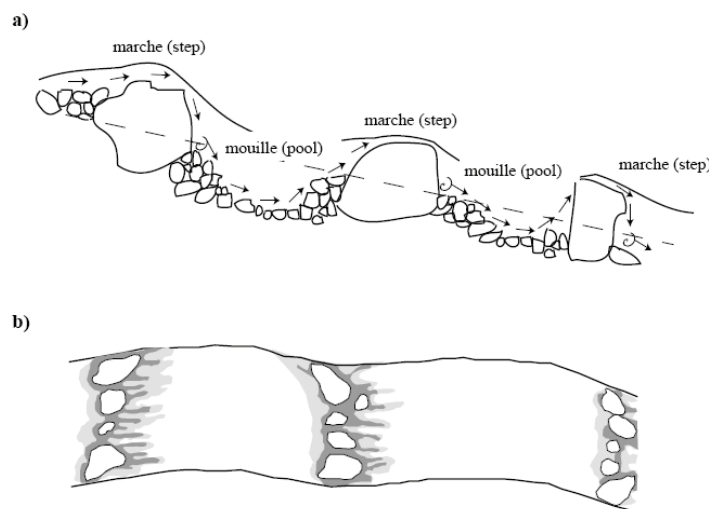
La « Phase I » est celle qui décrit le mieux les conditions de transport ordinaire pour un système à forte pente. Notamment, les études de terrain ont tendance à montrer que les torrents sont caractérisés par des écoulements liquides et solides, en moyenne, très faibles (Lenzi, 2001). Les crues les plus fréquentes sont généralement associées à des périodes de retour d'environ 1,5 - 3 ans (Lenzi et al., 2006).

Dans ces conditions, le transport solide mesuré est très fluctuant. Pour la même crue, des phases de transport intense sont généralement suivies de périodes sans transport (Lenzi, 2001; Lenzi et al., 2004). Par conséquent, les valeurs de débit solide mesurées peuvent être supérieures ou inférieures à celles prévues par les lois de transport, à l'équilibre (Egashira et Ashida, 1991).

Deux morphologies semblent plus représentatives de la dynamique sédimentaire des torrents (Montgomery et Buffington, 1997): les séquences à step-pools et les cascades sédimentaires.

Les step-pools semblent se développer dans les cours d'eau où la pente  $S$  est supérieure à 2 % (Grant et al., 1990 ; Abrahams et al., 1995 ; Montgomery et Buffington, 1997 ; Chin, 2003) et inférieure à 24 % (Whittaker et Jaeggy, 1982). Ils sont souvent décrits, par analogie, comme étant des séquences en marches d'escalier (Whittaker, 1987 ; Grant et al., 1990 ; Egashira et Ashida, 1991 ; Comiti et al., 2003 ; Curran et Wilcock, 2005).

Vue en coupe, le step marque une dénivellation importante dans le profil longitudinal du cours d'eau (Zimmermann et Church, 2001) et est immédiatement suivi de la mouille, *pool*, à l'aval (Rosport, 1994). Cette dernière a des profondeurs en deçà de l'élévation moyenne du lit et est généralement comblée par des particules plus fines comme des graviers et des sables (Buffington et al., 2002) (Figure 12).

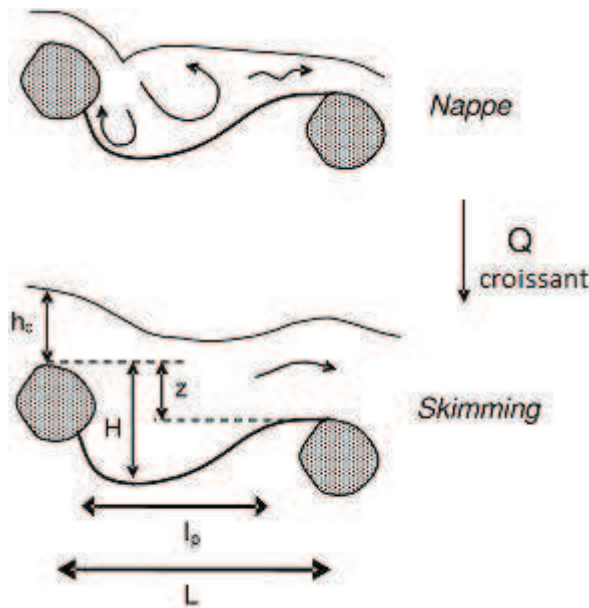


**Figure 12** : Schéma d'une séquence step-pool (d'après Lamarre, 2006) : a) vue en coupe et b) vue en plan. Les steps accentuent la turbulence et la vitesse de l'écoulement (zone grisée) alors que dans les mouilles, l'écoulement est plus tranquille.

Les step-pools introduisent des variations complexes dans l'écoulement (Duckson et Duckson, 2001). Ces variations se traduisent par de fortes accélérations et décélérations locales de l'écoulement à la surface de l'eau. L'écoulement liquide n'est jamais uniforme (Church et Zimmermann, 2007) et varie entre super-critique ( $F_r > 1$ ) au niveau du step à sous critique ( $F_r < 1$ ) au niveau de la mouille (Montgomery et Buffington, 1997).

L'interaction entre l'écoulement et la forme de fond (formation/destruction des step-pools) semble justifier un nombre de Froude global du système proche de 1 (Church et Zimmermann, 2007; Comiti et al., 2009; Grant, 1997).

Des récentes études ont permis de mieux détailler les deux régimes hydrauliques associés à une morphologie à step-pools (Comiti et al., 2009; Church et Zimmermann, 2007) : « nappe regime » et « skimming regime », bien schématisés sur la Figure 13.



**Figure 13** : « *Nappe* » et « *Skimming* » : régimes générés par une morphologie à step-pools d'après Comiti et al. (2009).

Pour de faibles débits liquides ( $Q$  sur la Figure 13), le « *Nappe regime* » correspond à un écoulement très turbulent composé de jets liquides (au-dessus du step) et de tourbillons (dans la mouille) qui sont responsables d'une augmentation du coefficient de frottement  $f$  (Comiti et al., 2009). L'écoulement varie continuellement entre super-critique ( $F_r > 1$ ) à l'amont du step et sous-critique ( $F_r < 1$ ) au niveau de la mouille.

Quand le débit liquide  $Q$  augmente (Figure 13), la zone de turbulence qui est générée à l'aval du step est submergée et l'écoulement devient super-critique ( $F_r > 1$ ) partout. Le « *Skimming regime* » est donc caractérisé par des vitesses d'écoulement élevées et par un frottement plus faible (Comiti et al., 2009).

Les step-pools semblent avoir une influence cruciale sur la dynamique sédimentaire d'un système à forte pente (Chin et Wohl, 2005; Lenzi et D'Agostino, 2000). On tire cette conclusion du fait que les step-pools persistent aussi bien pour des systèmes à faible capacité de transport (Grant et al., 1990; Lamarre, 2006) que pour des systèmes à capacité de transport très importante (Lenzi, 2001; Turowski et al., 2009). Notamment, leur structure (hauteur du

step et distance entre steps) semble s'adapter au régime hydrologique du système (Chin, 1998; Lenzi, 2001; Lenzi et D'Agostino, 2000; Turowski et al., 2009).

Pour des conditions hydrauliques ordinaires, le transport solide semble faible en présence des step-pools (Grant et al., 1990; Lamarre, 2006). Les éléments fins qui composent la mouille semblent transportés de préférence pour un mode de transport « de mouille en mouille » (Schmidt et Ergenzinger, 1992).

Au cours des crues intenses, les séquences step-pools peuvent être complètement détruites (Turowski et al., 2009) pour se réformer rapidement après l'événement (Sawada et al., 1983 ; Whittaker, 1987 ; Warbuton, 1992). Leur destruction peut modifier pour des années l'équilibre sédimentaire du système. La capacité de transport globale du système s'en trouve augmentée jusqu'au rétablissement de l'équilibre initial (avant la crue) qui correspond à une nouvelle configuration de step-pools (Lenzi, 2001; Turowski et al., 2009).

Les step-pools ont été interprétés comme un état d'équilibre stable pour le système (Lenzi, 2002; Lenzi et Comiti, 2003). Néanmoins, pour d'autres auteurs, une morphologie à step-pools a été interprétée comme « une phase » dans un processus plus long d'ajustement du système vers une configuration d'équilibre stable (Chin et Wohl, 2005).

Le tri granulométrique semble jouer un rôle clé dans le processus de formation des séquences step-pools, bien que celui-ci soit, à l'heure actuelle, une question ouverte (Comiti, 2003 ; Curran et Wilcock, 2005 ; Church et Zimmermann, 2007 ; Zimmermann et Church, 2010).

L'idée de base de formation du premier step est celle d'un assemblage de blocs autour du premier bloc qui se stabilise en raison de sa faible mobilité par rapport aux conditions d'écoulement (Church et Zimmermann, 2007). Un deuxième step pourrait alors se former à la fin du ressaut hydraulique produit par le premier, et ce mécanisme se reproduirait pour toute la séquence de step-pools (Whittaker et Jaeggy, 1982 ; Grant, 1994 ; Comiti et al., 2005).

Une théorie plus récente, inspirée des résultats de physique granulaire, sur la formation des structures step-pools a été proposée durant la thèse de Zimmermann (2009) par Church et Zimmermann (2007).

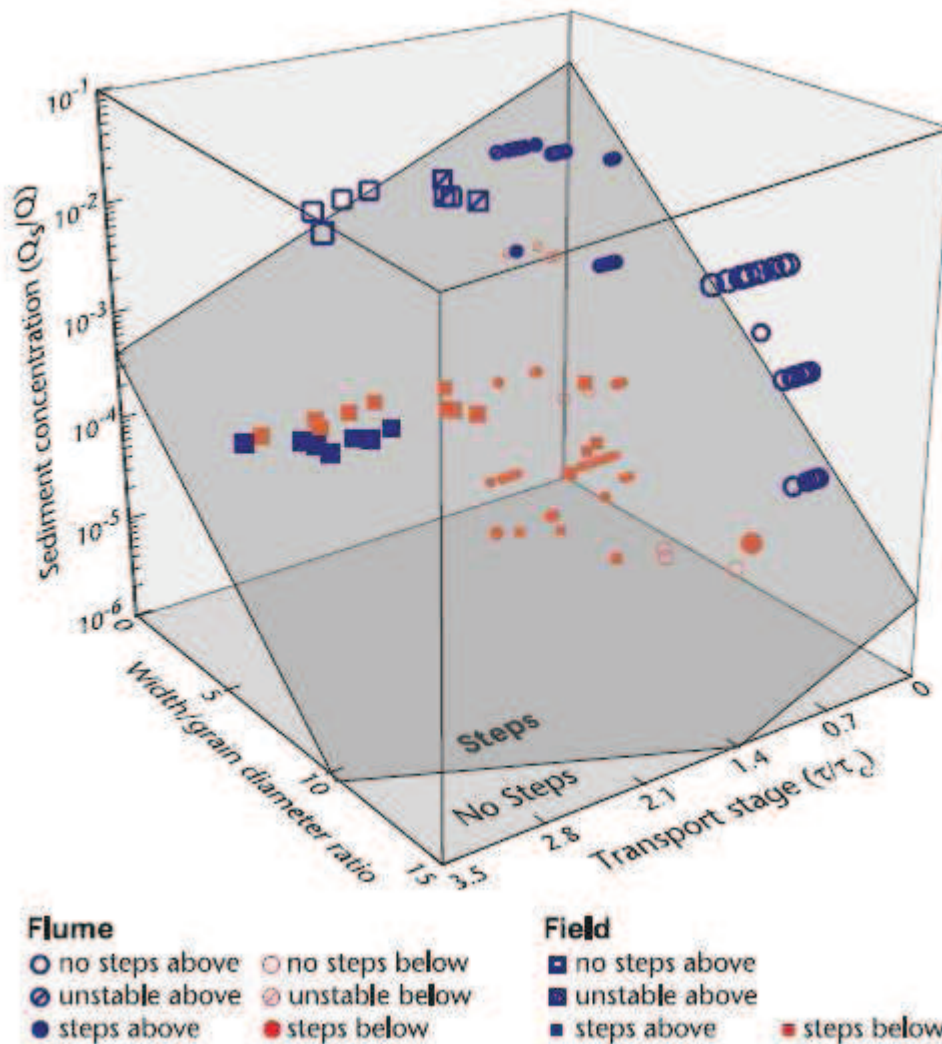
Cette théorie, nommée « Jammed State Hypothesis », implique que le matériau qui compose le step se regroupe par paquets pour augmenter sa résistance à l'écoulement. Les steps seraient donc assimilés à des agrégats linéaires de grains s'appuyant sur les berges du cours d'eau (représentant des « chaînes de force ») qui s'opposent à la force de l'écoulement (Zimmermann et Church, 2010). De telles chaînes de force gagnent en stabilité grâce à leur structure collective qui s'oppose à la force de l'écoulement et leur résistance serait renforcée grâce aux parois de la section (dans ce cas les bords du torrent qui confinent le step).

Trois paramètres sembleraient contrôler la formation d'un paquet de particules (ou « Jammed State ») :

- $W/D$  [-] : le « jamming ratio » qui représente le rapport entre la largeur du canal  $W$  [m] et le diamètre représentatif du step (notamment le  $D_{84}$  d'après Zimmermann et Church, 2010). Il est l'équivalent de la densité locale du système granulaire produite par l'agrégation des particules ;

- $\theta/\theta_c$  [-] : le « transport stage » qui représente l'excès de force capable de mobiliser le matériau du lit ;
- $Q_s/Q$  [-] : le « sediment transport concentration » qui représente la quantité de matériau transportée par le système.

A partir des résultats obtenus antérieurement, les auteurs ont pu délimiter le « jammed state » pour la formation des structures step-pools (Church et Zimmermann, 2007, voir Figure 14). De plus, une étude récente (Zimmermann et Church, 2010) semble montrer que la stabilité du « jamming state » augmente considérablement avec une diminution du « jamming ratio » (en dessous de 6).



**Figure 14 :** Domaine d'application de la « Jammed State Hypothesis », d'après Church et Zimmermann, 2007.

Bien que la formation des structures step-pools soit controversée, leur destruction est généralement associée à un phénomène de sapement de pied au cours des crues ordinaires (Curran et Wilcock, 2005) ou lors de crues intenses ayant une période de retour supérieure à 20-30 ans (Church et Zimmermann, 2007).

Pour des pentes supérieures à 25 %, une architecture plus chaotique prend place (Lamarre, 2006). Il existe alors des cascades (Montgomery et Buffington, 1997) où la disposition des cailloux et des blocs qui composent la surface du lit n'est pas continue dans l'espace (Figure 15). Une différenciation précise entre step-pools et cascade n'est pas simple en raison de la difficulté à les identifier de façon objective (Church et Zimemrmann, 2007). La méthode la plus efficace reste la méthode visuelle (Wooldridge et Hickin, 2002). Normalement les cascades diffèrent des step-pools par leur manque d'organisation spatiale (Montgomery et Buffington, 1997), présentant des blocs éparpillés sur la surface du lit et non associés en structures à des steps.

Les blocs et les cailloux qui composent la surface du lit des cascades sont immobiles pendant des conditions de transport ordinaires. Ils dépassent en taille la profondeur de l'écoulement (Montgomery et Buffington, 1997) et sont transportés par l'écoulement uniquement dans le cas d'événements rares, associés à des périodes de retour longues (environ 50-100 ans) (Grant et al., 1990; Kondolf et al., 1991 ; Whittaker, 1987b). Pendant les conditions de transport ordinaires, les cailloux et les particules fines du lit s'accumulent de préférence à proximité des blocs, à cause d'un masquage macroscopique (Montgomery et Buffington, 1997).



**Figure 15** : Exemple de morphologie à « cascades sédimentaires », d'après Montgomery et Buffington, 1997.

### **1.3. Modélisation du Tri Granulométrique**

#### *1.3.1. Introduction*

Les modèles décrits dans ce paragraphe correspondent à un essai d'interprétation quantitative (modélisation) des phénomènes observés et décrits dans le paragraphe précédent. Plus précisément, le comportement des différentes fractions du mélange sédimentaire a été modélisé grâce aux concepts de « masquage », « surexposition » et « mobilité équivalente ». La modélisation empirique ou physique du tri granulométrique repose sur le principe d'équilibre (1.1.1). Ces modèles ne sont donc pas adaptés dans le cas des fluctuations de transport solide (1.2.2).

Pour les torrents à forte pente, les auteurs se sont limités, jusqu'à présent, à la description du tri granulométrique dans le système. La modélisation a eu pour but de comprendre l'influence des step-pools sur le frottement et de décrire leur géométrie. Un modèle décrivant le comportement des différentes fractions granulométriques n'a pas encore été réalisé.

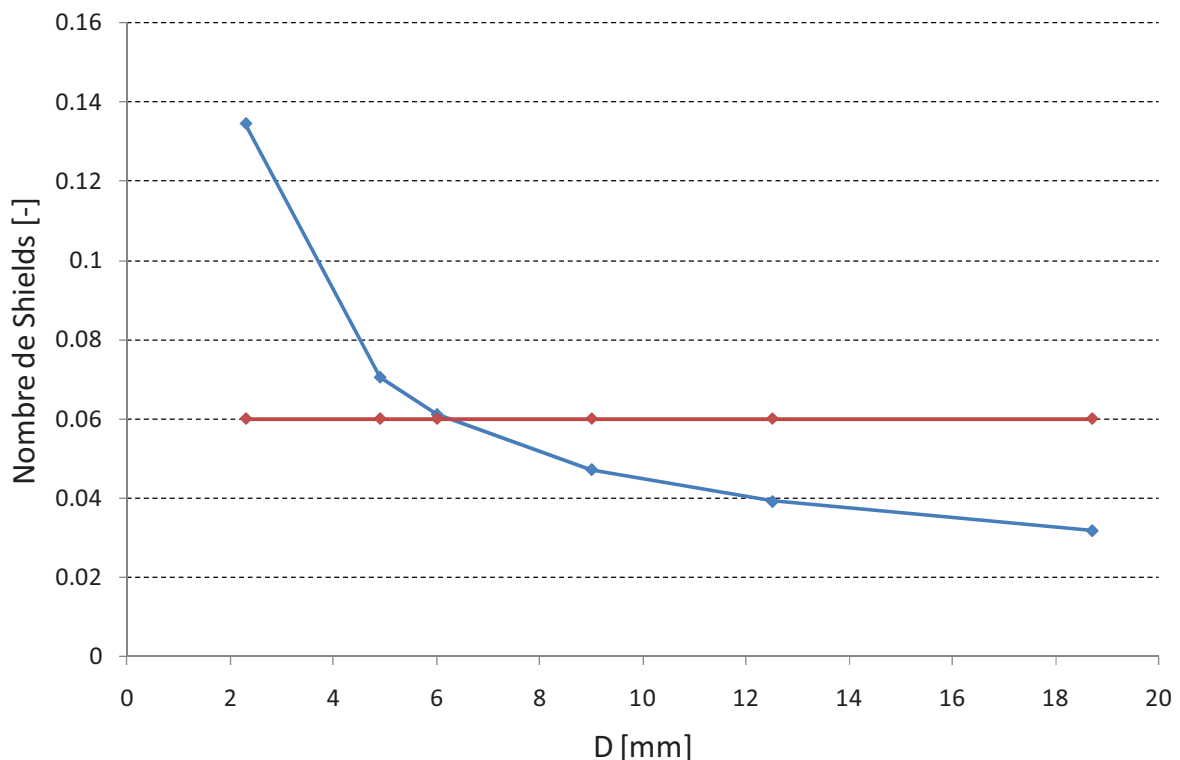
### 1.3.2. Modélisation empirique : masquage, surexposition et mobilité équivalente

Les études de terrain et de laboratoire ont pour objectif de comprendre l'évolution morphologique d'une rivière à partir des observations. Différentes approches ont été utilisées en littérature pour prendre en compte le rôle du tri granulométrique dans la définition de la mobilité.

Egiazaroff (1965) a défini la mobilité d'une particule de diamètre  $D_i$  par rapport à la condition de mise en mouvement pour un matériau uniforme de diamètre moyen arithmétique  $D_{moy}$  dans le cas d'un écoulement turbulent rugueux (Eq. 22) :

$$\theta_{ci} = \frac{0.1}{\left( \log_{10} 19 \frac{D_i}{D_{moy}} \right)^2} \quad (22)$$

L'équation 22 donne une valeur du nombre de Shields critique égale à 0.06 quand le diamètre  $D_i$  est égal au diamètre  $D_{moy}$  du mélange.



**Figure 16 :** Exemple d'effets de masquage et de surexposition pour un mélange granulaire de diamètre moyen  $D_{moy}$  de 6 mm. En bleu, l'équation 22 et en rouge, le cas d'un écoulement uniforme.



Les fractions granulométriques plus fines que le diamètre moyen du mélange ( $D_i < D_{moy}$ ) sont moins mobiles que dans le cas d'un mélange uniforme (et donc le nombre de Shields est plus grand, Figure 16) : une force plus grande est nécessaire pour les mettre en mouvement. Les particules grossières du mélange ( $D_i > D_{moy}$ ) sont, elles, plus mobiles que dans le cas d'un mélange uniforme (et donc le nombre de Shields est plus petit, Figure 16) : la force nécessaire pour les mettre en mouvement est en effet inférieure à celle nécessaire dans le cas d'une granulométrie uniforme.

Une vision « plus moderne » de la mobilité de deux classes granulométriques différentes est celle proposée par Parker et Klingemann (1982). Les auteurs proposent un nombre adimensionnel  $r_{ij}$  (Eq. 23) pour définir la mobilité de deux classes granulométriques du mélange soumises à la même force motrice par rapport à leur abondance relative  $f$  dans le mélange original :

$$r_{ij} = \frac{q_{Bi}}{f_i} \left( \frac{q_{Bj}}{f_j} \right)^{-1} \quad (23)$$

Quand  $r_{ij}$  est égal à 1, les particules ont toutes la même mobilité quelle que soit leur taille (égale mobilité), alors que, plus l'on s'éloigne de 1, plus l'on a de disparités de mobilité entre les particules qui composent la couche de sédiments transportés.

« Egale mobilité » implique donc qu'une même crue est capable de mobiliser toutes les fractions granulométriques qui composent la surface du lit et le sous-pavage. A partir de l'équation 23, Parker et Klingemann (1982) ont exprimé le concept de « mobilité équivalente » sous forme d'une fonction puissance donnant un nombre de Shields critique  $\theta_{ri}$  d'un diamètre donné  $D_i$ , défini par rapport à un seuil correspondant à un transport de référence (Eq. 24) :

$$\theta_{ri} = \theta_{r50} \left( \frac{D_i}{D_{50}} \right)^{-\alpha} \quad (24)$$

Où  $D_{50}$  est le diamètre moyen du mélange sédimentaire et  $\theta_{r50}$  son seuil critique de mise en mouvement par rapport à un débit de référence.

La valeur de  $\alpha$  peut donc varier théoriquement entre 0 et 1.

- $\alpha = 0$  implique une indépendance de la mobilité vis-à-vis de la taille des grains ; le shields critique est constant, c'est-à-dire que la mobilité est inversement proportionnelle à la taille des grains.
- $\alpha = 1$  correspond, par contre, à l'égale mobilité des particules qui composent le mélange sédimentaire ; ce qui implique que, pour le même écoulement (même crue),  $r_{ij}$  (Eq. 23) est égal à 1.

Parker et Klingeman (1982) ont trouvé des valeurs de  $\alpha$  très proches de l'unité (voir Tableau 1) pour leur étude de terrain dans la rivière Oak Creek.

Auteur(s)	$\theta_{r50}$	$\alpha$	Méthode
Parker et Klingemann (1982) sous-pavage	0,0876	0,982	Méthode de référence (donnés de terrain)
Andrews (1983)	0,0834	0,872	Méthode du plus gros grain
Wilcock et Southard (1988)	0.0226 – 0.0732	0.809 – 1.091	Méthode de référence (recirculation)

**Tableau 1 :** Exemple de coefficients utilisés dans l'équation 24.

Parker et Klingemann sont arrivés à la conclusion que chaque fraction granulométrique en présence dans le système avait une mobilité identique (mobilité équivalente) en considérant, d'après les observations et mesures faites sur la rivière Oak Creek, l'apparente stabilité dans le temps du pavage et du sous-pavage d'une part, et la similitude existante entre les courbes granulométriques de la couche charriée et du matériau stocké sous le pavage d'autre part. Comme le concept de masquage/surexposition ne peut expliquer à lui seul une égale mobilité, ils l'ont expliqué par l'existence d'un masquage « macroscopique » exercé par le pavage du lit. Une telle hypothèse implique que le pavage observé à faible débit serait également en place pendant une crue capable de mettre en mouvement toutes les fractions du lit et agirait comme une fine zone tampon capable de réguler les échanges entre le lit sous-jacent et la couche charriée. Cet effet, plus la sur-représentation des sédiments grossiers à la surface (pavage mobile), serait responsable d'une égale mobilité de chaque fraction du lit.

L'équation 24 a été testée, à la fois, sur le terrain et en canal expérimental et s'est avérée être une bonne approximation dans certains cas (Andrews, 1983; Andrews et Parker, 1987; Lepold, 1992). Néanmoins le concept d'égale mobilité et le rôle du pavage a souvent été remis en question.

Komar et Shih (1992) ont montré que le pavage n'est pas la seule condition d'équilibre capable d'assurer l'égale mobilité, comme, par exemple la rivière Egglehope Beck qui est en condition d'égale mobilité sans, pour autant, avoir une surface pavée. Gomez (1994) observe que la fraction grossière du matériau qui compose le système est toujours moins mobile que la fraction fine. Lisle (1995) a montré que, dans les rivières naturelles, la taille moyenne (moyennée sur une période de quelques années) des particules transportées par charriage est, dans la plupart des cas, plus fine que celle du matériau stocké dans le sous-pavage. Cette différence montre que le transport se fait de façon sélective (comme mécanisme de transport) et est une contradiction avec le principe d'égale mobilité. Pour finir, l'égale mobilité ne permet pas d'expliquer les fluctuations de transport et de pente observée sur le terrain et en laboratoire (Recking, 2006).

Un autre régime de transport défini en laboratoire est celui du transport partiel (Haschenburger et Wilcock, 2003; Wilcock, 1997; Wilcock et McArdell, 1993; Wilcock et McArdell, 1997), pour lequel le transport des particules dépend de leur taille. Des études de laboratoire (Wilcock et Crowe, 2003) tendent à montrer que cette condition se réalise pour une gamme de contraintes de l'écoulement  $\tau$  [N/m<sup>2</sup>] comprises entre :

$$1 < \frac{\tau}{\tau_{ri}} < 2,1 \quad (25)$$

Où  $\tau_{ri}$  [N/m<sup>2</sup>] est la contrainte « critique » qui correspond à un débit de référence pour les particules de diamètre  $d_i$ ; cette valeur de contrainte critique ne dépend pas seulement des conditions d'écoulement mais elle dépend aussi de la taille des particules (Wilcock et Crowe, 2003).

Dans ces conditions (Eq. 25) seulement, la composante fine du mélange est alors en condition d'égale mobilité alors que les grosses particules ont une mobilité de plus en plus réduite avec l'augmentation de leur taille (Wilcock, 1997). L'égale mobilité du mélange de surface qui compose le lit sédimentaire est donc uniquement obtenue pour de fortes conditions hydrauliques (Wilcock et Crowe, 2003).

### 1.3.3. Modélisation physique

Les modèles physiques de transport solide sont basés sur les équations de continuité et de quantité de mouvement de la phase liquide (notamment les équations de *Saint Venant*) couplées avec l'équation de continuité de la phase solide (équation d'Exner).

Felix Maria Exner (1920) a travaillé sur le problème de la migration des dunes et a formalisé l'équation de continuité de la phase solide pour calculer l'évolution de la morphologie d'une rivière en fonction du changement de flux des sédiments transportés  $q_s$ . Le système d'équations de *Saint Venant – Exner* dans le cas simple monodimensionnel est le suivant (Eq. 26, 27 et 28) :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial U}{\partial x} + U \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} = -gJ_e \quad (27)$$

$$(1 - p_0) \frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (28)$$

Où :

- $p_0$  [-] est la porosité de la couche active des sédiments ;
- $q_s$  [m<sup>3</sup>/ms] est le débit solide volumique par unité de largeur de la section du canal ;
- $\eta$  [m] est la côte du fond ;
- $h$  [m] est la profondeur de l'écoulement graduellement varié ;
- $U$  [m/s] est la vitesse moyenne de l'écoulement graduellement varié ;
- $J_e$  [m/m] est la perte de charge par unité de longueur ;
- $x, t$  [m,s] représentent les coordonnées d'intégration spatiale et temporelle.

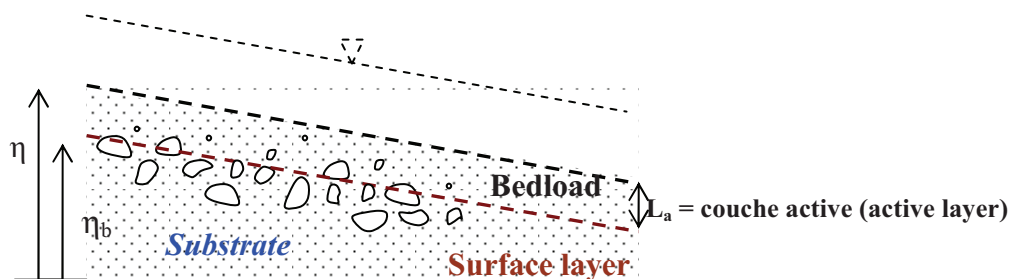
Généralement le système d'équations (Eq. 26, 27 et 28) est fermé par une équation indiquant la dépendance du flux de sédiments transportés «  $q_s$  » aux paramètres hydrauliques du système ( $h, U$ ).

Cette approche repose sur la détermination théorique ou empirique d'une « fonction d'échange » qui décrit les interactions entre les phases liquide et solide de l'écoulement et les interactions au sein même du lit.

Dans la littérature, on peut trouver des formulations fines cherchant à détailler les phénomènes de tri granulométrique (Cui et al., 1996; Gomez, 1995; Seal et al., 1997; Toro-Escobar et al., 1997). Toutes ces formulations se basent sur le concept de « couche active » ou « active layer » (Hirano, 1971).

### **Le concept de couche active (active-layer) (Hirano, 1971)**

Le transport par charriage est toujours accompagné de fluctuations du niveau du lit. Ces fluctuations sont fondamentales pour comprendre le transport en granulométrie étendue (Parker, 2004). Toutes les fluctuations sont supposées être concentrées dans une couche d'épaisseur finie  $L_a$  (Hirano, 1971).



**Figure 17:** Schématisation du concept de couche active pour le modèle à trois couches (Toro-Escobar et al., 1996).

L'active layer est une couche de sous-surface d'une épaisseur d'environ trois fois le  $D_{90}$  (Parker, 2004) où l'échange entre les sédiments et l'écoulement se fait uniquement de façon verticale sans aucun transport longitudinal. La dimension de référence de cette couche peut changer en fonction des auteurs ; par exemple elle peut être considérée équivalente à la profondeur maximale d'érosion ou à la hauteur des formes de fond présentes dans le système (Toro-Escobar et al., 1996). Elle représente en substance l'épaisseur de la couche concernée par le charriage, c'est à dire le matériau compris entre la partie du lit « presque statique » dans le temps (couche de surface de hauteur  $\eta_b$ ) et la côte du fond du lit  $\eta$  que l'on peut mesurer à chaque instant (Figure 17).

Si l'on considère maintenant les deux quantités :

- $F_j(x, t)$  = contenu en masse de la taille  $j$  dans la couche de surface à l'instant  $t$  et à l'abscisse  $x$  ;
- $f_{s,j}(x, \eta, t)$  = contenu en masse de la taille  $j$  dans la couche de sous-surface à l'instant  $t$ , à l'abscisse  $x$  et à l'ordonnée  $z$ .

En utilisant le concept de couche active, l'équation de continuité de la phase solide (Eq. 28) s'écrit :

$$(1 - p_0) \frac{\partial \eta}{\partial t} = (1 - p_0) \left( f_{s,j} \frac{\partial \eta_b}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (L_a F_j) \right) = - \frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (29)$$

Une version plus détaillée de la couche active est celle proposée par (Toro-Escobar et al., 1996). Les auteurs ajoutent un autre terme à l'équation d'Exner,  $f_{l,j}(x, t)$ , qui représente la distribution granulométrique à la frontière entre la sous-surface et la surface à l'instant  $t$  et à l'abscisse  $x$ .

Pour l'implémentation du modèle, les auteurs considèrent que pendant la phase d'érosion du lit la couche de surface et celle de sous-surface se mélangent (Eq. 30) :

$$f_{l,j} = f_{s,j}(x, \eta, t) \Big|_{z=\eta-L_a} \quad (30)$$

La phase d'aggradation, par contre, est plus complexe et les auteurs ont choisi de déterminer expérimentalement une fonction d'échange (Eq. 31) :

$$f_{l,j} = \frac{\chi_j p_j + (1 - \chi_j) F_j}{\sum_{j=1}^N [\chi_j p_j + (1 - \chi_j) F_j]} \quad (31)$$

Où :

$\chi_j$  [-] est un coefficient adimensionnel qui dépend des paramètres de l'écoulement.

Cette fonction est donc dépendante du transport et de l'état du lit en surface. Les auteurs ont conclu que la fonction d'échange  $f_{l,j}$  implique que l'évolution granulométrique de la sous-surface est influencée par le transport et la granulométrie de surface. Cette fonction a été utilisée avec de bons résultats par Cui (Cui et al., 1996) pour la simulation du *downstream-fining*.

## 1.4. Un approfondissement des résultats plus récents

### 1.4.1. Le concept d'efficacité de transport pour un système à granulométrie étendue

On retrouve, dans la littérature, la notion de transport efficace pour un système en granulométrie étendue. Elle est souvent utilisée pour décrire la dynamique de transport sur

nappe de charriage, avec une couche de sédiments grossiers qui « glisse », avec une grande efficacité, sur un lit composé de particules fines.

Le concept d'efficacité de transport remonte aux études de Bagnold (1966). L'auteur a défini la rivière comme un système de transport continu et homogène et a appliqué le principe de conservation de l'énergie au transport solide (Eq. 32), en ajoutant un terme d'efficacité  $e$  :

$$\frac{dW}{dt} = eP \quad (32)$$

Où :

- $W$  [Nm] est le travail produit par le système ;
- $P$  [Nm/sec] est la puissance disponible ;
- $e$  [-] est un terme d'efficacité.

Il a formulé cette égalité de la façon suivante :

$$i_b \tan \alpha = ew \quad (33)$$

Où :

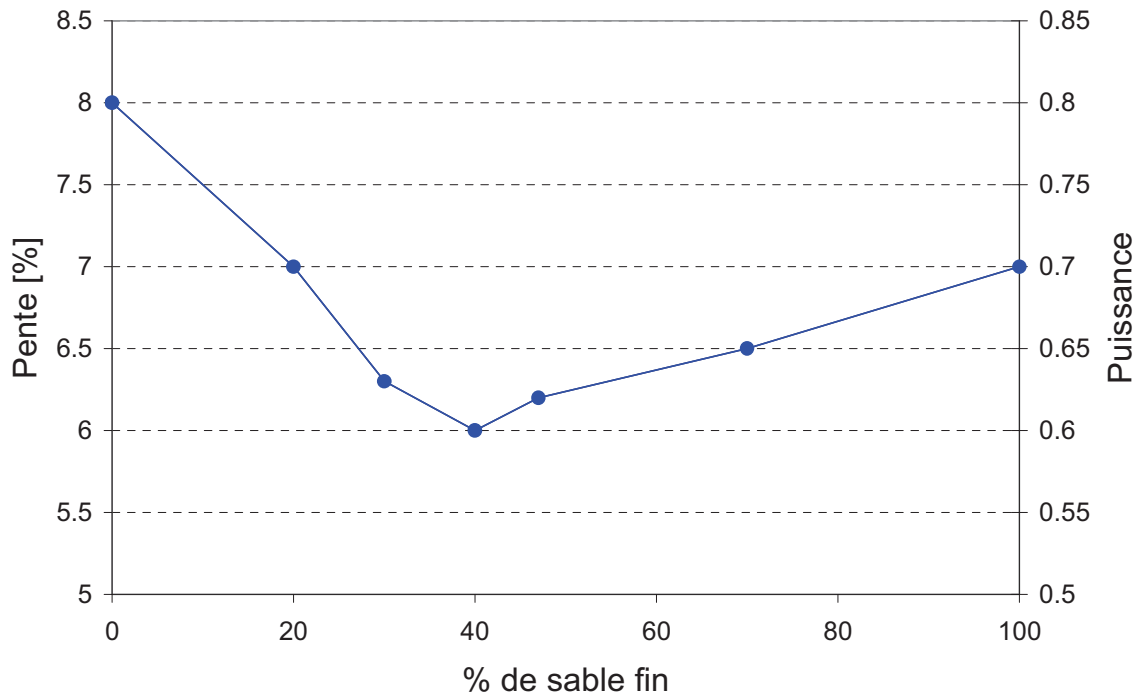
- $i_b = q_b g(\rho_s - \rho)$  est le transport solide « déjaugé » ;
- $q_b$  [m<sup>3</sup>/m/s] est le débit solide volumique par unité de largeur ;
- $\tan \alpha$  [-] est le coefficient dynamique de frottement interne ;
- $w = \tau U$  [N/m/s] est la puissance moyenne disponible pour la colonne d'eau par unité de surface du lit ;
- $e$  [-] est l'efficacité (< 1).

Pour un écoulement contraint latéralement et pour un matériau uniforme de diamètre  $D$ , à l'équilibre, l'équation 33 se réduit à (Recking, 2006) :

$$eS_o = C^{te}(Q, Q_s, D) \quad (34)$$

L'équation 34 implique que, pour une condition d'écoulement donnée, (en termes de débits liquide et solide) si la pente est constante, l'efficacité de transport du système est alors, à son tour, constante.

Or, si, pour un mélange granulaire uniforme, l'efficacité de transport «  $e$  » est constante, plusieurs travaux expérimentaux ou de terrain ont montré que la présence de sédiments fins avait pour effet d'augmenter l'efficacité du transport des graviers pour une condition hydraulique donnée (Cui et al., 2003; Curran and Wilcock, 2005; Ferguson et al., 1989; Iseya and Ikeda, 1987; Jackson and Beschta, 1984; Raudkivi and Ettema, 1982; Wilcock et al., 2001). Ces études sont très bien représentées par le travail de Iseya et Ikeda (Iseya and Ikeda, 1987) qui ont analysé les variations de comportement d'un système en fonction de l'augmentation de la teneur en sable du mélange, pour des débits liquide et solide (totaux) constants.

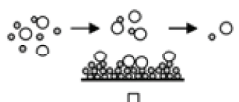
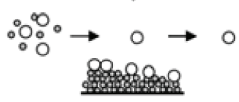
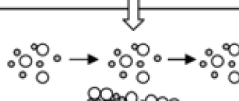
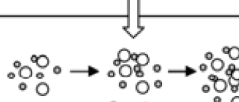
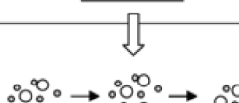



**Figure 18 :** Résultats expérimentaux pour un débit liquide  $Q$  et solide  $Q_s$  constants (Iseya and Ikeda, 1987).

Le résultat (Figure 18) montre que la puissance nécessaire pour transporter un mélange grossier (0% de sable) est supérieure à la puissance nécessaire pour transporter 100% de sable fins, pour un même débit solide, conformément au concept d'équilibre (Figure 2). Par contre, le transport d'un mélange de sable et de sédiments grossiers nécessite une puissance inférieure à celle nécessaire pour le transport du sable pur, de diamètre inférieur, ce qui est en contradiction avec le concept d'équilibre. C'est ce que l'on observe avec les nappes de charriage.

#### 1.4.2. Un schéma conceptuel pour décrire les fluctuations de débit solide et de pente : Recking et al. 2009

Recking (2006) a proposé un modèle conceptuel (Figure 19) pour décrire l'apparition des nappes de charriage dans un système à granulométrie étendue, basé sur le principe de conservation de l'énergie (Eq. 34) et sur l'observation d'un tri granulométrique très efficace qui se produit dans la partie amont du système.

Observed periodical bed state	Consequences on transport	Energy conservation
	Aggradation with reduced gravel mobility. Longitudinal and vertical grain sorting produce progressive bed subsurface fining.	Low efficiency $e$ Slope increase until $S=S_M$ verifying $eS_M=\varphi(q_s, q)$
	Congested bed (some runs develop a pavement): transport of coarse gravels, finer gravels being quickly stored in the bed	The gravel transport rate efficiency is minimum $e_m$ : $e_m S < \varphi(q_s, q)$
	Aggradation is not infinite and stops when the new energy slope $S_M$ allows transporting injected sediments	$q_{s(in)}=q_{s(out)}$ , presence of fine sediments in the bedload layer increases the coarse gravel mobility.
	Increased gravel mobility and strong local erosion producing a <b>bedload sheet</b> .	Peak solid discharge associated with bedload sheet migration.
	Gravel mobility is reduced abruptly when a minimum slope $S_m$ is attained. In some runs antidune waves contribute to reducing this mobility.	$e_m S_M \gg \varphi(q_s, q)$ $S$ decreases until $e_m S = \varphi(q_s, q)$ is verified
	Cells of immobile coarse gravels stop the finer gravel transport. The outlet solid discharge decreases abruptly. Aggradation starts again.	Abrupt transport rate efficiency decrease $e \ll e_m$ , $e S_m \ll \varphi(q_s, q)$ . New slope increase.

**Figure 19** : Scénario de fluctuations entre deux extrêmes de pente pour un système à granulométrie étendue, d'après Recking et al. (2009).

Un cycle est composé d'une aggradation et d'une érosion. Pendant l'aggradation le système augmente sa pente d'énergie et un tri granulométrique vertical et longitudinal très efficace associé à la formation progressive du pavage sur la surface du lit est observé. Le débit solide en sortie du système diminue et tend progressivement vers zéro. Le système atteint alors une valeur de pente maximale  $S_M$  qui correspond à la pente d'équilibre pour les conditions d'alimentation imposées et pour le diamètre moyen arithmétique du mélange. La capacité de transport du système est alors celle imposée par les conditions d'alimentation et l'aggradation s'arrête. Néanmoins, une stratification se met rapidement en place dans la couche charriée (avec une couche de sable en dessous du matériau grossier). Il en suit une augmentation de l'efficacité de transport et une forte érosion associée à la production et la propagation d'une nappe de charriage est alors observée. L'érosion est de longue durée et un pic de débit solide est enregistré à la sortie du système. Le phénomène érosif s'arrête quand le système atteint une nouvelle condition d'équilibre énergétique, représentée par une valeur de pente minimale  $S_m$ .

Sur la base de ce scénario, Recking (2006) a proposé une relation pour le calcul de la pente minimale du système à partir de la connaissance de la pente maximale  $S_M$ . La pente minimale peut être calculée en considérant que le système est à l'équilibre (en termes de débits solide et liquide) mais pour des conditions de transport très efficace (sur nappe de charriage) ; cette condition se traduit dans l'utilisation d'une loi de transport valable pour de fortes conditions hydrauliques (par exemple l'équation 20) en considérant le débit solide d'équilibre égal au



débit d'alimentation solide (Eq. 35, Recking, 2006) mais pour des pentes et nombre de Shields différents :

$$S_m = \frac{S_M}{\theta} \left( \frac{\Phi_A}{14} \right)^{\frac{1}{2.45}} \quad (35)$$

Où :

$\Phi_A$  [-] représente le débit solide d'alimentation (paramètre d'Einstein).

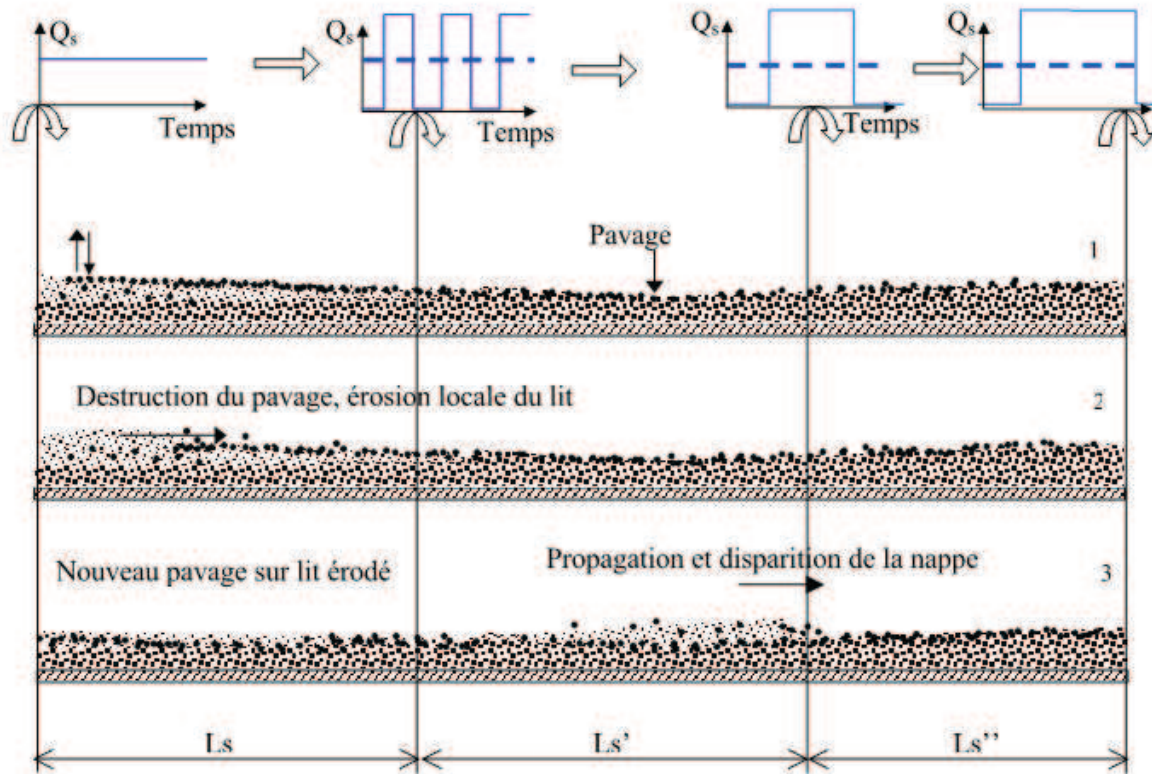
#### 1.4.3. La modélisation par compartiments : Recking (2006)

Le modèle à compartiments a été proposé pour interpréter la superposition de plusieurs périodes temporelles et spatiales dans les mesures de débit solide et de pente. Ce modèle est formulé et expliqué dans le détail par Recking (2006). Nous nous limiterons ici à expliquer en quoi consiste un comportement par compartiments du système.

Le modèle par compartiments repose sur l'hypothèse suivante : les nappes de charriage sont produites par un tri granulométrique local et efficace, sur une longueur finie  $L_s$  qui dépend des conditions d'alimentation, et produisant des « bouffées » sédimentaires qui seraient ensuite reprise par l'écoulement et transiteraient vers l'aval.

Le schéma de comportement du système est reporté en Figure 20 (Recking, 2006). Le mécanisme que l'auteur veut reproduire par la modélisation est donc le suivant : alimentée de façon constante, l'extrémité amont de longueur  $L_s$  (compartiment amont) est soumise à des cycles courts d'aggradations et de dégradations successives. Elle peut être comparée à une pompe à sédiments qui fluctue à haute fréquence entre les deux extrêmes de pente. Chaque aggradation a été associée à la formation progressive d'un pavage de surface et un enfouissement des sédiments fins. Les dégradations correspondent au contraire à une destruction locale du pavage libérant les sédiments fins: c'est la naissance de la nappe de charriage.

Les parties aval du canal (compartiments avals) sont alimentées en moyenne par le même flux solide que la partie amont, mais de façon discontinue, avec une périodicité étroitement liée aux pulsations de la zone amont. Quand une nappe de charriage se propage vers l'aval, elle perd sa puissance en échangeant des sédiments avec les couches sous-jacentes. Le processus de tri observé sur la longueur  $L_s$  continuerait donc de se produire sur les parties aval, mais ne pourrait exister que périodiquement, lors du passage des nappes de charriage. Pour cette raison, une réponse du lit sur une distance  $L_s$  serait à priori prévisible mais avec un temps caractéristique bien plus élevé que pour le fonctionnement du lit observé sur la longueur  $L_s$ . Les parties aval seraient donc supposées fluctuer entre les deux extrêmes (pente maximum et minimum) imposés par les conditions d'alimentation (et dont la signification physique a été expliquée dans le paragraphe précédent), mais avec une périodicité qui augmenterait avec l'ordre du compartiment (dans la direction amont-aval) et sur des longueurs à priori différentes de  $L_s$ .



**Figure 20 :** Schéma conceptuel du fonctionnement du lit par compartiments, d'après Recking (2006).

Une analyse de Fourier du signal de pente a confirmé que chaque compartiment est responsable d'une période de fluctuation du signal principal, avec une périodicité qui augmente avec l'ordre du compartiment (Recking, 2006).

Le modèle proposé se base sur les hypothèses suivantes (Recking et al. Submitted) :

1. Chaque compartiment fluctue entre une pente maximum et une pente minimum qui ne dépendent que de l'alimentation solide et liquide (voir paragraphe 1.4.2).
2. La cote du lit de chaque compartiment fluctue de façon indépendante autour d'une valeur moyenne, cette dernière étant toutefois imposée par le niveau du lit du compartiment adjacent en aval.
3. Chaque compartiment fluctue avec une période caractéristique  $T_n$  qui augmente avec l'augmentation de son ordre en raison de la discontinuité d'alimentation.

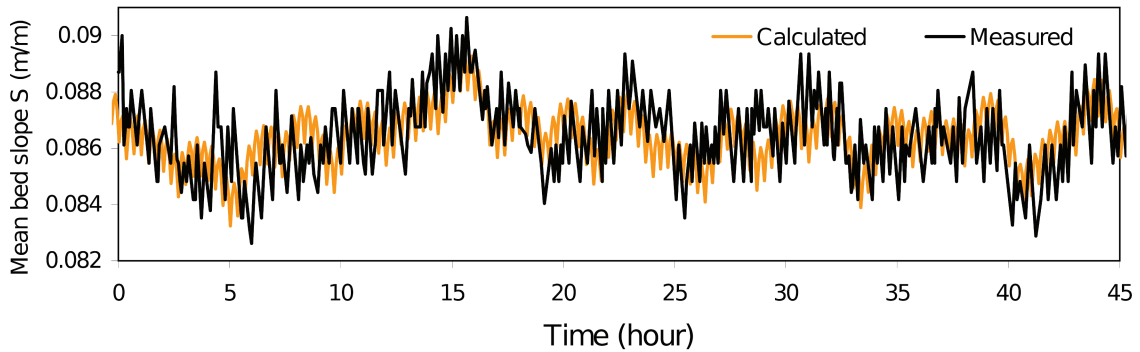
Ce comportement peut être modélisé en sommant plusieurs fonctions sinusoïdales de période  $T$  (une période distincte par fonction) et d'amplitude égale à la longueur fluctuante de chaque compartiment ( $L_n$ ) fois la variation de pente ( $S_o - S_o'$ ). Cette somme est divisée par la longueur totale fluctuante  $L$  pour retrouver la dimension d'une pente. Le modèle donnant la pente moyenne instantanée  $S_{oi}$  au temps  $t$  est formulé par l'équation 36 :

$$S_{oi}(t) = S_o' + \frac{S_o - S_o'}{L} \sum_{n=1}^N \text{abs} \left\{ \frac{L_n}{L} \sin \left( \frac{\pi}{T_n} t + \varphi_n \right) \right\} \quad (36)$$

Où :

- $\varphi_n$  [rad] est la phase pour chaque compartiment ;
- $L_n$  [m] est la longueur de chaque compartiment du système.

Le modèle permet alors de reproduire les signaux mesurés expérimentalement (Figure 21). Il s'agit d'un outil descriptif et, en aucun cas, d'un modèle prédictif.



**Figure 21 :** Exemple d'application du modèle par compartiments sur le signal de pente mesuré pour *Run7* (Recking et al. Submitted).

Nous allons maintenant nous intéresser au protocole mis en place au cours de la thèse pour la réalisation des expérimentations en canal.

## 2. CHAPITRE 2 : PROTOCOLE EXPERIMENTAL

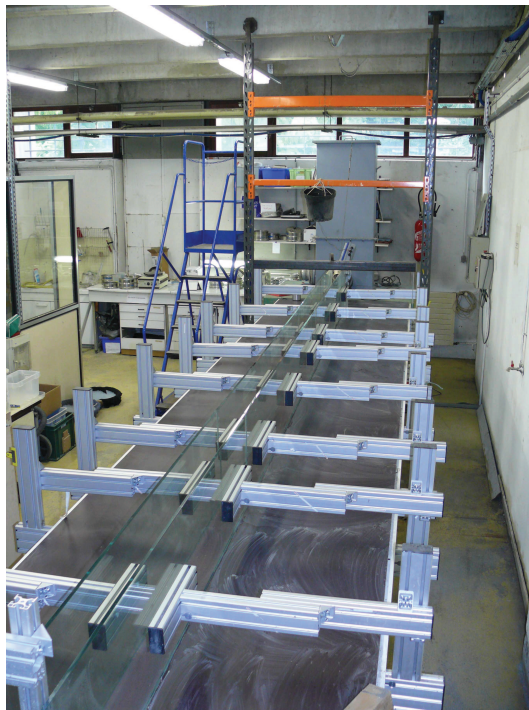
---

### 2.1. La plateforme expérimentale

Toutes les expériences ont été réalisées au Laboratoire d'Hydraulique du Cemagref de Grenoble. L'objectif étant d'analyser le rôle du tri granulométrique sur la dynamique sédimentaire d'un système à granulométrie étendue et à forte pente, il était donc important de connaître avec une bonne précision les grandeurs physiques qui caractérisent chaque écoulement. Notamment, le débit liquide, le débit solide, la pente (locale et globale) et la granulométrie de surface. C'est pourquoi un protocole expérimental a été mis en place, basé à la fois sur l'adaptation des systèmes de mesure existants (mesures de pente, mesures de transport solide par analyse d'images), et sur des outils et méthodes de mesure développés en fonction des exigences de la thèse : mesures de la granulométrie de surface et mesure de la vitesse de surface de l'écoulement. L'objectif de ce chapitre est de présenter les différents dispositifs qui ont été développés, la précision des instruments de mesure et le protocole expérimental ayant été choisi.

#### 2.1.1. Présentation générale du dispositif

Le dispositif expérimental (Figure 22) est constitué d'un canal de 6 m de longueur, de pente variable (0 à 20%) et de largeur variable (0 à 1.5 m). Les parois du canal sont en verre, ce qui permet d'observer par le côté les phénomènes de transport ainsi que de mesurer les pentes locales et la vitesse de surface de l'écoulement.



**Figure 22 :** Canal expérimental.

Différents équipements ont été ajoutés au canal expérimental pour les besoins de la thèse (Figure 23) : une alimentation solide, une pompe pour la recirculation des volumes d'eau stockés dans le réservoir aval, un débitmètre électromagnétique pour les mesures de débit liquide, une caméra rapide pour les mesures de débit solide en sortie du système (dispositif GDS), un support mécanique pour le positionnement de l'appareil photo (pour les mesures de granulométrie de surface), ainsi que des ordinateurs pour l'acquisition et le stockage des données.

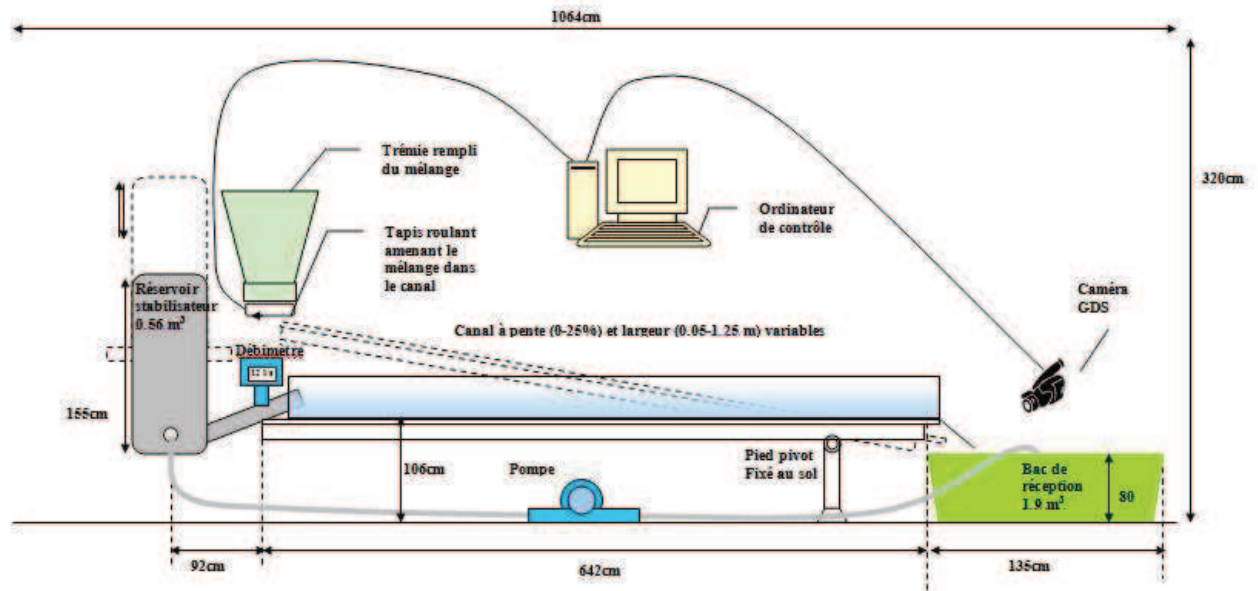


Figure 23: Dispositif expérimental.

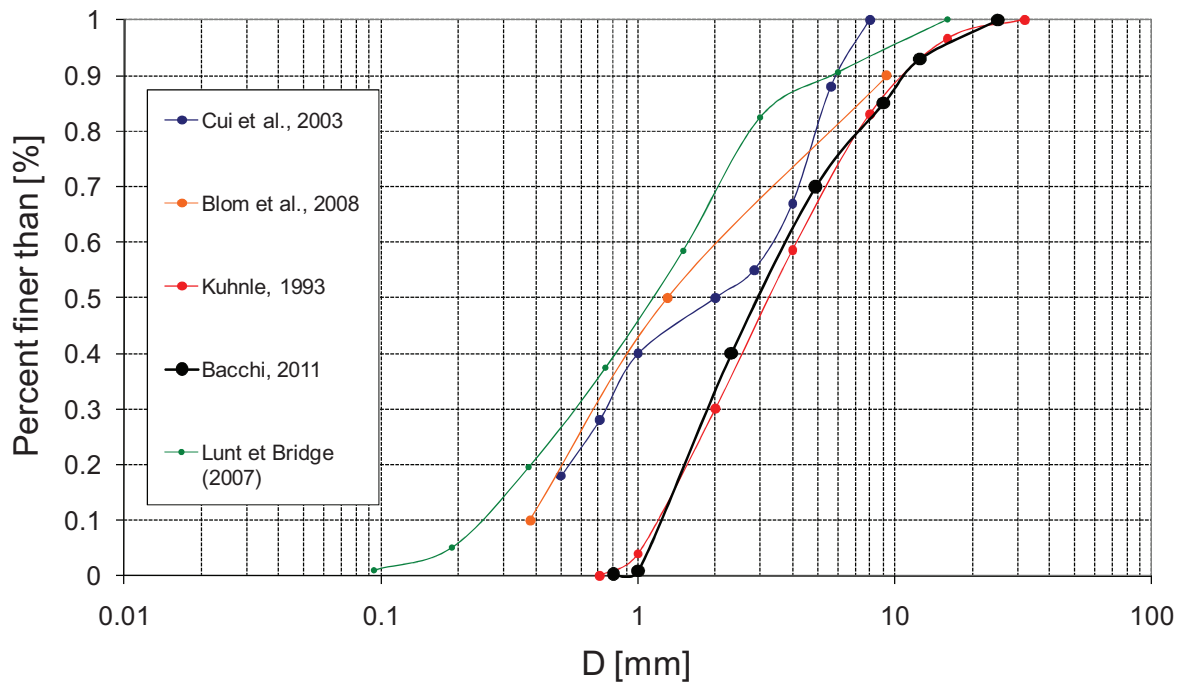
### 2.1.2. Les matériaux utilisés

Six matériaux naturels quasi-uniformes de diamètre moyen égal à 1 mm, 2.3 mm, 4.9 mm, 9 mm, 12.5 mm et 18.7 mm ont été utilisés pour les expérimentations. La courbe granulométrique complète est comparée à celle utilisée dans d'autres études expérimentales à granulométrie étendue (Blom et al. 2008; Cui et al. 2003; Kuhnle 1993; Lunt and Bridge 2007) sur la Figure 24.

Les diamètres caractéristiques du mélange sont reportés dans le Tableau 2.

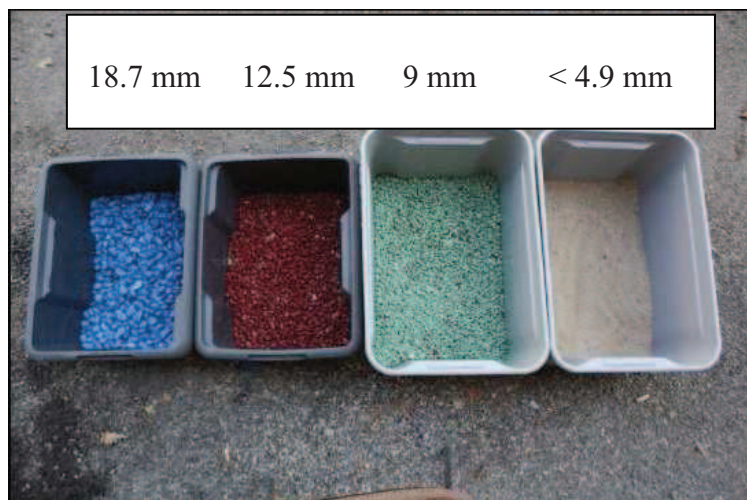
	$D_{16}$ [mm]	$D_{30}$ [mm]	$D_{50}$ [mm]	$D_{84}$ [mm]	$D_m$ [mm]
<i>Courbe Granulométrique</i>	1.84	2.13	3.16	9	6

Tableau 2 : Courbe granulométrique du matériau utilisé pour l'étude expérimentale en granulométrie étendue.



**Figure 24 :** Comparaison entre les courbes granulométriques du mélange utilisé pour la thèse et des mélanges d'autres études en granulométrie étendue.

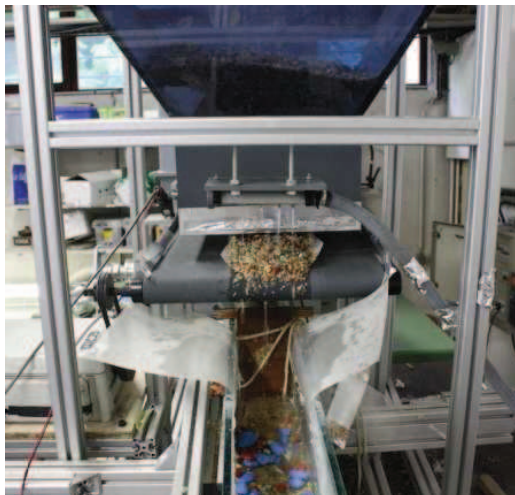
Les grains les plus grossiers du mélange (9 mm, 12.5 mm et 18.7 mm) ont été peints de différentes couleurs (Figure 25) afin de faciliter l'observation du tri granulométrique sur la surface du lit. La peinture utilisée est du type « peinture sol – trafic extrême ». Cette peinture a été choisie en raison de son imperméabilité et de sa résistance au frottement. Nous avons vaporisé la peinture sur les graviers, afin d'avoir une distribution de couleur la plus homogène possible sur le matériau, sans pour autant créer des couches trop épaisses de peinture (ces couches pourraient augmenter la taille des particules et créer des effets cohésifs).



**Figure 25 :** matériaux colorés pour les expériences.

### 2.1.3. Le dispositif d'alimentation solide

Les études de transport solide nécessitent l'emploi d'un système d'alimentation de flux solide. Les sédiments peuvent être injectés dans le système par le biais d'une pompe à sédiments, qui re-circule directement le matériau sortant du canal, ou à travers un système à injection directe (« vis sans fin » ou « tapis roulant »). Pour cette thèse, nous avons choisi de construire un dispositif « tapis roulant » sur le modèle d'autres travaux réalisés au sein du laboratoire (Recking, 2006). Le dispositif d'alimentation solide (Figure 26) est composé d'une trémie, d'un tapis roulant, d'un bloc moteur et d'un système tachymétrique de suivi et d'enregistrement de la vitesse du tapis roulant. Le mélange granulaire est injecté dans la trémie qui alimente gravitairement le tapis roulant. Le débit solide est contrôlé par la composition du mélange granulaire, les dimensions de l'orifice de sortie de la trémie (réglable), la distance entre la trémie et le tapis roulant (réglable), et la vitesse du tapis roulant (réglable grâce à un potentiomètre). Un système de goutte à goutte (Figure 27) a été ajouté à l'aplomb du déversement du matériau dans le canal afin de s'assurer que le matériau ne colle pas au tapis et que l'alimentation ne se fasse pas par paquets.

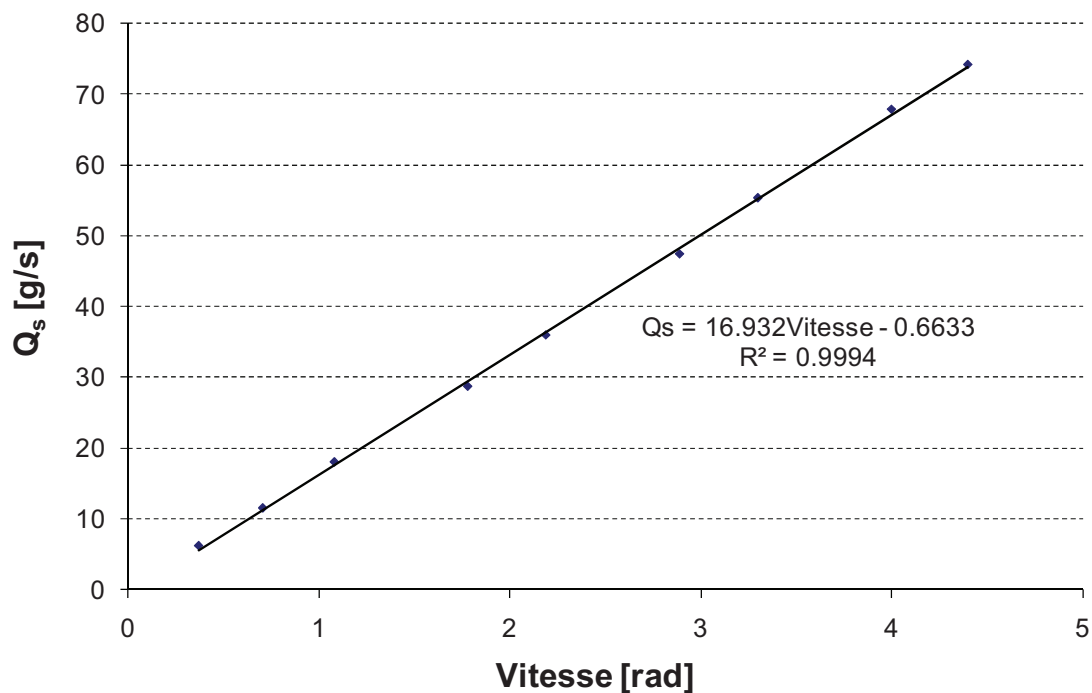


**Figure 26 :** Vision d'ensemble du système d'alimentation solide.



**Figure 27 :** Système de goutte à goutte.

Pour une configuration donnée de la trémie (dimension de l'orifice de sortie et distance entre la trémie et le tapis roulant données), c'est grâce à un suivi (et un enregistrement) de la vitesse de rotation du tapis roulant par le dispositif tachymétrique que l'on peut s'assurer de la constance du débit solide. Plus précisément, pour le mélange granulaire donné, une corrélation entre débit solide et vitesse du tapis-roulant a été mesurée (Figure 28).



**Figure 28** : Courbe de calibration de la trémie ; relation entre le débit solide et la vitesse du tapis roulant pour une courbe granulométrique donnée (Figure 24).

## 2.2. Le dispositif de mesure du débit solide par analyse d'images

La méthode d'acquisition et d'analyse d'images pour la quantification du débit solide et de la granulométrie en sortie du canal a été développée par Frey et al. (2003) et utilisée dans des cadres différents de ceux de cette thèse. Toutefois, pour les exigences de la thèse, un nouveau dispositif adapté aux nouvelles conditions expérimentales a été conçu. De plus, le logiciel utilisé pour le calcul de la granulométrie et du débit solide (décrit ci-dessous) a été modifié et adapté au mélange granulaire et aux conditions expérimentales utilisées.

### 2.2.1. Description de l'installation expérimentale pour la prise d'images en sortie du canal

Le nouveau dispositif GDS (Figure 29) est composé d'un plan incliné constitué d'une caisse en pvc (étanche) qui contient un système d'illumination « backlight » et une caméra rapide monochrome progressive PULNIX TM6705 pour la prise des images à haute fréquence. L'éclairage est posé sur le fond du réservoir aval (Figure 23) grâce des pieds en acier de longueur variable. Deux bras mécaniques rattachent le corps du dispositif au canal. Ces bras ont été fixés au canal de façon à pouvoir pivoter, ce qui permet de changer la pente du dispositif en fonction des exigences expérimentales.



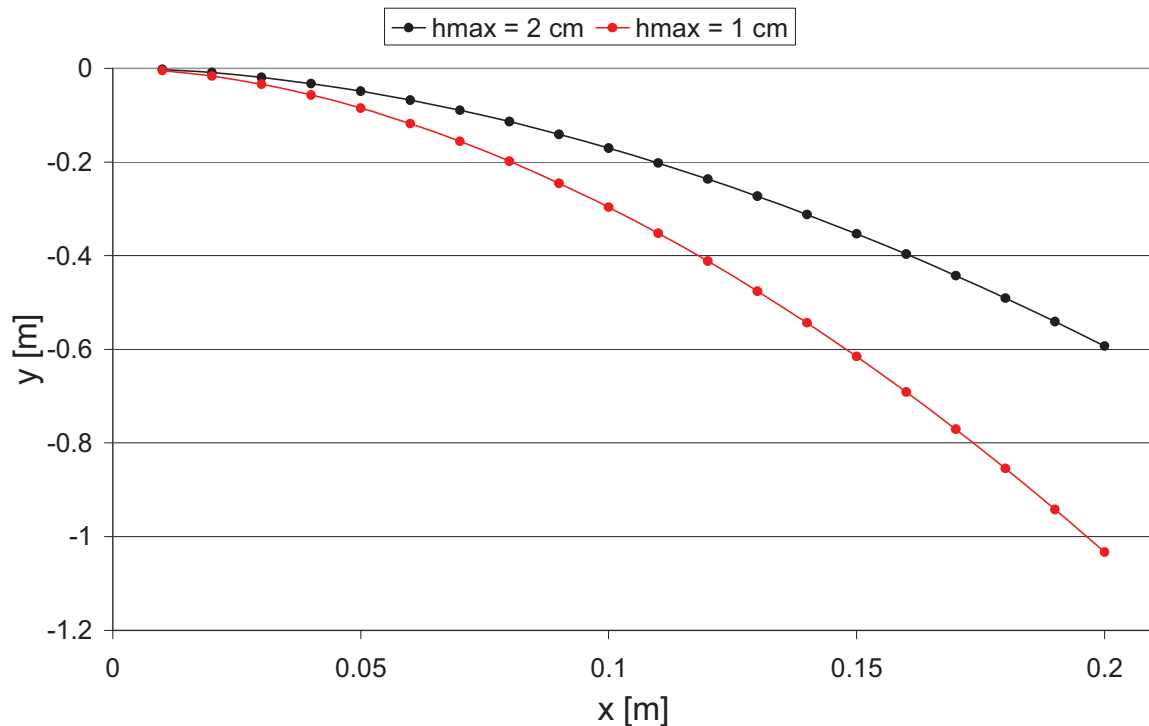


**Figure 29** : Dispositif GDS et seuil pour la récupération du matériau en sortie du canal.

La pente du dispositif est choisie pour permettre la plus grande dispersion des particules sur le plan incliné et diminuer la formation de bulles d'air provoquées par le détachement de la veine liquide en sortie du canal. Pour cela, nous avons construit un évacuateur de crue en plastique de type Craeger-Schimeni (Eq. 37, Figure 30).

$$\frac{y}{h_{\max}} = 0.47 \cdot \left( \frac{x}{h_{\max}} \right)^{1.80} \quad (37)$$

Où  $h_{\max}$  [m] est le niveau maximal d'eau par rapport au niveau de l'évacuateur et  $x$  et  $y$  sont les coordonnées d'un système de référence cartésien qui a pour origine (zéro du système de référence) le début de l'évacuateur (positionné à la sortie du canal).



**Figure 30** : Profil d'évacuateur de crue du type Craeger-Schimeni.

Pour profiler l'ouvrage, il a donc été nécessaire d'imposer une hauteur maximale  $h_{\max}$  [m]. On a choisi une hauteur de « projet » comprise entre 0.01 et 0.02 m (Figure 30) sur la base des observations de la profondeur de l'écoulement. Le vrai profil a été construit à la main en cherchant à respecter les courbes théoriques calculées.

Ce petit ouvrage permet une liaison directe entre le canal et le dispositif GDS et a permis de réduire la présence de bulles d'air dans l'écoulement.

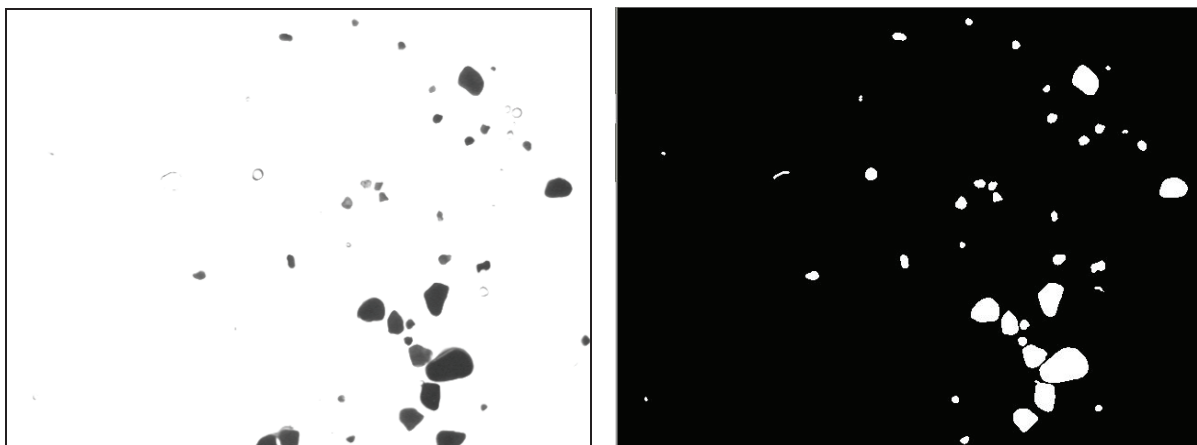
Le matériau transporté par l'écoulement (matériau charrié) passe sur le plan incliné éclairé et est récupéré provisoirement à l'aide d'un seau positionné à l'aval du dispositif GDS (Figure 29). Le seau sert également à mesurer le débit solide (mesure de poids du matériau transporté dans le temps) en sortie qui sera comparé aux mesures réalisées par analyse d'images.

### 2.2.2. Procédure d'acquisition et méthode d'analyse d'images

La prise d'images est assurée grâce à une caméra monochrome progressive PULNIX TM6705, avec une résolution de 640\*480 et une fréquence maximale d'acquisition de 60 images par seconde. Le logiciel d'acquisition a été développé par l'équipe TSI de l'université de St. Etienne et donne la possibilité de choisir, en entrée :

1. la fréquence d'acquisition (c'est-à-dire le nombre d'images enregistrées par seconde - **60 im/sec** dans le cadre de nos expériences) ;
2. le nombre d'images par séquence (nombre d'images totales prises en groupe - **15 im/sec** dans le cadre de nos expériences) ;
3. la fréquence d'acquisition des séquences : temps total nécessaire pour l'acquisition et l'enregistrement des images d'une séquence sur la mémoire vive de l'ordinateur.

Pour accéder à la granulométrie des particules, une technique de segmentation permet de séparer les particules du fond et les particules entre elles (Figure 31).

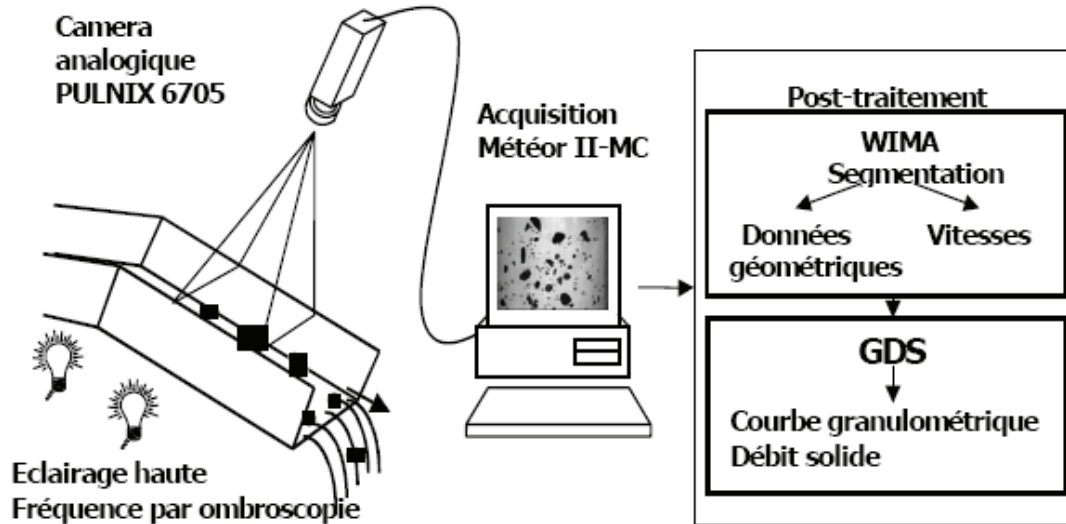


**Figure 31** : Exemple d'image brute et résultat des opérations de segmentation extrait par *Essai2* (voir paragraphe 2.5) ; les particules touchant les bords sont éliminées par l'algorithme.

L'algorithme de segmentation retenu est donc décomposé en deux étapes : séparation des particules du fond et séparation des particules collées. La première étape utilise un gradient de type Sobel, puis une détection des lignes de crêtes du gradient à base d'amincissements. L'étape de séparation des particules est basée sur le calcul d'une carte des niveaux d'érosion

des particules, puis sur une reconstruction des particules à partir d'épaissements conditionnels successifs. Cet algorithme contrôle aussi la concavité des particules : il ne sépare que les groupes de particules présentant une forte concavité.

Une fois la segmentation effectuée, chaque particule détectée est mesurée automatiquement suivant ses deux directions principales d'inertie qui correspondent à son mesodiamètre et à sa longueur. Un schéma du fonctionnement du dispositif est reporté sur la Figure 32 :

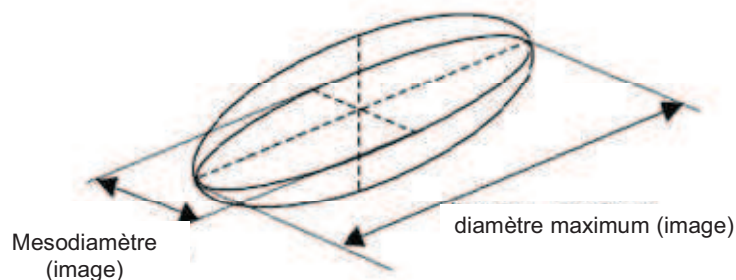


**Figure 32** : Schéma de fonctionnement du dispositif GDS – acquisition et post-traitement, d'après Frey et al. 2003.

### 2.2.3. Procédure de calcul du débit solide et de la granulométrie

Pour calculer le débit solide et la granulométrie du matériau transporté, il faut tout d'abord estimer le volume réel des particules à partir des images bidimensionnelles enregistrées. Les hypothèses de base utilisées sont :

1. écoulement des particules dans leur plan stable : c'est-à-dire que la particule est vue dans son plan d'énergie minimale ;
2. forme des particules convexe ;
3. choix d'un modèle de forme de type ellipsoïde (Figure 33).



**Figure 33** : Modèle ellipsoïde pour la représentation des particules.

Le logiciel WIMA (Ducottet 1994) permet de calculer l'aire  $A$ , le mesodiamètre  $d$  (diamètre minimum) et le diamètre maximum  $D$  à partir des images bidimensionnelles. Pour calculer le volume image de chaque particule, il est nécessaire de connaître l'épaisseur de la particule (sa troisième dimension). L'épaisseur  $e$  est une fraction du mesodiamètre,  $e = \alpha d$ . Ce paramètre de forme  $\alpha$ , dit « coefficient d'aplatissement », est calé à partir d'un échantillon de particules. Le volume  $V_i$  de chaque particule est donc :

$$V_i = \frac{\pi}{6} \alpha d^2 D = \frac{2}{3} \alpha d A \quad (38)$$

Des tests ont été effectués sur le matériau afin de déterminer la bonne valeur du coefficient d'aplatissement pour chaque classe granulométrique. Ces tests consistent en une confrontation directe entre la masse des particules réelles et la masse des particules calculée avec Wima. Les résultats de ces calibrations (Tableau 3) nous ont permis de caler un coefficient d'aplatissement pour chaque classe granulométrique, comme étant le rapport entre masse « réelle » et masse « image ».

D [mm]	$\alpha$ [-]
2.3	0.75
4.9	0.61
9	0.65
12.5	0.62
18.7	0.67

**Tableau 3** : Coefficient d'aplatissement pour chaque classe granulométrique.

A partir des volumes, le débit solide total  $Q_s$  [g/s] est obtenu comme étant la somme des débits solides élémentaires  $Q_{si}$  [g/s] de chaque classe  $i$  de particules :

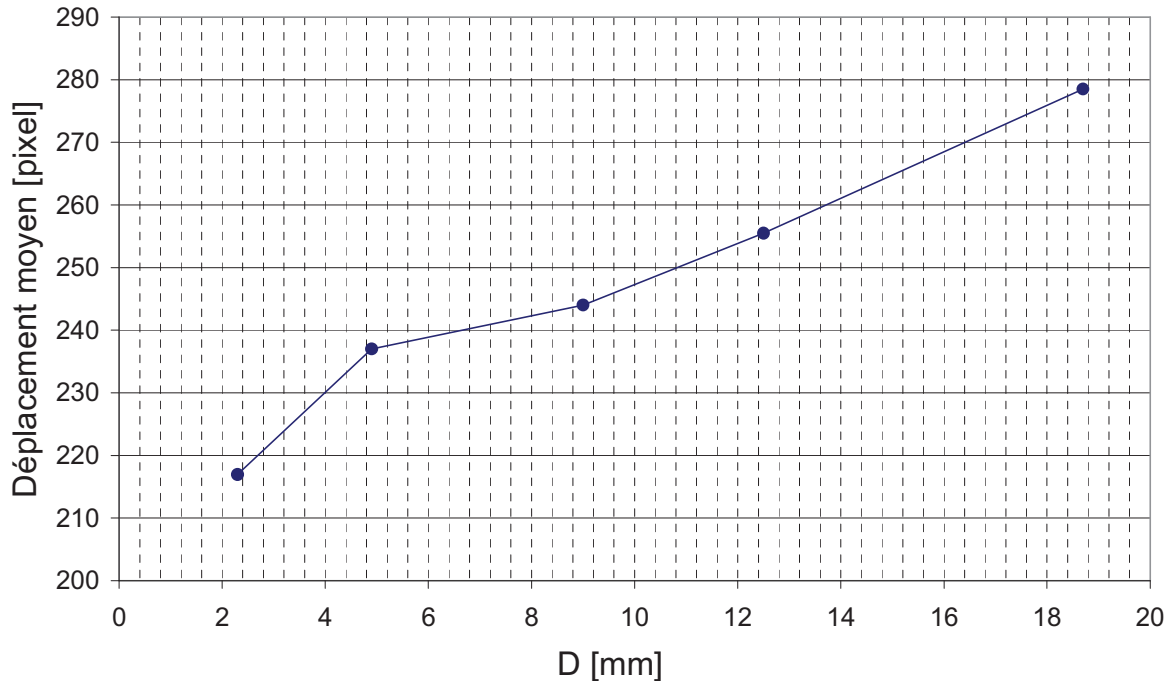
$$Q_s = \sum_{i \in \text{particules}} Q_{Si} = \sum_{i \in \text{particules}} \frac{\rho_s V_i v_i}{h} \quad (39)$$

Où  $v_i$  [pixel/sec] est la vitesse de déplacement des particules de la classe  $i$ ,  $h$  [pixel] est la longueur de l'image dans le sens de l'écoulement et  $\rho_s$  (2650 Kg/m<sup>3</sup>) est la densité du matériau.

La vitesse de déplacement des particules «  $v_i$  » est le rapport entre le déplacement moyen d'une particule de la classe  $i$  entre deux images successives  $d_i$  [pixel] et le délai de temps, en secondes, qui sépare les deux images. Pour nos expériences deux images successives sont séparées par un délai de temps fixe de 0.066 seconds. Cette valeur est fonction seulement de la fréquence d'acquisition choisie (notamment 60 *imm/sec*).

La valeur du déplacement moyen de chaque classe granulométrique composant le mélange s'est relevée être constante (Frey et al., 2003). Toutefois, ceci est vrai pour de forts débits

liquides et des pentes assez élevées de la table lumineuse. Dans des conditions de transport faible, le déplacement  $d_i$  [pixel] des particules peut être une fonction de la taille des particules elles-mêmes. Ceci a été observé lors des expérimentations comme le montre la Figure 34 obtenue dans le cas de l'expérience à « *Faible Transport* » (voir Chapitre 3, Partie 2).



**Figure 34 :** Exemple de déplacement moyen des particules (pixel) en fonction de leur taille ; le délai de temps entre deux images est égal à 0.066 seconds.

Une fois calculé le débit solide pour chaque fraction granulométrique, le pourcentage de chaque fraction granulométrique du mélange est calculé comme suit :

$$\%_{classe} = \frac{\sum_{d_i \in classe} Q_{s_i}}{Q_s} \quad (40)$$

Où  $N$  [-] est le nombre de classes granulométriques du mélange utilisé. A noter qu'il aurait été possible de calculer  $v_i$  pour chaque particule (comme reporté par Zimmermann et al., 2008), mais cela aurait nécessité une fréquence image bien plus élevée permettant le tracking et une longueur de calcul peut compatible avec les longues durées des expériences.

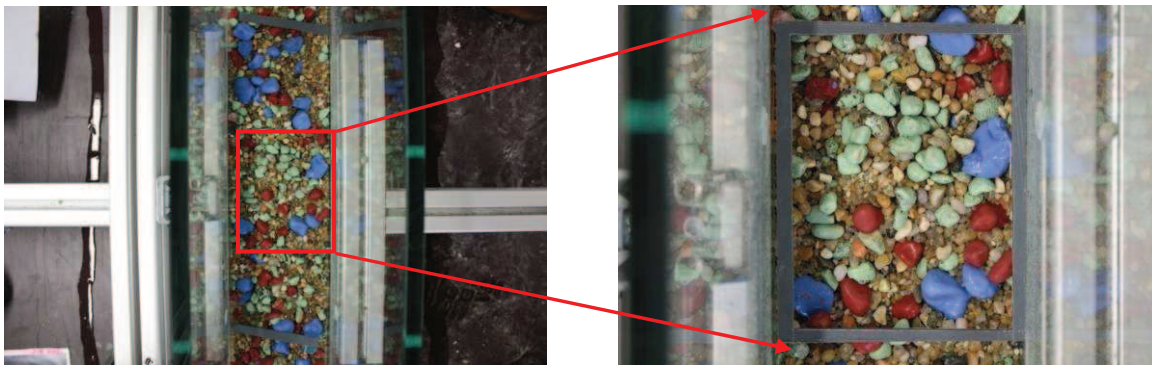
### 2.3. Granulométrie et morphologie du lit

L'un des objectifs de ce travail expérimental est la détermination de la relation entre la morphologie du lit, la granulométrie de surface et la dynamique de transport. Pour cette raison, une partie de l'activité expérimentale a été consacrée à la mise au point d'un dispositif d'acquisition et de traitement de la granulométrie de surface à partir de photographies.

Afin d'obtenir des images exploitables de la surface du lit, il était nécessaire de stopper l'expérience pendant une trentaine de minutes afin que l'eau présente dans le canal soit

évacuée, permettant ainsi de prendre des photos. Nous avons utilisé deux sortes de clichés (Figure 35), pour chacune des parties du canal (qui, mises bout à bout, recouvraient la totalité du lit):

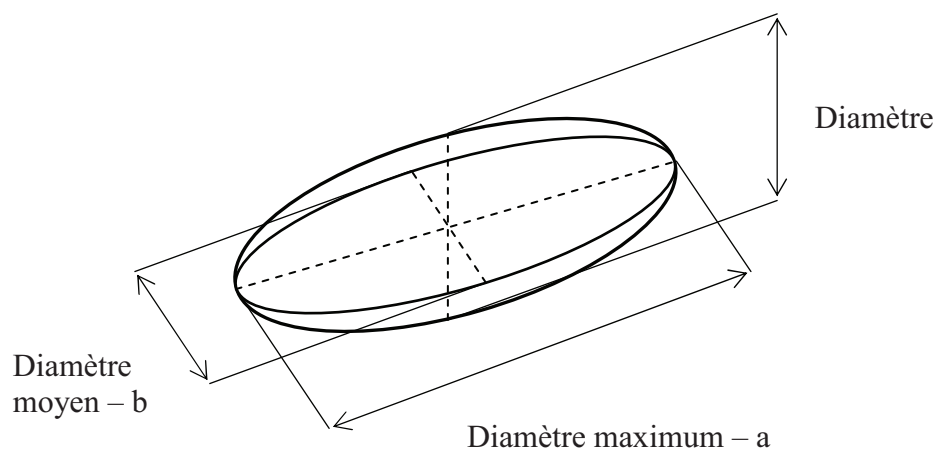
- Cliché 1 : Il nous a servi à obtenir un état de surface de la totalité du lit du canal, après assemblage de l'ensemble de ces clichés. Des bandelettes étaient placées aux extrémités de ce qui était capté par l'appareil afin que le logiciel d'assemblage puisse avoir des zones de recouvrement entre les photo.
- Cliché 2 : Plus précis, il nous a permis d'obtenir la distribution granulométrique de chaque partie du canal. Un cadre d'une dimension de 12\*9 cm était placé au centre du tronçon, afin de délimiter une zone d'étude plus restreinte mais représentative de la partie du canal considérée.



**Figure 35 :** Exemple de clichés pour les analyses ; Cliché 1 pour la reconstruction du profil granulométrique et Cliché 2 pour la quantification de la courbe granulométrique représentative de la zone.

### 2.3.1. Généralités sur l'échantillonnage granulométrique

Pour choisir une méthode d'échantillonnage granulométrique, une étude bibliographique préliminaire a été nécessaire. Une synthèse des principales techniques pour la détermination d'une courbe granulométrique de surface est reportée ci-dessous.



**Figure 36 :** Définition des axes caractéristiques d'une particule.

Pour effectuer un échantillonnage granulométrique en rivière afin d'obtenir une distribution de la taille des particules du lit, une certaine quantité de particules (nombre, masse) est prélevée sur le terrain. La taille des axes (en général l'axe b, Figure 36) de chaque particule est ensuite mesurée, ou alors chaque fraction obtenue par tamisage est pesée (méthode par pesée).

L'échantillonnage des particules peut être réalisé de trois manières :

- échantillonnage volumique : un volume de matériaux est prélevé dans le lit. Ce volume est déterminé par la taille des matériaux du lit, notamment le  $D_{max}$ . C'est la méthode généralement adoptée pour l'échantillonnage des sables. Deux cas sont possibles : soit l'échantillon contient à la fois des matériaux de la surface et de la subsurface, soit il contient uniquement des matériaux de cette dernière. Il n'est pas possible d'échantillonner la surface avec une telle méthode, et c'est, par ailleurs, la seule technique qui permet d'échantillonner la subsurface ;
- échantillonnage avec grille : il s'agit du « pebble count » (comptage des particules). A pas d'espace régulier, une particule est prélevée. Yuzyk et Winckler (1991) recommandent de prendre un pas deux fois supérieur au  $D_{max}$  afin d'éviter le double-comptage. La méthode généralement adoptée est celle de Wolman (Wolman 1954) ;
- échantillonnage surfacique : toutes les particules présentes sur une surface de dimensions données sont prélevées. La méthode la plus couramment utilisée est celle du « paint-and-pick » (peinture-et-collecte) (Lane et Carlson 1953) : la surface à échantillonner est peinte grâce à un spray, puis toutes les particules peintes sont prélevées.

La méthode dite de Wolman (Wolman 1954) consiste, pour un opérateur, à traverser une surface composée de graviers en suivant une « grille ». La grille peut être établie en marchant, ou mise en évidence par des lignes ou un décimètre étendu sur le sol. Une particule est collectée sous chaque nœud de la grille. Les particules sélectionnées dans l'échantillon doivent être choisies au hasard et l'échantillon doit être composé d'au moins 100 particules pour qu'il soit statistiquement représentatif.

### 2.3.2. Les différentes méthodes pour la détermination de la granulométrie de surface

Une fois les particules collectées, elles sont mesurées (ou passées au tamis ou au gabarit) et séparées selon des classes granulométriques : ces fractions constituent des sous-échantillons. Pour obtenir finalement la courbe granulométrique de l'échantillon, il faut analyser la fréquence de chaque fraction granulométrique en nombre ou en masse :

- fréquence en masse : chaque fraction granulométrique est pesée et sa masse est rapportée à la masse totale de l'échantillon. On obtient alors, pour l'échantillon, une fréquence d'occurrence en masse de chaque fraction granulométrique ;
- fréquence en nombre : le nombre de particules dans chaque fraction granulométrique est rapporté au nombre total de particules de l'échantillon. On obtient alors, pour l'échantillon, une fréquence d'occurrence en nombre de chaque fraction granulométrique. En théorie il est possible d'effectuer un échantillonnage volumique et de l'analyser en « nombre », mais cela est très peu pratique et donc peu usité.

Les trois méthodes d'échantillonnage (grille, surfacique et volumique) et les deux méthodes d'analyse granulométrique (par nombre et par masse) peuvent être combinées de (3 !) 6 façons différentes. La terminologie décrivant la méthode d'échantillonnage et la méthode d'analyse granulométrique est déclinée comme suit :

<b>analyse \ échantillonnage</b>	<b>grille (<i>grid</i>)</b>	<b>surfacique (<i>area</i>)</b>	<b>Volume</b>
nombre ( <i>number</i> )	grille-par-nombre ( <i>grid-by-number</i> )	aire-par-nombre ( <i>area-by-number</i> )	volume-par-nombre ( <i>volume-by-number</i> )
masse ( <i>weight</i> )	grille-par-masse ( <i>grid-by-weight</i> )	aire-par-masse ( <i>area-by-weight</i> )	volume-par-masse ( <i>volume-by-weight</i> )

**Tableau 4 :** Terminologie classique relative à différentes techniques d'échantillonnage granulométrique.

Des conversions sont possibles pour passer d'une méthode à une autre, en utilisant le modèle du cube plein (*voidless cube model*) de Kellerhals et Bray (1971).

<b>de \ vers</b>	<b>volume-par-masse</b>	<b>grille-par-nombre</b>	<b>grille-par-masse</b>	<b>aire-par-nombre</b>	<b>aire-par-masse</b>
volume-par-masse	1	1	$D^3$	$1/D^2$	D
grille-par-nombre	1	1	$D^3$	$1/D^2$	D
grille-par-masse	$1/D^3$	$1/D^3$	1	$1/D^5$	$1/D^2$
aire-par-nombre	$D^2$	$D^2$	$D^5$	1	$D^3$
aire-par-masse	$1/D$	$1/D$	$D^2$	$1/D^3$	1

**Tableau 5 :** Tableau de conversion pour comparer différentes méthodes d'échantillonnage, d'après Kellerhals et Bray, 1971.

La méthode de Wolmann (1954) et les autres méthodes reportées ci-dessus sont des méthodes manuelles qui nécessitent plusieurs heures de travail pour l'obtention d'une courbe granulométrique. Pour ces raisons, nous avons choisi de tester un logiciel, Digital Gravelometer™, conçu pour la détermination de la granulométrie de surface par photographie.



### 2.3.3. L'échantillonnage par photographie et le logiciel Digital Gravelometer™

La quantification de la granulométrie de surface à partir des photographies intéresse bon nombre d'ingénieurs et géologues travaillant en rivière. Ces techniques sont de plus en plus efficaces avec l'amélioration des nouvelles technologies (appareils photos, outils de calcul). L'intérêt réel d'un traitement automatisé des images pour la quantification de la granulométrie de surface est de diminuer le plus possible les temps de calcul et de récolte des données.

Les résultats peuvent être soit en fréquence-par-masse (Ibbeken and Schleyer 1986) soit sous une forme homogène à un échantillonnage de Wolman (1954) « grille-par-nombre » (Sime and Ferguson 2003). Récemment, Graham et al. (2005a) et Graham et al. (2005b) ont mis au point un logiciel appelé Digital Gravelometer™ permettant de mesurer rapidement la distribution de la taille des particules en surface. Le logiciel utilise des techniques de traitement d'images, afin de segmenter et de mesurer la taille de grains sur des photographies numériques. Il permet d'obtenir, au choix, des résultats homogènes à un échantillonnage surfacique avec fréquence en nombre (aire-par-nombre), ou à un échantillonnage par grille avec fréquence en nombre (grille-par-nombre) ; toutefois il ne permet pas d'obtenir de résultats en fréquence massique, car il travaille uniquement en 2D. Par comparaison avec le programme de Sime et Ferguson (2003), il semble que le logiciel Digital Gravelometer™ présente l'avantage d'être plus polyvalent (lithologies, forme des grains...) (Graham et al., 2005b).

Graham et al. (2005b) ont effectué des échantillonnages de terrain afin de valider leur logiciel. Ils ont utilisé la méthode du « paint-and-pick » (peinture-et-collecte, (Lane and Carlson 1953)). Cet échantillonnage surfacique est ensuite analysé en fréquence en nombre (aire-par-nombre), ce qui est aussi le cas pour la sortie des courbes granulométriques du logiciel Digital Gravelometer™ : les résultats des deux méthodes sont donc directement comparables. Il est ensuite possible de convertir les résultats « aire-par-nombre » pour obtenir des données homogènes à des données « grille-par-nombre » (Kellerhals and Bray 1971).

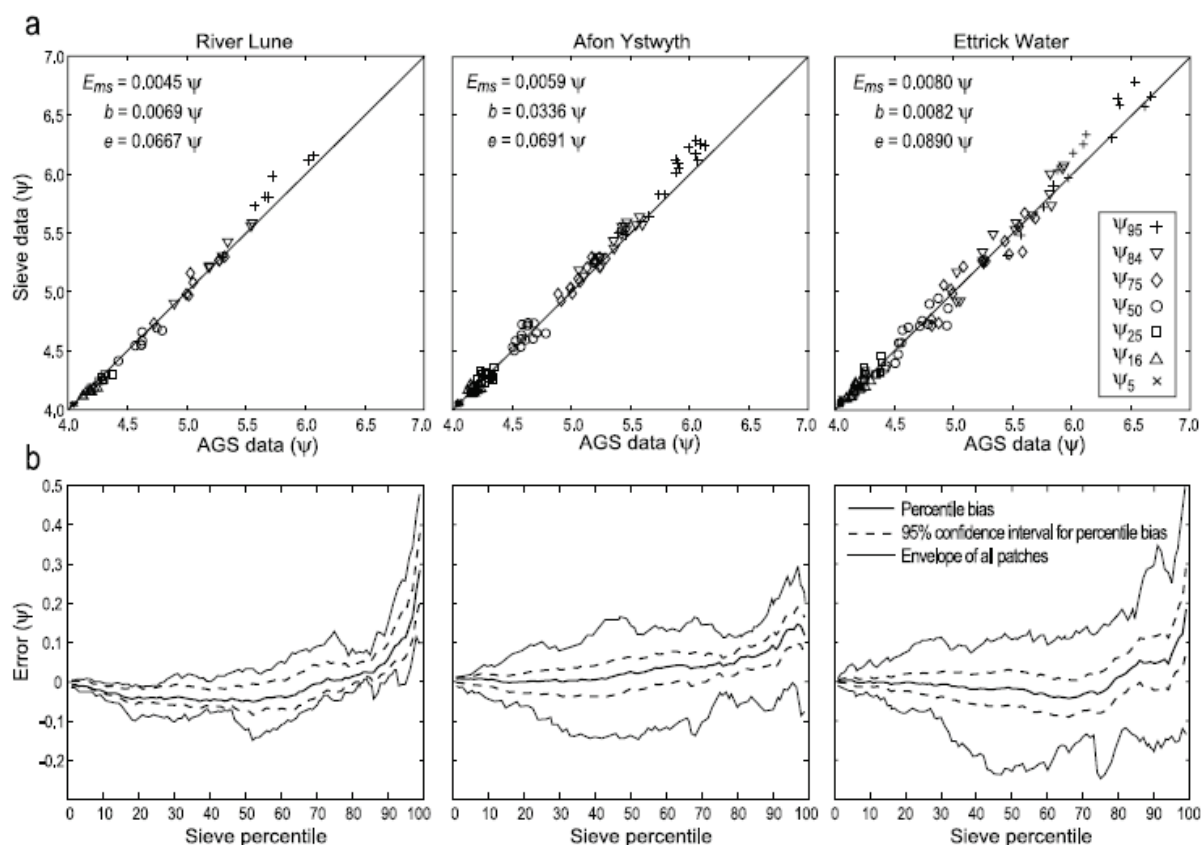
Une augmentation des erreurs (erreur moyenne ( $b$ ), erreur quadratique moyenne (Ems), erreur aléatoire irréductible ( $e$ )) avec l'augmentation du percentile  $\psi$  (avec  $\psi = \log_2(D)$ , où  $D$  est en mm) a été remarquée (Figure 16).

Il existe peu de littérature en ce qui concerne la précision à attendre d'une approche conventionnelle de l'échantillonnage granulométrique de terrain selon la méthode de Wolman (Graham et al., 2005b). Toutefois il semblerait (Rice and Church 1996) que l'on puisse s'attendre à des erreurs allant de  $\pm 0,2\psi$  à  $\pm 0,5\psi$  pour des échantillonnages de Wolman portant sur 100 particules, mais que la précision diminue pour les percentiles supérieurs au  $D_{90}$ .

Graham et al. (2005b) ont obtenu une précision similaire sur les résultats donnés par Digital Gravelometer™, bien que les erreurs soient distribuées différemment sur les percentiles par rapport à un échantillonnage de Wolman.

Il apparaît en outre que le logiciel présente certains avantages par rapport à une méthode d'échantillonnage conventionnelle : il n'existe pas de biais lié à l'opérateur, et la rapidité de la procédure automatisée par rapport à l'échantillonnage de Wolman permet d'augmenter le nombre de photographies analysées sur un faciès. En effet, le temps d'échantillonnage et de traitement d'une photographie est environ 6 à 20 fois plus rapide qu'un échantillonnage de Wolman sur 100 particules (Graham et al., 2005b). En moyennant les résultats obtenus sur ce

même faciès, la précision sur les percentiles s'en trouve augmentée. Grâce à l'automatisation de la procédure, il est donc possible, d'une part d'augmenter la taille de l'échantillon, et d'autre part de réduire l'erreur associée à une mauvaise identification de la population à échantillonner (erreur dans l'identification des limites d'un faciès).

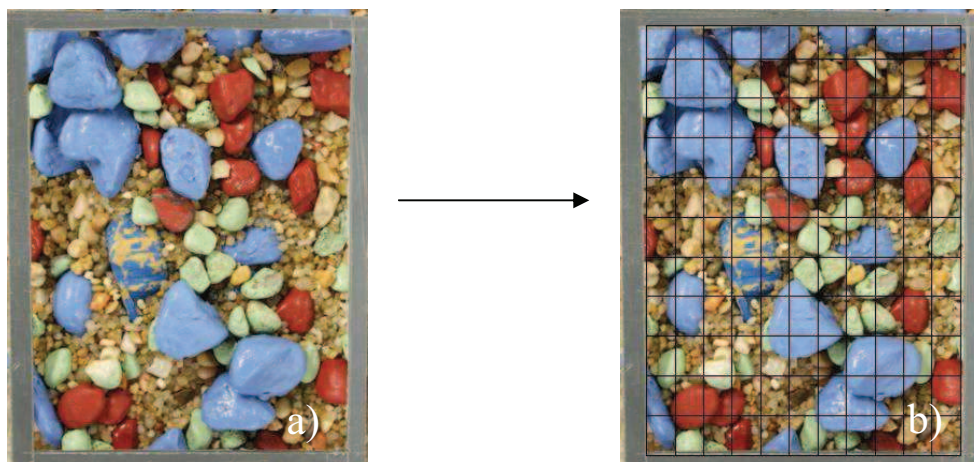


**Figure 37 :** Evaluation du logiciel Digital Gravelometer<sup>TM</sup> (Graham et al., 2005b) ; (a) Comparaison avec les résultats obtenus par la méthode du paint-and-pick ; (b) Enveloppes des erreurs associées, en fonction des percentiles  $\psi_i$  (avec  $\psi = \log 2(D)$ , où  $D$  est en mm).

#### 2.3.4. Test du logiciel Digital Gravelometer<sup>TM</sup>

Pour réaliser ces tests, nous avons choisi de comparer des courbes granulométriques connues (mélange) réalisées à la main avec les courbes granulométriques données par le logiciel et les courbes granulométriques données avec la méthode du « grid-by-number ». L'ensemble des résultats est reporté en ANNEXE1 et un exemple est sur la Figure 39.

Pour l'utilisation du logiciel Digital Gravelometer<sup>TM</sup> il suffit de donner en entrée quatre points de référence pour que le logiciel puisse automatiquement calculer la mire (rapport pixel/mm) et réajuster l'orientation de la photo.



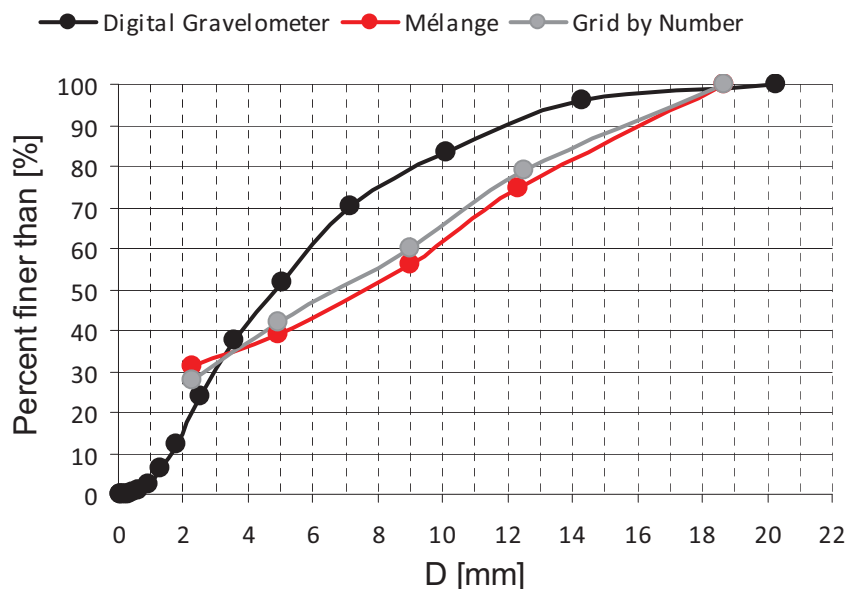
**Figure 38** : a) Exemple de cliché pour la validation du logiciel Digital Gravelometer™, b) Grille construite sur l'image photographique pour l'utilisation de la méthode de Wolmann sur les photographies prises au cours des expériences.

La courbe granulométrique obtenue avec le logiciel (en grille-par-nombre) doit être corrigée afin de la comparer avec la courbe granulométrique réelle obtenue par tamis. En effet, l'axe  $b$  mesuré par le logiciel est plus proche de celui mesuré avec une règle plutôt que de celui mesuré avec un tamis à maille carrée (Graham et al., 2005b). Pour cette raison, pour comparer les courbes granulométriques, il est nécessaire de considérer un ajustement donné par l'équation 41 (Church et al., 1987) :

$$\frac{D_s}{b} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{c}{b}\right)^2} \quad (41)$$

Où le ratio  $c/b$  représente la planéité de la particule et  $D_s$  [mm] est la taille de la maille carrée du tamis. On a été choisi d'utiliser une valeur constante de planéité, égale à 0.79. Cette valeur donne de bons résultats même pour des sédiments très différents entre eux au niveau de leur forme (Church et al. 1987).

Ensuite, une courbe granulométrique est construite avec la méthode « grid-by-number ». On choisi de dessiner sur l'image brute (photographie) une grille de 100 nœuds à pas réguliers (Figure 38, b). Cette grille a un pas d'environ 10 mm, c'est-à-dire un pas inférieur à deux fois  $D_{\max}$  (37.4 mm), ce que recommandent Yuzyk et Winckler (1991). Toutefois, de cette façon, il est possible d'obtenir une courbe granulométrique statistiquement représentative (Wolman, 1954).



**Figure 39** : Exemple de comparaison entre les résultats obtenus avec le logiciel et avec la méthode « grid-by-number ».

La Figure 39 montre que le logiciel Digital Gravelometer<sup>TM</sup> ne permet pas de calculer avec une précision suffisante la granulométrie de surface alors qu'une méthode de « grid-by-number » avec un pas d'espace de la grille inférieur à  $2D_{max}$  permet de très bien représenter le mélange granulométrique. Plus précisément, si on définit l'erreur donnée par les deux méthodes avec l'équation 42 :

$$erreur = \left| \frac{A_{mélange} - A_{mesure}}{A_{mélange}} \right| \quad (42)$$

Où  $A_{mélange}$  et  $A_{mesure}$  sont respectivement la surface calculée avec la méthode des trapèzes à partir de la Figure 39 pour le mélange granulaire et la surface obtenue avec les mesures effectuées avec le logiciel ou avec la méthode du « grid-by-number ».

Dans le cas de la Figure 39, l'erreur calculée passe de 3 à 30%, en la faveur de la méthode du comptage des particules. En moyenne, l'erreur est de l'ordre de 30% en utilisant le logiciel Digital Gravelometer<sup>TM</sup> et de 5% en utilisant la méthode du « grid-by-number » (tous les tests sur des mélanges de matériaux connus sont reportés en ANNEXE1).

Ce résultat est probablement lié à deux raisons : premièrement le logiciel a été validé pour des conditions de terrain et une valeur de  $\psi$  comprise entre 4 et 7. Pour le diamètre maximum du mélange (25 mm), cette valeur est de 4.64 et pour les autres classes granulométrique utilisées, cette valeur est inférieure à celle utilisée pour tester le logiciel ( $1.2 < \psi < 3.6$ ). Deuxièmement, le traitement d'image avec le logiciel pourrait produire une sur-segmentation des particules. Les particules grossières seraient alors découpées et assimilées à des particules plus fines : il en résulte alors une granulométrie plus fine que celle réelle.

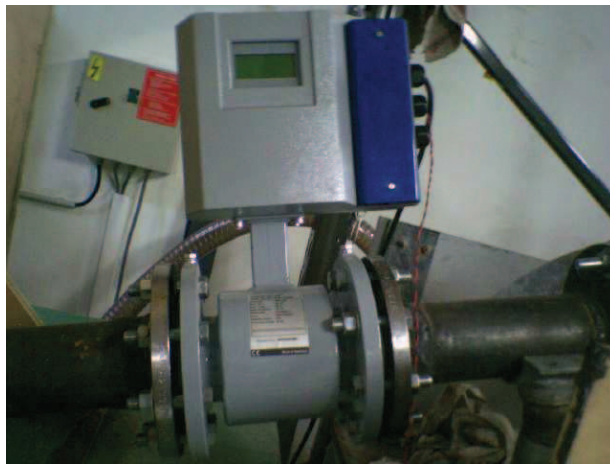
Au regard des résultats des tests (ANNEXE1), on a choisi d'adopter une méthode de comptage par grille (grid-by-number) avec un pas inférieur à deux fois le  $D_{max}$ . Cette méthode

permet une comparaison directe (sans transformation) des courbes granulométriques en volume par masse (méthode utilisée pour la préparation du mélange granulaire pour les expériences) et donne des résultats plus précis que ceux obtenus avec le logiciel. Même s'il y a des problèmes de double comptage des particules grossières, ceux-ci ne semblent pas influencer la mesure de la granulométrie de surface.

## 2.4. Mesures de débit liquide, pente et vitesse de surface de l'écoulement

### 2.4.1. Mesures de débit liquide

La mesure du débit liquide a été réalisée grâce au débitmètre Kobold série Mid (Figure 40).



**Figure 40** : Débitmètre électromagnétique *Kobold série Mid*.

Ce dispositif a une gamme de mesures allant d'environ 0 à 12 l/s et la mesure est indépendante des paramètres physico-chimiques du fluide tels que la densité, la température, la pression du fluide etc.

Le principe de mesure des débitmètres électromagnétiques est basé sur la loi de Faraday concernant l'induction magnétique : la tension induite au travers d'un conducteur, lors de son déplacement perpendiculaire à un champ magnétique, est proportionnelle à sa vitesse de déplacement. La tension induite dans le fluide est mesurée par deux électrodes diamétralement opposées. La tension induite est proportionnelle au produit du champ magnétique, de la distance entre les électrodes et de la vitesse moyenne du fluide (Eq. 43) :

$$E = k \cdot B \cdot D \cdot V \quad (43)$$

où :

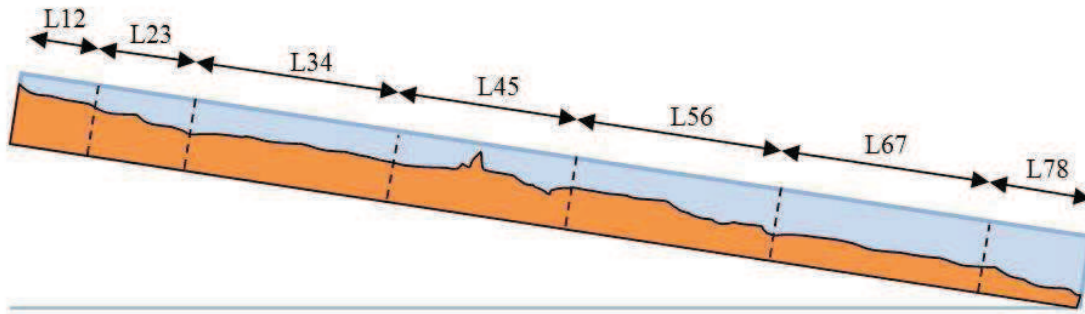
$E$  [Volt] est la tension induite,  $B$  [Tesla/sec] est l'intensité du champ magnétique,  $k$  [-] est la constante de proportionnalité,  $D$  [m] est la distance entre les deux électrodes,  $V$  [m/s] est la vitesse du fluide.

Le débitmètre a été calibré en usine et le fabricant annonce une précision de mesure à 0.25% dans la gamme de valeurs de 0.5 à 12 l/s.

Néanmoins, nous avons effectué des tests à l'aide d'un seau dans la gamme de mesure comprise entre 0.1 et 1 l/s. Ces tests nous ont permis de valider les mesures du débitmètre pour les débits liquides utilisés pour nos expériences.

#### 2.4.2. Mesures de la pente locale et de la pente moyenne du lit

Pour mesurer les pentes locale et moyenne du lit on a choisi de placer sept jauges le long du canal (Figure 41).



**Figure 41** : Positionnement des jauges.

La pente locale entre les sections  $i$  et  $i+1$  est donnée par l'équation 44 :

$$S_{oi-i+1} = \frac{h_i - h_{i+1}}{L_{i-i+1}} \quad (44)$$

Où  $h_{i,i+1}$  [m] est la hauteur du lit de particules par rapport à un niveau zéro représenté par la sortie du canal et  $L_{i,i+1}$  [m] est la distance entre deux sections de mesure. La pente moyenne  $S_o$  est donnée par la différence entre la hauteur du lit mesurée sur la première jauge et la hauteur du lit fixe, à la fin du canal, sur la longueur totale du lit des particules  $L_{tot}$  [m].

Pour les premières six jauges nous avons mesuré la distance entre la jauge  $i$  (qui varie entre 1 et 6) et le point fixe en aval du système  $f$ . Cette distance est notée ici  $L_{if}$  (Tableau 6) :

$L_{1f}$ [cm]	$L_{2f}$ [cm]	$L_{3f}$ [cm]	$L_{4f}$ [cm]	$L_{5f}$ [cm]	$L_{6f}$ [cm]
540	500	453	353	253	153

**Tableau 6** : Distance de calcul  $L_{if}$  [cm].

Nous utiliserons ces mesures au cours du Chapitre 3 seulement.

### 2.4.3. Mesure de la vitesse de l'écoulement

Le calcul des paramètres hydrauliques de l'écoulement dans un système torrentiel est un exercice complexe. L'écoulement est très turbulent et le matériau qui compose le lit du torrent dépasse régulièrement la profondeur moyenne de l'écoulement. Dans de telles conditions l'utilisation de traceurs (sel, encre) est très difficile. Par conséquent, nous avons utilisé les lois de transport et de frottement pour estimer les conditions hydrauliques de nos expériences (nombre de Shields, nombre de Shields critique, nombre de Froude)

La vitesse de surface de l'écoulement liquide a été mesurée à l'aide de particules de polystyrène. Cette méthode a été la seule utilisable étant donné les conditions expérimentales. Cette méthode simple, consiste à injecter des particules de polystyrène entre deux sections séparées d'une distance connue et à mesurer le temps de propagation à l'aide d'un chronomètre. Deux opérateurs sont nécessaires pour ces mesures. Le premier opérateur injecte le nuage de particules dans l'écoulement, et le deuxième mesure le temps de déplacement du nuage entre deux points séparés d'une distance connue.

La hauteur  $h$  [m] de l'écoulement, le nombre de Froude [-] et le nombre de Shields  $\theta$  [-] seront également calculés à l'aide des relations suivantes (en faisant l'hypothèse que la vitesse moyenne de l'écoulement  $U_m$  soit environ égale à  $U_{surface}$ ) :

$$h = \frac{Q_l}{L^* \cdot U_{surface}}$$

$$Fr = \frac{U_{surface}}{\sqrt{g \cdot h}}$$

$$\theta \approx \frac{h \cdot S}{1.65D}$$

Où  $U_{surface}$  [m/s] est la vitesse de surface mesurée,  $Q_l$  [m<sup>3</sup>/s] est le débit liquide mesuré,  $g$  [m/s<sup>2</sup>] est l'accélération de gravité et  $L^*$  [m] est la largeur effective de la section (ce point sera discuté dans les chapitres suivants).

## 2.5. Choix d'alimentation constante ou recirculation

On distingue classiquement deux protocoles pour l'alimentation solide : un système à alimentation constante (« feed system ») et un système à alimentation par recirculation (« recirculating system »). Les deux systèmes sont techniquement très différents. Généralement un système à charge solide constante (« feed system ») est constitué d'une trémie pour le stockage du mélange et d'un système de type tapis roulant ou vis sans fins pour le contrôle du volume des sédiments injectés dans le temps. La recirculation, par contre, consiste à utiliser une pompe à sédiments pour la recirculation du matériau en sortie du canal. Parker et Wilcock (1993) ont analysé le problème théoriquement et en ont conclu que l'on peut adopter l'un ou l'autre système d'alimentation en fonction des phénomènes que l'on veut étudier. Si le cœur du problème est l'analyse de la capacité de transport d'un système en fonction des conditions hydrauliques imposées, le système à recirculation est le plus adapté. En effet, dans ce cas, la seule contrainte imposée par l'utilisateur est le débit liquide et le système ajuste sa pente d'équilibre à une valeur qui dépend seulement de la capacité de transport du système. Si, par contre, le cœur de l'analyse est l'évaluation des effets d'une charge solide donnée sur un système, alors le système à alimentation constante est le plus adapté. Dans ce cas, en effet, le système s'ajuste à une valeur de pente moyenne d'équilibre dynamique qui est une fonction des conditions hydrauliques et du débit solide imposé. La morphologie (ou les évolutions morphologiques) du système est donc associée à une condition hydraulique imposée (taux liquide et solide d'alimentation).

Les phénomènes observés dans les deux cas peuvent être très différents. C'est pourquoi il nous a semblé important d'effectuer une comparaison expérimentale entre les deux systèmes afin de pouvoir choisir, au final, les conditions les mieux adaptées à la reproduction des phénomènes que l'on veut étudier. Des tests préliminaires ont donc été réalisés afin de permettre :

1. la comparaison expérimentale des deux systèmes d'alimentation solide ;
2. la détermination de l'influence du système d'alimentation sur les phénomènes observés ; notamment, la production de nappes de charriage et la dynamique du lit sédimentaire ;
3. le choix du mode d'alimentation le plus adapté.

### 2.5.1. Conditions expérimentales

Pour les deux expériences, appelées ci-dessous *Essai1* et *Essai2*, on a utilisé le même mélange granulaire, composé de sédiments de 2.3 mm et de 4.9 mm, et le même débit liquide  $Q_l$  [l/s] égal à 0.82 l/s. Pour *Essai1*, un mélange bimodal composé à 50 % de 2.3 mm et à 50 % de 4.9 mm a été imposé au système avec un taux d'alimentation solide constant  $Q_s$  [g/s] de 5.4 g/s. Pour le démarrage d'*Essai2* (pour  $t$  égal à zéro), nous avons utilisé le même taux que pour *Essai1* en début d'expérience et nous avons ensuite laissé le mélange évoluer au gré de la recirculation. Le débit solide à l'instant  $t$  est donc une fonction « F » du débit solide en sortie du système  $Q_{so}$  [g/s].

N'ayant pas à disposition de pompe à sédiments, le matériau en sortie du système, récupéré à l'aide d'un seau, a été réinjecté dans la trémie amont à pas de temps réguliers de cinq minutes.



Des expériences longues (respectivement de 48 et 42 h) ont été effectuées pour permettre aux deux systèmes d'atteindre une condition d'équilibre dynamique.

Les paramètres hydrauliques (nombre de Froude, nombre de Shields) ont été calculés en utilisant le modèle de transport et de frottement proposé par Recking et al. (2008b), validés par ailleurs pour ce type d'écoulement (Recking, 2006).

La mesure des pentes locale et moyenne a été faite à l'aide des sept jauges positionnées tout au long du canal (Figure 41) et le débit solide en sortie de système a été mesuré avec le dispositif GDS (paragraphe 2.2).

### 2.5.2. Résultats

Les résultats sont reportés dans le Tableau 7. Les mesures montrent que des grandes fluctuations à la fois de la pente et du débit solide sont observées pour les deux systèmes d'alimentation (Figure 42, Figure 43, Figure 44, Figure 45) pour des conditions d'alimentation liquide constante.

<i>Run</i>	$Q_w$	$W$	$h_o$	$\theta/\theta_c$	$S_{min}$	$S_{max}$	$S_{eq}$	$Q_{sm}$	$Q_{sma}$	$Q_{seq}$	$Q_{s2.3}$	$Q_{s4.9}$
<i>N°</i>	<i>l/s</i>	<i>M</i>	<i>cm</i>		%	%	%	in g/s	x g/s	g/s	g/s	g/s
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
1	0.82	0.1	1.93	1.21	2.6	3	2.8	1.27	15	5.4	2.71	2.69
2	0.82	0.1	1.96	1.15	2.6	3.25	3	0.13	10	3.44	1.09	2.35

Colonne (1) nombre de manipulation, (2) débit liquide, (3) largeur du canal, (4) hauteur d'eau calculée avec la loi de frottement (Recking et al., 2008), (5) rapport entre le nombre de Shields et le nombre de Shields critique, (6 – 8) valeur mesurés de pente moyenne, (9 – 11) valeurs de débit solide en sortie mesurée avec le dispositif GDS, (12 – 13) valeurs de débit solide moyen par classe granulométrique.

**Tableau 7 :** Synthèse des résultats expérimentaux pour *Essai1* et *Essai2*.

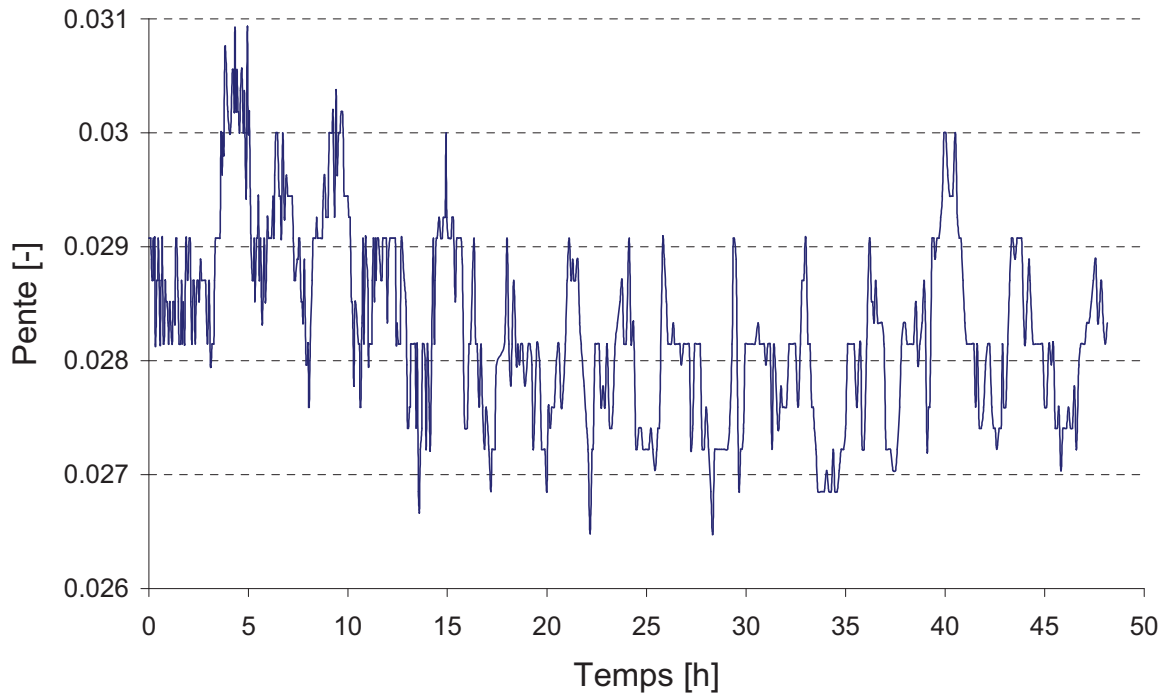
Les conditions d'équilibre dynamique (débit solide moyen et pente moyenne) sont différentes pour les deux systèmes et ont été calculées en utilisant l'équation 45 :

$$\bar{f} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (45)$$

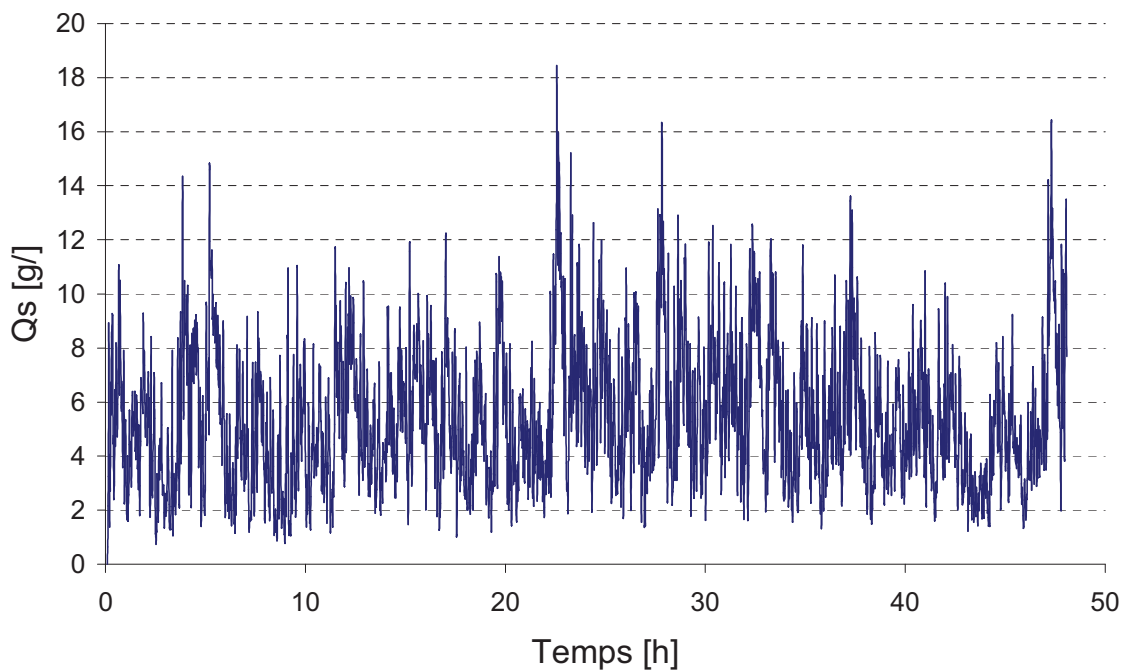
Où  $\bar{f}$  est la moyenne pondérée d'une quantité  $f(t)$  (où  $t$  est le temps) sur une période d'observation  $T$ . Dans toute la thèse, les quantités moyennes seront désormais toujours calculées en utilisant cette relation.

Pour *Essai1*, le système atteint une condition d'équilibre dynamique autour d'une pente moyenne de 0.028 ; dans ces conditions, le débit solide moyen mesuré à la sortie du système correspond exactement à celui d'alimentation solide égal à 5.4 g/s. Pour *Essai2*, le débit solide

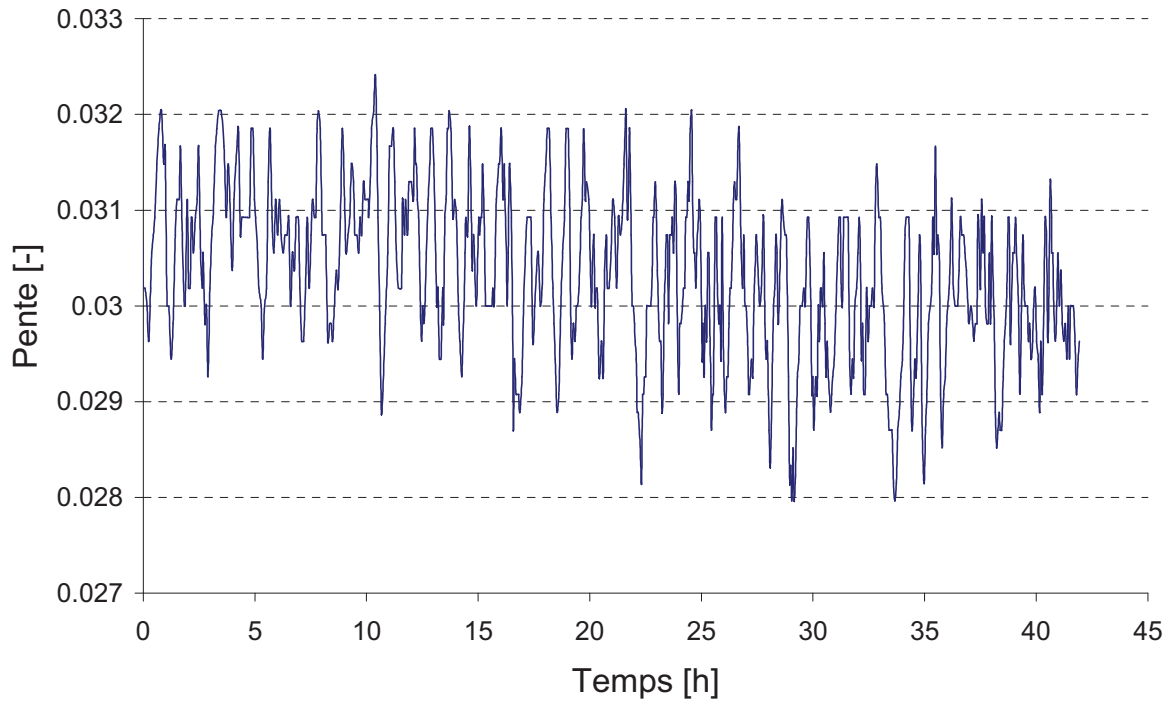
moyen en sortie du système est inférieur à celui mesuré pour *Essai 1* et l'équilibre dynamique est atteint pour une pente moyenne de 0.03 et un débit solide de 3.44 g/s. La capacité de transport maximal des deux systèmes est, elle aussi, différente ; pour *Essai 1* on a mesuré des pics de transport nettement supérieurs à ceux mesurés pour *Essai 2*, avec un rapport entre les deux de 1.5. De telles différences sont associées à un comportement différent des systèmes.



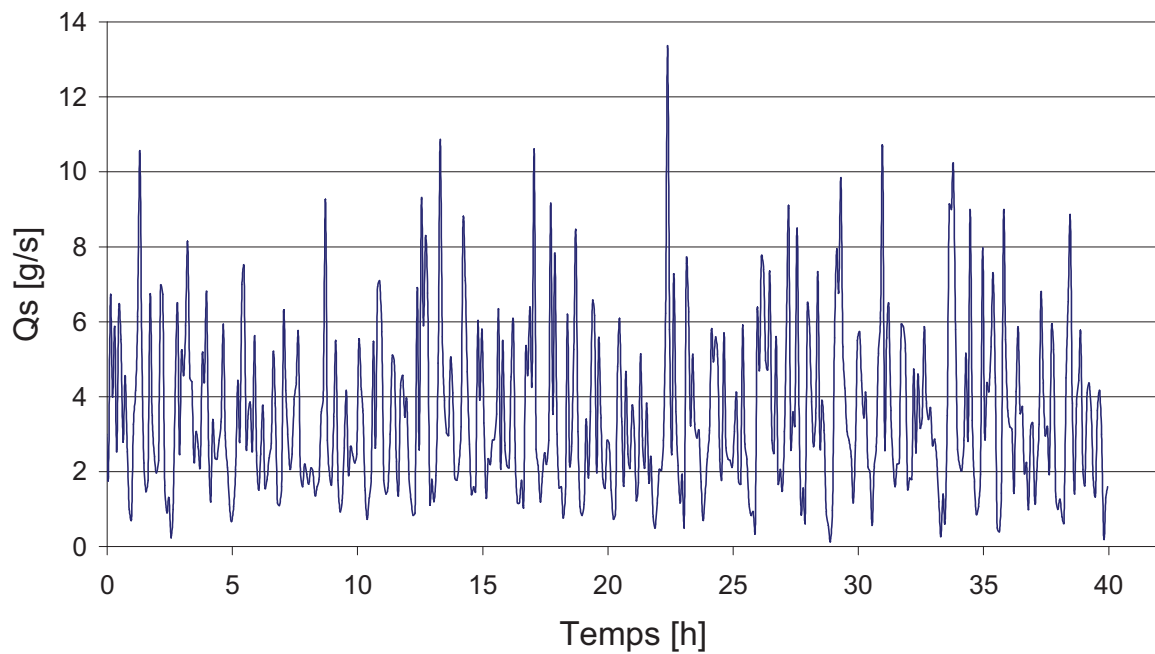
**Figure 42 :** Résultats expérimentaux pour *Essai 1* : pente moyenne du système



**Figure 43 :** Résultats expérimentaux pour *Essai 1* : débit solide en sortie du système



**Figure 44 :** Résultats expérimentaux pour *Essai2* : pente moyenne du système.



**Figure 45 :** Résultats expérimentaux pour *Essai2* : débit solide en sortie du système.

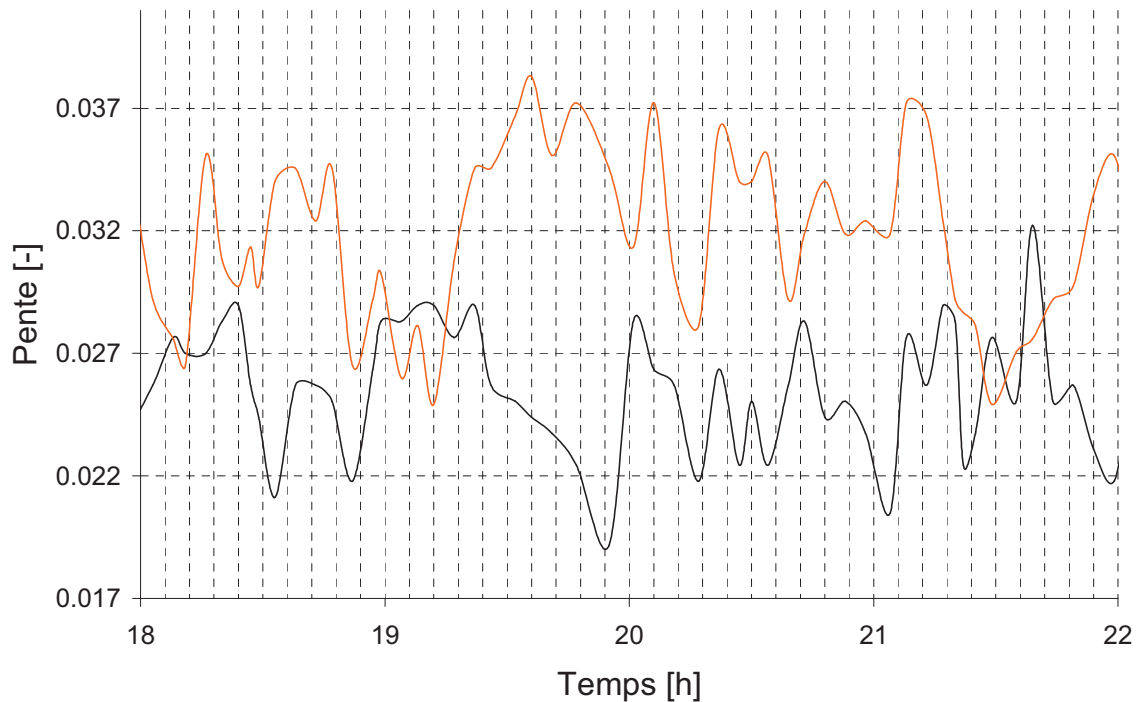
### 2.5.3. Phénomènes observés

Lors des expériences, on a observé deux comportements différents du système. Pour *Essai1*, comme reporté dans d'autres études avec un système à alimentation constante (Iseya and Ikeda, 1987; Kuhnle 1993; Recking et al. 2009 ; Nelson et al. 2009) la morphologie du lit a évolué dans le temps et une alternance de pavage et de lit plat est observée. Les évolutions temporelles et spatiales de morphologie, de pente et débit solide sont strictement corrélées. Similairement à Recking et al. (2009), deux extrêmes sont observés : un lit complètement pavé qui correspond à une pente maximale du système, à un débit solide en sortie du système proche de zéro et un lit complètement plat composé de particules fines qui correspond à une pente minimale et à un pic de débit solide en sortie du système. Entre les deux extrêmes, une période de « transition » (Iseya and Ikeda 1987; Recking 2006; Recking et al. 2009) est également observée. Pendant cette période le lit présente localement des morphologies différentes. On observe des zones d'aggradation et d'érosion locale. Des antidunes et des nappes de charriage sont également observées à différents endroits du canal.

Plus précisément, la production de nappes de charriage est observée un peu partout dans le système, dont le fonctionnement semble suivre la logique du modèle par compartiments (Recking 2006, Chapitre 1) avec une partie aval qui évolue plus lentement (subissant moins l'influence de l'alimentation solide), à basse fréquence, et qui influence, à long terme, la dynamique du système global et une partie amont, soumise à des flux sédimentaires constants, qui évolue à haute fréquence à cause de la production très fréquente de nappes de charriage. Cette hypothèse sera testée dans la suite.

Pour *Essai2*, comme pour *Essai1*, le système fluctue entre une pente minimale et une pente maximale. Toutefois, ces deux extrêmes de pente moyenne ne correspondent pas à deux états différents du système mais plutôt à une phase d'aggradation et une phase d'érosion de la partie amont du canal. En effet, les évolutions morphologiques observées pour *Essai1* n'ont pas été observée pour *Essai2*. Aucune érosion n'a été observée sur toute la longueur du lit du canal. Au contraire, le lit est globalement (et stablement) pavé avec des érosions localisées associées à la production de nappes de charriage.

On observe plus particulièrement une corrélation forte entre la partie amont et la partie aval du système, probablement liée au système d'alimentation (Parker, 2003). Cette corrélation est bien mise en évidence sur la Figure 46. Les parties amont (orange) et aval (noir) du système (respectivement  $S_{14}$  et  $S_{6aval}$  de la Figure 41) sont en opposition de phase. Une érosion du compartiment aval est donc responsable de l'aggradation du compartiment amont et vice-versa, par réinjection à l'amont des sédiments érodés à l'aval. Le décalage temporel des pics d'érosion et d'aggradation dans le signal est lié au système d'alimentation et à la partie intermédiaire ( $S_{46}$ ) du canal.



**Figure 46 :** Correspondance entre les phases d'aggradation et d'érosion pour le compartiment amont (orange) et aval (noir) pour *Run2*

Il a donc été observé un comportement cyclique du système. Le cycle décrit est une simplification des phénomènes complexes observés :

- la partie amont ( $S_{1A}$ ) est dans une phase d'aggradation liée à la production d'une nappe de charriage en aval, et donc à une augmentation soudaine du débit solide en entrée du système (conséquence de la recirculation) ; la partie aval ( $S_{\delta_{aval}}$ ) érodée atteint une pente minimale et le transport solide en sortie du système est presque nul ;
- la partie amont atteint une pente maximale d'équilibre locale, conséquence de la fin de la phase d'aggradation ; le système est relativement stable : la partie amont est à forte pente et la partie aval à faible pente avec un débit solide en sortie du système proche de zéro ;
- la réduction du débit solide d'alimentation favorise une érosion amont : une nappe de charriage se propage vers l'aval ;
- la partie amont du canal atteint une pente minimale alors que la partie aval est en phase d'aggradation jusqu'à atteindre une pente maximale d'équilibre ; le système est à nouveau relativement stable avec une partie aval à forte pente et une partie amont à faible pente ;
- une instabilité se produit dans la partie aval du système qui commence à s'éroder : une nappe de charriage est re-circulée dans le système ; le cycle (a – d) se remet en place.

Dans le cycle décrit schématiquement aux points a, b, c et d, nous n'avons pas considéré le rôle de la partie intermédiaire du canal et surtout le rôle du système d'alimentation dans l'échange sédimentaire entre la partie amont et la partie aval du système. Ce-dernier influence

le système en réduisant l'impact des érosions aval et en lissant les pics de débit solide par le biais de la vitesse du tapis roulant (laissée constante et égale à la vitesse du tapis roulant utilisée pour *Essai1*).

Des observations similaires ont déjà été reportées en littérature. Parker (2003) a observé la propagation d'une onde sédimentaire (« sediment lump ») dans un système à recirculation, produite artificiellement par le système lui-même. Quand la vague est re-circulée, le sédiment transporté dans les conditions hydrauliques de l'aval se retrouve en amont, dans des conditions qui ne lui correspondent pas. Ceci produit un « dysfonctionnement » dans le système, dysfonctionnement à l'origine de la formation de cette onde. Une explication différente a été proposée dans la suite.

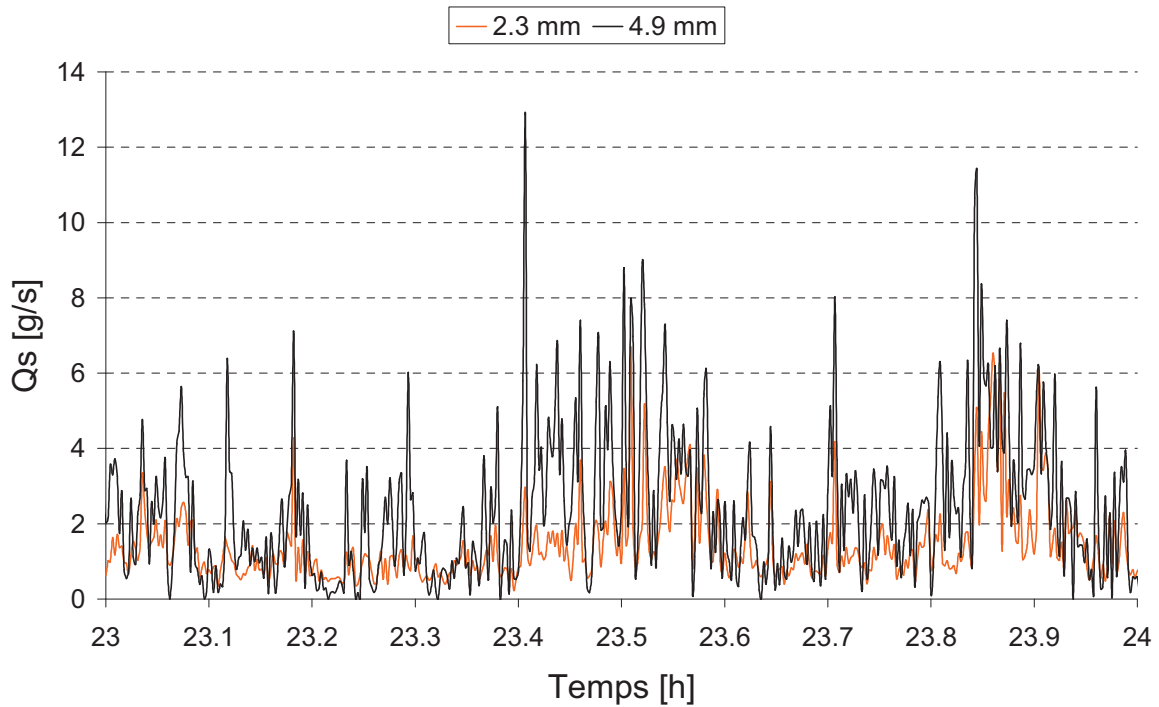
#### 2.5.4. Analyse des résultats

Dans les mêmes conditions hydrauliques, les deux systèmes d'alimentation ont produit un comportement différent du système en terme d'évolution de la pente moyenne, du débit solide en sortie du canal et de la morphologie du lit.

La raison de ces différences pourrait être liée aux mécanismes de production et de propagation des nappes de charriage qui dépendent fortement des conditions d'alimentation en matériaux solides (taux et composition du sédiment injecté) (Bennet et Bridge, 1995; Venditti et al. 2008), ainsi que des conditions hydrauliques du système.

Pour *Essai1*, le système est soumis à une alimentation constante. Ceci permet la manifestation du tri-granulométrique efficace à l'amont du canal sur une longueur finie (Recking, 2006), responsable de la production des nappes de charriage en amont à haute fréquence. Ces nappes de charriage sont responsables des fluctuations à court terme de la pente moyenne du système ainsi que des variations à long terme de la morphologie du lit (Recking et al., 2009 ; Recking, 2006). En effet, la propagation des nappes de charriage permet la redistribution en aval des sédiments fins temporairement stockés à l'amont et la reproduction des mécanismes de tri-granulométrique avec une fréquence de plus en plus basse, de proche en proche, dans la direction amont-aval.

Pour *Essai2*, au contraire, l'alimentation solide n'est pas constante et dépend des conditions de transport (composition du sédiment en sortie du canal). Le tri granulométrique se produit dans *Essai2* de façon efficace. Contrairement à *Essai1* (où on a maintenu constant le mélange d'alimentation), le tri a eu pour conséquence un appauvrissement progressif de la teneur des éléments fins dans l'alimentation d'*Essai2* (par stockage progressif des fins dans le lit). Ceci explique des nappes de charriage beaucoup plus faibles et un lit plus pavé et plus stable.



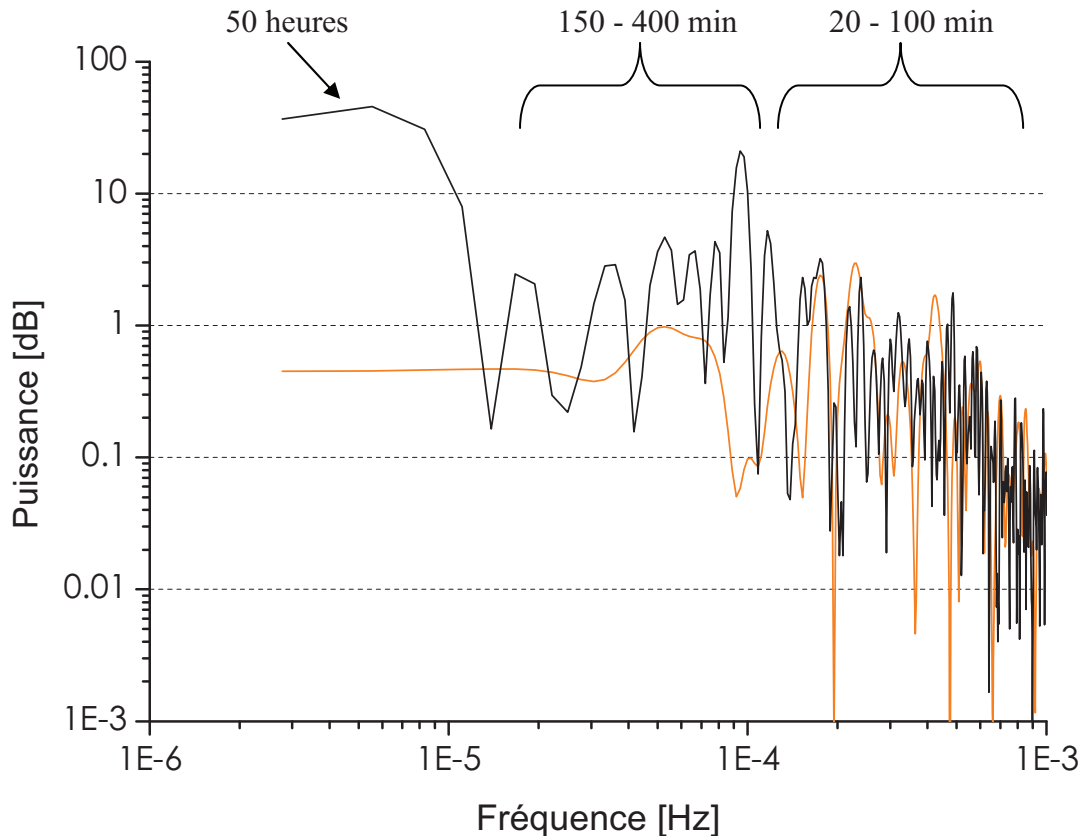
**Figure 47 :** Exemple de transport partiel enregistré avec le dispositif GDS (*Essai2*).

Les différences de comportement entre les deux systèmes peuvent être mises en évidence par une analyse de Fourier du signal de la pente moyenne. L'intérêt de cette approche est de quantifier avec un estimateur non biaisé la période principale de fluctuation pour les séries temporelles de pente moyenne mesurées (Kuhnle and Southard 1988).

L'analyse spectrale a donc été effectuée sur un signal de pente adimensionnel (Eq. 46) et les résultats sont reportés sur la Figure 48 :

$$\overline{S(t)} = \frac{S(t) - \mu(S(t))}{\sigma(S(t))} \quad (47)$$

Où  $\mu(S(t))$  et  $\sigma(S(t))$  sont respectivement la moyenne et l'écart-type du signal de pente  $S(t)$  (locale ou moyenne) mesurés.



**Figure 48** : Analyse de Fourier du signal de pente globale pour Run1 (noir) et Run2 (orange).

Les fréquences d'intérêt du signal varient entre  $10^{-3}$  et  $5.5 \cdot 10^{-6}$  Hz, c'est-à-dire entre 15 minutes et 50 heures.

Pour *Essai1*, on peut observer trois familles de pics, correspondant à des périodes de fluctuation courtes (20-100 min), intermédiaires (150-400 min) et longues (environ 3000 minutes). Ces trois familles montrent que le comportement du système est très complexe. Cette complexité a effectivement été observée au cours de l'expérience (évolution de morphologie et de transport dans le temps décrite au paragraphe précédent) et a été documentée dans des études précédentes (Iseya et Ikeda 1987; Recking 2006; Recking et al. 2009).

Pour *Essai2*, au contraire, une seule famille de pics a été observée, comprise entre des fréquences de  $2 \cdot 10^{-4}$  et  $5 \cdot 10^{-4}$  Hz (c'est à dire une période de fluctuation entre 30 et 80 minutes, très proches des fluctuations courtes observées pour *Essai1*). Ceci montre, d'un côté, la relative stabilité du système observé et, de l'autre, que toutes les variations du signal de pente sont associées à des phénomènes relativement rapides, associés à la propagation d'une nappe de charriage qui semble se produire avec une période comprise entre 30 et 80 minutes.

Pour les basses fréquences, le spectre du signal est lissé et le seul pic mesuré (fréquence de  $5 \cdot 10^{-5}$  Hz, environ 6 h) correspond probablement à la phase de décroissance du signal de la pente moyenne à partir de la condition initiale du système.



### 2.5.5. Conclusion

L'objectif de cette comparaison expérimentale entre les deux systèmes d'alimentation était de déterminer la manière dont ceux-ci influencent la dynamique du système sédimentaire.

Nous avons pu observer que, pour les deux systèmes, le tri-granulométrique joue un rôle important (notamment dans la production de nappes de charriage) mais différent en fonction du système d'alimentation. Pour *Essai1*, le système bascule entre deux conditions de morphologies (lit plat composé par des particules fines et lit pavé à forte pente) et de transport très différentes (érosions amont-aval, aggradations) ; pour *Essai2*, le lit est globalement pavé mais des ondes sédimentaires périodiques (nappes de charriage) sont observées. En raison de ces différences, la capacité de transport maximale pour *Essai2* est inférieure à celle mesurée pour *Essai1*.

Pendant la recirculation, le système s'autocontrôle. Le matériau transporté interagit avec le lit (tri granulométrique) et sa composition se trouve rapidement fortement modifiée (appauvrissement de la fraction fine). Le sédiment injecté a donc des caractéristiques qui dépendent du système lui-même et qui varient au cours du temps. Ce phénomène n'est pas compatible avec les objectifs de la thèse (étude de la dynamique sédimentaire du système soumis à une alimentation donnée et constante dans le temps).

Nous avons donc choisi d'utiliser un système à alimentation constante car c'est le seul qui permet de contrôler parfaitement les conditions imposées au système (Parker et Wilcock, 1993). De plus, ce système d'alimentation est celui qui pourrait le mieux se rapprocher du fonctionnement d'un tronçon de cours d'eau à forte pente, proche des sources sédimentaires.

## **PARTIE 2 : DYNAMIQUE A L'EQUILIBRE**

---



## INTRODUCTION

---

L'étude bibliographique a montré qu'en raison du tri granulométrique, pour une condition hydraulique donnée des fluctuations de transport solide sont attendues. Notamment, quatre points fondamentaux ont été mis en évidence sur le phénomène de fluctuation de transport et de pente :

- 1) les fluctuations sont périodiques : pour une même condition hydraulique (débit liquide, solide et granulométrie du mélange) différentes périodes ont été observées (Hoey, 1992 ; Kuhnle and Southard, 1988 ; Recking et al., 2009) ;
- 2) des cycles de formation/destruction du pavage de surface pour des expériences de longue durée avec des matériaux bimodaux ont été observés (Recking et al. 2009) ;
- 3) les pics de débit solide sont la réponse à une propagation d'une nappe de charriage (Hoey, 1992 ; Kuhnle and Southard, 1988 ; Iseya et Ikeda, 1997 ; Recking et al. 2009 ; Nelson et al. 2009) ;
- 4) Les fluctuations ont tendance à disparaître pour de fortes conditions hydrauliques, quand  $\theta/\theta_c > 2$  (Recking et al. 2009) ;

Toutes les expériences ont été effectuées en granulométrie étendue, sur des matériaux bimodaux (Iseya et Ikeda, 1997 ; Recking et al., 2009) ou sur une granulométrie plus complexe (Kuhnle et Southard, 1988 ; Nelson et al. 2009). Des descriptions assez précises des phénomènes observés ont été proposées par les auteurs. Les effets de la granulométrie de surface ont été observés mais il y a eu peu de quantification par des mesures.

Un essai d'interprétation des mécanismes physiques à la base du phénomène de fluctuation a été reporté (Recking et al. 2009). Suivant ce schéma conceptuel la pente maximale et minimale représenterait deux états d'équilibre pour le système associés à une efficacité de transport différente, en raison du tri granulométrique (Recking et al. 2009).

Un comportement du système par compartiments a également été décrit (Recking, 2006). Le modèle par compartiments est un outil intéressant qui permet de reproduire le comportement global du système sur la base de l'analyse du spectre de Fourier du signal de pente moyenne. Bien qu'il ne soit pas un outil prévisionnel (les périodes et la longueur de chaque compartiment sont mesurés sur la base des données expérimentaux), le modèle par compartiments peut aider à interpréter le comportement à court et long terme du système.

Le travail expérimental de la thèse se situe à l'interface (et dans la continuité) entre les travaux sur les fluctuations de transport solide (Kuhnle and Southard, 1988 ; Iseya et Ikeda, 1997 ; Recking et al., 2009) et les études sur la dynamique sédimentaire à forte pente (Church et Zimmermann, 2007).

Dans le domaine des fluctuations, les études se sont limités jusqu'à présent à des pentes comprises entre 0.8 et 9% et pour des conditions hydrauliques dans la gamme  $1.2 < \theta/\theta_c < 2$ . Pour les fortes pentes, les expérimentations ont été effectuées absence d'alimentation solide (Comiti et al., 2009; Lenzi et Comiti, 2003; Lenzi, 2002) ou pour des conditions hydrauliques fortes, quand  $\theta/\theta_c > 3$  (Zimmermann et Church, 2010; Smart et Jaeggy, 1983; Rickenmann, 2001).

A notre connaissance, une étude détaillée des systèmes en condition  $\theta/\theta_c \approx 1$  n'a encore jamais été réalisée à ce jour pour les très fortes pentes.

C'est pourquoi l'objectif de nos expériences est d'étudier l'influence du tri granulométrique pour les conditions suivantes :

- 1) Mélange granulaire étendu (Figure 24) ;
- 2) Très forte pente (supérieure à 9%) ;
- 3) Conditions hydrauliques faibles ( $\theta/\theta_c \approx 1$ ) ;
- 4) Longue durée (pour observer, s'ils existent à ces conditions, des cycles complets de formation/destruction du pavage) ;
- 5) Mesure de la granulométrie de surface ;

Deux expériences ont été réalisées, appelées ci après *Faible Transport* et *Fort Transport*.

### Conditions expérimentales

Le mélange granulométrique utilisé est celui reporté sur la Figure 24 (Chapitre 2). Comme déjà expliqué précédemment, nous avons choisi ce mélange car il est représentatif de la granulométrie d'un torrent de montagne à forte pente. Le coefficient d'étendue du mélange, défini par l'équation 48, est 2.64 (granulométrie très étendue) et les diamètres représentatifs du mélange granulaire sont reportés dans le Tableau 8.

$$\sigma = 0.5 \left( \frac{d_{84}}{d_{50}} + \frac{d_{50}}{d_{16}} \right) \quad (48)$$

$D_{16}$ [mm]	$D_{30}$ [mm]	$D_{50}$ [mm]	$D_{84}$ [mm]	$D_{90}$ [mm]	$D_{max}$ [mm]	$D_m$ [mm]
1.84	2.13	3.16	9	11.18	25	6

**Tableau 8 :** Diamètres caractéristiques du mélange granulaire utilisé pour les manipulations ; l'index numérique (30, 50, 84 et 90) correspond au pourcentage de matériau du mélange ayant un diamètre inférieur à cet index et le diamètre  $d_m$  correspond au diamètre moyen arithmétique du mélange granulaire.

Afin d'accélérer (en terme de durée d'expérimentation) les expériences, nous avons choisi d'en « prédéterminer » les conditions initiales. Ce choix est lié au fait que les temps d'expérimentation (voir *Essai1* et *Essai2* ou Recking et al. 2009) peuvent être très longs, surtout pour de faibles conditions hydrauliques, proches de la mise en mouvement du matériau qui compose le mélange.

Pour cette raison nous avons d'abord « recherché » une bonne gamme de valeurs (pente, débit liquide et débit solide) qui vérifient le rapport  $\theta/\theta_c \approx 1$  pour « *Faible Transport* » et  $\theta/\theta_c > 1$  pour « *Fort Transport* » à l'aide des lois de transport et frottement reportés au chapitre 1 (paragraphe 1.1.3) (Tableau 9).

<i>Auteur</i>	<i>Faible Transport</i>	<i>Fort Transport</i>
	$Q_s$ [g/s]	$Q_s$ [g/s]
Recking et al. 2008b	8	61.5
Rickenmann (1991)	14	69
Shocklitch (1961)	0	23
Meyer-Peter et Mueller (1948)	0	5

**Tableau 9** : Valeurs de débits solide du système calculés à partir des modèles de transport et frottement reportés au paragraphe 1.2.2.

Pour les calculs, nous avons utilisé une pente d'énergie de **12%** avec des valeurs de débit liquide de **0.3** (*Faible Transport*) et **0.55 l/s** (*Fort Transport*) et avec le diamètre moyen arithmétique du mélange égale à **6 mm** (Tableau 9).

Néanmoins, les mêmes calculs effectués en utilisant le  $D_{84}$  du mélange d'alimentation pourraient donner des résultats différents. Par exemple, en considérant le modèle proposé par Recking et al. (2008b), nous aurions deux valeurs du rapport  $\theta_{84}/\theta_c$  de 0.94 (*Faible Transport*) et 1.37 (*Fort Transport*). Ces valeurs nous indiquent que la mobilité du mélange sédimentaire est très faible pour les conditions d'expérimentation choisies.

Finalement, parmi les modèles testés nous avons choisi d'utiliser celui de Recking et al. (2008b) pour orienter nos expérimentations. Nous avons imposés pour « *Faible Transport* » et « *Fort Transport* », respectivement, un débit d'alimentation solide de **6 g/s** (vitesse minimum du tapis roulant) et **60 g/s** et un débit liquide de **0.3** et **0.55 l/s** respectivement.

Les résultats globaux obtenus à la fin de l'expérience sont les suivants.

	$Q_l$ [l/s]	$Q_s$ [g/s]	$S_{eq}$ [m/m]	$T$ [h]
<i>Faible Transport</i>	0.3	6	0.122	110
<i>Fort Transport</i>	0.55	60	0.122	92

**Tableau 10** : Débit liquide ( $Q_l$ ), débit solide ( $Q_s$ ), et pente ( $S_{eq}$ ) mesurés à l'équilibre ;  $T$  est la durée de l'expérience en heures.

Pour la prise des données au cours des expériences, le protocole de mesure utilisé peut être détaillé en quatre points, qui sont les suivants :

- 1) Mesure régulière (entre 2 et 10 minutes en fonction des conditions hydrauliques) de la côte du lit en correspondance des jauges ;

- 2) Mesure du débit solide par l'intermédiaire du seau (entre 45 et 300 secondes en fonction des conditions hydrauliques) et mesure du débit solide par analyse d'images avec le dispositif GDS toutes les six secondes (mais pas pendant toute l'expérience) ;
- 3) Arrêts de manipulation et mesure de la granulométrie de surface (toutes les 2 ou 3 heures) ;
- 4) Mesure de la vitesse de surface de l'écoulement avec des particules de polystyrène à des instants différents pendant toute la durée de manipulation.

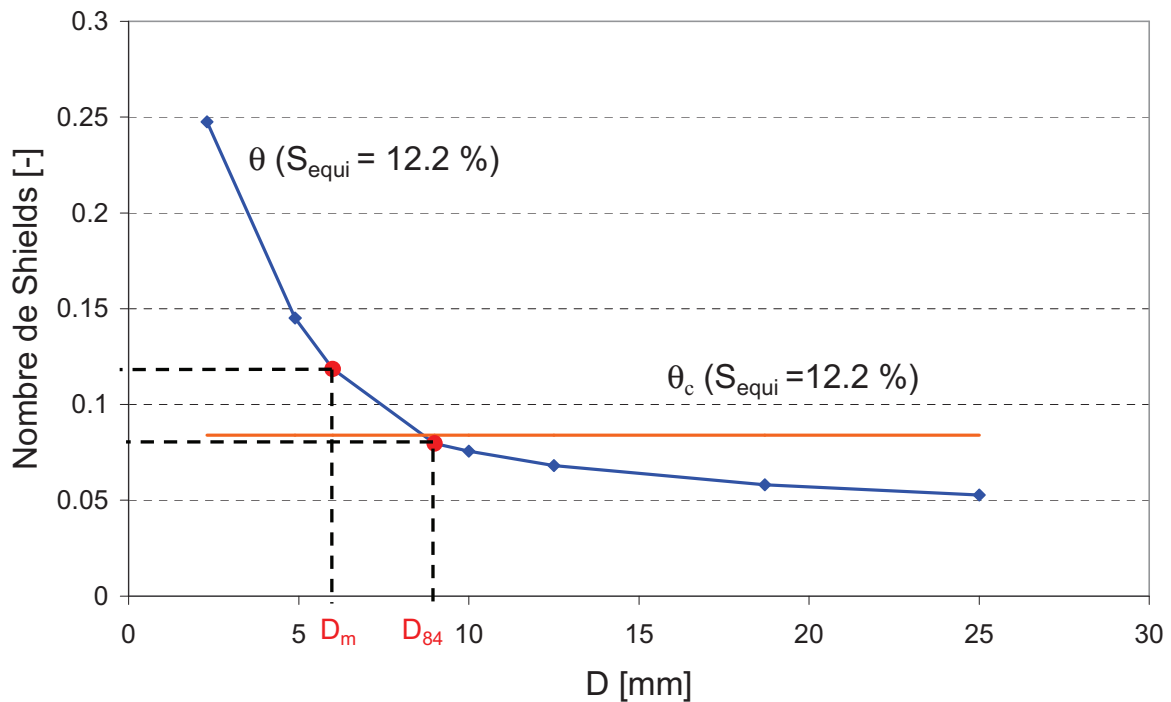
### 3. CHAPITRE 3 : EXPERIENCE A FAIBLE TRANSPORT

L'expérience à *Faible Transport* est une expérience de longue durée réalisée pour un système à forte pente et pour des conditions de mobilité du mélange granulaire très faibles (Tableau 11).

	$Q_l$ [l/s]	$Q_s$ [g/s]	$S_{eq}$ [m/m]	$Fr$ [-]	$U_{moy}$ [m/s]	$\theta_{84}/\theta_c$ [-]	$T$ [h]
<i>Faible Transport</i>	0.3	6	0.122	$\approx 1$	0.30	0.94	110

**Tableau 11 :** Conditions d'équilibre dynamique pour l'expérience à *Faible Transport*.

Les paramètres hydrauliques (Tableau 11, Figure 49) ont été calculés en utilisant la pente d'équilibre dynamique mesurée pour le système et les modèles de frottement et de mise en mouvement proposés par Recking et al. (2008b).



**Figure 49 :** Mobilité du mélange par rapport aux conditions de mise en mouvement du système (Recking et al. 2008b) ;  $D_m$  et  $D_{84}$  sont respectivement le diamètre moyen arithmétique et le  $D_{84}$  du mélange d'alimentation.



Lors de cette expérience, seules les fractions granulométriques de diamètre inférieur au diamètre moyen arithmétique d'alimentation (6 mm) sont mobiles (Figure 49). La mobilité du matériau grossier est donc en dessous de la condition de mise en mouvement : notamment  $\theta_{D_{Max}}/\theta_c \ll 1$  et  $\theta_{84}/\theta_c < 1$ .

Afin de valider ces calculs, une expérience spécifique a été réalisée avec un matériau uniforme de diamètre  $D$  égal à 10 mm. Cette valeur correspond à la valeur du diamètre moyen arithmétique du pavage de surface mesuré au cours de l'expérience. Le matériau a été placé sur un canal de pente 12.2% et le système a été alimenté avec un débit liquide de 0.3 l/s. Au cours de l'expérience, aucune variation de la pente n'a été enregistrée et le transport solide est resté nul.

Les observations concernant le comportement du système, les résultats des mesures expérimentales et leur interprétation seront présentés au cours de ce chapitre.

### **3.1. Observations de la dynamique sédimentaire du système**

Il s'agit ici, dans un premier temps, d'observations visuelles de la dynamique sédimentaire du système.

Dans le cadre de cette expérience le lit est globalement pavé au cours de toute la durée de l'expérience (Figure 50). Néanmoins, nous avons observé un comportement très complexe du système.

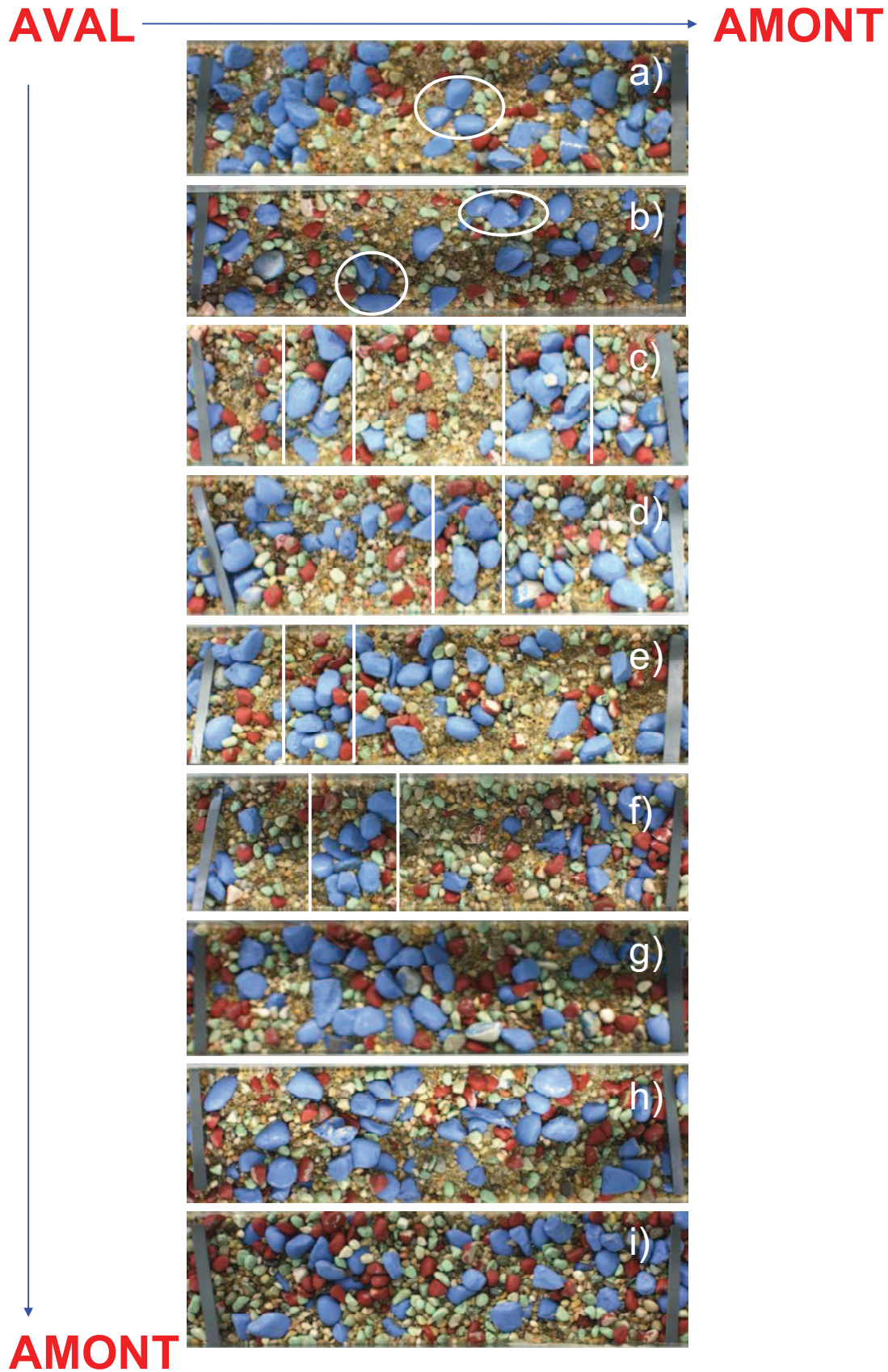
Le transport par charriage semble se réaliser par des mécanismes d'érosions de différentes intensités et de durées et d'étendues spatiales. Principalement, les érosions sont produites par la déstabilisation locale d'une structure de surface (des macroformes similaires aux step-pools) mais semblent parfois associées à un comportement plus global du système. Ces érosions sont associées à la destruction du pavage de surface et à la propagation d'une nappe de charriage (pour une analyse plus détaillée voir paragraphe 3.2.6).

L'intensité des phénomènes érosifs de destruction du pavage est très grande. Des pics de transport supérieurs à 60 g/s (soit 10 fois la valeur moyenne) sont mesurés.

Nous détaillerons, dans la suite, les principales morphologies observées au cours de l'expérience (voir paragraphe 3.1.1 et 3.1.2). De telles morphologies ont été associées à trois états (ou phases) du système :

- 1) *PHASE I* - la formation de « bed clusters » ;
- 2) *PHASE II* - la formation de seuils (similaires aux step-pools) de largeur égale à celle du canal ;
- 3) *PHASE III* - la production et la propagation de nappes de charriage à forte pente.

Les Phases I et II étant constamment présentes dans le système, le lit se trouve être globalement pavé (Figure 50). La phase III est associée à un pavage uniforme sur la quasi-totalité du canal. Ce pavage se produit cycliquement dans le système avec une longue périodicité (environ 16 heures).

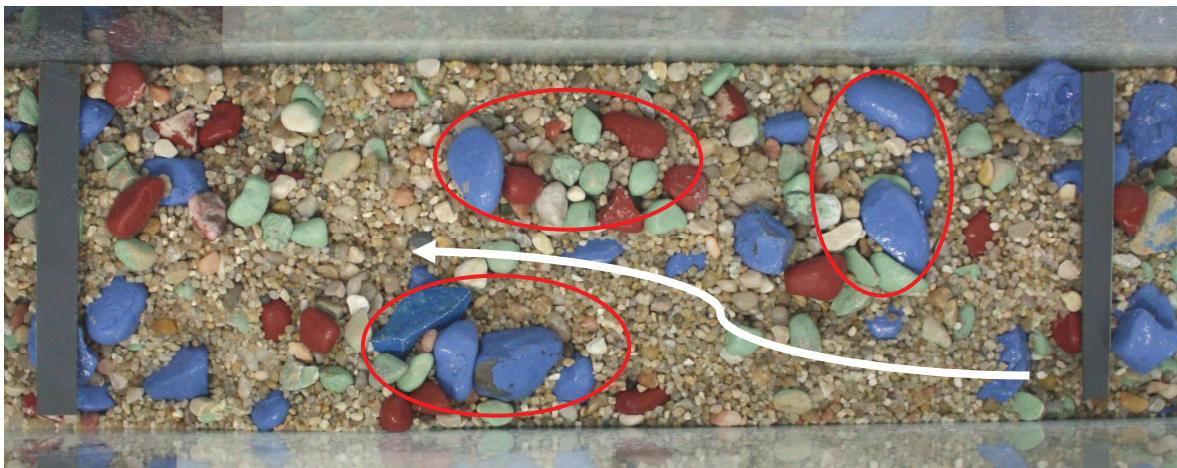


**Figure 50 :** Exemple de lit globalement pavé pour l'expérience à *Faible Transport* : a-f) exemples de « bed-clusters » (les ronds blancs) et seuils (droites blanches) ; g-i) exemple de pavage à forte pente.

### 3.1.1. Bed-clusters et seuils dans le système

Les gros éléments du mélange granulaire s'assemblent en structures qui ressemblent aux « bed clusters » (Figure 51), largement observés en littérature pour les rivières à graviers (Church et Hassan, 1988 ; Raudkivi, 1998 ; Hassan et Reid 1990 ; Reid et al. 1992 ; Hassan et Church, 2000 ; Storm et al., 2004). Leur présence dans le système est très stable, globalement, et ils disparaissent uniquement après des érosions intenses pour réapparaître très rapidement.

Les « bed-clusters » jouent un rôle important du point de vue de la dynamique du système. Les grosses particules affleurent à la surface libre et réduisent ainsi la section de l'écoulement. L'écoulement en résulte accéléré et le lit est localement érodé à côté des clusters (Figure 51).



**Figure 51** : Bed-clusters dans l'expérience *Faible Transport* : les zones de lit érodées entre les bed-clusters (cercles en rouge) semblent montrer que l'écoulement est accéléré par la présence des clusters.

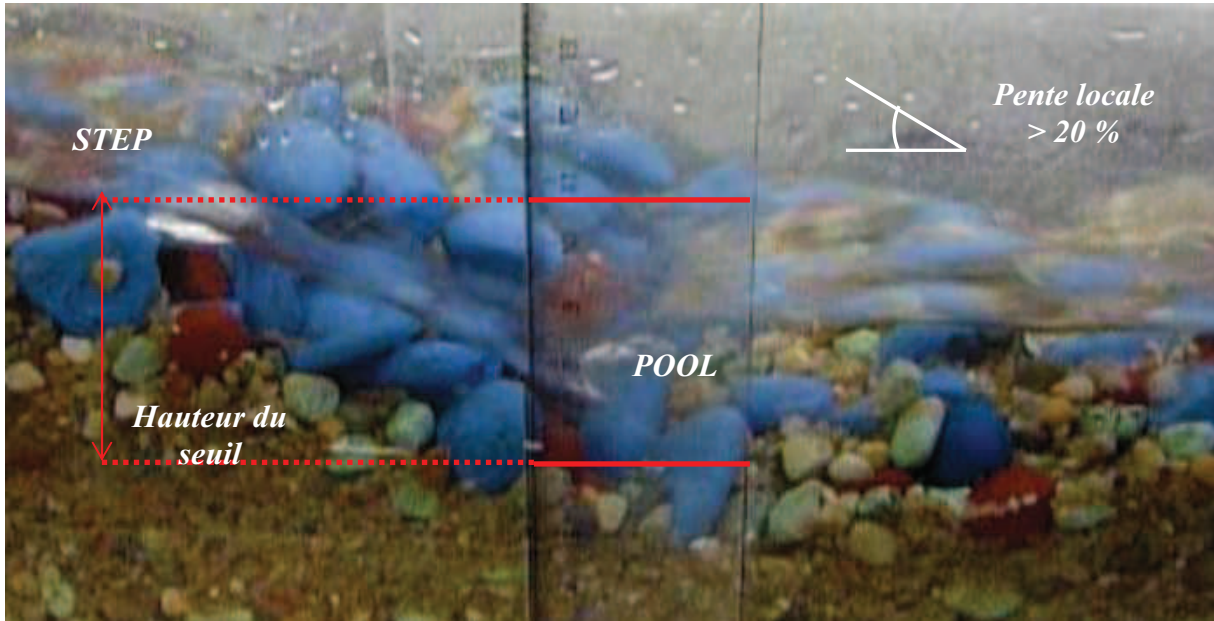
Parallèlement aux bed-clusters, dès les premières heures d'expérimentation, nous avons observé, régulièrement, un phénomène de formation et de destruction de structures que nous appellerons seuils. Ces structures ressemblent aux step-pools généralement observés pour les torrents à forte pente (Buffington et Montgomery, 1997). Les seuils sont rarement apparus comme des séquences bien définies de deux steps ou plus (séquences step-pools), mais plutôt comme de grosses marches occupant la largeur entière du canal (Figure 52, Figure 56).

Les mécanismes potentiels de formation de ces seuils sont associés à la grande différence de mobilité entre les différentes classes granulométriques du mélange (voir Figure 49). Notamment, au cours d'une érosion locale la pente diminue localement. Les grosses particules du mélange ( $D_{\max} = 25$  mm) s'arrêtent soudainement en raison d'une brusque diminution de leur mobilité. C'est la formation des « bed clusters ». Les « bed clusters » semblent évoluer ensuite en seuils.

Ce type de comportement pour la formation des seuils semble se rapprocher de la « Jammed State Hypothesis » proposée par Church et Zimmermann (2007). Les « bed clusters » pourraient être une réponse du matériau granulaire afin d'augmenter sa résistance à l'écoulement ; les seuils (ou step-pools) pourraient ensuite représenter de vraies « chaînes de force » qui gagnent en stabilité grâce à leur structure collective qui s'oppose à la force de

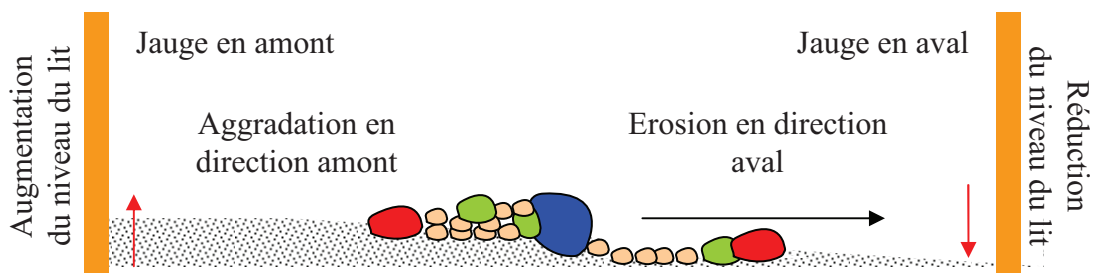
l'écoulement et dont la résistance serait renforcée par la présence des parois de la section (Zimmermann et Church, 2010).

Les seuils peuvent atteindre un dénivelé amont-aval de plus de 5 cm. Ils semblent influencer la dynamique du système sur une échelle locale (à court terme) et globale (à long terme, voir paragraphe 3.1.2).



**Figure 52 :** Détails de la morphologie step-pool observée pendant les manipulations (la hauteur du step est d'environ 5 cm).

A court terme ces structures permettent de justifier les augmentations soudaines de pente locale (effet local, Figure 53) et la formation d'un pavage de surface locale.



**Figure 53 :** Exemple d'influence de la formation d'un seuil sur la partie amont et aval du système ; augmentation de la côte du lit à l'amont du seuil et diminution de la côte du lit à l'aval du seuil.

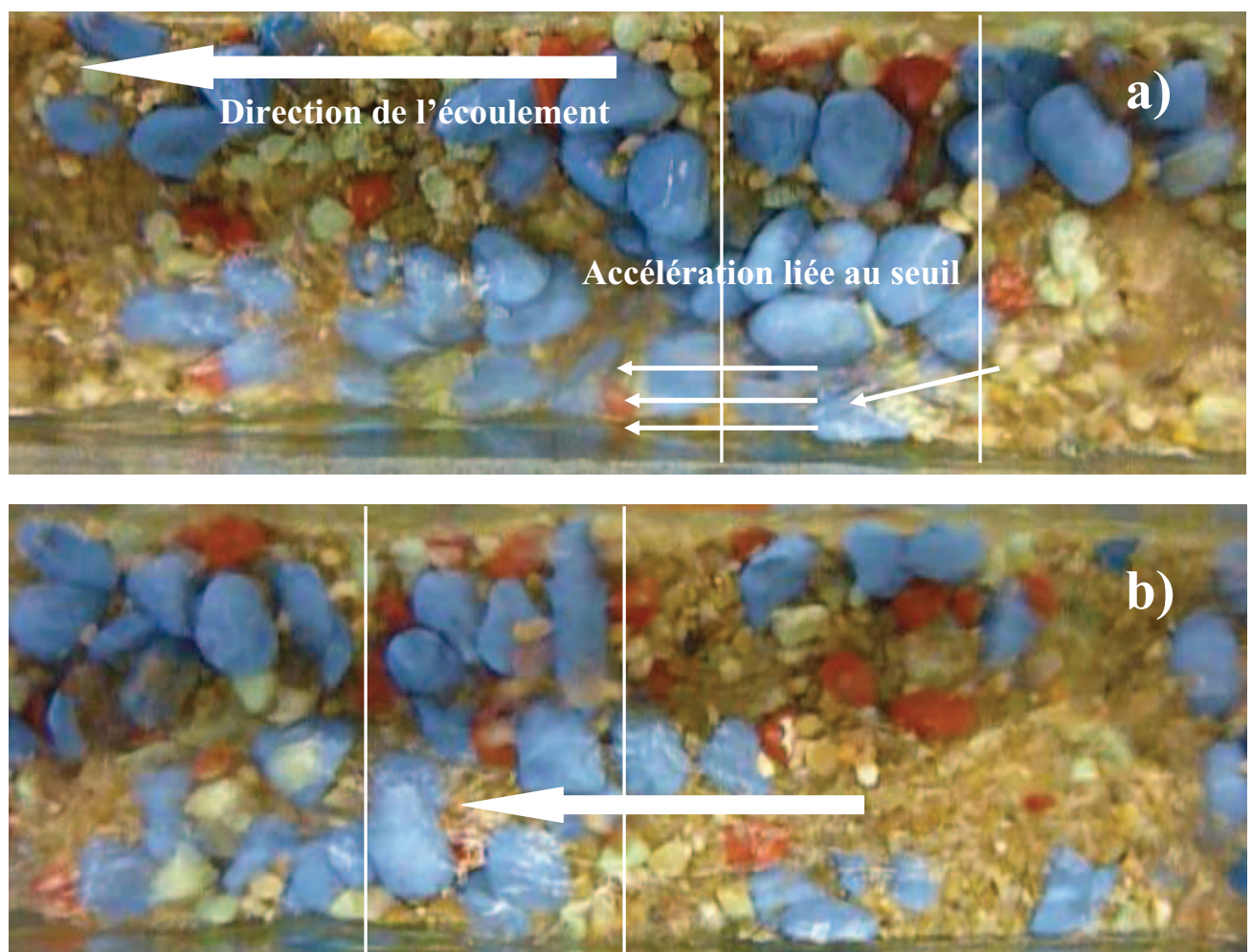
Les seuils agissent temporairement comme des points fixes du système (Lenzi et Comiti, 2003). En amont, ils favorisent l'accumulation des particules et la formation du pavage. La côte du lit augmente et les sédiments fins sont alors stockés sous la couche formée par les éléments grossiers. En aval, l'écoulement qui passe sur le seuil est accéléré. Le débit solide

provenant de l'amont est diminué en raison du stockage de matériau. L'accélération de l'écoulement sur le seuil et la diminution des apports sédimentaires sont responsables d'une érosion locale. Cette érosion est associée à une diminution de la pente locale et de la côte du lit.

L'effet combiné de l'aggradation en amont et de l'érosion en aval du seuil peut produire une augmentation notable de la pente locale entre les deux jauges sur le tronçon considéré (Figure 53).

Deux mécanismes principaux de destruction des seuils ont été observés :

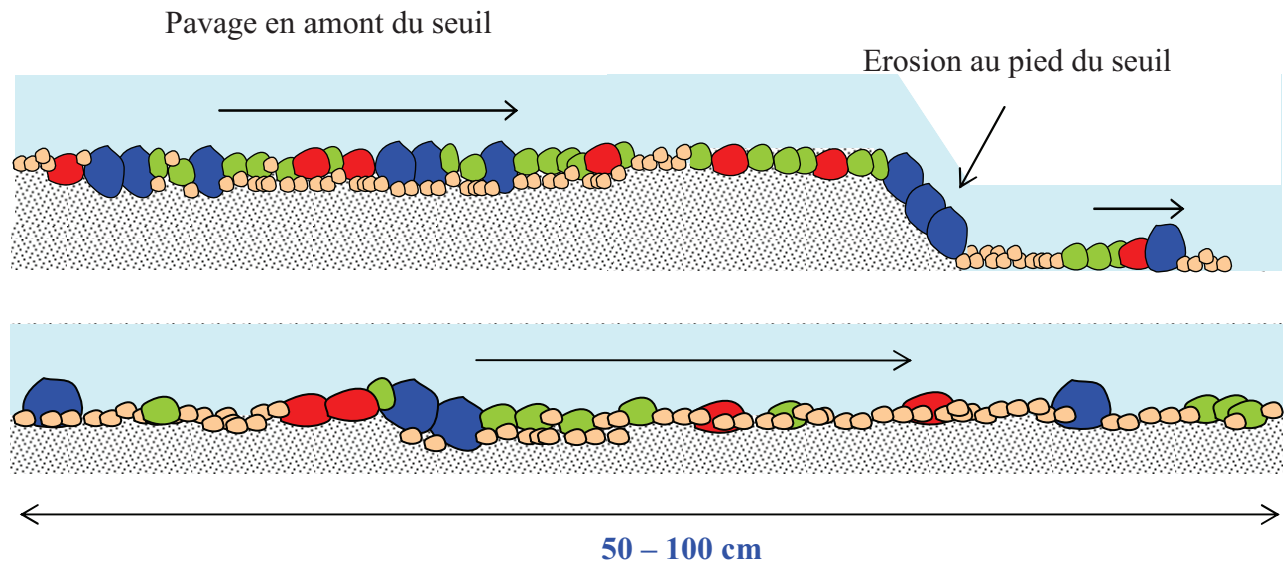
- 1) l'érosion au pied de la structure (Figure 54), liée à l'accélération du jet liquide et à une déstabilisation progressive de la base du seuil ;
- 2) l'érosion par impact suite à la production d'une nappe de charriage en amont.



**Figure 54 :** Deux images séparées de 6 secondes montrant le mécanisme d'érosion de proche en proche ; a) jet liquide accéléré au pied du seuil ; b) étalement des particules du seuil et reformation rapide d'un autre seuil en aval. Le lit en résulte pavé, en aval, après l'érosion du seuil et en amont les particules fines sont moins protégées et sont donc plus disponibles au transport.

L'érosion au pied du seuil peut produire deux phénomènes, chacun à une échelle différente. Une érosion à petite échelle est associée à la destruction d'un seuil qui se reforme immédiatement en aval (Figure 54). A cause de l'érosion du seuil, le lit qui en résulte est localement pavé, en aval (Figure 54, b). Les sédiments fins qui étaient temporairement stockés dans le seuil sont alors libérés (Figure 54, b) et peuvent se propager en aval, avant d'être progressivement enfoui sous le pavage en formation. La destruction des seuils est le mécanisme principal qui permet la redistribution des sédiments fins dans le système. Dans ce contexte nous parlerons de mode d'érosions de « **proche en proche** ». On verra, par la suite, que c'est le mode de transport principal pour ce type d'écoulement.

Quand un pavage stable s'est formé entre deux seuils (voir paragraphe 3.1.2 et Figure 56), l'érosion au pied du seuil en aval est un phénomène régressif qui déstabilise la partie amont du système. Le pavage à l'amont du seuil est souvent complètement détruit et les particules grossières qui sont à l'origine de sa formation sont redistribuées sur tout le canal (voir une schématisation sur la Figure 55). La granulométrie du lit qui en résulte est alors plus fine après ce type d'érosion et les grosses particules recommencent à se regrouper en donnant naissance à de nouvelles structures sédimentaires (bed-clusters et seuils).



**Figure 55** : Erosion régressive et redistribution des gros éléments (couleur bleu, vert et rouge) et des fins (en beige) dans le système.

La formation locale ou globale d'un pavage de surface à forte pente semble engendrée par la présence des seuils : nous pouvons donc dire que les seuils influencent sur le long terme la dynamique du système. Ce phénomène est important car la destruction du pavage est associée à des pics de transport qui peuvent atteindre 15 fois la valeur du débit solide moyen du système. C'est pourquoi, le rôle du pavage sur la dynamique sédimentaire sera discuté en détail dans le paragraphe suivant.

### 3.1.2. Pavage à forte pente et nappes de charriage

Un pavage uniforme se forme sur deux échelles spatiales différentes : une échelle intermédiaire (environ 50 – 100 cm) et l'échelle du canal (environ 520 cm).

Le pavage qui se forme à l'échelle intermédiaire est associé à un phénomène très marqué d'aggradation « locale » du système. Ce phénomène consiste en la formation d'une séquence de deux seuils ou plus (Figure 56), séparés d'une distance  $L^*$  (de l'ordre de 50 – 100 cm), favorisant la formation d'un pavage à plus forte pente dans la zone comprise entre les seuils.

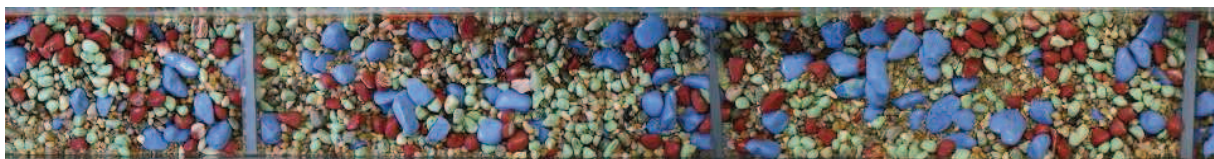
La stabilité de ce pavage est assurée par l'effet combiné des seuils en amont et en aval. La partie amont réduit les apports sédimentaires alors que la partie aval stabilise la pente autour d'un point fixe constitué par la crête du seuil. Le pavage entre les deux seuils est stable jusqu'à la destruction d'un des deux seuils, en amont ou en aval. Une érosion respectivement progressive ou régressive du lit pavé est observée.



**Figure 56 :** Formation du pavage entre deux seuils en cascade, associés à une phase d'aggradation du lit.

Avec une périodicité plus longue, nous avons également observé la formation d'un pavage uniforme à plus grande échelle (environ celle du canal). Ce phénomène semble être le résultat d'un processus long d'aggradation associé à la formation des seuils dans le système. La composition de plusieurs pavages locaux mènerait à la formation d'un pavage uniforme sur tout le canal (Figure 57). La logique de formation de ce pavage semble se rapprocher de celle décrite par Recking (2006) dans le cadre de sa thèse (modélisation par compartiments). Un schéma conceptuel est reporté sur la Figure 59.

Le pavage stabilise temporairement le lit de surface. L'écoulement liquide qui en résulte est uniforme et bidimensionnel. La destruction de ce pavage est associée à la production de nappes de charriage dans le système.

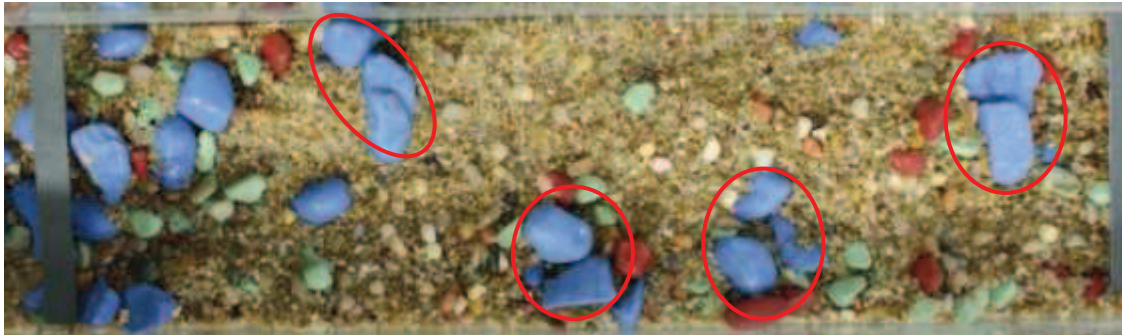


**Figure 57 :** Formation d'un pavage uniforme sur toute la longueur du canal – *PHASE III*.

La destruction du pavage en raison de la production d'une nappe de charriage est différente de celle qui se produit par instabilité d'un seuil (Figure 56). Les nappes de charriage sont des phénomènes érosifs à grande échelle produites par un phénomène d'instabilité linéaire (Seminara et al., 1996) ou par le tri granulométrique, quand le système a atteint une condition d'équilibre énergétique (Recking et al. 2009).

Les nappes de charriage sont plus « morphogènes » que les seuils. Elles permettent une redistribution de toutes les fractions granulométriques du mélange d'alimentation dans le système.

Contrairement à d'autres études (Recking et al. 2009), les nappes de charriage observées ne sont pas en mesure de changer radicalement la morphologie du lit mais ont un impact local. Le pavage local en aval, bien que déstabilisé, est rarement complètement détruit au cours de la propagation de la nappe de charriage. Cette propagation se réalise plutôt de façon tridimensionnelle, avec une partie de section complètement érodée et une autre plus stable (Figure 58).



**Figure 58 :** Lit érodé après la production d'une nappe de charriage (partie haute de l'image) ; des bed-clusters se réforment immédiatement après l'érosion.

### 3.1.3. Synthèse sur les observations

Les « Bed Clusters » et les « seuils » sont des éléments clés en mesure d'expliquer l'évolution à long terme du système. Un schéma conceptuel des observations expérimentales est reporté sur la Figure 59.

Nous avons distingué trois phases (ou états du lit) associées à l'aggradation du système. Chaque phase est associée à une des trois morphologies dominantes, les « *Bed Clusters* », les « *Seuils* » et le « *Pavage* ».

La *Phase I* est une phase ordinaire que nous pouvons observer en continu au cours de toute l'expérience. Les « *Bed Clusters* » se forment de façon aléatoire sur toute la longueur du canal et l'écoulement est tridimensionnel (Figure 51). Ces structures sont stables et sont érodées localement et régulièrement, pour se reformer rapidement en aval.

La *Phase II* commence quand les « *Bed Clusters* » évoluent sous forme de « *Seuils* » similaires aux Step-Pools (macroformes). En raison de leur faible mobilité et de leur « taux d'occupation » de la section d'écoulement, les « *bed-clusters* » représentent des lieux privilégiés de dépôt de particules grossières (Sutherland, 1991, Reid et al. 1992, Church et al. 1998, Hassan et Church, 2000). Dans ce cas, des seuils, de largeur égale à celle de la section d'écoulement, se forment en stabilisant localement le système. Les seuils favorisent alors la formation d'un pavage local stable et uniforme (l'écoulement est bidimensionnel). Ils sont aussi à la base de la formation d'un pavage global sur toute la longueur du système (*Phase III*).

Tandis que le pavage local est détruit par une instabilité qui se produit au niveau du seuil en amont ou en aval, le pavage global, lui, est détruit en raison de la production des nappes de charriage.





### 3.2. Analyse des résultats

#### 3.2.1. Généralités

Nous avons mesuré des fluctuations de la pente (locale et globale) et du débit solide autour de valeurs d'équilibre dynamique. Ces fluctuations sont associées à des mécanismes de formation et de destruction de structures sédimentaires bien définies (« bed clusters », pavage, nappes de charriage, seuils similaires aux step-pools) qui influencent la dynamique du système sur des échelles temporelles et spatiales variées.

Nous allons présenter l'ensemble des mesures expérimentales acquises au cours de l'expérience. Il s'agit notamment des mesures de pente (locale et globale), de débit solide et de la granulométrie de surface.

La granulométrie de surface est mesurée en statique, après l'arrêt de l'expérience. Elle est indicatrice du rôle des différentes fractions granulométrique, c'est-à-dire indicatrice du tri granulométrique, sur la dynamique du système lui-même.

La pente et le débit solide permettent une analyse spatiale et temporelle des phénomènes observés ainsi que de leur intensité.

La relation qui existe entre la granulométrie de surface, la pente et le transport, a été étudiée à l'échelle du canal et à l'échelle locale. Pour l'analyse locale, nous avons partagé le canal en quatre « compartiments » (voir paragraphe 1.4.3).

Nous avons choisi d'introduire deux indices de fluctuation : un pour la pente et un pour le débit solide. Le « taux de fluctuation »  $T_f$  [-] (Eq. 49) est le rapport entre le débit solide maximal moyen mesuré et le débit solide d'équilibre dynamique du système. C'est un indicateur de l'intensité du phénomène érosif mesuré. « L'amplitude de fluctuation »  $A_f$  [-] (Eq. 50) est la différence entre la pente maximale et la pente minimale moyenne du système. C'est un indicateur représentant le volume de matériau concerné par le phénomène de fluctuation.

$$T_f = \frac{Q_{s_{max}}}{Q_{s_{eq}}} \quad (49)$$

$$A_f = S_{o_{max}} - S_{o_{min}} = \frac{h_{max} - h_{min}}{L_{tot}} \quad (50)$$

Où :

- $Q_{s_{max}}$  [g/s] et  $Q_{s_{eq}}$  [g/s] sont respectivement le débit solide maximal moyen et le débit d'équilibre dynamique pour le système ;
- $S_{o_{max}}$  [m/m] et  $S_{o_{min}}$  [m/m] sont respectivement les pentes maximale et minimale moyennes du système ;
- $h_{max}$  [m] et  $h_{min}$  [m] sont respectivement les niveaux maximal et minimal moyens du lit mobile mesuré à l'extrémité amont du canal (jauge 1) ;
- $L_{tot}$  [m] est la longueur totale du lit mobile.

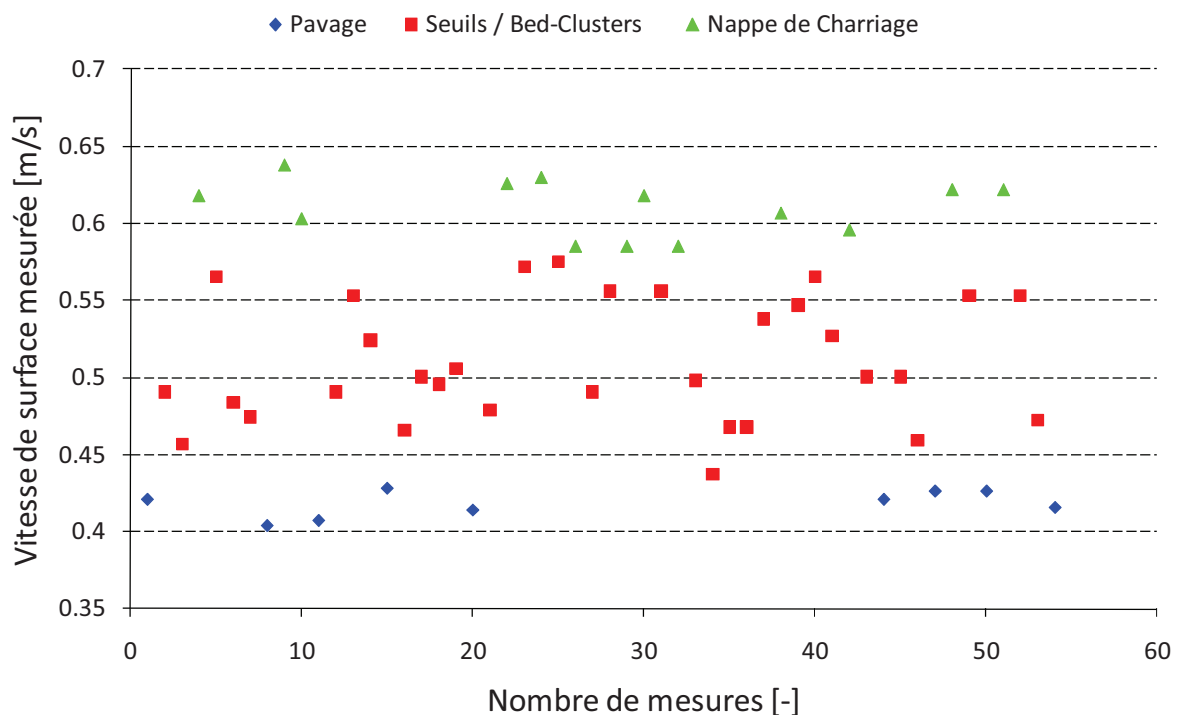
### 3.2.2. *Hydraulique du système*

Au cours de l'expérience, nous avons effectué des mesures de vitesse de surface avec la méthode du nuage de particules de polystyrène (voir paragraphe 2.4.3). La vitesse mesurée correspond à une vitesse de surface moyenne sur une longueur de canal de 1 m.

Les 54 mesures de vitesse de surface effectuées montrent que celle-ci varie entre 0.4 et 0.64 m/s pour une vitesse moyenne d'environ 0.52 m/s (Figure 60).

Chaque mesure de vitesse a été associée visuellement aux différentes structures de surface (Figure 60). Les vitesses maximales mesurées de **0.6 m/s** (triangles verts, Figure 60) correspondent à un écoulement accéléré pendant le passage d'une nappe de charriage (destruction du pavage) alors que les vitesses minimales de **0.4 m/s** (carrés bleus, Figure 60) sont associées à un lit uniformément pavé.

Les bed-clusters et les seuils produisent des zones d'ombre et d'accélération dans l'écoulement. Ces structures sont responsables des larges fluctuations de vitesse mesurées entre les deux extrêmes ( $0.4 < U_{surface} < 0.64$ , carrés rouges sur la Figure 60).



**Figure 60** : Mesures de vitesse de surface de l'écoulement pour l'expérience à *Faible Transport* ; chaque mesure correspond à un état du lit différent.

Ces valeurs mesurées sont comparées à la valeur théorique de vitesse moyenne de l'écoulement ( $U_{moy}$  égale à **0.32 m/s**), calculée en utilisant le diamètre moyen arithmétique «  $D_{m,p}$  » du pavage de surface (11.5 mm), la pente d'équilibre dynamique du système (12.2 %) et la loi de frottement de Recking et al. (2008b). Nous avons choisi cette valeur de diamètre parce qu'elle est représentative du pavage de surface, très stable dans le temps (Figure 66).

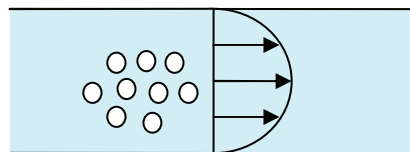
Morphologie dominante	$U_{\text{moy}}$ [m/s]	$U_{\text{moy,calculée}} / U_{\text{surface,mesurée}}$ [-]
<i>Pavage</i>	0.4	0.8
<i>Seuils / Bed-Clusters</i>	0.52	0.62
<i>Nappe de charriage</i>	0.62	0.52

**Tableau 12 :** Profil de vitesse estimé pour chaque structure sédimentaire du lit (pavage, nappes de charriage, bed-clusters et seuils) à partir des valeurs du rapport

$$U_{\text{moy,calculée}} / U_{\text{surface,mesurée}} \cdot$$

Ces différences sont liées aux incertitudes de la loi de frottement (Recking et al., 2008b) et les incertitudes associées à la méthode de mesure. Notamment, nous n'avons aucune méthode pour corriger l'influence des effets de bords sur la vitesse des particules de polystyrène (Figure 61) ;

Accélération du profil de vitesse au centre de la section



**Figure 61 :** Influence possible des bords sur les mesures de vitesse de surface de l'écoulement.

La profondeur de l'écoulement  $h$  [m], les nombres de Froude  $F_r$  [-] et de Shields  $\theta$  [-] ont été calculés en faisant l'hypothèse  $U_{\text{surface}} = U_{\text{moyenne}}$ .

Pour les calculs, nous avons choisi d'utiliser une largeur corrigée de la section d'écoulement égale à 7.5 cm. Cette valeur permet de tenir compte du fait que l'écoulement est souvent tridimensionnel avec des blocs de 25 mm (égale au  $D_{\text{max}}$  du mélange) qui se déposent régulièrement sur les bords du canal.

Les paramètres hydrauliques ont été calculés en utilisant la pente moyenne du système égale à 0.122 et le diamètre moyen arithmétique du pavage de surface (Tableau 13). Les valeurs obtenues ont été comparées aux valeurs calculées avec la loi de frottement (Recking et al., 2008b). Dans les deux cas, la mise en mouvement a été calculée avec le modèle de Recking et al. (2008b).

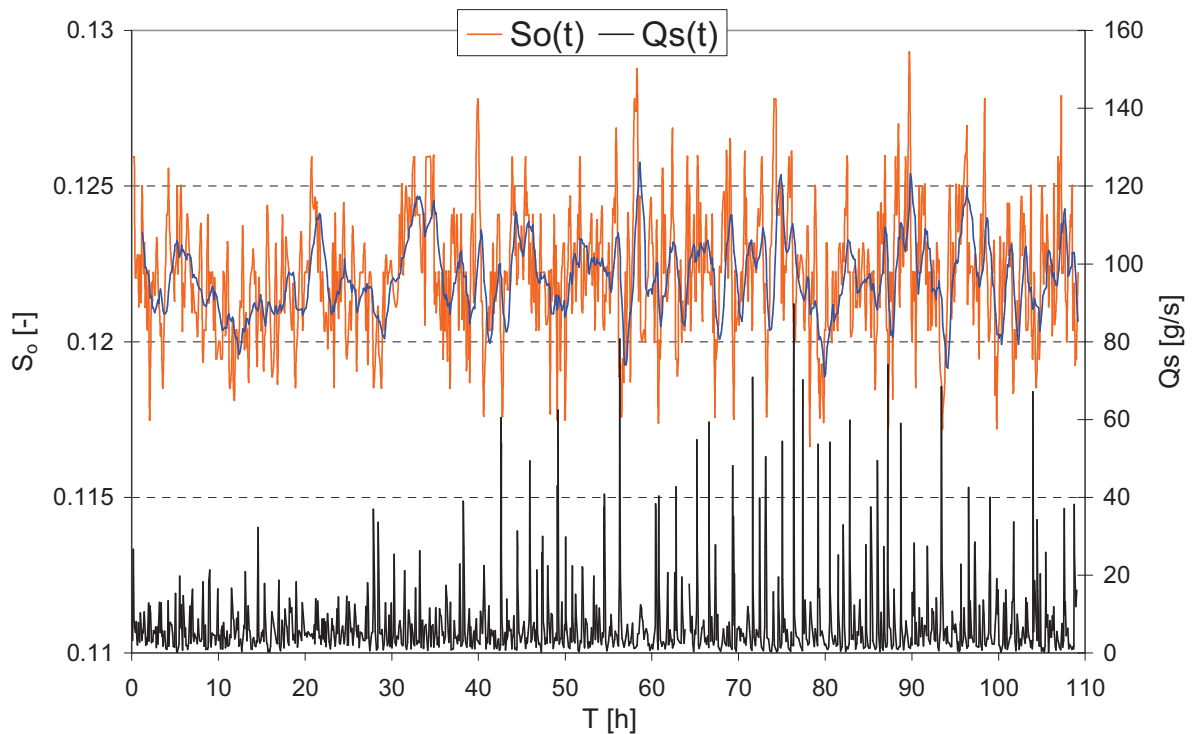
D [mm]	$U_{\text{moy}}$ [m/s]	Fr [-]	$\theta$ [-]	$\theta_c$ [-]	$\theta/\theta_c$
$D_{m,p}$ (11.5)	0.52	1.89	0.026	0.084	0.31
$D_{m,p}$ (11.5)	0.32	$\approx 1$	0.077	0.084	0.92

**Tableau 13** : Comparaison entre les conditions hydrauliques mesurées (première ligne) et celle calculées (seconde ligne) pour l'expérience à « *Faible Transport* ».

Un nombre de Froude d'environ 2 est excessif pour ce type d'écoulement. En effet, dans ce contexte torrentiel, l'interaction entre l'écoulement et les formes de fond (formation/destruction) semblerait la raison pour laquelle le nombre de Froude est généralement proche de 1 (Church et Zimmermann, 2007; Comiti et al., 2009; Grant, 1997.). Les valeurs indiquées par la loi de frottement nous semblent donc plus raisonnables, du moins en ce qui concerne le nombre de Froude. La validité de notre choix est confortée par le fait que les valeurs de la loi de frottement couplées à la loi de transport (Recking et al. 2008b) nous ont donné une très bonne approximation de la capacité de transport globale du système (Tableau 9).

### 3.2.3. Pente et débit solide

La pente moyenne globale fluctue autour d'une valeur de **12.2%** et le débit solide moyen enregistré à la sortie du système correspond au débit d'alimentation solide de **6 g/s** (Figure 62). Le système est donc dans les conditions **d'équilibre dynamique**.



**Figure 62** : Pente moyenne et débit solide moyen en sortie du système au cours de l'expérience *Faible Transport* ; en bleu la moyenne mobile sur 10 points du signal de pente mesuré.

Les mesures montrent une phase de « mise en route » pour l'expérience d'environ 40 heures (Figure 62). Pendant cette phase l'amplitude et le taux de fluctuation semblent plus modérés bien que le système fluctue autour des valeurs d'équilibre dynamique. Nous n'avons pas de justification définitive pour ces résultats. La phase de démarrage pourrait être associée à une période de construction du lit sous la contrainte hydraulique imposée par le système d'alimentation (débit solide et débit liquide).

Les résultats quantitatifs des fluctuations de pente et de débit solide à l'échelle du canal pour l'expérience à « *Faible Transport* » sont reportés dans le Tableau 14.

	$S_{\min}$ [-]	$S_{\max}$ [-]	$Q_{S_{\min}}$ [g/s]	$Q_{S_{\max}}$ [g/s]	$A_f$ [-]	$T_f$ [-]
<i>Faible Transport</i>	0.116	0.129	0.33	66	0.013	11

**Tableau 14** : Résultats globaux pour l'expérience à *Faible Transport*.

L'amplitude de fluctuation  $A_f$  [-] et le taux de fluctuation  $T_f$  [-] sont respectivement de 0.013 et 11. Ce résultat montre qu'à des fluctuations relativement faibles de la pente moyenne du système sont associées des fluctuations très grandes du transport solide. Le tri granulométrique, matérialisé par la formation de structures de surface d'étendue spatiale différente (bed-clusters, seuils, pavage à forte pente et nappes de charriage), peut influencer grandement la dynamique du système.

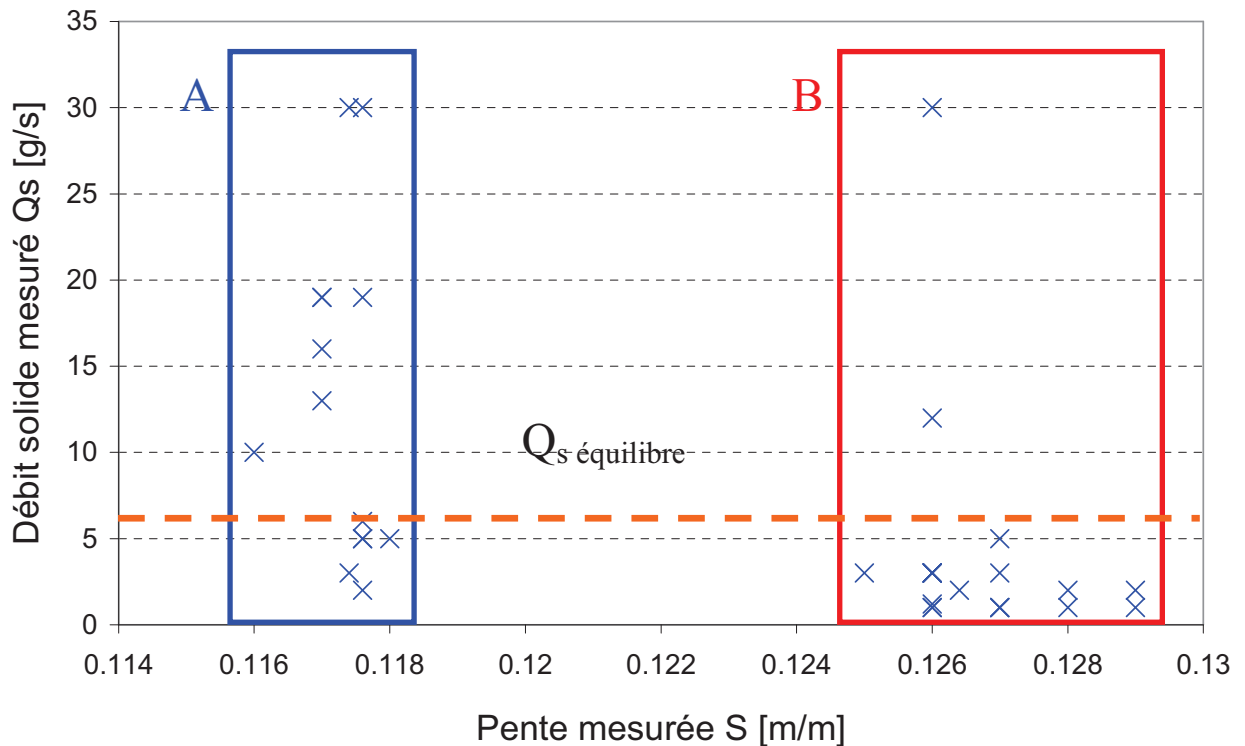
Sur la Figure 63, nous avons représenté la valeur de débit solide qui correspond à un maximum (groupe B, Figure 63) ou à un minimum (groupe A, Figure 63) de pente moyenne globale du système (observé à partir de la Figure 62).

Les données correspondent à des mesures effectuées sans arrêter l'expérience et sont reportées en ANNEXE 2.

Les forts débits solides, supérieurs à 2 fois le débit d'équilibre dynamique, sont associés aux faibles pentes. Les faibles débits solides (égaux ou inférieurs au débit solide d'alimentation) sont observés aussi bien pour des faibles que pour des fortes pentes.

Une corrélation directe entre les extrêmes (maximum et minimum) de pente moyenne du système et les extrêmes (maximum et minimum) de débit solide ne semble pas exister. Ce fait (Figure 63) est surprenant et est, d'ailleurs, en opposition avec les résultats obtenus par Recking et al. (2009).

Nous allons justifier ces résultats (Tableau 14, Figure 63) dans la suite du chapitre. Nous arriverons alors à la conclusion suivante : les phénomènes locaux ont une importance majeure dans ce type de transport.



**Figure 63 :** Extrêmes de pente et de débit solide mesurés en dynamique à partir des mesures reportées sur la Figure 62 ; le groupe A (en bleu) et le groupe B (en rouge) représentent respectivement les débits solides mesurés pour une pente minimale ou maximale globale du système ; en orange, le débit solide d'équilibre dynamique pour le système.

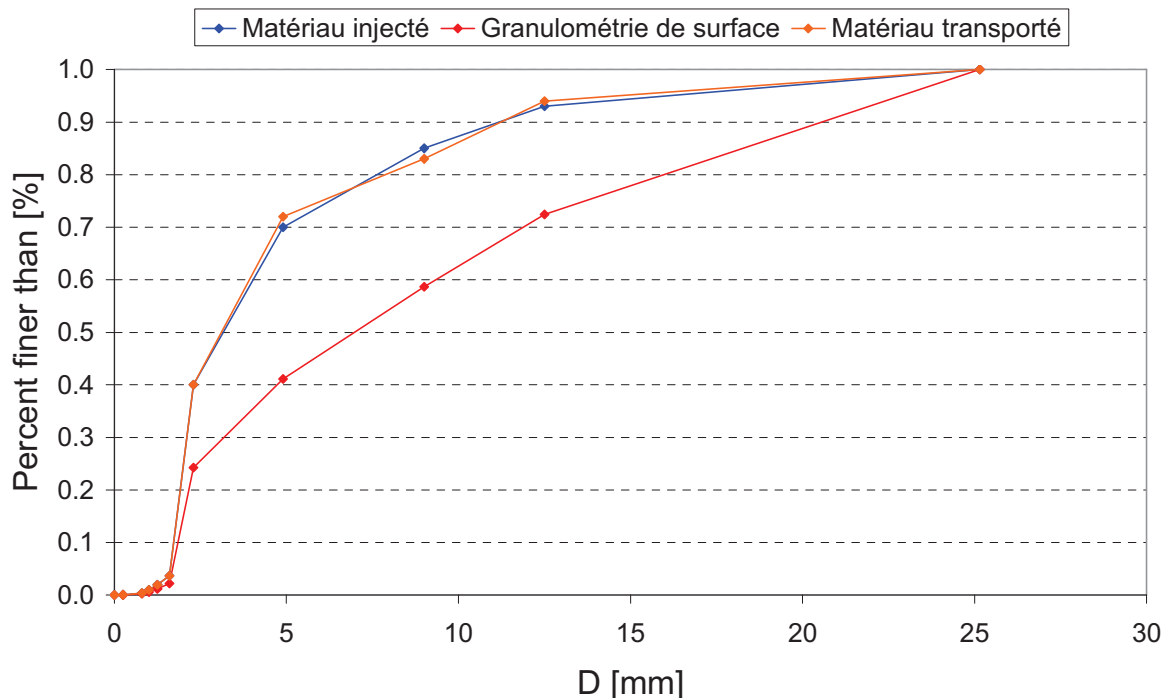
#### 3.2.4. Granulométrie de surface

Au cours de l'expérience, nous avons mesuré 33 profils de granulométrie de surface. Chaque profil était composé de 15 photos du canal. Grâce aux données collectées, nous avons calculé le profil granulométrique moyen du lit de surface et du matériau transporté par l'écoulement. Les deux courbes granulométriques, reportées dans le Tableau 15 et sur la Figure 64, ont été calculées comme étant la moyenne arithmétique de tous les profils mesurés au cours de l'expérience.

Les mesures effectuées permettent de confirmer les observations expérimentales d'un lit globalement pavé (courbe rouge, Figure 64) et de constater que la composition granulométrique du matériau injecté (courbe bleue, Figure 64) est égale à celle du matériau transporté (courbe orange Figure 64).

	$D_{16}$ [mm]	$D_{30}$ [mm]	$D_{50}$ [mm]	$D_{84}$ [mm]	$D_m$ [mm]
<i>Surface du lit</i>	1.83	3.18	7	18	11.5
<i>Matériau Injecté</i>	1.66	2.13	3.16	9	6
<i>Matériau Transporté</i>	1.83	2.10	3.11	9.32	6.32

**Tableau 15 :** Diamètres représentatifs de la courbe granulométrique moyenne de la surface du lit, du matériau injecté et du matériau transporté mesuré à la sortie du canal.

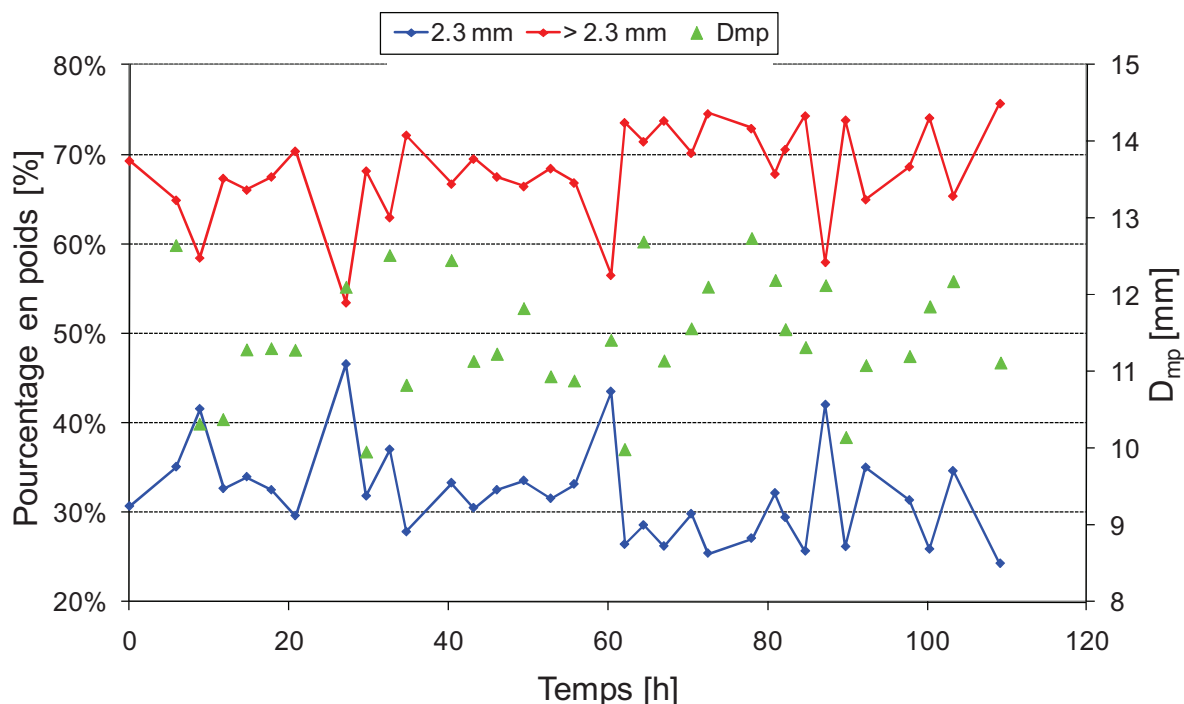


**Figure 64 :** Courbe granulométrique du matériau transporté (en orange), du matériau injecté (en bleu) et du matériau composant le lit de surface (en rouge) pour l'expérience à « *Faible Transport* ».

Le pavage est relativement stable au cours de toute la durée de l'expérience (Figure 65). Bien que le  $D_{40}$  du mélange d'alimentation soit égal à 2.3 mm, le pourcentage de ces particules sur la surface est souvent inférieur à 40 %. Le diamètre moyen arithmétique mesuré sur la surface du lit pendant chaque échantillonnage «  $D_{mp}$  » fluctue faiblement pendant toute l'expérience entre 10 et 13 mm (Figure 65). Le diamètre moyen global est d'environ 11.5 mm (Tableau 15). Cette valeur est proche (bien que supérieure) du  $D_{84}$  du mélange d'alimentation (de 9



mm) et est égale à environ 2 fois le diamètre moyen du matériau d'alimentation (égale à 6 mm). Cette condition est représentative d'un lit pavé (Parker et Klingemann, 1982).



**Figure 65 :** Evolution dans le temps du pourcentage en poids des particules qui composent le mélange granulaire de la surface du lit (particules ayant un diamètre supérieur à 2.3 mm en rouge et inférieur et égal à 2.3 mm en bleu) et du diamètre moyen arithmétique (triangles en vert).

La composition granulométrique de la surface semble évoluer faiblement dans le temps (Figure 65). La composante grossière du mélange ( $> 2.3$  mm) semble légèrement augmenter et la composante fine ( $\leq 2.3$  mm) semble diminuer. Cette faible tendance pourrait être liée à la phase de démarrage de l'expérience.

Tout ce qui est injecté est retrouvé intégralement en sortie du canal, malgré la présence d'un pavage persistant, ce qui nous fait dire que l'expérience à *Faible Transport* se trouve dans les conditions de mobilité équivalente (Parker et Klingemann, 1982). La mobilité équivalente correspond à un lit pavé (le ratio  $D_{mp}/D_m$  est égal à 2.65, d'après Parker et Klingemann, 1982) et à une équivalence entre le matériau transporté et le matériau qui compose la sous-surface (mélange d'origine), disponible pour le transport. Les deux conditions sont vérifiées dans cette expérience.

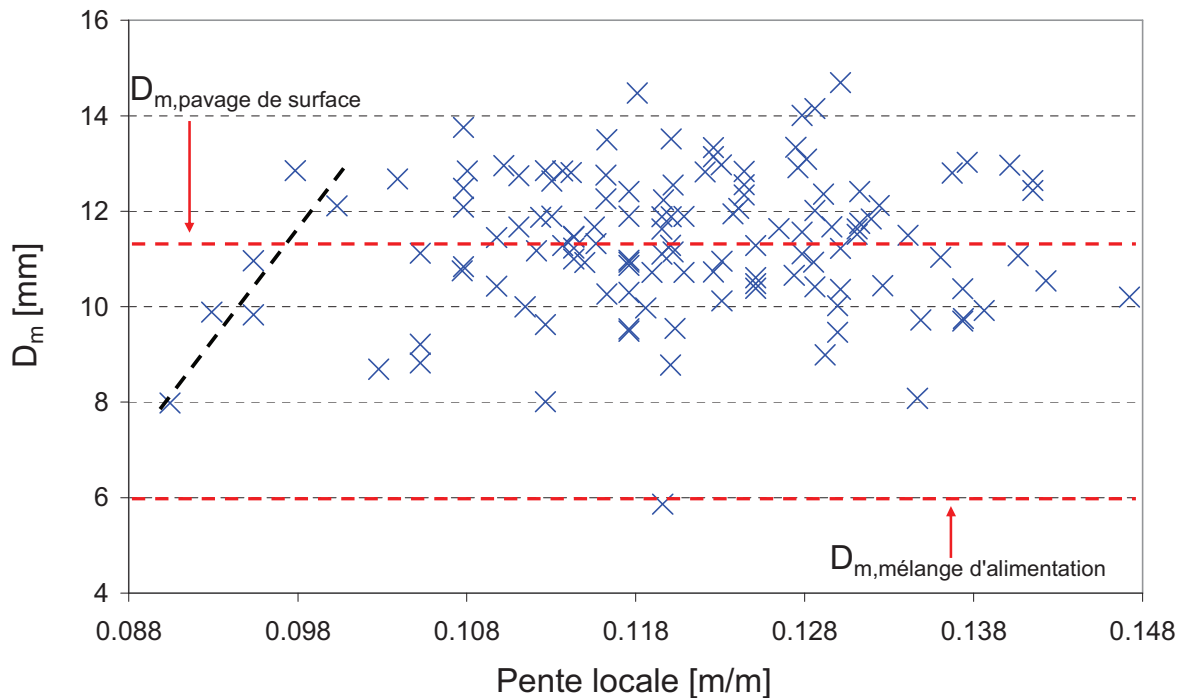
Le résultat obtenu est surprenant si l'on considère les conditions expérimentales utilisées (pente très forte de 12.2 % et  $\theta/\theta_c < 1$ ). Notamment, dans un contexte torrentiel (pente supérieure à 5 %, d'après Rickenmann, 2001), les études dans la littérature tendent à montrer que le système est en condition de transport partiel avec des sédiments fins qui sont transportés plus facilement par l'écoulement que les sédiments grossiers (Schmidt et Ergenzinger, 1992; Comiti et al., 2005). La mobilité équivalente est généralement associée à

des conditions de transport intense responsables de la destruction du pavage de surface, quand le rapport  $\theta/\theta_c > 3$  (Rickenmann, 2001).

Pour notre expérience, l'égalité de mobilité semble la conséquence du tri granulométrique, matérialisé par des phénomènes locaux de formation et de destruction des seuils et par des phénomènes à plus grande échelle, associés à la propagation de nappes de charriage.

### 3.2.5. Analyse locale : corrélation entre la pente, le débit solide et la granulométrie de surface

Pour chaque partie du canal (voir Tableau 18, paragraphe 3.4), nous avons analysé la relation qui existe entre la pente locale et la granulométrie de surface (Figure 66). Pour la partie aval du système, nous avons analysé la relation qui existe entre la pente, la granulométrie de surface et le débit solide moyen transporté au cours de la première minute d'expérience, qui a suivi chaque arrêt (Figure 67). Pour cette analyse notre hypothèse est que le débit solide mesuré est représentatif de l'état du lit en aval du système.



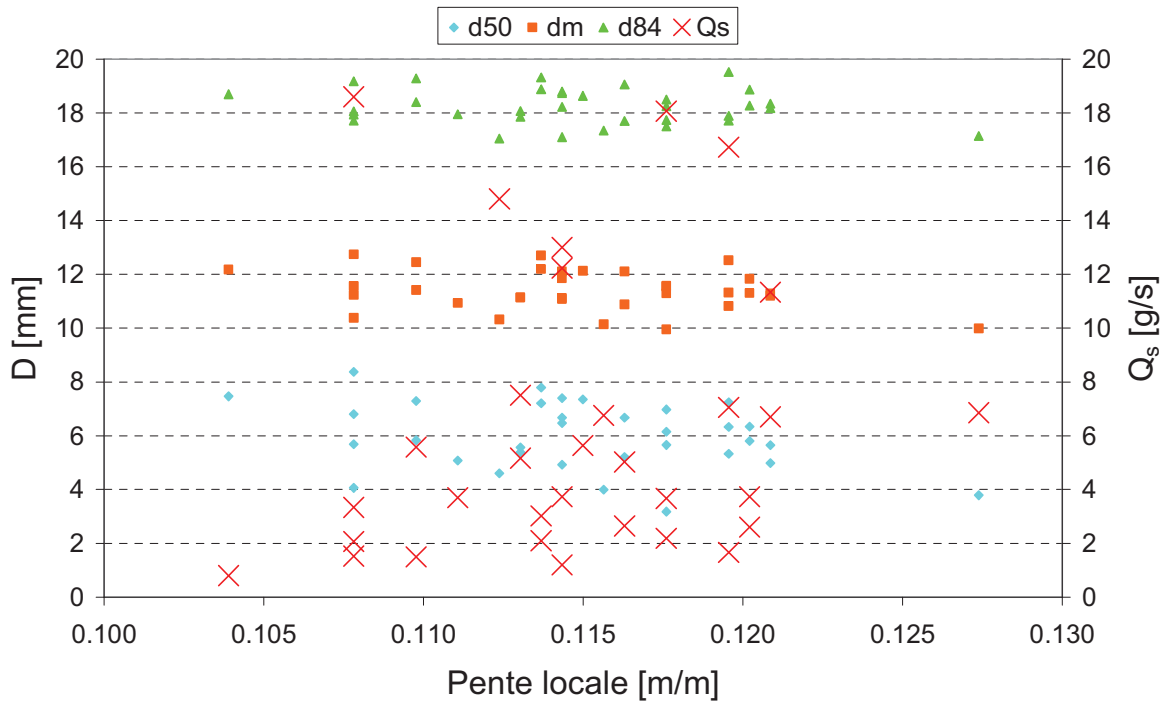
**Figure 66 :** Diamètre moyen arithmétique de la surface du lit en fonction de la pente locale dans le cas de l'expérience *Faible Transport*.

La Figure 66 montre que, même localement, il n'y a pas de corrélation entre la pente et la granulométrie de surface (représentée par le diamètre moyen arithmétique sur la Figure 66).

Pour des pentes comprises entre 0.088 et 0.10, nous pouvons observer une augmentation du diamètre moyen arithmétique du lit avec l'augmentation de la pente. Ces mesures correspondent à la phase de démarrage de l'expérience et sont difficiles à interpréter.

Les variations de la pente locale sont largement supérieures aux variations de la pente globale du système. L'amplitude de fluctuation  $A_f$  atteint localement la valeur 0.06. Cette valeur est 5 fois supérieure à la valeur mesurée pour le système.

Le ratio  $D_{mp}/D_m$  varie globalement entre 1.33 et 2.33. Ces valeurs sont très proches de 2.5, trouvé par Parker et Klingemann (1982) sur la rivière Oak Creek. Localement, le lit est pavé sur toute la durée de l'expérience.



**Figure 67 :** Pente locale, débit solide et granulométrie de surface mesurés dans la partie aval du canal au cours de l'expérience *Faible Transport*.

L'analyse détaillée de la partie aval du système (Figure 67, Tableau 16) permet de confirmer une très grande stabilité du pavage local. Le diamètre moyen arithmétique mesuré sur la surface du lit est d'environ 11 mm, supérieur au  $D_{84}$  du mélange d'alimentation (9 mm). De grandes variations des pentes locales et des débits solides sont mesurées. L'amplitude de fluctuation  $A_f$ , égale à 0.025, est environ 2 fois supérieure à l'amplitude de fluctuation globale du système. Le taux de fluctuation  $T_f$  [-] varie entre 0 et 3. Ces valeurs du taux de fluctuation sont sensiblement identiques à celles mesurées sur la Figure 63 (corrélation entre pente moyenne et débit solide moyen).

Nous pouvons en conclure que les pics de débit solide mesurés plus fréquemment ne sont pas l'expression d'un phénomène érosif à grande échelle mais, plutôt, d'un phénomène d'érosion locale. Par conséquent les taux de fluctuation global et local sont, en moyenne, les mêmes.

Grâce aux observations expérimentales (paragraphe 3.1.1) nous pouvons conclure que ce comportement du système est représentatif des mécanismes d'érosion de « proche en proche ». L'érosion au pied d'un seuil pourrait produire un pic de transport relativement grand par rapport aux conditions de transport moyennes ( $T_f$  supérieur à 2) tout en gardant un lit globalement pavé à l'amont du seuil (Figure 54).

Temps [h]	D <sub>50</sub> [mm]	D <sub>m</sub> [mm]	D <sub>84</sub> [mm]	Q <sub>s</sub> [g/s]	S <sub>o</sub> [m/m]
5.87	4.60	10.32	16.23	14.80	0.112
8.82	4.07	8.73	16.44	18.60	0.108
11.77	5.10	8.65	16.61	3.67	0.118
14.72	5.81	9.42	16.61	2.60	0.120
17.80	5.65	9.43	16.59	6.70	0.121
20.80	7.40	9.43	16.77	3.73	0.114
27.17	3.18	10.08	16.38	18.07	0.118
29.70	7.24	8.27	17.00	1.67	0.120
32.63	5.33	10.22	16.44	16.72	0.120
34.73	7.29	9.09	16.93	1.50	0.110
40.37	5.39	10.25	16.55	7.50	0.113
43.15	5.69	9.32	16.55	3.33	0.108
46.08	6.34	9.42	16.80	3.74	0.120
49.43	5.08	9.77	16.52	3.70	0.111
52.82	5.20	9.15	16.44	2.65	0.116
55.75	5.84	9.16	16.66	5.58	0.110
60.37	3.79	9.50	16.27	6.85	0.127
62.08	7.79	8.38	16.94	3.02	0.114
64.43	5.57	10.48	16.49	5.17	0.113
67.02	6.80	9.38	16.51	2.07	0.108
70.43	6.67	9.78	16.86	5.02	0.116
72.53	8.38	9.99	16.89	1.52	0.108
77.98	7.21	10.58	16.80	2.10	0.114
80.95	6.16	10.14	16.68	2.19	0.118
82.22	6.33	9.62	16.50	7.06	0.120
84.75	7.36	9.55	16.73	5.63	0.115
87.27	4.00	10.15	16.33	6.75	0.116
89.80	6.47	8.50	16.25	1.20	0.114
92.32	4.98	9.49	16.64	11.33	0.121
97.78	6.67	9.31	16.76	12.23	0.114
100.32	7.46	9.84	16.75	0.80	0.104
103.25	4.93	10.18	16.60	13.00	0.114
109.18	6.97	9.26	16.45		0.118

**Tableau 16 :** Pente moyenne, débit solide et granulométrie de surface mesurés en phase de redémarrage dans la partie aval du canal pour *Faible Transport*.

### 3.2.6. Conclusions

L'analyse des paramètres qui décrivent le système nous a permis de tirer deux conclusions principales :

1. **Les phénomènes locaux contrôlent la dynamique sédimentaire du système** : cette conclusion a été tirée par les observations des mécanismes de transport et l'analyse locale du comportement du système (3.2.5) ;
2. **Le système est en conditions de mobilité équivalente** : le taux et la composition du matériau injecté et transporté par le système sont les mêmes et un pavage stable s'est formé sur la surface du lit ( $D_{mp}/D_m > 2$ ).

### 3.3. Essai d'interprétation de la dynamique sédimentaire

#### 3.3.1. Introduction

Nous avons parlé jusqu'à présent de phénomènes d'érosion à une échelle locale (ou à petite échelle) et globale (ou à grande échelle).

Les phénomènes érosifs locaux ont été associés aux érosions de proche en proche alors que les phénomènes globaux ont été associés à la destruction du pavage. Le pavage se détruit dans le système par déstabilisation d'un seuil ou par la production d'une nappe de charriage. Ces deux phénomènes sont différents.

Le système est en conditions de mobilité équivalente (Parker et Klingemann, 1982). Afin de comprendre comment la mobilité équivalente se réalise, nous nous fixés deux objectifs principaux d'analyse :

1. La compréhension de l'influence des différentes morphologies observées sur la dynamique du système ;
2. La compréhension de l'échelle spatiale et de la fréquence à laquelle se produisent les phénomènes érosifs mesurés.

#### 3.3.2. Echelles spatiales et temporelles des phénomènes érosifs observés dans le cas de l'expérience à « Faible Transport »

Pour chaque tronçon du canal, nous avons mesuré la pente entre le début du tronçon et la sortie du canal. Cette pente est noté  $S_{if}$  (Eq. 51).

$$S_{if} = \frac{h_i - h_f}{L_{if}} \quad (51)$$

Où :

- $h_i$  [m] est la côte du lit mobile mesurée au niveau de la jauge  $i$  ( $i$  varie entre 1 en amont et 6 en aval) ;

- $h_f$  [m] est la cote du point fixe en sortie du canal ;
- $L_{if}$  [m] est la longueur de la partie du canal comprise entre la jauge  $i$  et le point fixe  $f$ .

Les différentes distances  $L_{if}$  [m] ont été reportées dans le Tableau 6 (voir Chapitre 2, paragraphe 2.4.2).

Cette méthode d'analyse nous a permis de visualiser la propagation des érosions vers l'aval et les parties du canal responsables de chaque pic de débit solide. A partir de ces mesures, nous en avons déduit l'échelle spatiale associée à chaque phénomène érosif.

Nous avons pu distinguer trois familles. A chaque famille a été associée une intensité de transport (débit solide), une échelle spatiale (longueur de la partie du canal concernée par l'érosion) et un mécanisme physique responsable de l'érosion. Les caractéristiques de ces trois familles sont reportées dans le Tableau 17.

Longueur [m]	Débit solide	Mécanisme d'érosion
Erosion à petite échelle $L = 20 - 50$ cm.	10 - 40 g/s (c'est-à-dire environ 7 fois le débit d'alimentation solide)	Erosion par instabilité associée à la destruction d'un seuil dans le système. Mode de transport de « proche en proche ».
Erosion à moyenne échelle $L = 150 - 250$ cm.	$40 \text{ g/s} < Q_s < 70 \text{ g/s}$	Erosion produite par la déstabilisation d'un seuil qui stabilisait une partie de lit pavé.
Erosion à grande échelle $L = 520$ cm	$Q_s > 70 \text{ g/s}$	Erosion progressive par instabilité du pavage – nappe de charriage.

**Tableau 17** : Famille des pics mesurés dans le cas de l'expérience à « *Faible Transport* »

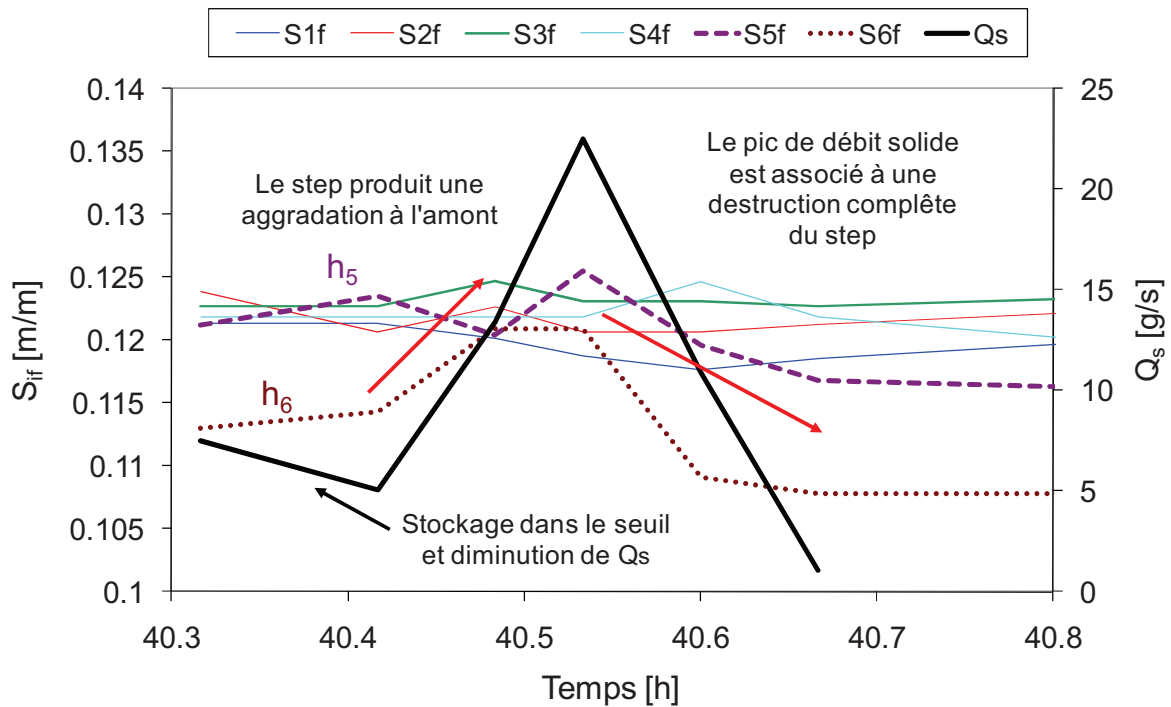
### Erosion à « petite échelle » - Seuils

La première famille d'érosions est celle des érosions de proche en proche (Figure 68). Ces érosions sont produites par la déstabilisation d'une structure « seuils » dans le canal (*PHASE I* d'aggradation).

Les débits solides que nous avons mesurés sont compris entre 2 fois (12 g/s) et 7 fois (40 g/s) le débit d'équilibre dynamique pour le système. Ces valeurs montrent le rôle significatif joué par ce mécanisme d'érosion dans l'échange de sédiments.

L'échelle spatiale de la zone intéressée par l'érosion est inférieure au mètre et, donc, inférieure à la résolution de mesure (Tableau 6). L'échelle spatiale de ce phénomène a donc été mesurée directement dans le canal.

L'exemple reporté sur la Figure 68 représente les effets d'un seuil s'étant produit à l'aval de la jauge 6 du canal, dans la zone  $S_{6f}$ . La présence du seuil produit en amont une aggradation locale.



**Figure 68 :** Exemple d'érosion par instabilité locale d'un seuil au cours de l'expérience *Faible Transport* ;  $h_5$  et  $h_6$  représentent la cote du lit au niveau des jauges 5 et 6 respectivement.

L'aggradation est progressive dans la direction aval-amont. La cote du lit au niveau des jauges 6 (d'abord) «  $h_6$  » et 5 (ensuite) «  $h_5$  » augmente. La destruction du seuil produit un pic de débit solide. Les parties du canal concernées par le phénomène d'aggradation s'érodent soudainement. Plus à l'amont, ( $S_{1f}$ ,  $S_{2f}$ ,  $S_{3f}$ ,  $S_{4f}$ ) le système ne semble pas participer à l'érosion (et au pic de  $Q_s$ ) mesurée à l'aval.

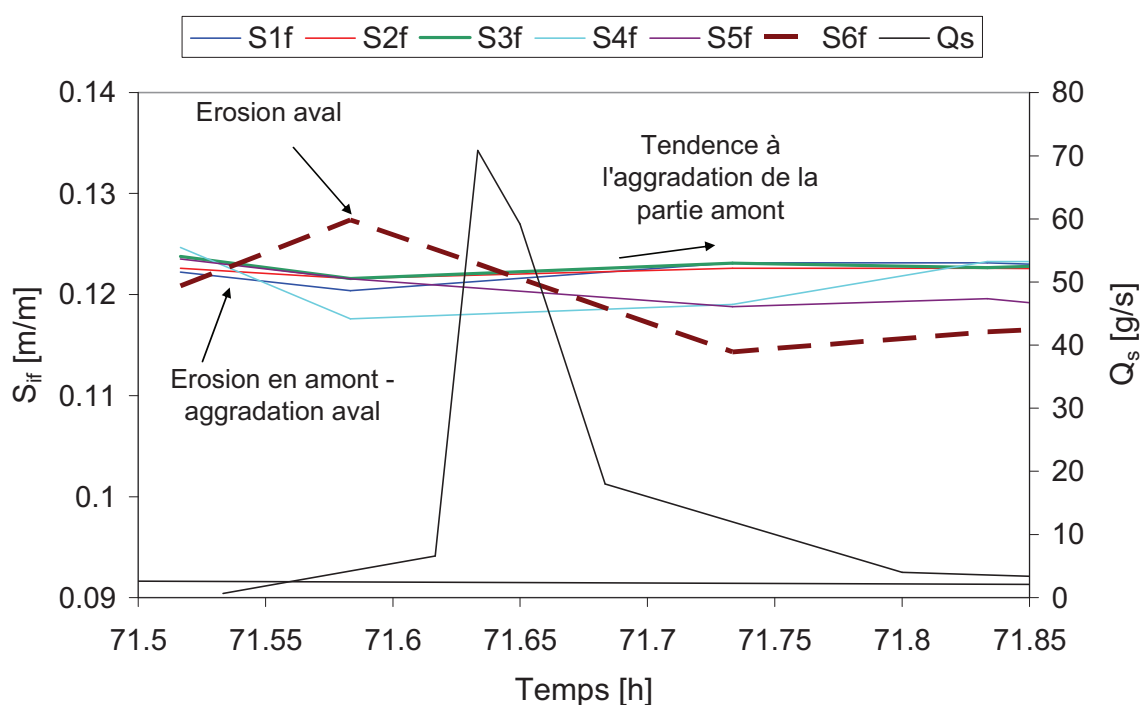
Le phénomène décrit est local, à petite échelle. L'exemple veut montrer la difficulté d'estimer par des mesures (de débit et de pente) la dynamique des érosions de proche en proche. La difficulté augmente si l'on considère que ces mécanismes se produisent à une échelle spatiale inférieure (de l'ordre de 20 – 50 cm) à l'échelle de mesure (de l'ordre de 1 m).

### Erosion à « moyenne échelle »

La deuxième famille d'érosions ne concerne pas le canal dans toute sa longueur mais seulement en partie. Ces érosions sont normalement associées à la déstabilisation d'une partie de canal comprise entre deux seuils (Figure 56) (*PHASE II* d'aggradation). La longueur spatiale de la partie de canal concernée a été évaluée entre 150 et 250 cm.

Les pics de transport associés ont une intensité assez élevée (environ 10 fois le débit d'alimentation solide) et une durée d'environ 10-20 minutes. La Figure 69 montre que le pic

de débit solide est associé seulement à la partie aval du système ( $S_{6f}$ ) alors que la partie amont ( $S_{1f}$ ,  $S_{2f}$ ,  $S_{3f}$ ,  $S_{4f}$ ) ne semble pas perturbée par l'érosion, mais subit, au contraire, une légère aggradation (augmentation de la pente dans le temps).



**Figure 69 :** Propagation d'une érosion produite en aval et de forte intensité. La longueur caractéristique du phénomène érosif est équivalente à la longueur du canal.

L'augmentation de la pente locale de la partie aval ( $S_{6f}$ ) se produit jusqu'à une pente maximale et est suivie d'une érosion de longue durée. Cette érosion est associée à la production d'une nappe de charriage dans le système et le pic de transport enregistré est important (environ 70 g/s).

### Erosion à « grande échelle »

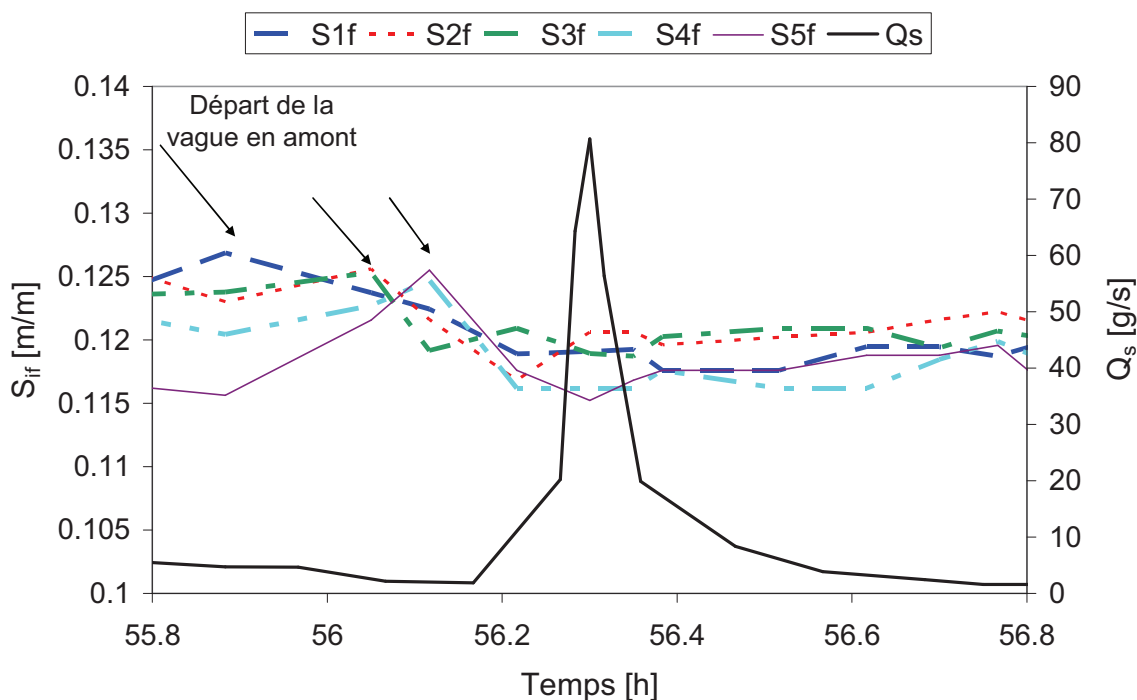
Ces érosions (voir exemple sur la Figure 70) peuvent concerner le canal dans sa totalité et ont une intensité forte, pouvant atteindre environ 15 fois le débit d'alimentation solide, et une durée longue (environ 30 minutes). Une nappe de charriage peut se produire en tête du canal quand le pavage de surface se forme sur une longueur proche de celle du canal (*PHASE III*). Les érosions permettent alors à la plupart des sédiments fins, stockés dans le système, d'être libérés et transportés en aval.

La vague de sédiments produite par l'érosion affecte le lit sur toute sa longueur mais n'en change pas sa morphologie, comme en témoignent les profils granulométriques de la surface du lit (Figure 65).

Sur la Figure 70, nous avons reporté un exemple d'érosion à grande échelle. Toutes les parties du système semblent concernées par le phénomène érosif. Les flèches noires indiquent que la



vague a été produite en amont. Au cours de sa propagation, elle déstabilise les parties situées en aval.



**Figure 70** : Propagation d'une érosion produite en amont et de forte intensité. Phénomène d'érosion à l'échelle du canal dans le cadre de l'expérience *Faible Transport*.

### 3.3.3. Analyse quantitative des familles d'érosions observées

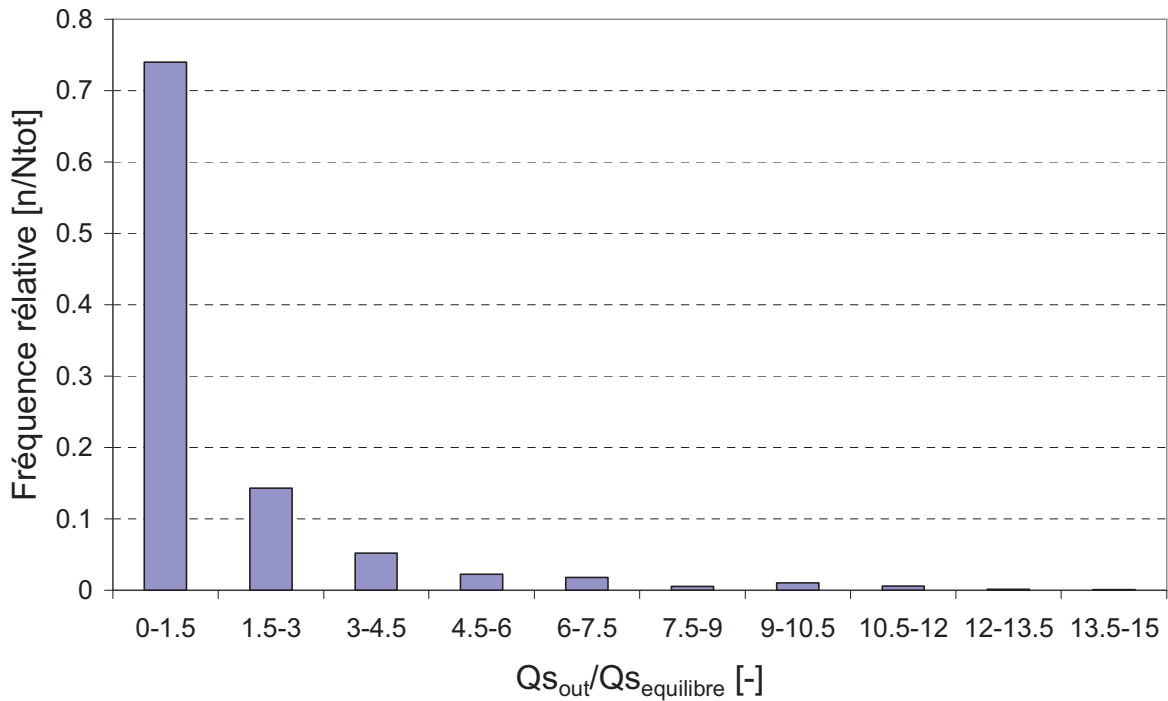
Nous avons choisi d'analyser la fréquence relative du rapport  $\frac{Q_{s_{out}}}{Q_{s_{equilibre}}}$  des débits mesurés en

sortie du canal au cours de l'expérience «  $Q_{s_{out}}$  » par rapport au débit solide d'équilibre dynamique «  $Q_{s_{equilibre}}$  » (Figure 71). Les résultats de l'analyse montrent que 95 % des érosions observées sont dans la gamme  $0 < \frac{Q_{s_{out}}}{Q_{s_{equilibre}}} \leq 6$ , ce qui implique que 95 % des

érosions mesurées en sortie du canal ont une intensité inférieure à 40 g/s correspondant donc à des mécanismes de proche en proche.

De ce fait, statistiquement, les mécanismes d'érosion de « proche en proche » de faible intensité et haute fréquence, associés à la destruction de seuils, sont le mode principal de transport.

Cette analyse quantitative et l'analyse des mécanismes de transport nous permettent de conclure que, pour l'expérience à *Faible Transport*, la mobilité équivalente se réalise par des érosions à petite échelle et à haute fréquence (Figure 71), associées à la formation et à la destruction de seuils dans le système. Deux autres familles d'érosion, à moyenne et à grande échelle, à faible fréquence, et associée à des phénomènes de destruction du pavage, permettent la redistribution massive des sédiments fins dans le système.



**Figure 71 :** Fréquence relative du rapport  $Q_{s_{out}}/Q_{s_{equilibre}}$  calculé dans l'expérience à « *Faible Transport* ».

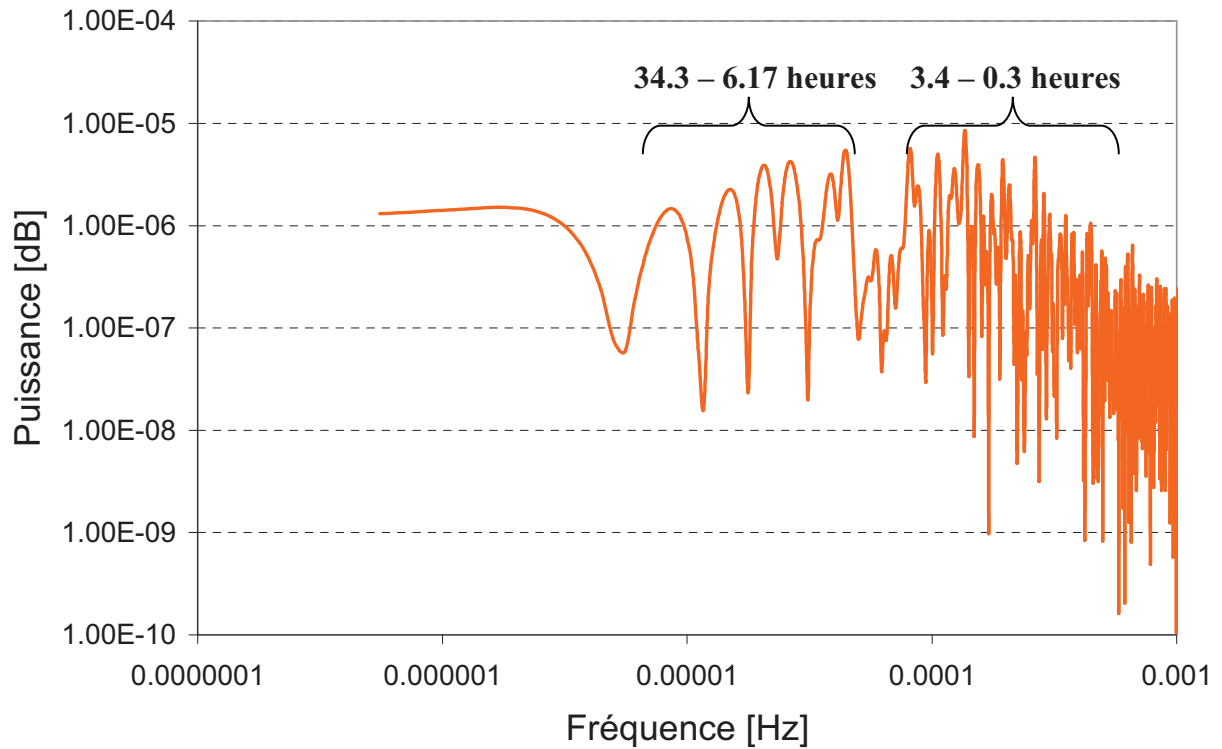
### 3.4. Application du modèle à compartiments à l'expérience « Faible Transport »

Le système étant à l'équilibre, nous pouvons chercher à utiliser le modèle par compartiments comme instrument d'analyse.

Pour l'application du modèle par compartiments, il faut tout d'abord isoler les fréquences principales du signal de pente moyenne du système. Pour ce faire, nous avons choisi d'adopter l'analyse de Fourier. L'intérêt de cette approche est de quantifier, à l'aide d'un estimateur non biaisé, les principales périodes de fluctuation. Le spectre du signal a été reporté sur la Figure 72.

Plusieurs pics sont observés dans le plan de Fourier pour le signal de pente moyenne  $S_o(t)$ . Les pics du signal sont bien marqués et peuvent être partagés en deux catégories, chacune comprise entre 6.17 et 34.3 heures et entre 0.3 et 3.4 heures.

Chaque pic correspond à une famille d'érosions, représentée par une période caractéristique.



**Figure 72 :** Analyse du signal de pente moyenne dans l'expérience à *Faible Transport*.

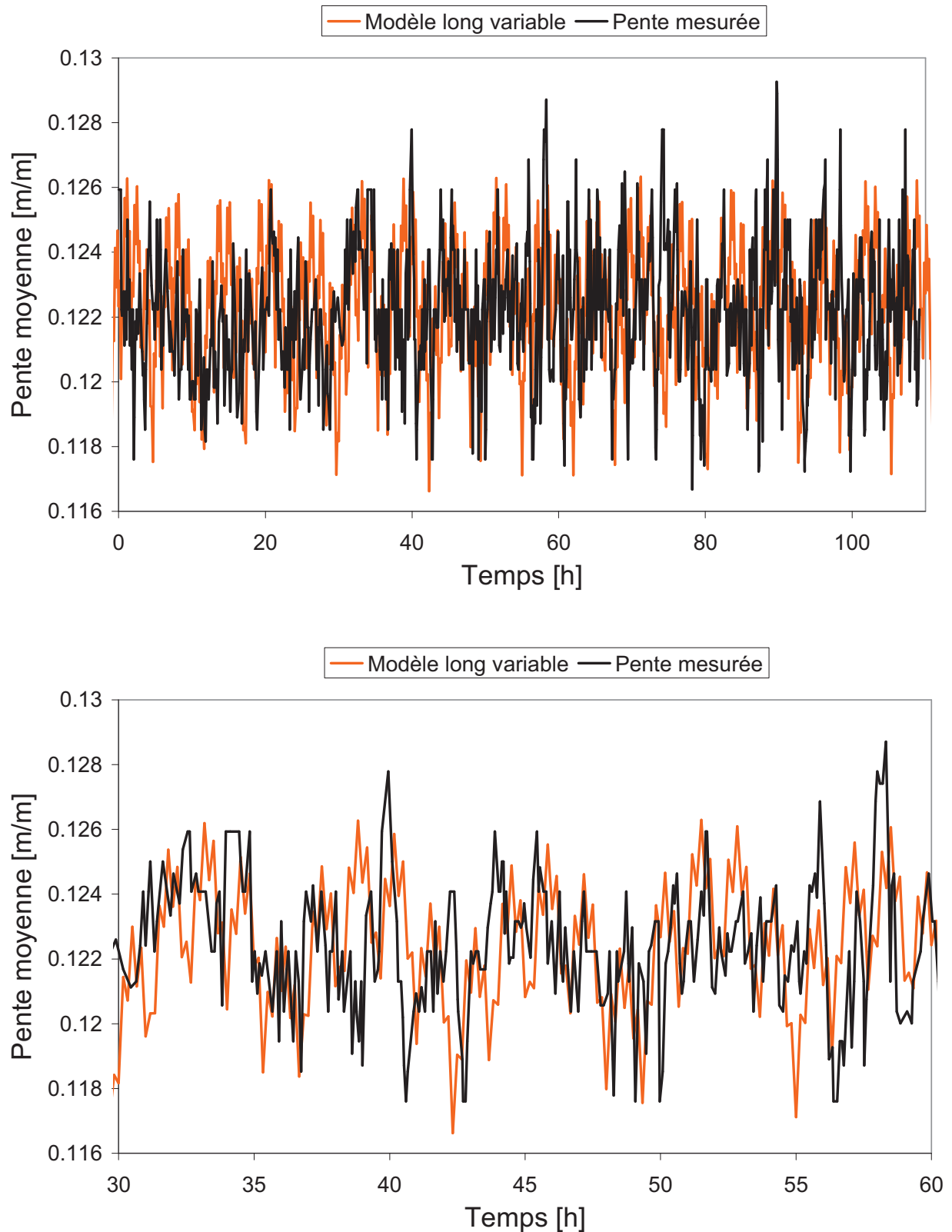
Sur la base de la formulation du modèle par compartiments (Recking, 2006), chaque compartiment devrait être à la base des fréquences principales de fluctuation du signal global.

Par conséquent, à chaque compartiment nous avons associé une période caractéristique (issue de l'analyse de Fourier) qui augmente avec l'ordre du compartiment (Recking, 2006).

	Compartiment 1	Compartiment 2	Compartiment 3	Compartiment 4
$L_{\text{comp}}$ [m]	0.87	2	2	0.53
Phase [rad]	0	0.3	0	0
T [min]	20	84	378	1025
Couche charriée moyenne [cm]	7.2	8	7.5	7.2

**Tableau 18 :** Paramètres du modèle par compartiment dans l'expérience *Faible Transport* ; la couche charriée est le produit entre  $A_f$  (du compartiment) et  $L_{\text{comp}}$  (du compartiment).

On a joué sur les autres paramètres (longueur de chaque compartiment et phase) pour ajuster le modèle sur le signal de pente réel (Tableau 18). Les résultats ont été reportés sur la Figure 73.



**Figure 73 :** Comparaison entre la pente mesurée au cours de l'expérience et la pente calculée avec le modèle par compartiments.

L'écart entre les données expérimentales et les résultats de la simulation numérique n'est pas négligeable (Figure 73).

Les différences sont liées à deux aspects :

1. l'importance des mécanismes locaux qui sont responsables d'érosions à haute fréquence de proche en proche ;
2. les nappes de charriage qui, lorsqu'elles se produisent, ont une influence locale. De ce fait, il n'y a pas d'influence directe des érosions amont sur le comportement du compartiment juste en aval de celui où il y a eu l'érosion ; cette condition est nécessaire pour retrouver un fonctionnement par compartiments.

Ce résultat tend à confirmer que la dynamique de transport se fait de « proche en proche » et n'est pas une dynamique par « compartiments ».

### **3.5. Conclusion Générale pour l'expérience à « Faible Transport »**

Cette expérience a montré que, malgré des conditions bien en dessous des conditions critiques de transport pour la plupart des diamètres du mélange, et malgré un pavage persistant de la surface du lit, la totalité des sédiments injectés est efficacement transportée sur la longueur du canal et un équilibre dynamique est atteint. Le système est en conditions d'égale mobilité.

Cette condition n'est pas associée au développement d'une couche de charriage continue et identifiable, comme c'est souvent le cas pour le transport de gravier.

Par ailleurs, on assiste plutôt à une lente translation amont-aval du lit par des micro-érosions se manifestant de proche en proche. Suite à une érosion au pied d'un seuil, les sédiments fins qui étaient temporairement stockés sont libérés et se propagent en aval, avant d'être progressivement enfouis sous le nouveau pavage en formation. La destruction des seuils est le mécanisme principal qui permet la redistribution des sédiments fins dans le système.

L'importance des phénomènes locaux sur la dynamique du système se traduit par un manque de corrélation (globale et locale) entre la pente, le débit solide et la granulométrie de surface.

Néanmoins, le lit développe d'autres formes (pavage de surface et nappes de charriage) responsables d'érosions à échelle plus grande. Ces mécanismes d'érosions ont un impact majeur en termes de redistribution des fractions granulométrique dans le système mais sont observés avec une faible fréquence (typiquement inférieur à 5 %, Figure 71) dans le système.

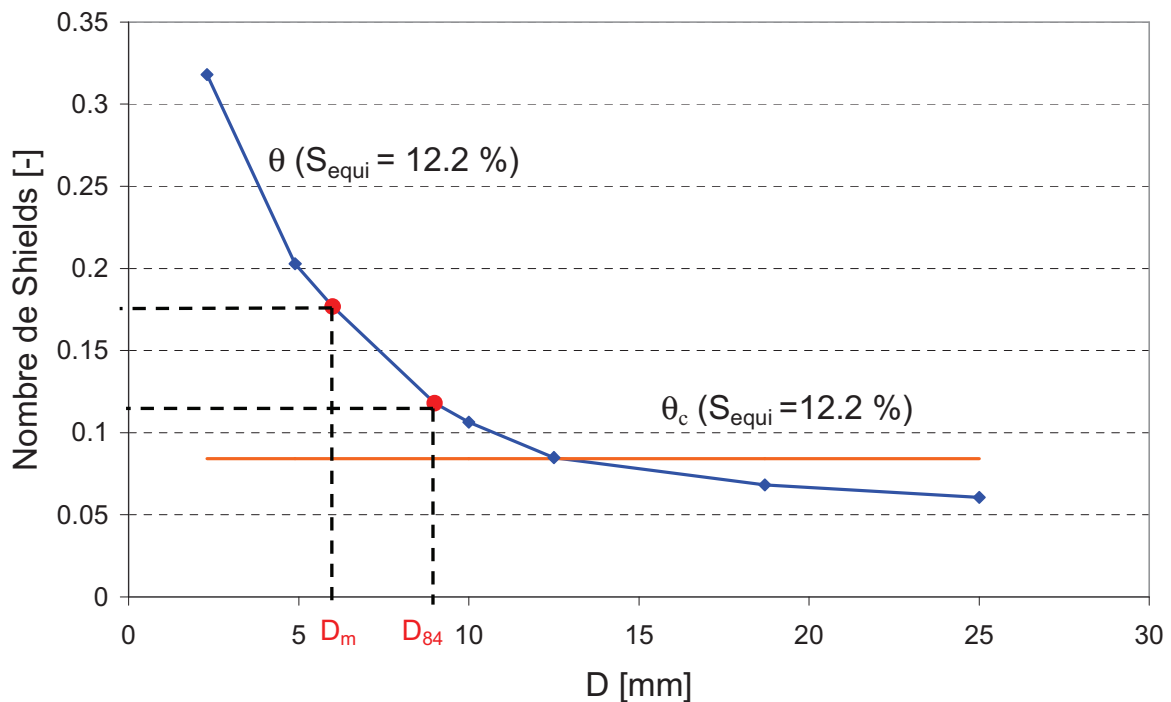
#### 4. CHAPITRE 4 : EXPERIENCE A FORT TRANSPORT

L'expérience à *Fort Transport* est une expérience longue. Elle a été réalisée pour un système à forte pente et pour des conditions de mobilité du mélange granulaire dans la gamme  $1 < \theta_{84}/\theta_c < 2$  (Tableau 19).

	$Q_l$ [l/s]	$Q_s$ [g/s]	$S_{eq}$ [m/m]	$U_{moy}$ [m/s]	$\theta_{84}/\theta_c$ [-]	$T$ [h]
<i>Fort Transport</i>	0.55	60	0.122	0.375	1.37	92

**Tableau 19 :** Conditions de l'expérience à *Fort Transport*.

Les paramètres hydrauliques (Tableau 19, Figure 74) ont été calculés avec les modèles de frottement et mise en mouvement proposés par Recking et al. (2008b), la pente d'équilibre dynamique du système et le  $D_{84}$  du mélange d'alimentation.



**Figure 74 :** Mobilité du mélange granulaire pour l'expérience à *Fort Transport* calculée avec les lois de frottement et mise en mouvement ;  $D_m$  et  $D_{84}$  sont référés au mélange d'alimentation.

Le diamètre pour lequel commence la mise en mouvement dans ces conditions hydraulique est de 12.5 mm. Les matériaux les plus fins du mélange se trouvent au-dessus du seuil de mise en mouvement (notamment  $\theta_{84}/\theta_c > 1$ ) alors que les éléments les plus grossiers du mélange ( $D_{max}$ ) se trouvent en dessous du seuil de mise en mouvement ( $\theta_{D_{max}}/\theta_c < 1$ ).

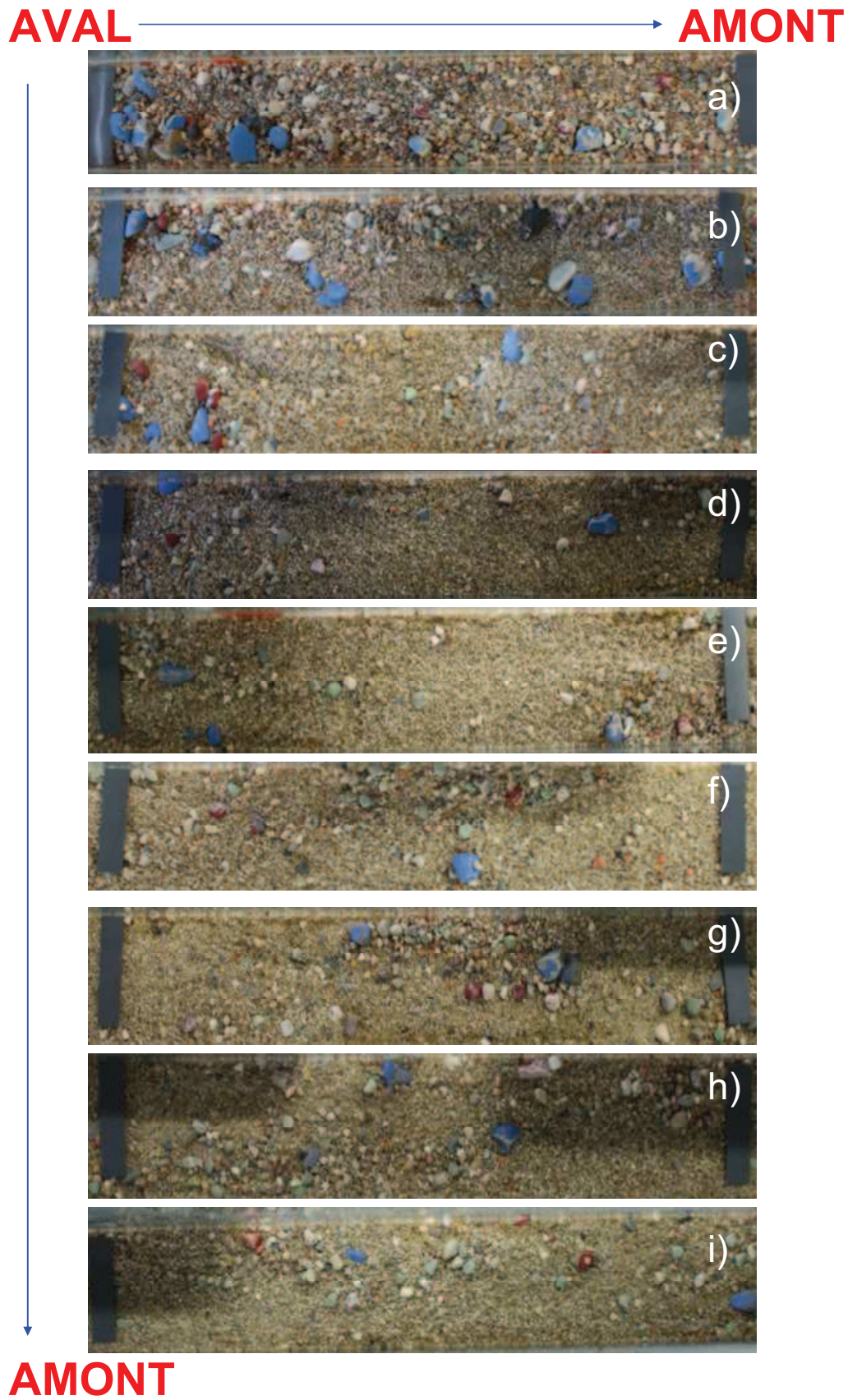
Les observations visuelles du comportement du système, les résultats des mesures expérimentales et leur interprétation seront présentées au cours de ce chapitre.

#### **4.1. Observations expérimentales**

Dans l'expérience « *Fort Transport* », le transport solide est très intense et se produit de façon « continue » au cours de toute l'expérience. Des érosions fréquentes associées à la formation/destruction du pavage local sont observées. Ces érosions sont le résultat d'un tri granulométrique très efficace qui se manifeste par la production et la propagation de nappes de charriage dans le système. Ces phénomènes semblent étroitement corrélés aux transformations morphologiques du lit ainsi qu'aux fluctuations de transport et de pente mesurés pour le système.

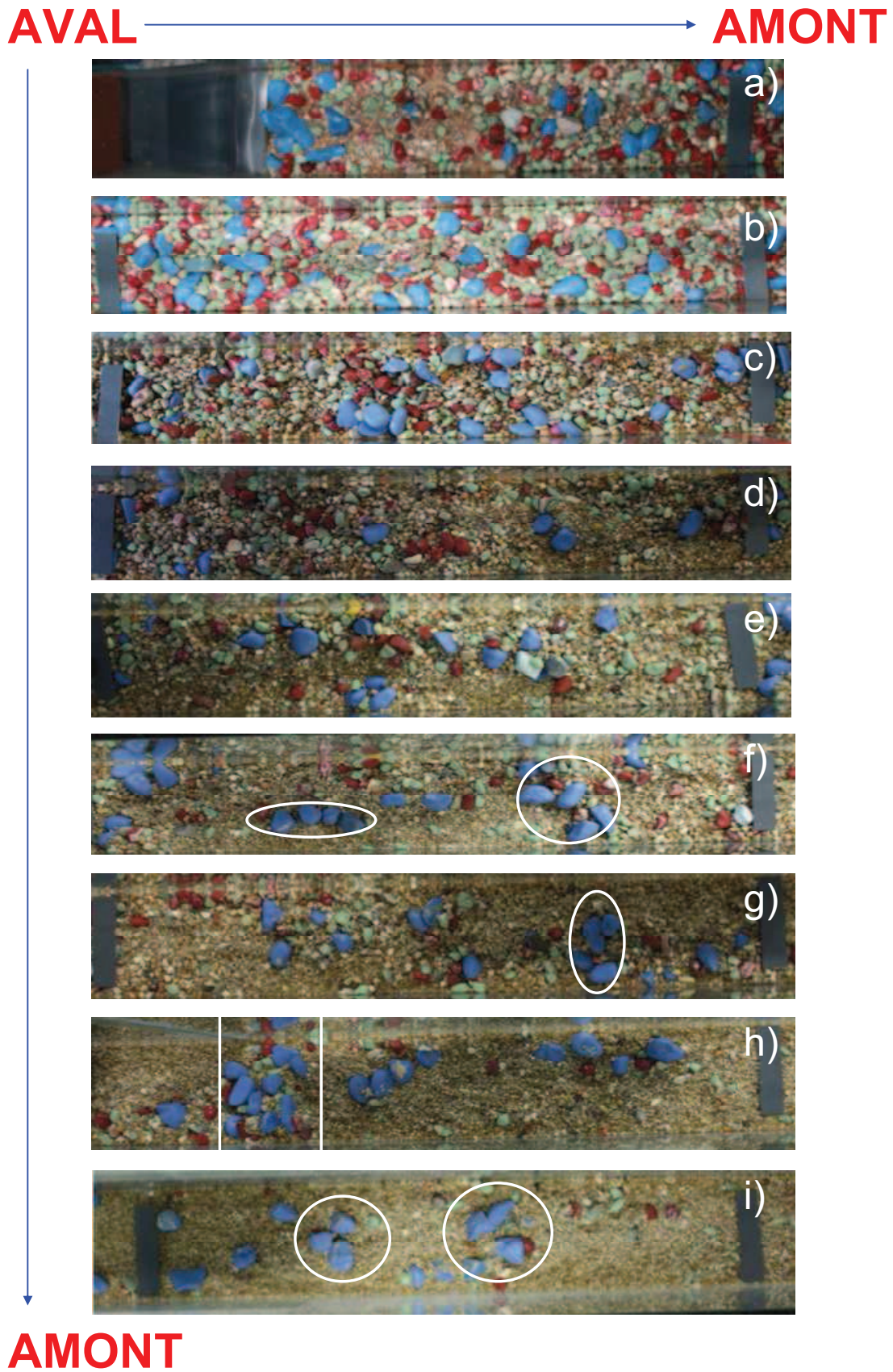
Similairement à d'autres études (Iseya and Ikeda, 1987b; Kuhnle and Southard, 1988a; Recking, 2006; Recking et al., 2009) le système fluctue entre deux pentes extrêmes (maximum et minimum) et trois « phases » ou « états » ont pu être observés de façon périodique (Figure 75) :

- 1) un lit plat composé de particules fines au cours d'un processus d'érosion long qui affecte le canal sur toute sa longueur (Figure 75) ;
- 2) un lit complètement pavé à forte pente à la fin d'une phase d'aggradation (Figure 77) ;
- 3) un lit de transition (Figure 76) caractérisé par la présence de structures similaires aux « step-pools » ou aux « bed clusters », par la production de nappes de charriage à différents endroits du canal et par un lit localement pavé.

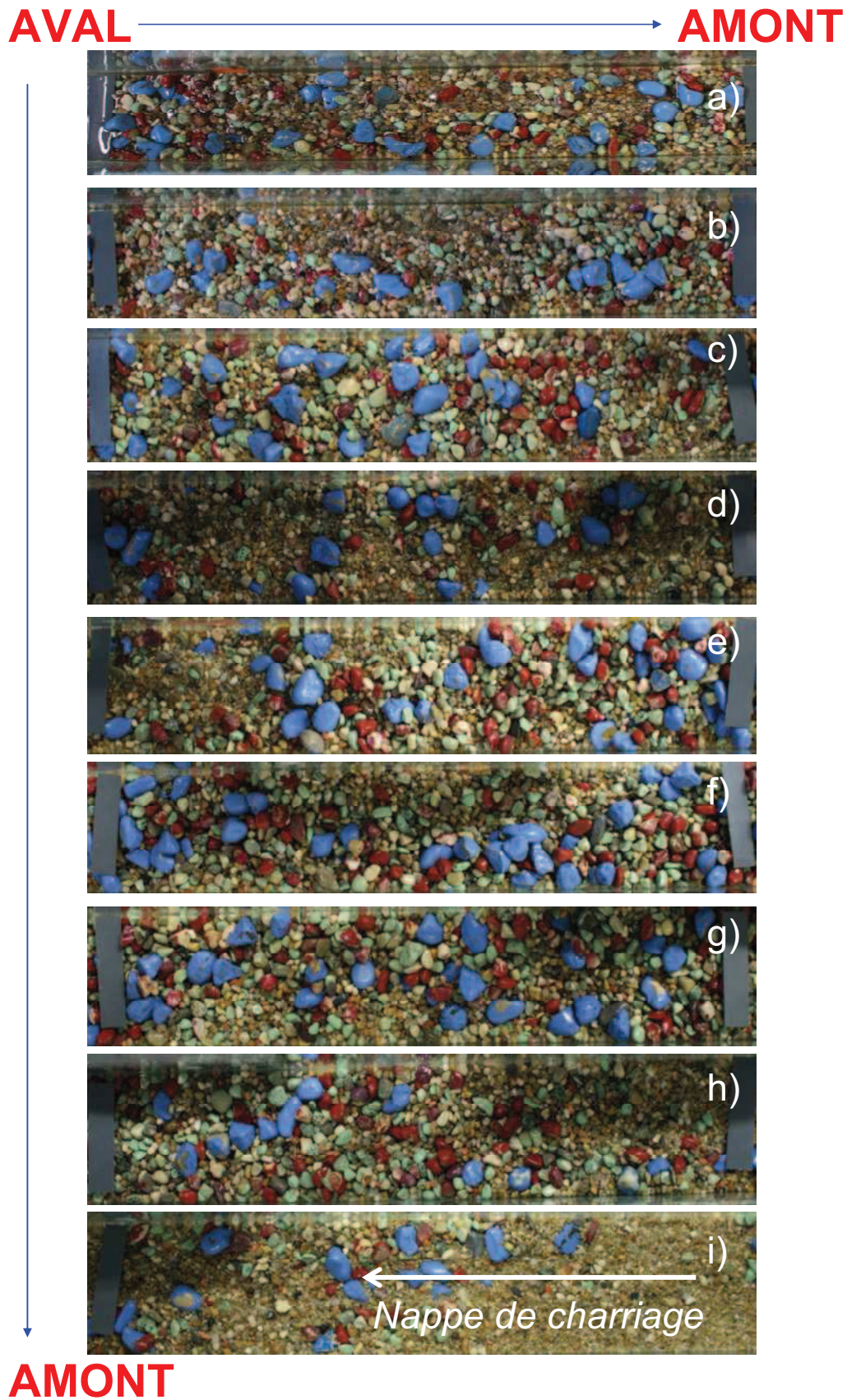


**Figure 75** : Exemple de lit érodé dans l'expérience « *Fort Transport* ».





**Figure 76 :** Exemple de lit de transition (bed clusters et step-pools).



**Figure 77** : Exemple de lit pavé à forte pente ; i) dans la section amont une nappe de charriage commence à se produire.

Quand le lit est complètement pavé, les éléments fins ont disparu de la surface du lit et le transport solide à la sortie du système est presque nul. La pente globale du système est forte et l'écoulement est uniforme et bidimensionnel. Un phénomène érosif très intense et de longue durée est rapidement observé une fois que le système a atteint cette condition. L'érosion du canal est associée à la production et à la propagation d'une nappe de charriage à l'amont du système.

Le période de « transition » (Iseya and Ikeda, 1987b; Recking et al., 2009) (Figure 76) est, quant à elle, très longue. Elle caractérise le système la plupart du temps. Pendant cette période, le lit présente localement des morphologies très différentes. On observe des zones d'aggradation (*a, b, c* de Figure 76) et d'érosion locale (*i, h* de Figure 76). Les nappes de charriage se produisent localement à différents endroits du canal. Le lit présente alternativement des bed-clusters et des step-pools dans la direction longitudinale (voir *f, g, h, i* sur la Figure 76). Ces structures sont éphémères et ont un faible impact sur la morphologie du lit (en termes d'influence sur la pente locale). Cependant, comme pour l'expérience « *Faible Transport* », les bed-clusters semblent à la base de la formation des step-pools et par conséquent d'un pavage local. Les step-pools, dans l'expérience « *Fort Transport* », pourraient avoir le même rôle que les antidunes observées au cours d'*Essai1* et *Essai2* dans le processus de reconstruction du pavage local (et global) après une phase d'érosion (Recking et al., 2009).

Les step-pools ont des dimensions réduites par rapport à ceux observés dans l'expérience « *Faible Transport* » (Figure 78). Généralement, ils sont instantanément détruits après leur formation, à cause de la propagation en continu des nappes de charriage dans le système ; dans ce cas, le lit devient localement érodé et composé de particules fines.



**Figure 78** : Exemple de structure step-pool observé dans l'expérience « *Fort Transport* »

La production de nappes de charriage semble plus fréquente dans la partie amont, proche de l'alimentation solide. Ces formes de fond sont fondamentales pour l'échange de sédiments dans le système. Elles semblent être le facteur clé pour expliquer les évolutions morphologiques observées (Recking et al. 2009). Les nappes de charriage sont produites quand le système atteint localement (ou globalement) une pente d'équilibre, suite à un tri granulométrique (enfouissement des sédiments fins et formation du pavage en surface) très efficace (Recking, 2006). Pendant sa propagation, la nappe de charriage déstabilise localement le lit pavé en aval de la zone de départ (par impact du front de propagation de la nappe sur les sédiments grossiers qui composent le pavage) permettant ainsi un enfouissement progressif des sédiments fins et donc une réduction de leur intensité au fur et à mesure de leur

transfert vers l'aval. Les sédiments grossiers qui composent le pavage se déplacent à grande vitesse sur un lit composé de particules fines ; par conséquent, quand une nappe de charriage se produit en aval, un pic de sédiments grossiers est mesuré juste avant le pic de sédiments fins (voir paragraphe 4.3.1). L'amplitude des pics de transport enregistrés dépend de la partie du canal ayant été touchée par l'érosion.

Les fluctuations périodiques du système sont très similaires à celles déjà décrites par ailleurs (Recking, 2006, Recking et al. 2009) :

- 1) après une érosion globale du système sur toute la longueur du canal, le lit est complètement plat ;
- 2) on observe la formation de bed-clusters et step-pools sur toute la longueur du canal ; ces micro et macroformes se forment et se détruisent à haute fréquence à cause de la production de nappes de charriage dans le système ;
- 3) la formation et la destruction des seuils est à la base de la formation d'un pavage local ; un pavage à forte pente se forme et se détruit localement produisant les nappes de charriage et des profils de pente très contrastés. Les éléments fins sont redistribués dans le système au cours de la propagation des nappes de charriage. La morphologie du lit est très hétérogène avec alternativement un lit plat, pavé et des micro ou macroformes (Figure 76) ;
- 4) sur le long terme, un pavage de surface à forte pente se forme sur toute la longueur du canal ;
- 5) la production d'une nappe de charriage en tête de canal est à la base de la destruction complète du pavage et le cycle recommence.

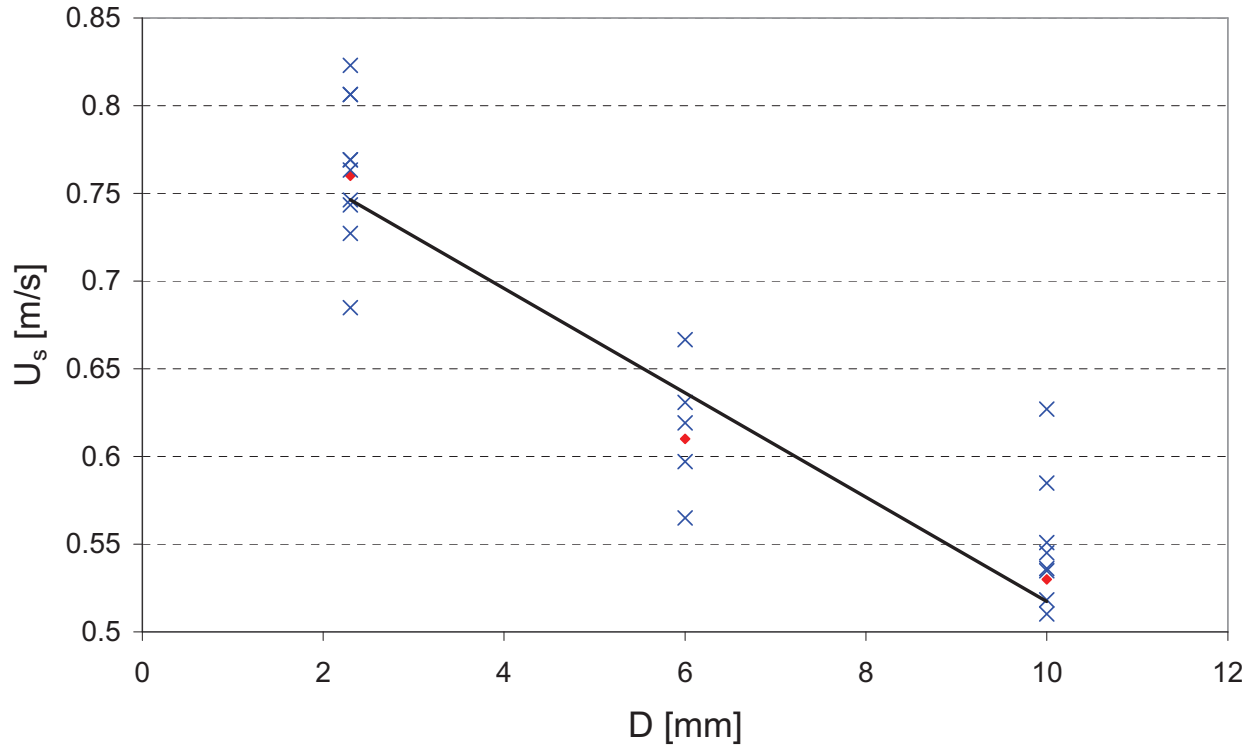
## 4.2. Analyse des résultats

### 4.2.1. Hydraulique du système

Les mesures de vitesse de surface de l'écoulement ont été effectuées en parallèle à celles de granulométrie de surface. L'état du lit changeant souvent, cette procédure était nécessaire.

Les mesures de granulométrie ont été effectuées pour chaque état du lit en arrêtant l'expérience à la fin de chaque campagne de mesure de vitesse. Les résultats sont reportés dans le **Tableau 20** et sur la Figure 79.

Les résultats obtenus montrent que les fluctuations morphologiques du lit produisent des transformations profondes de l'hydrodynamique du système (Figure 79). La vitesse moyenne (sur une zone de 1 m de longueur) mesurée sur la surface du lit, avec la méthode des particules de polystyrènes, varie entre une valeur moyenne de **0.76 m/s** (au cours d'une érosion par nappe de charriage) et de **0.53 m/s** (pour un lit pavé). La vitesse de surface qui correspond à un lit de transition (bed-clusters et seuils) est d'environ **0.61 m/s**.



**Figure 79 :** Vitesse de surface de l'écoulement en fonction de la granulométrie du lit – « *Fort Transport* ».

Comme pour l'expérience « *Faible Transport* », ces mesures sont comparées aux calculs effectués avec la loi de frottement (Recking et al., 2008b). Pour les calculs, nous avons utilisé le diamètre et la pente représentative de chaque phase (**Tableau 20**).

Morphologie dominante	D [mm]	S [m/m]	U <sub>surf</sub> [m/s]	U <sub>moy</sub> [m/s]	$\frac{U_{moy,calculée}}{U_{surface,mesurée}}$ [-]
<i>Nappe de charriage</i>	2.3	0.10	0.76	0.52	0.69
<i>Seuils / Bed-Clusters</i>	6	0.122	0.61	0.37	0.61
<i>Pavage</i>	10	0.15	0.53	0.34	0.64

**Tableau 20 :** Comparaison entre vitesse la de surface mesurée  $U_{surf}$  et la vitesse moyenne calculée avec la loi de frottement  $U_{moy}$  (Recking et al., 2008b) pour les différents états du lit.

$D$  [mm] est le diamètre mesuré sur la surface à la fin de chaque campagne de mesures de vitesse.

Comme pour l'expérience « *Faible Transport* », nous préférons ne pas nous exprimer, ni sur la forme effective du profil de vitesse pendant la propagation d'une nappe de charriage, ni sur l'influence des effets de bord sur les mesures.

Si l'on suppose que la vitesse de surface de l'écoulement est égale à la vitesse moyenne (hypothèse de profil de vitesse uniforme), nous pouvons calculer les nombres de Shields et de

Froude de l'écoulement représentatifs des conditions d'équilibre dynamique ( $S_{eq}$  égale à 12.2%). Les résultats des calculs ont été reportés dans le Tableau 21 et comparés à ceux effectués avec la loi de frottement.

D [mm]	$U_{moy}$ [m/s]	Fr [-]	$\theta$ [-]	$\theta_c$ [-]	$\theta/\theta_c$
$D_{m,m}$ (6)	0.61	1.89	0.095	0.084	1.13
$D_{m,p}$ (6)	0.37	$\approx 1$	0.177	0.084	2.1

**Tableau 21** : Conditions hydrauliques mesurées (première ligne) et calculées (seconde ligne) représentatives de la condition d'équilibre dynamique pour l'expérience « *Fort Transport* ».

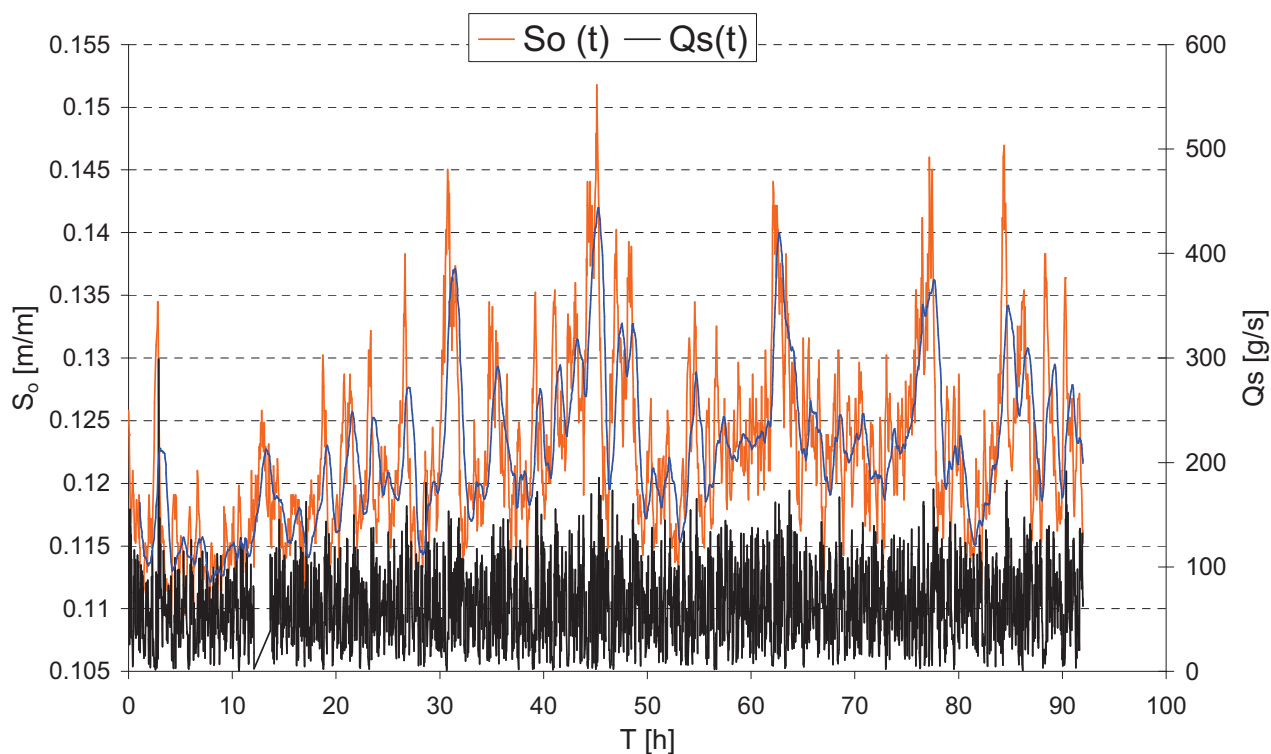
Les résultats obtenus avec les deux méthodes sont radicalement opposés. Ici encore, la vitesse de surface conduit à des nombres de Froude irréalistes. Le couplage entre la loi de frottement et la loi de transport (Recking et al., 2008b) nous a permis de quantifier, avec une très bonne précision, les conditions réelles d'équilibre dynamique pour le système (voir Tableau 9). Comme pour l'expérience *Faible Transport*, ce résultat nous conforte dans le choix de la loi de frottement pour la détermination de l'hydraulique du système.

#### 4.2.2. Pente Moyenne et Débit Solide

Pour l'expérience « *Fort Transport* » les variations cycliques de l'état du lit sont accompagnées de fluctuations très larges de la pente et du débit solide. La pente moyenne globale du système est la même que pour l'expérience « *Faible Transport* », égale à **12.2 %**, mais les valeurs extrêmes mesurées sont plus grandes. La fluctuation de la pente globale est comprise entre 0.1 et 0.145 ; ces valeurs correspondent à une amplitude de fluctuation  $A_f$  [-] de 0.045. Pour l'expérience « *Faible Transport* », nous avons mesuré une valeur de 0.013, soit environ 5 fois inférieure.

Comme pour l'expérience « *Faible Transport* » nous avons observé que l'expérience comporte une phase de démarrage d'environ 30 heures (Figure 80). Cette phase de démarrage est longue et, pourrait être associée à une phase « d'adaptation » du lit aux contraintes imposées par le système d'alimentation.

Le débit solide mesuré à la sortie du système fluctue autour d'une valeur moyenne de **60 g/s**, égale au débit d'alimentation solide. Le système est donc dans les conditions **d'équilibre dynamique**. Le débit maximal moyen mesuré est d'environ **180 g/s** alors que le débit minimal mesuré est d'environ **0.66 g/s**. Ces valeurs correspondent à un taux de fluctuation  $T_f$  [-] de **3**, et en comparaison avec l'expérience à *Faible Transport* (avec un taux de fluctuation de 11), ce résultat tend à confirmer une diminution des fluctuations de transport solide quand le rapport  $\theta/\theta_c$  augmente (Recking et al. 2009).



**Figure 80** : Pente moyenne (en orange) et débit solide moyen (en noir) mesuré à l'aide du seuil à la sortie du système pour « *Fort Transport* » ; la courbe bleu est la moyenne mobile sur dix points du signal de pente moyenne.

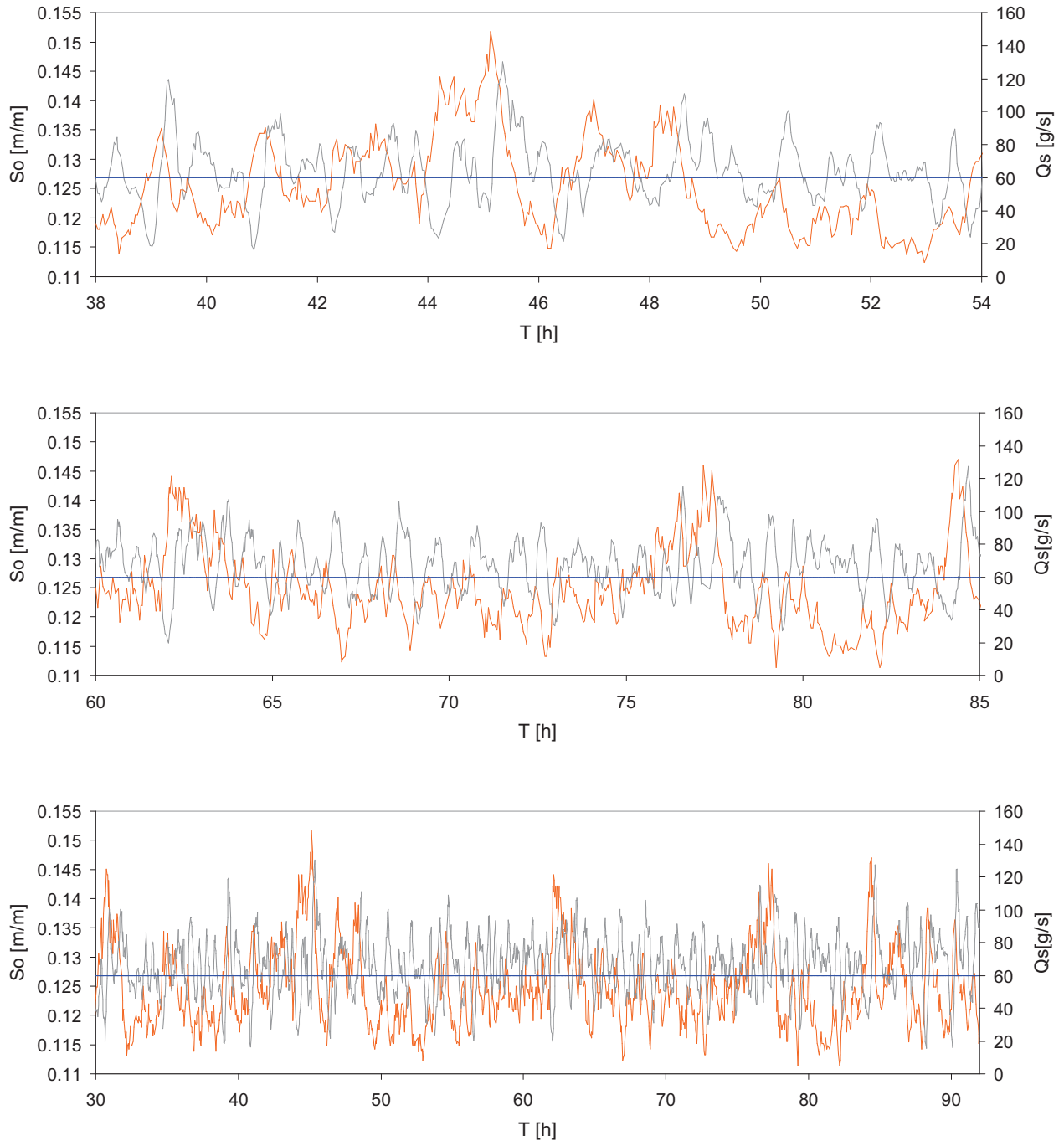
L'ensemble des résultats globaux mesurés pour l'expérience *Fort Transport* a été reporté dans le Tableau 22.

	$S_{\min}$ [-]	$S_{\max}$ [-]	$Q_{S_{\min}}$ [g/s]	$Q_{S_{\max}}$ [g/s]	$A_f$ [-]	$T_f$ [-]
<i>Fort Transport</i>	0.1	0.145	0.66	180	0.045	3

**Tableau 22** : Résultats globaux pour *Fort Transport*.

Contrairement à l'expérience à « *Faible Transport* » les signaux de pente moyenne et de débit solide mesuré à la sortie du système semblent corrélés (Figure 81) : une augmentation de la pente (aggradation) correspond à une diminution du débit solide en sortie du système alors qu'une diminution de la pente (érosion) correspond à un pic de transport solide.

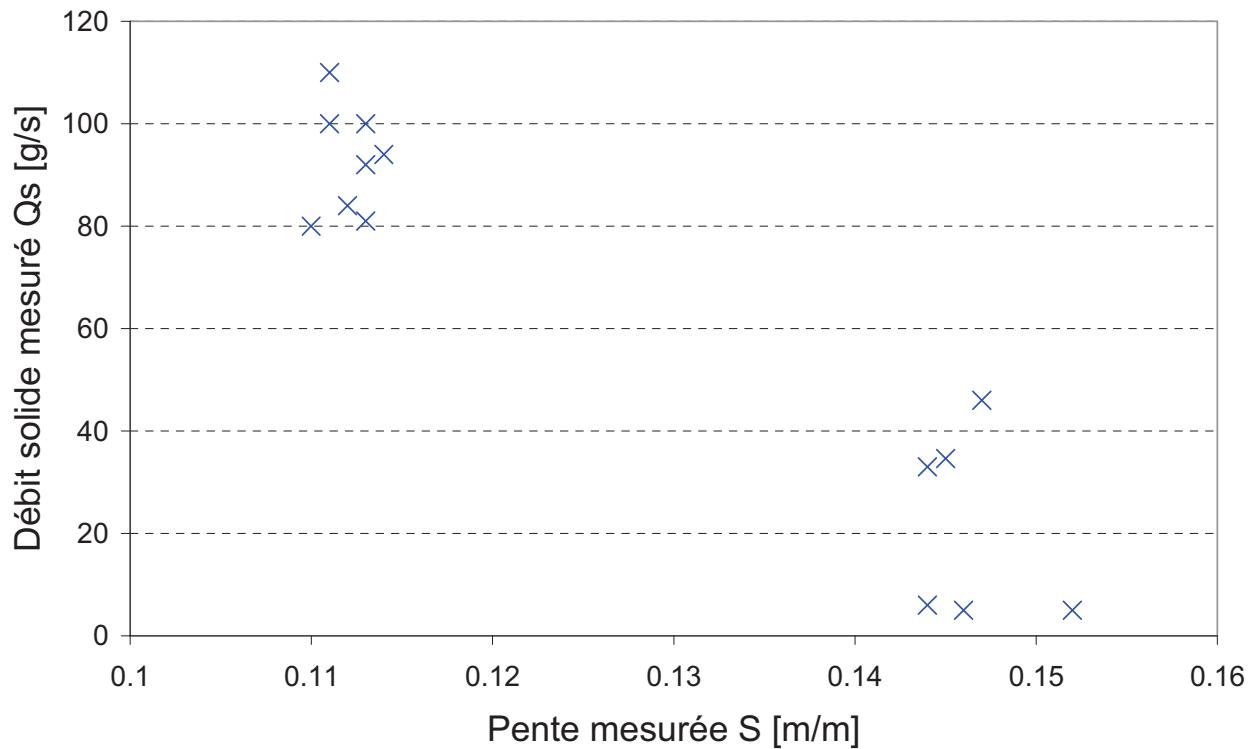
Cette corrélation est vérifiée, en général, pour toute la durée de l'expérience (Figure 81). De ce fait, forts de l'expérience à « *Faible Transport* », nous pouvons supposer que les fluctuations de débit solide peuvent être associées à des phénomènes à grande échelle (du compartiment ou du canal) et que les phénomènes locaux, de la micro à la macro-échelle (formation et destruction de bed-clusters et step-pools), ont une influence négligeable vis-à-vis du comportement global du système. Ce point sera mieux détaillé dans le paragraphe 4.3.



**Figure 81** : Pente moyenne (orange) et débit solide (gris) pour l'expérience « *Fort Transport* ». En bleu le débit solide d'alimentation du système.

La Figure 82 a été obtenue en mesurant au cours de l'expérience la valeur de débit solide qui correspond à une valeur extrême de pente moyenne du système. Nous pouvons distinguer deux groupes bien définis de débits solides. Les pics de transport solide correspondent à un lit en érosion à faible pente. Les phases d'aggradation (quand la pente est maximale) correspondent à un transport solide très faible. Ce résultat montre que les extrêmes de pente pour le système correspondent à des caractéristiques de transport complètement différentes.





**Figure 82 :** Extrêmes de pente et débit mesurés en dynamique au cours de l'expérience – *Fort Transport*.

Les mesures utilisées pour construire la Figure 82 ont été reportées dans le Tableau 23.

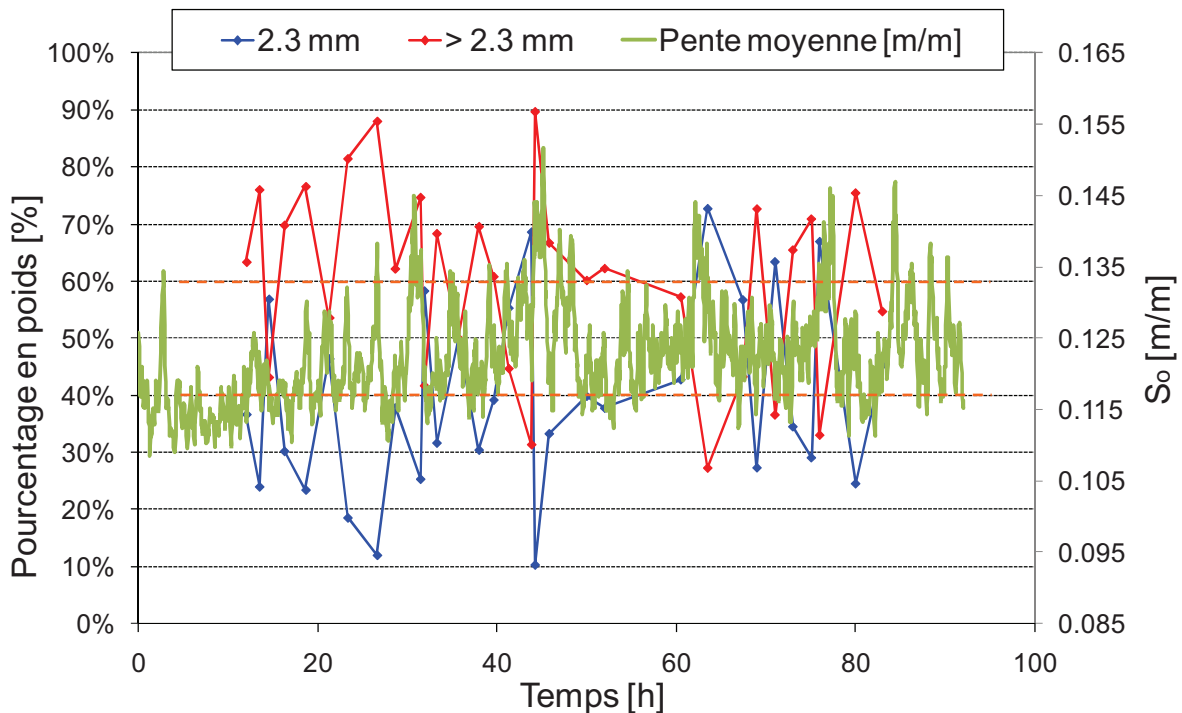
<b>T [heures]</b>	<b>S<sub>max</sub> [-]</b>	<b>S<sub>min</sub> [-]</b>	<b>Q<sub>s</sub> [g/s]</b>
27.83		0.11	80
30.75	0.145		34.63
32.2		0.113	92
44.46	0.144		33
45.13	0.152		5
52.96		0.112	84
62.13	0.144		6
67		0.113	100
68.9		0.114	94
72.75		0.113	81
77.18	0.146		5
79.25		0.111	110
82.18		0.111	100
84.4	0.147		46

**Tableau 23 :** Mesures de débit solide qui correspondent aux pentes maximum et minimum observées pour *Fort Transport*.

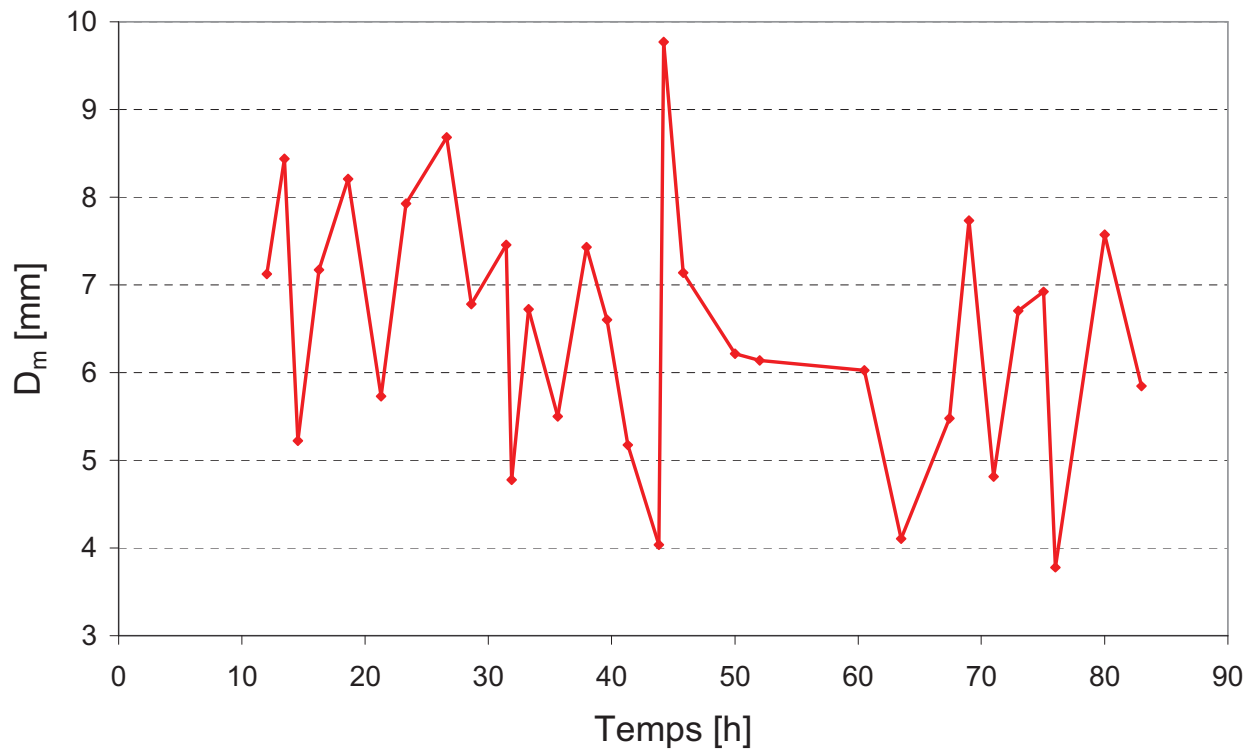
#### 4.2.3. Evolution dans le temps de la Granulométrie de Surface

Les 31 profils granulométriques de la surface du lit (chaque profil composé de 15 photos) montrent que les larges transformations de la morphologie du système sont associées aussi à des modifications de la granulométrie de surface (Figure 83). Les particules fines du mélange sédimentaire (2.3 mm) et grossières (> 2.3 mm) apparaissent et disparaissent de la surface en fonction de la phase d'évolution du système. Pour un lit de surface complètement pavé, les éléments fins occupent un minimum de 10 % de la surface du lit. Cette phase, observée périodiquement, correspond à une pente globale maximale moyenne d'environ 14.5%.

Du fait de l'évolution temporelle du lit, le diamètre moyen arithmétique du mélange varie entre 3.8 mm (pour un lit en érosion) et 10 mm (pour un lit pavé). Le diamètre moyen total de surface mesuré (moyenne des diamètres moyens mesurés pour tous les profils) est d'environ 7.12 mm (Figure 84). Cette valeur est très proche du diamètre moyen du mélange d'alimentation (égale à 6 mm).



**Figure 83 :** Evolution dans le temps du pourcentage en poids de matériaux qui composent le mélange (supérieur à 2.3 mm en rouge, et inférieur et égal à 2.3 mm en bleu) pour l'expérience « *Fort Transport* ».

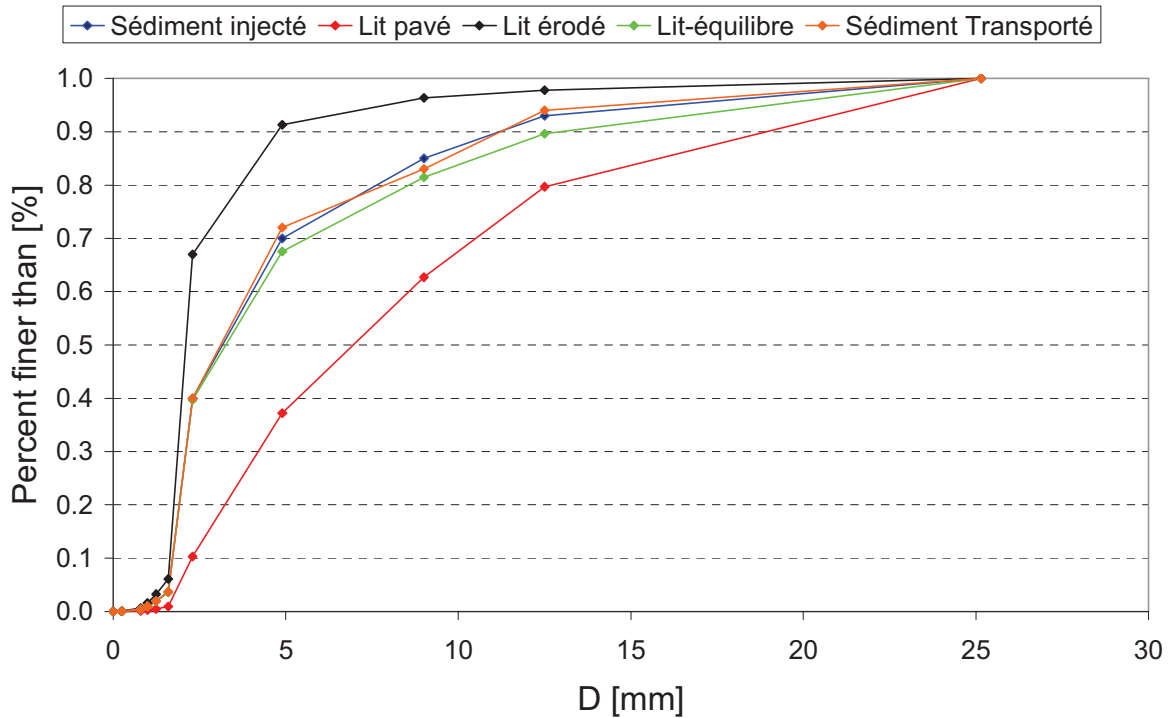


**Figure 84** : Evolution dans le temps du diamètre moyen arithmétique de la surface du lit pour l'expérience « *Fort Transport* ».

A partir des mesures par photo, nous avons pu calculer les profils granulométriques moyens représentatifs des conditions expérimentales (Tableau 24 et Figure 85).

	<b>D<sub>16</sub> [mm]</b>	<b>D<sub>30</sub> [mm]</b>	<b>D<sub>50</sub> [mm]</b>	<b>D<sub>m</sub> [mm]</b>	<b>D<sub>84</sub> [mm]</b>
<i>Lit érodé</i>	0.55	1	1.7	2.3	4
<i>Lit Equilibre</i>	1.84	2.11	3.26	7.12	10.08
<i>Lit pavé</i>	2.85	4.20	6.95	10	15.18
<i>Matériau Injecté</i>	1.83	2.13	3.16	6	9
<i>Matériau Transporté</i>	1.83	2.10	3.11	6.32	9.31

**Tableau 24** : Diamètres représentatifs des courbes granulométriques moyennes mesurées sur la surface du lit pour l'expérience « *Fort Transport* ».



**Figure 85 :** Courbe granulométrique du matériau transporté recueilli en sortie (en orange), du matériau injecté (en bleu), du lit à l'équilibre (en vert), du lit pavé (en rouge) et du lit érodé (en noir) pour l'expérience « *Fort Transport* ».

Les résultats reportés sur la Figure 85 montrent l'amplitude des changements de granulométrie de surface (et par conséquent de morphologie) du lit pour une condition hydraulique imposée.

Nos mesures nous permettent de conclure que l'équilibre dynamique, pour l'expérience *Fort Transport*, s'exprime comme une équivalence entre la composition du matériau transporté, celle du matériau injecté et celle du matériau qui, en moyenne, constitue la surface du lit.

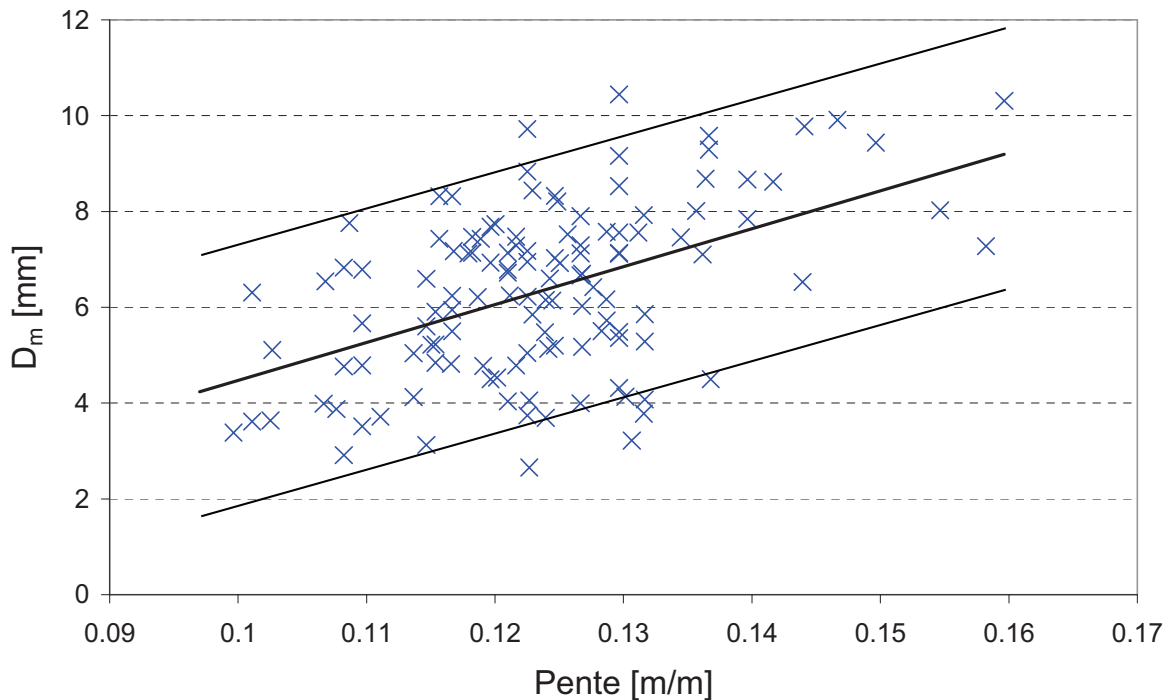
#### 4.2.4. Corrélation entre la pente, la granulométrie de surface et le débit solide

Comme pour l'expérience « *Faible Transport* », nous avons cherché à interpoler les données de pente locale et de granulométrie locale du système (représentée par le diamètre moyen arithmétique de la surface) afin d'en étudier la relation (Figure 86). Le canal a été partagé en quatre parties, exactement comme pour l'expérience à « *Faible Transport* ». Une tendance croissante entre la pente et la granulométrie de surface semble exister (Figure 86) bien que l'incertitude soit grande. Notamment, plusieurs diamètres moyens sont associés à la même valeur de pente locale.

Une incompatibilité entre l'échelle des phénomènes de transport (du compartiment ou du canal) observés et l'échelle de mesure de la granulométrie locale (échelle du compartiment) pourrait être à l'origine de la grande variation reportée dans nos mesures (Figure 86).

Par exemple, les nappes de charriage qui se déposent sur le lit (à l'arrêt de l'expérience) montrent une ségrégation longitudinale (Figure 9). La nappe de charriage est caractérisée par un front de matériau grossier en aval, suivi de sédiments fins en amont. La mesure de la

granulométrie en aval et en amont donnerait, sur deux compartiments adjacents, un lit grossier et un lit fin pour une même pente locale.

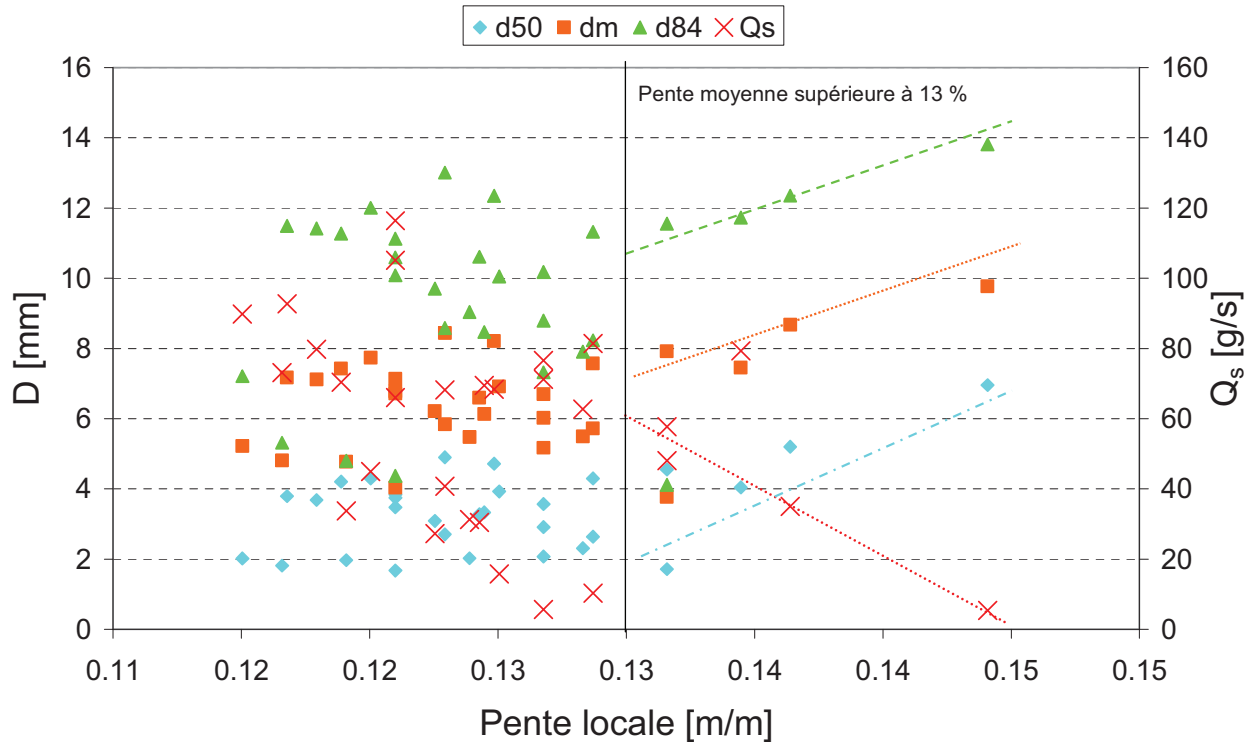


**Figure 86 :** Diamètre moyen arithmétique de la surface du lit en fonction de la pente locale – « Fort Transport ».

Par cohérence avec les phénomènes observés, nous avons donc choisi d'étudier globalement (à l'échelle du canal) la relation qui existe entre la pente (moyenne globale), la granulométrie de surface (moyenne globale) et le débit solide moyen transporté pendant la première minute qui suit chaque mesure de granulométrie de surface (données GDS). Les résultats sont représentés sur la Figure 87 (pour toutes les données voir l'ANNEXE 3).

Nous pouvons observer deux comportements différents du système autour d'une valeur seuil de 13%. Quand la pente augmente, à partir de 13 %, le pavage de surface semble de plus en plus important : de ce fait la granulométrie est de plus en plus grossière et le transport est de plus en plus faible.

Au dessous de 13 %, l'absence de corrélation pourrait être associée à l'alternance d'états du lit qui caractérisent la « phase de transition » (voir Figure 76) mais aussi au protocole de mesure utilisé. En effet, ces mesures ont été effectuées après arrêt de l'alimentation. Dans ce cas, les nappes de charriage en transit dans le système perdent leur intensité et leur puissance. La granulométrie de surface qui en résulte est plus grossière en raison du dépôt de particules qui composent le front des nappes de charriage qui n'ont pas transité jusqu'à l'aval.



**Figure 87 :** Diamètres  $D_{50}$ ,  $D_m$  et  $D_{84}$  du système en fonction du débit solide en sortie de système pour l'expérience « *Fort Transport* ».

### 4.3. Essai d'interprétation de la dynamique sédimentaire

L'objectif de cette partie est de comprendre l'influence des morphologies observées sur la dynamique de transport du système.

#### 4.3.1. Les « nappes de charriage » comme mode principal de transport pour l'expérience « Fort Transport »

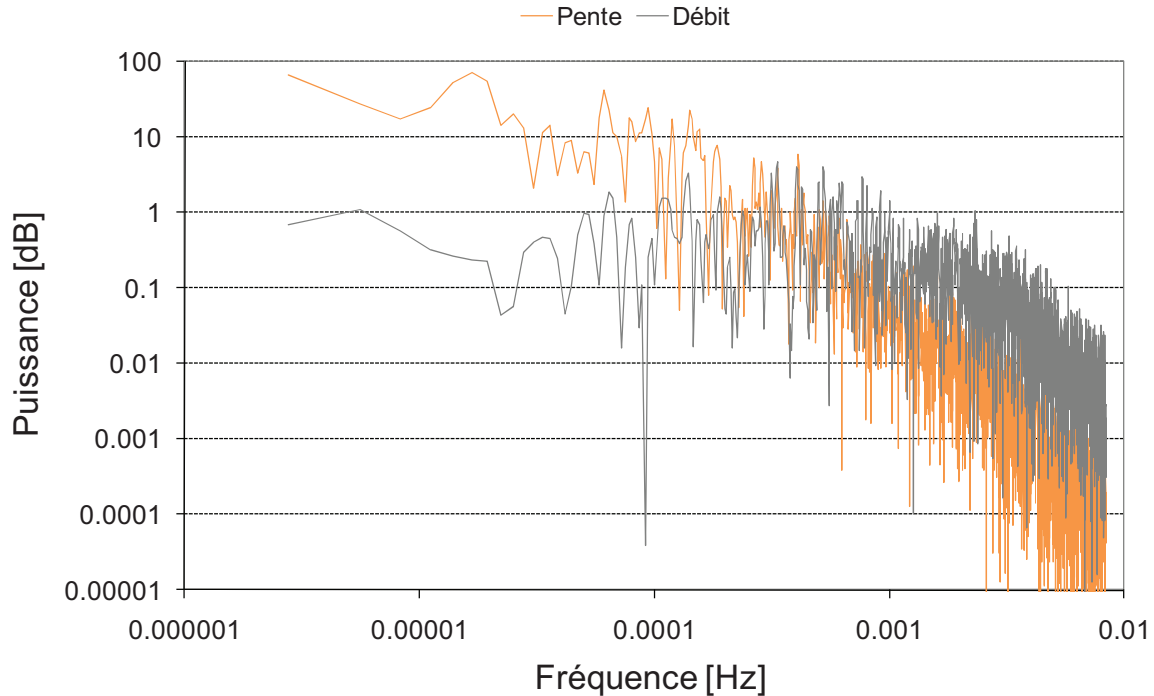
Pour l'expérience « *Fort Transport* », les signaux de pente moyenne et de débit solide sont fortement corrélés.

Les cycles de formation/destruction d'un pavage de surface et de production/propagation d'une nappe de charriage à différents endroits du système sont observés en continu, sur toute la durée de l'expérience.

Nous avons mesuré, sur le plan de Fourier, les signatures spectrales des signaux de pente moyenne (en orange sur la Figure 88) et de débit solide (en gris sur la Figure 88) mesurés au cours de l'expérience. Chaque pic du signal correspond à un phénomène érosif différent.

L'analyse de Fourier effectuée montre que plusieurs périodes sont associées au phénomène de fluctuations.

Bien qu'une similitude semble exister entre les fréquences associées aux principaux pics, il est difficile de tirer une conclusion de cette analyse de fréquence.

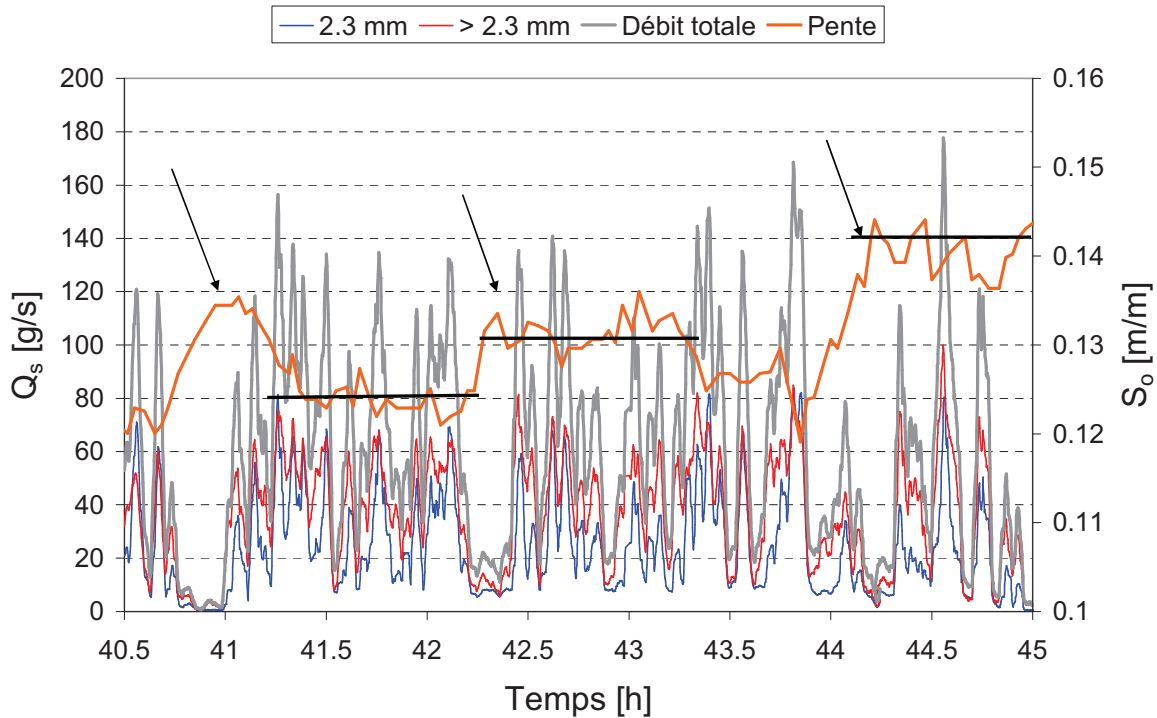


**Figure 88** : Analyse de Fourier du signal de pente moyenne (orange) et du signal de débit solide (gris) pour l'expérience à *Fort Transport*.

Néanmoins, un tel comportement du système a déjà été documenté et associé à l'influence des nappes de charriage sur le système à court, moyen et long terme (Recking et al., 2009).

La Figure 89 représente une fenêtre temporelle du signal de débit solide enregistré avec le dispositif GDS en fonction du signal de pente moyenne du système. Par souci de clarté, nous avons partagé les classes granulométriques du mélange en deux familles : une première avec un diamètre inférieur à 2.3 mm et une seconde avec un diamètre supérieur à 2.3 mm.

La fenêtre temporelle du signal GDS montre seulement quatre heures d'expérience qui sont représentatives du signal mesuré.



**Figure 89 :** Variation du débit solide mesuré avec le dispositif GDS en fonction de la pente moyenne du canal. En rouge les particules de taille supérieure à 2.3 mm et en bleu les particules de taille égale à 2.3 mm.

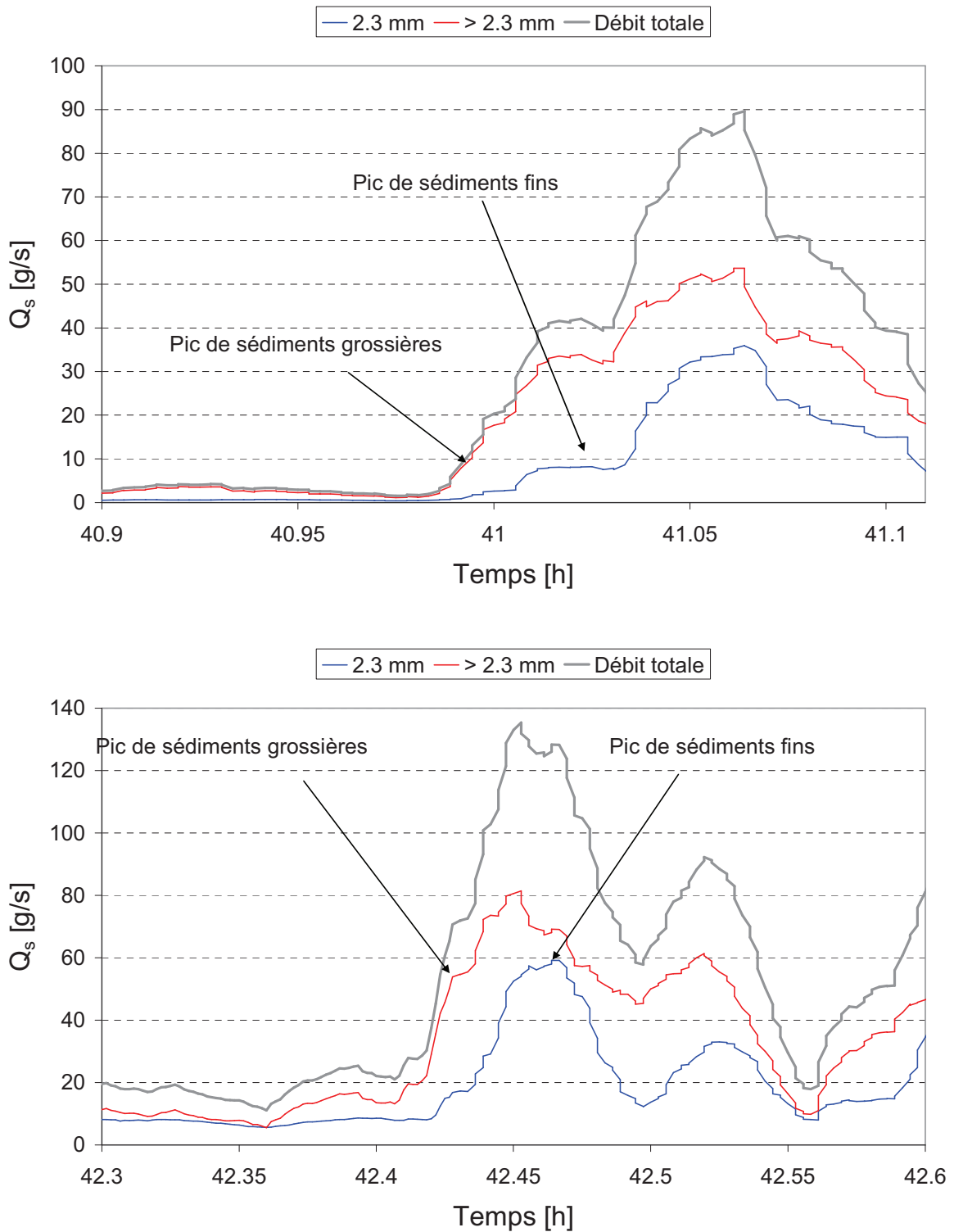
Ces données montrent une corrélation très forte entre la pente et le débit solide (Figure 89) : les phases d'aggradation du système (indiquées par une flèche noire) correspondent à de brusques réductions du débit solide (qui tombe à zéro) alors que les érosions (diminution de la pente moyenne) correspondent à des pics de débit solide.

Entre chaque phase d'aggradation, la Figure 89 montre l'existence de phase de stabilisation de la pente (ligne noire) qui suggère un comportement par compartiments (discuté par la suite).

L'analyse des pics de transport montre que la dynamique de tous les pics mesurés avec le GDS sont quasiment du même type : un pic d'éléments fins (en bleu) est postérieur (dans le temps) à celui des particules qui composent le pavage (en rouge). Ce mécanisme de transport a déjà été décrit dans d'autres études (Recking et al. 2009 ; Nelson et al. 2009 ; Kuhnle et Southard, 1998) et a été associé à la propagation de nappes de charriage dans lesquelles les particules grossières du mélange sont transportées avec une grande efficacité sur une couche de sédiments fins.

Un zoom de la Figure 89 a été proposé ci-dessous (Figure 90) pour mieux permettre d'apprécier cette dynamique de transport par nappes de charriage du système.



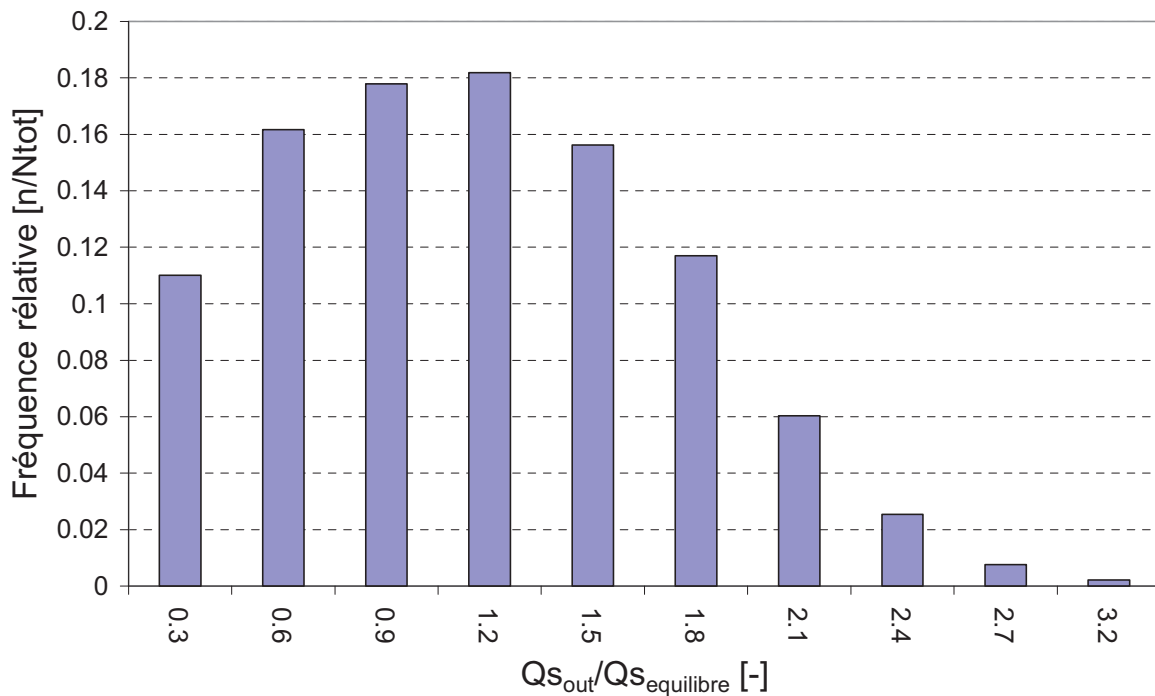


**Figure 90 :** Dynamique de propagation des nappes de charriage ; le pic de débit solide des sédiments grossières (en rouge) est toujours antécédent à celui des sédiments fins (en bleu).

Comme pour l'expérience « *Faible Transport* », on peut analyser la fréquence relative du rapport  $\frac{Q_{s_{out}}}{Q_{s_{équilibre}}}$  (Figure 91). Ces résultats montrent que la distribution des pics de débit

solide est centrée autour de la valeur moyenne. Notamment, les familles d'érosions les plus fréquentes sont celles aux alentours de la moyenne ( $0.6 < \frac{Qs_{out}}{Qs_{équilibre}} < 1.5$ ) Cette « symétrie » entre érosions ( $\frac{Qs_{out}}{Qs_{équilibre}} > 1$ ) et aggradations ( $\frac{Qs_{out}}{Qs_{équilibre}} < 1$ ) pourrait symboliser un phénomène continu de destruction et de formation d'un pavage local, typique de la dynamique par nappe de charriage.

Les pics de transport « extrêmes » ( $\frac{Qs_{out}}{Qs_{équilibre}} > 2.1$ ) sont rares et sont mesurés avec une fréquence très faible. Ces pics sont associés à des érosions à grande échelle qui concernent le canal sur toute sa longueur, après que le système a atteint une valeur de pente maximale. Cette condition est rarement vérifiée. Elle peut être considérée comme l'événement rare (en termes statistiques) de transport pour un système à granulométrie étendue, soumis à des conditions hydrauliques constantes et supérieures à la mise en mouvement.



**Figure 91 :** Fréquence des érosions mesurées pour l'expérience « *Fort Transport* ».

#### 4.3.2. Un scénario pour calculer l'Amplitude de fluctuation du système

Pour l'expérience « *Fort Transport* », nous avons montré, jusqu'à présent, que le transport solide fluctue largement dans le temps et que ces fluctuations se répercutent de façon nette sur la morphologie du lit, la pente (locale et globale), la capacité de transport du système ainsi que sur les paramètres hydrodynamiques de l'écoulement.

Plus particulièrement, des fluctuations de pente, de transport et de morphologie du lit sont observées en continu et la structure du lit en résulte être hétérogène, avec une alternance fréquente de lit plat érodé, de lit pavé et de zones de transition caractérisées par des step-pools et des bed-clusters (Figure 76). Toutes les fluctuations de pente et de débit mesurées sont comprises entre deux extrêmes : un lit plat ( $D_m$  min) à faible pente et très forte capacité de transport et un lit pavé ( $D_m$  max) à pente maximale et faible transport (voir Figure 82, Figure 85).

Ces observations ont déjà été reportées en littérature et un scénario a été proposé (Recking 2006 ; Recking et al. 2009) pour décrire l'évolution du système. En raison des similarités des phénomènes observés, nous testerons, ici, les hypothèses proposées par Recking (2006) pour le calcul de la pente maximale  $S_{max}$  et minimale  $S_{min}$  du système en fonction des conditions de transport. Le scénario a été décrit au chapitre 1 (synthèse bibliographique) et nous reporterons, dans la suite, les points principaux.

Recking (2006) a formulé l'hypothèse que la pente maximale  $S_{max}$  du système est la pente d'équilibre pour un matériau uniforme de diamètre  $D$ , qui correspond au diamètre moyen arithmétique du mélange injecté pour les conditions d'alimentation données. La pente minimale  $S_{min}$  correspond également à la pente d'équilibre pour le système (débit solide égal au débit d'alimentation) mais dans des conditions de fort transport (transport très efficace sur lit plat).

En utilisant la loi de transport adaptée aux conditions de transport efficace (Eq. 20), Recking (2006) a proposé la formule suivante pour calculer  $S_{min}$  (Eq. 52) :

$$S_{min} = \frac{S_{max}}{\theta} \left( \frac{\Phi_A}{14} \right)^{\frac{1}{2.45}} \quad (52)$$

Où  $\Phi_A$  [-] est le débit solide adimensionnel calculé à l'équilibre et  $\theta$  [-] le paramètre de Shields représentant les conditions hydrauliques du système à l'équilibre.

Nous avons testé ce modèle de la façon suivante. Nous avons utilisé les diamètres représentatifs du système, notamment le diamètre moyen arithmétique du mélange d'alimentation «  $D_{m,m}$  » et du pavage de surface «  $D_{m,p}$  » et le  $D_{84,p}$  du pavage de surface (Tableau 24). Nous avons calculé le débit solide d'équilibre pour le système  $Q_{sc}$  [g/s] (et  $\Phi_A$  [-]) en utilisant la loi de transport et de frottement (Recking et al., 2008b) et la pente maximale mesurée pour le système  $S_{max}$  (**0.145**).

Ces valeurs ont été comparées avec le débit solide d'équilibre  $Q_{se}$  [g/s] réel mesuré pour le système (**60 g/s**). Pour chaque diamètre et chaque condition hydraulique nous avons calculé la pente minimale  $S_{min,c}$  à l'aide de l'Equation 52 et nous avons comparé les résultats obtenus avec la pente minimum réelle  $S_{min,r}$  du système (**0.10 m/m**).

Les résultats ont été reportés dans le Tableau 25 ci-dessous.

D [mm]	Q <sub>sc</sub> [g/s]	S <sub>min,c</sub> [-]	Q <sub>sc</sub> /Q <sub>se</sub> [-]	S <sub>min,c</sub> / S <sub>min,r</sub> [-]
D <sub>m,m</sub> (6)	138	0.135	2.2	1.35
D <sub>m,p</sub> (10)	52	0.103	0.9	1.03
D <sub>84,p</sub> (15)	2	0.031	0.03	0.31

**Tableau 25 :** Test du modèle d'extrêmes de pente proposé par Recking (2006) ; tous les calculs ont été fait en utilisant la pente maximale mesurée pour le système. Les index *c* et *e* indique respectivement calculé et équilibre.

Les résultats montrent que le débit d'équilibre dynamique corresponde à celui calculé pour un matériau uniforme de diamètre égal au diamètre moyen arithmétique du pavage de surface D<sub>m,p</sub> (10 mm). Pour ce diamètre-ci, la pente minimale du système calculée à partir de l'Equation 35 semble correspondre à la valeur réelle mesurée au cours de l'expérience (avec un écart de 3 %).

Le modèle utilisé semble reproduire assez bien la dynamique d'évolution de l'expérience « *Fort Transport* », du moins en ce qui concerne l'amplitude de fluctuation du système. Il semble donc possible, pour un système à granulométrie étendue, d'estimer l'amplitude de fluctuation totale en fonction des conditions hydrauliques du système (notamment, le débit liquide, le débit solide et la courbe granulométrique du matériau transporté).

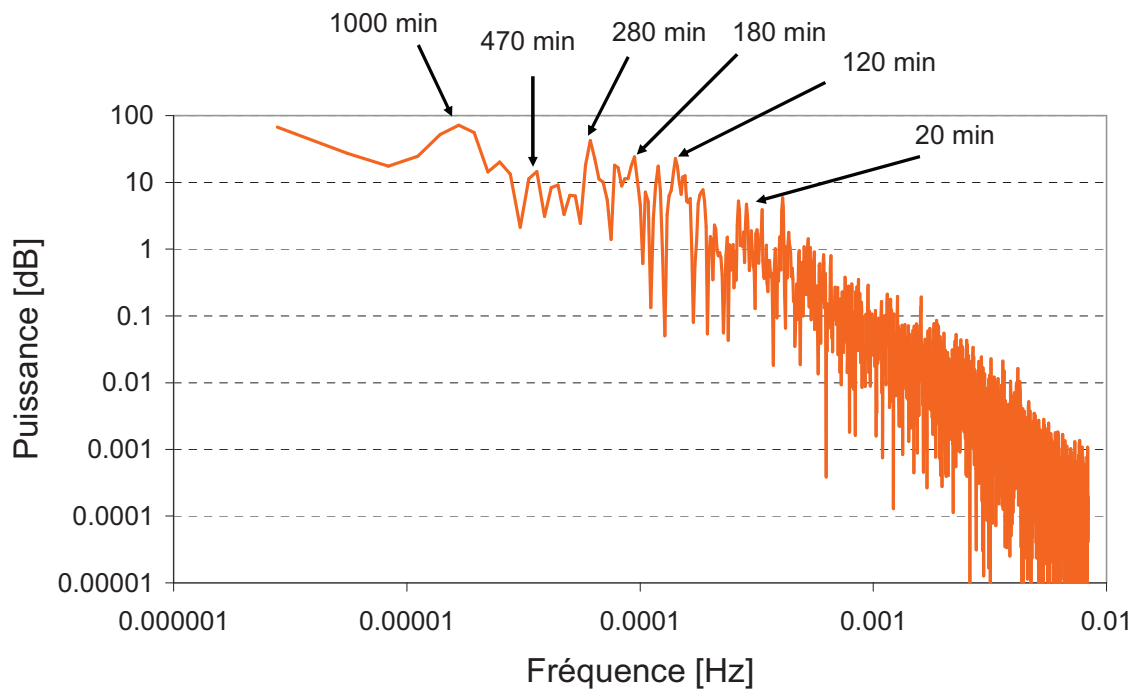
Le diamètre « caractéristique » du mélange capable de reproduire les fluctuations de pente semble être le D<sub>84</sub> du matériau injecté (de 9 mm est donc presque identique au D<sub>m</sub> du pavage de surface) et non le diamètre moyen arithmétique du mélange injecté comme dans le cas de Recking (2006).

#### 4.4. Application du modèle par compartiments à « Fort Transport »

Sur la base du signal de pente locale, on a choisi de partager le système en six compartiments. Ensuite, on a isolé les fréquences principales du signal de pente globale du système grâce à une analyse de Fourier (Figure 92).

Plusieurs pics sont observés dans le plan de Fourier pour le signal de pente moyenne  $S_o(t)$ . Les pics du signal sont bien marqués pour l'expérience « *Fort Transport* » et ils peuvent être partagés en trois familles, comprises respectivement entre 25 et 70 minutes, entre 90 minutes (1h30) et 280 minutes (2h40) et entre 380 minutes et 1000 minutes (environ 17 heures). Chaque pic correspond à une famille d'érosions, représentée par une période caractéristique.

Chaque compartiment devrait théoriquement être à la base des fréquences principales de fluctuation du signal global. Les hautes fréquences devraient correspondre aux érosions provoquées par un phénomène de tri efficace qui se produit en tête du système, l'alimentation solide étant constante sur toute la durée de l'expérience. Les basses fréquences, par contre, devraient être liées aux phénomènes complexes d'interaction entre les compartiments. Ce type de comportement devrait ressortir par l'analyse de Fourier du signal par compartiments.

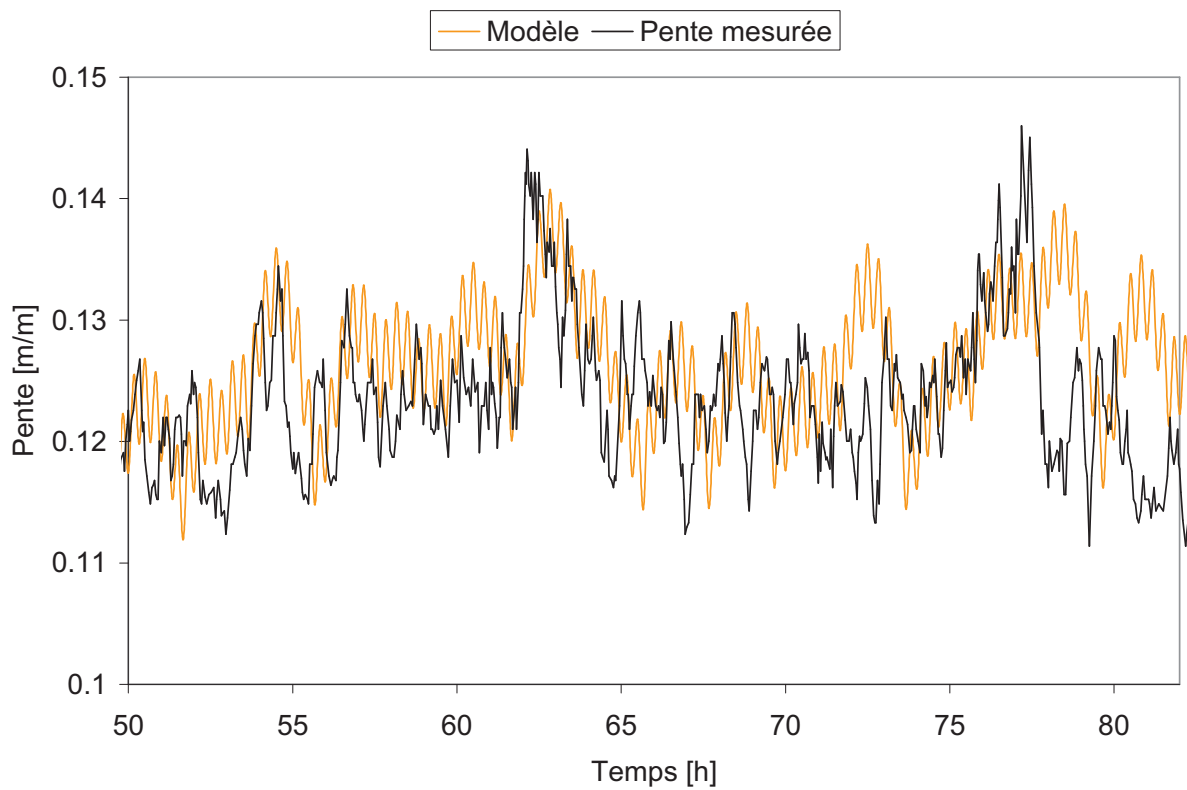
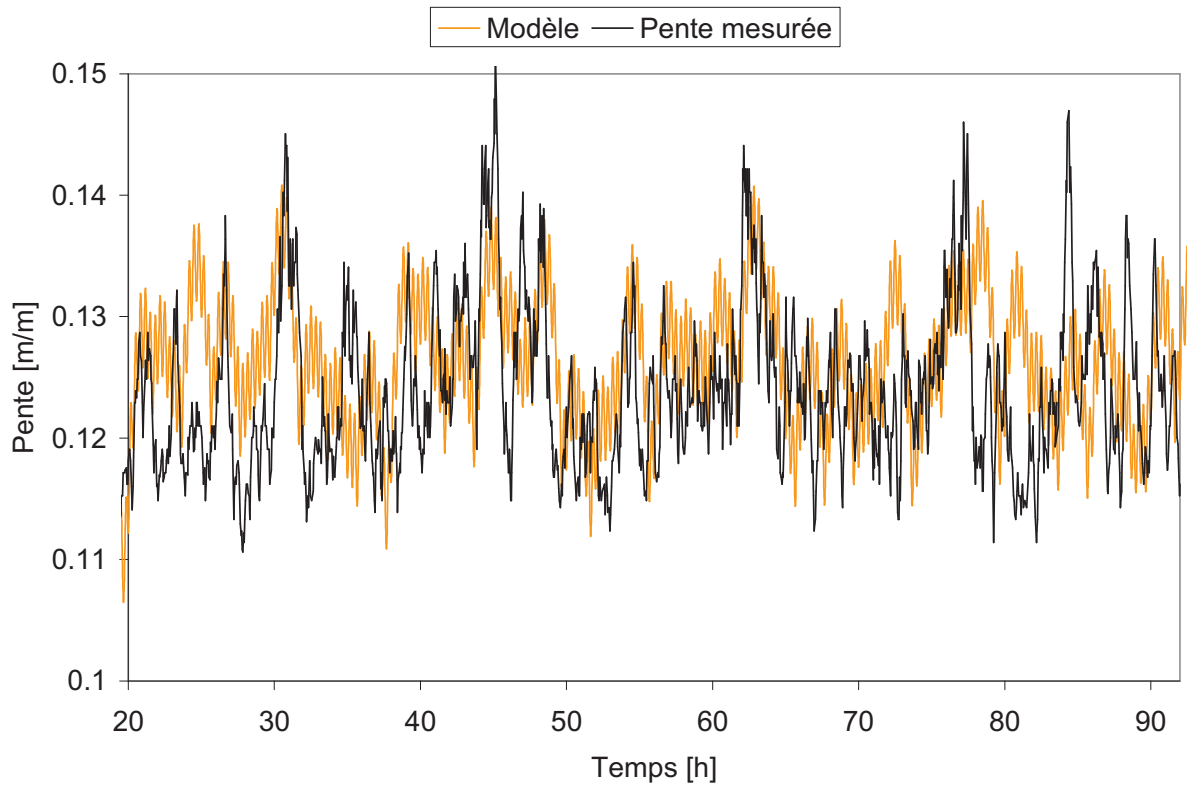


**Figure 92 :** Analyse du signal de pente moyenne pour l'expérience « *Fort Transport* ».

L'application du modèle par compartiments sur la base des données reportées dans le Tableau 26 a été faite et les résultats sont représentés sur la Figure 92.

	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>C6</b>
$L_{\text{comp}}$ [m]	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Phase [rad]	0	20	70	70	0	233
T [min]	20	120	180	280	470	1000

**Tableau 26 :** Paramètres du modèle par compartiment – *Fort Transport*.



**Figure 93 :** Comparaison entre la pente mesurée et la pente calculée avec le modèle par compartiments pour l'expérience « *Fort Transport* ».

Il est illusoire de vouloir reproduire un comportement aussi complexe avec un modèle aussi simple. Néanmoins, le modèle reproduit globalement le comportement du système, avec une augmentation et une diminution périodique de la pente moyenne dans le temps. Pour l'expérience « *Fort Transport* », tous les pics de pente moyenne mesurés sont reproduits par le modèle.

Le comportement par compartiments du système (voir paragraphe 1.3.4) fournit donc une explication à l'existence de différentes échelles d'érosions observées expérimentalement (Recking, 2006). Les érosions courtes seraient associées aux nappes de charriage. Elles ont un impact faible sur la morphologie du lit (perturbation locale). Les érosions d'intensité majeure pourraient être associées à plusieurs compartiments en phase.

Bien que le modèle conceptuel par compartiments ne soit pas un outil prédictif (Recking, 2006), il permet, dans le cas de l'expérience « *Fort Transport* », de mieux comprendre les échelles spatiales et temporelles des phénomènes érosifs observés.

#### **4.5. Conclusions pour l'expérience « *Fort Transport* »**

Dans le cadre de l'expérience « *Fort Transport* », de grandes fluctuations de la pente et du débit solide ont été observées au cours de toute l'expérience. Ces fluctuations ont été associées à un comportement complexe du lit et à des changements complexes de la granulométrie de surface, de la morphologie du lit ainsi que des paramètres hydrodynamiques du système.

La granulométrie et la morphologie du lit ainsi que la pente moyenne globale fluctuent dans le temps entre deux extrêmes : un lit pavé à forte pente, caractérisé par un débit solide nul en sortie et un diamètre moyen égal au  $D_{84}$  du mélange d'alimentation, et un lit plat à faible pente, composé essentiellement de particules fines (2.3 mm), où le transport est très intense en raison de la grande mobilité des particules grossières.

Ces deux états du système correspondent à deux conditions d'équilibre énergétique associées à deux régimes de transport différents (Recking, 2006).

Le mode principal de transport est celui par nappe de charriage. L'échelle principale des phénomènes semble être celle du canal (ou, du moins, celle du compartiment) et les signaux de pente et de débit solide sont fortement corrélés.





## CONCLUSION DE LA PARTIE 2

Pour les expériences « *Faible Transport* » et « *Fort Transport* », nous avons mesuré un comportement différent du système fluctuant autour de la même pente d'équilibre dynamique (Tableau 27). « *Faible Transport* » est un système présentant de très fortes fluctuations du débit solide ( $T_f$  supérieur à 10) et une très grande stabilité de la pente ( $A_f$  de 0.01). « *Fort Transport* », au contraire, est caractérisé par de « faibles » fluctuations de débit solide de débit solide ( $T_f$  d'environ 3) et de larges fluctuations de la pente et de la morphologie ( $A_f$  de 0.045).

	$A_f$ [-]	$T_f$ [-]	$S_{eq}$ [m/m]	$\theta_{84}/\theta_c$ [-]	$T$ [h]
<i>Faible Transport</i>	0.01	> 10	0.122	0.94	110
<i>Fort Transport</i>	0.035	3	0.122	1.37	92

**Tableau 27** : Données représentatives des deux expériences.

La raison de ce comportement est le tri granulométrique, qui joue un rôle à échelles spatiales et temporelles différentes, en raison des différentes conditions hydrauliques auxquelles le système est soumis.

Nous parlerons de tri granulométrique « de faible portée » et « de grande portée » en raison de ces différences.

### **Tri granulométrique**

Le tri granulométrique se manifeste différemment selon que les conditions hydrauliques sont inférieures (pour *Faible Transport*) ou supérieures (pour *Fort Transport*) au seuil de mise en mouvement des éléments grossiers du mélange d'alimentation ( $D_{84}$ ).

Le comportement des deux systèmes est très différent. La raison de ces différences est liée au rôle des structures sédimentaires représentatives de chaque condition hydraulique, notamment les « step-pools » dans le cas de l'expérience « *Faible Transport* » et les « nappes de charriage » dans le cas de l'expérience « *Fort Transport* ».

Dans l'expérience « *Faible Transport* », le lit est globalement pavé au cours de toute l'expérience. Des fluctuations de pente et de débit solide sont observées et associées principalement aux mécanismes de formation et de destruction des « step-pools ». Lors de la destruction de ce-derniers, les particules fines du mélange d'alimentation peuvent se redistribuer dans le système. Dans ce contexte, on peut alors parler d'un tri granulométrique « de faible portée » car la redistribution des éléments fins est principalement associée au phénomène d'instabilité d'une macro forme. Le transport se fait principalement de « proche en proche ». Des érosions très intenses, à l'échelle du canal, sont également observées. Ces

érosions sont rares (en termes de fréquence) et ont été associées à un comportement à long terme du système.

Dans le cadre de l'expérience « *Fort Transport* », au contraire, nous avons observé des transformations morphologiques importantes du système. L'état du lit fluctue périodiquement entre un lit complètement pavé à forte pente et un lit plat composé presque totalement des particules fines du mélange d'alimentation, au cours des érosions. Ces deux états correspondent respectivement au minimum et au maximum du débit solide en sortie du système. Entre ces deux phases, de longues périodes de transition sont observées. Le profil du lit est très contrasté et des zones de pavage ou d'érosion locales sont également observées. Plus particulièrement, la dynamique sédimentaire semble fortement corrélée à la production et à la propagation de nappes de charriage qui sont considérées comme le mode principal de transport.

C'est pourquoi nous parlerons de tri granulométrique « de grande portée ». Les nappes de charriage sont, non seulement, à la base de l'échange des sédiments dans le système, mais elles sont aussi l'élément capable d'expliquer l'augmentation de mobilité des éléments du pavage au cours du transport (transport efficace sur lit plat).

### **Conséquences sur la morphologie**

La valeur de  $\theta_{84}/\theta_c$  a des conséquences très fortes sur la morphologie du système. En effet, si on a un rapport  $\theta_{84}/\theta_c < 1$  (cas de l'expérience *Faible Transport*), les step-pools sont très présents, très stables, et contrôlent la dynamique de transport. Au contraire, si l'on a un rapport  $\theta_{84}/\theta_c > 1$  (ce de l'expérience *Fort Transport*), les step-pools ne sont que des états éphémères associés à la phase de transition et rapidement détruits par les nappes de charriage.

Le rôle des conditions hydrauliques pourrait aussi influencer la dynamique de formation du pavage de surface.

Dans l'expérience *Faible Transport*, le pavage représente la condition d'équilibre dynamique pour le système. Le pavage est très stable dans le temps, aussi bien globalement que localement.

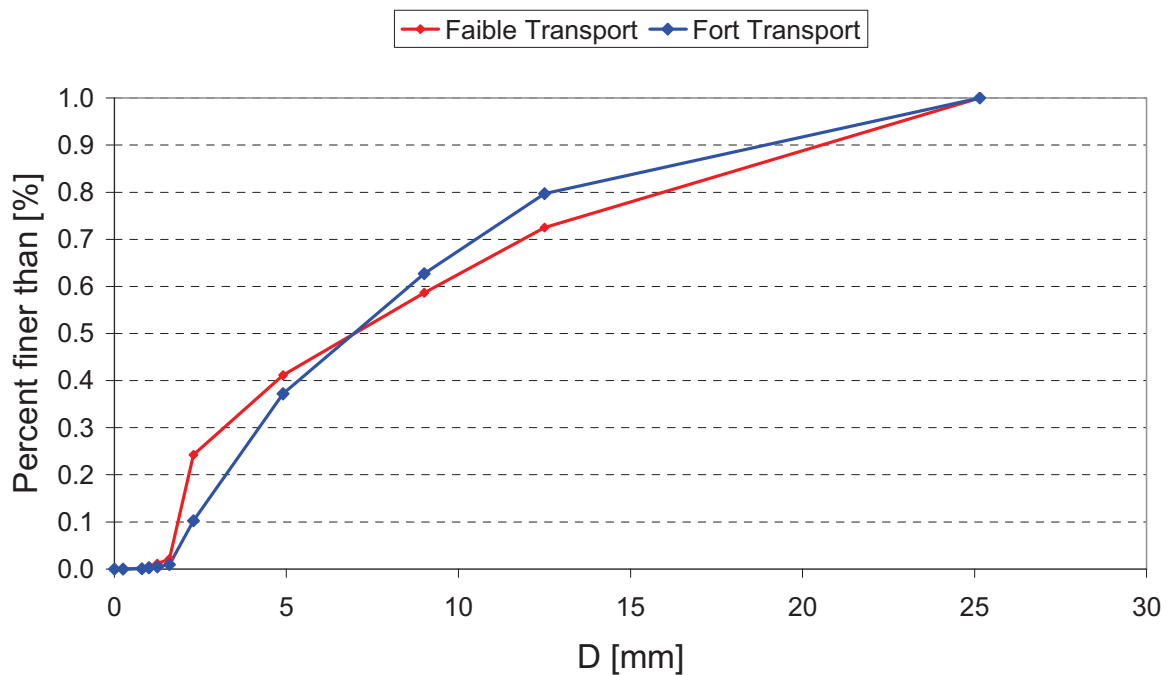
Dans l'expérience *Fort Transport*, au contraire, l'équilibre dynamique est représenté par la phase de transition du système. Cette phase correspond à un lit alternativement plat, pavé avec des step-pools et des bed-clusters. Le pavage semble représenter une condition d'équilibre énergétique pour le système (Recking et al., 2009). L'hypothèse formulée par Recking et al. (2009) d'un système fluctuant entre deux extrêmes énergétiques a été testée pour l'expérience et a présenté de bons résultats (4.3.2).

Il est tout de même intéressant d'observer que le pavage global mesuré au cours de l'expérience à *Faible Transport* (Figure 95) est similaire (Figure 94) au pavage à forte pente mesuré pour celle à *Fort Transport* (Figure 96).

Cette similarité montre la difficulté à associer, sur le terrain, une certaine morphologie à un régime hydrologique donné. Dans ce cas, par exemple, les deux pavages, bien que similaires, correspondent à des dynamiques sédimentaires très différentes.

	$D_{16}$ [mm]	$D_{30}$ [mm]	$D_{50}$ [mm]	$D_m$ [mm]	$D_{84}$ [mm]
<i>Faible Transport</i>	1.83	3.18	7	11.5	18
<i>Fort Transport</i>	2.85	4.20	6.95	10	15.18

**Tableau 28 :** Pavage moyen mesuré pour l'expérience à *Faible Transport* et pavage à forte pente mesuré pour l'expérience à *Fort Transport*.



**Figure 94 :** Pavage globale sur la surface du lit pour *Faible Transport* (courbe rouge) et pavage à forte pente pour *Fort Transport* (courbe bleue).

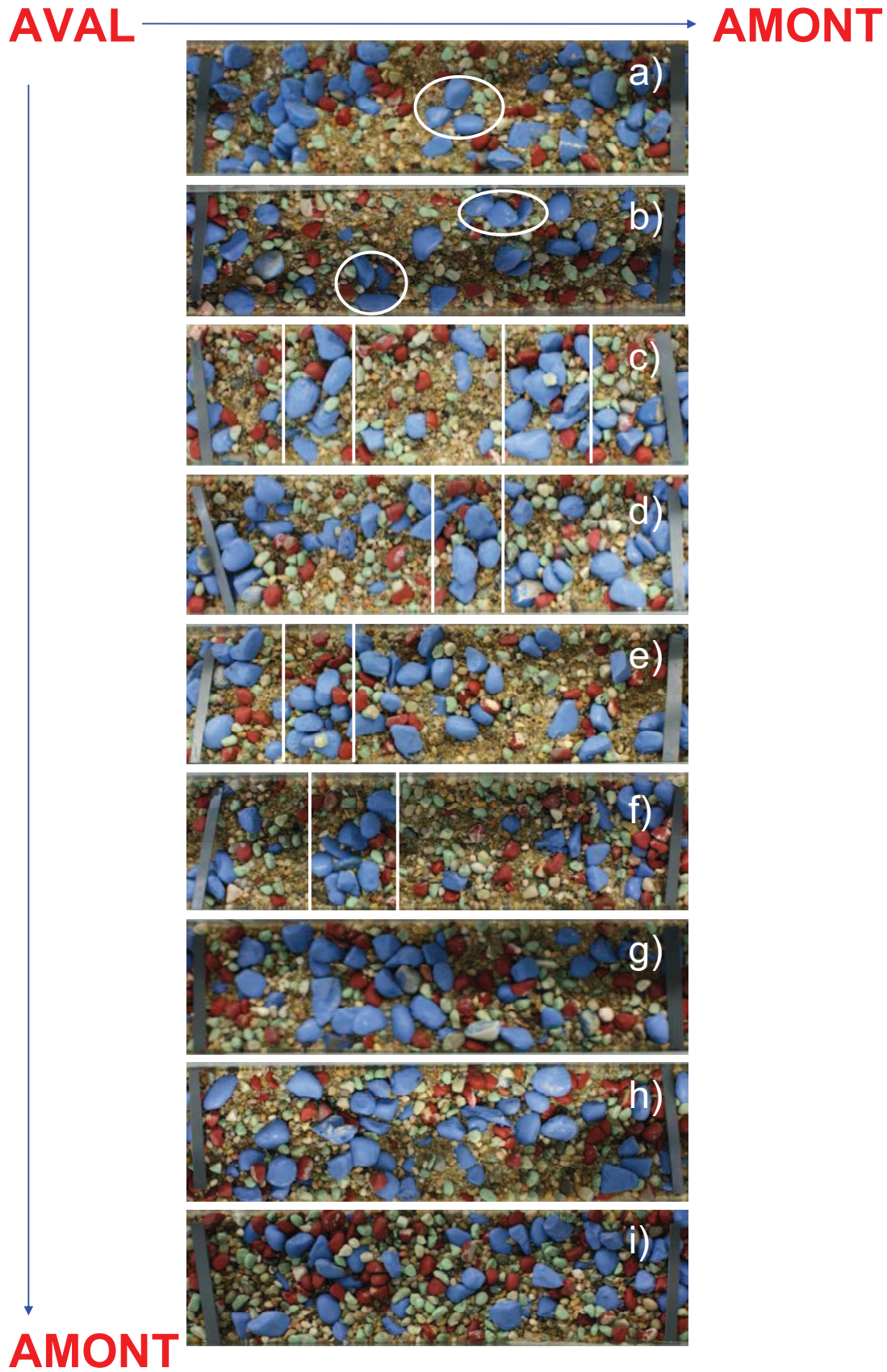
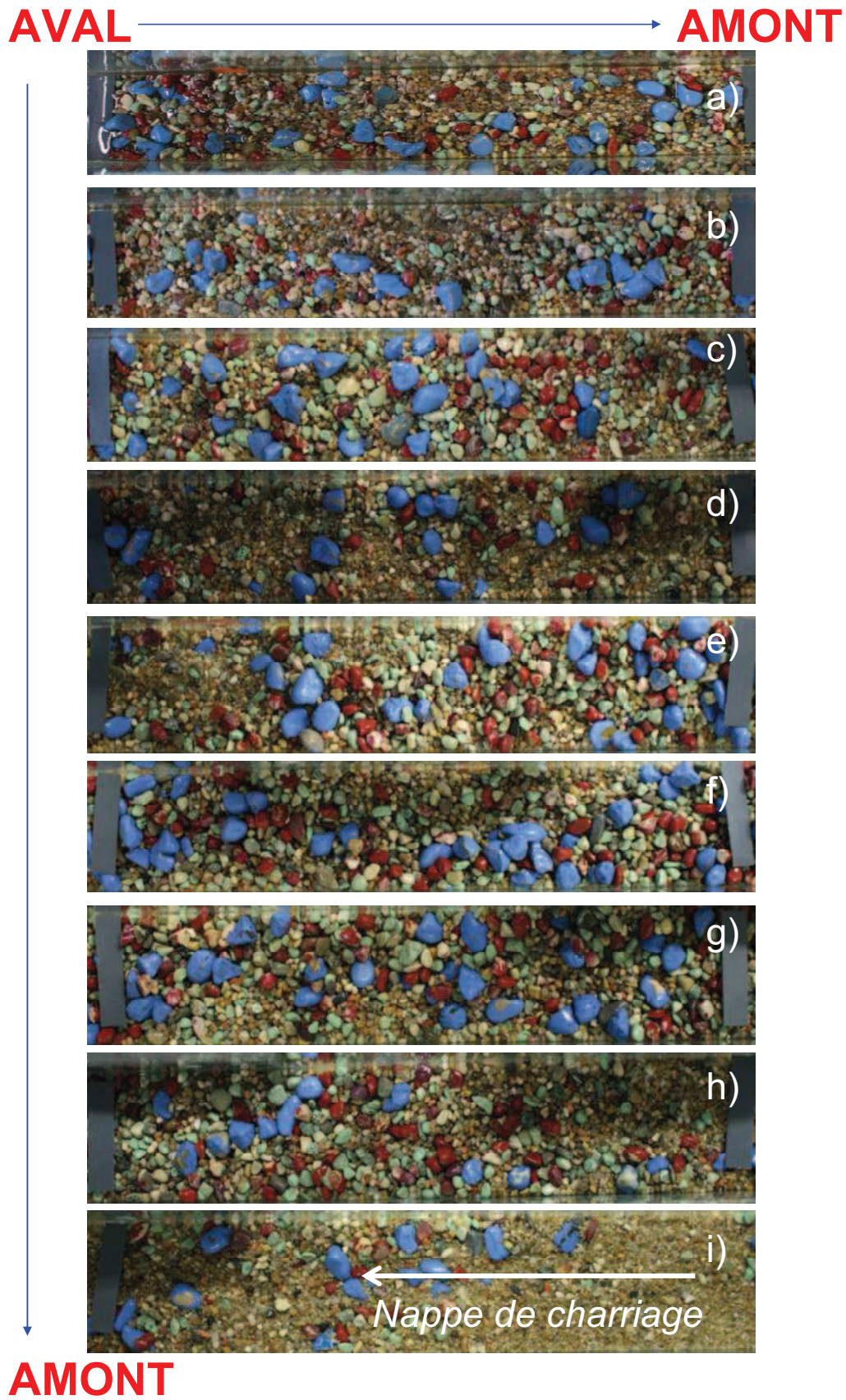


Figure 95 : Pavage de surface pour l'expérience à *Faible Transport*.



**Figure 96** : Pavage de surface pour l'expérience à *Fort Transport*.

**Echelle des phénomènes de transport et dynamique sédimentaire**

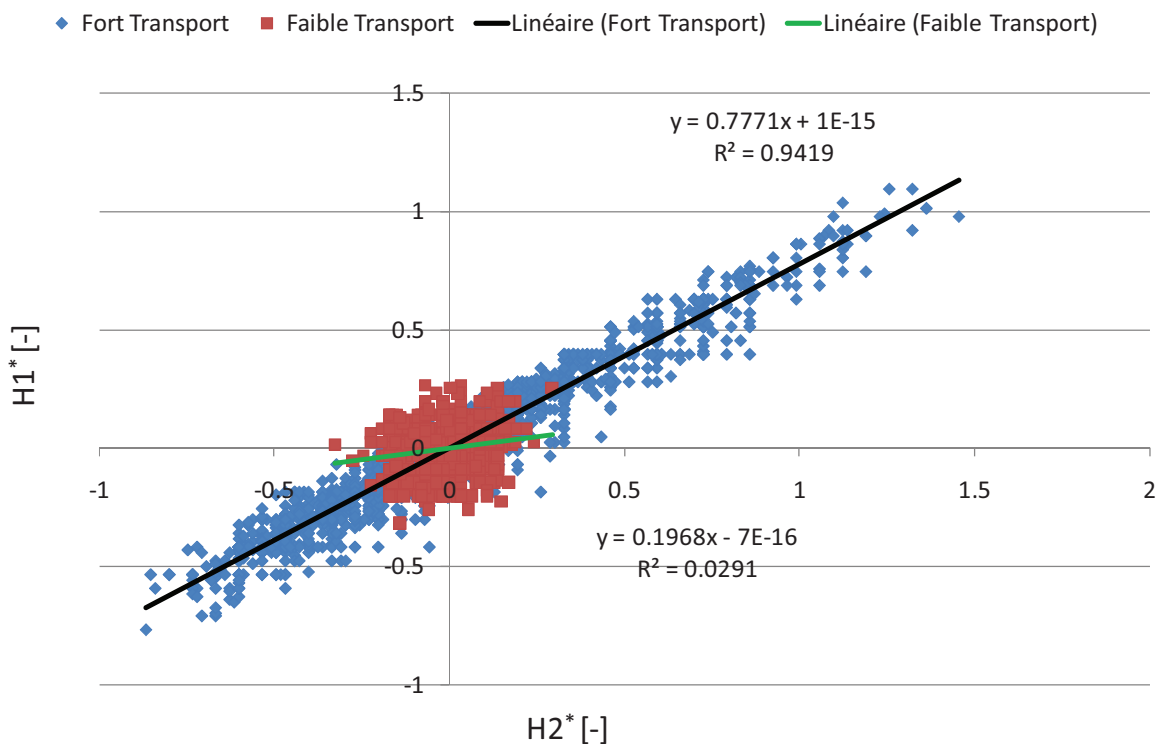
Les conditions hydrauliques ont également une influence sur l'échelle spatiale des évolutions morphologiques observées.

L'étude de la corrélation existant entre les mesures de niveau du lit peut aider à mieux visualiser les échelles spatiales caractéristiques des deux expériences. C'est pourquoi nous avons cherché à corréler les mesures de niveau du lit  $H1^*$  et  $H2^*$  qui correspondent à deux jauges adjacentes. Nous avons choisi les mêmes jauges pour les expériences *Faible Transport* et *Fort Transport*. La distance qui le sépare est égale à 1 m. Les mesures de  $H1^*$  et  $H2^*$  correspondent à :

$$H1^* = \frac{H1 - \overline{H1}}{\overline{H1}}$$

$$H2^* = \frac{H2 - \overline{H2}}{\overline{H2}}$$

Où  $\overline{H1}$  et  $\overline{H2}$  sont, respectivement, les quantités moyennes mesurés pour chaque jauge et  $H1$  et  $H2$  sont, respectivement, les mesures instantanées du niveau du lit.

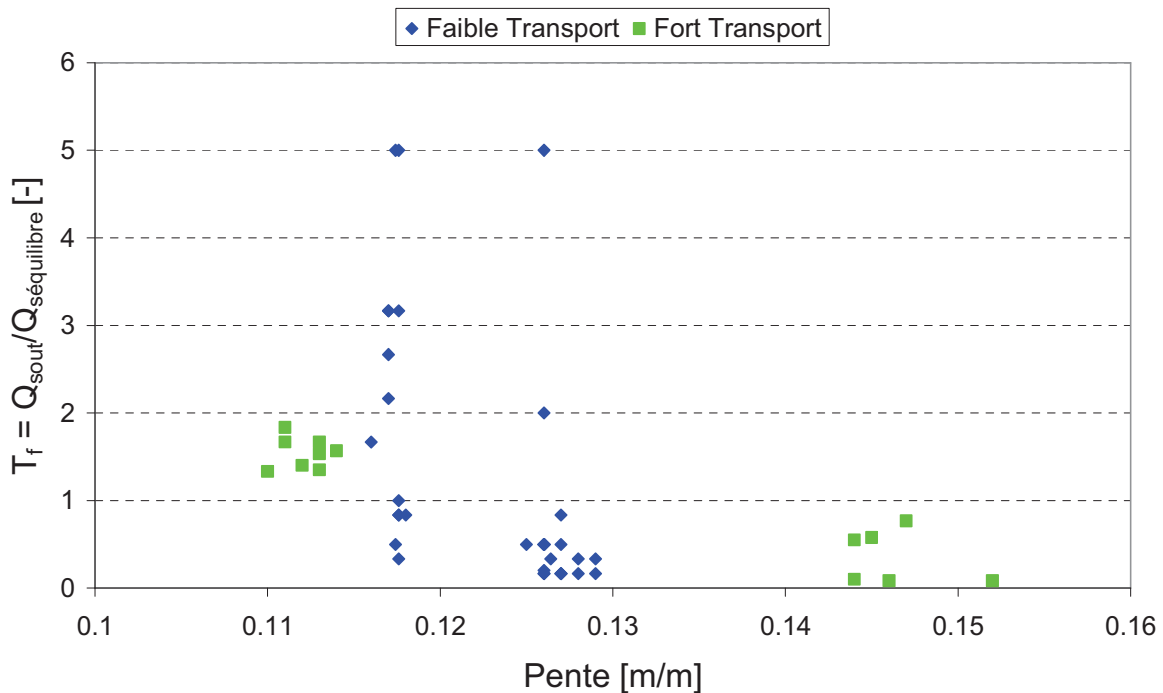


**Figure 97 :** Corrélation mesurée entre les niveaux du lit mobile adimensionnel  $H1^*$  et  $H2^*$  pour l'expérience à *Fort Transport* (points en bleu) et pour l'expérience à *Faible Transport* (points en rouge) ; en noir la courbe de tendance pour *Fort Transport* et en vert la courbe de tendance pour *Faible Transport*.

Cette analyse confirme que :

1. l'amplitude des fluctuations mesurée pour l'expérience à *Fort Transport* est supérieure à celle mesurée pour l'expérience à *Faible Transport* ;
2. l'échelle spatiale des phénomènes observés dans le cadre de l'expérience à *Fort Transport* est supérieure à celle des phénomènes érosifs mesurés dans l'expérience à *Faible Transport*. Ceci se traduit, pour l'expérience à *Fort Transport*, dans une corrélation très forte entre les mesures de niveau du lit effectuées dans deux sections de mesure distancée de 1 m ; pour l'expérience à *Faible Transport*, au contraire, le comportement du lit entre les deux mêmes sections est complètement indépendant.

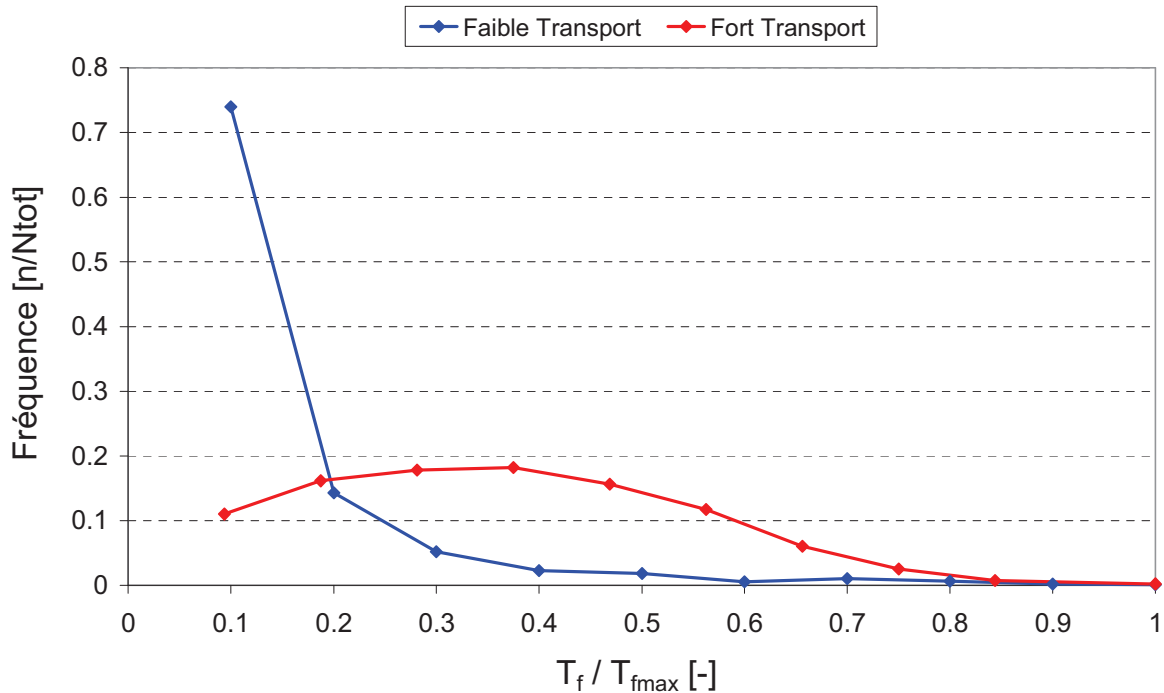
Ce comportement a des répercussions sur la dynamique sédimentaire du système. Pour l'expérience « *Faible Transport* », aucune corrélation entre les extrêmes de pente moyenne et débit solide n'a été observée (Figure 98). Ceci est la conséquence d'une dynamique de transport de « proche en proche ». Au contraire pour l'expérience « *Fort Transport* », les extrêmes de pente moyenne et de débit solide sont corrélés (Figure 98), ce qui montre que les phénomènes observés se produisent à l'échelle du système ou du compartiment. Les nappes de charriage ont été identifiées comme le mode principal de transport.



**Figure 98 :** Pente et débit solide mesurés en dynamique dans le cadre des expériences *Faible Transport* (carrés en bleu) et *Fort Transport* (carrés en vert).

D'un point de vue quantitatif, le mode de transport pour chaque expérience a été défini statistiquement. Notamment, pour chaque expérience, nous avons étudié la distribution de fréquence du taux de fluctuation  $T_f\left(\frac{Q_{s_{out}}}{Q_{s_{équilibre}}}\right)$ .

Sur la Figure 99, la fréquence du taux de fluctuation  $T_f \left( \frac{Q_{s_{out}}}{Q_{s_{équilibre}}} \right)$  est représentée en fonction du rapport entre le taux de fluctuation  $T_f$  et le taux de fluctuation maximale  $T_{fmax}$  mesuré pour chaque expérience. Cette représentation a permis de comparer les résultats obtenus pour les expériences *Faible Transport* (en bleu) et *Fort Transport* (en rouge) en fonction de la même abscisse spatiale (qui va de zéro à 1).



**Figure 99 :** Fréquence des érosions mesurées dans les expériences *Faible Transport* (courbe bleue) et *Fort Transport* (courbe rouge) en fonction du rapport entre le taux de fluctuation associé à la famille d'érosions  $T_f [-]$  et le taux de fluctuation maximum  $T_{fmax} [-]$  mesuré pour chaque expérience (respectivement de 3.2 pour *Fort Transport* et 15 pour *Faible Transport*).

Les deux courbes montrent une dynamique de transport complètement différente pour les deux systèmes. Pour l'expérience *Fort Transport*, les pics de transport semblent régulièrement distribués autour d'une valeur moyenne. Pour l'expérience *Faible Transport*, au contraire, presque toutes les érosions sont associées à des phénomènes de transport de faible intensité par rapports à ceux maximums mesurés.

Au cours des Chapitres 3 et 4, nous avons donc associé ces deux comportements à deux modes de transport différents : un mode de transport de proche en proche pour l'expérience *Faible Transport* et par nappe de charriage pour l'expérience *Fort Transport*.





### **PARTIE 3 : DYNAMIQUE HORS EQUILIBRE**

---



## CHAPITRE 5 : DYNAMIQUE HORS EQUILIBRE

---

### 4.6. Introduction

Dans la partie 2, nous avons analysé le rôle du tri granulométrique pour deux systèmes à forte pente, en granulométrie étendue, qui fluctuent autour d'une condition d'équilibre dynamique.

Cependant, les systèmes naturels ne sont pas toujours à l'équilibre. Des perturbations par rapport à la condition d'équilibre dynamique peuvent être liées à des interventions humaines ou à des phénomènes naturels. C'est le cas, par exemple, de la réalisation d'un ouvrage de dérivation du débit liquide (destiné par exemple à l'utilisation hydroélectrique) ou à la mise en place de seuils de correction torrentielle.

Nous étudierons, dans ce chapitre, comment ce qui a été décrit aux chapitres précédents se manifeste hors équilibre. Nous ferons ceci au travers de deux exemples. Le **CAS 1** est l'exemple d'un système en phase d'aggradation. Pour simuler cette situation et se différencier par rapport à d'autres études (où l'aggradation est produite en laboratoire par une augmentation du taux solide d'alimentation, voir Madej et al., 2009), nous avons réalisé une expérience avec un taux d'alimentation constant et égal à celui utilisé pour l'expérience *Faible Transport* (Chapitre 3), mais à partir d'une pente moyenne initiale plus faible et égale à **8.5 %**.

Le **CAS 2** correspond au transport en présence de seuils de correction torrentielle. L'objectif est de comprendre comment ceux-ci influencent la dynamique naturelle du système en termes de fréquence, d'intensité et de volume de transport. Cette expérience a été réalisée en continuité avec l'expérience *Fort Transport*. Notamment, les conditions hydrauliques (débit solide et débit liquide) imposées au système sont exactement les mêmes.

Les résultats obtenus et une discussion pour chaque cas seront présentés au cours de ce chapitre.

## **4.7. CAS 1 : Un système en phase d'aggradation**

### *4.7.1. Introduction et conditions expérimentales*

Pour l'expérience en aggradation, nous avons choisi les mêmes conditions d'alimentation que pour l'expérience *Faible Transport* : un débit liquide de **0.3 l/s** et un débit d'alimentation solide de **6 g/s**. Afin de produire l'aggradation, la pente initiale imposée au système est de **8.5 %**. Cette pente a été choisie inférieure à celle d'équilibre dynamique, qui est, elle, de **12.2 %** (voir Chapitre 3 pour plus de détails).

Au début de l'expérience, le matériau du lit a été mélangé afin qu'il ait la même composition que le sédiment injecté. La granulométrie de surface dans le temps a ensuite été mesurée tout au long de l'expérience.

### *4.7.2. Observations expérimentales*

Différentes morphologies ont été observées au cours de l'expérience, notamment la formation et la destruction de « bed-clusters » (microformes), la formation et la destruction de « seuils » similaires aux « step-pools » dans le système (macroformes) et la formation et la propagation de « nappes de charriage » (macroformes).

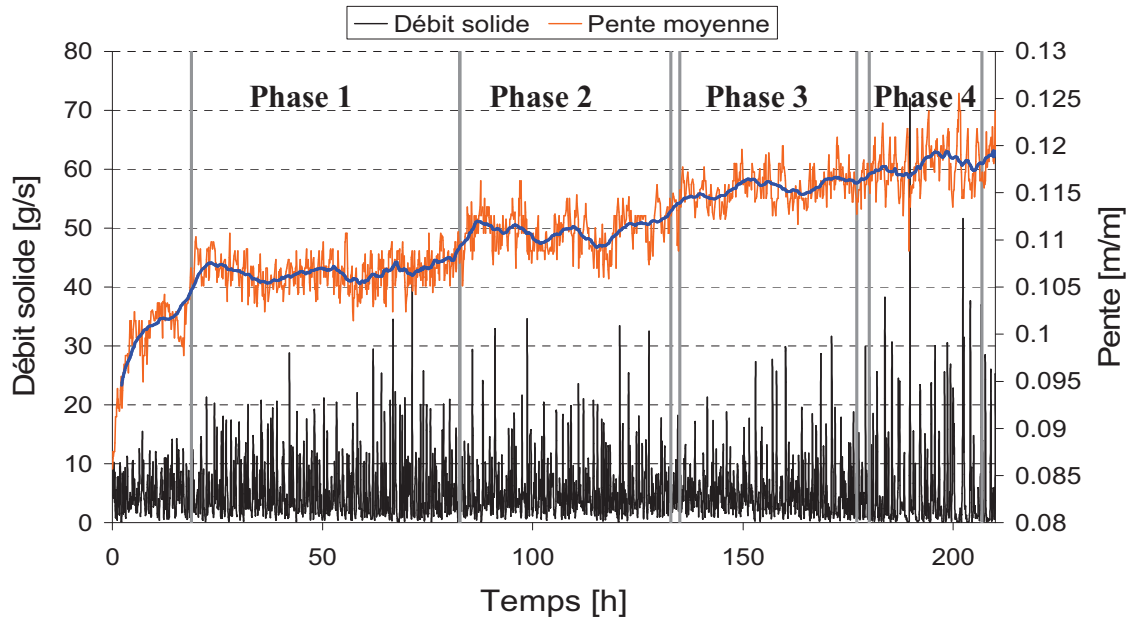
Ces micro et macroformes ont la même dynamique de formation et destruction décrite au cours du Chapitre 3, dans le cadre de l'expérience à *Faible Transport*. Néanmoins, nos mesures montrent des spécificités de comportement associées au phénomène d'aggradation global du système. Notamment, la formation et la production de nappes de charriage dans le système sont observées principalement (et presque exclusivement) dans la partie amont du système ; leur étendue spatiale (ainsi que leur effet d'impact) semble augmenter progressivement, dans le temps, quand le système s'approche de la condition d'équilibre dynamique. Ce fait se traduit par une augmentation significative du taux et de l'amplitude de fluctuation (et donc de l'impact des érosions) à la fin de l'expérience (Figure 101).

Par contre, de même que pour l'expérience *Faible Transport*, des « seuils » similaires aux « step-pools » se sont formés un peu partout dans le système. La formation et la destruction de ces seuils semblent être le mode par lequel le tri granulométrique se manifeste pour produire l'aggradation du système. Ces observations expérimentales seront à la base de l'interprétation des mesures effectuées au cours de l'expérience.

### *4.7.3. Résultats expérimentaux*

L'évolution dans le temps du signal de pente moyenne et de débit solide en sortie du canal est présentée sur la Figure 100. Le premier constat est que **210 heures** sont nécessaires pour que le système atteigne les conditions d'équilibre.

Le système montre un comportement très complexe et de larges fluctuations de pente et de débit solide sont mesurées au cours de toute la durée de l'expérience. La pente moyenne varie entre une valeur minimale de **8.5 %** (condition initiale d'expérimentation) et la pente finale d'équilibre de **12.2 %**.



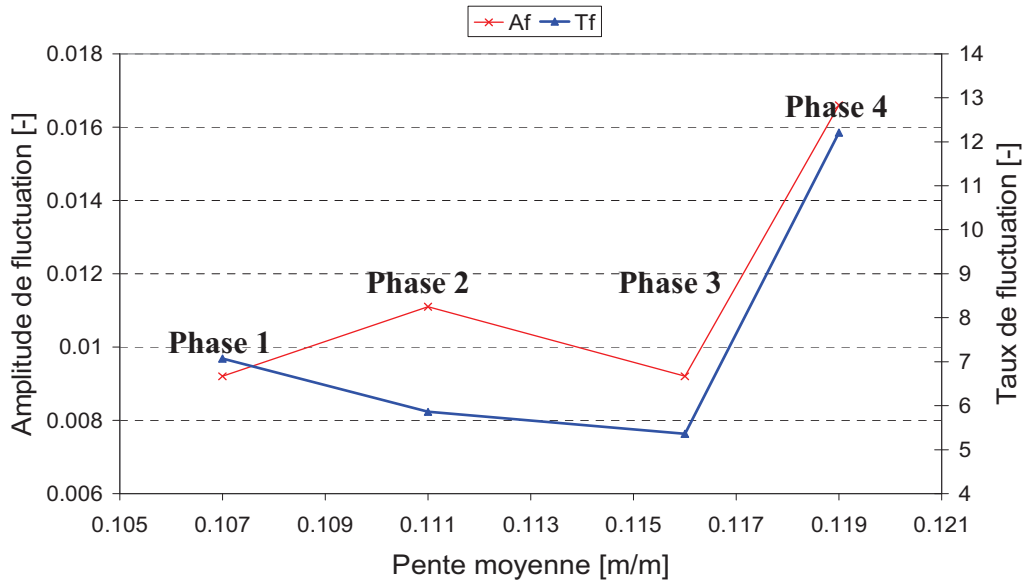
**Figure 100** : Comportement global du système dans le temps ; évolution dans le temps du débit solide total en sortie du canal (courbe noire) et de la pente moyenne (courbe orange). En bleu la moyenne mobile du signal calculée sur 50 points.

Les mesures montrent que le signal de pente semble se stabiliser au moins quatre fois (Figure 100). Après une phase de démarrage d'environ 17 h, caractérisée par une augmentation rapide de la pente moyenne du système et par des débits solides faibles par rapport aux valeurs mesurées au cours de l'expérience, nous avons pu distinguer quatre phases de « pseudo-équilibre », dans lesquelles la pente et le débit solide fluctuent autour d'une valeur moyenne. Les passages entre les phases de pseudo-équilibre sont très brusques en ce qui concerne la transition entre la Phase de démarrage et la Phase 1, ainsi qu'entre la Phase 1 et la Phase 2. Ils le sont un peu moins entre la Phase 2 et la Phase 3, ainsi qu'entre la Phase 3 et la Phase 4. Chaque phase est associée à des fluctuations de la pente instantanée et du débit solide, qui varie entre une valeur minimale de 0.17 g/s et une valeur maximale de 72 g/s.

Nous avons utilisé l'amplitude de fluctuation  $A_f$  et le taux de fluctuation  $T_f$  définis dans la Partie 2 afin d'interpréter la dynamique du système autour d'une valeur de « pseudo-équilibre » (Tableau 29).

Période [h]	$S_o$ [m/m]	$S_{max}$ [m/m]	$Q_{smoy}$ [g/s]	$T_f$ [-]	$A_f$ [-]
18 – 82	0.107	0.111	5.34	7.07	0.0092
83 – 133	0.111	0.116	5.338	5.86	0.0111
135 – 177	0.116	0.121	5.23	5.36	0.0092
180 – 207	0.119	0.125	5.04	12.21	0.0166

**Tableau 29** : Récapitulatif des quatre phases d'équilibre dynamique observées pendant la manipulation.



**Figure 101** : Taux de fluctuation  $T_f$  et amplitude de fluctuation  $A_f$  [-] en fonction de la pente d'équilibre dynamique pour les quatre phases de pseudo-équilibre du système ; le débit solide d'alimentation du système est égal à 6 g/s.

La première phase de pseudo-équilibre pour le système est observée entre 18 et 82 h. Pendant toute cette période, le système semble fluctuer autour d'une pente d'équilibre de 0.107. Le débit moyen en sortie du canal est d'environ 5.34 g/s, inférieur au débit d'alimentation solide, et le taux de fluctuation  $T_f$  [-] et l'amplitude de fluctuation  $A_f$  [-] sont respectivement de 7.07 et 0.0091 (Figure 101).

La Phase 2 est comprise entre 83 et 133 h ; le système augmente encore la valeur de sa pente d'équilibre dynamique qui atteint une valeur de 0.111. Le débit solide moyen en sortie du système ne change pas sensiblement (environ 5.34 g/s comme pour la phase 1) mais le taux de fluctuation  $T_f$  [-] diminue et atteint une valeur de 5.46 (Figure 101). L'amplitude de fluctuation  $A_f$  [-] augmente légèrement jusqu'à une valeur de 0.0105 (Figure 101).

Pendant la Phase 3, entre 135 et 177 h, le système augmente encore sa pente moyenne d'équilibre jusqu'à une valeur de 0.116. Cependant, le débit solide a encore tendance à diminuer ; le débit solide moyen en sortie du canal est de 5.23 g/s, ce qui correspond à un taux de fluctuation  $T_f$  [-] de 5.36 (Figure 101). Cette phase de « faible » transport est aussi caractérisée par une diminution de l'indice d'amplitude de fluctuation  $A_f$  [-] qui se reporte à la valeur initiale de 0.0092 (Figure 101).

Pendant la phase 4, entre 180 et 207 heures, le système augmente progressivement sa pente moyenne jusqu'à une valeur d'environ 12 %. Le débit d'équilibre dynamique diminue encore jusqu'à une valeur de 5.04 g/s. Cependant, contrairement à ce qu'on avait pu observer pour les trois phases précédentes, le taux de fluctuation augmente jusqu'à une valeur de 12.1 (Figure 101). Cette augmentation du taux de fluctuation est associée à une nette augmentation de l'amplitude de fluctuation qui atteint alors sa valeur maximale de 0.016 (Figure 101).

Pendant cette phase le système s'approche de la condition d'équilibre dynamique (de 12.2 %). Ceci correspond à une large érosion du canal, observée après que le système a atteint sa valeur de pente maximale de 12.5 %. Cette érosion produit un débit solide maximal ponctuel

de 72 g/s et a concerné plusieurs parties du lit mobile. Ce comportement sera analysé par la suite.

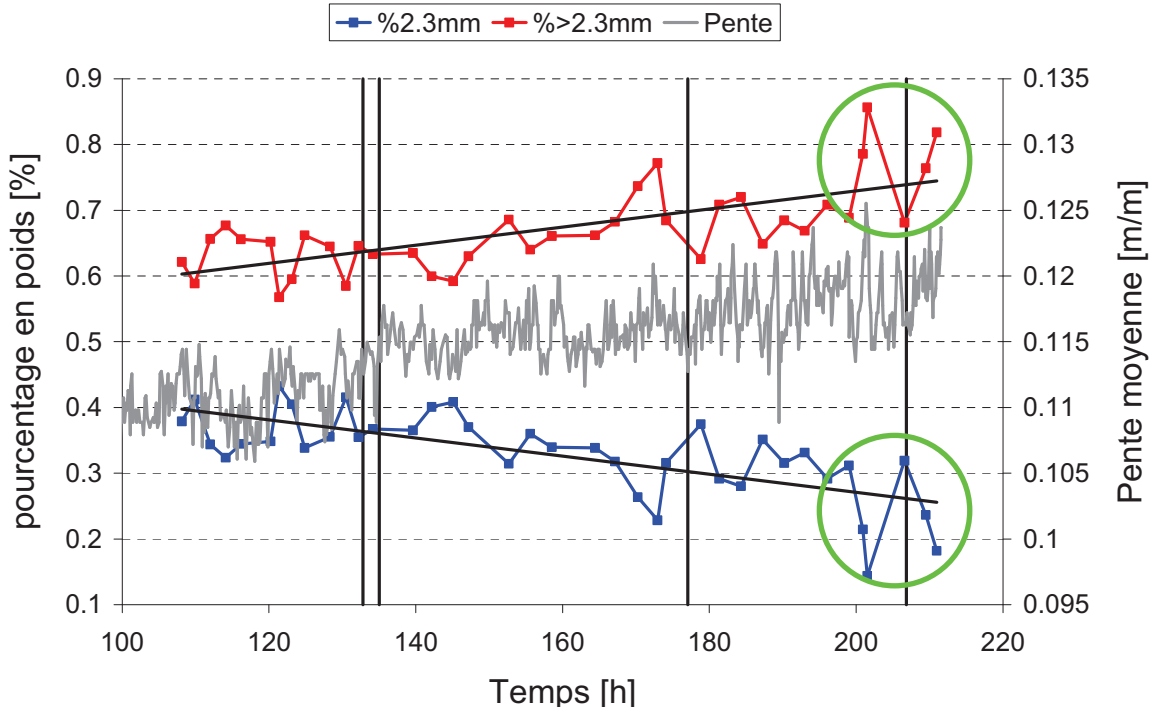
### Granulométrie de surface

Pour l'expérience en phase d'aggradation, nous avons arrêté la manipulation 38 fois. A chaque arrêt, un profil granulométrique complet du lit a été réalisé. Les profils du lit (chacun composé de 17 photos) ont débuté à 108 h.

Pour des raisons de clarté, nous avons choisi de partager le mélange en deux groupes de particules, l'un avec des particules de diamètre inférieur ou égal à 2.3 mm, l'autre avec des particules de diamètre supérieur à 2.3 mm (voir **Figure 102**).

Les mesures montrent que l'augmentation globale de la pente moyenne et la diminution du débit solide sont associées à la formation progressive d'un pavage de surface. Ce pavage se matérialise par une progressive disparition des éléments fins de la surface du lit. Le pourcentage de particules fines sur la surface (**Figure 102**) passe d'une valeur initiale de 40 % (correspondant à leur pourcentage dans le mélange d'alimentation) à une valeur de 18 %, alors que les particules de diamètre supérieur à 2.3 mm passent globalement de 60 % à 78 %. Les valeurs de fin expérience sont les mêmes mesurés à l'équilibre pour l'expérience à *Faible Transport* (voir Chapitre 3).

Il est tout de même intéressant d'observer que des fluctuations plus grandes des proportions de sédiments fins et de sédiments grossiers sur le lit sont mesurées quand le système s'approche globalement de l'équilibre (voir cercles verts sur la **Figure 102**).



**Figure 102** : Evolution dans le temps du pourcentage en poids des fractions granulométriques qui composent la couche de surface (de diamètre inférieur ou égal à 2.3 mm en bleu et supérieur à 2.3 mm en rouge) ; des courbes de tendance linéaires (en noir) ont été tracées.



Temps [h]	2.3 mm [%]	> 2.3 mm [%]	D <sub>m</sub> [mm]	D <sub>84</sub> [mm]
108.2	0.38	0.62	6.0	9.0
109.9	0.41	0.59	8.8	14.7
112.0	0.34	0.66	9.0	15.3
114.1	0.32	0.68	8.9	14.7
116.2	0.34	0.66	9.3	14.9
120.2	0.35	0.65	9.1	14.8
121.4	0.43	0.57	9.2	15.0
123.1	0.40	0.60	8.7	15.1
124.9	0.34	0.66	9.2	15.4
128.3	0.36	0.64	9.7	15.5
130.5	0.42	0.58	9.5	15.5
132.2	0.35	0.65	8.6	14.8
134.2	0.37	0.63	9.1	15.1
139.6	0.37	0.63	9.3	15.3
142.2	0.40	0.60	9.1	15.1
145.1	0.41	0.59	9.0	15.2
147.2	0.37	0.63	8.4	14.3
152.7	0.31	0.69	9.5	15.6
155.6	0.36	0.64	9.4	15.0
158.5	0.34	0.66	9.3	15.4
164.4	0.34	0.66	9.3	15.2
167.2	0.32	0.68	9.2	15.0
170.3	0.26	0.74	9.4	15.3
172.9	0.23	0.77	10.0	15.3
174.1	0.32	0.68	9.8	15.2
178.8	0.37	0.63	9.5	15.4
181.4	0.29	0.71	8.7	14.6
184.3	0.28	0.72	9.2	14.7
187.3	0.35	0.65	9.4	14.9
190.2	0.32	0.68	9.1	15.1
193.0	0.33	0.67	8.9	14.3
196.1	0.29	0.71	9.0	14.9
199.0	0.31	0.69	9.2	14.6
200.9	0.21	0.79	8.6	13.8
201.5	0.14	0.86	9.6	14.5
206.6	0.32	0.68	10.0	14.1
209.5	0.24	0.76	8.6	14.2
211.0	0.18	0.82	9.4	14.6

**Tableau 30** : Proportion de sédiments fins (2.3 mm) et grossiers (> 2.3 mm) et diamètres représentatifs de la granulométrie de surface.

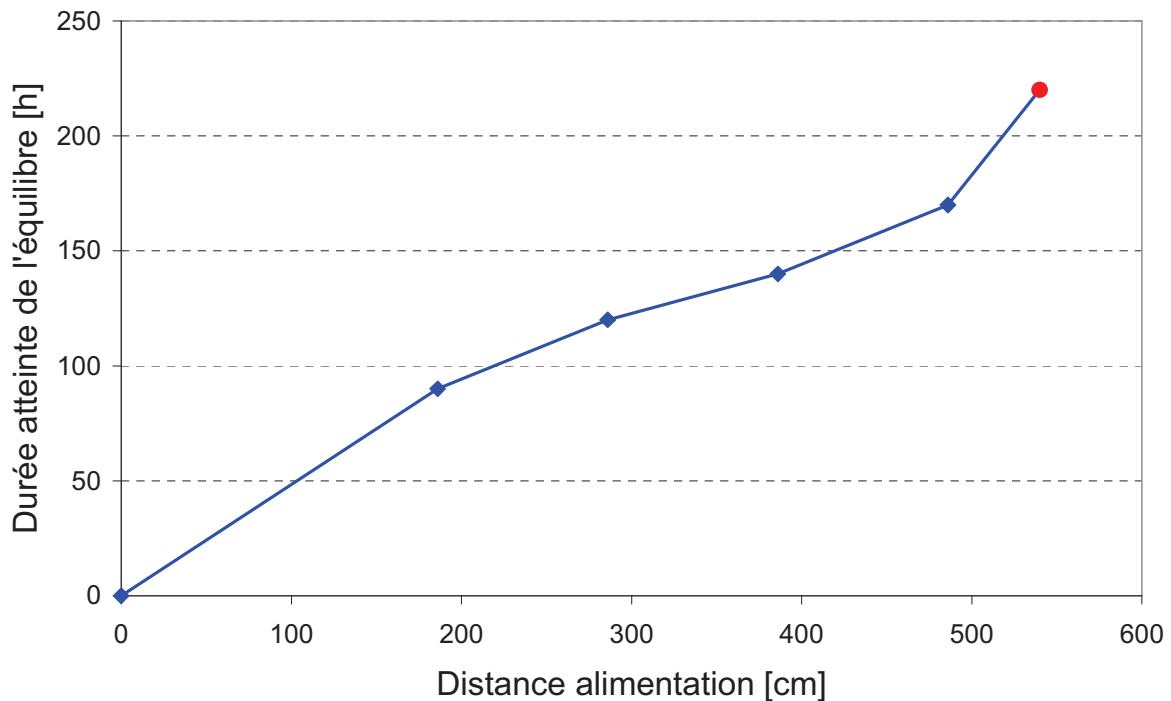
#### 4.7.4. Analyse du phénomène d'aggradation

Nous cherchons ici à comprendre le phénomène d'aggradation à travers une analyse locale de la pente du système.

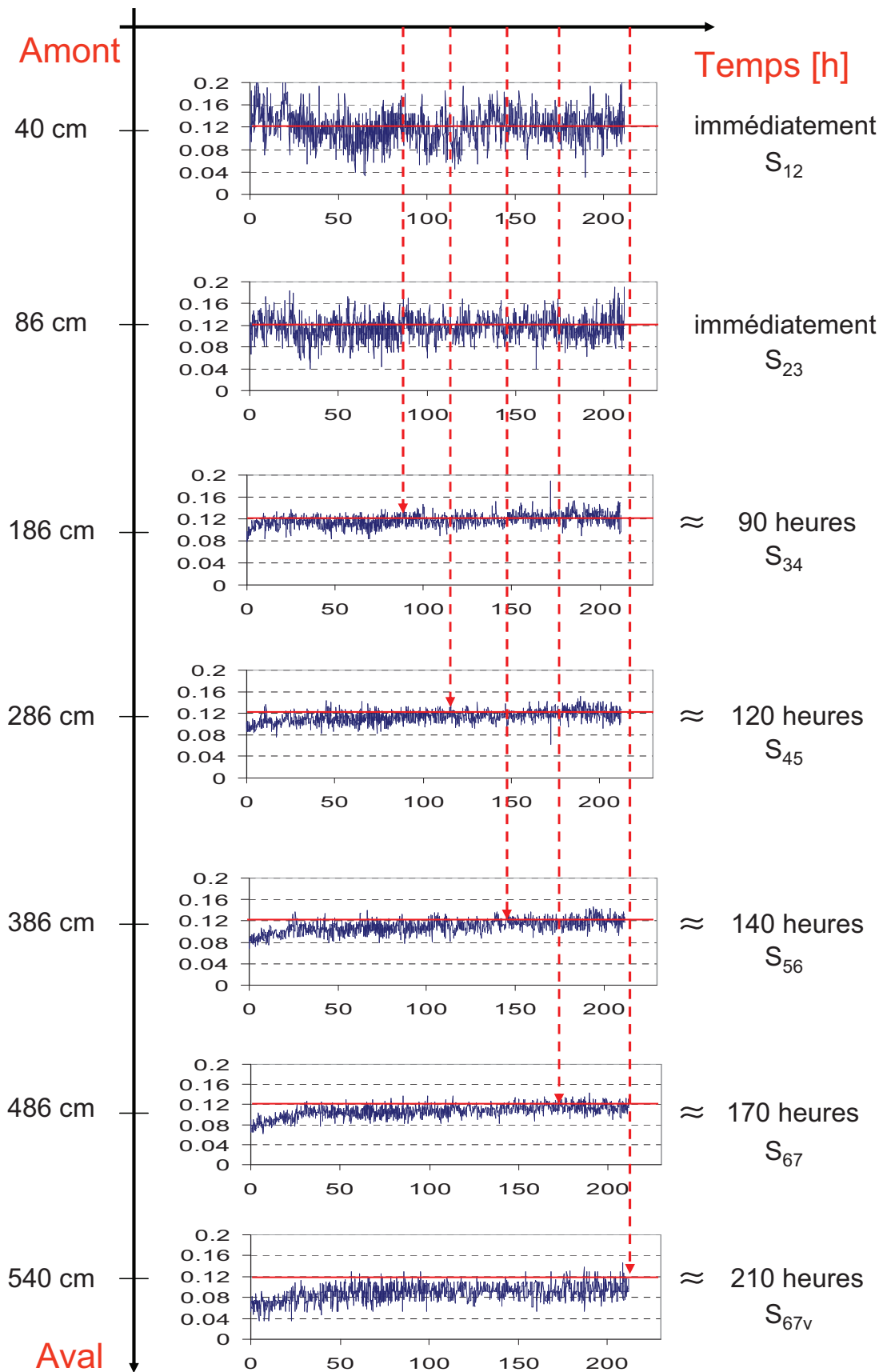
Nous avons observé l'évolution du signal de pente locale dans le temps et dans l'espace afin de mesurer quand (et où) le système atteint l'équilibre dynamique. Les résultats de cette analyse sont reportés sur la Figure 104 et la Figure 103 en fait la synthèse.

La Figure 104 montre l'évolution dans le temps (en abscisse) du signal de pente locale mesuré entre deux jauges (Figure 41, chapitre 2). Les signaux ont été représentés dans l'ordre amont-aval (en ordonnée). Les lignes rouges représentent la pente d'équilibre dynamique pour le système (12.2 %).

La Figure 103 est construite à partir de la Figure 104 et représente le délai d'atteinte de l'équilibre pour les différentes parties du canal.



**Figure 103 :** Durée de temps nécessaire au système pour atteindre de la condition d'équilibre dynamique en fonction de la distance par rapport au système d'alimentation.



**Figure 104 :** Comportement local du système qui atteint l'équilibre progressivement ; les lignes rouges correspondent à la pente d'équilibre dynamique du système (égale à 12.2%).

Les Figure 104 et Figure 103 montrent que les différentes parties du canal atteignent l'équilibre dynamique d'autant plus lentement qu'elles sont éloignées du système d'alimentation.

La partie amont du canal a dès le début atteint la pente d'équilibre dynamique de **12.2 %**. Après la phase de démarrage,  $S_{12}$  et  $S_{23}$  fluctuent autour d'une pente moyenne locale de 12.2%. Les transitions entre les phases de pseudo-équilibre ne sont pas nettes et cette partie continue à fluctuer entre une pente minimale de 0.09 et une pente maximale de 0.15 ce qui correspond à une amplitude de fluctuation  $A_f$  de 0.06, supérieure à celle mesurée pour le système globalement. Ces valeurs élevées de l'amplitude de fluctuation sont associées à la production à haute fréquence de nappes de charriage dans cette partie du canal.

Les parties  $S_{34}$ ,  $S_{45}$ ,  $S_{56}$ ,  $S_{67}$  atteignent l'équilibre après respectivement 90, 120, 140 et 170 heures. Le point rouge sur la Figure 103 représente le temps que nous avons estimé nécessaire pour que tout le système soit à l'équilibre. La différence de comportement entre l'amont et l'aval sera étudiée ci-après.

#### 4.7.5. Analyse des résultats : comportement différencié amont-aval

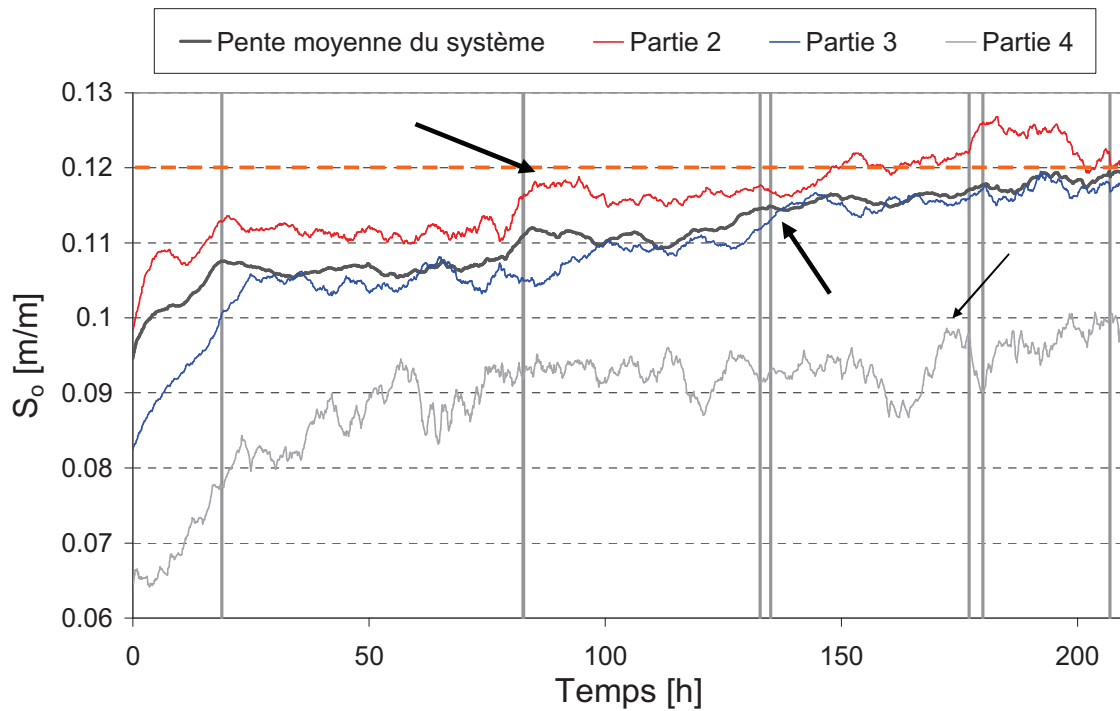
Dans l'analyse, nous avons choisi de décomposer le système en quatre parties, identiques (de même longueur et de emplacement dans le système) aux compartiments utilisés pour l'expérience à *Faible Transport* (Chapitre 3) :

- 1) Une partie amont de 0.8 m de long, comprise entre les jauges 1 et 3 (voir Figure 41, chapitre 2) ;
- 2) Une partie aval, entre la section 7 de mesure (voir Figure 41) et le point fixe en sortie du système ;
- 3) Deux parties centrales, d'environ 2 m de longueur, comprises respectivement entre les jauges 3 et 5, et, 5 et 7 (voir Figure 41).

La partie amont du système est influencée seulement par les conditions d'alimentation. Par conséquent, le système fluctue autour de valeurs d'équilibre dynamique (imposées par les conditions d'alimentation) et n'est pas perturbé par le comportement des parties aval du système. Ceci explique la formation de nappes de charriage à haute fréquence (quand le système atteint localement une pente maximale).

Les parties aval influencent sur le long terme l'évolution du système : la partie  $S_{35}$  (partie 2, Figure 105) semble responsable de la transition entre les phases 1 et 2 de « pseudo-équilibre », la partie  $S_{57}$  (partie 3, Figure 105) de la deuxième entre les phases 2 et 3 de « pseudo-équilibre » et la partie  $S_{7v}$  de la dernière phase de transition (partie 4, Figure 105).

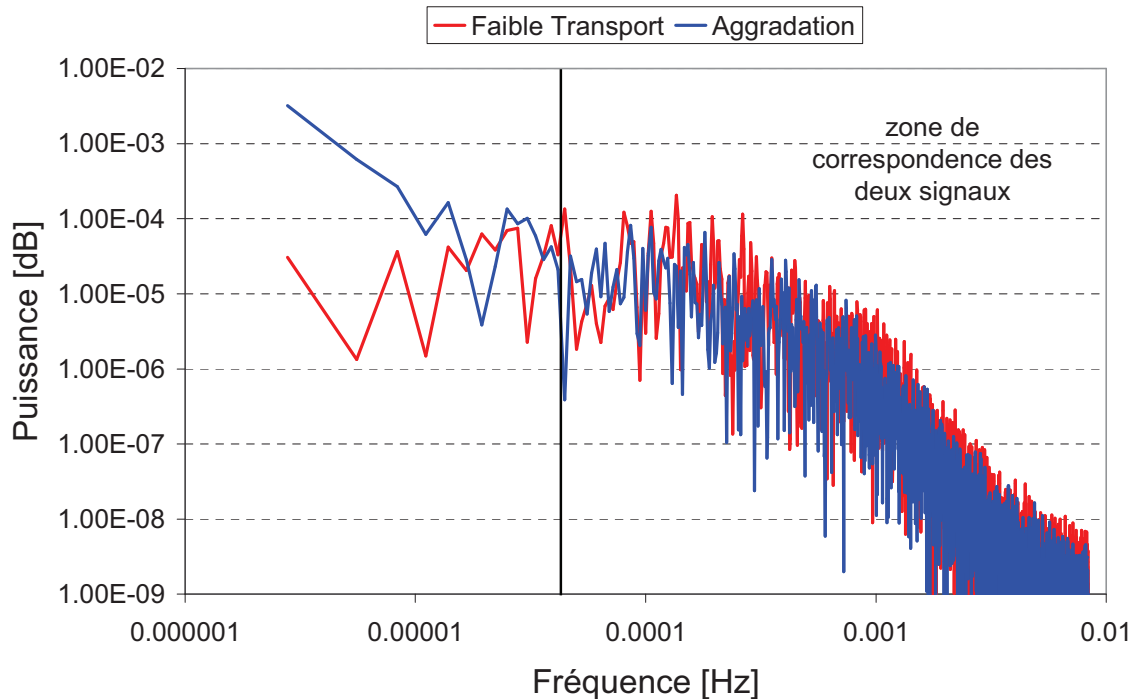
Quand toutes les parties du système s'approchent de la condition d'équilibre dynamique, une grande érosion qui concerne le lit sur toute sa longueur est enregistrée avec un pic de débit solide de 72 g/s à 190 h. Ces valeurs sont proches de celles mesurées dans l'expérience *Faible Transport*. Le système peut, en effet, commencer à produire des érosions à grande échelle, associées à des nappes de charriage de fort impact qui se propagent sur toute la longueur du canal (voir Chapitre 3 pour une description plus détaillée des familles d'érosion observées).



**Figure 105 :** Pente moyenne (sur 50 points) de chaque compartiment dans le temps comparée à la pente moyenne (sur 50 points) du système ; en orange la pente d'équilibre dynamique du système. Les flèches indiquent les compartiments responsables des phases de transition du système.

Ce type de comportement reflète un fonctionnement par compartiments du système (Recking, 2006).

L'analyse de Fourier du signal de pente moyenne (Figure 106) pour l'expérience en aggradation (courbe rouge) est comparée à celle effectuée pour l'expérience à *Faible Transport* (courbe bleue). Pour plus de détails voir Chapitre 3.



**Figure 106** : Spectre de Fourier du signal de pente moyenne pour l'expérience à *Faible Transport* (courbe rouge) et l'expérience en aggradation (courbe bleue) ; la ligne noire représente une période de 375 minutes.

Sur le plan de Fourier, les fréquences fondamentales des deux signaux se ressemblent étroitement jusqu'à une période d'environ 375 minutes (représentée par la ligne noire sur la Figure 106). Pour les périodes supérieures à 375 minutes (plus basses fréquences), les deux signaux, au contraire, ne se superposent pas. Plus précisément, pour l'expérience en phase d'aggradation, pour les basses fréquences, il n'y a pas de pics bien définis sur le plan de Fourier.

Chaque période est associée à un pic de fluctuation du signal de pente moyenne. Nous rappelons ici les fréquences fondamentales associées aux quatre compartiments pour l'expérience à *Faible Transport* (Tableau 31).

	Compartiment 1	Compartiment 2	Compartiment 3	Compartiment 4
$L_{comp}$ [m]	0.87	2	2	0.53
T [min]	20	84	378	1025

**Tableau 31** : Période principales de fluctuation pour l'expérience à *Faible Transport*.

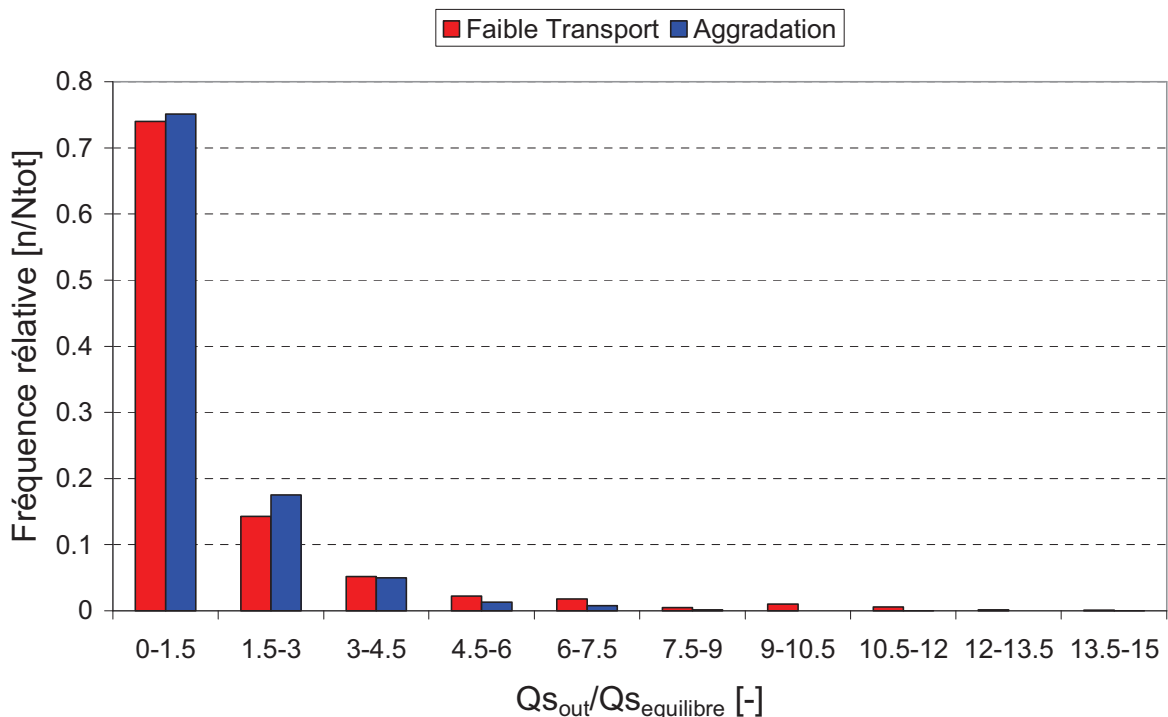
Si nous considérons que les quatre parties du système correspondent aux quatre compartiments définis dans le cadre de l'expérience à *Faible Transport*, une logique de comportement par compartiments (Recking, 2006) peut aider à l'interprétation de ces résultats.

Les compartiments avals ne s'approchent de l'équilibre qu'à la fin de l'expérience (et ceci de façon instable). Ceci peut expliquer pourquoi nous ne mesurons pas de fluctuations à basse fréquence du signal de pente moyenne et l'absence de pics basse fréquence sur le spectre.

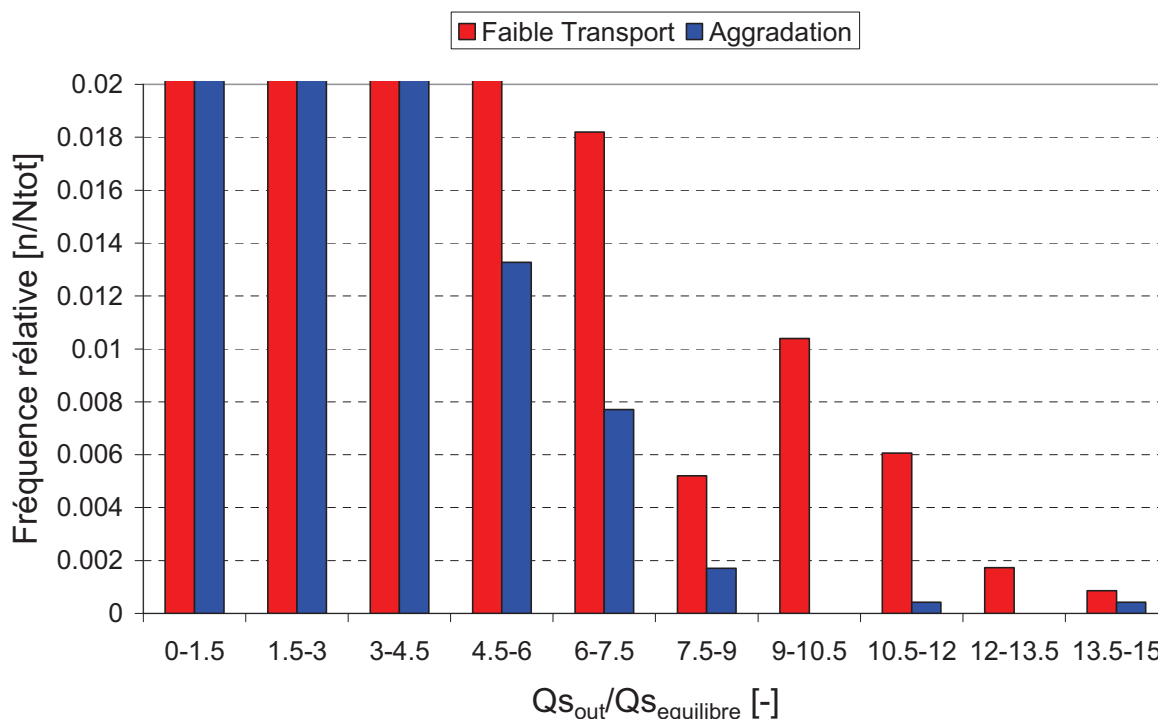
#### 4.7.6. Analyse des résultats : débit solide

Pour l'expérience en phase d'aggradation, nous avons mesuré un taux de fluctuation quasi constant pour toute l'expérience et compris entre 5 et 7 (pour un débit solide maximal d'environ 40 g/s). Cette famille d'érosion avait été associée à des mécanismes d'érosion de proche en proche (qui est le mode principal de transport pour l'expérience à *Faible Transport*, voir chapitre 3).

De même que pour l'expérience *Faible Transport*, nous avons analysé la distribution de fréquence du rapport  $\frac{Q_{s_{out}}}{Q_{s_{equilibre}}}$  mesuré au cours de l'expérience (où  $Q_{s_{out}}$  est le débit moyen mesuré en sortie du système et  $Q_{s_{equilibre}}$  est le débit d'équilibre dynamique). Ces résultats ont été comparés avec ceux obtenus pour l'expérience à *Faible Transport* sur la Figure 107 et sur la Figure 108.



**Figure 107 :** Comparaison entre la distribution de fréquence des rapports  $\frac{Q_{s_{out}}}{Q_{s_{equilibre}}}$  mesurés pour *Faible Transport* et pour l'expérience en aggradation.



**Figure 108** : Comparaison entre la distribution de fréquence des rapports  $\frac{Q_{s_{out}}}{Q_{s_{equilibre}}}$  mesurés pour l'expérience *Faible Transport* et pour l'expérience en aggradation – zoom sur les basse fréquences.

La Figure 107 suggère que le mode principal de transport pour un système en aggradation (et pour les conditions hydrauliques données) est celui de proche en proche. Notamment, les érosions associées à la destruction des seuils (qui avaient été quantifiées au cours de l'expérience *Faible Transport* par un débit solide de 40 g/s) sont presque le seul phénomène érosif mesuré (la probabilité d'observer une érosion inférieure à 40 g/s, c'est-à-dire six fois le débit d'équilibre, est supérieur à 95 %).

L'expérience à l'équilibre (*Faible Transport*) a, globalement, une capacité de transport maximale plus grande (la fréquence des érosions supérieures à 40 g/s associées à un comportement par compartiments est supérieure à celle mesurée pour l'expérience en aggradation, voir Figure 108). Ces érosions avaient été associées à la propagation de nappes de charriage au cours de l'expérience à *Faible Transport* (érosions à grande échelle). Les nappes de charriage se produisaient « rarement » (par rapport aux autres érosions) mais se propageaient avec une plus grande efficacité lorsque les différentes parties du canal étaient déjà à l'équilibre.

Pour l'expérience en aggradation, par contre, les nappes de charriage qui se forment à haute fréquence en amont (où le système a atteint localement la condition d'équilibre) se dispersent dans les parties aval, en construction, qui stockent le sédiment pour atteindre la pente d'équilibre.

Ceci pourrait aussi expliquer pourquoi à la fin de l'expérience, quand les différentes parties du système sont proches de l'équilibre, nous avons mesuré une grande érosion (la seule mesurée



au cours de 210 heures) associée à un taux de fluctuation d'environ 12 qui est similaire (bien qu'inférieur) à celui observé pour l'expérience « *Faible Transport* ».

#### 4.7.7. Conclusions

Cette expérience est originale dans le sens qu'elle décrit une aggradation pour une durée de temps aussi longue (210 heures) sous des conditions hydrauliques constantes et très proches de la mise en mouvement du matériau qui compose le mélange d'alimentation (voir Chapitre 3 pour l'estimation des conditions hydrauliques). L'aggradation que nous avons « produit » dans le système est une conséquence de la recherche de l'équilibre dynamique pour le système à partir d'une condition initiale de non équilibre.

Les résultats obtenus montrent que plusieurs centaines d'heures sont nécessaires avant d'atteindre globalement l'équilibre dynamique et que, du fait du tri-granulométrique (qui ne dépend que des conditions d'alimentation), l'équilibre peut être observé dès les premières heures en entrée du canal.

L'aggradation est un phénomène qui se produit dans la direction amont-aval. La partie amont, sous l'influence directe de l'alimentation solide, atteint l'équilibre immédiatement. Les parties aval atteignent l'équilibre progressivement avec une périodicité qui augmente dans la direction amont-aval.

L'aggradation est associée à un stockage de sédiments dans le système (augmentation de la pente moyenne) et une diminution de débit solide dans le temps.

Les fluctuations de transport et de granulométrie de surface augmentent soudainement quand le système atteint (ou s'approche) la condition d'équilibre dynamique. Ce résultat a été expliqué par la logique de comportement par compartiments.

Le phénomène d'aggradation est aussi associé à la formation d'un pavage de surface stable, avec une granulométrie de surface de plus en plus grossière dans le temps (Figure 102). Cependant, d'autres études ont trouvé des résultats opposés aux nôtres, avec un phénomène d'aggradation qui correspond à une granulométrie de surface de plus en plus fine (Madej et al. 2009).

Les différences trouvées entre nos résultats et ceux de Madej et al. (2009) sont probablement liées aux protocoles expérimentaux utilisés, Madej et al. (2009) ayant produit le phénomène d'aggradation en augmentant le taux solide d'alimentation du système.

#### 4.8. CAS 2 : L'influence de seuils de correction torrentielle sur la dynamique du système

##### 4.8.1. Introduction et conditions expérimentales

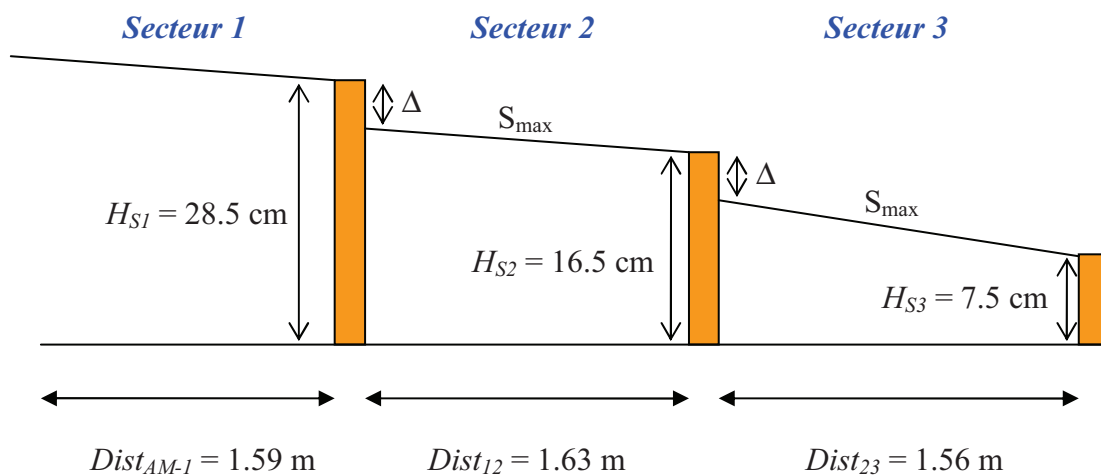
Un problème opérationnel important dans le cadre de l'aménagement du territoire montagnard et de la lutte contre l'érosion est celui du positionnement de seuils de correction torrentielle.

Notoirement, les objectifs d'un aménagement présentant des seuils de correction torrentielle sont la stabilisation du torrent (à travers une diminution de la contrainte hydraulique de l'écoulement effectuée par une diminution de la pente du système et l'augmentation du frottement) et la diminution des volumes transportés par le système (Conesa-Garcia et al., 2007).

Les seuils sont dimensionnés (et positionnés) dans le système de façon à reproduire une morphologie à step-pools, celle-ci étant considérée comme une condition d'équilibre stable pour le système torrentiel (Lenzi et Comiti, 2003). Par conséquent, différentes relations géométriques ont été proposées dans la littérature afin de dimensionner la profondeur du seuil  $H$  [m] et la distance entre deux seuils  $L$  [m] en fonction de la pente du système (Conesa-Garcia et al., 2007).

L'objectif de notre expérience est d'analyser l'influence de deux seuils sur la dynamique de transport. Cette dynamique sera comparée à l'expérience à *Fort Transport* dont la dynamique d'évolution autour de l'équilibre a été analysée au cours du Chapitre 4.

Nous avons choisi de positionner deux seuils dans le système. Le canal se trouve partagé en trois parties, que nous appellerons « secteurs » et que nous avons numérotées dans la direction amont-aval. Plus précisément, le **Secteur 1** est la partie amont du canal, comprise entre le système d'alimentation et le seuil 1, le **Secteur 2** est la partie comprise entre le seuil 1 et le seuil 2 et le **Secteur 3** est la partie comprise entre le seuil 2 et la sortie du système.



**Figure 109** : Schéma du dispositif expérimental comprenant deux seuils.

Nous avons choisi la hauteur des seuils et la distance entre deux seuils de telles sortes que les trois parties du canal soient complètement indépendantes entre elles. Notamment, sur la base des résultats obtenus au cours de toutes les expériences réalisées, des fluctuations de la pente locale entre un minimum et un maximum sont prévisibles pour chaque secteur. Par conséquent, pour les secteurs 2 et 3, si le seuil amont (respectivement  $H_{S1}$  et  $H_{S2}$ ) n'est pas assez haut, il risque d'être enseveli par le matériau qui compose le lit quand le secteur atteint sa valeur de pente maximale. Dans ce cas, il y aurait périodiquement une continuité entre les deux secteurs, chose que nous voulons éviter.

Sur la base de cette considération, pour le choix de la hauteur des seuils et de leur inter-distance, nous avons supposé que le système peut atteindre une valeur de pente maximale de **0.145**. Cette valeur avait été mesurée comme pente maximale moyenne instantanée dans le cadre de l'expérience à *Fort Transport*.

La relation qui lie la distance entre les seuils qui limitent un secteur, leur hauteur et la pente maximale du système est donnée par l'équation 53 :

$$h_{s-am} = h_{s-av} + dist \cdot S_{max} + \Delta \quad (53)$$

Où :

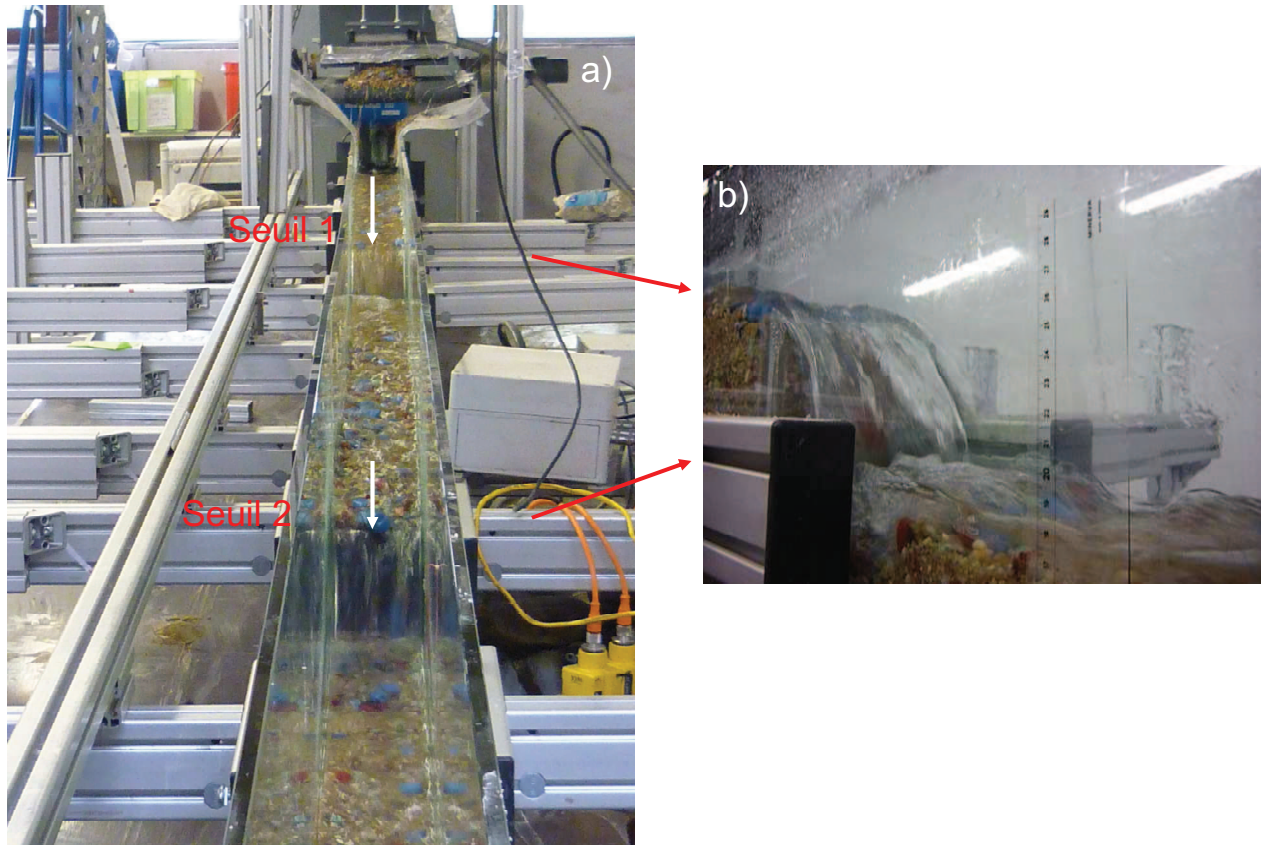
- $h_{s-am}$  [m] est la profondeur du seuil en amont du secteur ;
- $h_{s-av}$  [m] est la profondeur du seuil en aval du secteur ;
- $dist$  [m] est la distance entre deux seuils ;
- $S_{max}$  [m/m] est la pente maximale prévue pour le système (et mesurée au cours de l'expérience à *Fort Transport* dans le Chapitre 4) ;
- $\Delta$  [m] est un facteur de sécurité.

Nous avons calculé les hauteurs du seuil intermédiaire et du seuil en amont à partir de la hauteur de la butée de sortie du canal, égale à **7.5 cm**.

La profondeur des trois seuils et leur positionnement dans le système sont reportés sur la Figure 109. Le canal avec les deux seuils et la discontinuité hydraulique provoquée par la présence des seuils sont représentés sur la Figure 110.

Après avoir positionné positionnés les seuils dans le système, nous avons construit le lit avec un mélange homogène, identique à celui utilisé pour l'alimentation solide du système.

Les conditions d'alimentation imposées au système sont celles utilisée pour l'expérience à *Fort Transport* : débit solide de **60 g/s** et débit liquide de **0.55 l/s**. La durée de l'expérience a été courte (par rapport aux autres réalisées dans la thèse) et est égale à environ **18 heures**.



**Figure 110 :** a) Dispositif expérimental avec les seuils ; b) Exemple de discontinuité hydraulique générée par les seuils.

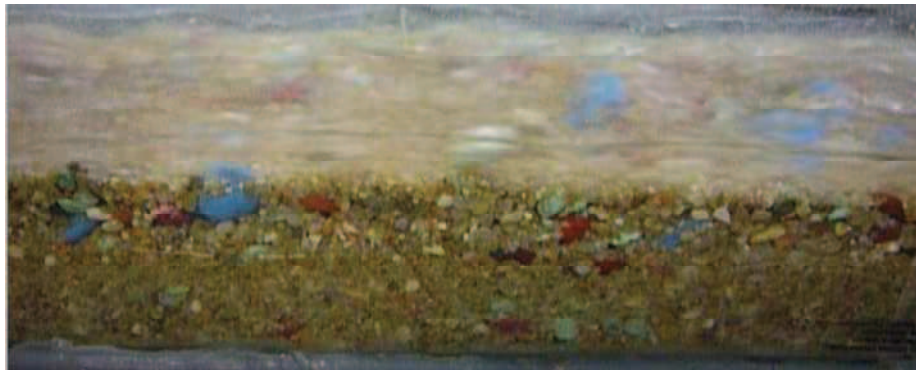
#### 4.8.2. Observations expérimentales

Une première observation est que durant toute l'expérience, les seuils n'ont jamais été ensevelis par le matériau du lit au cours d'une phase d'aggradation. Le critère de calcul utilisé (Eq. 53) a donc apporté les résultats espérés.

Pour chaque secteur nous avons observé de larges fluctuations de la pente et du débit solide. Ces fluctuations sont associées à la production et à la propagation de nappes de charriage dans le système.

Comme pour l'expérience à *Fort Transport* (Chapitre 4), les fluctuations de transport solide pour chaque secteur sont accompagnées de transformations morphologiques du lit. Notamment, la pente minimale est observée à la fin d'une phase d'érosion (lit plat érodé) suite à la production d'une nappe de charriage (Figure 111a) ; la phase d'aggradation est associée à la formation et à la destruction très rapide de step-pools dans le système jusqu'à la formation d'un pavage uniforme à forte pente sur toute la longueur du secteur (Figure 111c).

Toutes les morphologies observées ont déjà été décrites plus précisément dans le Chapitre 4 (expérience à *Fort Transport*). Néanmoins, en raison de la présence de seuils dans le système, nous n'avons jamais observé de phénomène érosif qui aurait concerné le canal sur toute sa longueur et sur une longue durée. Le cycle de formation/destruction du pavage est observé pour chaque secteur. La fréquence et l'impact des phénomènes érosifs seront analysés dans la suite (4.8.4) et comparée avec l'expérience à *Fort Transport*.



Propagation d'une nappe de charriage : le système atteint la pente minimale



Reconstruction du lit et formation des step-pools



Lit pavé à forte pente

**Figure 111** : Expérience avec seuils ; états du lit observés périodiquement pour chaque secteur du canal.

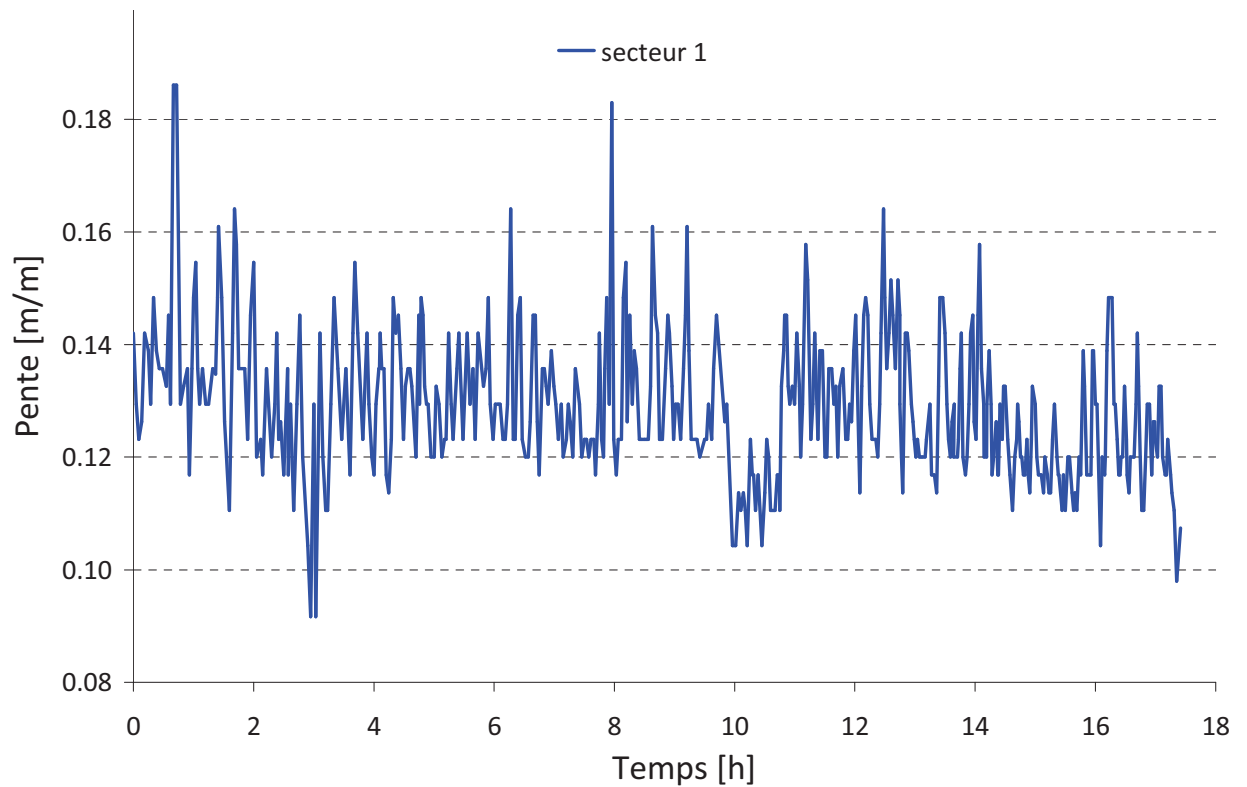
#### 4.8.3. Résultats globaux : pente et débit solide

Une synthèse des résultats concernant l'évolution de la pente locale pour chaque secteur est reportée dans le Tableau 32.

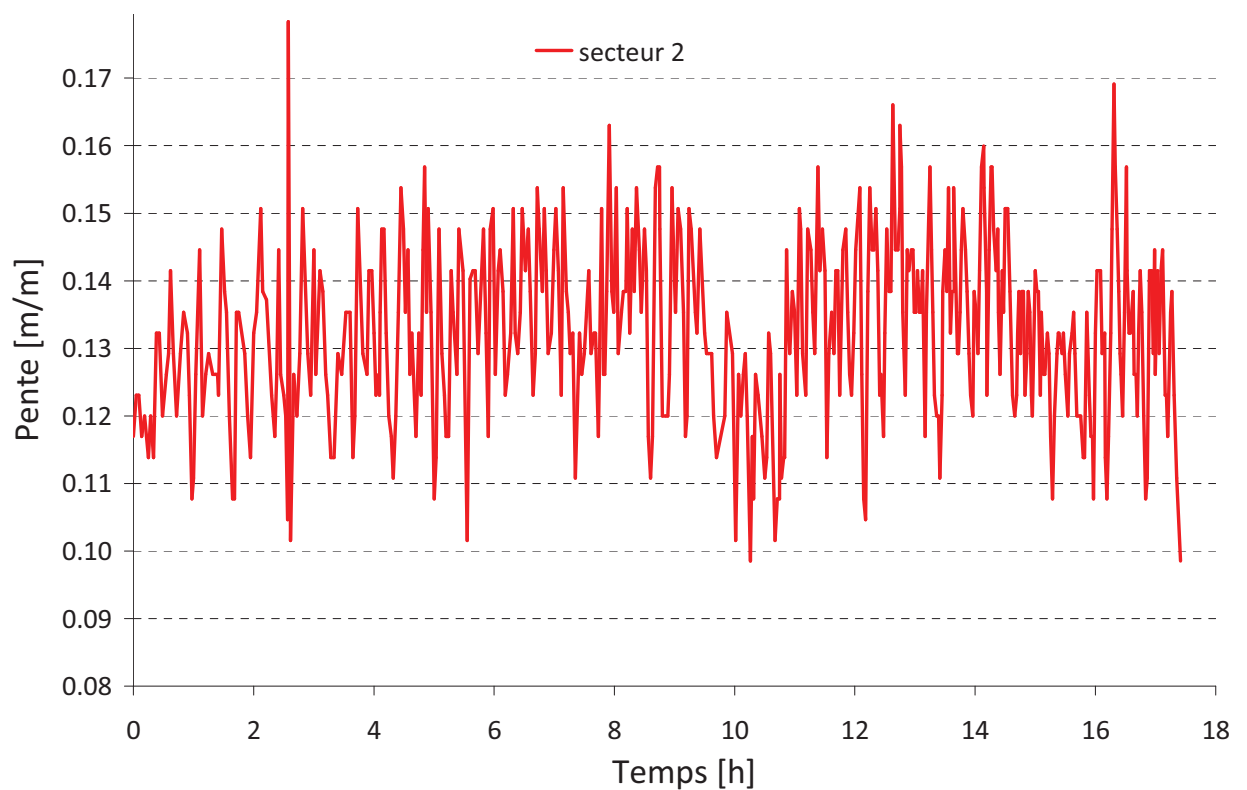
	<i>Secteur 1</i>	<i>Secteur 2</i>	<i>Secteur 3</i>	<i>Fort Transport</i>
$S_{max}$ [m/m]	0.155	0.154	0.136	0.155
$S_{min}$ [m/m]	0.11	0.107	0.094	0.11
$S_{moy}$ [m/m]	0.128	0.132	0.113	0.122
$A_f$ [-]	0.045	0.047	0.042	0.045

**Tableau 32** : Synthèse des résultats expérimentaux obtenus pour les trois secteurs.

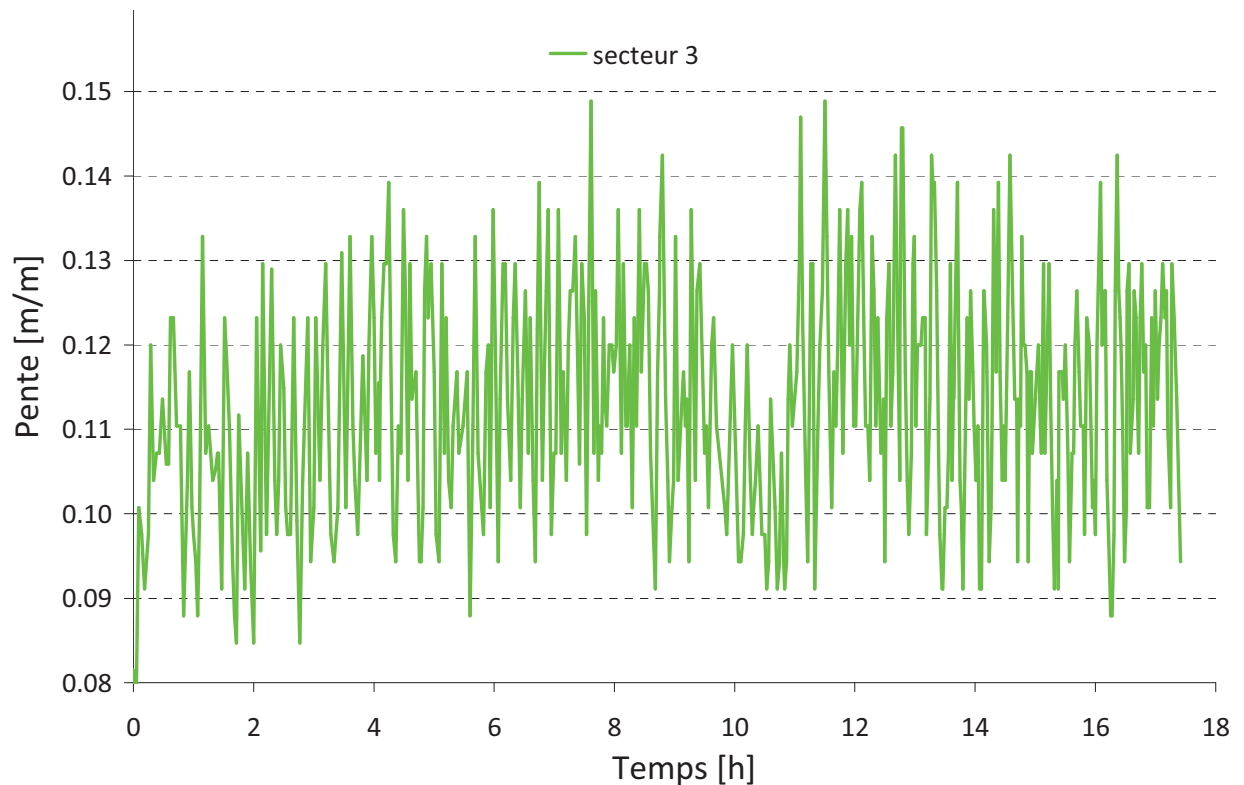
Les mesures de l'évolution dans le temps du signal de pente pour chaque secteur sont reportés sur la Figure 112 (Secteur 1), sur la Figure 113 (Secteur 2) et sur la Figure 114 (Secteur 3).



**Figure 112 :** Evolution dans le temps du signal de pente moyenne locale pour le Secteur 1.



**Figure 113 :** Evolution dans le temps du signal de pente moyenne locale pour le Secteur 2.



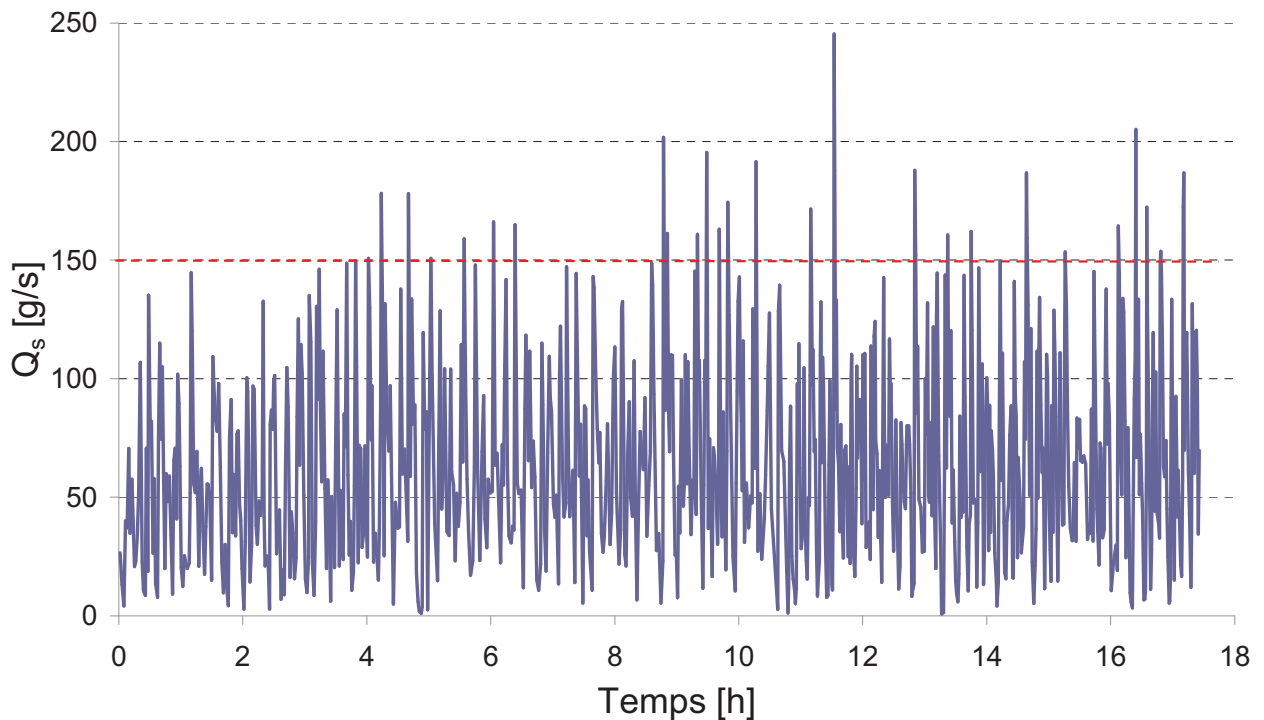
**Figure 114 :** Evolution dans le temps du signal de pente moyenne locale pour le Secteur 3.

Les mesures expérimentales montrent que le **Secteur 1** fluctue à très haute fréquence entre une valeur maximale moyenne d'environ **0.155** et une valeur minimale moyenne d'environ **0.11**. Ces valeurs correspondent à une amplitude de fluctuation  $A_f$  [-] de 0.045, proche de celle mesurée dans le cadre de l'expérience à *Fort Transport*. La pente moyenne mesurée est d'environ **12.8 %** et est donc supérieure à la pente d'équilibre mesurée pour l'expérience *Fort Transport*.

Le **Secteur 2**, compris entre les seuils 1 et 2, fluctue également à très haute fréquence au cours de toute l'expérience. La pente moyenne locale varie entre une valeur minimale de **0.107** et une valeur maximale de **0.154** pour une valeur de l'amplitude de fluctuation de 0.047. La pente moyenne est d'environ **0.132**, supérieure à celle à laquelle on s'attendrait pour les conditions d'alimentation imposées.

Le **Secteur 3**, compris entre les seuils 2 et 3 (le point de sortie du système), fluctue entre une pente maximale moyenne de **0.136** et une pente minimale moyenne de **0.094**, pour une valeur de l'amplitude de fluctuation de 0.042. La pente moyenne locale est d'environ **0.113**, valeur inférieure à celle de l'équilibre dynamique du système.

Les fluctuations de pente se traduisent par des fluctuations de débit solide. Celui-ci fluctue, avec une très grande fréquence, entre une valeur minimale d'environ **1 g/s** et une valeur maximale d'environ **150 g/s** (Figure 115). Le débit solide moyen mesuré à la sortie du système est d'environ **60 g/s**, égal aux conditions d'alimentation. Le système est donc globalement dans les conditions d'équilibre dynamique. Ces valeurs correspondent à un taux de fluctuation  $T_f$  [-] d'environ 2.7. Néanmoins, ponctuellement, des pics de débit solide supérieurs à **150 g/s** ont été mesurés. Ces pics sont rares et ont été analysés ci-après.



**Figure 115 :** Débit solide moyen mesuré en sortie du système ; en rouge le débit solide maximum moyen attribué au système.

#### 4.8.4. Comparaison avec l'expérience à Fort Transport

Sur la base des mesures de pente et de débit solide, nous pouvons tirer trois conclusions principales :

1. le taux de fluctuation  $T_f$  [-] du système avec seuils (égal à 2.7) est sensiblement identique au taux de fluctuation mesuré pour un système sans seuils (égal à 3) : de ce fait, nous pouvons en conclure que l'intensité des phénomènes érosifs est la même pour les deux systèmes ;
2. la pente moyenne des trois secteurs est différente de la pente d'équilibre dynamique mesurée pour l'expérience à *Fort Transport* : elle en est supérieure pour les Secteurs 1 et 2 et inférieure pour le Secteur 3 ;
3. le **Secteur 1** (le plus proche à l'alimentation solide) et le **Secteur 2** fluctuent entre les mêmes extrêmes de pente que ceux mesurés au cours de l'expérience à *Fort Transport*.

Le **Secteur 1** peut être assimilé à l'expérience à *Fort Transport* mais avec une longueur spatiale plus limitée. Par conséquent, les fluctuations du système entre les deux extrêmes (et donc l'amplitude de fluctuation) sont les mêmes et sont uniquement imposés par les conditions d'alimentation. Néanmoins, la pente moyenne du **Secteur 1** est supérieure à celle mesurée lors de l'expérience à *Fort Transport*. Ce résultat est difficile à interpréter mais pourrait être associé à la présence du seuil dont l'effet serait de stabiliser localement le pavage du lit (en bloquant préférentiellement les éléments grossiers) favorisant une aggradation.

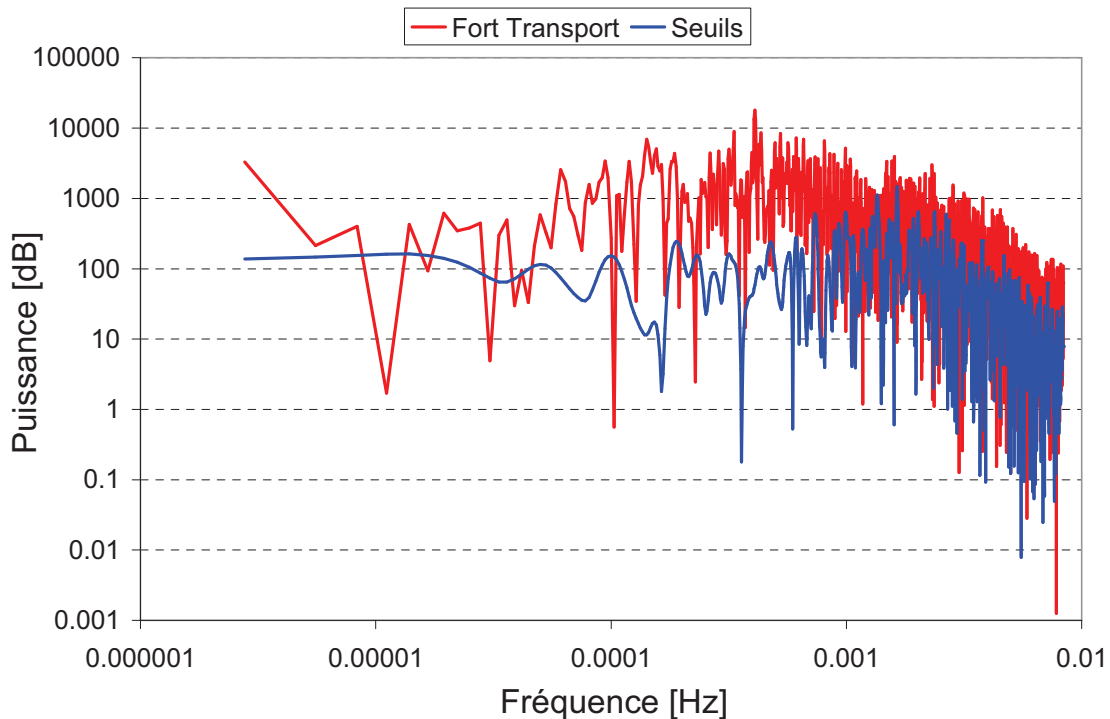


Un effet similaire pourrait se produire dans le *Secteur 2*, dont la pente moyenne est supérieure à celle mesurée au cours de l'expérience *Fort Transport*.

Etant donné que l'intensité des phénomènes érosifs est sensiblement identique à celle mesurée dans l'expérience à *Fort Transport*, il est désormais intéressant d'analyser en quoi la présence de deux seuils influence la fréquence des érosions et le volume maximum de matériau transporté (sachant que le volume moyen transporté par les deux systèmes est le même).

### Fréquence des phénomènes mesurés

Pour comparer la fréquence temporelle des érosions mesurées au cours de l'expérience à *Fort Transport* et au cours de l'expérience avec deux seuils, une analyse de Fourier des signaux de débit solide a été effectuée (Figure 116).



**Figure 116 :** Analyse de Fourier du signal de débit solide pour l'expérience à *Fort Transport* (courbe rouge) et pour l'expérience avec deux seuils (courbe bleue).

L'analyse de Fourier du signal de débit solide pour l'expérience à *Fort Transport* (courbe rouge) montre plusieurs pics (chaque pic associé à une famille d'érosion) étalés sur une gamme de périodes allant d'environ 5 minutes à 1000 minutes. Ces familles sont similaires à celle retrouvées sur le signal de pente (local et global) effectué dans le Chapitre 4 et ont été associées aux différentes échelles d'érosions observées expérimentalement (Recking, 2006). Notamment, les érosions courtes seraient associées aux nappes de charriage et n'ont qu'un impact faible sur la morphologie du lit (perturbation locale) et les érosions d'intensité majeure pourraient être associées à plusieurs parties du canal (ou compartiments) en phase.

Le système avec seuils a une signature spectrale complètement différente de celle mesurée pour l'expérience à *Fort Transport*. Les deux signaux sont nettement différents pour les

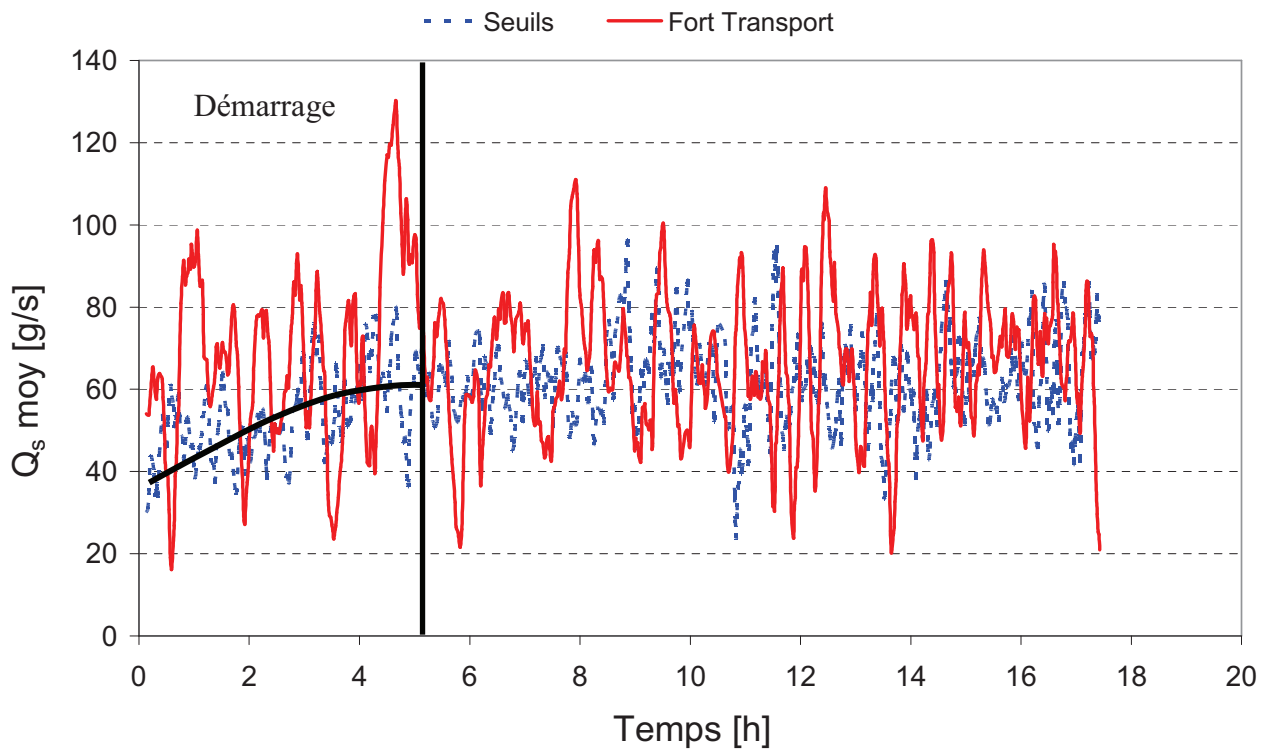
basses fréquences (inférieures à 0.0001 Hz et donc associées à des périodes supérieures à 3 heures) et semblent se rapprocher (bien qu'avec une intensité inférieure pour l'expérience avec seuils) pour les hautes fréquences.

Les différences d'intensité entre les deux spectres pourraient être associées au jeu de données utilisé. Pour l'expérience avec deux seuils (environ 18 heures de durée), nous disposons d'un jeu de données beaucoup moins important que celui de l'expérience à *Fort Transport* (environ 110 heures de durée).

Néanmoins la présence du seuil peut aussi expliquer l'atténuation des basses fréquences, en interrompant la continuité sédimentaire, tout en permettant les érosions à haute fréquence (nappes de charriage). C'est ce qu'on a essayé d'analyser par la suite.

### Volumes transportés

Les deux systèmes sont dans les conditions d'équilibre dynamique correspondant à un débit liquide de **0.55 l/s** et un débit solide de **60 g/s**. Par conséquent, le volume moyen de matériau transporté par les deux systèmes est le même.



**Figure 117 :** Débits solides moyens (moyennes mobiles sur 10 points, soit une périodicité de 15 minutes) mesurés à la sortie du système pour l'expérience *Fort Transport* (courbe rouge) et l'expérience avec deux seuils (courbe bleue) ; la courbe noire indique la phase de démarrage pour l'expérience avec seuils, peu supérieure à 5 heures.

Cependant, si l'on compare les débits solides moyens mesurés pour le système avec seuils (courbe bleue) et celui mesuré pour le système sans seuil (courbe rouge) (Figure 117), il

semble évident que la quantité de matériau transporté au cours d'un seul phénomène érosif peut être très différente.

Afin de quantifier les différences observées sur les signaux de débit solide, nous avons adopté la méthode suivante.

Premièrement, nous avons calculé, pour chaque série de débit solide (avec ou sans seuils) le volume unitaire de matériau transporté par le système au cours d'une seule minute d'expérience. Le volume transporté a été calculé en utilisant la méthode des trapèzes (Eq. 54) :

$$V(t, t + \Delta t) = \frac{\Delta t}{2\rho_s} (Q_s(t) + Q_s(t + \Delta t)) \quad (54)$$

Où :

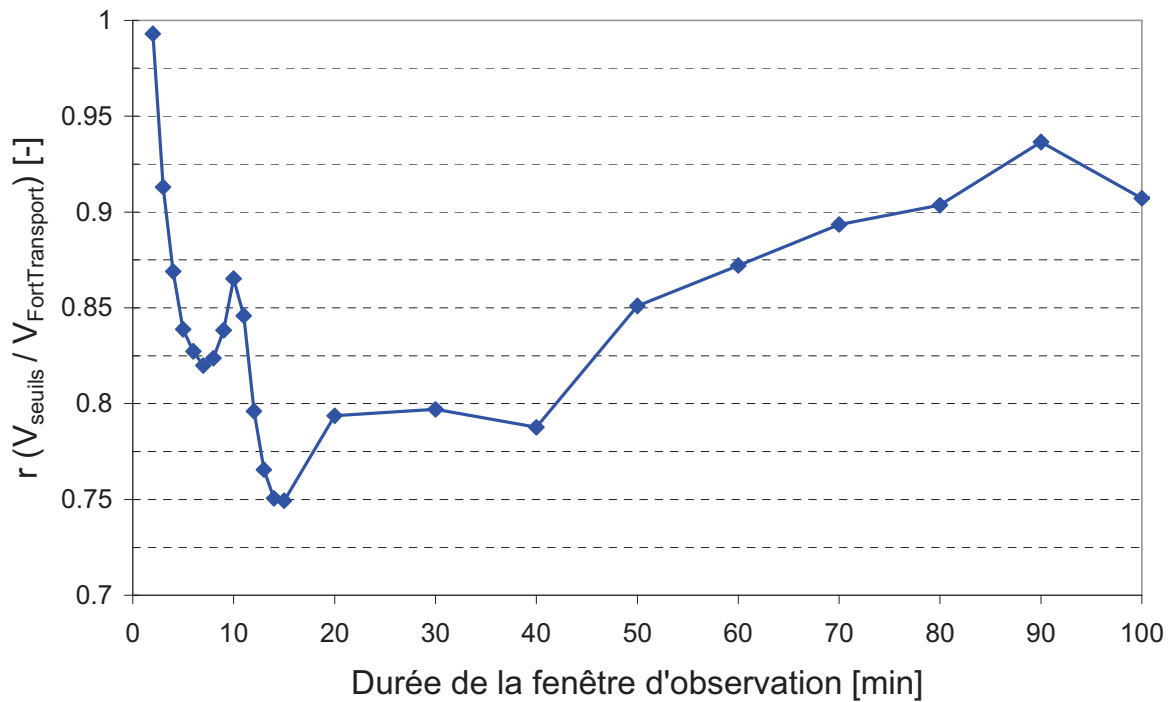
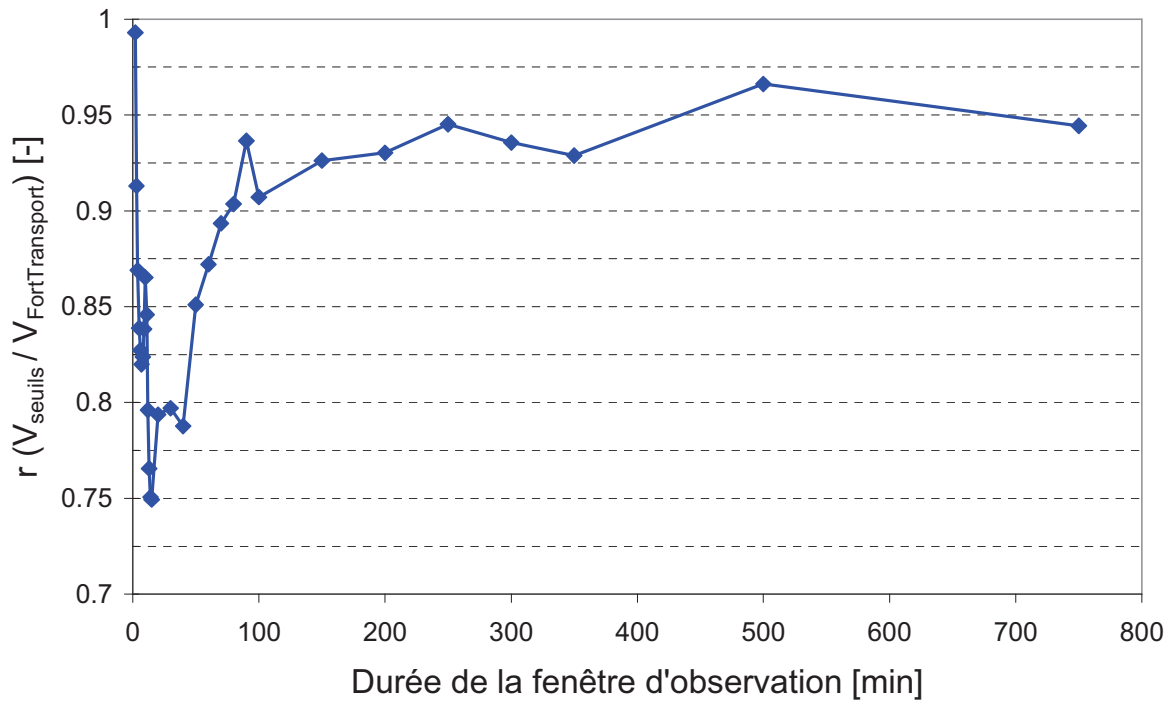
- $Q_s(t)$  [Kg/min] est le débit solide mesuré en sortie du système à l'instant  $t$  ;
- $Q_s(t+l)$  [Kg/min] est le débit solide mesuré en sortie du système à l'instant  $t+\Delta t$  ;
- $\rho_s$  [Kg/m<sup>3</sup>] est la densité du matériau granulaire (égale à 2650 Kg/m<sup>3</sup>) ;
- $\Delta t$  [min] est le délai de temps entre deux mesures de débit, égal à 1 minute.

La série de volumes unitaires a été analysée de la façon suivante. Nous avons utilisé 30 fenêtres temporelles de dimension croissante entre 2 minutes et 750 minutes (Tableau 33). Pour chaque fenêtre, le volume transporté est la somme des volumes élémentaires mesurés sur 1 minute. Chaque fenêtre représente une période d'observation que nous avons fait glisser (pas temporel d'une minute) afin de couvrir tout le signal de débit solide. Pour chaque période d'observation, nous avons mesuré le rapport « r » entre le volume maximum calculé pour le système avec seuils (parmi tous les volumes calculés pour chaque durée) et le volume maximum calculé pour l'expérience à *Fort Transport* (parmi tous les volumes calculés pour chaque durée). Les résultats ont été reportés dans le Tableau 33.

Durée [min]	Volumes Seuils [m <sup>3</sup> ]	Volumes Fort Transport [m <sup>3</sup> ]	r [-]
2	0.008	0.008	0.99
3	0.010	0.011	0.91
4	0.013	0.015	0.87
5	0.015	0.018	0.84
6	0.017	0.020	0.83
7	0.018	0.022	0.82
8	0.020	0.024	0.82
9	0.021	0.026	0.84
10	0.023	0.027	0.87
11	0.025	0.030	0.85
12	0.026	0.033	0.80
13	0.027	0.035	0.77
14	0.029	0.038	0.75
15	0.031	0.041	0.75
20	0.040	0.051	0.79
30	0.054	0.068	0.80
40	0.067	0.085	0.79
50	0.085	0.099	0.85
60	0.100	0.115	0.87
70	0.116	0.129	0.89
80	0.129	0.143	0.90
90	0.146	0.156	0.94
100	0.160	0.177	0.91
150	0.233	0.251	0.93
200	0.302	0.324	0.93
250	0.371	0.392	0.95
300	0.444	0.474	0.94
350	0.509	0.548	0.93
500	0.734	0.759	0.97
750	1.072	1.135	0.94

**Tableau 33 :** Volumes maximaux transportés par le système pour différentes durées de temps au cours de l'expérience avec seuils et de celle à *Fort Transport*.

L'évolution du ratio « r » en fonction de la durée de la fenêtre d'observation du phénomène est reportée sur la Figure 118.



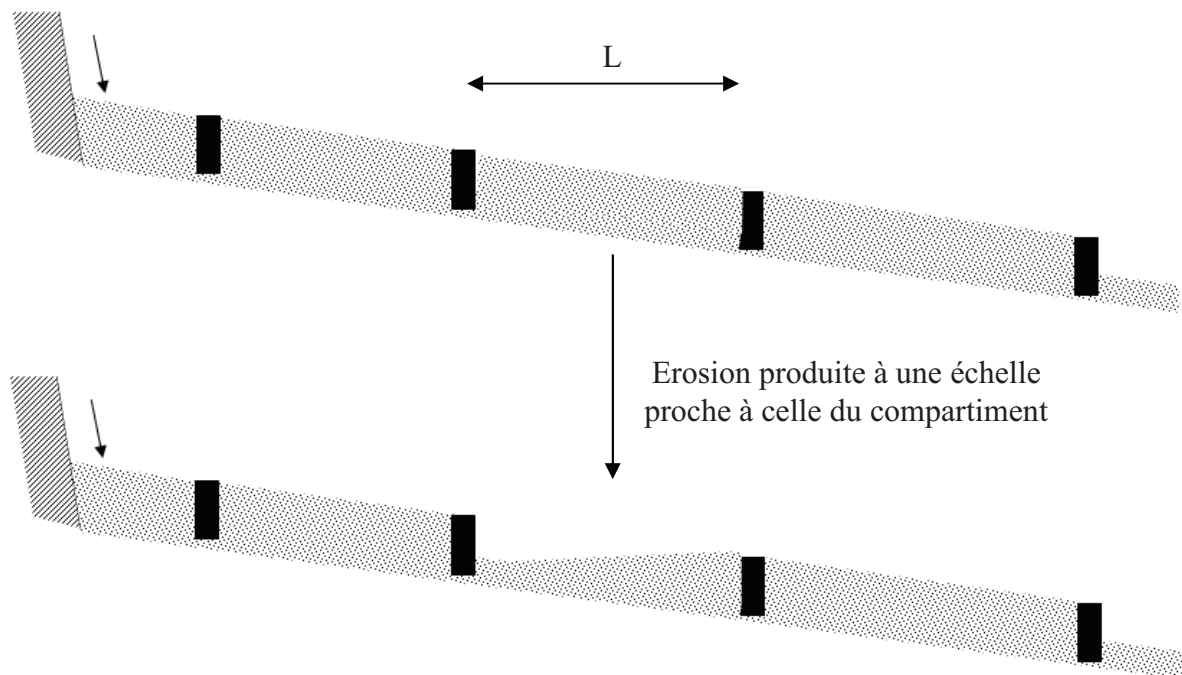
**Figure 118 :** Evolution du rapport « r » entre le volume maximal de matériau transporté par un système avec seuils et le volume maximal de matériau transporté par un système sans seuils, en fonction de la durée de la fenêtre de mesure.

Les résultats obtenus confirment que l'intensité maximale des phénomènes érosifs est essentiellement la même. Pour une courte durée (2 minutes), le volume maximum de matériau transporté par les deux systèmes est aussi le même.

La présence de seuils peut diminuer fortement (jusqu'à 25%) la quantité de matériau maximale transportée au cours d'une érosion. Cet effet est bien marqué pour des périodes d'observation comprises entre 12 et 40 minutes et tend à disparaître avec l'augmentation de la taille temporelle de la fenêtre de mesure (ce qui est logique puisque, sur le long terme, les deux systèmes ont la même condition d'équilibre dynamique).

Sur la base de ces résultats et des observations expérimentales, nous suggérons les justifications suivantes pour un tel comportement du système.

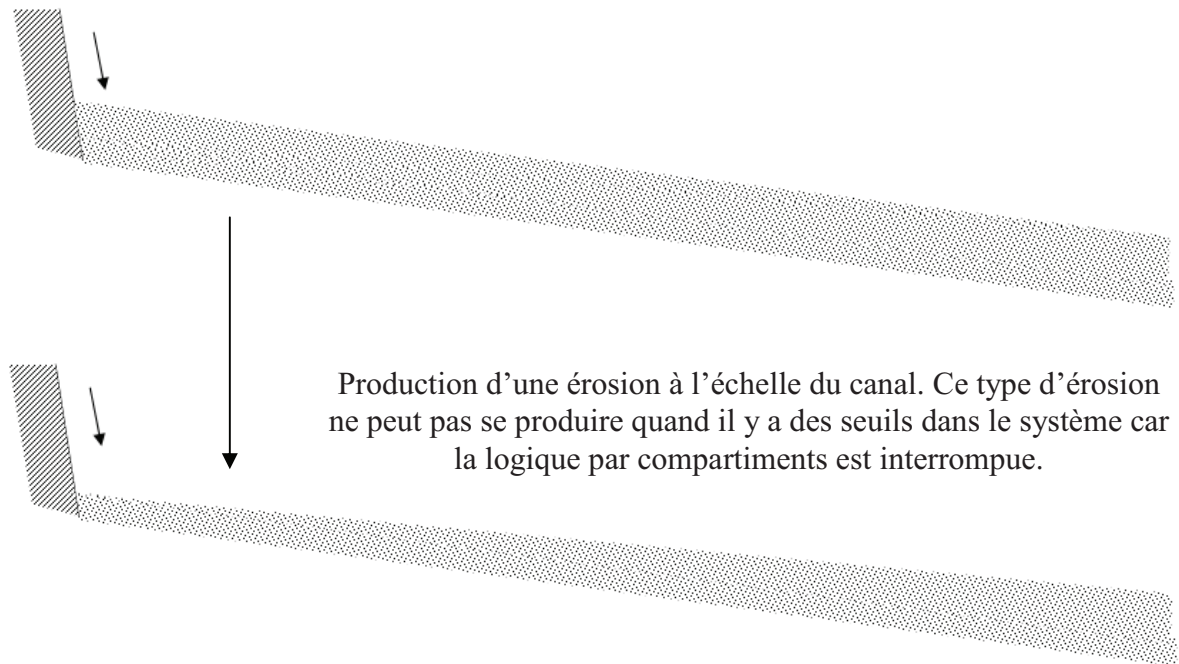
Les érosions rapides (d'une durée inférieure à 5 minutes) sont associées à la production locale de nappes de charriage ; le tri-granulométrique produit à petite échelle (formation/destruction de la nappe de charriage sur une longueur  $L$  qui représente la dimension d'un compartiment, voir Figure 119) jouerait un rôle similaire pour les deux systèmes et l'intensité, la durée, et le volume de matériau transporté en résulterait donc très proches. Néanmoins, le volume produit par les seuils est toujours un peu inférieur. Ceci pourrait être lié au freinage de l'érosion par le seuil localement.



**Figure 119** : Exemple d'érosion à échelle de l'événement pour un système avec seuils ; effet des seuils sur la dynamique de transport.

Une période d'observation comprise entre 7 et 40 minutes pourrait correspondre à la durée moyenne d'un phénomène érosif à moyenne ou grande échelle (échelle de l'événement). Ces phénomènes, au cours de l'expérience à *Fort Transport*, ont été associés à la formation et à la

destruction d'un pavage de surface sur plusieurs « compartiments » (quand ceux-ci sont en phase, voir schéma conceptuel sur la Figure 120). La discontinuité hydraulique des seuils empêcherait donc ce genre de comportement en limitant l'étendue maximale de la zone de lit pavé à la longueur du secteur (voir schéma conceptuel sur la Figure 119). Par conséquent la capacité de transport diminuerait globalement jusqu'à 25 %. Dans ce cas, le tri granulométrique, associé au comportement de deux ou plusieurs compartiments en phases (Recking, 2006), qui avait été observé pour l'expérience à *Fort Transport*, ne se manifesterait pas à cause de la présence des seuils.



**Figure 120 :** Erosion à échelle de l'événement associée à la destruction complète du pavage de surface pour l'expérience *Fort Transport*.

#### 4.8.5. Conclusions

Sur la base de cette étude, nous pouvons conclure que, pour un système naturel proche de la zone d'alimentation, un aménagement avec seuils peut avoir un rôle significatif dans la réduction des volumes de matériau transportés à l'échelle de l'événement.

Les seuils semblent donc influencer le comportement du système. Sur le long terme, leur effet est transparent, étant donné que l'équilibre dynamique est imposé par le système d'alimentation.

Un autre effet possible des seuils sur le système est celui de stockage du matériau et de « freinage » des nappes de charriage. Ceci pourrait expliquer pourquoi la pente moyenne du Secteur 1 (à proximité de l'alimentation solide) est supérieure à celle d'un système sans seuils (expérience à *Fort Transport*) et pourquoi, même pour les érosions de faible durée, le volume

transporté par un système sans seuil est légèrement supérieur (entre 5 et 10% de matériau transporté en plus).

D'autres études menées sur de plus longues durées et avec des conditions hydrauliques différentes seraient nécessaires pour aboutir à une conclusion définitive quant au rôle joué par les seuils sur le système.



#### **4.9. Conclusion générale de l'étude hors-équilibre**

En général, nous avons observé que pour les deux systèmes, dans la partie amont le tri granulométrique est matérialisé par la formation/destruction d'un pavage de surface associé à la production de nappes de charriage dans le système. La fréquence et l'intensité du phénomène est liée étroitement aux conditions d'alimentation.

Pour le **CAS 1** (système en phase d'aggradation) les nappes de charriage produites en amont n'ont pas assez d'énergie pour se propager jusqu'à la sortie du canal. Néanmoins, elles se dispersent dans le lit en aval (tri granulométrique longitudinal) et contribuent à l'augmentation de la pente globale et locale du système.

Pour le **CAS 2** (système avec seuils) les nappes de charriage se produisent à haute fréquence dans les trois secteurs du canal. Les seuils freinent l'impact (et donc l'intensité) des nappes de charriage et diminuent le volume de matériau transporté aux échelles de temps intermédiaires.

## CONCLUSION GENERALE

---

Cette thèse avait pour objectif principal de comprendre le rôle du tri granulométrique sur la dynamique de transport d'un système torrentiel.

Nous avons montré expérimentalement qu'en raison du tri granulométrique, des systèmes relativement stables ( $\theta_{84}/\theta_c \approx 1$ ) peuvent donner lieu à des phénomènes de transport intense, associés à des départs massifs du matériau qui compose le lit. Ces phénomènes sont associés à la destruction du pavage et à la propagation de nappes de charriage dans le système.

Pour l'expérience à *Faible Transport* ( $\theta_{84}/\theta_c < 1$ ), le tri granulométrique s'est traduit par la formation et la destruction à haute fréquence de structures à step-pools sur un lit globalement pavé. Ces érosions sont à petite échelle spatiale (dynamique d'érosion « de proche en proche ») et sont associées à des pics de transport qui peuvent atteindre 6 fois la valeur moyenne imposée par les conditions d'alimentation. Les step-pools ne sont pas seulement à la base des fluctuations de transport à haute fréquence, mais leur stabilité semble être aussi à la base d'un processus de formation du pavage à plus grande échelle. La destruction de ce pavage associée à la propagation de nappes de charriage (érosion à grande échelle) produit des pics de débit solide qui peuvent atteindre 15 fois la valeur moyenne.

Ces deux familles d'érosions (de proche en proche et par nappe de charriage) permettent une mobilité équivalente de toutes les tailles malgré les très faibles conditions hydrauliques.

L'expérience à *Fort Transport* ( $\theta_{84}/\theta_c > 1$ ) a été réalisée en comparaison avec celle à *Faible Transport*. Les résultats obtenus ont permis de montrer qu'en fonction des conditions hydrauliques appliquées au système l'échelle et la fréquence des phénomènes érosifs peuvent changer considérablement. Le tri granulométrique se matérialise par la formation/destruction à haute fréquence d'un pavage de surface et la propagation de nappes de charriage qui sont le mode principale de transport dans cette expérience. La mobilité équivalente pour cette expérience n'est pas associée à un pavage de surface mais à une granulométrie du lit très proche de celle du matériau transporté par le système.

Le fait d'être en dessous ou au dessus du Shields  $\theta_{c84}$  a donc des conséquences très fortes sur la morphologie du système. Sur la base de l'étude de la mobilité du mélange le diamètre  $D_{84}$  semble contrôler la dynamique d'évolution globale (pente et débit solide) et la morphologie (état du lit et granulométrie de surface) du système. Lorsque  $\theta_{84}/\theta_c < 1$ , les step-pools sont très présents, très stables, et contrôlent la dynamique de transport. Lorsque  $\theta_{84}/\theta_c > 1$  les step-pools ne sont que des états éphémères associés à la phase de transition et rapidement détruits par les nappes de charriage. Ils sont remplacés par un pavage régulier, fréquemment détruit, et l'évolution à long terme du système semble correspondre à celle proposée par la modélisation par compartiments (Recking, 2006).

Les résultats obtenus pour les deux expériences mettent en évidence la faiblesse des outils d'expertise en territoire montagnard (les formules de transport classiques sont calibrées pour des fortes conditions hydrauliques,  $\theta/\theta_c > 2$ ) et remettent en question l'idée d'une morphologie à step-pools représentative d'un état d'équilibre stable pour un torrent (Lenzi,

2002). Dans nos expériences, les step-pools ne semblent être pas associés à un état stable du système mais plutôt à une phase de transition dans un processus d'aggradation long, voire très long, qui abouti à la formation d'un pavage à forte pente. Cette conclusion est similaire à celle reportée par Chin (2005).

Pour mieux comprendre ce phénomène il semble donc fondamental poursuivre les efforts de recherche sur la compréhension du rôle du tri granulométrique. Pour cela, des expériences très longues (supérieures à 100 heures) sont nécessaires pour permettre au tri granulométrique de s'exprimer sur des échelles spatiales et temporelles différentes.

Le Chapitre 5 a permis d'observer le rôle du tri granulométrique sur la dynamique hors-équilibre d'un système à forte pente. L'expérience en aggradation a montré qu'une période très longue peut être nécessaire pour que le système atteigne une condition d'équilibre dynamique (plus de 210 heures). L'équilibre local du système est alors atteint progressivement dans la direction amont-aval, les parties les plus proches du système d'alimentation étant celles qui atteignent en premier l'état d'équilibre dynamique.

L'expérience avec seuils a montré que ce type d'aménagement peut avoir un impact non négligeable (quantifié par nos mesures à 25%) sur la quantité de matériau transporté au cours d'un événement. Néanmoins, l'intensité maximum instantanée des érosions associées aux nappes de charriage aussi, tout comme le comportement global du système à long terme, ne sont pas affectés par la présence des seuils.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Abrahams, A.D., Li, G. and Atkinson, J.F., 1995. Step-pool streams: Adjustment to maximum flow resistance. *Water Resources Research*, 31(10): 2593-2602.
- Ancey, C., Davison, A.C., Bohm, T., Jodeau, M. and Frey, P., 2008. Entrainment and motion of coarse particles in a shallow water stream down a steep slope. *Journal of Fluids mechanics*, 595: 83-114.
- Andrews, E.D., 1983. Entrainment of gravel from naturally sorted riverbed material. *Geological Society of America Bulletin*, 94(10): 1225-1231.
- Andrews, E.D. and Parker, G., 1987. Formation of a coarse surface layer as the response to gravel mobility. In: J.W. sons (Editor), *Sediment transport in Gravel-bed rivers*, pp. 269-325.
- Ashmore, P.E., 1988. Bedload transport in braided gravel bed stream models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 13: 677-695.
- Bagnold, R.A., 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics. paper 422-I, United state department of interior, Washington.
- Bathurst, J.C., 1987. Measuring and modelling bedload transport in channels with coarse bed materials. *River Channels: Environment and Process*, edited by K. Richards, pp. 272-294, Blackwell, Malden, Mass.
- Bathurst, J.C., 2002. At-a-site variation and minimum flow resistance for mountain rivers. *Journal of Hydrology*, 269(1-2): 11-26.
- Bennet, S.J. and Bridge, J.S., 1995. The geometry and dynamics of low-relief bed forms in heterogeneous sediment in laboratory channel, and their relationship to water flow. *Journal of Sedimentary Research*, A65(1): 29-39.
- Blom, A., Ribberink, J.S. and Parker, G., 2008. Vertical sorting and the morphodynamics of bed forms-dominated rivers: A sorting evolution model. *Journal of Geophysical Research*, 113(F01019, doi:10.1019/2006JF000618): 1-19.
- Böhm, T. et al., 2006. Two-dimensional motion of a set of particles in a free surface flow with image processing. *Experiments in fluids*, 41: 1-11.
- Brownlie, W.R., 1981. Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels. Kh-R-34A, Keck Laboratory of Hydraulics and Water Ressources , California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Buffington, J.M., Lisle, T.E., Woodsmith, R.D. and Hilton, S., 2002. Control no the size and occurrence of pools in coarse-grained forest rivers. *River Research and Application*, 18: 507-531.

- Buffington, J.M. and Montgomery, D.R., 1999a. Effects of hydraulic roughness on surface textures of gravel-bed rivers. *Water Resources Research*, 35(11): 3507.
- Buffington, J.M. and Montgomery, D.R., 1999b. A procedure for classifying textural facies in gravel-bed rivers. *Water Resources Research*, 35(6): 1903.
- Cardoso, A.H., Graf, W.H. and Gust, G., 1989. Uniform flow in a smooth open channel". *Journal of Hydraulic Research*, 27(5): 603-616.
- Carollo, F.G., Fero, V. and Termini, D., 2005. Analyzing Turbulence Intensity in Gravel Bed Channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(12): 1050-1061.
- Chin, A., 2003. The geomorphic significance of step-pools in mountain streams. *Geomorphology*, 55: 125-137.
- Chin, A. and Wohl, E., 2005. Toward a theory for step pools in stream channels. *Progress in physical geography*, 29(3): 275-296.
- Church, M. and Hassan, M.A., 1998. Stabilizing self-organized structures in gravel-bed stream channels: field and experimental observations. *Water Resources Research*, 34(11): 3169-3179.
- Church, M. and Hassan, M.A., 2002. Mobility of bed material in Harris Creek. *Water Resources Research*, 38(11): 19-31.
- Church, M. and Zimmerman, A., 2007. Form and stability of step-pool channels: Research progress. *Water Resources Research*, 43(W03415): 1-21.
- Church, M.A., McLean, D.G. and Wolcott, J.F., 1987. River bed gravels: sampling and analysis, *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*. John Wiley and Sons, Chichester, pp. 43-88.
- Comiti, F., 2003. Local scouring in natural and artificial step pool systems, Univ Degli Studi Di Padova, Legnaro, Italy, 209 pp.
- Comiti, F., Andreoli, A. and Lenzi, M., 2005. Morphological effects of local scouring in step-pool streams. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30: 1567 - 1581.
- Comiti, F., Mao, L., Wilcox, A., Wohl, E. and Lenzi, M., 2007. Field-derived relationships for flow velocity and resistance in high-gradient streams. *Journal of Hydrology*, 21(3).
- Comiti, F., Cadol, D., Wohl, E., 2009. Flow regimes, bed morphology, and flow resistance in self-formed step-pools channels. *Water Resources Research*, 45, W04424, doi: 10.1029/2008WR007259.
- Conesa-Garcia, C., Lopez-Bermudez, F. and Garcia-Lorenzo, R., 2007. Bed stability variations after check dam construction in torrential channels (South-East Spain). *Earth Surface Processes and Landforms*, 32: 2165-2184.
- Cudden, J.R. and Hoey, T.B., 2003. The causes of bedload pulses in a gravel channel: the implications of bedload grain-size distribution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28: 1411-1428.

- Cui, Y. et al., 2003. Sediment pulses in mountain rivers. Part 1 : Experiments. *Water Resources Research*, 39(9): 1240.
- Cui, Y., Parker, G. and Paola, C., 1996. Numerical simulation of aggradation and downstream fining. *Journal of Hydraulic Research*, 34(2).
- Curran, J.C. and Wilcock, P.R., 2005. Characteristic dimensions of the step-pool bed configuration: an experimental study. *Water Resources Research*, 41(W02030): 1-11.
- Dietrich, W.E. and Smith, J.D., 1984. Bed load transport in a river meander. *Water Resources Research*, 20(10): 1355-1380.
- Duckson, D.W.J. and Duckson, L.J., 2001. Channel bed steps and pool shapes along Soda Creek, Three Sisters Wilderness, Oregon. *Geomorphology*, 38: 267-279.
- Ducottet, C., 1994. Application of wavelet transforms to the processing of tomographic and holographic images of fluid flows, Saint Etienne.
- Egashira, S. and Ashida, K., 1991. Flow resistance and sediment transportation in streams with step-pool bed morphology. *Lecture Notes in Earth Science*: 45-58.
- Egiazaroff, I.V., 1965. Calculation of nonuniform sediment concentrations. *Journal of the Hydraulics Division (ASCE)*, HY4(6): 225-247.
- Ehrenberger, R., 1931. Direct bedload measurements on the Danube at Vienna and their results to date. *Die Wasserwirtschaft*, 34: 1-9.
- Einstein, H.A., 1937. Bed load transport as a probability problem. PhD Thesis, Federal Institute of Technology, Zurich.
- Einstein, H.A., 1950. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows, United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service, Washington.
- Ferguson, R., Prestegard, K.L. and Ashworth, P.J., 1989. Influence of sand on gravel transport in a braided gravel bed river. *Water Resources Research*, 25(4): 635-643.
- Frey, P., Ducottet, C. and Jay, J., 2003. Fluctuations of bed load solid discharge and grain size distribution on steep slopes with image analysis. *Experiments in fluids*, 35: 589-597.
- Garcia, C. et al., 2007. Process of initiation of motion leading to bedload transport in gravel-bed rivers. *Geophysical Research Letters*, 34(L06403).
- Garcia, C., Laronne, J.B. and Sala, M., 2000. Continuous monitoring of bedload flux in a mountain gravel-bed river. *Geomorphology*, 34: 23-31.
- Gilbert, G.K., 1914. *The Transportation of Debris by Running Water*, US Geological Survey, Washington Government Printing Office.
- Gomez, B., 1983. Temporal variations in bedload transport rates: the effects of progressive bed armouring. *Earth Surface Processes and Landforms*, 8: 41-54.

- Gomez, B., 1994. Effects of particle shape and mobility on stable armor development. *Water Resources Research*, 30(7): 2229-2240.
- Gomez, B., 1995. Bedload transport and changing grain size distributions. In: A.G.a.G. Petts (Editor), *Changing river channels*. John Wiley and Sons Ltd, pp. 177-199.
- Gomez, B., Richard, L.N. and Hubbell, D.W., 1989. Temporal variations in bedload transport rates associated with the migration of bedforms. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14: 135-156.
- Graham, D.J., Reid, I. and Rice, S.P., 2005a. Automated Sizing of Coarse-Grained Sediments: Image-Processing Procedures. *Mathematical Geology*, 37(1).
- Graham, D.J., Rice, S.P. and Reid, I., 2005b. A transferable method for the automated grain sizing of river gravels. *Water Resources Research*, 41.
- Grant, G., Swanson, F. and Wolman, G., 1990. Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, Western Cascades, Oregon. *Geological Society of America Bulletin*, 102: 340-352.
- Grant, G.E., 1997. Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams: A new hypothesis. *Water Resources Research*, 33(2): 349-358.
- Griffiths, G.A., 1979. High sediment yields from major rivers of the Western Southern Alps, New Zealand. *Nature*, 282(5734): 61-63.
- Habersack, H., Nachtnebel, H.P. and Laronne, J.B., 2001. The continuous measurement of bedload discharge in a large alpine gravel bed river. *Journal of Hydraulic Research*, 39(2): 125-133.
- Hascenburger, J.K. and Wilcock, P.R., 2003. Partial transport in a natural gravel bed channel. *Water Resources Research*, 39(1).
- Hassan, M.A. and Church, M., 2000. Experiments on surface structure and partial sediment transport on a gravel bed. *Water Resources Research*, 36(7): 1885.
- Hassan, M.A., Egozi, R. and Parker, G., 2006. Experiments on the effect of hydrograph characteristics on vertical grain sorting in gravel bed rivers. *Water Resources Research*, 42(9).
- Hassan, M.A. and Reid, I., 1990. The influence of microform bed roughness elements on flow and sediment transport in gravel bed rivers *Earth Surface Processes & Landforms* 15(8): 739-750.
- Hirano, M., 1971. River bed degradation with armouring. *Trans JSCE*, 195: 55-65.
- Hoey, T.B., 1992. Temporal variations in bedload transport rates and sediment storage in gravel-bed rivers. *Progress in Physical Geography*, 16(3): 319-338.
- Hoey, T.B. and Sutherland, A.J., 1991. Channel morphology and bedload pulses in braided rivers: a laboratory study. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16: 447-462.

- Hubbell, D.W., 1987. Bedload sampling and analysis. In: C.R. Thorne, Bathurst, J.C., Hey, R.D. (Editor), *Sediment transport in Gravel-Beds rivers*. John Wiley and Sons Ltd, Chichester, pp. 89-106.
- Ibbeken, H. and Schleyer, R., 1986. Photo-sieving: a method for grain-size analysis of coarse-grained, unconsolidated bedding surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms*, 11: 59-77.
- Iseya, F. and Ikeda, H., 1987. Pulsations in bedload transport rates induced by a longitudinal sediment sorting: a flume study using sand and gravel mixture. *Geografiska Annaler*, 69A(1): 15-27.
- Jackson, W.L. and Beschta, R.L., 1982. A model of two-phase bedload transport in an Oregon coast range stream. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7: 517-527.
- Jackson, W.L. and Beschta, R.L., 1984. Influences of increased sand delivery on the morphology of sand and gravel channels. *Water Resources Bull.*, 20(4): 527-533.
- Kang, S., 1982. *Sediment transport in small glacial stream: Hilda Creek, Alberta, Univ of Ill at Chicago, Chicago*, 265 pp.
- Karim, F. and Kennedy, J.F., 1990. Menu of couple velocity and sediment discharge relations for rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(8).
- Kellerhals, R. and Bray, D.I., 1971. Sampling procedures for coarse fluvial sediments. In: J.o.t.H. Division (Editor), *Proceedings of the American Society of Civil Engineers* (8279), ASCE, pp. 1165-1180.
- Keulegan, G.B., 1938. Laws of turbulent flow in open channels. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 21(Research Paper 1151): 707-741.
- Komar, P.D. and Shih, S.M., 1992. Equal mobility versus changing bedload grain sizes in gravel bed streams. In: J.W.a. sons (Editor), *Dynamics of gravel bed rivers*. Billi Hey Thorne Tacconi, pp. 73-106.
- Kondolf, G.M., Cada, G.F., Sale, M.J. and Felando, T., 1991. Distribution and stability of potential salmonid spawning gravels in steep boulder-bed streams of the eastern Sierra Nevada. In: T.o.t.A.F. Society (Editor), pp. 177-186.
- Kuhnle, R.A., 1993. Fluvial transport of sand and gravel mixtures with bimodal size distributions. *Sedimentary Geology*, 85: 17-24.
- Kuhnle, R.A., 1996. Unsteady transport of sand and gravel mixtures. In: P.C.a.M. Dawson (Editor), *Advances in fluvial dynamics and Stratigraphy* (Chap 5). John Wiley & Sons Ltd, pp. 183-201.
- Kuhnle, R.A. and Southard, J.B., 1988. Bed load transport fluctuations in a gravel bed laboratory channel. *Water Resources Research*, 24(2): 247-260.
- Kuhnle, R.A., Willis, J.C. and Bowie, A.J., 1989. Variations in the transport of bedload sediment in a gravel-bed stream, Goodwin Creek, Mississippi, USA, 4th International symposium on river sedimentation, Beijing, China, pp. 539-546.



- Lamarre, H., 2006. Le transport des sédiments, les structures sédimentaires et la stabilité dans les cours d'eau de morphologie en step-pool, Université de Montréal.
- Lane, E.W., 1955. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *Proceedings of ASCE*, 81: 1-17.
- Lane, E.W. and Carlson, E.J., 1953. Some factors affecting the stability of canals constructed in coarse granular material, 5th IAHR Congress. International Association of Hydraulic, Madrid, pp. 37-48.
- Lanzoni, S. and Tubino, M., 1999. Grain sorting and bar instability. *Journal of Fluids mechanism*, 393: 175-213.
- Laronne, J.B. and Duncan, M.J., 1992. Bedload transport paths and gravel bar formation. In: P.B.e. al. (Editor), *Dynamics of Gravel-Bed Rivers*. John Wiley, Chichester, U. K., pp. 177-202.
- Laronne, J.B., Garcia, C. and Reid, I., 2001. Mobility of patch sediment in gravel bed streams: patch character and its implications for bedload, *Gravel Bed Rivers*, pp. 249-290.
- Lekach, J. and Schick, A., 1983. Evidence for transport of bedload in waves: analysis of fluvial sediment samples in a small upland stream channel. *Catena (Elsevier)*, 10: 267-279.
- Lenzi, M. and Comiti, F., 2003. Local scouring and morphological adjustments in steep channels with check-dam sequences. *Geomorphology*, 55(97-109).
- Lenzi, M., 2002. Stream bed stabilization using boulder check dams that mimic step-pool morphology features in Northern Italy. *Geomorphology*, 45(3-4): 243-260.
- Lenzi, M., Mao, L., Comiti, F., 2004. Magnitude-frequency analysis of bed load data in an Alpine boulder bed stream. *Water Resources Research*, 40, W07201, doi:10.1029/2003WR002961.
- Lenzi, M. And D'Agostino, V., 2000. Step-pool evolution in Alpine torrent. In: M.L. Monti (Editor), *New Trends in Water and Environmental Engineering for Safety and Life*, Balkema, Rotterdam, pp. 12.
- Liebault, F. and Piegay, H., 2001. Assessment of channel changes due to long term bedload supply decrease, Roubion river, France. *Geomorphology*, 36: 167-186.
- Lisle, T.E., 1995. Particle size variations between bed load and bed material in natural gravel bed channels. *Water Resources Research*, 31(4): 1107-1118.
- Lisle, T.E. and Madej, M.A., 1992. Spatial variation in armouring in a channel with high sediment supply In: H.R. Billi P, Thorne CR, Tacconi P (eds). *John Wiley & Sons: Chichester (Editor), Dynamics of Gravel-bed Rivers* pp. 277-293.
- Lunt, I.A. and Bridge, J.S., 2007. Formation and preservation of open-framework gravel strata in unidirectional flows. *Sedimentology*, 54(1): 71-87.

- Madej, M.A. and Ozaki, V., 1996. Channel response to sediment wave propagation and movement, Redwood Creek, California, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21: 911-927.
- Madej, M.A., Sutherland, D.G., Lisle, T.E. and Pryor, B., 2009. Channel responses to varying sediment input: A flume experiment modeled after Redwood Creek, California. *Geomorphology*, 103(4): 507-519.
- Mao, L. and Surian, N., 2010. Observations on sediment mobility in a large gravel-bed river. *Geomorphology*, 114: 326-337.
- Meade, R.H., 1985. Wavelike movement of bedload sediment, East Fork River, Wyoming. *Environmental Geology and Water Science*, 7: 215-225.
- Meyer-Peter, E. and Mueller, R., 1948. Formulas for Bed-Load Transport, Proceedings 2d Meeting IAHR, Stockholm, pp. 39-64.
- Montgomery, D.R. and Buffington, J.M., 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109(5): 596-611.
- Mühlofer, 1933. Investigations into suspended load and bedload of the river Inn, near Kirchbichl, Tirol. *Die Wasserwirtschaft*: 1-6.
- Nelson, P.A. et al., 2009. Response of bed surface patchiness to reductions in sediment supply. *J. Geophys. Res.*, 114.
- Nikora, V.I., Koll, K., McEwan, I., McLean, D.G. and Dittrich, A., 2004. Velocity distribution in the roughness layer of rough-bed flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(10): 1036-1042.
- Nikora, V.I. and Smart, G.M., 1997. Turbulence characteristics of the New Zealand gravel-bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(9): 764-773.
- Nikuradse, J., 1933. *Strömungsgesetze in rauhen Rohren (Laws of Flow in Rough Pipes)*. Forschungsheft Verein Deutscher Ingenieure N°361.
- Nowell, A.R. and Church, M., 1979. Turbulent flow in a depth-limited boundary layer. *Journal of Geophysical Research*, 84(C8): 4816-4824.
- Paige, A.D. and Hickin, E.J., 2000. Annual bed-elevation regime in the alluvial channel of Squamish River, Southern British Columbia, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25: 991-1009.
- Paola, C. and Seal, R., 1995. Grain size patchiness as a cause of selective deposition and downstream fining. *Water Resources Research*, 31(5): 1395-1408.
- Parker, G., 1992. Some random notes on grain sorting. In: Z. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, SUISSE (1971) (Revue) (Editor), Grain sorting seminar, Ascona, Switzerland, pp. 19-76.

- Parker, G., 2003. Persistence of sediment lumps in approach to equilibrium in sediment-recirculating flumes, XXX International Association of Hydraulic Research Congress, Thessaloniki, Greece.
- Parker, G., 2004. Transport of gravel and sediment mixtures (Draft Version). In: ASCE (Editor), ASCE Manual 54 "Sedimentation Engineering".
- Parker, G. and Klingeman, P.C., 1982. On why gravel bed streams are paved. *Water Resources Research*, 18(5): 1409-1423.
- Parker, G., Klingeman, P.C. and McLean, D.G., 1982. Bedload and size distribution in paved gravel-bed streams. *Journal of the Hydraulics Division (ASCE)*, 108(HY4): 544-571.
- Parker, G. and Wilcock, P.R., 1993. Sediment Feed and Recirculating Flumes: Fundamental Difference. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(11): 1192-1204.
- Raudkivi, A.J., 1998. *Loose boundary hydraulics*. The Netherlands, Rotterdam.
- Raudkivi, A.J. and Ettema, R., 1982. Stability of armour layers in rivers. *Journal of the Hydraulics Division*, 108(HY9): 1047-1057.
- Recking, A., 2009. Theoretical development on the effects of changing flow hydraulics on incipient bedload motion. *Water Resources Research*, 45, W04401: 16.
- Recking, A., 2010. A comparison between flume and field bedload transport data and consequences for surface based bedload transport prediction. *Water Resources Research*, 46: 1-16.
- Recking, A., Bacchi, V., Paquier, A., Frey, P. and Naaim, M., soumis. Analysing periodicities affecting bed morphology produced by bedload transport of non uniform sediment mixtures. *Journal of Geophysical Research, Earth Surface*.
- Recking, A., Frey, P., Paquier, A. and Belleudy, P., 2009. An experimental investigation of mechanisms responsible for bedload sheet production and migration. *J. Geophys. Res.*, 114, F03010,.
- Recking, A., Frey, P., Paquier, A., Belleudy, P. and Champagne, J.Y., 2008a. Bedload transport flume experiments on steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(9): 1302-1310.
- Recking, A., Frey, P., Paquier, A., Belleudy, P. and Champagne, J.Y., 2008b. Feedback between bed load and flow resistance in gravel and cobble bed rivers. *Water Resources Research*, 44: 21.
- Reid, I., Frostick, L.E. and Brayshaw, A.C., 1985. The incidence and nature of bedload transport during flood flows in coarse-grained alluvial channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10: 33-44.
- Reid, I., Frostick, L.E. and Brayshaw, A.C., 1992. Microform roughness elements and the selective entrainment and entrapment of particles in gravel bed rivers. In: J.W. sons (Editor), *Dynamic of gravel bed rivers*. Billi, Hey, Thorne, Tacconi, pp. 253-275.

- Rice, S.P. and Church, M., 1996. Sampling surficial fluvial gravels: the precision of size distribution percentile estimates. *Journal of Sedimentary Research*, 66(3): 654-665.
- Rickenmann, D., 1991. Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 117(11): 1419-1439.
- Rickenmann, D., 2001. Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams. *Water Resources Research*, 37(12): 3295.
- Rosport, M., 1994. Stability of torrent beds characterized by step pool textures. *International Journal of Sedimentary Research*, 9: 124-132.
- Sawada, T., Ashida, K. and Takahashi, T., 1983. Relationship between channel pattern and sediment transport in a steep gravel bed river. *Zeitschrift für geomorphologie*, 46: 55-66.
- Schmidt, K.H. and Ergenzinger, P., 1992. Bedload entrainment, travel lengths, step lengths, rest periods studied with passive (iron, magnetic) and active (radio) tracer techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17: 147-165.
- Schoklitsch, A., 1962. *Handbuch des Wasserbaus* (in German), Springer Verlag (3rd edition), Wien.
- Seal, R. and Paola, C., 1995. Observations of downstream fining on the North Fork Toutle River near Mount St. Helens, Washington. *Water Resources Research*, 31(5): 1409-1420.
- Seal, R., Paola, C., Parker, G., Southard, J.B. and Wilcock, P.R., 1997. Experiments on downstream fining of gravel : I. Narrow-channel runs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(10): 874-884.
- Seminara, G., Colombini, M. and Parker, G., 1996. Nearly pure sorting waves and formation of bedload sheet. *Journal of Fluids mechanism*, 312: 253-278.
- Shields, A., 1936. Application of similarity principles and turbulence research to bed load movement, US Dept of Agr. , Soil Conservation Service Cooperative Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, Calif.
- Sime, L.C. and Ferguson, R.I., 2003. Information on grain sizes in gravel-bed rivers by automated image analysis. *Journal of Sedimentary Research*, 73(4): 630-636.
- Smart, G., 1999. Turbulent velocity profiles and boundary shear in gravel bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(2): 106-116.
- Smart, G., and M. Jaeggy., 1983. Sediment transport on steep slopes. Nr. 64, *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, Zurich.
- Smart, G.M., Duncan, M.J. and Walsh, J.M., 2002. Relatively rough flow resistance equations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(6): 568-578.
- Song, T., Graf, W.H. and Lemmin, U., 1995. Uniform flow in open channels with movable gravel bed. *Journal of Hydraulic Research*, 32(6): 861-875.

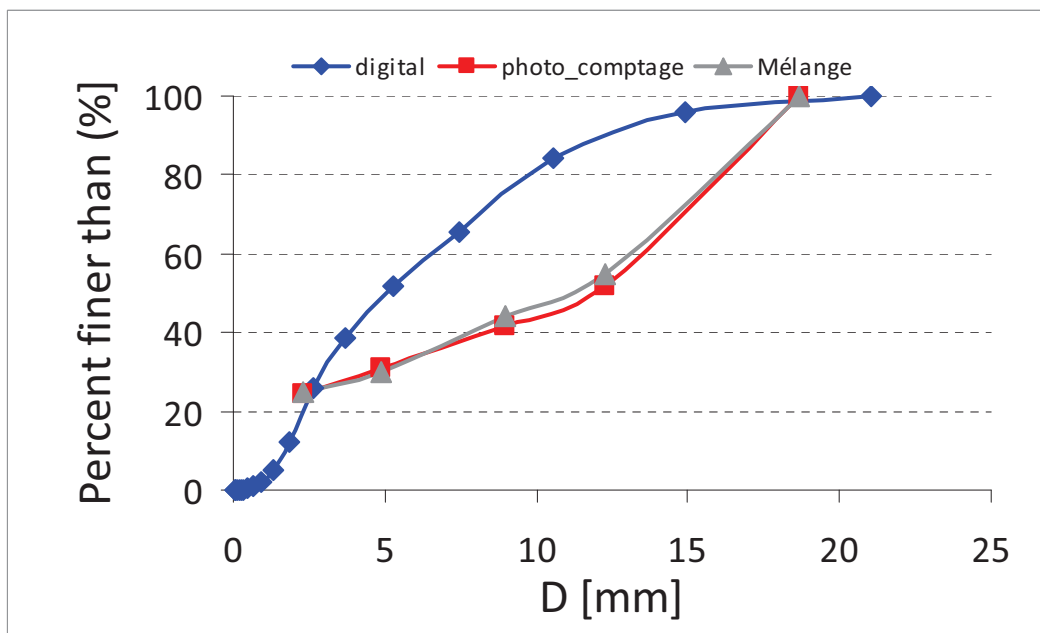
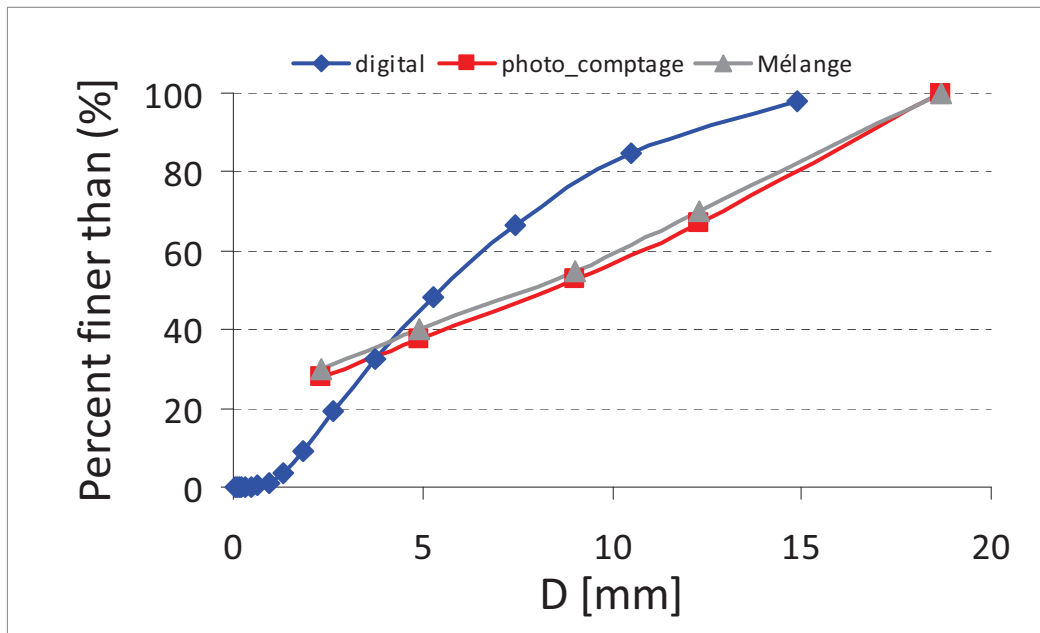
- Strom, K., Papanicolaou, A., Evangelopoulos, N. and Odeh, M., 2004. Microforms in Gravel Bed Rivers: Formation, Disintegration, and Effects on Bed Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(6): 554-567.
- Sutherland, A.J., 1991. Hiding functions to predict self armoring, International Grain Sorting Seminar, Monte Verità, Ascona, Switzerland.
- Toro-Escobar, C., Paola, C. and Parker, G., 1996. Transfer function for the deposition of poorly sorted gravel in response to streambed aggradation. *Journal of Hydraulic Research*, 34(1): 35-53.
- Tsujimoto, T., 1991. Bed-load transport in steep channels. *Fluvial Hydraulics of Mountain Regions, Lect; Notes Earth Sci. ser.*, 37: 89-102.
- Turowski, J.M., yager, E.M., Badoux, A., Rickenmann, D. and Molnar, P., 2009. The impact of exceptional events on erosion, bedload transport and channel stability in a step-pool channel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34: 1661-1673.
- Venditti, J.G., Nelson, P.A. and Dietrich, W.E., 2008. The domain of bedload sheets, *Marine and River Dune Dynamics*, Leeds, United Kingdom.
- Vericat, D., Batalla, R.J. and Gibbins, C., 2008. Sediment entrainment and depletion from patches of fine material in a gravel-bed river. *Water Resources Research*.
- Warburton, J., 1992. Observations of bed-load transport and channel bed changes in a proglacial mountain stream. *Arctic Alpine Research*, 23(3): 195-203.
- Whiting, P., Dietrich, W.E., Leopold, L.B., Drake, T.G. and Shreve, R.L., 1988. Bedload sheets in heterogeneous sediments. *Geology*, 16: 105-109.
- Whittaker, 1987a. Sediment transport in step-pool streams. *Sediment transport in gravel bed rivers*: 545 - 579.
- Whittaker, J.G., 1987b. Modelling bed-load transport in steep mountain streams, *Erosion and sedimentation in the Pacific Rim*. IAHS, Corvallis, pp. 319-332.
- Whittaker, J.G. and Jaeggi, M., 1982. Origin of step-pool systems in mountain streams. *Journal of the Hydraulics Division*, 108(HY6): 758-773.
- Wilcock, P.R., 1992. Flow competence: a criticism of a classic concept. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17: 289-298.
- Wilcock, P.R., 1997. The components of fractional transport rate. *Water Resources Research*, 33(1): 247.
- Wilcock, P.R. and Crowe, J.C., 2003. Surface-based transport model for mixed-size sediment. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 129(2): 120-128.
- Wilcock, P.R. and DeTemple, B.T., 2005. Persistence of armor layers in gravel-bed rivers. *Geophysical Research Letters*, 32: L08402, doi:10.1029/2004GL021772.

- Wilcock, P.R., Kenworthy, S.T. and Crowe, J.C., 2001. Experimental study of the transport of mixed sand and gravel. *Water Resources Research*, 37(12): 3349.
- Wilcock, P.R. and McArdell, B.W., 1993. Surface-based fractional transport rates: Mobilization thresholds and partial transport of a sand-gravel sediment. *Water Resources Research*, 29(4): 1297-1312.
- Wilcock, P.R. and McArdell, B.W., 1997. Partial transport of a sand/gravel sediment. *Water Resources Research*, 33(1): 235.
- Wilcock, P.R. and Southard, J.B., 1988. Experimental study of incipient motion in mixed-size sediment. *Water Resources Research*, 24(7): 1137-1151.
- Wolman, M.G., 1954. A method of sampling coarse river-bed material. *American Geophysical Union - Transactions*, 35(6): 951 - 956.
- Wong, M. and Parker, G., 2006. Re-analysis and correction of bed load relation of Meyer-Peter and Muller using their own database. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(11): 1159-1168.
- Wooldridge, C.L. and Hickin, E.J., 2002. Step-pool and cascade morphology, Mosquito Creek, British Columbia: a test of four analytical techniques. *Can. J Earth sci.*, 39: 493-503.
- Yalin, M.S., 1972. *Mechanics of sediment transport*, New York.
- Yuzyk, T.R. and Winckler, T., 1991. *Procedures for bed-material sampling*, Environment Canada, Water Resources Branch, Sediment Survey Section, Ottawa, Canada.
- Zimmermann, A. and Church, M., 2001. Channel morphology, gradient profiles and bed stresses during flood in a step-pool channel. *Geomorphology*, 40: 311-327.
- Zimmermann, A., Church, M. and Hassan, M.A., 2010. Step-pool stability: Testing the jammed state hypothesis. *Journal of Geophysical Research*, 115: F02008, doi:10.1029/2009JF001365.
- Zimmermann, A.E., 2009. *Experimental investigations of step-pool channel formation and stability*, University of British Columbia, Vancouver, 360 pp.
- Zimmermann, A.E., Church, M. and Hassan, M.A., 2008. Video-based gravel transport measurements with a flume mounted light table. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33: 2285-2296.

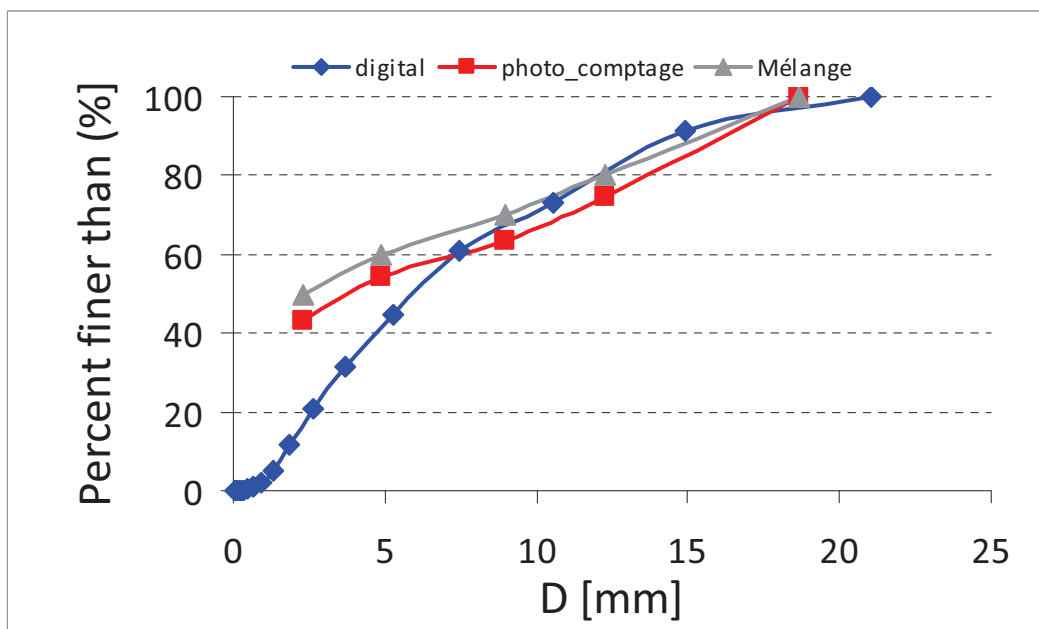
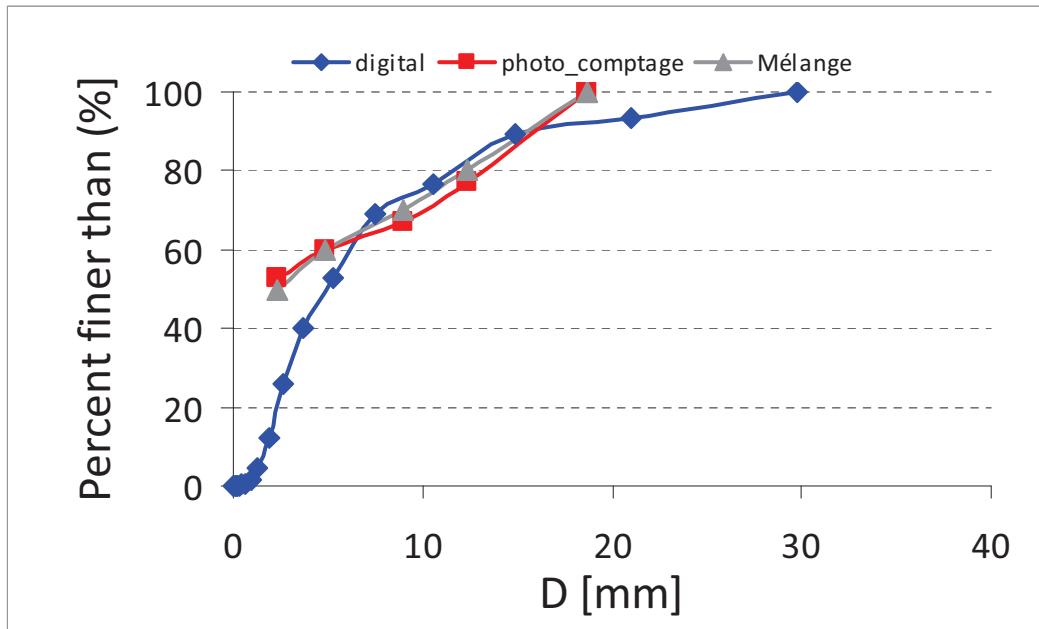
## ANNEXES

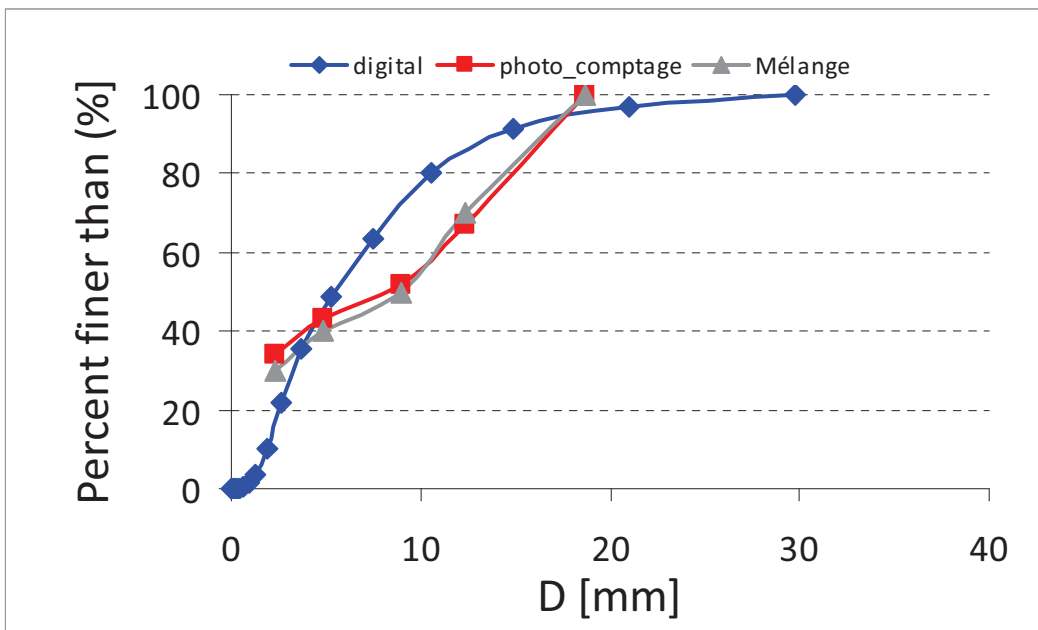
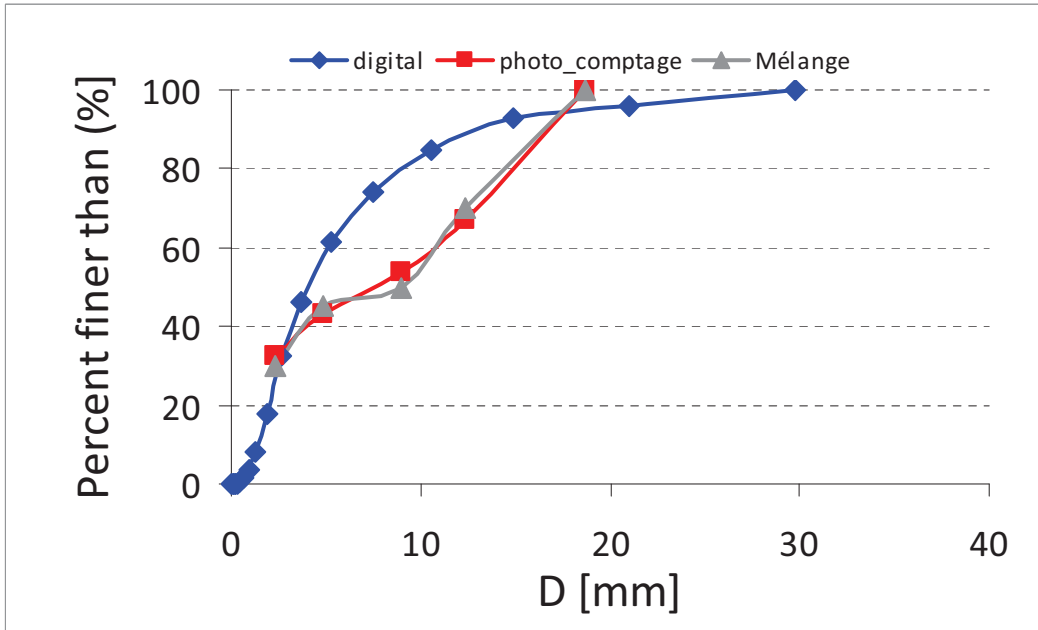
---

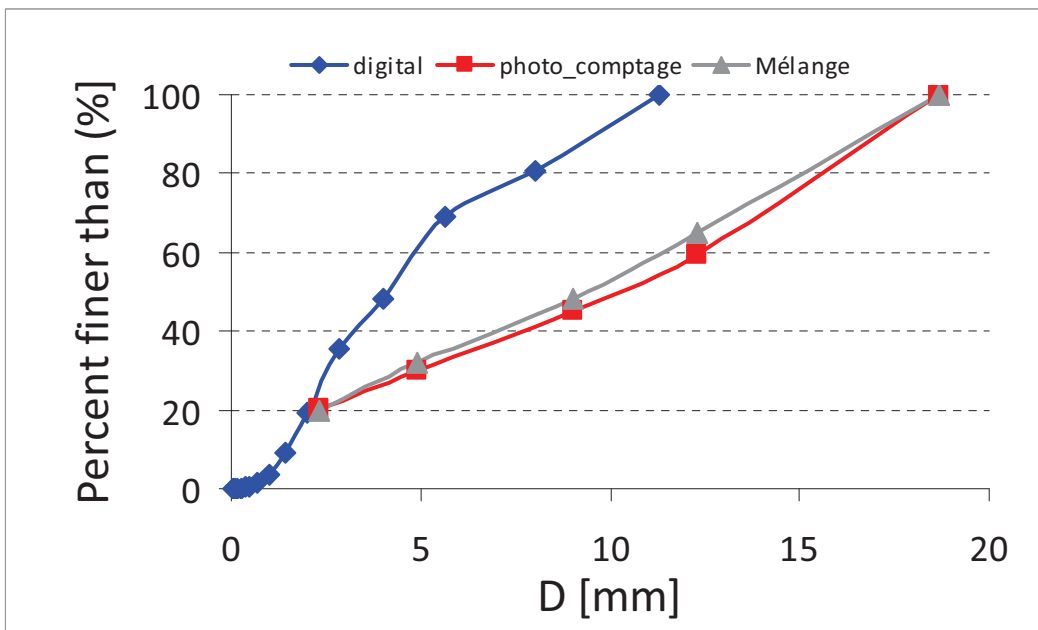
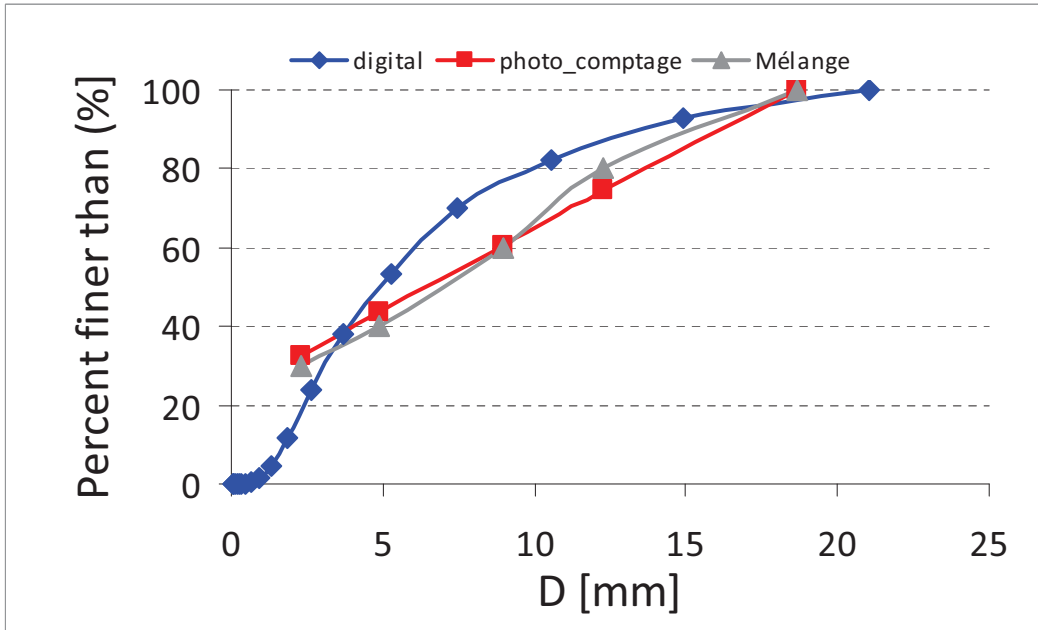
**ANNEXE1 : COMPARAISON ENTRE LA METHODE DE COMPTAGE DES PARTICULES ET LE LOGICIEL DIGITALGRAVELOMETER™**

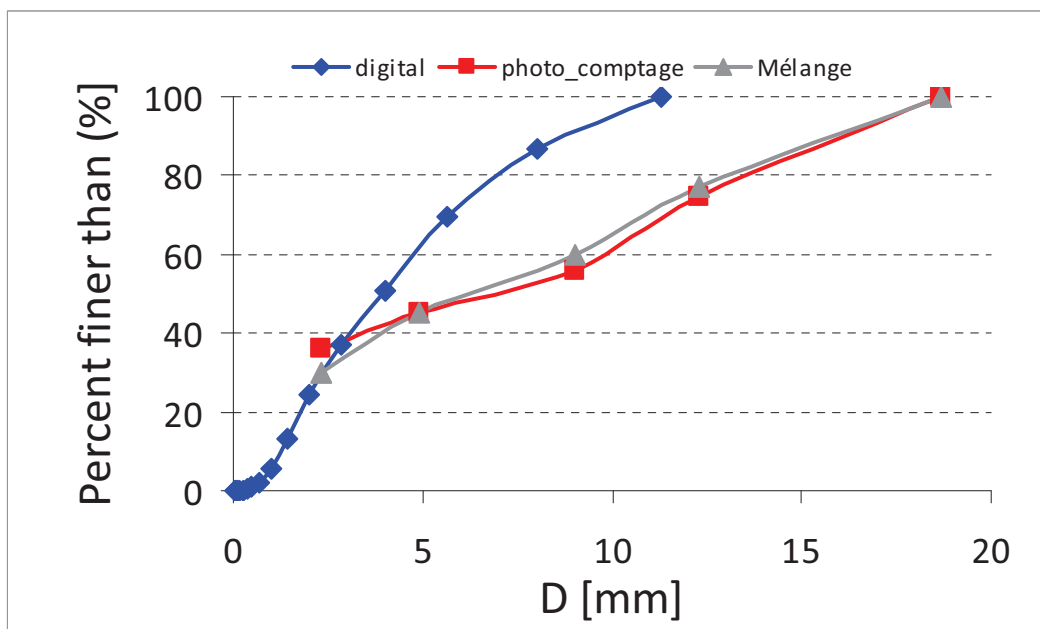
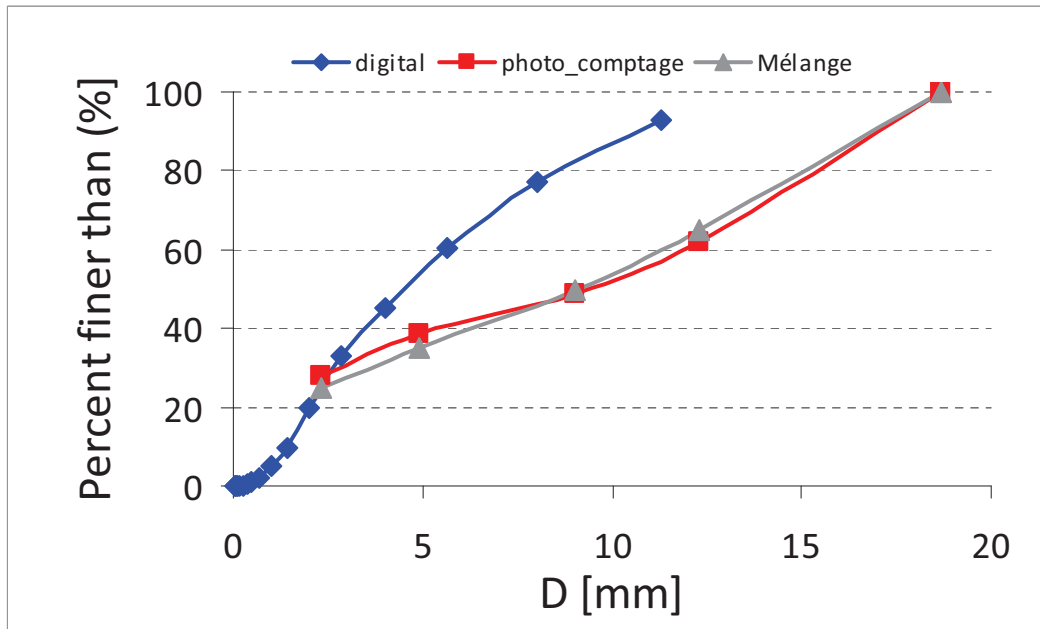


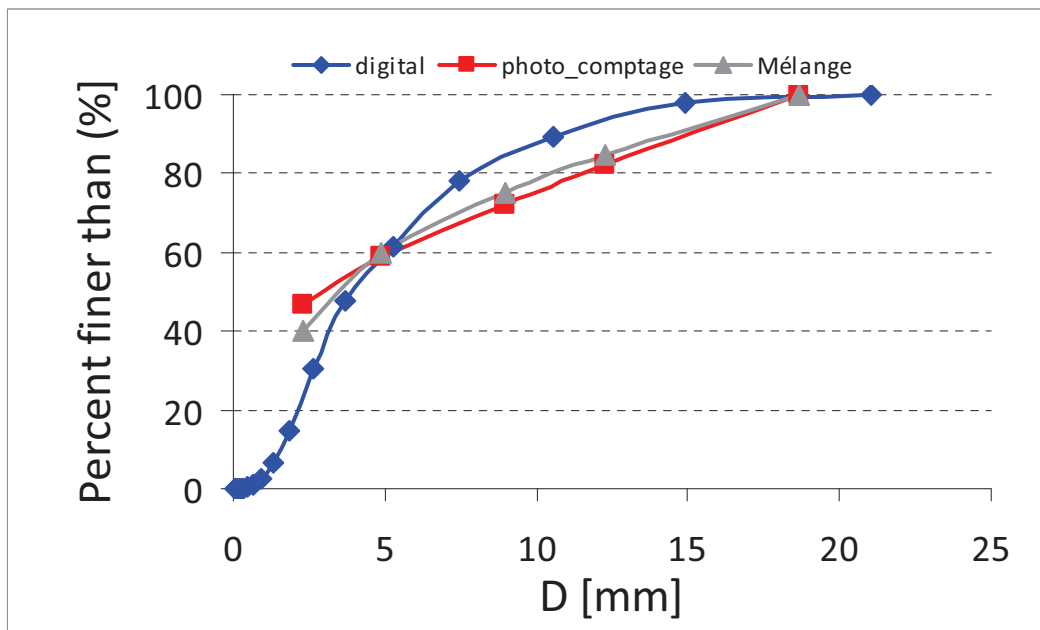
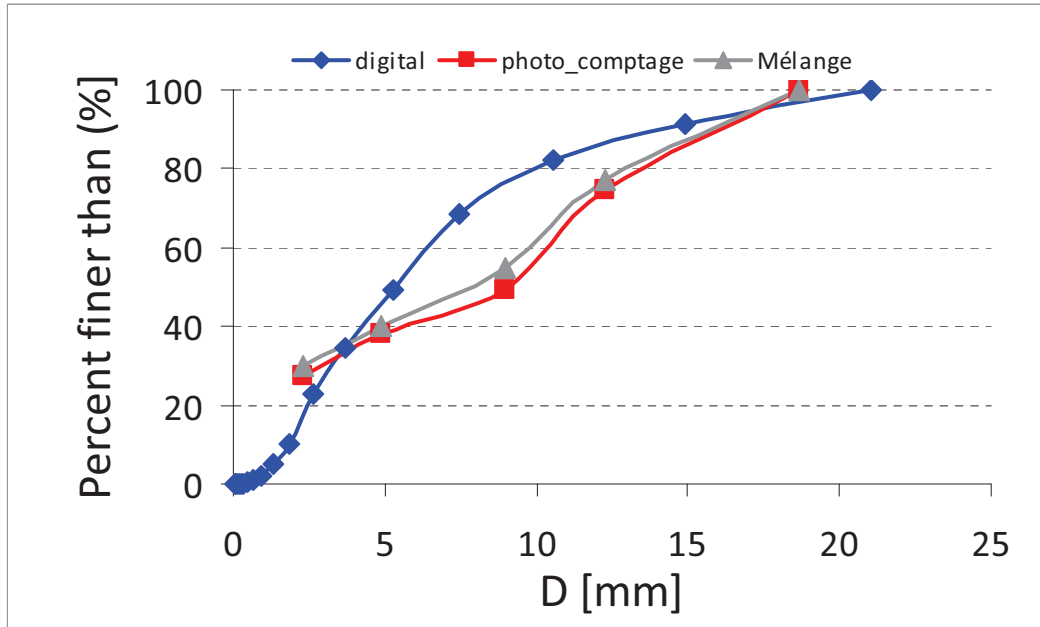


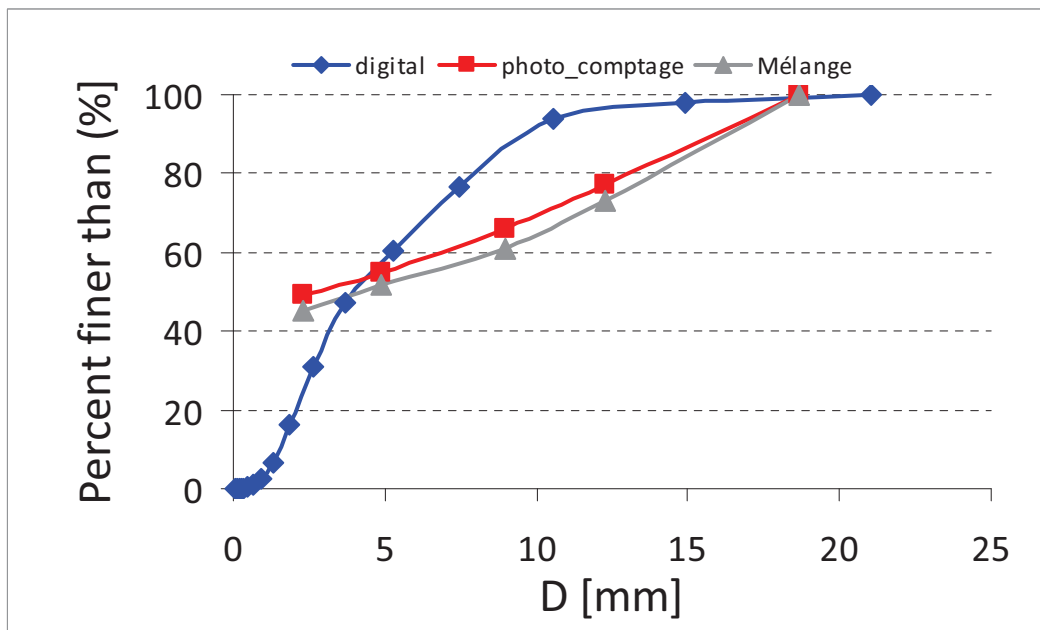
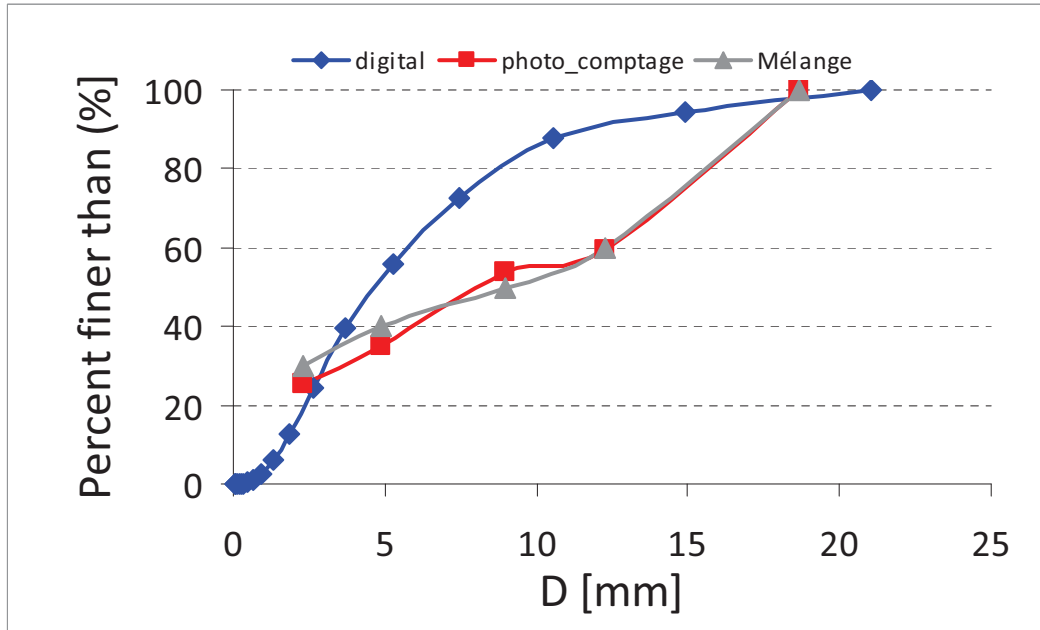


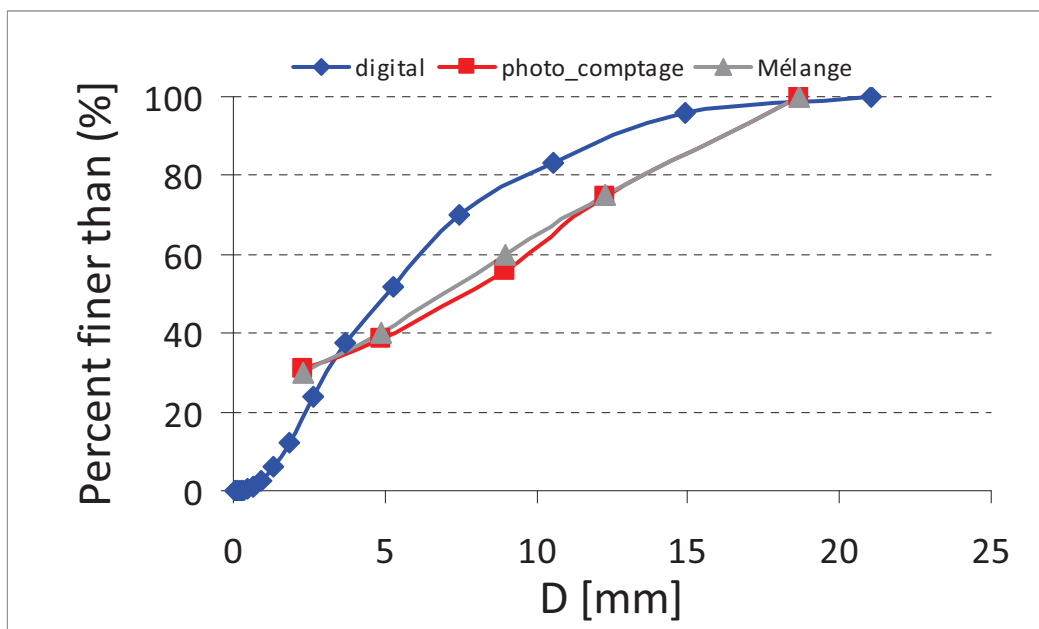
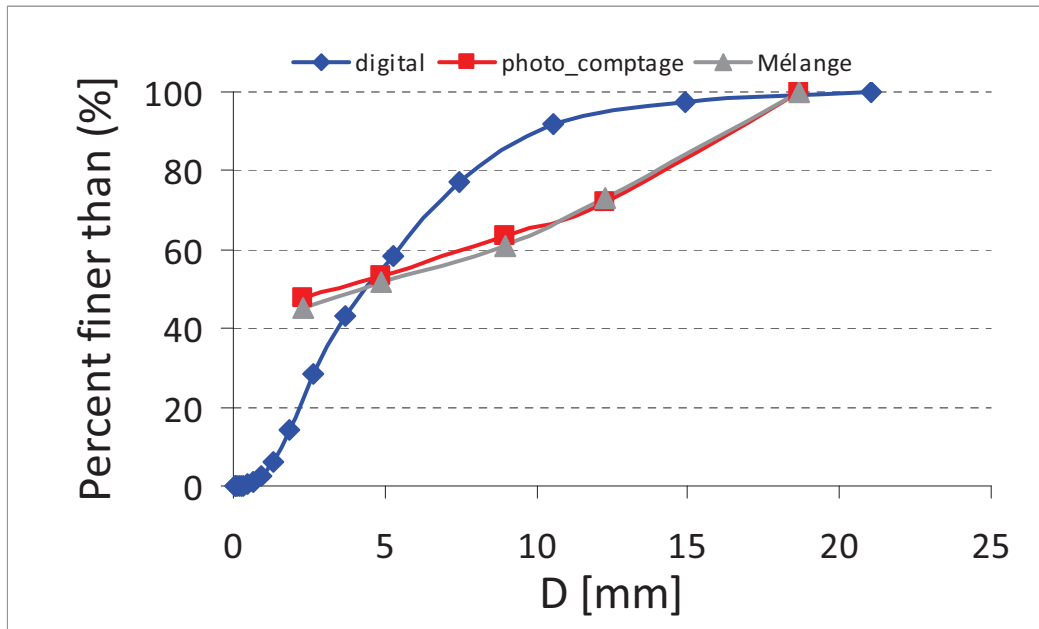












**ANNEXE 2 : MESURES DE DEBIT SOLIDE CORRESPONDANT AUX  
PENTES MAXIMALE ET MINIMALE OBSERVEES AU COURS DE  
L'EXPERIENCE FAIBLE TRANSPORT**

---

T [heures]	$S_{max}$ [-]	$S_{min}$ [-]	$Q_s$ [g/s]
39.95	0.127		3
40.6		0.117	16
42.8		0.117	2
43.88	0.126		3
45.43	0.126		1.2
49		0.117	5
49.96		0.117	6
51.71	0.126		3
55.88	0.127		5
56.51		0.117	5
58.31	0.129		2
60.78		0.117	30
61.28	0.125		3
64.1	0.126		12
65.25	0.126		30
67.28		0.117	19
69.01	0.126		2
69.46		0.117	30
70.71	0.126		3
72.68	0.126		1
74.31	0.128		1
76.11	0.126		3
78.21		0.11	10
79.83		0.117	3
82.55	0.126		1
86.9	0.126		3
87.26		0.117	19
88.46	0.127		1
89.7	0.129		1
90.45		0.118	5
93.51		0.117	13
96.36	0.127		1
98.41	0.128		2
99.78		0.117	19
107.25	0.127		1

$S_{min}$  [-] et  $S_{max}$  [-] sont, respectivement, la pente maximum et minimum du système ;  $Q_s$  [g/s] est le débit solide qui correspond aux valeurs de pente indiqués.  $T$  est le temps.





**ANNEXE 3 : PENTE MOYENNE, DEBIT SOLIDE ET  
GRANULOMETRIE DE SURFACE MESURES EN PHASE DE  
REDEMARRAGE DANS LE CADRE DE L'EXPERIENCE FORT  
TRANSPORT**

Temps [h]	$D_{50}$ [mm]	$D_m$ [mm]	$D_{84}$ [mm]	$Q_s$ [mm]	$S_o$ [mm]
12.03	3.69	7.12	11.42	79.77	0.118
13.47	4.90	8.44	13.01	40.77	0.123
14.53	2.02	5.22	7.22	89.80	0.115
16.27	3.79	7.17	11.49	92.75	0.117
18.63	4.72	8.21	12.35	68.36	0.125
21.30	2.64	5.73	8.24	10.31	0.129
23.32	4.56	7.93	11.56	48.05	0.132
26.62	5.20	8.68	12.36	35.03	0.136
28.62	3.48	6.78	10.60		0.121
31.45	4.04	7.46	11.73	79.28	0.134
31.88	1.97	4.78	4.80	33.79	0.119
33.27	3.74	6.72	10.09	66.03	0.121
35.63	2.31	5.50	7.91	62.78	0.128
37.97	4.21	7.43	11.28	70.37	0.119
39.63	3.28	6.60	10.61	30.46	0.124
41.32	2.08	5.17	7.32	76.57	0.127
43.83	1.67	4.04	4.37	105.09	0.121
44.22	6.96	9.77	13.81	5.43	0.144
45.80	3.85	7.14	11.13	116.41	0.121
50.00	3.09	6.22	9.71	27.28	0.123
52.00	3.33	6.14	8.47	69.52	0.124
60.50	2.92	6.03	8.80	71.23	0.127
63.50	1.58	4.11	4.37	145.39	
67.42	2.03	5.48	9.04	31.31	0.124
69.00	4.30	7.74	12.01	44.95	0.120
71.00	1.81	4.81	5.32	73.16	0.117
73.00	3.57	6.70	10.18	5.74	0.127
75.05	3.93	6.92	10.06	15.81	0.125
76.00	1.72	3.78	4.12	57.74	0.132
80.00	4.30	7.58	11.32	81.45	0.129
83.00	2.71	5.85	8.59	68.20	0.123

$S_o$  [-] et  $Q_s$  [g/s] sont, respectivement, la pente moyenne et le débit solide moyen du système en phase de redémarrage ;  $D_{50}$ ,  $D_{84}$ ,  $D_m$  [mm] sont les diamètres caractéristiques de la courbe granulométrique de la surface du lit (mesurés avant de redémarrer l'expérience).