



**HAL**  
open science

# Modélisation physique et étude morphologique des dépôts dans les ouvrages de correction torrentielle (plage de dépôt)

J. Le Guern

► **To cite this version:**

J. Le Guern. Modélisation physique et étude morphologique des dépôts dans les ouvrages de correction torrentielle (plage de dépôt). Sciences de l'environnement. 2014. hal-02600007

**HAL Id: hal-02600007**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02600007v1>**

Submitted on 16 May 2020

**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.

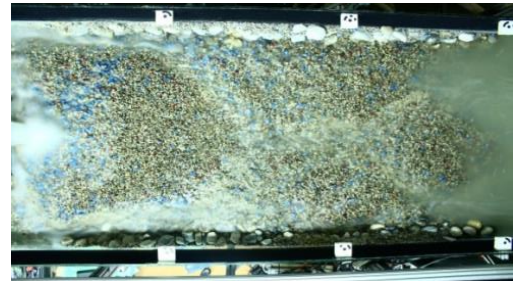
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Master Sciences de l'Eau et de l'Environnement

## Hydrosystèmes et Bassins Versants : diagnostic et risque environnemental

*Rapport de stage de fin d'études pour l'obtention  
de la 2<sup>nd</sup>e année de Master*

### Modélisation physique et étude morphologique des dépôts dans les ouvrages de correction torrentielle (plages de dépôt).



## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement Guillaume Piton qui m'a encadré pendant ce stage et avec qui j'ai énormément appris pendant ces cinq derniers mois. Il a su être présent et disponible pour me conseiller et m'orienter dans mon travail. Il m'a transmis son engouement, sa rigueur et sa passion tout au long de ce stage. J'ai appris chaque jour à tes côtés Guillaume et pour cela je te témoigne toute ma reconnaissance.

Je tiens également à remercier Alain Recking qui m'a fait intégrer l'équipe ETNA et avec qui j'ai pu échanger et discuter de mon travail mais aussi de mon avenir. Merci, Alain, pour l'attention que tu m'as portée et les conseils que tu m'as donné. Tu as également su valoriser mon travail lorsque j'étais en proie au doute, seul au labo. Merci de m'avoir permis de vivre cette expérience.

J'attache une importance toute particulière à remercier Hervé Bellot pour tout le temps qu'il a passé à programmer le matériel du laboratoire et sans qui je n'aurais pu effectuer ce travail (cf. la Pitonade). Merci pour ta disponibilité malgré ton emploi du temps chargé et pour toutes les discussions que nous avons pu avoir.

Nombreuses sont les personnes impliquées de près ou de loin dans ce travail. Je souhaite toutes les remercier car sans eux, je n'aurais pas pu arriver jusque-là. Merci à Frédéric Ousset et Christian Eymond-Gris pour m'avoir supporté et beaucoup aidé dans mes bricolages réguliers. Merci également à Ismail Rifai avec qui j'ai partagé mon bungalow et qui avec qui j'ai eu de nombreuses discussions enrichissantes. Merci à Dominique l'Aigle pour avoir pris le temps de me montrer son modèle et d'être venu me conseiller. Merci aussi à Julie Pellan pour m'avoir aidé dans toutes les manip en laboratoire. Merci enfin à tous mes amis stagiaires et mes coéquipiers de football dont je n'aurai pas la place d'énoncer tous les noms et avec qui j'ai passé d'agréables moments les midis comme les weekends.

Pour finir, je remercie ma petite femme et mon fils pour leur patience et leur courage. Passer ces longs mois loin de vous ne fut pas facile tous les jours, pour vous comme pour moi.

Cette étude a été financée par l'IRSTEA et le projet Européen ALCOTRA : RISBA.

## Sommaire

Remerciements.....	1
Sommaire .....	1
Introduction.....	2
1. Présentation de la problématique et synthèse bibliographique.....	3
1.1. L'hydraulique torrentielle.....	3
1.2. Application de la photogrammétrie à la géomorphologie.....	10
2. Matériel et méthodes.....	14
2.1. Le dispositif expérimental .....	14
2.2. Le dispositif de mesure.....	20
3. Résultats.....	28
3.1. Pente et concentration.....	28
3.2. Cycles morphologiques.....	29
3.3. Tri granulométrique.....	32
3.4. Pentes de dépôt et de transport.....	32
4. Discussion.....	40
4.1. Similarités avec les morphodynamiques connues.....	40
4.2. Initialisation de l'incision : renaissance de la «dune à forte pente».....	41
4.3. Tri granulométrique.....	42
4.4. Pente.....	42
Conclusion et perspectives .....	46
Bibliographie.....	47
Table des figures .....	51
Table des matières .....	53
Annexes.....	55
Résumé .....	62
Abstract .....	62

## Introduction

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre d'un stage de master 2 réalisé au sein de l'équipe ETNA de l'IRSTEA de Grenoble. Il a pour objectif de décrire la morphologie et l'évolution des dépôts au sein d'un barrage de correction torrentielle (plage de dépôt) mis en place sur un torrent pour gérer les risques liés aux apports massifs de sédiments. Cet ouvrage est destiné à contenir les écoulements lors des crues pour préserver des zones à enjeux situées juste en aval de l'ouvrage. Cette étude morphologique est réalisée sur la base d'un modèle physique et l'acquisition des données est effectuée à l'aide de la photogrammétrie.

Les phénomènes se développant dans les hydrosystèmes d'altitude sont radicalement différents de ceux des systèmes fluviaux de plaine. La principale différence réside dans la pente de ces systèmes. Les fortes pentes des torrents contribuent à passer dans le domaine torrentiel où l'équilibre du système est difficile à déterminer. Ainsi, les lois qui régissent l'hydraulique et le transport solide dans les systèmes fluviaux ne sont plus valables.

Dans un premier temps, ce rapport pose la problématique et le contexte de cette étude au travers d'une analyse bibliographique des spécificités de l'hydraulique torrentielle. Il présente ensuite le matériel et les méthodes employés afin de répondre à cette problématique : le canal hydraulique et la photogrammétrie. Enfin, les résultats des expérimentations en laboratoire seront présentés, en particulier les cycles morphologiques observés et les aspects de tri granulométrique. Dans un second temps, ces résultats sont discutés et confrontés aux observations tirées de la littérature scientifique.

# 1. Présentation de la problématique et synthèse bibliographique

## 1.1. L'hydraulique torrentielle

Les torrents sont situés à l'amont des réseaux hydrographiques et ils contrôlent ainsi tous les apports (liquides et solides) des hydrosystèmes de plaine. Ils participent à la régulation de l'équilibre morphologique des rivières de piémont (Recking et al., 2013). Les torrents peuvent être distingués des rivières torrentielles et des rivières principalement par leur pente. Ainsi, Meunier (1991) définit une rivière en deçà d'une pente de 1.5%, une rivière torrentielle pour une pente inférieure à 6% et un torrent au-delà de 6%. Il caractérise également un torrent par un lit de nature et de profil plus irrégulier, par des écoulements plus turbulents et plus chargés en matériaux divers (large gamme granulométrique et débris végétaux), ce qui induit différents modes de transport des sédiments (charriage, charriage hyperconcentré, transport en masse, laves torrentielles). La spécificité des torrents réside également dans leur régime de crue. En effet, à l'inverse des rivières, les torrents sont caractérisés par des crues violentes et soudaines provoquées par des pluies de même nature.

Le bassin versant torrentiel comporte trois zones fonctionnelles. Une zone de production, composée d'un réseau de ravins, fournit les matériaux à un chenal. Les écoulements sont concentrés au sein de ce chenal et ce dernier assure le transit des matériaux vers l'aval (zone de transfert). Les matériaux sont ensuite acheminés vers une zone de dépôt qui forme un cône de déjection. Le bassin versant torrentiel constitue donc à la fois un système fluvial complet, et à plus petite échelle, la zone de production d'un système fluvial plus grand.

### 1.1.1. Le transport solide en contexte torrentiel

En hydraulique fluviale, on distingue trois types de transport des sédiments dans les cours d'eau :

- **La suspension** est le transport des particules fines au sein de l'écoulement. Les sédiments sont maintenus grâce à la turbulence.
- **La saltation** est le transport de sédiments par bonds successifs sur le lit.
- **Le charriage** est un transport par roulement des grains sur le lit.

Les fortes pentes du contexte torrentiel mettent en jeu des forces considérables qui permettent une multitude de types de transports dans les torrents.

Les laves torrentielles font partie du domaine d'étude de l'hydraulique torrentielle. En effet, Meunier (1991) place l'hydraulique torrentielle à mi-chemin entre l'hydraulique fluviale et la géomécanique (étude des sols et matériaux granulaires). La Figure 1 montre l'évolution des phénomènes entre un pôle « eau » et un pôle « matériau solide ». En augmentant la teneur en matériau solide (donc la pente pour augmenter la capacité de transport), on passe progressivement de l'hydraulique fluviale où le charriage et la suspension dominent, vers des écoulements hyperconcentrés où le solide influence beaucoup les écoulements. Ce type d'écoulement peut être observé tant dans un matériau fin et cohésif que dans un matériau plus grossier (charriage hyperconcentré). Le domaine des laves torrentielles se situe par exemple dans un domaine très concentré en matériau solide, ce qui lui confère des propriétés rhéologiques caractéristiques.

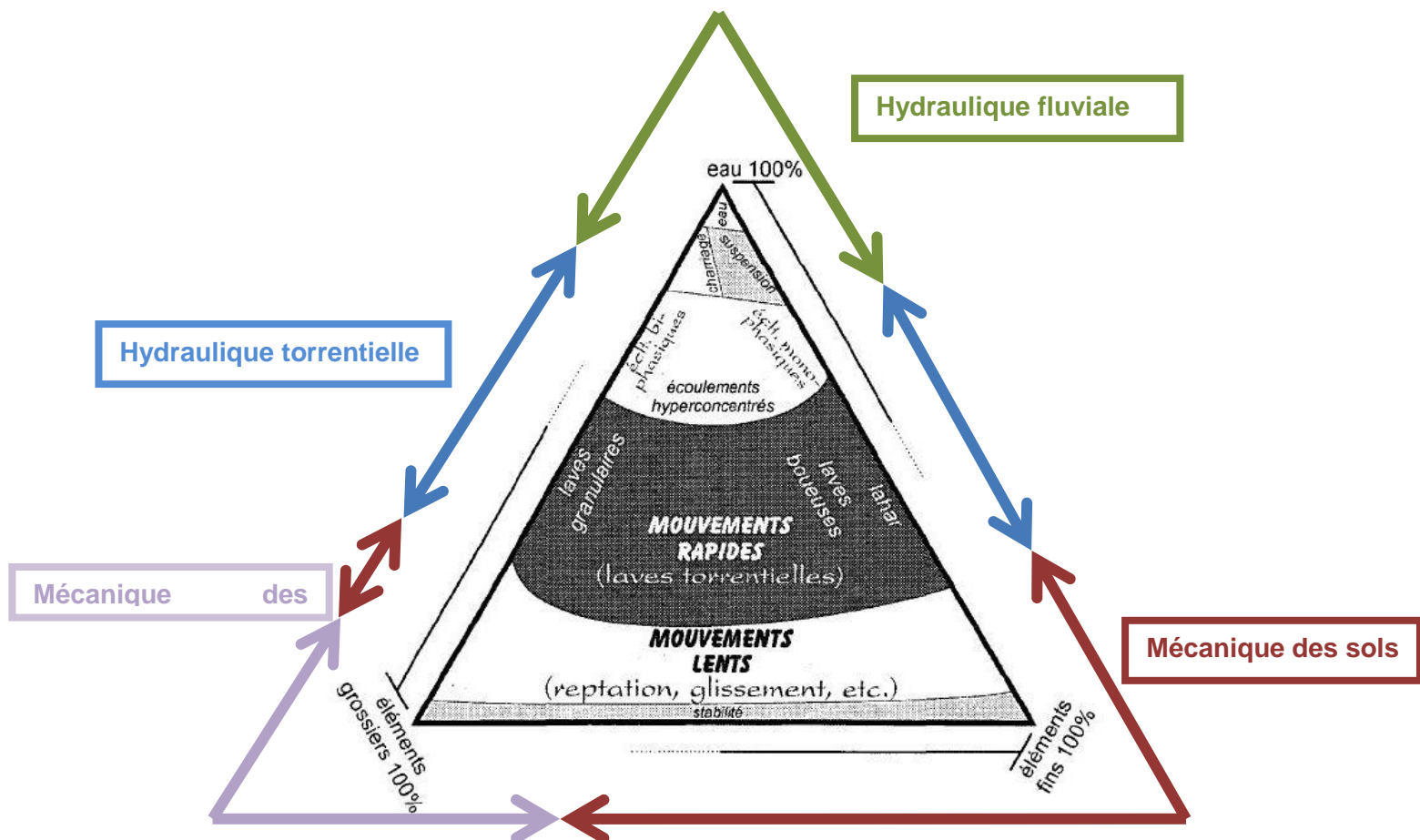


Figure 1 : Schéma de transition des disciplines en fonction du phénomène étudié, (modifié d'après Meunier, 1991).

Les laves torrentielles se forment dans un contexte montagnard à forte pente, où une zone de production en matériau solide est connectée au torrent et est susceptible de l'alimenter. Bardou (2002) met en évidence que le déclenchement d'une lave torrentielle est lié aux prédispositions d'un bassin versant. Ainsi, un bassin versant ne réagit pas de la même manière à deux évènements hydrologiques de même intensité. Ce système met en balance les prédispositions de base du bassin versant (géologie, topographie,...), les prédispositions variables (principalement la disponibilité du matériau meuble) et les facteurs dégradants (pluie, température, ...). La Figure 2 illustre cette balance qui, lorsque les facteurs dégradants affectent la stabilité du système, se retrouve en déséquilibre et provoque le déclenchement de laves. Ainsi, un stock moyen de matériau combiné à une forte pluie peut déstabiliser le système, tout comme la combinaison d'un grand stock de matériau avec une faible pluie. Sur la Figure 2, l'augmentation brutale des prédispositions de base peut être attribuée à un glissement de terrain dans le chenal qui modifie sa morphologie et fournit une grande quantité de matériau mobilisable.

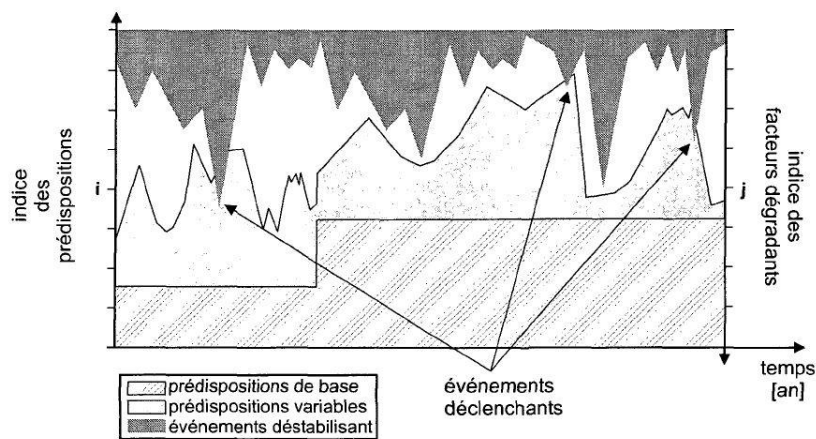


Figure 2 : Illustration qualitative de l'équilibre d'un bassin versant torrentiel (Bardou, 2002).

Les versants contrôlent les apports sédimentaires aux chenaux. Toutefois, leur fonctionnement est fortement transitoire dans l'espace et dans le temps. Recking et al. (2013) parlent de pulsations détritiques de versant rythmées par les processus de pente, ce qui se traduit par une morphodynamique très variable, avec des cycles de dépôt et de reprise de sédiment. La notion de régime d'équilibre (balance de Lane) ne peut donc pas être appliquée aux torrents.

Les laves se différencient des écoulements de charriage torrentiel par leur concentration en matériau solide (50 à 80 % en volume). Leur régime d'écoulement, qui est fortement transitoire, induit un fonctionnement par ondes (« bouffées ») (Recking et al., 2013). Elles présentent les caractéristiques d'un écoulement monophasique, c'est-à-dire les caractéristiques d'un écoulement où le solide et l'eau ont la même vitesse, par opposition à l'écoulement biphasique, où l'eau se déplace plus vite que le solide, comme pour le charriage. Les dépôts de laves ne présentent pas de tri granulométrique, mise à part la présence de gros blocs sur le front de lave, et leur granularité très étendue. Ainsi, la morphologie particulière de ces écoulements se caractérise par la présence d'un front de lave, de bourrelets latéraux, d'un corps et d'une queue de coulée (Figure 3) (Recking et al., 2013).

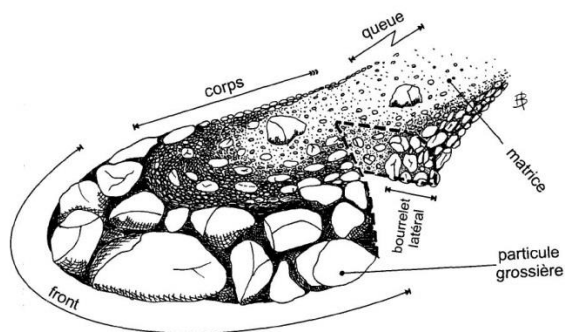


Figure 3 : Entités fonctionnelles d'un laves torrentielle (Bardou, 2002).

Selon l'aspect, respectivement plus ou moins marqué, de ces traits morphologiques mais aussi de la composition de l'écoulement (rapport eau/matériau), on distingue des laves torrentielles boueuses, des laves torrentielles granulaires mais aussi des laves torrentielles de type lahars (coulées de cendres volcaniques) (Recking et al., 2013). Meunier (1985) distingue les coulées boueuses (mud flow) des laves torrentielles (debris flow) par leurs origines (hydraulique pour les laves et rupture de versant pour les coulées). Le charriage torrentiel (granular flow) est caractérisé par Meunier (1985) comme un écoulement biphasique et se différencie ainsi des laves et des coulées.



Le charriage torrentiel traduit les processus de transport des sédiments en contexte de forte pente. Alternativement, ces processus prennent la forme de charriage hyperconcentré et de charriage ordinaire. Dans le cas du charriage hyperconcentré, les concentrations en débit solide sont nettement supérieures à celles du charriage ordinaire (Figure 4) et les hauteurs d'eau sont fortement influencées par le transit des sédiments. En effet, Smart and Jaeggi (1983) ont mis en évidence qu'à partir d'une pente d'environ 7%, la hauteur d'eau pour un débit donné est supérieure à la hauteur d'eau si il n'y avait pas de sédiments en transit. Ceci montre l'influence des sédiments sur la hauteur d'eau en contexte torrentiel. Ainsi, les lois classiques de l'hydraulique ne peuvent pas être prises en compte pour traduire ces phénomènes mais l'hydraulique torrentielle permet de les traduire. L'intensité du transport solide induit également une forte variabilité du fond du torrent, qui est constamment remanié au rythme des dépôts et des érosions. Contrairement aux rivières de plaines où le risque d'inondation est principalement dû aux variations du niveau d'eau, les rivières torrentielles et les torrents présentent des risques de débordements selon la concentration solide de l'écoulement mais aussi suivant les variations locales et rapides du fond (couramment dénommées « respiration du lit » par les professionnels du milieu).

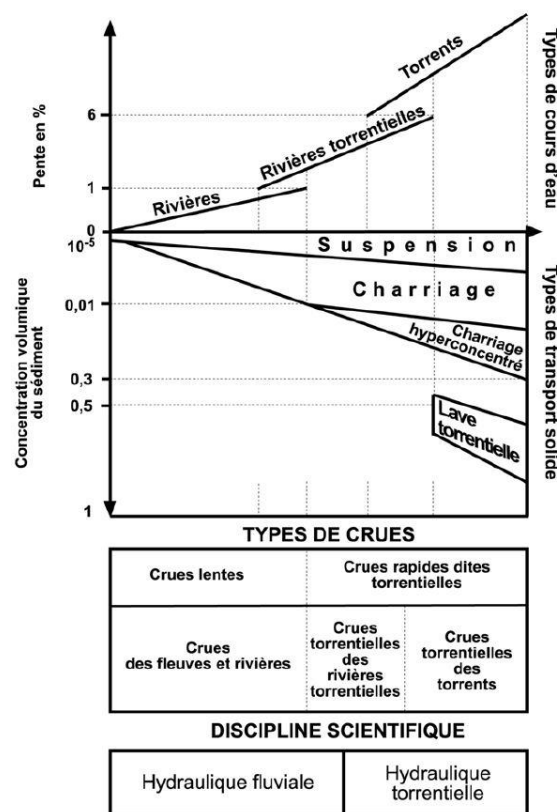


Figure 4 : Méthode de classification des types de rivières permettant de distinguer la rivière torrentielle du torrent selon des critères hydrauliques et sédimentaires (Liébault, 2003).

La limite entre le charriage et le charriage hyperconcentré peut être définie en fonction de la couche de matériaux transportés. Lorsqu'il n'y a qu'une seule épaisseur de grains, on considère qu'il s'agit de charriage. Dans le cas du charriage hyperconcentré, le transport s'effectue avec une couche d'épaisseur supérieure au diamètre des grains. Le charriage hyperconcentré diffère des laves par son caractère multi-phasique et sa concentration en sédiments mais il présente également des points communs, tels que son fonctionnement par bouffées et son faible tri granulométrique (Koulinski, 1993).

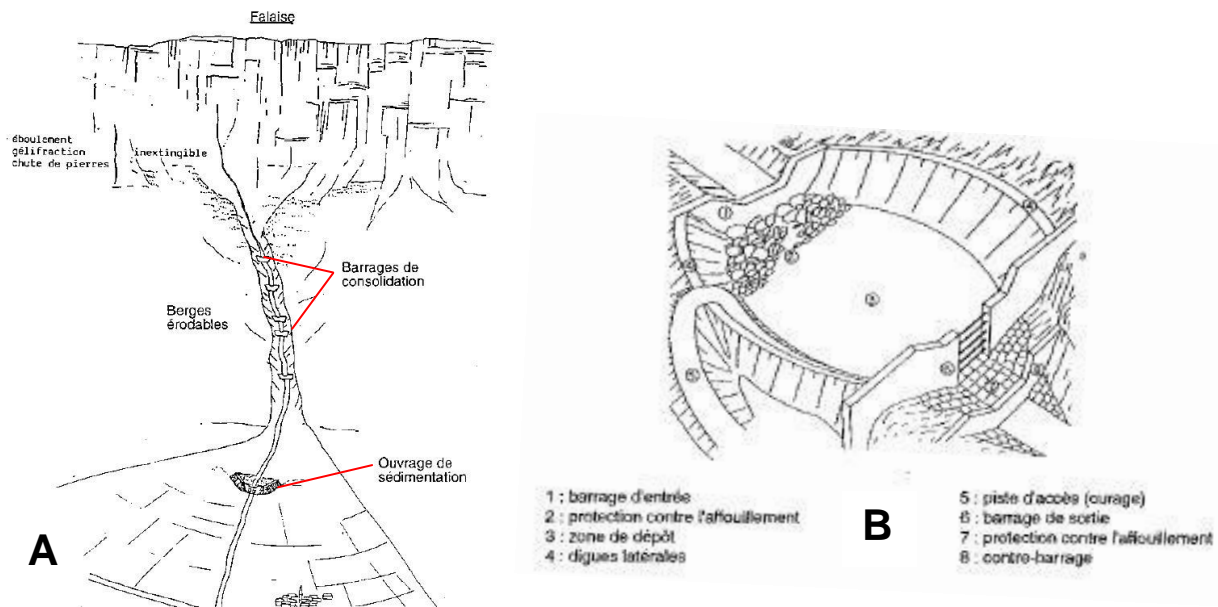
Tous ces processus de transport interviennent dans les torrents et peuvent se produire successivement. Or, l'absence de frontières bien distinctes entre ces phénomènes rend difficile leur compréhension.

### 1.1.2. Les ouvrages de correction torrentielle (plages de dépôt)

De 1790 à 1850, les bassins versants alpins sont le lieu d'une déforestation intensive due à la pression démographique post-Révolution française. La mise en place de ces pratiques induit une augmentation de la production sédimentaire qui conduit à une aggradation au sein du lit des torrents. Pour contrôler l'érosion des bassins versants et lutter contre les crues torrentielles, l'Etat a mis en place le service RTM (Restauration des Terrains de Montagne) chargé d'appliquer un programme de reforestation entre 1860 et 1910 (Ancey, 2011). La mise en place de la végétation dans les terrains de montagne s'est accentuée lors des années 1950 suite à l'abandon des zones rurales par la population (Liébault et al., 2005). La végétalisation a contribué à l'incision des torrents par déficit d'apports sédimentaires. L'incision a engendré une réduction de la bande active des torrents, et favorisé l'installation de la végétation, ce qui provoque une augmentation de la rugosité, une baisse des vitesses et une augmentation de la hauteur d'eau. Cette association de facteurs favorise le débordement des torrents lors des crues. De plus, l'aménagement des cônes de déjection des torrents induit la nécessité de lutter contre les risques de débordement. C'est dans ce contexte que les plages de dépôt ont été implantées dans les Alpes françaises depuis les années 1970. Les premières plages de dépôt ont été installées à la fin des années 1930, puis les installations se sont multipliées entre 1980 et 2000. En 2008, le département de l'Isère dénombrait environ 130 plages de dépôt (Liébault et al., 2010). Les plages de dépôt peuvent être considérées comme des outils de la gestion des sédiments (Van Effenterre, 1981) et peuvent également servir d'outil de mesure du transport solide torrentiel grâce à l'historique du suivi de ces ouvrages (Veyrat-Charvillon and Memier, 2006 ; Liébault et al., 2010).

Les ouvrages de correction torrentielle sont mis en place sur les torrents dans le but de protéger les zones aval qui sont souvent le lieu d'enjeux majeurs. Les ouvrages de protection sont de deux types (Recking et al., 2013) (Figure 5A) :

- Les ouvrages de protection « active » qui visent à traiter directement les causes de l'érosion (stabilisation) et qui sont le plus souvent placés à l'amont du bassin versant (barrages, seuils et reboisement).
- Les ouvrages de protection « passive » dont le but est plutôt de limiter les conséquences de l'érosion et du transport solide afin de protéger l'aval du bassin versant. Ils sont positionnés au niveau du sommet du cône de déjection.



**Figure 5 : Les aménagements torrentiels. A : Schémas d'un bassin versant torrentiel avec aménagement mixte (actif et passif) (Deymier et al., 1995). B : Eléments d'un ouvrage de sédimentation (modifié d'après Zollinger, 1983).**

Les plages de dépôt entrent dans la catégorie des ouvrages de protection « passive » (Figure 5B). Leur rôle est de contenir les dépôts sédimentaires et les laves torrentielles afin d'éviter les débordements dans la vallée. Les phénomènes de dépôt y sont favorisés par l'élargissement de la section transversale et la diminution de la pente (Zollinger 1986).

Dans un cas idéal, la plage doit permettre une continuité sédimentaire pour des petites crues (charriage) et doit créer une discontinuité lors des fortes crues torrentielles. Cet ouvrage est constitué d'un barrage d'entrée connecté de façon directe (Figure 5B) ou indirecte à la zone de dépôt. Cette zone de dépôt est entourée de digues latérales et l'ouvrage se termine par un barrage de sortie dont les ouvertures peuvent être de plusieurs types (pertuis, grilles, fentes,...). Ces différents types d'ouverture induisent des comportements de l'ouvrage totalement différents. Ainsi, une étude réalisée conjointement par Sogreah, ETRM (bureau d'études Eaux, Torrents et Rivières de Montagne) et les services départementaux RTM, a permis de mettre en évidence l'influence des différents types d'ouvertures lors de crues torrentielles (SOGREAH et al. 2011). Cette étude est préalable à l'installation d'une plage de dépôt sur le Torrent du Chagnon, afin de réduire les risques de débordements liés à son engravement au niveau de la confluence avec le Chagne. Lors de cette étude, 13 essais ont été réalisés en faisant varier le type d'ouverture (fentes horizontales, verticales, circulaires, en trapèze, avec peigne, plus ou moins profondes,...), l'apport ou non de flottant (végétation) ainsi que la durée de l'hydrogramme.

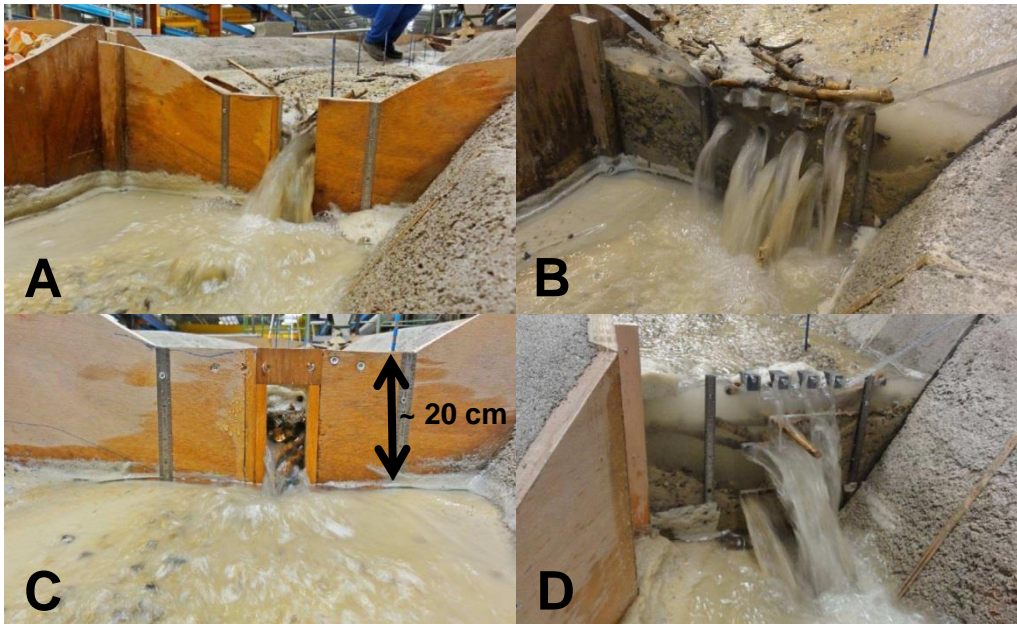


Figure 6 : Exemple d'ouvertures de plage de dépôt en modèle physique. A : fente large, B : 10 ouvertures circulaires avec fente, C : fente étroite et profonde avec peigne, D : 4 fentes horizontales décalées. (SOGREAH et al., 2011).

Les résultats montrent que la forme et la position des ouvertures sur le barrage ont tendance à influencer la reprise ou la stabilisation des sédiments à la décrue, tandis que la présence de flottants influence beaucoup le volume des dépôts au sein de l'ouvrage (Figure 7). Dans le cas du Chagnon, l'ouvrage idéal doit permettre un stockage quasi inexistant lors de la montée de crue puis un stockage maximum à la pointe de la crue. De plus, il doit permettre une rétention des flottants et ne doit pas permettre la reprise de sédiments à la décrue afin de limiter les risques à l'aval de l'ouvrage. La complexité de l'ouvrage retenu pour cette étude témoigne de la difficulté à remplir ces multiples critères d'efficacité. Compte tenu de la grande variété du fonctionnement des torrents, il n'y a pas un type d'ouvrage adapté mais le cahier des charges doit être adapté à chaque site.

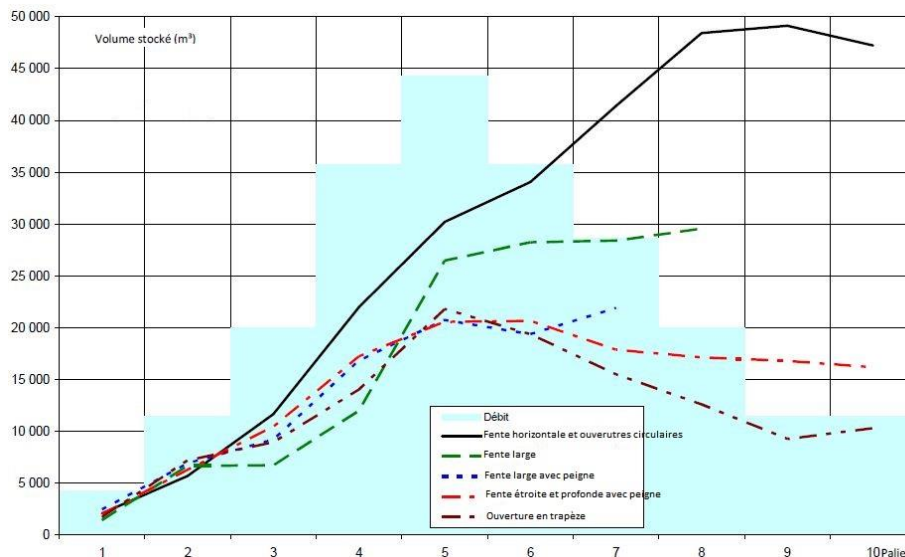


Figure 7 : Volumes stockés au cours d'un hydrogramme de crue pour différentes configurations d'ouvrage terminal (SOGREAH et al. 2011).

La mise en place de ce type d'ouvrage n'est pas sans conséquences à l'aval. En effet, si l'ouvrage terminal stoppe tous les matériaux au lieu de réguler leur transit, le déficit de sédiment à l'aval de l'ouvrage entraîne une érosion du lit et potentiellement une déstabilisation des ouvrages à l'aval

(Frey et al., 1999). Ces observations ont également été réalisées sur les modèles réduits avec un important affouillement du seuil à l'aval de la plage de dépôt (SOGREAH et al., 2011).

Les plages de dépôt posent également un problème pour leur coût d'entretien. En effet, selon la fréquence des crues torrentielles, la plage doit être curée entre chaque évènement afin de garder sa capacité de stockage maximale. Ce coût est d'autant plus important si les matériaux ne peuvent être exploités après curage (Frey et al., 1999). L'auto-curage peut être facilité suivant le type d'ouvrage terminal (Zollinger, 1986). Outre le type d'ouverture final, le volume et la forme de la plage sont des paramètres primordiaux à prendre en compte.

Deux grands éléments restent à éclairer dans le fonctionnement des plages de dépôt des cours d'eau à charriage (les laves torrentielles posent d'autres questions qui n'ont pas été traitées dans ce travail).

- Quel sont les lois d'hydraulique pure qui décrivent les ouvrages de fermeture des plages de dépôt? Comment s'adaptent-elles à la présence d'un transport massif de sédiments ou de flottants?
- Quelle est la dynamique des dépôts sédimentaires dans les plages ? Ces phénomènes diffèrent très clairement des phénomènes d'équilibre morphologique et les formules de transport ne s'appliquent peut-être plus dans ce contexte.

Ce travail porte spécifiquement sur la deuxième question et vise à fournir un outil d'étude du phénomène ainsi qu'à initier les premières simulations.

## 1.2. Application de la photogrammétrie à la géomorphologie

La photogrammétrie est née au XIX<sup>ème</sup> siècle, suite à l'essor des appareils de restitution et des chambres de prise de vue. Cette technique permet de reconstituer le relief d'un objet ou d'un paysage à partir de photographies prises d'au moins deux points de vue différents, et d'effectuer des mesures altimétriques ou volumétriques. En quelque sorte, cette méthode permet de restituer la vision humaine (3D) comme le fait notre cerveau en observant la même scène à partir de deux points de vue différents (principe de la stéréoscopie). La photogrammétrie connaît de nombreuses applications, dont la principale est la cartographie à partir de photographies aériennes. Cette application a notamment été développée lors de la seconde Guerre Mondiale pour la conception de cartes d'état-major. Elle est également utilisée en architecture, génie civil ou encore en urbanisme. Ce n'est que dans les années 1990 que cette technique a été développée par les géomorphologues au profit de domaines d'étude très variés (processus de versant, fluctuations de glaciers, dynamique fluviale,...) (Veyrat-Charvillon, 2005). Cette technique permet notamment d'effectuer un suivi temporel et spatial de l'évolution de ces systèmes. De multiples auteurs ont utilisés cette technique pour acquérir des données, tant sur le terrain qu'en laboratoire.

### 1.2.1. Application sur le terrain

Sur le terrain, la photogrammétrie peut être mise en œuvre par voie aérienne (avions, drones, ballons,...) mais aussi directement depuis le sol. On distingue ainsi la photogrammétrie de courte distance (close range photogrammetry) de la photogrammétrie aérienne (aerial photogrammetry). Le principal objectif de l'utilisation de cette technique en géomorphologie est l'acquisition de MNT (Modèle Numérique de Terrain). Les récents progrès en termes d'analyse d'image et de calcul par ordinateur ont contribué au développement de nouvelles méthodes automatisées pour la conception de nuages de points denses, appelées Structure-from-Motion

(SfM). Ceci contribue à faire de la photogrammétrie une technique en développement face à ses « concurrents » (LiDAR, Laser Scane ou suivi GPS) beaucoup plus onéreux et lourds à mettre en œuvre. Une récente étude met en évidence la qualité des résultats obtenus avec la méthode SfM utilisant le même logiciel que pour notre étude (Agisoft Photoscan). En effet, les MNT réalisés sur une rivière en tresses de Nouvelle-Zélande présentent une erreur dans le plan XY d'environ 0,04m et de 0,10m en altitude (Javernick et al., 2014). Toutefois, il est nécessaire de coupler ces mesures altimétriques avec un suivi bathymétrique afin de corriger le MNT du niveau d'eau dans les chenaux et ainsi de pouvoir réaliser des mesures sur les sections des chenaux (Figure 8).

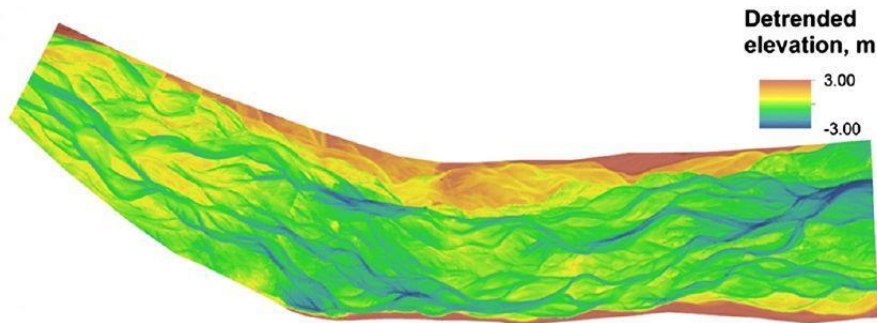


Figure 8 : MNT de la rivière en tresse Ahuriri (Nouvelle-Zélande) réalisé sous Agisoft Photoscan (Javernick et al., 2014).

De plus, Fonstad et al. (2013) montrent que les MNT réalisés avec la méthode SfM sont comparables aux MNT réalisés par LiDAR en matière de densité de points mais aussi en matière de précision (de l'ordre du centimètre) (Figure 9). En outre, la méthode SfM est beaucoup moins couteuse et permet un traitement des données simplifié.

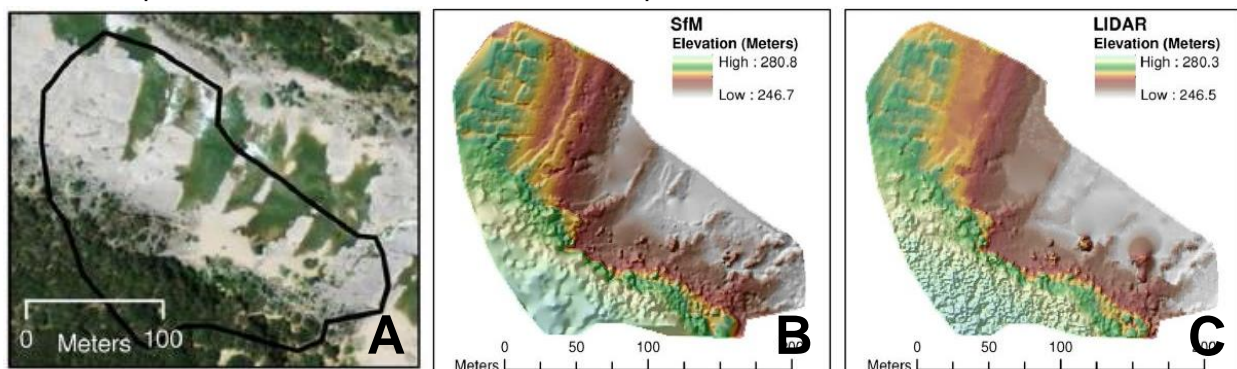


Figure 9 : Comparaison de MNT SfM et LiDAR (Fonstad et al. 2013). A : photo aérienne. B : MNT SfM. C : MNT LiDAR.

Ces résultats montrent tout de même que le MNT SfM est moins précis que le LiDAR dans la zone boisée du Sud de la zone d'étude (Figure 9) et que les résultats obtenus nécessitent une correction de la végétation.

Une des nombreuses applications de cet outil est l'étude des formes d'érosion et de dépôt (Lapointe et al., 1998; Lane et al. 1994, 1996, 1998). Lane, Westaway, and Murray Hicks (2003) ont utilisé la photogrammétrie associée à un laser altimétrique pour étudier les changements morphologiques d'une rivière en tresses entre deux épisodes de crue. Ils ont ainsi pu estimer les zones de dépôt et d'érosion en soustrayant les MNT issus des différentes campagnes de mesures (Figure 10).

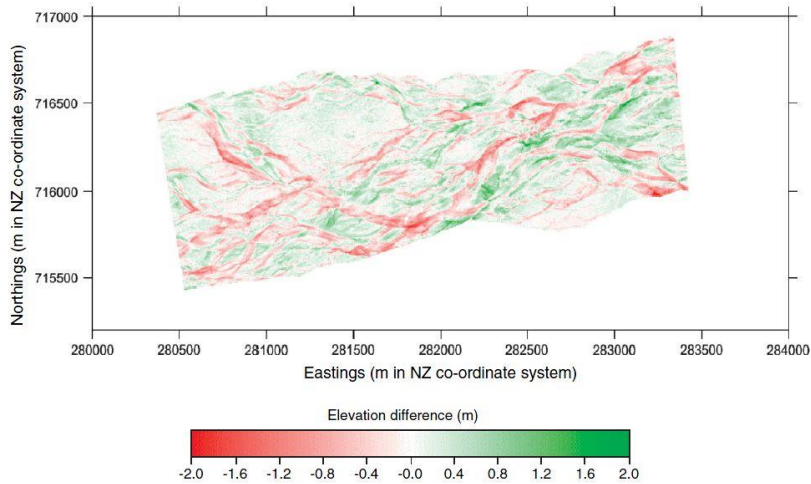


Figure 10 : Carte d'un secteur de la rivière Waimakariri (Nouvelle-Zélande) montrant les zones en érosion et les dépôts entre février 1999 et février 2000 (Lane et al., 2003).

De même, Veyrat-Charvillon & Memier (2006) ont établi des estimations du budget sédimentaire et des taux d'érosion du torrent du Manival (Isère) à partir de photos d'archive et du principe de stéréophotogrammétrie. D'autres auteurs ont utilisé la photogrammétrie à courte distance (close range) afin de réaliser des MNT de la surface des barres d'une rivière graveleuse (Figure 11) et ainsi de déterminer la rugosité de surface de ces barres dans le but de paramétrer un modèle hydraulique (Butler et al., 2014 ; Carbonneau et al., 2003).

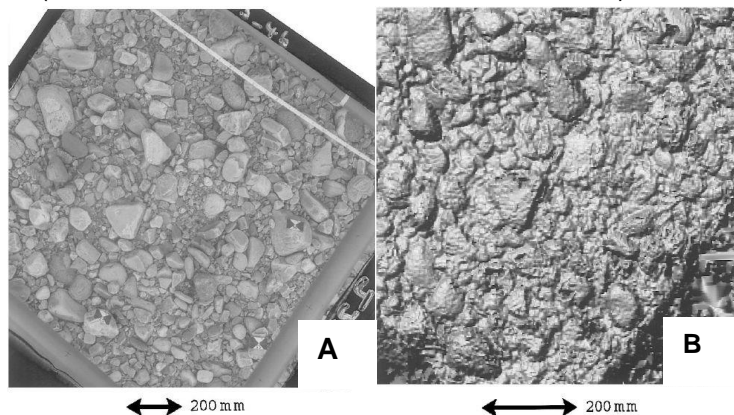


Figure 11 : A. Photo utilisée pour la construction du MNT. B. Zoom du MNT réalisé par photogrammétrie (Butler et al., 2014).

L'étude de l'érosion des berges a également été l'objet d'études photogrammétriques (Figure 12) (Barker et al., 1997).

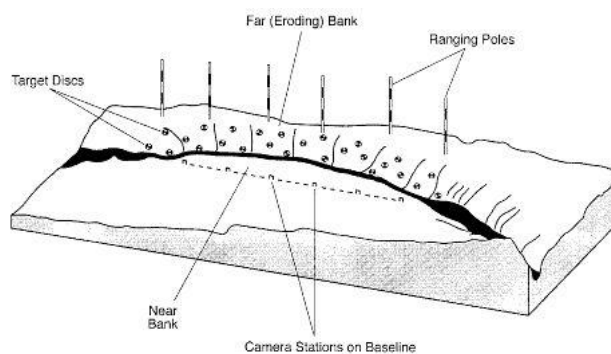


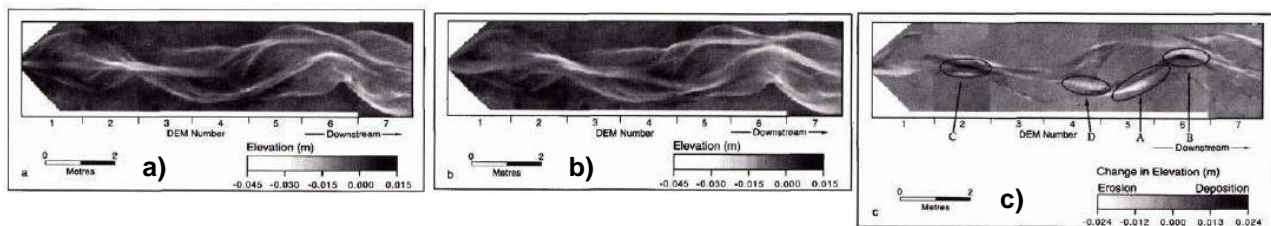
Figure 12 : Schéma présentant le système de mesure mis en place le long d'une berge. On note la position des appareils de prise de vue et les cibles positionnées sur la berge qui servent à la construction du MNT via la photogrammétrie (Barker et al., 1997).

La photogrammétrie offre donc la possibilité d'acquérir de nombreuses données sur le terrain telles que les zones de dépôt ou d'érosion après une crue ou encore les pentes et largeurs des chenaux. Toutes ces informations permettent d'effectuer une analyse de l'évolution morphologique des cours d'eau et des torrents. La rapidité de mise en œuvre permet en outre d'acquérir la donnée rapidement après un évènement et avant tout remaniement sans altérer les formes observées lorsque cette technique est mise en œuvre par voie aérienne.

### 1.2.2. Application en laboratoire

De nombreux auteurs utilisent également la photogrammétrie pour acquérir des données en laboratoire. L'étude des modèles physiques par photogrammétrie permet une acquisition rapide des données. Une fois le dispositif de mesure installé et calibré, il suffit de prendre les photos du modèle et de réaliser un post-traitement afin d'obtenir un MNT. Le Pôle grenoblois d'Etudes et de Recherche pour la prévention des risques naturels a réalisé une étude des interactions entre les écoulements torrentiels et les ouvrages terminaux de plage de dépôt à l'aide d'un modèle réduit. Les mesures topographiques sur ce modèle sont réalisées à partir de neuf réglets positionnés dans la plage de dépôt dont les cotes sont relevées à un pas de temps d'une minute (Frey et al., 1999). On comprend bien là les facilités qu'implique la méthode photogrammétrique dans l'acquisition des données.

Stojic et al. (1998) ont utilisé cette méthode afin de comprendre les changements morphologiques des rivières en tresses et d'estimer le transport solide à partir des changements volumétriques (Figure 13).



**Figure 13 : MNT issus de l'étude d'un modèle réduit de rivière en tresse (Stojic et al., 1998) a) MNT à t=320 min, b) MNT à t = 350 min, c) Différence des MNT illustrant les morphologies et valeurs des dépôts à l'aval des bares (B, C), l'érosion le long d'un nouveau chenal (D) et le l'influence aval entre des zones de dépôt (B) et d'érosion (A).**

D'autres articles traitent également du suivi morphologique des modèles réduit de cours d'eau (Chandler et al., 2001; Lane et al., 2001) et attachent une grande importance en la définition de la précision de la mesure.

Une des limites de la méthode photogrammétrique est la prise de vue avec de l'eau dans le canal. Cette difficulté peut être contournée en stoppant la simulation pour effectuer les prises de vue. Cependant, des auteurs ont montré qu'il était possible de corriger les effets de la réfraction à l'interface air/eau par un algorithme basé sur une analyse géométrique du problème (Butler et al., 2002).



## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Le dispositif expérimental

Afin de répondre aux questions précédemment énoncées, un modèle physique a été réalisé dans le canal hydraulique de l'IRSTEA. La mise en place d'un tel modèle nécessite une réflexion primordiale en amont de tous travaux afin de prendre en compte l'échelle de travail et ainsi de connaître la représentativité de ce que l'on modélise. Comparé à l'analyse de terrain, les modèles réduits permettent une installation simplifiée des appareils de mesures, une répétabilité des mesures et une bonne maîtrise des paramètres que l'on souhaite faire varier.

#### 2.1.1. Le canal hydraulique

Pour cette étude, le dispositif expérimental est composé d'un canal de pente variable (0 à 12%), et de 1,2 mètre de largeur pour 5 mètres de long. Il est alimenté par une pompe qui prélève l'eau dans une cuve située tout à l'aval du canal (Figure 14).

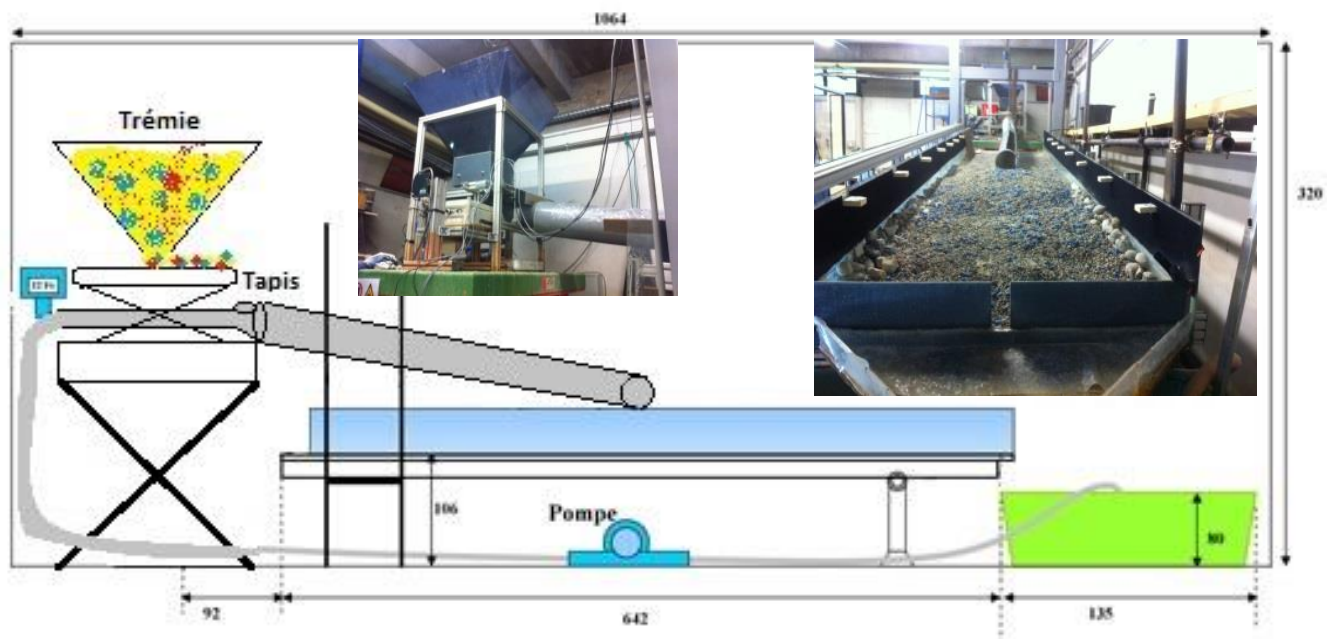


Figure 14: Schéma du canal hydraulique de l'IRSTEA.

L'eau est réinjectée à l'amont par un circuit qui fonctionne en charge. Un débitmètre à l'amont permet de connaître le débit liquide. Les caractéristiques de la pompe permettent un débit maximum de 3.5 L/s. La pompe est gérée par un variateur de vitesse qui lui-même est commandé via un ordinateur. Cette commande nécessite une calibration de la pompe en établissant une relation entre la tension (Volt) du variateur et le débit (L/s) affiché par le débitmètre (Figure 15).

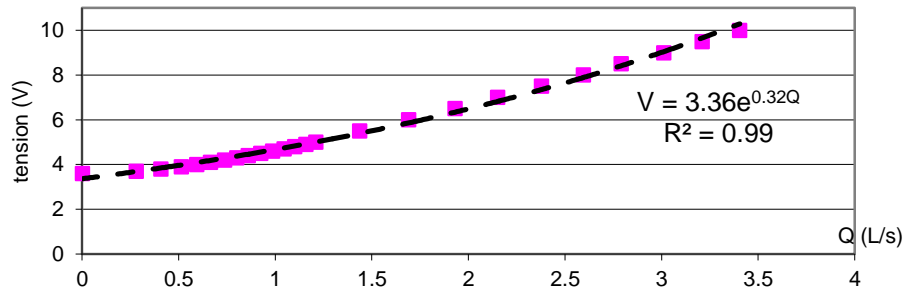


Figure 15 : Courbe de calibration de la pompe. Relation tension en fonction du débit.

Ainsi, un débit est implémenté et transformé en tension par la relation de la Figure 15. Ensuite le capteur (débitmètre) reçoit cette tension et la convertit en tension de sortie. La tension de sortie est alors associée à un débit de sortie qui est calibré à partir des caractéristiques internes du capteur (section, vitesse). Ce débit en sortie est enregistré par le programme. La relation de calibration permet la concordance entre le débit en entrée et en sortie. Ce programme, une fois calibré, permet de réaliser et de programmer des hydrogrammes.

La plage de dépôt modélisée occupe seulement la partie aval du canal, l'ouvrage de fermeture étant positionné à l'extrémité aval du canal. De cette manière, le débit solide mesuré en sortie est un débit instantané, dans le sens où il n'est pas influencé par des phases de dépôt ou d'érosion qui auraient lieu dans la partie aval du canal si la fente était positionnée au milieu du canal. Aussi, afin de pouvoir observer l'influence de la fente sur les dépôts en amont sans que la simulation ne soit trop longue, la partie amont du canal n'est pas utilisée. La fente mesure 6 cm de large soit environ 2.5 à 3 fois le diamètre maximum des grains afin d'assurer un contrôle hydraulique et une très faible probabilité de blocage mécanique. L'eau et les sédiments sont amenés dans le canal par un tuyau PVC dont les parois ont été rendues plus rugueuses en y collant du sédiment afin de ralentir les écoulements. Le tuyau est positionné sur un seuil et des enrochements ont été placés au pied du tuyau afin de limiter l'érosion dans ce secteur à forte dissipation d'énergie. Un lit plan, de même pente que le canal et d'épaisseur d'environ 5 cm, est placé dans le fond du canal et correspond à l'état initial de la plage de dépôt. Des enrochements ont également été placés sur les parois du canal afin de ralentir les écoulements qui prendraient beaucoup de vitesse sur ces parois en verre et fausseraient les phénomènes observés.

### 2.1.2. Similitude de Froude

L'utilisation de tout modèle (physique réduit, numérique, analytique, etc) pose la question de la représentativité. La définition que donne Steven A. HUGHES du Coastal Engineering Research Center d'un modèle physique est la suivante : « *Un modèle physique est la reproduction d'un système physique (généralement à taille réduite) conçue de telle sorte que les forces prépondérantes qui agissent sur le système sont représentées sur le modèle en proportion convenable par rapport au système physique lui-même* » (Hughes & Liu, 1993). La question est donc de déterminer les forces prépondérantes du système étudié et les proportions qu'elles respectent.

Les modèles physiques hydrauliques à fond mobile représentant le transport sédimentaire, ont été et sont encore largement utilisés dans la recherche et l'ingénierie. La comparaison entre les résultats du modèle (vitesses, hauteur, etc) et la nature est réalisée à travers une analyse dite de *Similitude*. Afin qu'un modèle réduit soit à l'image de la réalité, il doit respecter trois règles de similitude (Koulinski 1993) :

- Similitude géométrique (rapport de dimensions homologues)

- Similitude cinématique (vitesses homologues)
- Similitude dynamique (rapports des forces homologues)

Le principe des similitudes est basé sur l'analyse dimensionnelle (théorème de Vaschy Buckingham ou théorème des  $\pi$ ). L'analyse dimensionnelle part du postulat qu'une relation entre des grandeurs physiques doit être dimensionnellement homogène, c'est-à-dire indépendante du système d'unité de mesure. Afin de pouvoir comparer modèle et terrain, il suffit de choisir des nombres adimensionnels pertinents et de respecter leurs valeurs (Table 1).

Parmi les nombres adimensionnels régulièrement utilisés dans l'hydraulique et le transport solides, on peut citer ceux reporté dans la table 1. L'analyse dimensionnelle est réalisée avec l'idée de réaliser un modèle physique dans les conditions d'expériences classiques c'est-à-dire :

- Sur Terre (accélération de la pesanteur  $g$  constante),
- Avec de l'eau à température ambiante (densité  $\rho$  et viscosité  $\nu$  de l'eau constantes),
- Avec des matériaux naturels (densité du matériau  $\rho_s$  constante)

**Table 1 : Nombre dimensionnels pertinents dans les écoulements fluviaux.**

Nom et désignation	Formule	Analyse dimensionnelle	Pertinence dans l'analyse de
<b>Froude <math>Fr</math></b>	$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$	$\frac{[U]}{[h]^{0.5}}$	<b>forces d'inertie / forces de pesanteur</b>
Submersion Relative	$\frac{h}{D}$	$\frac{[h]}{[D]}$	Dimension de l'écoulement / dimension des rugosités
Darcy Weisbach $f$	$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{U}{\sqrt{ghS}} = \frac{U}{u^*}$	$\frac{[U]}{[h]^{0.5}}$	Loi de frottement
Rickenmann & Recking $U^{**}$ & $q^{**}$	$U^{**} = \frac{U}{\sqrt{gSD}}$ $q^{**} = \frac{q}{\sqrt{gSD^3}}$	$\frac{[U]}{[D]^{0.5}}$ & $\frac{[U][W][h]/[W]}{[D]^{3/2}} = \frac{[U]}{[D]^{0.5}} * \frac{[h]}{[D]}$	Loi de frottement
<b>Reynold <math>Re</math></b>	$Re = \frac{Uh}{\nu}$	$[U][h]$	<b>forces d'inertie / forces de viscosité dans l'écoulement moyen</b>
Shield $\tau^*$	$\tau^* = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gD_x} = \frac{hS}{\Delta_s D_x}$	$\frac{[h]}{[D]}$	forces d'arrachements / forces stabilisatrices
Reynold particulière $Re^*$	$Re^* = \frac{u^* D_x}{\nu} = \frac{\sqrt{ghS} D_x}{\nu}$	$[h]^{0.5} [D]$	forces d'inertie / forces de viscosité dans la couche limite
Débit solide adimensionnel $\Phi$	$\Phi = \frac{Qs/W}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) g D_x^3}}$	$\frac{[U][W][h]/[W]}{[D]^{3/2}} = \frac{[U]}{[D]^{0.5}} * \frac{[h]}{[D]}$	Transport solide

Ce tableau appelle deux commentaires :

1. Les deux nombres adimensionnels les plus utilisés en hydraulique sont les nombres de Reynolds et de Froude. L'analyse dimensionnelle montre que la conservation de ces deux nombres n'est possible que pour un rapport d'échelle de 1, soit pour un modèle de la dimension du prototype. Dans le cas d'un modèle réduit, l'une des deux similitudes doit être relaxée. Il est généralement considéré, et ceci s'applique particulièrement aux écoulements torrentiels (Couvert & Lefebvre, 1994), que pour un nombre de Reynolds supérieur à un certain seuil la turbulence prédomine et les effets liés à la viscosité peuvent être négligés.
2. Une fois le modèle assez grand pour assurer un écoulement turbulent ( $Re > 400-1000$  selon Sharp (1981)) et rugueux ( $Re^* > 70$  selon Sharp (1981)), la similitude de Froude associée à celle de submersion relative permet de respecter l'ensemble des autres paramètres

adimensionnels : Darcy Weisbach (ou Rickenmann & Recking), Shields et Débit solide adimensionnel, permettant de respecter les forces hydrauliques et sédimentaires prépondérantes tel que proposé par la définition de Hughes donnée plus haut.

Ainsi, l'échelle du modèle est dictée par la similitude de Froude. Pour faire le lien entre les dimensions du modèle et les dimensions du terrain, un facteur d'échelle  $\lambda$  s'applique pour chaque paramètre étudié.

$$\lambda_{\text{géométrie}} = \lambda_{\text{diamètre}} = \lambda ; \quad \lambda_{\text{vitesse}} = \lambda_{\text{temps}} = \lambda^{0.5} ; \quad \lambda_{\text{débit w \& s}} = \lambda^{5/2}$$

Notre modèle ne vise pas à représenter un torrent en particulier mais il faudrait pouvoir le comparer à plusieurs torrents de tailles différentes. Ce type de modèle est un modèle dit « analogue » par opposition au modèle « générique » d'un torrent particulier (Peakall et al., 1996). Le facteur d'échelle est calculé à partir du rapport  $D50_{\text{nature}} / D50_{\text{modèle}}$  pour chaque torrent (

Table 2).

**Table 2 : Facteurs d'échelle entre le canal IRSTEA et les torrents de l'analyse granulométrique.**

Site	Canal IRSTEA	Manival	Erlenbach	Pitzbach	Rio Cordon
D50 [mm] analyse	3	39.6	79.0	50.0	92.0
<b>Echelle D50/D50 modèle [-]</b>	<b>1</b>	<b>13.2</b>	<b>26.3</b>	<b>16.7</b>	<b>30.7</b>
Largeur lit actif [m]	1.1	15.0	3.8	11.0	6.0
Largeur équivalente canal [m]	1.1	14.5	29.0	18.3	33.7
Largeur éq/réelle [-]	1.0	1.0	7.6	1.7	5.6
S [%]	0-12	10 à 20	10	9	13.6
D50 Recking <sup>(1)</sup> ou RTM <sup>(2)</sup> [mm]		50	80	50	119
Longueur équivalente 6 m [m]	6	79	158	100	184
Durée essai modèle (min)		33	39	176	
Durée crue décennale (min)		120.0 <sup>(2)</sup>	200.0 <sup>(3)</sup>	720.0 <sup>(4)</sup>	
V injecté modèle (m3)		0.39	0.09		0.03
V injecté réel (m3)		900.0 <sup>(2)</sup>	1650.0 <sup>(3)</sup>		890.0 <sup>(5)</sup>
Q modèle (l/s)		7.1	2.8	7.9	2.0
Crue décennale (m3/s)		4.5 <sup>(2)</sup>	10.0 <sup>(3)</sup>	9.0 <sup>(4)</sup>	10.4 <sup>(5)</sup>

Sources: (1)(Recking, 2013)

(2)(Peteuil et al., 2008)

(3)(Turowski et al., 2009)

(4)(Turowski & Rickenmann, 2009)

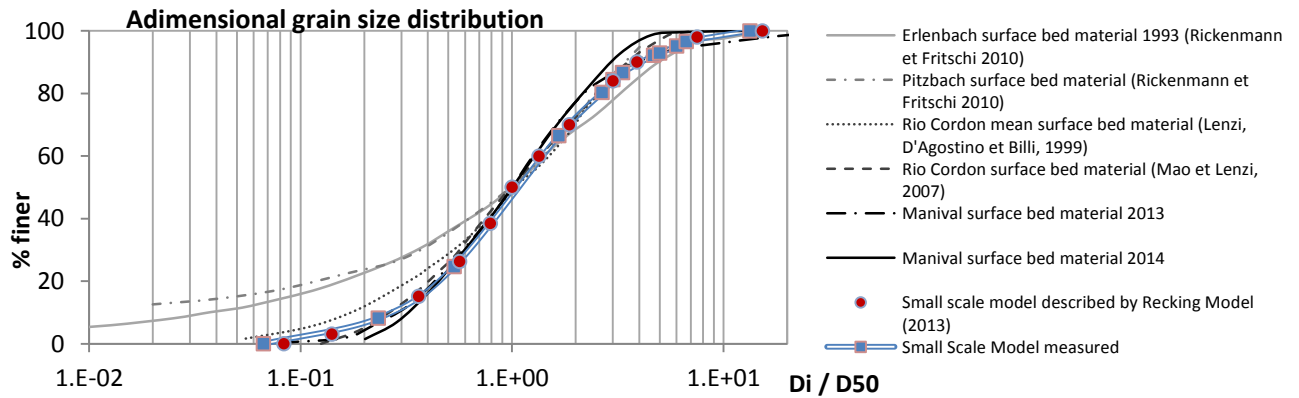
(5)(Lenzi et al., 1999)

### 2.1.3. Granulométrie et alimentation solide du modèle

#### Analyse granulométrique

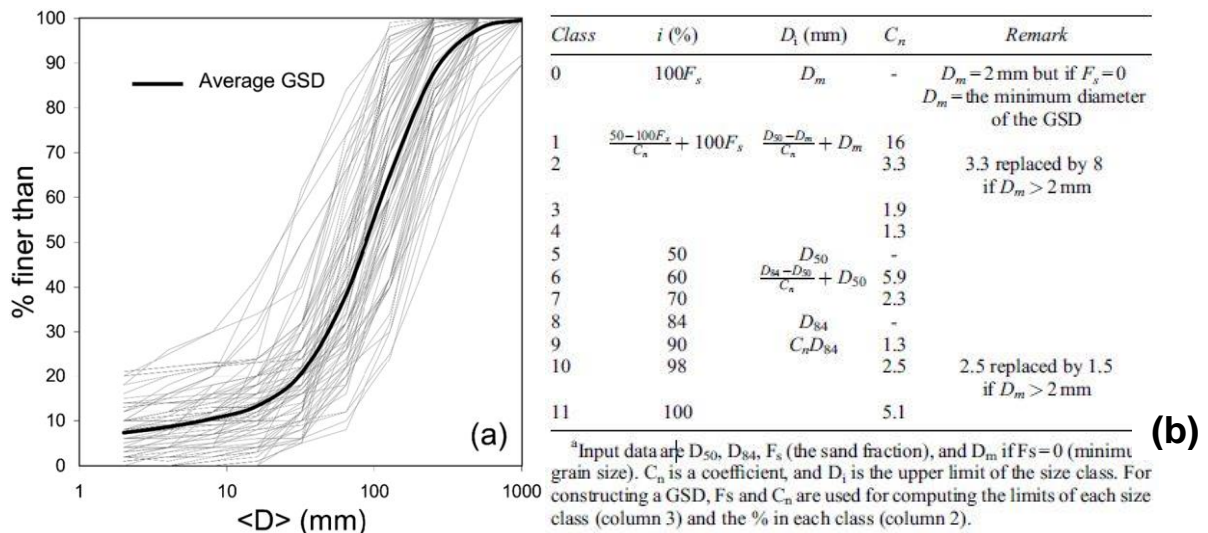
Afin d'utiliser des matériaux représentatifs des lits de torrents, une recherche bibliographique a été réalisée. Cette analyse a permis de comparer les courbes granulométriques de quatre torrents :

- Le Manival (Isère) (Peteuil et al., 2008)
- Le Rio Cordon (Italie) ( Lenzi, Agostino, & Billi, 1999; Mao & Lenzi, 2007)
- L'Erlenbach et Le Pitzbach (Suisse) (Rickenmann & Fritschi, 2010)



• **Figure 16 : Comparaison entre les courbes granulométriques des torrents et les courbes du modèle (une courbe issu du modèle de Recking et une courbe avec les tailles de tamis disponibles).**

Les courbes ont été adimensionnalisées en divisant les diamètres par le D50. Elles présentent une certaine cohérence pour la fraction grossière mais sont plus dispersées pour les diamètres plus fins que le D50 (Figure 16). Sur la base de cette analyse, les paramètres moyens de la distribution de la taille des grains de ces différents torrents ont pu être mis en évidence. Ces paramètres permettent d'implémenter un modèle de distribution de la taille des grains (GSD model) à l'aide des travaux de Recking (2013) (Figure 17b).



**Figure 17 : Grain Size Distribution model. (a) Field data set of 78 gravel bed rivers and (b) the model of reconstruction of de Grain Size Distribution (Recking, 2013).**

Ce modèle est construit sur la base de trois paramètres : le D50, le rapport D84/D50 et le diamètre minimum  $D_m$ . La Figure 17a présente les courbes granulométriques des 78 rivières graveleuses qui ont servi à la construction de ce modèle. La Figure 17b montre le modèle de construction d'une courbe granulométrique issu de l'analyse des courbes. Ainsi, une courbe granulométrique cohérente à celles des torrents étudiés a pu être établie sur la base de ce modèle.

Le rapport D84/D50 apparent est de 2.5 et le D50 du modèle a été choisi arbitrairement à 3 mm. Le D50 ne doit pas être trop petit afin de rester dans des nombres de Reynolds particuliers assez élevés et ainsi respecter les similitudes. Cette courbe a ensuite été recalculée par rapport aux diamètres des tamis disponibles (Figure 16, courbe small scale model measured).

Nous souhaitons réaliser un mélange de près de 2 tonnes, les masses de chaque fraction ainsi déterminées ont été calculées. Il a fallu tamiser les matériaux à notre disposition pour disposer de

la quantité nécessaire de chaque fraction. Le mélange a ensuite été réalisé en répartissant les bonnes proportions de chaque fraction dans des bacs.

Afin de mieux observer les phénomènes de ségrégation des grains, nous avons peint les grains de taille supérieure au D95 en bleu à l'aide d'une bétonnière. Quelques grains inférieurs à cette taille étaient déjà peints en rouge et en vert. Le diamètre 0.7 mm correspond à un sable orangé et le diamètre 1.6 mm à du gravier blanc (Figure 18).



Figure 18 : Photo du mélange constitué.

### Dispositif d'alimentation solide et calibrage

L'alimentation du canal en débit solide est effectuée à partir d'une trémie (Figure 14) qui stocke les sédiments et les déverse par gravité sur un tapis roulant qui entraîne le matériau. Tout comme la pompe, le tapis nécessite une calibration afin de pouvoir programmer des sédimentogrammes et connaître le débit solide à l'entrée du canal. Nous avons donc établi la relation entre la tension de commande (Volt) et le débit solide en intégrant la masse de sédiment sortant sur 2 minutes pour différentes tensions. Cette relation permet de convertir le débit en entrée en une tension de commande. La tension de commande induit ensuite une vitesse du tapis mesurée avec un potentiomètre. Cette nouvelle relation entre la vitesse du tapis et le débit solide permet l'enregistrement d'un débit solide (Figure 19).

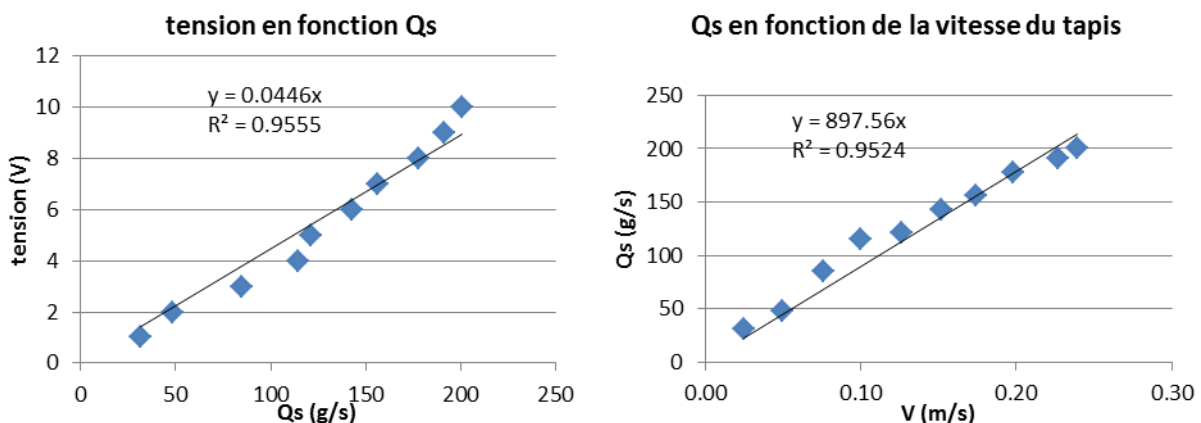


Figure 19 : Courbes de calibration du tapis d'alimentation en débit solide.

Cependant, des instabilités de la vitesse de rotation du tapis sont à noter. En effet, la vitesse de rotation du tapis peut varier en fonction du taux de remplissage de la trémie. C'est pourquoi la trémie est maintenue à un niveau de remplissage relativement constant au cours d'une simulation. Cet exercice devient très physique lorsque le débit solide est à son maximum (environ 200 g/s). De

plus, il faut également tenir compte de la taille du gâteau (nom donné au tas de sédiment qui se forme sur le tapis au sortir de la trémie). La taille de celui-ci varie au cours du temps en fonction par exemple du taux d'humidité du sédiment inséré dans la trémie. Ces instabilités peuvent être à l'origine de la linéarité imparfaite qui existe dans la relation entre tension et débit solide (Figure 19).

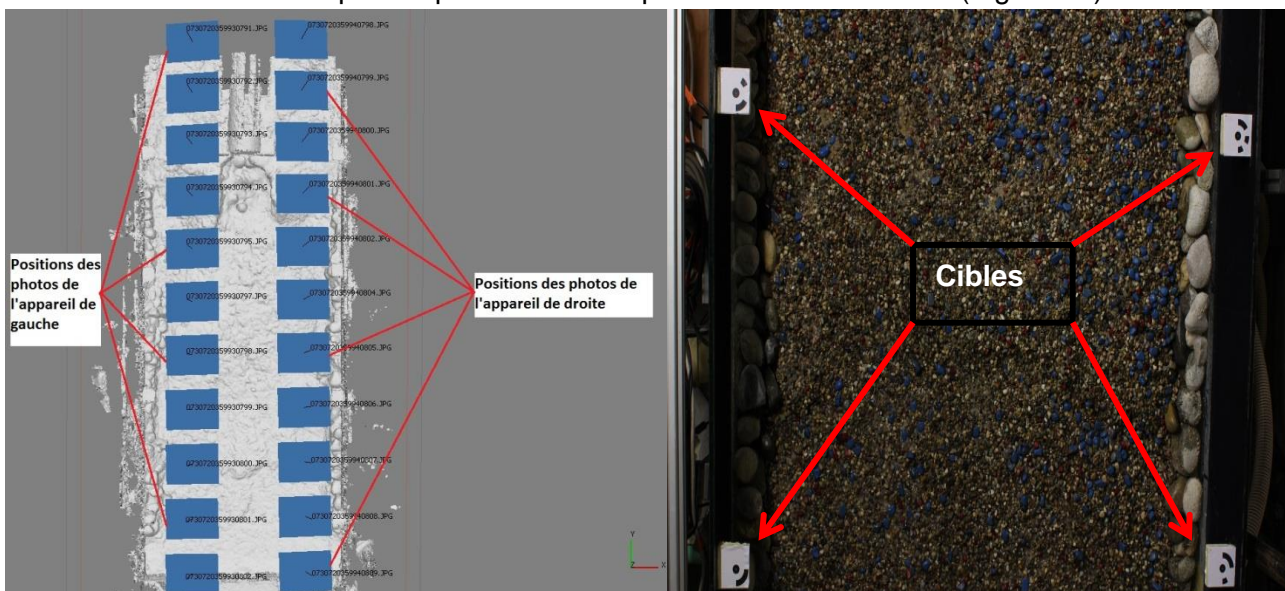
## 2.2. Le dispositif de mesure

Afin de mesurer l'évolution de la morphologie des dépôts dans le canal, il a été choisi d'utiliser la photogrammétrie. Cette technique permet d'obtenir des Modèles Numériques d'Altitude (MNA) du canal lors de différents états de remplissage. Ainsi, il est possible de réaliser des cartes de dépôts-érosions au cours d'une simulation, de mesurer les largeurs des chenaux qui se forment, ou encore la pente des dépôts. De plus, il est possible de réaliser des mesures de la hauteur d'eau dans les chenaux à l'aide d'une jauge. Combinées à la mesure de la largeur des chenaux et à la mesure de la vitesse par *particle tracking velocimetry* (PTV), ces mesures permettent de déterminer les valeurs du nombre de Froude ainsi que celles de forces tractrices.

### 2.2.1. La photogrammétrie avec Agisoft Photoscan

#### *Dispositif et paramètres de prise de vue*

Le dispositif est composé de deux appareils photo Canon EOS 100D équipés d'objectifs à focale fixe de 28 mm. Ces appareils sont fixés sur un rail au plafond du laboratoire. Le rail permet de faire coulisser les deux appareils dans le sens de la longueur du canal (axe Y). Les appareils sont positionnés afin que chacun couvre toute la largeur du canal (axe X). De cette manière, il y a 100% de recouvrement entre deux photos prises à une même position Y sur le rail. Les appareils sont positionnés sur le même Y et sont espacés d'environ 60 cm. Il y a environ 80% de recouvrement entre deux photos prises sur deux positions Y successives (Figure 20).



**Figure 20 : A gauche : vue de dessus du canal 3D sous Agisoft Photoscan avec la position des photos prises afin de couvrir la totalité du canal (en bas à droite, l'axe Y est en vert et l'axe X est en rouge). A droite : positionnement des cibles autour du canal.**

Il faut donc 2\*16 photos pour couvrir le canal avec 100% de recouvrement en X et 80% de recouvrement en Y. Ces pourcentage de recouvrement permettent au logiciel de repérer le plus de points similaires possibles entre deux photos et ainsi de construire avec d'autant plus de précision le modèle 3D.

Les trois principaux paramètres permettant de gérer l'exposition, c'est-à-dire la quantité de lumière utilisée pour créer une image, sont :

- La sensibilité du capteur (ISO)
- L'indice d'ouverture du diaphragme (N)
- La vitesse d'obturation (ou temps pendant lequel le capteur est exposé à la lumière)

L'ISO doit être le plus faible possible pour atténuer le bruit induit par sa valeur élevée. Plus l'ISO est grand, plus le capteur est sensible à la lumière. L'indice d'ouverture du diaphragme est égal à la distance focale sur le diamètre de la pupille du diaphragme ( $N=f/d$ ). Plus l'indice est élevé, plus le diaphragme est fermé et donc moins il laisse entrer la lumière vers le capteur. Ce paramètre contrôle également la profondeur de champ. Plus l'ouverture est importante moins il y a de profondeur de champ et ceci diminue la zone de netteté (car la lumière passe par les bords de la lentille là où il y a plus de distorsion). Enfin, la vitesse d'obturation permet de paramétrer le temps d'exposition du capteur. Plus la vitesse est grande, plus le temps d'exposition est court et moins la lumière passe vers le capteur. Cependant, plus la vitesse est lente, plus il y a de risque de flou de bougé ou de flou de mouvement du sujet. Dans notre étude, le flou de bougé et le flou de mouvement du sujet seront nuls car l'appareil sera fixé et la simulation sera stoppée avant de prendre des clichés (arrêt des débits liquide et solide).

Les appareils seuls ne suffisent pas à la construction d'un modèle. Il est nécessaire de placer des cibles tout autour du canal (Figure 20). Ces cibles sont disposées à une même cote Z grâce à un niveau laser et les distances entre chaque cible sont connues. Cette cote est définie comme étant le niveau zéro du modèle. Ainsi, les cibles se trouvent dans le même plan XY et elles servent à orienter le modèle un fois construit. Elles peuvent également servir de points de repère fixes pour le logiciel lorsqu'il assemble les photos entre elles. Les distances mesurées entre les cibles permettent la mise à l'échelle du modèle. Au total, dix cibles sont positionnées de part et d'autre du canal dans la zone à observer.

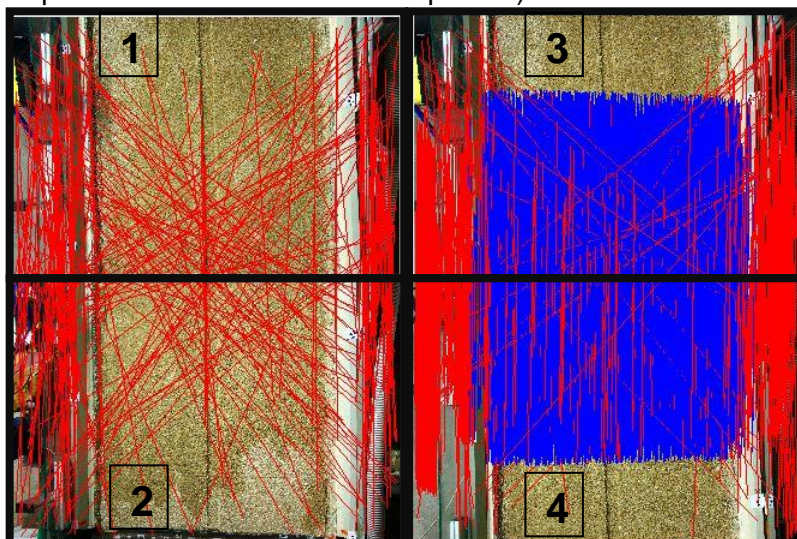
### **Fonctionnement d'Agisoft Photoscan**

Agisoft Photoscan est un logiciel de traitement d'image qui permet, à partir d'au moins deux photos, de reconstituer un objet ou un paysage en 3D et de réaliser des cartes de profondeurs. Il permet donc de faire de la photogrammétrie multi-vue. La construction d'un modèle sous Agisoft Photoscan s'effectue en trois étapes : l'alignement des photos, la construction d'un nuage de point dense et le maillage.

Durant l'étape d'alignement des photos, Photoscan inspecte les photos deux à deux afin de détecter des points communs. Dès lors qu'il trouve deux points similaires, il élargit sa recherche au voisinage local de chacun de ces deux points afin d'établir une corrélation entre ces deux points. Si la corrélation est acceptable, ces points sont conservés pour la suite de l'alignement. La position de l'appareil pour chaque photo détermine ensuite la validité de cette corrélation. Par exemple, deux points peuvent être similaires ainsi que leur voisinage proche, mais s'ils sont sur des photos éloignées (qui n'ont pas de recouvrement entre elles), alors ces points définissent un couple de points invalide. Au contraire, si ces deux points sont similaires et que la position des appareils indique qu'ils appartiennent à la même surface de recouvrement entre deux photos, alors ces points définissent un couple de point valide pour l'alignement des photos. La Figure 21 illustre la

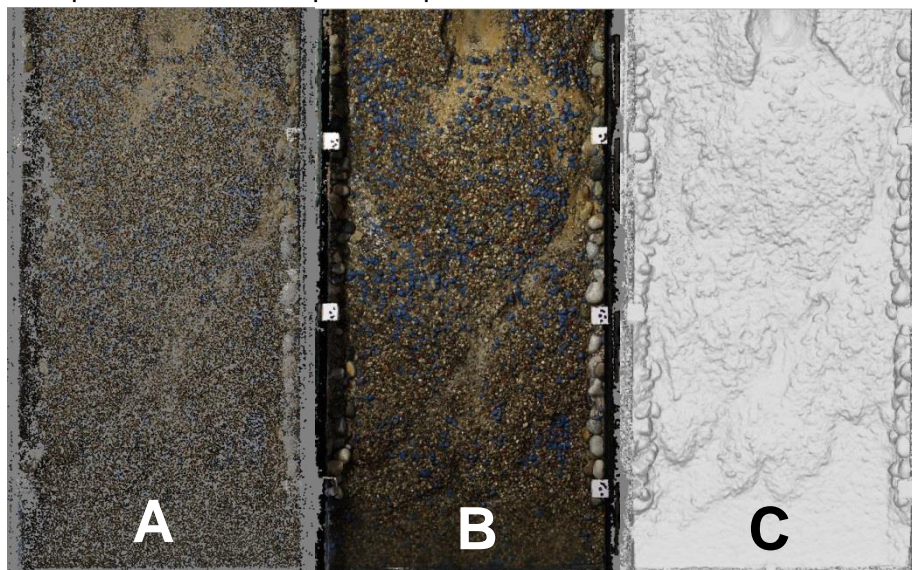


détection des couples de points effectuée par Photoscan. La capture d'écran de gauche montre que Photoscan a trouvé des points de correspondance entre la photo 1 et la photo 2 mais ces points ne sont pas validés par la position de l'appareil lors des deux prises de vue. Autrement dit, les deux photos sont tellement éloignées qu'il ne peut y avoir de recouvrement entre celles-ci et donc Photoscan ne trouve aucun couple de points valide. La capture d'écran de droite montre les points de correspondance entre deux photos (3 et 4) prises l'une à la suite de l'autre. Les points de correspondance entre ces deux photos et donc le recouvrement entre celles-ci sont affichés en bleu (près de 10 000 points valides entre ces deux photos).



**Figure 21 : Comparaison entre des points similaires qui n'appartiennent pas à la même zone de recouvrement entre deux photos (photos 1 et 2), et entre des points similaires qui font partie de la même zone de recouvrement (3 et 4).**

Après la construction d'un nuage de points, celui-ci est densifié et les informations de profondeur sont calculées à partir des positions des appareils, estimées lors de l'alignement des photos. Ainsi, le nuage de points passe de 130 000 points à plus de 2 000 000 sur la même surface (Figure 22).



**Figure 22 : Comparaison entre le nuage de points (A) et le nuage de points densifié (B). (C) est le nuage de points densifié sans la couleur et qui permet de mieux se rendre compte du relief et de la densité de point.**

Enfin, la dernière étape consiste à construire le maillage de ce nuage de point par interpolation de la surface entre les points du nuage dense (Figure 23). Ce maillage 3D comprend près de 200 000 sommets et près de 400 000 faces sur un espace d'environ 3 m<sup>2</sup>.

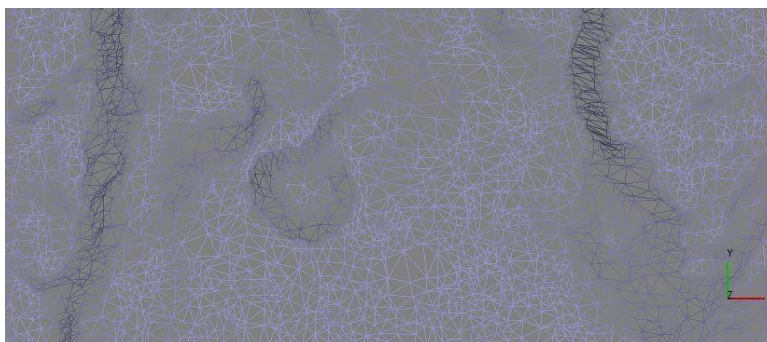


Figure 23 : Maillage zoomé d'un modèle du canal afin d'observer les faces et les sommets.

Après cette étape, le logiciel permet d'extraire une orthophoto, un fichier de point xyz ou un MNT (Modèle Numérique de Terrain). Les MNT extraits serviront par la suite à observer et commenter la morphologie des dépôts observés dans le canal.

### Analyse de la fiabilité de la mesure

Afin de déterminer la fiabilité de la méthode d'acquisition de données morphologiques, des tests de reproductibilité ont été réalisés. Ainsi, cinq séries de photos ont été prises avec une même configuration du fond du canal. Les MNT extraits ont été soustraits entre eux afin d'observer les différences en terme d'estimation de l'altitude mais aussi en terme de volumes estimés. La Figure 24 montre que l'erreur médiane sur l'altitude entre les différents ensembles de photo ne dépasse pas la taille du D50 (1.3 mm) des matériaux présents dans le canal. Pour les volumes (Figure 25), l'erreur maximale entre deux séries de photo est de l'ordre de  $0,002 \text{ m}^3$ , soit environ  $2 \text{ dm}^3$ . Si l'on considère une densité du matériau d'environ 2, cette erreur représente alors près de 4 Kg d'erreur sur  $2,25 \text{ m}^2$  (surface du canal extraite sur les MNT).

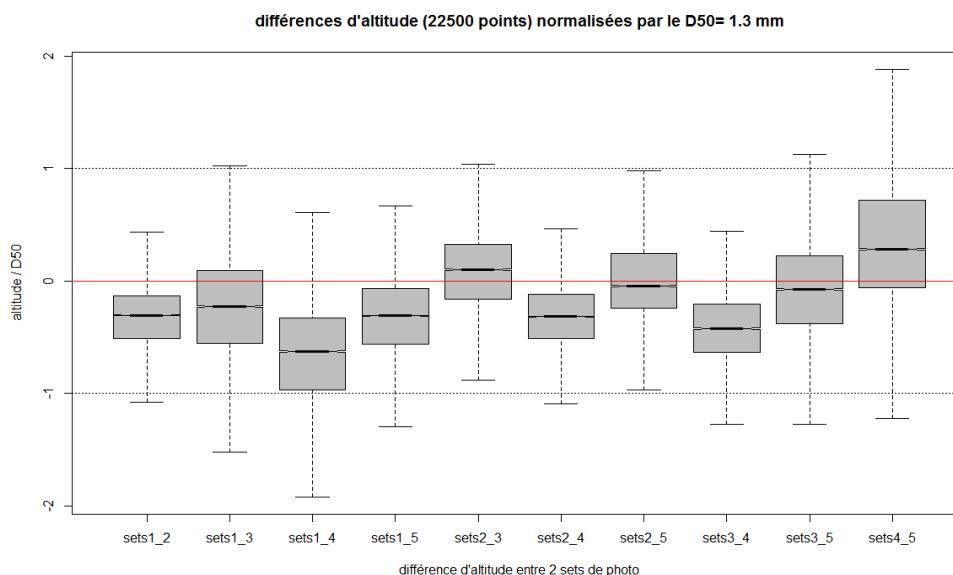


Figure 24 : Différences d'altitude entre deux ensembles de photos. L'altitude a été normalisée par le D50 des sédiments présents dans le canal lors des tests.

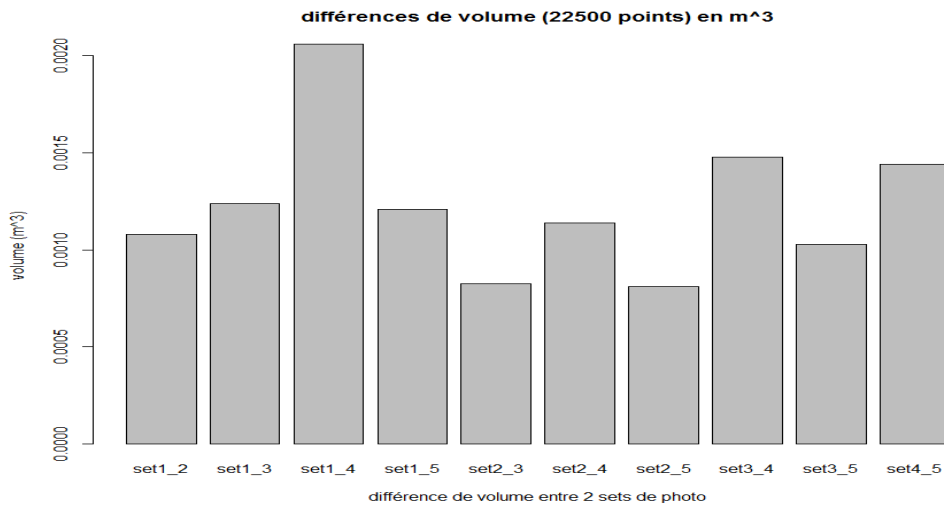


Figure 25 : Différences de volume entre deux ensembles de photos.

Ces tests permettent de conclure que la précision en termes de reproductibilité est millimétrique. Des essais de mesures relatives ont également été réalisés en positionnant dans le fond du canal quinze objets dont les mensurations étaient connues par mesure au pied à coulisse. Deux MNT ont ensuite été construits sous Agisoft photoscan, l'un extrait à un pas d'espace de 3mm et l'autre à un pas d'espace de 1mm. De cette manière, on peut comparer les mesures absolues avec des mesures réalisées directement sur le MNT avec ArcGis et qualifier ainsi l'erreur relative induite par la conception du MNT avec Agisoft mais aussi l'erreur due au degré de précision d'extraction du MNT.

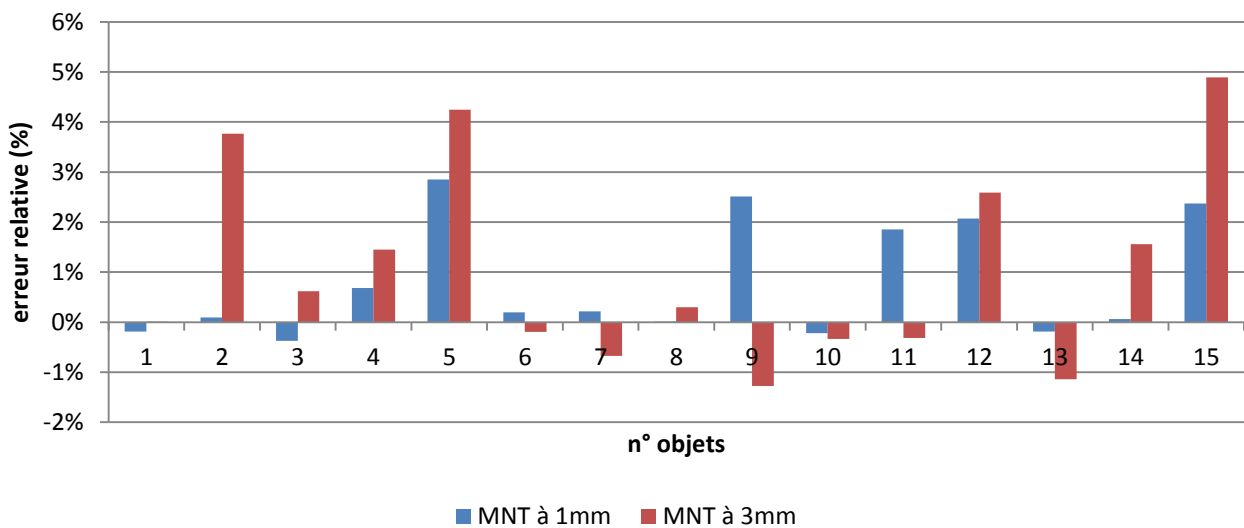


Figure 26 : Mesure de l'erreur relative des distances sous Agisoft photoscan.

La Figure 26 montre que l'erreur relative ne dépasse pas 5% et que cette erreur est plus importante pour le MNT extrait avec un maillage de 3mm. En effet, la précision du maillage d'extraction du MNT influence la précision des mesures réalisées par la suite. L'extraction des MNT sera donc réalisée au pas de 1 mm.

La photogrammétrie avec un appareil photo non-métrique pose le problème de la correction de la distorsion. Un appareil photo métrique est un appareil dont les paramètres de calibration internes sont connus et qui permet donc une correction optimale de la distorsion. Ces paramètres permettent une correction de la distorsion induite par l'optique utilisée ou encore le mode de prise

de vue. Dans Agisoft photoscan, ces paramètres sont estimés et peuvent être optimisés afin de corriger les effets de distorsion de la lentille. Les paramètres internes de l'appareil sont la distance focale, les coordonnées du centre du capteur (cx-cy), les paramètres de la distorsion radiale (k1, k2, k3 et k4) et les paramètres de la distorsion tangentielle (p1 et p2). La Figure 27 montre que sans optimisation des paramètres, le modèle présente une convexité et l'optimisation de paramètres isolés renforce les effets de la distorsion. L'optimisation de tous les paramètres permet d'éliminer les effets de la distorsion. Il faut préciser que les mesures de profils en long sont réalisées sur un lit plan.

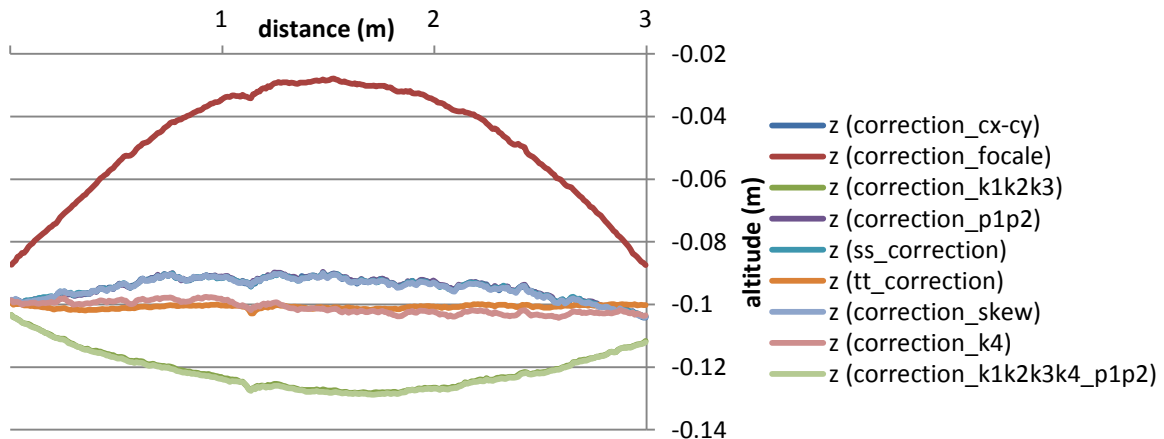


Figure 27 : Profils en long du canal pour différentes combinaisons d'optimisation des paramètres.

Cependant, nous avons constaté que le mode de prise de vue induit également des phénomènes de distorsion. Une première prise de vue du canal a été réalisée avec l'appareil en main et ceci d'un seul côté du canal. Puis une seconde prise de vue a été effectuée avec les deux appareils positionnés sur le rail. La Figure 28 montre que le fait de couvrir le canal avec deux appareils et le fait que ces deux appareils soient fixés permet d'obtenir de bons résultats avec l'optimisation des paramètres pour corriger la distorsion.

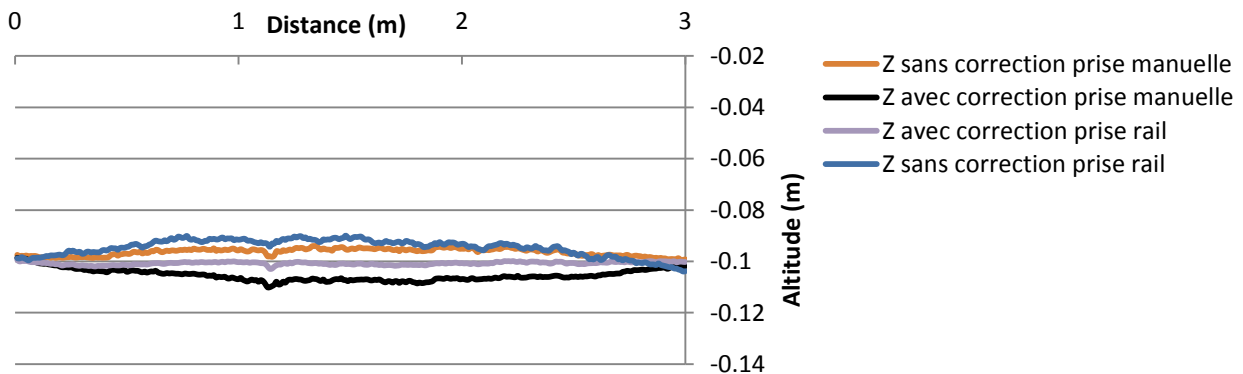


Figure 28 : Profils en long du canal pour différents mode de prise de vue et pour différentes correction de la distorsion.

### Effet de l'eau

Des acquisitions ont été réalisées dans le canal avec de l'eau, puis juste après sans eau, afin de comparer les modèles réalisés par Agisoft et d'observer les effets de l'eau sur la mesure d'élévation. La Figure 29 montre qu'Agisoft peut générer un modèle 3D même lorsqu'il y a de l'eau dans le canal mais dans ce cas, il n'a pas pu trouver de points dans les zones avec écoulement. Le chenal central (Figure 29B et Figure 29C) a une densité de points beaucoup plus faible que les

zones sèches. Cependant, dans les chenaux secondaires, lorsque la hauteur d'eau est plus faible, la densité de point augmente par rapport au chenal central.

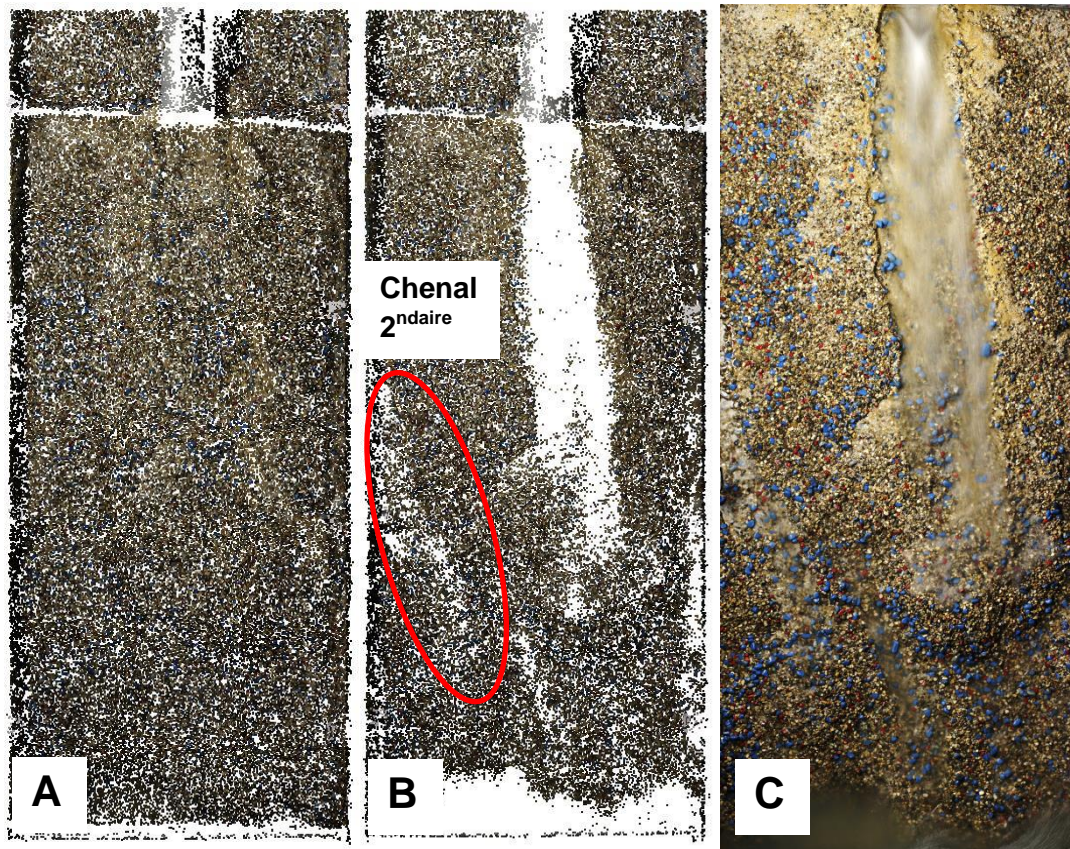


Figure 29 : Comparaison des nuages de points épars obtenus avec Agisoft pour, A : le canal sans eau, B : le canal avec de l'eau, C : orthophoto du canal avec de l'eau dans le chenal central.

En traçant des profils en travers des chenaux sur les MNT avec présence d'eau et sans eau, la hauteur d'eau peut être approchée mais la surface libre est très bruitée du fait des vitesses élevées qui prennent place au sein des écoulements torrentiels (Figure 30A). Lorsque la hauteur d'eau est plus faible (Figure 30B), la surface libre est moins chahutée car il y a plus de points et l'interpolation entre ces points donne un meilleur résultat.

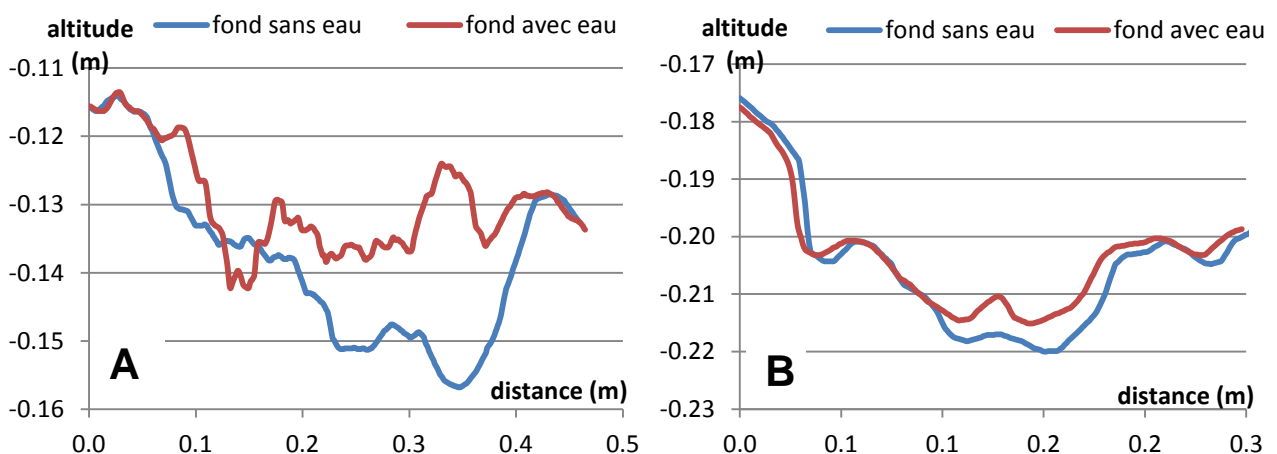


Figure 30 : Profils en travers des MNT avec et sans eau. A : chenal central figure 29. B : chenal secondaire figure 29.

### 2.2.2. Mesure du débit solide aval

Le débit solide à la sortie de la fente de la plage de dépôt a également été mesuré. Des bacs réceptionnent le sédiment en sortie et permettent d'égoutter ce dernier durant environ une minute. Ensuite, les bacs ont été pesés et, de temps en temps, un échantillon de sédiment est passé à l'étuve. A partir de sa masse avant et après séchage, un taux d'humidité peut être déterminé et les débits solides sont alors corrigés de cette teneur en eau. La masse de sédiment est intégrée sur un temps. Il est alors possible de déterminer un débit (g/s). Le débit solide total en sortie peut être comparé au débit solide total injecté dans le canal. Ainsi, connaissant la densité du matériau, le volume du dépôt final peut être déterminé et comparé au volume déterminé en soustrayant le MNT de l'état initial et de l'état final du canal par exemple grâce à l'outil remblais-déblais d'ArcGis. Cependant, la fente n'a permis aucun débit solide en sortie du canal lors de nos essais.

### 3. Résultats

#### 3.1. Pente et concentration

Les premières simulations de remplissage de la plage de dépôt ont été réalisées en débit permanent (3 L/s) avec une pente du canal de 8%. Une analyse préalable à ces simulations visait à mettre en évidence les concentrations en débit solide à l'équilibre pour une pente donnée. Les concentrations à l'équilibre ont été déterminées à l'aide de différentes formules de transport solide adaptées au domaine torrentiel. Cette analyse a conduit à penser que, pour une pente et une concentration en débit solide données, la plage de dépôt se trouverait à un état d'équilibre (dans le fuseau des courbes de la Figure 31). Pour une concentration plus faible, la plage présenterait un déséquilibre avec une érosion à l'amont ou au contraire un dépôt massif pour une concentration plus élevée que la concentration à l'équilibre. Cependant les résultats pour une pente de 8% ont montré que l'état théorique d'équilibre n'était pas atteint pour des concentrations de 1, 2 et 3% et l'érosion de l'intérieur de la plage initialement attendue n'est pas observée.

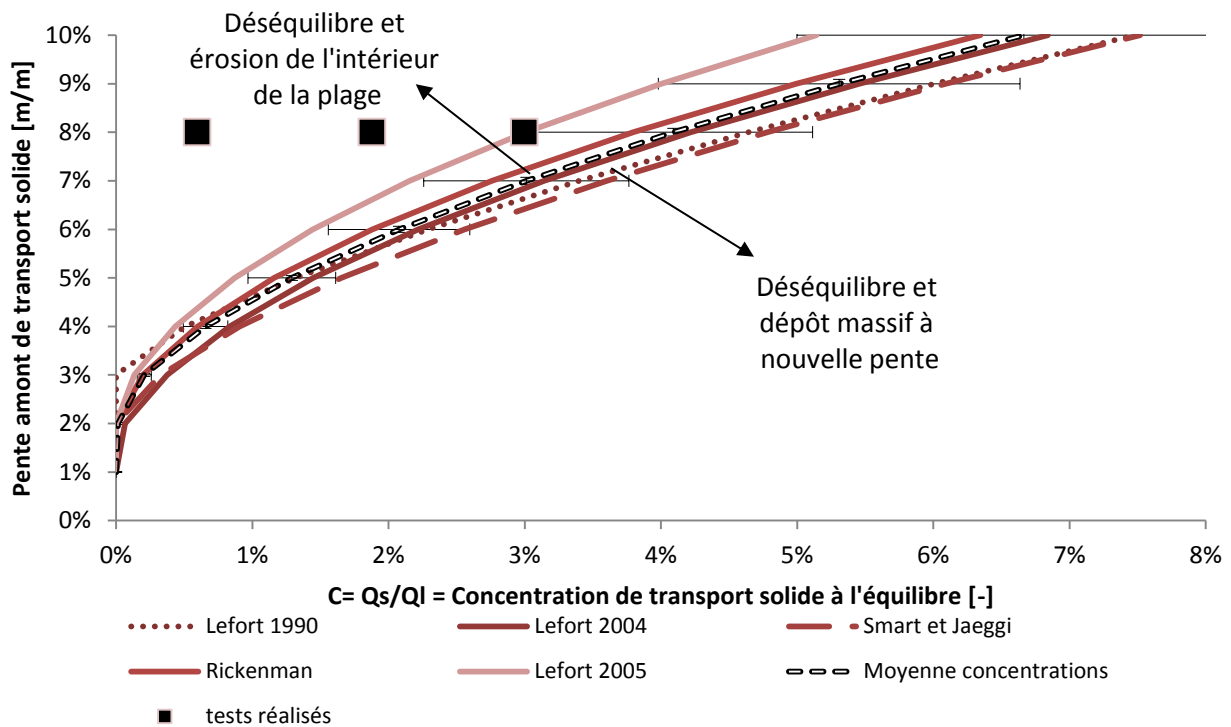


Figure 31 : Courbes de la pente en fonction de la concentration à l'équilibre établies suivant cinq formules de transport solide pour le D50 du modèle et pour une largeur de chenal d'environ 20 cm.

Au contraire, tous ces tests présentent les mêmes caractéristiques, à savoir, le développement d'un cycle de dépôt massif à l'amont puis d'érosion de ce dépôt qui se répète au cours de la simulation. Nous pensons que la plage présenterait une érosion (chenalisation), c'est pourquoi nous avons calculé les concentrations d'équilibre pour une largeur de 20 cm, or on observe plutôt un dépôt massif à l'amont avec des nappes de charriage très denses qui s'étalent sur une grande partie de la largeur du canal. En réalisant le même calcul avec une largeur de 90 cm, la zone d'équilibre s'élargit (fuseau des courbes plus large) et le domaine de l'équilibre s'en trouve décalé (Figure 32).

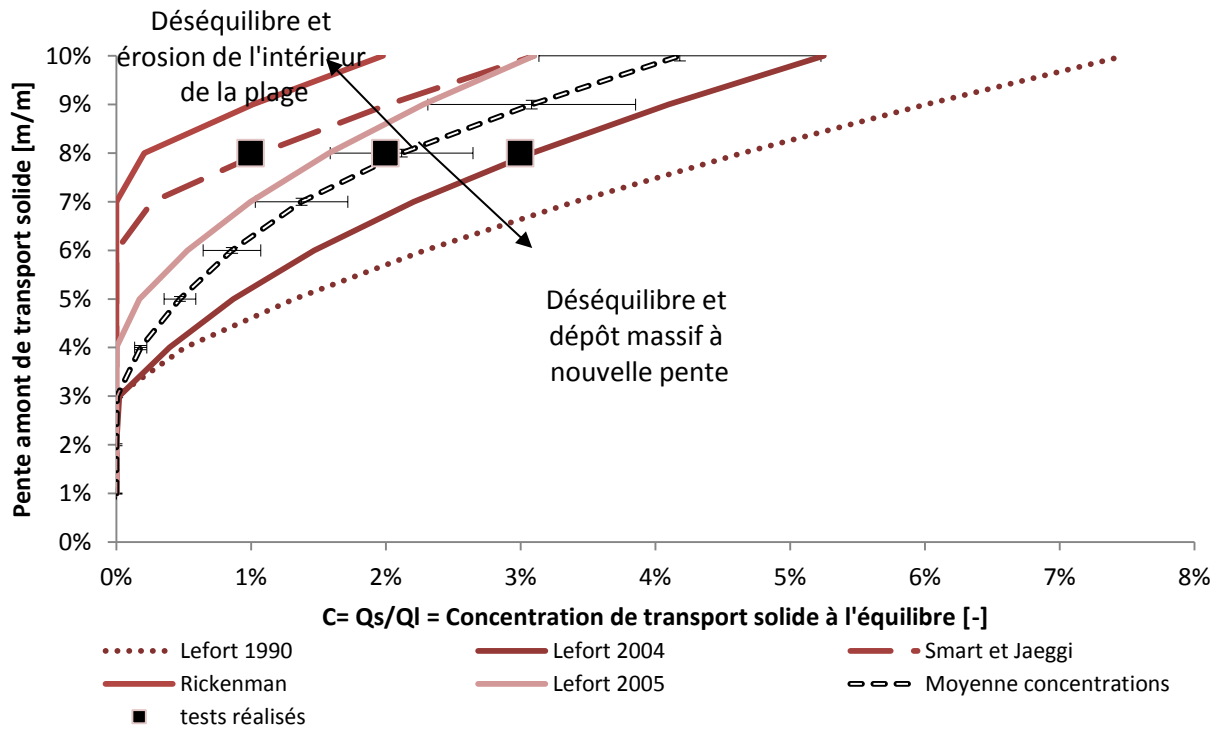


Figure 32 : Courbes de la pente en fonction de la concentration à l'équilibre établies suivant cinq formules de transport solide pour le D50 du modèle et pour une largeur de chenal d'environ 90 cm.

### 3.2. Cycles morphologiques

Les résultats présentés ci-après illustrent les cycles d'érosion/dépôt observés au cours des différentes simulations. On constate une répétition régulière de ces cycles au cours des simulations. La Figure 33 montre que plus la concentration en débit solide est élevée, plus les cycles de dépôt/érosion sont rapides et resserrés dans le temps. La Figure 34 illustre les cycles observés et décrits ci-après.

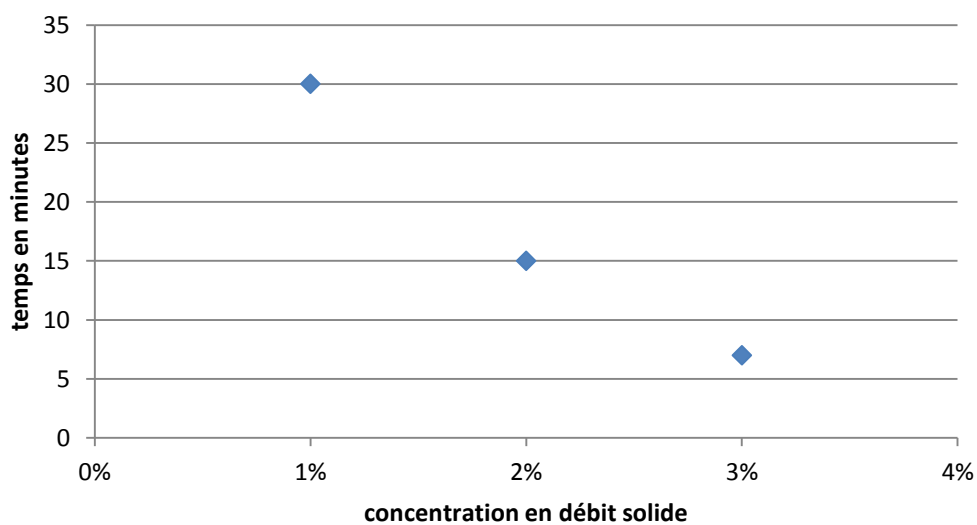


Figure 33 : Temps de retour des cycles observés en fonction de la concentration en débit solide



### 3.2.1. Etape 1 : dépôt amont massif et écoulement en nappe

La première phase du cycle morphologique comprend un dépôt massif en amont de la plage. Ce dernier se met en place par l'avancée de petits lobes qui constituent le dépôt initial (annexe 1). L'écoulement balaye la zone, créant de nouveaux lobes de part et d'autre du dépôt initial. Celui-ci s'allonge et s'élargit en même temps qu'il s'élève. Une fois qu'il est assez conséquent, l'écoulement est obligé de le contourner. Il y a alors formation de deux chenaux divergeants qui le contournent. Ces chenaux latéraux permettent le transit de matériaux à l'aval de la plage. Lorsque ces matériaux rencontrent la zone d'eau calme induite par la présence de la fente, ils se déposent à la façon d'un delta avec un front très raide qui prograde lentement comme dans un lac (annexe 1).

S'il se passe plus de temps avant la première érosion du dépôt amont (simulation CQs=1%), les deux bras latéraux peuvent même constituer des barres latérales à l'aval qui encadrent le dépôt central. On observe alors l'initiation d'une forme caractéristique des rivières en tresse (annexe 2) avec la répétition d'un motif. Des phénomènes d'incision peuvent être observés à la confluence des deux bras latéraux. Cette érosion contribue à l'alimentation du dépôt central aval.

### 3.2.2. Etape 2 : chenalisation soudaine

Au bout d'un certain temps, le dépôt se déstabilise petit à petit. Il y a formation de petits lobes d'érosion là où les écoulements préférentiels se frayent un chemin. Ces écoulements entraînent une épaisseur de plusieurs grains de sédiment sous forme de nappes de charriage. Ces phénomènes déstabilisent alors brusquement le dépôt et l'érosion s'emballe. Un chenal central s'incise dans le dépôt et entraîne les sédiments vers l'aval. L'écoulement apparaît alors parfois en nappe et parfois partiellement chenalisé. Si le transport est assez efficace, les lobes aval progradent loin dans la retenue d'eau (annexe 3). Le dépôt ainsi formé fait de nouveau diverger l'écoulement en deux bras qui remontent au fur et à mesure que l'incision est comblée.

### 3.2.3. Etape 3 : migration des chenaux

L'étalement de l'écoulement et le pivot créé par le dépôt total dans la retenue permet un développement de l'accumulation centrale de sédiment. De nouveau, les écoulements divergent au droit de ce dépôt et on peut observer la remontée des deux bras latéraux qui entourent le dépôt massif et convergent à l'aval de ce dernier (annexe 4).

Le cycle recommence alors : lorsque le dépôt amont atteint une forte pente, il est de nouveau déstabilisé et une érosion importante se met en place. Sur l'annexe 5, le chenal central ainsi créé se sépare rapidement en deux chenaux pour contourner l'étalement du dépôt précédent. Les chenaux divergeants ont une forte capacité de transport et recueillent les sédiments issus de l'érosion amont. Ainsi, ils transfèrent les sédiments vers l'aval qui viennent alimenter un delta à proximité de la zone d'eau calme. L'annexe 5 illustre la reconnexion et la remontée des deux bras latéraux au fur et à mesure que le dépôt se reforme.

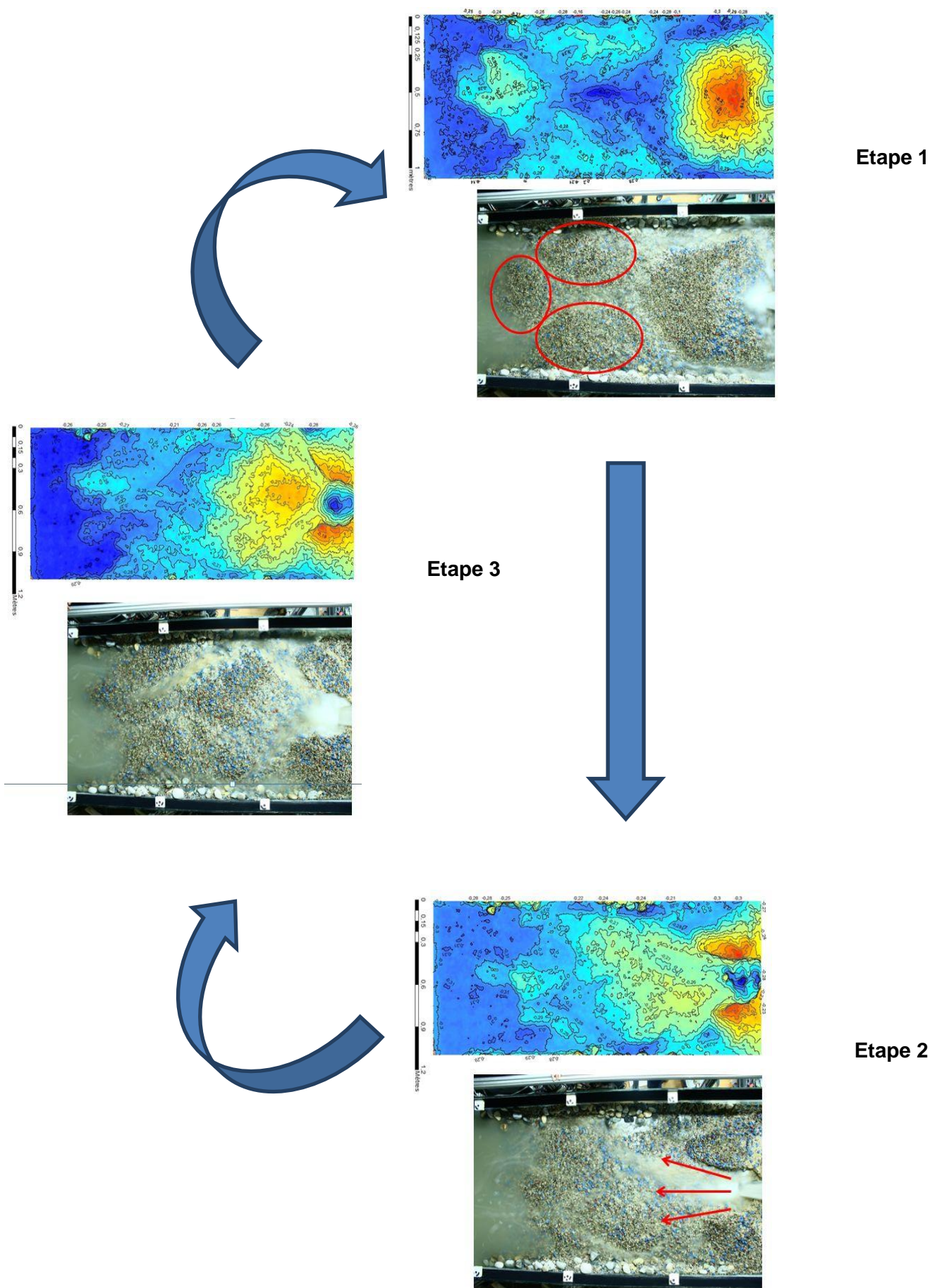


Figure 34 : Schéma illustrant les cycles morphologiques observés.

### 3.3. Tri granulométrique

Des phénomènes de ségrégation sont observés au cours des simulations (Figure 35). Une photo de la surface du dépôt a été prise, puis la couche de surface a été enlevée manuellement pour laisser apparaître la subsurface supérieure et enfin la subsurface profonde.

Le pavage du dépôt amont permet la stabilisation de ce dernier jusqu'à la rupture du pavage due à l'augmentation de la pente du dépôt. Koulinski (1993) parle de pavage dans le cas d'une brutale surcharge en matériau qui apparaît lorsque la contrainte hydraulique diminue au niveau d'une rupture de pente. On parle alors de « revêtement externe ». Ce type de pavage est beaucoup moins résistant que le classique pavage de fond de torrent que l'on observe par exemple dans les gorges.

Le pavage observé pendant les essais peut être assimilé à un simple « revêtement externe » car il est régulièrement déstabilisé lorsque la pente du dépôt est trop importante. De plus, il se produit au niveau d'une rupture de pente entre le canal d'amené et le canal hydraulique.

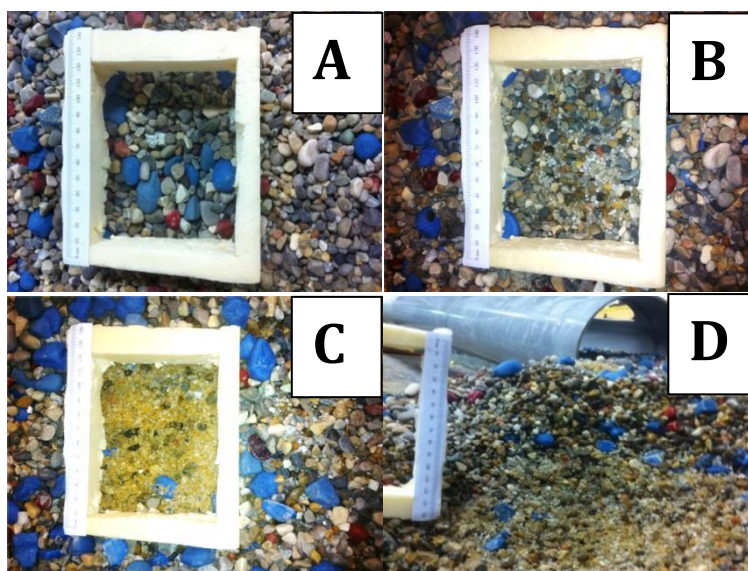
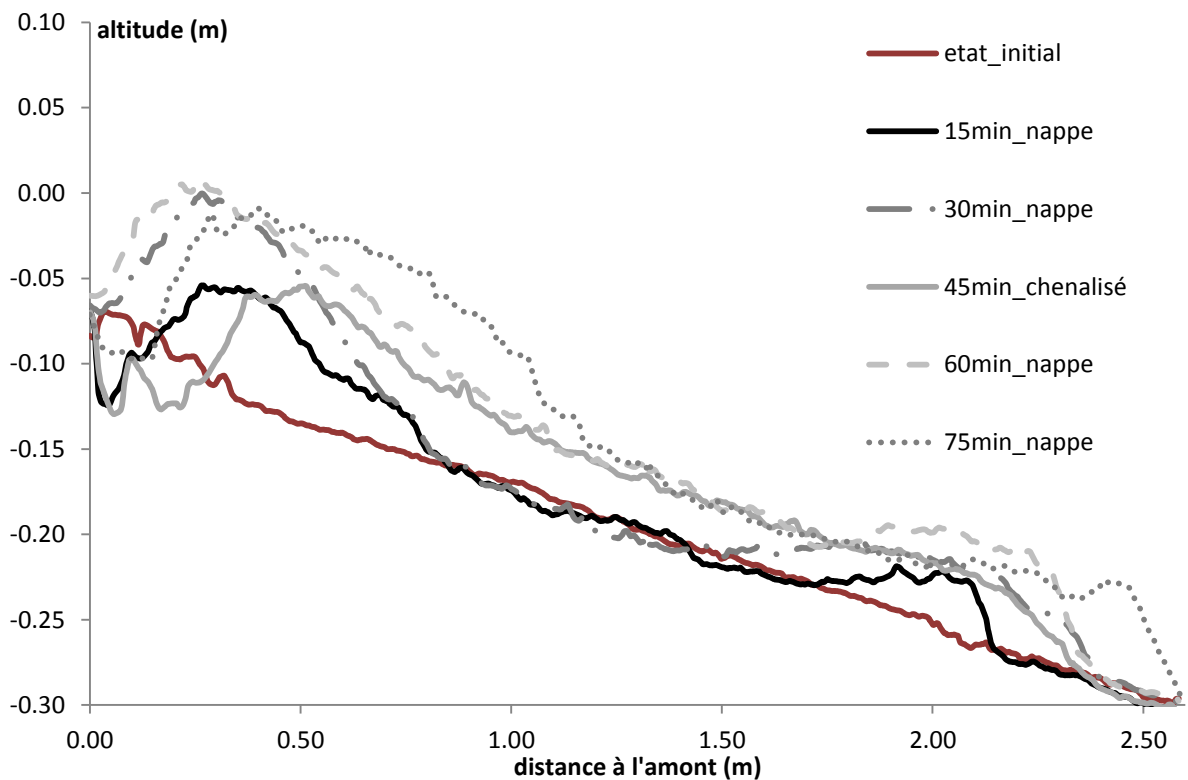


Figure 35 : Photos illustrant le tri granulométrique du dépôt amont. A : Surface du dépôt. B : subsurface du dépôt. C : Couche de fond du dépôt. D : Vue en coupe du dépôt.

### 3.4. Pentes de dépôt et de transport

#### 3.4.1. Analyse qualitative des pentes

Des profils en long du fond ont été extraits des MNT. Ces profils illustrent les cycles observés (annexe 1). Après 15 minutes, le dépôt a commencé à se constituer en amont du canal et atteint son maximum au bout de 30 minutes de simulation. A 45 minutes, le dépôt s'est chenalisé et l'étalement du volume accumulé réduit considérablement la pente du lit.



**Figure 36 : Profils en long de la simulation à 1% de concentration en débit solide.**

La Figure 36 montre le lissage des pentes après érosion comparé aux fortes pentes des dépôts. Les profils extraits à 45, 60 et 75 minutes présentent des pentes plus faibles, ils ont été extraits directement après un phénomène de chenalisation.

Au bout de 60 minutes de simulation, le front aval des dépôts atteint le voisinage de la fente. Un débit solide s'initie alors en sortie de la plage. A partir du moment où la fente est connectée avec l'amont par un chenal actif en terme de transport solide, la morphologie devient plus stable et le chenal perdure dans le temps (Figure 36, Figure 37 et annexe 8). Ce chenal stabilisé présente lui aussi une pente plus faible que les dépôts ayant lieu pendant une phase d'écoulement en nappe comme l'illustre la Figure 37.

De plus, on remarque l'avancée des lobes de dépôt à proximité de l'ouvrage. Ces lobes présentent une pente de front très raide et progressent lentement à la faveur des apports par bouffées de l'amont (annexe 7).

L'annexe 7 illustre cette dynamique deltaïque à proximité de la fente. Dans ce cas, le front a atteint la fente de l'ouvrage suite à l'apport énorme de sédiments entre 60 minutes et 70 minutes de simulation. Ceci induit une certaine transparence de l'ouvrage de fermeture dès l'atteinte de ce dernier par le front sédimentaire. Le piégeage des sédiments qui était préalablement total devient très partiel.

L'annexe 9 permet d'observer l'étalement du dépôt après chaque érosion. Ces figures montrent aussi l'influence de la concentration en débit solide sur les cycles observés.

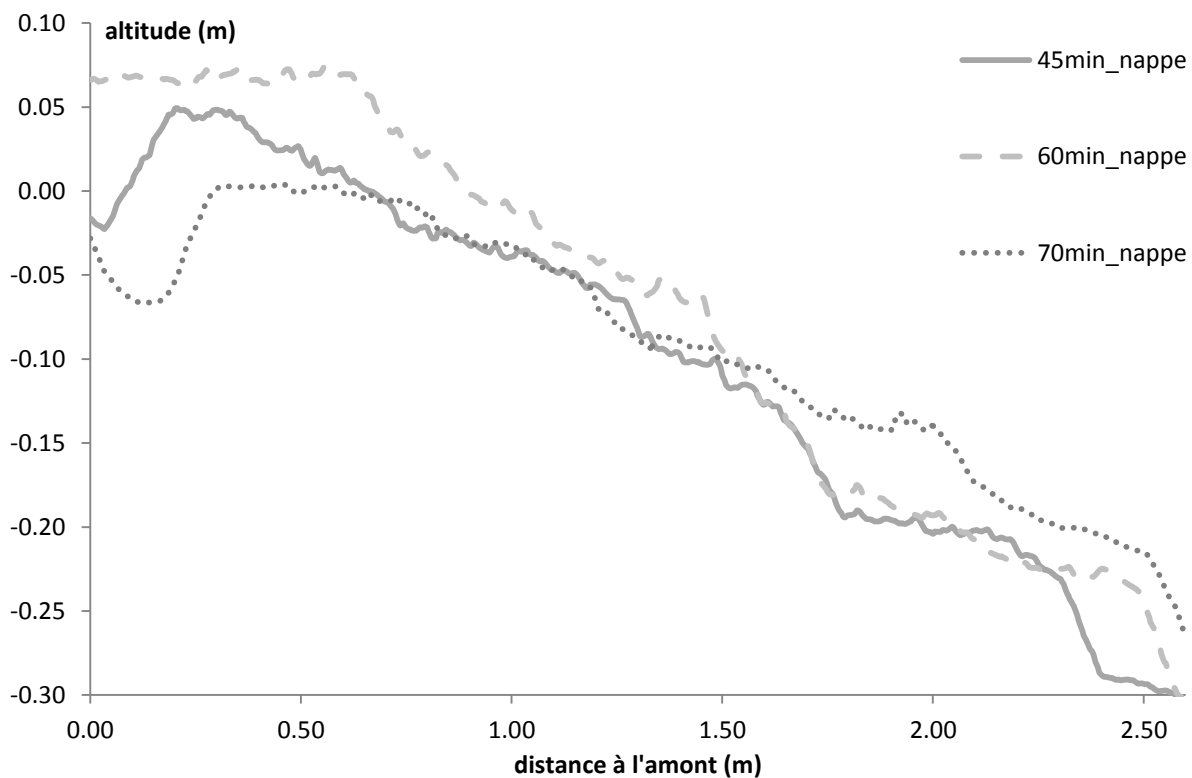


Figure 37 : Profils en long de la simulation à 2% de concentration en débit solide.

### 3.4.2. Analyse quantitative des pentes

Une analyse quantitative des pentes des cônes et des deltas a été réalisée à partir de ces profils en long (e.g. Figure 38). Cette analyse permet d'implémenter le facteur pente dans les formules de transport solide afin de vérifier leur validité dans nos conditions expérimentales, mais aussi d'observer si des tendances se dégagent.

Les pentes mesurées ont été classées en fonction de l'état morphologique du lit au moment de l'acquisition de la donnée. Les pentes des dépôts après une l'érosion (chenalisé) et les pentes des dépôts avant une érosion (nappe) ont été distinguées.

Dans le premier cas, l'écoulement est en presque totalité contenu dans un chenal unique. Cet état morphologique est instable et dure rarement plus de quelques minutes. Dans le deuxième cas, le dépôt est balayé par de multiples écoulements transitoires, généralement diffus et présentant de faibles hauteurs d'eau. Deux écoulements préférentiels s'installent de chaque côté de l'accumulation centrale comme exposé plus haut. Cet état morphologique d'aggradation dure plus longtemps que l'état chenalisé. De courts épisodes de dépavage et de création de lobes ont lieu durant la formation du cône d'aggradation. L'arrêt de ces bouffées sédimentaires a généralement lieu sous la forme de fronts raides. Après plusieurs phases de ces microdépavages, le cône devient très raide et occupe un volume notable dans la zone amont de la plage. Les zones régulièrement balayées par les écoulements se raidissent jusqu'à des valeurs de pente de l'ordre de 20%. Occasionnellement, des zones d'arrêts massifs, rarement balayées par les écoulements (zones d'arrêt dit « sec » dans la suite du texte) peuvent même atteindre des valeurs de pentes de 30%, valeurs extrêmement raides pour des processus alluvionnaires.

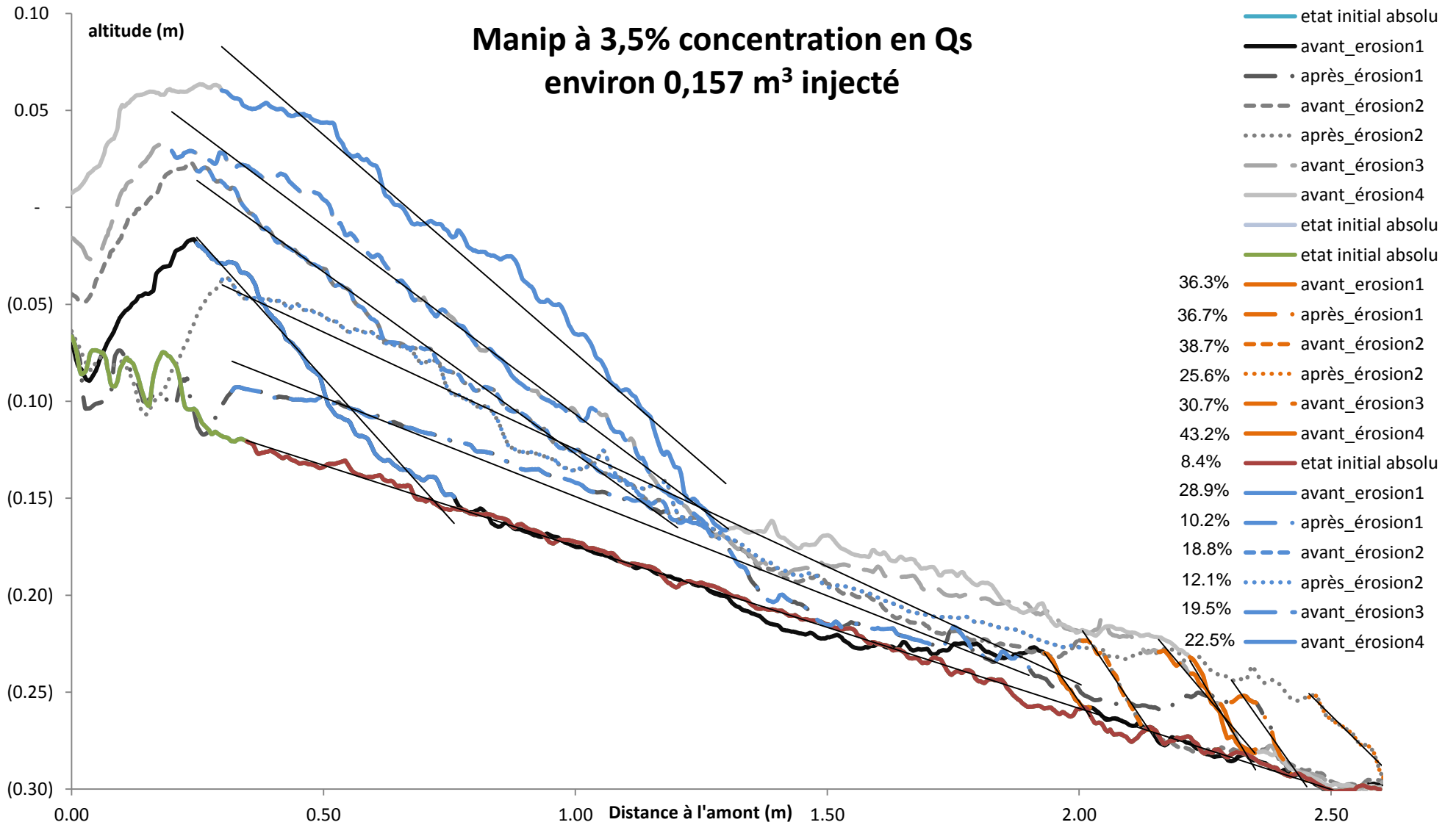


Figure 38 : Profils en long du canal montrant l'extraction des données de pentes.

En plaçant ces pentes dans un graphique de la pente en fonction des conditions d'alimentation en débit solide du canal, plusieurs tendances peuvent être mises en évidence (Figure 39).

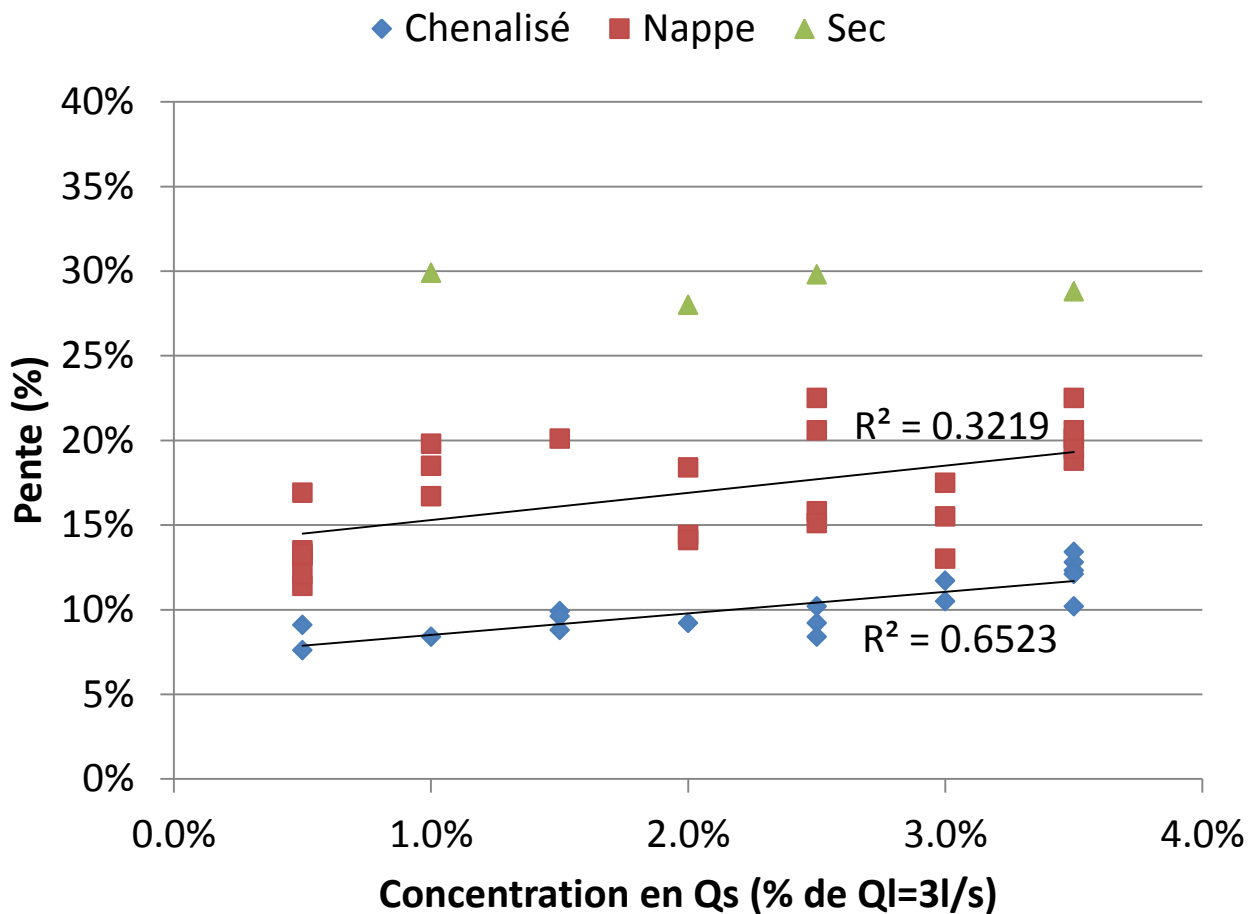


Figure 39 : Pentes des dépôts en fonction de la concentration en débit solide injectée.

La variabilité des pentes de nappe est forte. Il faut avoir à l'esprit qu'il est difficile de réaliser une mesure immédiatement avant une rupture, celle-ci étant soudaine et peu prédictible. Il y a donc dépôt progressif et raidissement de l'accumulation au cours de sa formation. Nous avons essayé de réaliser des mesures des valeurs maximum mais la Figure 39 contient l'ensemble des mesures réalisées. Seule la simulation à 3.5% de concentration présente les pentes de nappe juste avant érosion (variabilité de valeurs plus faible).

La Figure 39 appelle les commentaires suivants :

- Des fronts très raides "secs" ont été observés dans l'ensemble des manipulations ayant abouti à la formation d'un dépôt massif dans la partie amont de la plage. Seules les manipulations avec une alimentation à 0.5 et 1.5% de concentration n'ont pas généré un tel dépôt. Les valeurs de ces pentes maximums semblent indépendantes de la concentration d'alimentation. Comme les phénomènes qui les génèrent sont des dépauges et des arrêts brutaux des matériaux précédemment accumulés, ceci est relativement indépendant de la concentration amont. Ce résultat semble donc normal.
- Les pentes en nappe augmentent progressivement au cours de l'aggradation pour atteindre des valeurs très fortes de l'ordre de 20 %. Elles semblent elles aussi relativement indépendantes de la concentration amont. Toutefois, l'installation d'un système de tressage relativement à l'équilibre dans l'expérience à 0.5% de concentration a généré une reprise

régulière au pied du cône. Les arrêts de lobes ne pouvaient se raidir étant donnée l'érosion continu du cône. Ce transport solide « de fond » vient donc limiter la formation de structures morphologiques typées (cônes raides) quand les conditions expérimentales approchent un équilibre.

- Les pentes des chenaux augmentent avec la concentration d'apport tel que le prévoit la théorie. L'application des formules de transport usuelles dans les conditions torrentielles des expériences est présentée plus loin.

### 3.4.3. Analyse de la variabilité des pentes

Les mesures de pentes ont été réalisées de façon arbitraire dans l'axe des dépôts. Or, il existe une variabilité de la pente suivant la direction des écoulements mais également suivant le nombre de cycles morphologiques d'érosion/dépôt qui ont affectés la plage de dépôt.

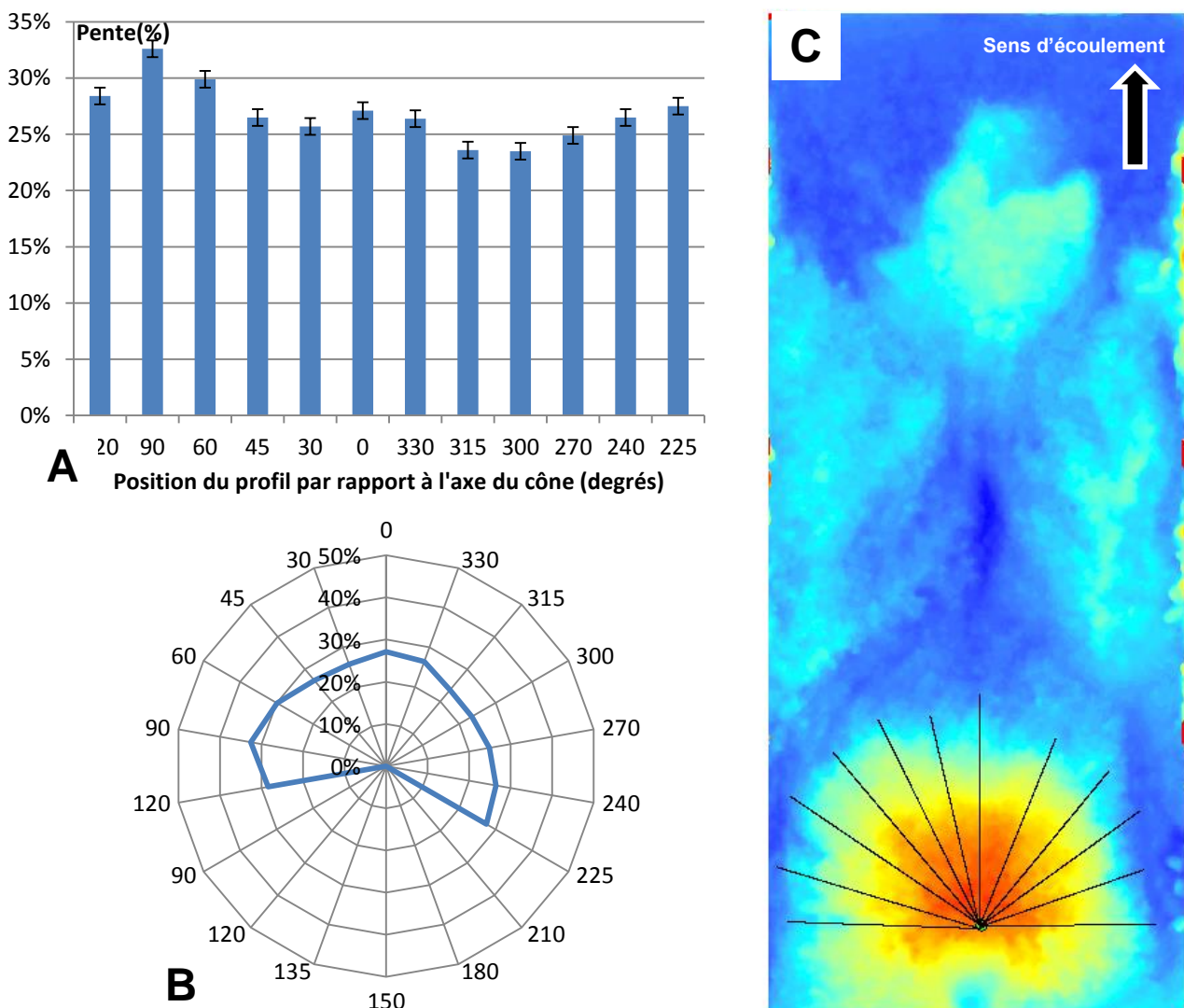
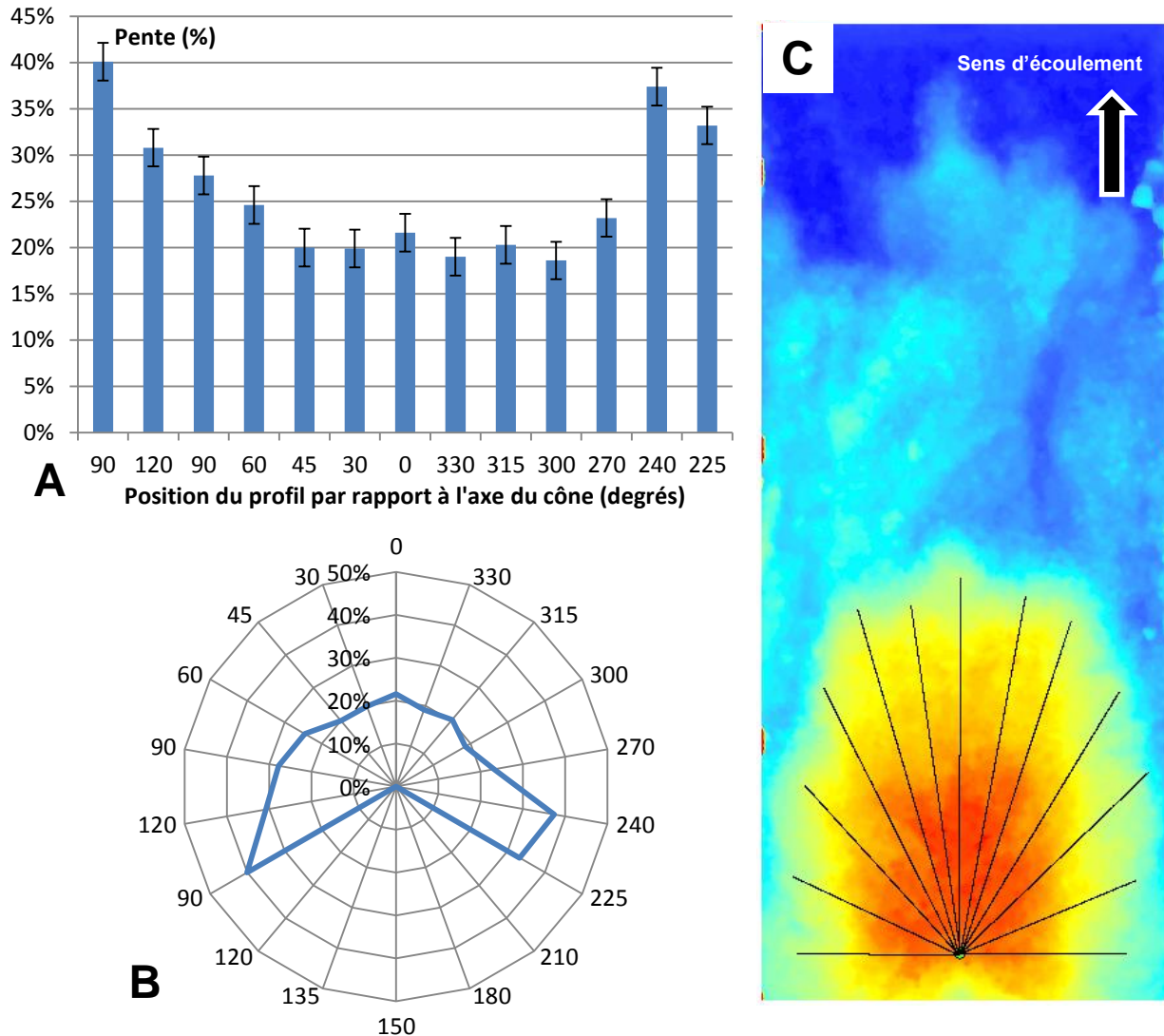


Figure 40 : Distribution des pentes par rapport à l'axe du dépôt initial. A : Histogramme avec l'erreur standard. B : Diagramme radar avec la pente sur le rayon et l'écart entre les profils en degré (0=axe du dépôt). C : MNT montrant la position des profils utilisés pour cette analyse.

La Figure 40 montre que la variabilité de la pente est faible lorsqu'il s'agit du dépôt initial n'ayant subi aucun cycle morphogène. L'erreur standard entre ces différentes mesures de pente est de 0.7%. A contrario, lorsque le dépôt a subi plusieurs cycles d'érosion/dépôt, la variabilité de la pente



augmente (erreur standard = 2.0%) et le cône prend alors une forme plus allongé avec des pentes plus raides sur ces flancs (Figure 41).



**Figure 41 : Distribution des pentes par rapport à l'axe du dépôt après plusieurs cycles morphologiques. A : Histogramme avec l'erreur standard. B : Diagramme radar avec la pente sur le rayon et l'écart entre les profils en degré (0=axe du dépôt). C : MNT montrant la position des profils utilisés pour cette analyse.**

La variabilité des pentes des deltas est naturellement plus forte que celle des cônes (Figure 42). La pente est plus importante sur le front du delta que sur les bords. De plus, l'orientation du front et sa forme sont conditionnées par la direction des écoulements qui génèrent ce front. En entrant dans la zone d'eau calme, les sédiments précédemment transportés se déposent en intégralité, créant une « mouth bar ». Ce dépôt forme un obstacle situé précisément dans l'axe de l'écoulement et oblige ce dernier à adapter son cheminement. Le développement des deltas prend donc généralement une direction préférentielle liée à celle qu'adopte le chenal actif. Des dissymétries significatives sont ainsi observées dans la forme des fronts deltaïques.

De plus, une part de la variabilité des pentes peut être attribuée à l'influence des écoulements lors de l'arrêt des simulations pour les prises de vues qui permettent de générer les MNT (effet du protocole). A la reprise de la simulation, la plage se remplit d'eau rapidement. La zone d'eau calme n'existe alors pas encore. Des phénomènes de fortes érosions ont lieu sur les zones raides des fronts deltaïques et des étalements sont observés. Dans la mesure où le dépôt, au droit des fronts deltaïques, est total et lié au remous hydraulique, la perturbation de la forme du front à l'occasion de

la remise en route de l'expérience est considérée comme ayant un effet négligeable sur la suite des expériences.

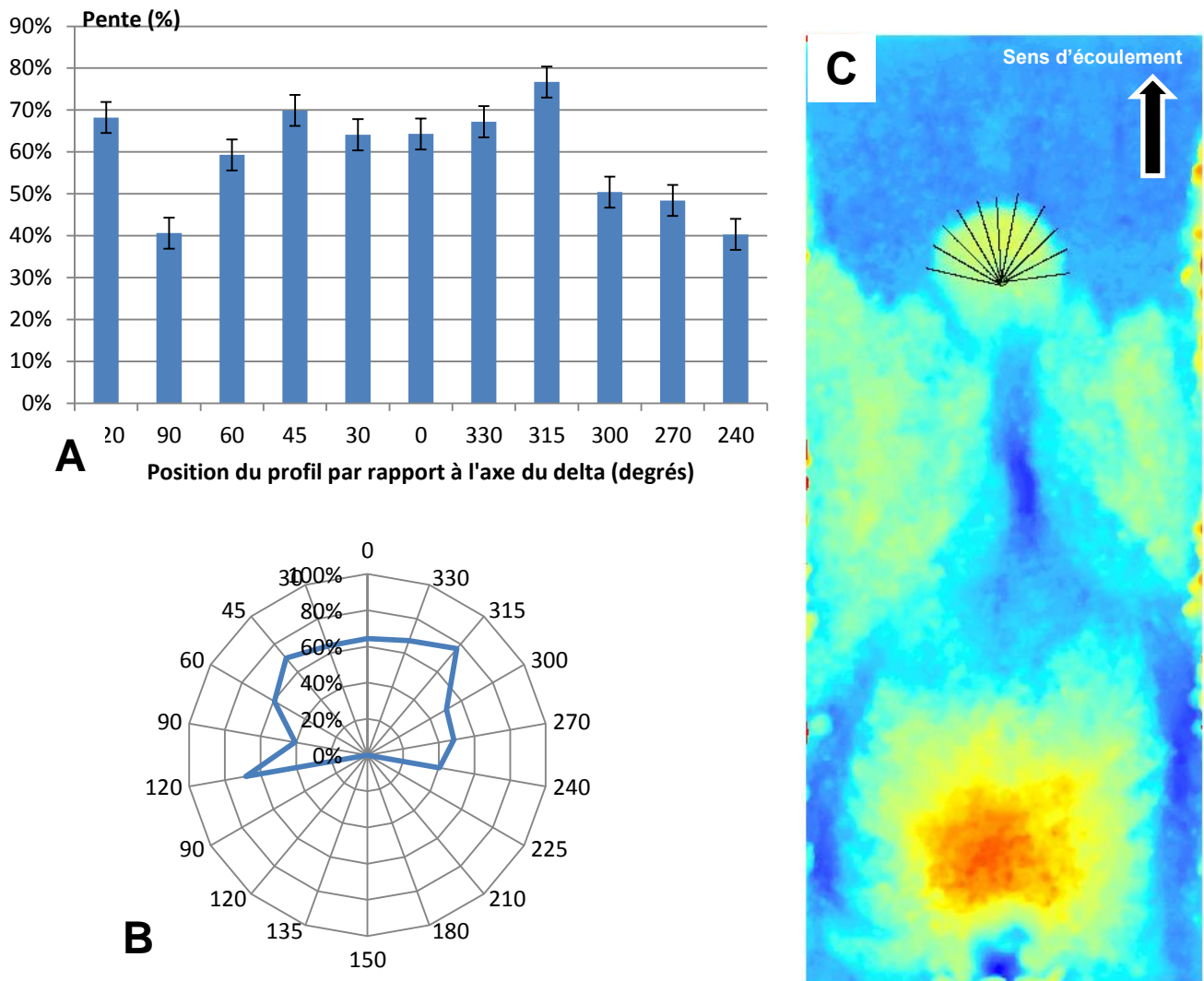


Figure 42 : Distribution des pentes par rapport à l'axe du delta. A : Histogramme avec l'erreur standard. B : Diagramme radar avec la pente sur le rayon et l'écart entre les profils en degré (0=axe du dépôt). C : MNT montrant la position des profils utilisés pour cette analyse.

## 4. Discussion

### 4.1. Similarités avec les morphodynamiques connues

Dans la littérature, il n'existe pas de description détaillée de la morphologie de dépôt de charriage au sein d'une plage. Il est cependant possible de trouver des analogies entre les observations effectuées au cours de cette étude et la description du fonctionnement des cônes alluviaux et des deltas. Van Dijk et al. (2012) comparent la morphodynamique des cônes alluviaux et des deltas à l'aide de modèles réduits (Figure 43a). Au cours de ces expériences, ils mettent en évidence que la formation d'un cône alluvial suit des cycles de dépôts puis d'incisions. Les dépôts s'effectuent à la faveur d'écoulement en nappes (sheet flows). Au contraire, les incisions chenalisent le cône par érosion régressive. Cette érosion conduit à un dépôt aval qui déclenche le comblement du chenal par propagation d'un remous solide (backfilling), remous prenant généralement « appui » sur un lobe aval.

Ces cycles sont semblables aux cycles observés dans la plage de dépôt. Toutefois l'initiation du phénomène de chenalisation semble apparaître par l'amont dans nos écoulements torrentiels plutôt que par l'aval tel qu'observé par Van Dijk et al. (2012). L'érosion massive du dépôt s'initie au droit d'une petite zone dépavée ou ravinée qui devient très rapidement un axe d'écoulement préférentiel. Le dérapage met en mouvement les sédiments grossiers vers l'aval. Ces derniers forment des lobes de dépôt comme le décrivent Reitz & Jerolmack (2012) dans leurs travaux sur la dynamique des cônes alluviaux (Figure 43b). Cependant, les phénomènes de chenalisation et de création de lobes sont beaucoup plus dynamiques dans notre cas d'étude. Ainsi, le cône est balayé par plusieurs écoulements préférentiels qui finissent par déstabiliser le dépôt laissant place à une érosion massive de ce dernier.

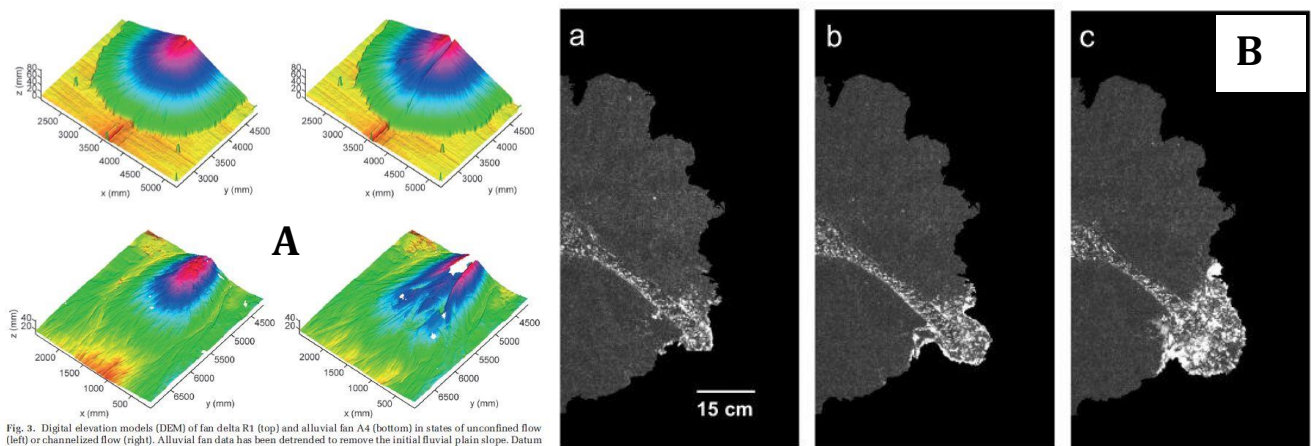


Fig. 3. Digital elevation models (DEM) of fan delta R1 (top) and alluvial fan A4 (bottom) in states of unconfined flow (left) or channelized flow (right). Alluvial fan data has been detrended to remove the initial fluvial plain slope. Datum and direction of coordinates are arbitrary.

**Figure 43 : A : MNT des cycles de dépôt et de chenalisation des deltas (en haut) et des cônes alluviaux (en bas) (Van Dijk et al., 2012) ; B : Images de la formation d'un lobe sur un cône alluvial en laboratoire. L'intervalle entre les photos est de deux minutes (Reitz & Jerolmack, 2012).**

Les formes observées par Van Dijk et al. (2012) sont du même type que celles observées lors de nos essais en laboratoire, surtout celles des cônes alluviaux qui sont plus allongées que les deltas grâce à la direction préférentielle d'écoulement dans l'axe de la pente.

Cependant ces phénomènes sont observés sur des pentes de l'ordre de 3% avec des concentrations en débit solide d'environ 0.3% et un D50 de 0.23 mm contre 8% dans notre cas et des concentrations 3 à 10 fois supérieures.

En 1983, Zollinger décrit au travers d'essais en laboratoire la morphologie d'un dépôt dans une plage. Les figures qui illustrent sa thèse sont obtenues à l'aide de la photogrammétrie. Là encore, les ressemblances avec nos observations sont frappantes (Figure 44).

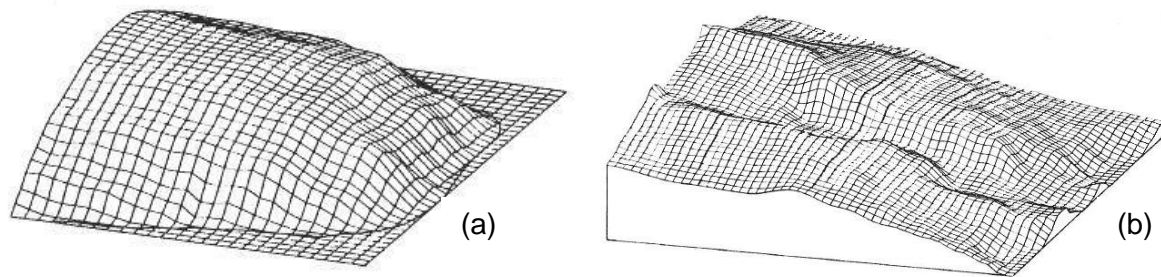


Figure 44 : MNT des dépôts a) écoulement en nappes, b) écoulement chenalisé (Zollinger, 1983)

## 4.2. Initialisation de l'incision : renaissance de la «dune à forte pente»

Les phénomènes observés lors de l'initiation de l'érosion du dépôt peuvent également être comparés aux dunes à fortes pentes. Ces phénomènes, rarement décrits, n'existent qu'en contexte torrentiel. La dune à forte pente se compose de trois parties (Figure 45) :

- Un chenal central bien marqué, rectiligne, qui fait transiter un matériau grossier semblant glisser sur un matériau plus fin (nappe de charriage selon la terminologie actuelle).
- Une niche d'érosion en amont qui peut reculer sous l'effet de la mise en place d'une érosion régressive.
- Une zone de dépôt à l'aval (le lobe).

Koulinski (1993) décrit leur fonctionnement de la manière suivante : « Une dune à forte pente s'installe lorsque les débits de plusieurs chenaux [...] se rassemblent dans un seul chenal, par suite des variations du modelé du lit alluvial, et donnent naissance à un écoulement liquide suffisant pour qu'un débit solide conséquent puisse être transporté. Un lessivage des éléments grossiers se produit alors et un lit fin à très forte capacité de transport s'installe avec érosion régressive et dépôt à l'aval. ». Ce type de morphologie ne peut avoir lieu que pour une granulométrie étendue, et, d'autre part, il semblerait que le déplacement des matériaux par nappes de granulométrie resserrée soit indispensable à l'amorçage de ces structures, d'où l'importance du tri granulométrique dans l'apparition de ce genre de structure.

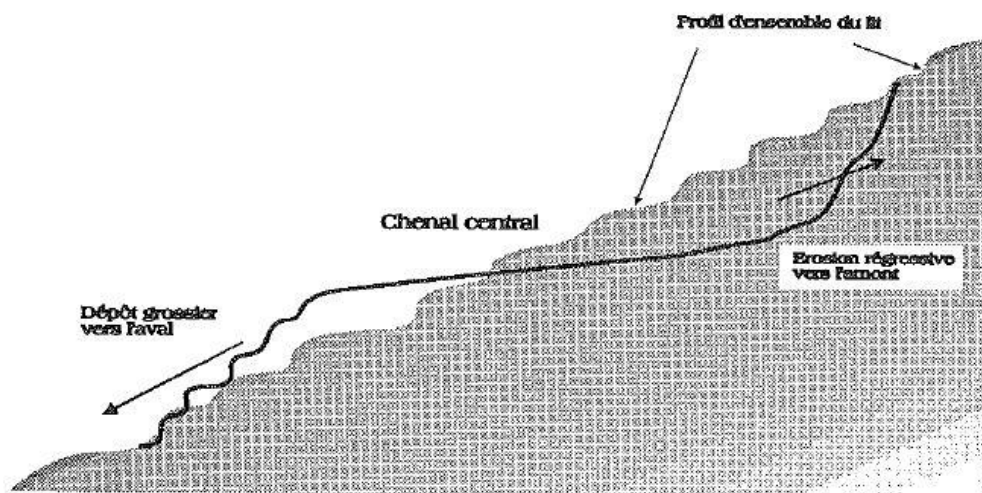


Figure 45 : Schéma d'une dune à forte pente (Koulinski, 1993).

Bacchi et al. (2014) ont également observé des fluctuations cycliques dans leurs essais en canal étroit (1D). Le diamètre des grains du mélange utilisé est similaire au mélange que nous avons utilisé dans notre étude ( $D_{50}=3.2$  mm,  $D_{84}/D_{50}=2.8$ ) et la pente du canal était supérieure (12%).

Ils ont observé des phénomènes de pavage du lit avec une destruction périodique créant une érosion locale et une propagation vers l'aval du matériel érodé sous forme de nappe de charriage. Ces cycles de destruction du pavage du lit engendrent alors des variations fréquentes de la pente amont. Les essais ayant été réalisés en alimentation constante, il semblerait que ces fluctuations cycliques soient principalement dues au tri granulométrique.

### 4.3. Tri granulométrique

Ces observations de ségrégation sont également mises en évidence sur le terrain. Ainsi, lors d'une campagne de mesure sur le torrent du Manival, la granularité des dépôts a pu être observée (Figure 46). Un tri très marqué est visible sur la partie supérieure des dépôts de manière équivalente à celui illustré par la Figure 35.

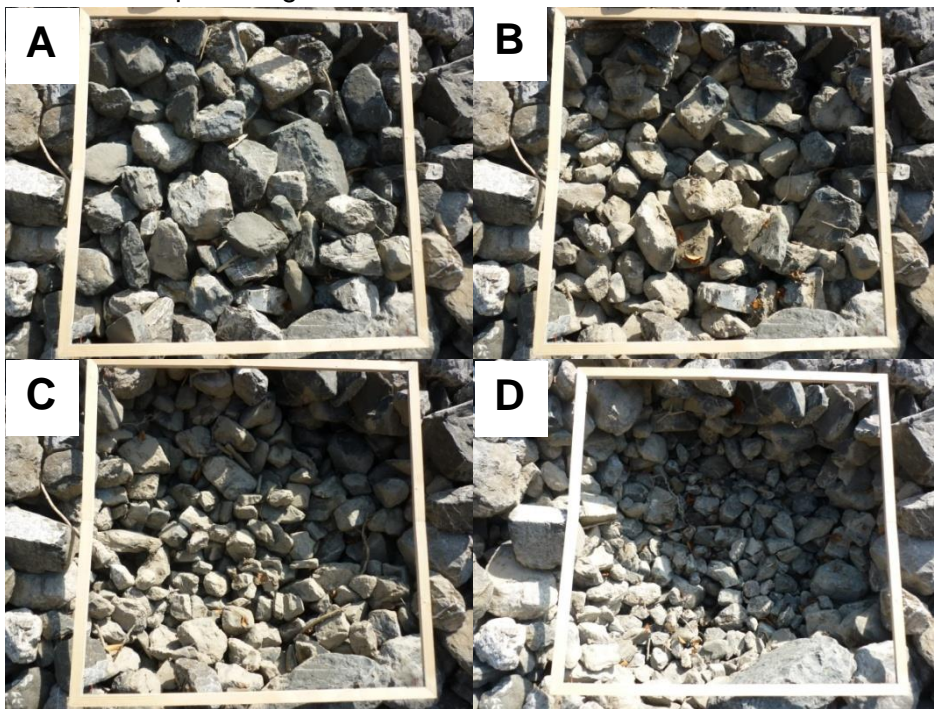


Figure 46 : Photo d'un dépôt dans le chenal du Manival (38). Respectivement de A à D de plus en plus profond.

Les implications de ce phénomène sur l'hydraulique, le transport sédiment et la morphodynamique reste pour l'heure des questions de recherche.

## 4.4. Pente

### 4.4.1. Fluctuations des pentes

Les profils extraits des simulations effectuées montrent également des similarités avec ceux observés par certains auteurs. Tout d'abord, les essais de Nicholas et al. (2009), Van Dijk et al. (2009) et Van Dijk et al. (2012) présentent deux types de profils en long. Les profils des deltas et des cônes diffèrent par leurs pentes et leurs formes. Les deltas présentent une pente très faible avec la présence d'un front à l'aval qui prograde au cours du temps (Figure 47). Les profils des cônes sont plus raides mais ne présentent pas de rupture de pente importante à l'aval, contrairement aux profils des dépôts de charriage. Les profils que nous avons pu réaliser présentent en fait ces deux aspects avec, à l'amont une forte pente de dépôt comme les cônes alluviaux puis à l'aval une rupture de pente et un front de delta qui prograde au cours du temps.

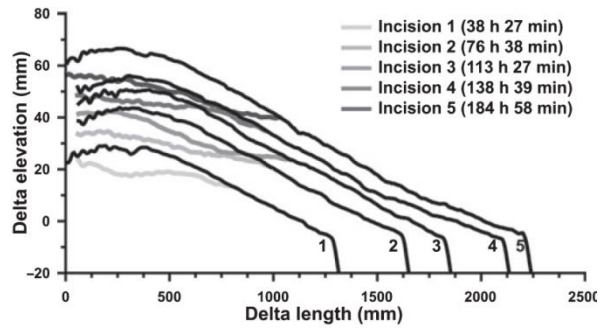


Figure 47 : Profils en long d'un delta montrant les différentes phases du cycle (Van Dijk et al. 2009).

La Figure 48 montre des incisions à l'amont qui contribuent à un transfert vers l'aval des matériaux érodés et la formation d'une barre sédimentaire. Le même phénomène peut être observé sur les figures des profils en long extraits des MNT des simulations.

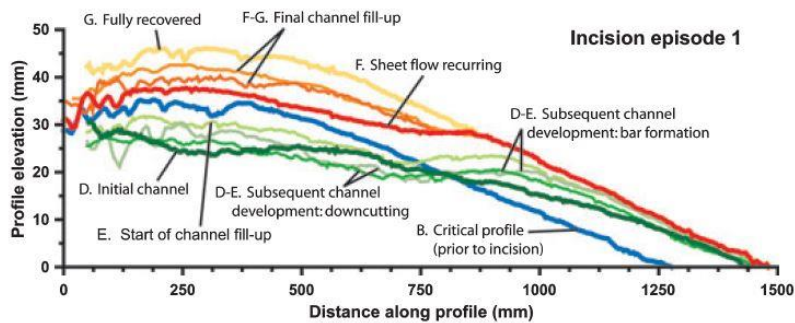


Figure 48 : Profils en long d'un cycle d'incision d'un delta (Van Dijk et al. 2009).

La forme des profils est caractéristique avec un profil convexe sur le dépôt avant la chenalisation de ce dernier et un profil plutôt concave lorsqu'il est chenalisé (annexe 6). Ces observations ont également été relevées dans les travaux de Parker et al. (1998). Dans leur développement théorique sur les cônes alluviaux, Parker et al. (1998) notent que le profil en long est toujours convexe pour un cône graveleux avec un écoulement en nappe. Pour les cônes chenalisés, la tendance s'inverse avec un profil plutôt concave, tant pour les cônes graveleux que sableux (Figure 49).

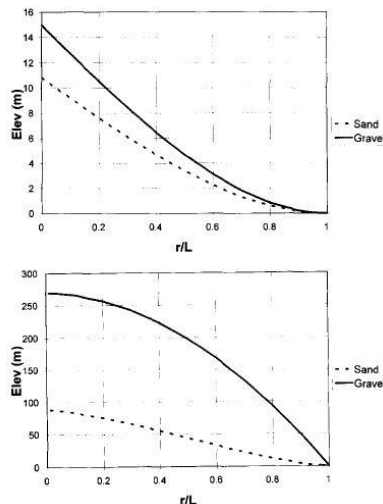


Figure 49 : Profils d'un cône chenalisé en haut et non chenalisé en bas (Paola & Mohrig 1998).

#### 4.4.2. Application des formules de transport solide

Les mesures de pentes réalisées sur les profils en long des différentes simulations ont permis de vérifier la validité des formules de transport solide usuelles en conditions torrentielles. Nous avons tenté de calculer les largeurs des chenaux pour différentes conditions de pente, de granulométrie et de concentration en débit solide.

Dans les conditions classiques d'application des formules de transport solide, par exemple à l'amont d'une plage, les paramètres sont les suivants :

- Pente
- Granulométrie
- Largeur du chenal
- Débit liquide

La formule de transport permet de déterminer le débit solide. Dans le cas d'une plage de dépôt, le problème est inverse. Les conditions expérimentales ont permis de déterminer les apports solides et liquides et la granulométrie. La pente des dépôts et la largeur des chenaux actifs sont par contre inconnus et s'adaptent naturellement. Afin de pouvoir concevoir les digues latérales des plages, une estimation de la pente des dépôts est nécessaire. Dans la mesure où deux variables restent libres (largeur et pente) le problème n'est pas fermé et présente plusieurs configurations correctes. Nos observations ont montré que les dépôts dans les plages adoptent des cycles entre deux états instables sur le long terme : des écoulements en nappe et chenalisés. Ayant mesuré les pentes de chacun des états, l'idée était de vérifier si les formules de Lefort, Smart et Jaeggi ou Rickenmann (Malavoi et al., 2011) fournissaient les bonnes valeurs de pente avec un paramètre de largeur de transport (i) cohérent avec la réalité des observations (~10-20 cm en chenalisé et ~ 60-120 cm en nappe) et (ii) constant entre les expériences afin d'être extrapolable à d'autres cas.

Le tableau suivant détaille plusieurs configurations testées avec des granulométries différentes.

Test 1 : D50 - pente nappe=20% et pente chenal fonction de la concentration							
C%	pente chenal %	w (m) avec D50=3 mm (nappe)		w (m) avec D50=3 mm (chenal)			
		Rickenmann	Smart et Jaeggi	Rickenmann	Smart et Jaeggi		
1	8.4	6.22	9.07	2.01	2.14		
2	9.2	6.03	8.65	1.92	2.03		
2.5	9.3	5.93	8.43	1.76	1.92		
3	11.1	5.83	8.22	2.34	2.51		
3.5	12.2	5.73	8.01	2.63	2.90		

Test 2 : D84 et Dm - pente nappe=20% et pente chenal fonction de la concentration							
C%	pente chenal %	w (m) avec D84=7.5 mm (nappe)		w (m) avec Dm=5.36 mm (chenal)		D (m) avec Lefort 1990	
		Rickenmann	Smart et Jaeggi	Rickenmann	Smart et Jaeggi	nappe	chenal
1	8.4	1.57	2.30	0.84	0.90	0.0325	0.0117
2	9.2	1.52	2.19	0.80	0.85	0.0315	0.0117
2.5	9.3	1.50	2.13	0.73	0.80	0.0310	0.1110
3	11.1	1.48	2.08	0.98	1.05	0.0305	0.0137
3.5	12.2	1.45	2.03	1.10	1.22	0.0300	0.0150

Test 3 : CONCENTRATION DOUBLEE - pente nappe=20% et pente chenal fonction de la concentration							
C%	pente chenal %	w (m) avec D84=7.5 mm (nappe)		w (m) avec Dm=5.36 mm (chenal)		D (m) avec Lefort 1990	
		Rickenmann	Smart et Jaeggi	Rickenmann	Smart et Jaeggi	nappe	chenal
2	8.4	1.52	2.19	0.67	0.72	0.0315	0.0103
4	9.2	1.43	1.97	0.48	0.53	0.0295	0.0089
5	9.3	1.38	1.86	0.34	0.41	0.0285	0.0077
6	11.1	1.33	1.76	0.57	0.61	0.0275	0.0099
7	12.2	1.28	1.66	0.66	0.70	0.0265	0.0108

Test 4 : D95- pente nappe=20% et pente chenal fonction de la concentration					
C%	pente chenal %	w (m) avec D95=14 mm (nappe)		w (m) avec D95=14 mm (chenal)	
		Rickenmann	Smart et Jaeggi	Rickenmann	Smart et Jaeggi
1	8.4	0.62	0.90	0.20	0.21
2	9.2	0.60	0.86	0.19	0.20
2.5	9.3	0.59	0.83	0.18	0.19
3	11.1	0.58	0.82	0.23	0.25
3.5	12.2	0.57	0.79	0.26	0.29

Figure 50 : Analyse de la validité des formules de transport solide en conditions torrentielles

Le premier test calcule les largeurs actives des chenaux avec comme taille de grain le D50 dans les conditions d'écoulement en nappe et d'écoulement chenalisé. Les observations réalisées lors des simulations ont permis d'estimer un ordre de grandeur de ces largeurs actives (10 à 20 cm dans le cas où l'écoulement est chenalisé et 60 à 120 cm lorsqu'il est en nappe). Ce premier test montre qu'en appliquant les formules de transport solide avec le D50, les largeurs actives calculées sont aberrantes (Figure 50).

Lors du second test, ce travail a été réalisé avec le D84 dans le cas des écoulements en nappe et le diamètre moyen (Dm) lorsqu'il est chenalisé. Là encore les valeurs de largeurs actives estimées par les formules de transport solide sont aberrantes. La formule de Lefort ne tient pas compte de la largeur active des chenaux, nous avons donc estimé le diamètre des grains pour les deux configurations d'écoulement. Ces valeurs sont très élevées puisqu'elles correspondent au diamètre maximum du mélange sédimentaire pour les écoulements en nappe et environ au D90 pour les écoulements chenalisés (Figure 50).

Le troisième test réalisé est basé sur des observations de Frey et al. (1999) qui préconisent, suite à leurs essais, de multiplier la concentration par deux dans les formules de transport solide afin d'estimer des paramètres plus cohérents. Les valeurs estimées de largeurs des chenaux en doublant les concentrations ne sont pas concluantes mais elles se rapprochent des observations réalisées lors des manipulations. Les diamètres de grains calculés avec la formule de Lefort sont toujours surestimés (Figure 50).

Le dernier test calcule les largeurs des chenaux à partir du D95. Ce test est basé sur les observations réalisées par Lala Rakotoson (1994) qui détermine une meilleure estimation des paramètres des formules de transport solide en conditions torrentielles avec une taille de grain proche du D95. Les valeurs de largeurs des chenaux ainsi calculées semblent cohérentes avec nos observations (Figure 50).

Les formules de transport solide usuellement utilisées en hydraulique torrentielle ne sont pas applicables à notre cas d'étude. Les paramètres qui entrent en compte dans ces formules doivent être forcés pour obtenir des résultats cohérents avec nos observations. Il semble qu'en utilisant une granularité grossière les résultats soient cohérents. Cependant ces observations mènent à mettre en garde quant à l'emploi de ces formules pour le dimensionnement d'ouvrages telles que les plages de dépôt. Il est nécessaire de poursuivre la recherche dans ce sens afin de déterminer des outils fiables pour la conception de ces ouvrages de correction torrentielle.



## Conclusion et perspectives

Cette étude a permis de mettre en évidence le fonctionnement cyclique des dépôts au sein d'une plage de dépôt. Ce fonctionnement s'apparente au fonctionnement des cônes et des deltas, cependant les conditions de pente et la granularité des écoulements diffèrent des conditions torrentielles. Les concentrations en débit solide apparaissent comme un premier facteur régulant les cycles. La granularité étendue, qui permet le tri granulométrique, semble également contrôler ces cycles et le fonctionnement par bouffées du transport solide. Dans ces conditions, on ne peut parler d'équilibre du fait de l'évolution cyclique de ces formes qui sont continuellement remaniées. Le terme d'équilibre dynamique est plus approprié. Ainsi le dépôt amont oscille entre une pente minimum et une pente maximum que nous sommes attachés à décrire qualitativement.

La première perspective de ce travail est donc la description quantitative des pentes et des débits solides associés à ces pentes à l'aide des formules de transport solide. L'idéal serait de déterminer une formule ou une approche permettant d'estimer les valeurs de pentes minimum et maximum. Les valeurs des pentes minimum et maximum permettraient ainsi de déterminer respectivement les volumes minimum et maximum de stockage mais aussi la cote minimum des crêtes des digues latérales afin de donner des éléments dans les choix du design des plages de dépôt et de limiter les risques liés au contournement des digues. Aujourd'hui, rien dans la littérature ne permet d'estimer ces pentes. Un des éléments-clé des formules de transport solide est la largeur du chenal actif, or, dans les zones de dépôts massifs, il n'existe pas de formule pour estimer cette largeur. Une analyse des valeurs minimum et maximum de largeur active est à programmer. De plus, il convient de tenir compte du tri granulométrique qui s'opère dans ce type de dépôt pour implémenter les formules de transport solide avec la bonne taille de grain en fonction de la phase du cycle pour déterminer les pentes correspondantes.

Pour finir, des recommandations aux concepteurs d'ouvrages seront rédigées. Le projet européen ayant financé ce stage prévoit la réalisation d'un guide technique incluant nos résultats.

## Bibliographie

- Agostino, V.D. & Lenzi, M.A., 1999. Bedload transport in the instrumented catchment of the Rio Cordon Part II : Analysis of the bedload rate. *Catena*, 36, pp.191–204.
- Ancey, C., 2011. Histoire et controverse de l'ingénierie des risques en montagne. , pp.1–19.
- Bacchi, V., Recking, A., Eckert, N., Frey, P., Piton, G. & Naaim, M., 2014. The effects of kinetic sorting on sediment mobility on steep slopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(8), pp.1075–1086.
- Bardou, E., 2002. Méthodologie de diagnostic des laves torrentielles sur un bassin versant alpin. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 382p.
- Barker, R., Dixon, L. & Hooke, J., 1997. Use of terrestrial photogrammetry for monitoring and measuring bank erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22(13), pp.1217–1227.
- Butler, J.B., Lane, S.N. & Chandler, J.H., 2001. Automated extraction of grain-size data from gravel surfaces using digital image processing. *Journal of Hydraulic Research*, 39:5, pp.519-529.
- Butler, J.B., Lane, S.N. & Chandler, J.H., 2002. Through-water close range digital photogrammetry in flume and field environments. *Photogrammetric Record*, 17, pp.419–439.
- Carbonneau, P.E., Lane, S.N. & Bergeron, N.E., 2003. Cost-effective non-metric close-range digital photogrammetry and its application to a study of coarse gravel river beds. *Remote Sensing*, 24, pp.2837–2854.
- Chandler, J.H., Shiono, K., Rameshwaren, P. & Lane, S.N., 2001. Measuring flume surfaces for hydraulics research using a kodak dcs460. *Photogrammetric Record*, 17, pp.39–61.
- Couvert, B. & Lefebvre, B., 1994. Contribution de modèles physiques à l'étude du charriage torrentiel. *La Houille Blanche*, 3, pp.81–90.
- Deymier, C., Tacnet, J.-M. & Mathys, N., 1995. Conception et calcul de barrages de correction torrentielle CEMAGREF-D., Antony. Ouvrage interne. 287 p.
- Fonstad, M.A., Dietrich, J., Courville, B.C., Jensen, J.L. & Carbonneau, P.E., 2013. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(4), pp.421–430.
- Frey, P., Tannou, S., Tacnet, J.M., Richard, D. & Koulinski, V., 1999. Interactions écoulements torrentiels-ouvrages terminaux de plage de dépôt. Rapport d'étude du Pôle Grenoblois d'Etudes et de Recherche pour la prévention des risques naturels. 38 p.
- Hughes, S. & Liu, P.L.F., 1993. Physical models and laboratory techniques in coastal engineering. Advanced series on ocean engineering. World Scie., Singapore.
- Javernick, L., Brasington, J. & Caruso, B., 2014. Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology*, in press.
- Koulinski, V., 1993. Etude de la formation d'un lit torrentiel par confrontation d'essais sur modèle réduit et d'observations de terrain. Thèse, Université Joseph Fourier-Grenoble 1. 538 p.

- Lala Rakotoson, S.J., 1994. Etude de l'influence de la largeur disponible a l'écoulement sur le charriage torrentiel. Mémoire de DEA. Université Jodeph Fourier de Grenoble. 68 p.
- Lane, S.N., Chandler, J.H. & Richards, K.S., 1994. Developments in monitoring and terrain modelling small scale river bed topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19(4), pp.349–368.
- Lane, S.N., Richards, K.S. & Chandler, J.H., 1996. Discharge and sediment supply controls on erosion and deposition in a dynamic alluvial channel. *Geomorphology*, 15(1), pp.1–15.
- Lane, S.N., Chandler, J.H. & Richards, K.S., 1998. Landform monitoring, modelling and analysis : the role of land form in geomorphological research. Chapter 1 in Landform monitoring, modelling and analysis Wiley., Chichester.
- Lane, S.N., Chandler, J.H. & Porfiri, K., 2001. Monitoring river channel and flume surfaces with digital photogrammetry. *Journal of hydraulic engineering*, 127, pp.871–877.
- Lane, S.N., Westaway, R.M. & Murray Hicks, D., 2003. Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(3), pp.249–271.
- Lapointe, M.F., Secretan, Y., Driscoll, S., Bergeron, N. & Leclerc, M., 1998. Response of the Ha! Ha! River to the flood of July 1996 in the Saguenay region of Quebec: Large-scale avulsion in a glaciated valley. *Water Resources Research*, 34(9), pp. 2383-2392.
- Lenzi, M.A., Agostino, V.D. & Billi, P., 1999. Bedload transport in the instrumented catchment of the Rio Cordon Part I : Analysis of bedload records , conditions and threshold of bedload entrainment. *Catena*, 36, pp.171–190.
- Liébault, F., 2003. Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel ( massifs du Diois et des Baronnies ). Thèse à l'Université Lumière Lyon 2. 339 p.
- Liébault, F., Gomez, B., Page, M., Marden, M., Peacock, D., Richard, D. & Trotter, C.M., 2005. Land-use change, sediment production and channel response in upland regions. *River Research and Applications*, 21(7), pp.739–756.
- Liébault, F., Peteuil, C., Jousse, C., Fragnol, B., Berger, F., Lopez Saez, J., Gotteland, A., Jaboyedoff, M. & Loye, A., 2010. L ' utilisation des plages de dépôts pour la mesure du transport solide torrentiel : applications dans le département de l ' Isère Rapport IRSTEA Grenoble. 49 p.
- Malavoi, J.R., Garnier, C.C., Landon, N., Recking, A. & Baran, P., 2011. Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière. Annexe : les formules de transport, p190. Onema. 216 p.
- Mao, L. & Lenzi, M.A., 2007. Sediment mobility and bedload transport conditions in an alpine stream. *Hydrological processes*, 1891, pp.1882–1891.
- Meunier, M., 1985. Symposium International sur l'érosion, les crues torrentielles et la prévention des désastres. Tsukuba. 35 p.
- Meunier, M., 1991. Eléments d'hydraulique torrentielle. CEMAGREF-DICOVA, Grenoble. 278 p.
- Nicholas, A.P., Clarke, L. & Quine, T.A., 2009. A numerical modelling and experimental study.of flow width dynamics on alluvial fans , *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, pp.1985–1993.

- Parker, G., Paola, C., Whipple, X. & Mohrig, D., 1998. Alluvial fans formed by channelized fluvial, *Journal of Hydraulic Engineering*, 124, pp.985–995.
- Peakall, J., Ashworth, P. & Best, J., 1996. The Scientific Nature of Geomorphology. Chapter 9: Physical Modelling in Fluvial Geomorphology: Principles , Applications and Unresolved Issues. Wiley. Chichester. pp. 221-253.
- Peteuil, C. Maraval, C., Bertrand, C. & Monier, G., 2008. Torrent du Manival. Schéma d'aménagement et de gestion du bassin versant contre les crues. Rapport ONF et RTM Isère. 107 p.
- Recking, A., 2013. An analysis of nonlinearity effects on bed load transport prediction. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface Processes and Landforms*, 118(3), pp.1264–1281.
- Recking, A., Richard, D., Degoutte, G., Liébault, F., Remaître, A., Peteuil, C., Mathys, N., Lang, M., Sauquet, E., Cipriani, T., Camenen, B., Frey, P., Chambon, G., Laigle, D. & Tacnet, J.M., 2013. Torrents et rivières de montagne. Dynamique et aménagement. Quae, ed., Versailles. 334 p.
- Reitz, M.D. & Jerolmack, D.J., 2012. Experimental alluvial fan evolution: Channel dynamics, slope controls, and shoreline growth. *Journal of Geophysical Research*, 117, 19 p.
- Rickenmann, D. & Fritschi, B., 2010. Bedload transport measurements using piezoelectric impact sensors and geophones. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report*, pp.407–423.
- Sharp, J., 1981. Hydraulic modelling. Butterworth., London.
- Smart, J.M. & Jaeggi, M.N.R., 1983. Sediment transport on steep slope. *Hydrologie und Glaziologie*, 64, p.191.
- SOGREAH, RTM & ETRM, 2011. Étude sur modèle réduit de la plage de dépôt du Chagnon. Rapport pour la commune de Vars. 169 p.
- Stojic, M., Chandler, J., Ashmore, P. & Luce, J., 1998. The Assessment of Sediment Transport Rates by Automated Digital Photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 64(5), pp.387–395.
- Turowski, J.M., Yager, E.M., Badoux, A., Rickenmann, D. & 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*, 1673, pp.1661–1673.
- Turowski, J.M. & Rickenmann, D., 2009. Tools and cover effects in bedload transport observations in the Pitzbach , Austria. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(June 2008), pp.26–37.
- Van Dijk, M., Postma, G. & Kleinhans, M.G., 2009. Autocyclic behaviour of fan deltas: an analogue experimental study. *Sedimentology*, 56(5), pp.1569–1589.
- Van Dijk, M., Kleinhans, M.G., Postma, G. & Kraal, E., 2012. Contrasting morphodynamics in alluvial fans and fan deltas: effect of the downstream boundary. *Sedimentology*, 59(7), pp.2125–2145.
- Van Effenterre, C., 1981. Les barrages perméables de sédimentation. Rapport de séminaire, Propriano. 13 p.
- Veyrat-Charvillon, S., 2005. Elaboration d ' une méthode de prédiction du volume maximal d ' une lave torrentielle. Géomorphologie torrentielle , Topographie de terrain et Stéréophotogrammétrie sur

photographies aériennes d ' archives Torrents du Manival , du Merdarêt et des Arches. Thèse Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand 2. 356 p.

Veyrat-Charvillon, S. & Memier, M., 2006. Stereophotogrammetry of archive data and topographic approaches to debris-flow torrent measurements: calculation of channel-sediment states and a partial sediment budget for Manival torrent (Isère, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(2), pp.201–219.

Zollinger, F., 1983. Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz. Ihre Morphologie und die Möglichkeiten einer Steuerung. Zürich: Eidgenössischen technischen hochschule Zürich. 268 p.

Zollinger, F., 1986. Symposium international sur les phénomènes érosifs. Prévention contre les laves torrentielles et autres désastres analogues. Les plages de dépôt dans les Alpes Européennes. , 14 p.

## Table des figures

FIGURE 1 : SCHEMA DE TRANSITION DES DISCIPLINES EN FONCTION DU PHENOMENE ETUDIE, (MODIFIE D'APRES MEUNIER, 1991).	4
FIGURE 2 : ILLUSTRATION QUALITATIVE DE L'EQUILIBRE D'UN BASSIN VERSANT TORRENTIEL (BARDOU, 2002).	5
FIGURE 3 : ENTITES FONCTIONNELLES D'UN LAVES TORRENTIELLE (BARDOU, 2002).	5
<b>FIGURE 4 : METHODE DE CLASSIFICATION DES TYPES DE RIVIERES PERMETTANT DE DISTINGUER LA RIVIERE TORRENTIELLE DU TORRENT SELON DES CRITERES HYDRAULIQUES ET SEDIMENTAIRES (LIEBALT, 2003).</b>	6
FIGURE 5 : LES AMENAGEMENTS TORRENTIELS. A : SCHEMAS D'UN BASSIN VERSANT TORRENTIEL AVEC AMENAGEMENT MIXTE (ACTIF ET PASSIF) (DEYMIER ET AL., 1995). B : ELEMENTS D'UN OUVRAGE DE SEDIMENTATION (MODIFIE D'APRES ZOLLINGER, 1983).	8
FIGURE 6 : EXEMPLE D'OUVERTURES DE PLAGE DE DEPOT EN MODELE PHYSIQUE. A : FENTE LARGE, B : 10 OUVERTURES CIRCULAIRES AVEC FENTE, C : FENTE ETROITE ET PROFONDE AVEC PEIGNE, D : 4 FENTES HORIZONTALES DECALEES. (SOGREAH ET AL., 2011).	9
FIGURE 7 : VOLUMES STOCKES AU COURS D'UN HYDROGRAMME DE CRUE POUR DIFFERENTES CONFIGURATIONS D'OUVRAGE TERMINAL (SOGREAH ET AL. 2011).	9
FIGURE 8 : MNT DE LA RIVIERE EN TRESSE AHURIRI (NOUVELLE-ZELANDE) REALISE SOUS AGISOFT PHOTOSCAN (JAVERNICK ET AL., 2014).	11
FIGURE 9 : COMPARAISON DE MNT SfM ET LIDAR (FONSTAD ET AL. 2013). A : PHOTO AERIENNE. B : MNT SfM. C : MNT LIDAR.	11
FIGURE 10 : CARTE D'UN SECTEUR DE LA RIVIERE WAIMAKARIRI (NOUVELLE-ZELANDE) MONTRANT LES ZONES EN EROSION ET LES DEPOTS ENTRE FEVRIER 1999 ET FEVRIER 2000 (LANE ET AL., 2003).	12
FIGURE 11 : A. PHOTO UTILISEE POUR LA CONSTRUCTION DU MNT. B. ZOOM DU MNT REALISE PAR PHOTOGRAMMETRIE (BUTLER ET AL., 2014).	12
FIGURE 12 : SCHEMA PRESENTANT LE SYSTEME DE MESURE MIS EN PLACE LE LONG D'UNE BERGE. ON NOTE LA POSITION DES APPAREILS DE PRISE DE VUE ET LES CIBLES POSITIONNEES SUR LA BERGE QUI SERVENT A LA CONSTRUCTION DU MNT VIA LA PHOTOGRAMMETRIE (BARKER ET AL., 1997).	12
FIGURE 13 : MNT ISSUS DE L'ETUDE D'UN MODELE REDUIT DE RIVIERE EN TRESSE (STOJIC ET AL., 1998) A) MNT A T=320 MIN, B) MNT A T = 350 MIN, C) DIFFERENCE DES MNT ILLUSTRANT LES MORPHOLOGIES ET VALEURS DES DEPOTS A L'AVAL DES BARES (B, C), L'EROSION LE LONG D'UN NOUVEAU CHENAL (D) ET LE L'INFLUENCE AVAL ENTRE DES ZONES DE DEPOT (B) ET D'EROSION (A).	13
FIGURE 14 : SCHEMA DU CANAL HYDRAULIQUE DE L'IRSTEA.	14
FIGURE 15 : COURBE DE CALIBRATION DE LA POMPE. RELATION TENSION EN FONCTION DU DEBIT.	15
• FIGURE 16 : COMPARAISON ENTRE LES COURBES GRANULOMETRIQUES DES TORRENTS ET LES COURBES DU MODELE (UNE COURBE ISSU DU MODELE DE RECKING ET UNE COURBE AVEC LES TAILLES DE TAMIS DISPONIBLES).	18
FIGURE 17 : GRAIN SIZE DISTRIBUTION MODEL. (A) FIELD DATA SET OF 78 GRAVEL BED RIVERS AND (B) THE MODEL OF RECONSTRUCTION OF DE GRAIN SIZE DISTRIBUTION (RECKING, 2013).	18
FIGURE 18 : PHOTO DU MELANGE CONSTITUE.	19
FIGURE 19 : COURBES DE CALIBRATION DU TAPIS D'ALIMENTATION EN DEBIT SOLIDE.	19
FIGURE 20 : A GAUCHE : VUE DE DESSUS DU CANAL 3D SOUS AGISOFT PHOTOSCAN AVEC LA POSITION DES PHOTOS PRISES AFIN DE COUVRIR LA TOTALITE DU CANAL (EN BAS A DROITE, L'AXE Y EST EN VERT ET L'AXE X EST EN ROUGE). A DROITE : POSITIONNEMENT DES CIBLES AUTOUR DU CANAL.	20
FIGURE 21 : COMPARAISON ENTRE DES POINTS SIMILAIRES QUI N'APPARTIENNENT PAS A LA MEME ZONE DE RECOUVREMENT ENTRE DEUX PHOTOS (PHOTOS 1 ET 2), ET ENTRE DES POINTS SIMILAIRES QUI FONT PARTIE DE LA MEME ZONE DE RECOUVREMENT (3 ET 4).	22
FIGURE 22 : COMPARAISON ENTRE LE NUAGE DE POINTS (A) ET LE NUAGE DE POINTS DENSIFIE (B). (C) EST LE NUAGE DE POINTS DENSIFIE SANS LA COULEUR ET QUI PERMET DE MIEUX SE RENDRE COMPTE DU RELIEF ET DE LA DENSITE DE POINT.	22
FIGURE 23 : MAILLAGE ZOOMÉ D'UN MODELE DU CANAL AFIN D'OBSERVER LES FACES ET LES SOMMETS.	23
FIGURE 24 : DIFFERENCES D'ALTITUDE ENTRE DEUX ENSEMBLES DE PHOTOS. L'ALTITUDE A ETE NORMALISEE PAR LE D50 DES SEDIMENTS PRESENTS DANS LE CANAL LORS DES TESTS.	23
FIGURE 25 : DIFFERENCES DE VOLUME ENTRE DEUX ENSEMBLES DE PHOTOS.	24
FIGURE 26 : MESURE DE L'ERREUR RELATIVE DES DISTANCES SOUS AGISOFT PHOTOSCAN.	24
FIGURE 27 : PROFILS EN LONG DU CANAL POUR DIFFERENTES COMBINAISONS D'OPTIMISATION DES PARAMETRES.	25
FIGURE 28 : PROFILS EN LONG DU CANAL POUR DIFFERENTS MODE DE PRISE DE VUE ET POUR DIFFERENTES CORRECTION DE LA DISTORSION.	25
FIGURE 29 : COMPARAISON DES NUAGES DE POINTS EPARSE OBTENUS AVEC AGISOFT POUR, A : LE CANAL SANS EAU, B : LE CANAL AVEC DE L'EAU, C : ORTHOPHOTO DU CANAL AVEC DE L'EAU DANS LE CHENAL CENTRAL.	26
FIGURE 30 : PROFILS EN TRAVERS DES MNT AVEC ET SANS EAU. A : CHENAL CENTRAL FIGURE 29. B : CHENAL SECONDAIRE FIGURE 29.	26

FIGURE 31 : COURBES DE LA PENTE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION A L'EQUILIBRE ETABLIES SUIVANT CINQ FORMULES DE TRANSPORT SOLIDE POUR LE D50 DU MODELE ET POUR UNE LARGEUR DE CHENAL D'ENVIRON 20 CM. ....	28
FIGURE 32 : COURBES DE LA PENTE EN FONCTION DE LA CONCENTRATION A L'EQUILIBRE ETABLIES SUIVANT CINQ FORMULES DE TRANSPORT SOLIDE POUR LE D50 DU MODELE ET POUR UNE LARGEUR DE CHENAL D'ENVIRON 90 CM. ....	29
FIGURE 33 : TEMPS DE RETOUR DES CYCLES OBSERVES EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN DEBIT SOLIDE .....	29
FIGURE 34 : SCHEMA ILLUSTRANT LES CYCLES MORPHOLOGIQUES OBSERVES. ....	31
FIGURE 35 : PHOTOS ILLUSTRANT LE TRI GRANULOMETRIQUE DU DEPOT AMONT. A : SURFACE DU DEPOT. B : SUBSURFACE DU DEPOT. C : COUCHE DE FOND DU DEPOT. D : VUE EN COUPE DU DEPOT.....	32
FIGURE 36 : PROFILS EN LONG DE LA SIMULATION A 1% DE CONCENTRATION EN DEBIT SOLIDE.....	33
FIGURE 37 : PROFILS EN LONG DE LA SIMULATION A 2% DE CONCENTRATION EN DEBIT SOLIDE.....	34
FIGURE 38 : PROFILS EN LONG DU CANAL MONTRANT L'EXTRACTION DES DONNEES DE PENTES.....	35
FIGURE 39 : PENTES DES DEPOTS EN FONCTION DE LA CONCENTRATION EN DEBIT SOLIDE INJECTEE.....	36
FIGURE 40 : DISTRIBUTION DES PENTES PAR RAPPORT A L'AXE DU DEPOT INITIAL. A : HISTOGRAMME AVEC L'ERREUR STANDARD. B : DIAGRAMME RADAR AVEC LA PENTE SUR LE RAYON ET L'ECART ENTRE LES PROFILS EN DEGRE (0=AXE DU DEPOT). C : MNT MONTRANT LA POSITION DES PROFILS UTILISES POUR CETTE ANALYSE. ....	37
FIGURE 41 : DISTRIBUTION DES PENTES PAR RAPPORT A L'AXE DU DEPOT APRES PLUSIEURS CYCLES MORPHOLOGIQUES. A : HISTOGRAMME AVEC L'ERREUR STANDARD. B : DIAGRAMME RADAR AVEC LA PENTE SUR LE RAYON ET L'ECART ENTRE LES PROFILS EN DEGRE (0=AXE DU DEPOT). C : MNT MONTRANT LA POSITION DES PROFILS UTILISES POUR CETTE ANALYSE.....	38
FIGURE 42 : DISTRIBUTION DES PENTES PAR RAPPORT A L'AXE DU DELTA. A : HISTOGRAMME AVEC L'ERREUR STANDARD. B : DIAGRAMME RADAR AVEC LA PENTE SUR LE RAYON ET L'ECART ENTRE LES PROFILS EN DEGRE (0=AXE DU DEPOT). C : MNT MONTRANT LA POSITION DES PROFILS UTILISES POUR CETTE ANALYSE. ....	39
FIGURE 43 : A : MNT DES CYCLES DE DEPOT ET DE CHENALISATION DES DELTAS (EN HAUT) ET DES CONES ALLUVIAUX (EN BAS) (VAN DIJK ET AL., 2012) ; B : IMAGES DE LA FORMATION D'UN LOBE SUR UN CONE ALLUVIAL EN LABORATOIRE. L'INTERVALLE ENTRE LES PHOTOS EST DE DEUX MINUTES (REITZ & JEROLMACK, 2012).....	40
FIGURE 44 : MNT DES DEPOTS A) ECOULEMENT EN NAPPES, B) ECOULEMENT CHENALISE (ZOLLINGER, 1983) .....	41
FIGURE 45 : SCHEMA D'UNE DUNE A FORTE PENTE (KOULINSKI, 1993).....	41
FIGURE 46 : PHOTO D'UN DEPOT DANS LE CHENAL DU MANIVAL (38). RESPECTIVEMENT DE A A D DE PLUS EN PLUS PROFOND.....	42
FIGURE 47 : PROFILS EN LONG D'UN DELTA MONTRANT LES DIFFERENTES PHASES DU CYCLE (VAN DIJK ET AL. 2009). ....	43
FIGURE 48 : PROFILS EN LONG D'UN CYCLE D'INCISION D'UN DELTA (VAN DIJK ET AL. 2009). ....	43
FIGURE 49 : PROFILS D'UN CONE CHENALISE EN HAUT ET NON CHENALISE EN BAS (PAOLA & MOHRIG 1998).....	43
FIGURE 50 : ANALYSE DE LA VALIDITE DES FORMULES DE TRANSPORT SOLIDE EN CONDITIONS TORRENTIELLES .....	44
TABLE 1 : NOMBRE DIMENSIONNELS PERTINENTS DANS LES ECOULEMENTS FLUVIAUX.....	16
TABLE 2 : FACTEURS D'ECHELLE ENTRE LE CANAL IRSTEA ET LES TORRENTS DE L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE. ....	17

## Table des matières

Remerciements.....	1
Sommaire .....	1
Introduction.....	2
1. Présentation de la problématique et synthèse bibliographique .....	3
1.1. L'hydraulique torrentielle.....	3
1.1.1. Le transport solide en contexte torrentiel .....	3
1.1.2. Les ouvrages de correction torrentielle (plages de dépôt).....	7
1.2. Application de la photogrammétrie à la géomorphologie.....	10
1.2.1. Application sur le terrain .....	10
1.2.2. Application en laboratoire .....	13
2. Matériel et méthodes.....	14
2.1. Le dispositif expérimental .....	14
2.1.1. Le canal hydraulique.....	14
2.1.2. Similitude de Froude.....	15
2.1.3. Granulométrie et alimentation solide du modèle .....	17
Analyse granulométrique.....	17
Dispositif d'alimentation solide et calibrage .....	19
2.2. Le dispositif de mesure .....	20
2.2.1. La photogrammétrie avec Agisoft Photoscan.....	20
Dispositif et paramètres de prise de vue.....	20
Fonctionnement d'Agisoft Photoscan .....	21
Analyse de la fiabilité de la mesure .....	23
Effet de l'eau .....	25
2.2.2. Mesure du débit solide aval .....	27
3. Résultats.....	28
3.1. Pente et concentration.....	28
3.2. Cycles morphologiques.....	29
3.2.1. Etape 1 : dépôt amont massif et écoulement en nappe.....	30
3.2.2. Etape 2 : chenalisation soudaine .....	30
3.2.3. Etape 3 : migration des chenaux.....	30
3.3. Tri granulométrique.....	32
3.4. Pentes de dépôt et de transport.....	32
3.4.1. Analyse qualitative des pentes.....	32
3.4.2. Analyse quantitative des pentes .....	34
3.4.3. Analyse de la variabilité des pentes .....	37



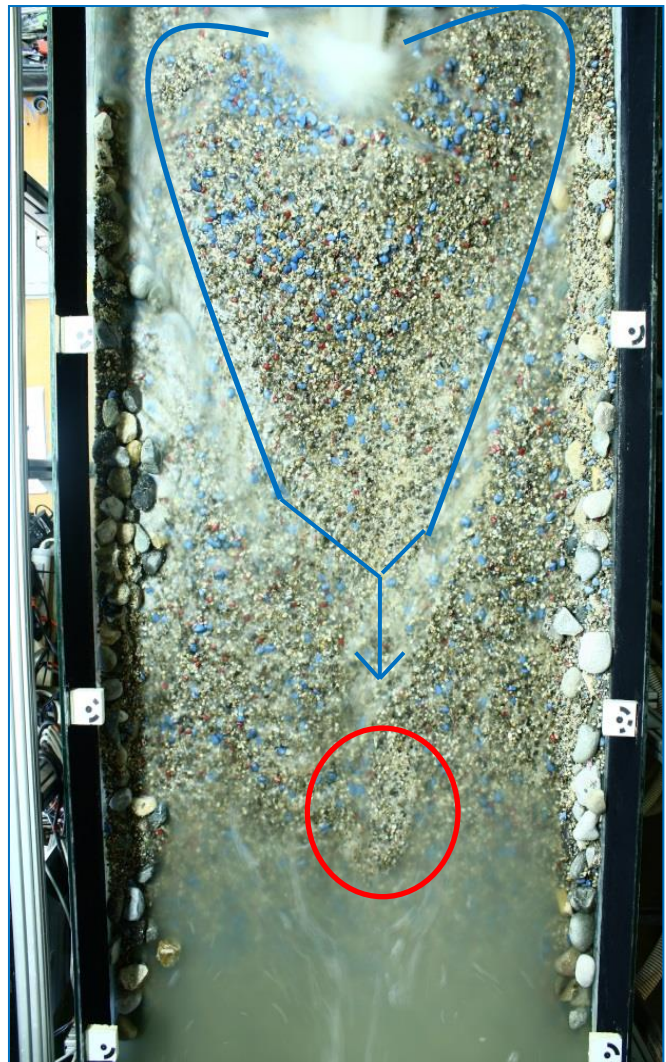
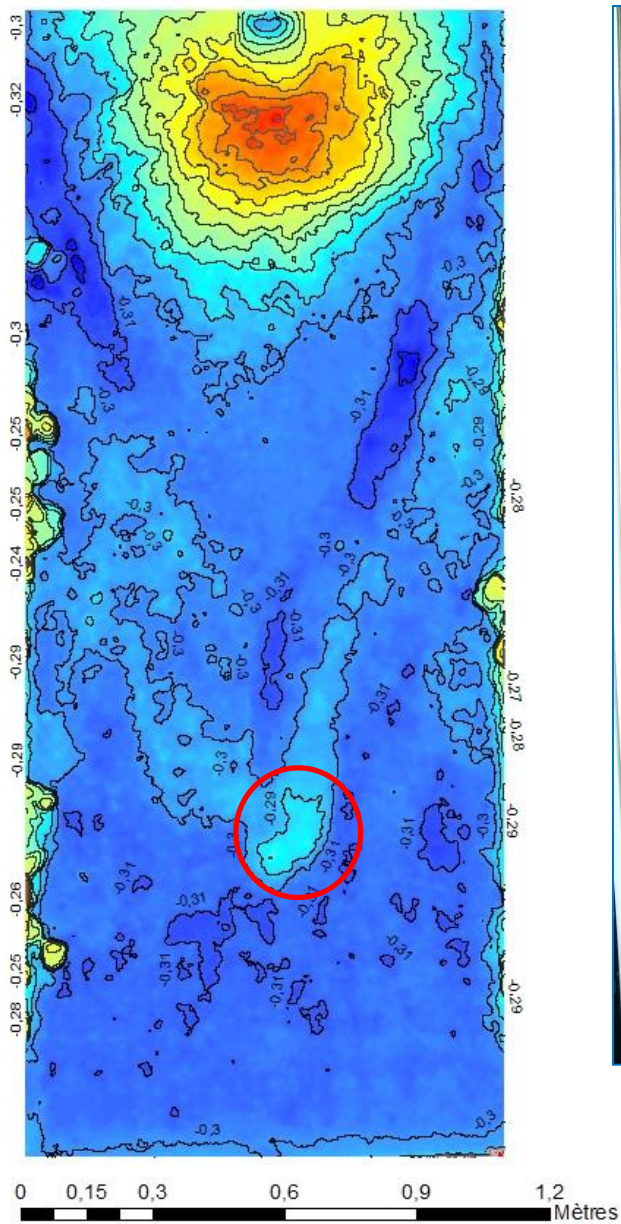
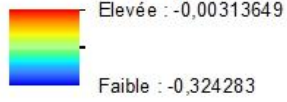
4. Discussion.....	40
4.1. Similarités avec les morphodynamiques connues.....	40
4.2. Initialisation de l'incision : renaissance de la «dune à forte pente».....	41
4.3. Tri granulométrique.....	42
4.4. Pente.....	42
4.4.1. Fluctuations des pentes.....	42
4.4.2. Application des formules de transport solide.....	44
Conclusion et perspectives .....	46
Bibliographie.....	47
Table des figures .....	51
Table des matières .....	53
Annexes.....	55
Résumé .....	62
Abstract .....	62

## Annexes

**Annexe 1 :** MNT et photo du canal avant la première érosion du dépôt amont pour une concentration en débit solide de 3%.

mnt

altitude (m)



**Annexe 2 : MNT et photo du canal avant la première érosion du dépôt amont pour une concentration en débit solide de 1%.**

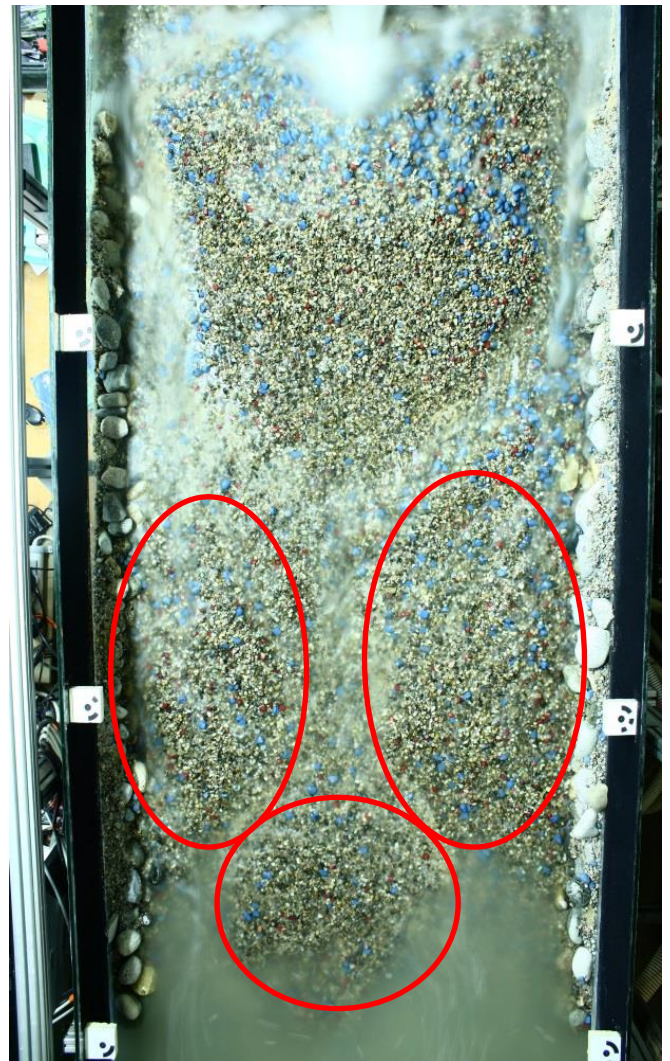
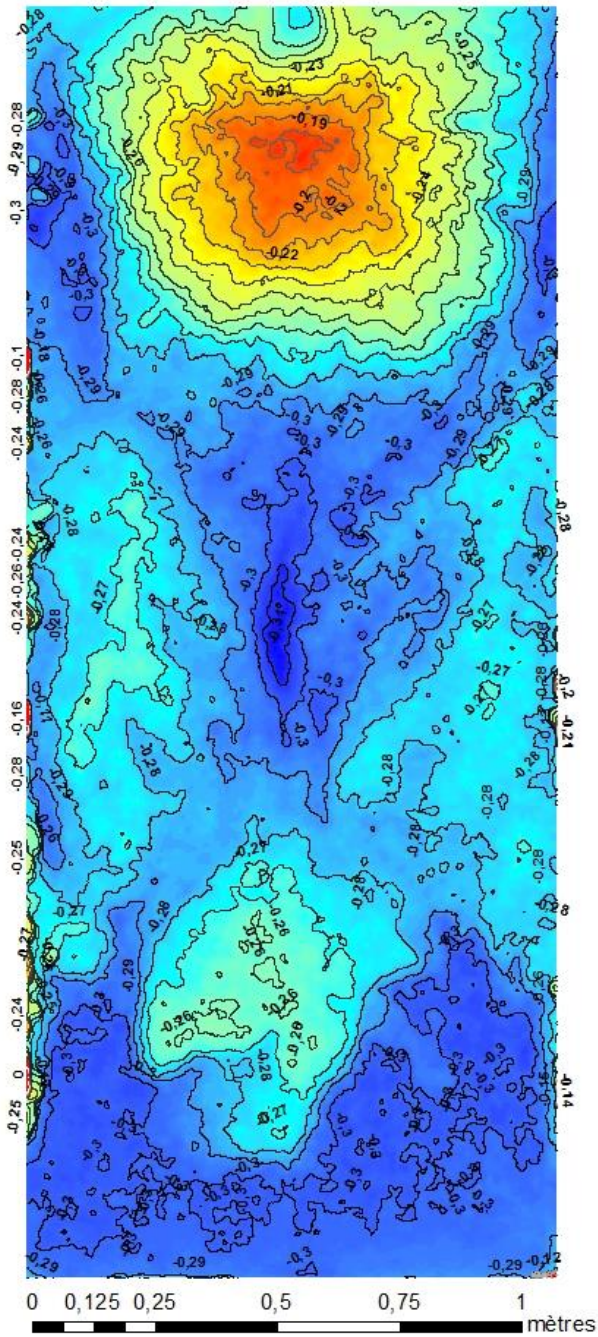
**mnt**

**altitude (m)**



Elevée : 0,000928223

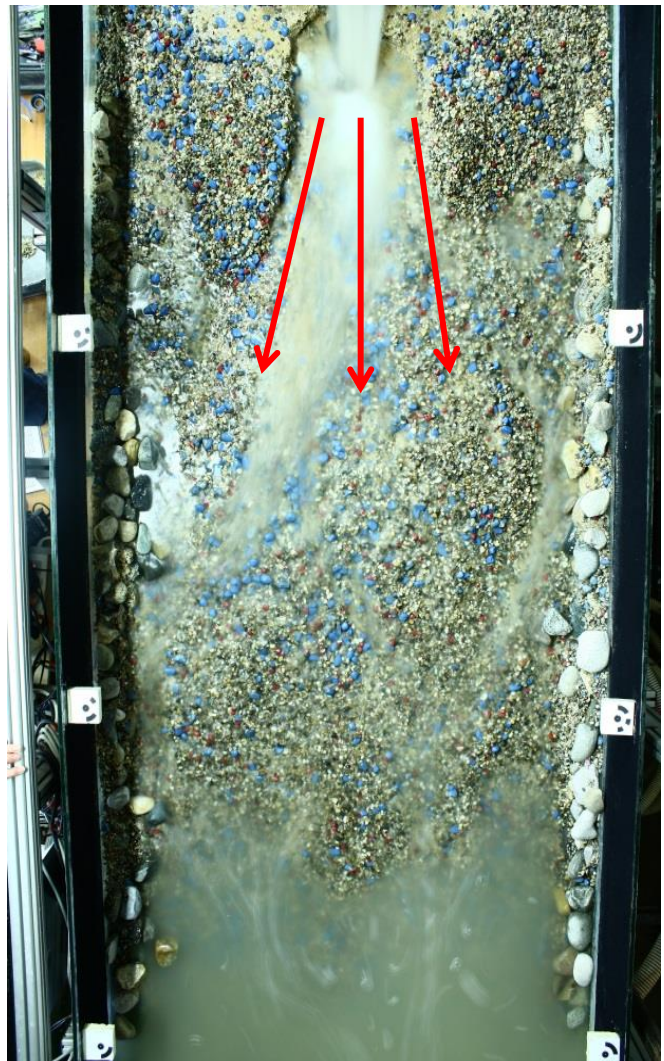
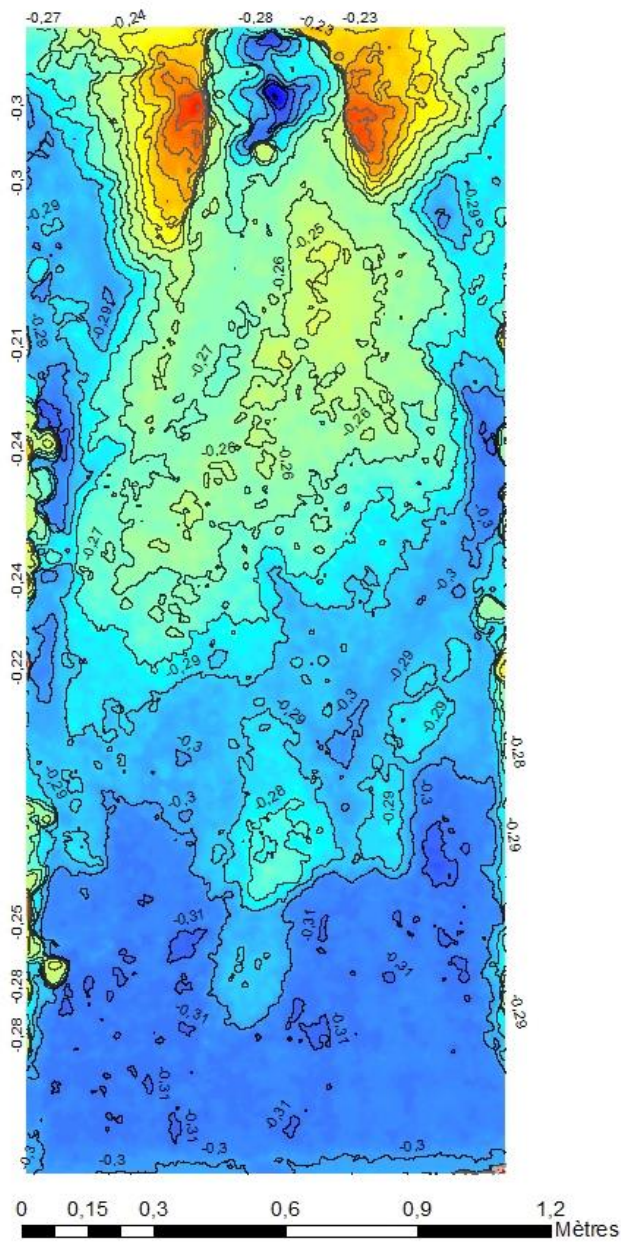
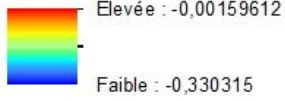
Faible : -0,316856



**Annexe 3 : MNT du canal après la première érosion du dépôt amont pour une concentration en débit solide de 3%.**

mnt

Valeur

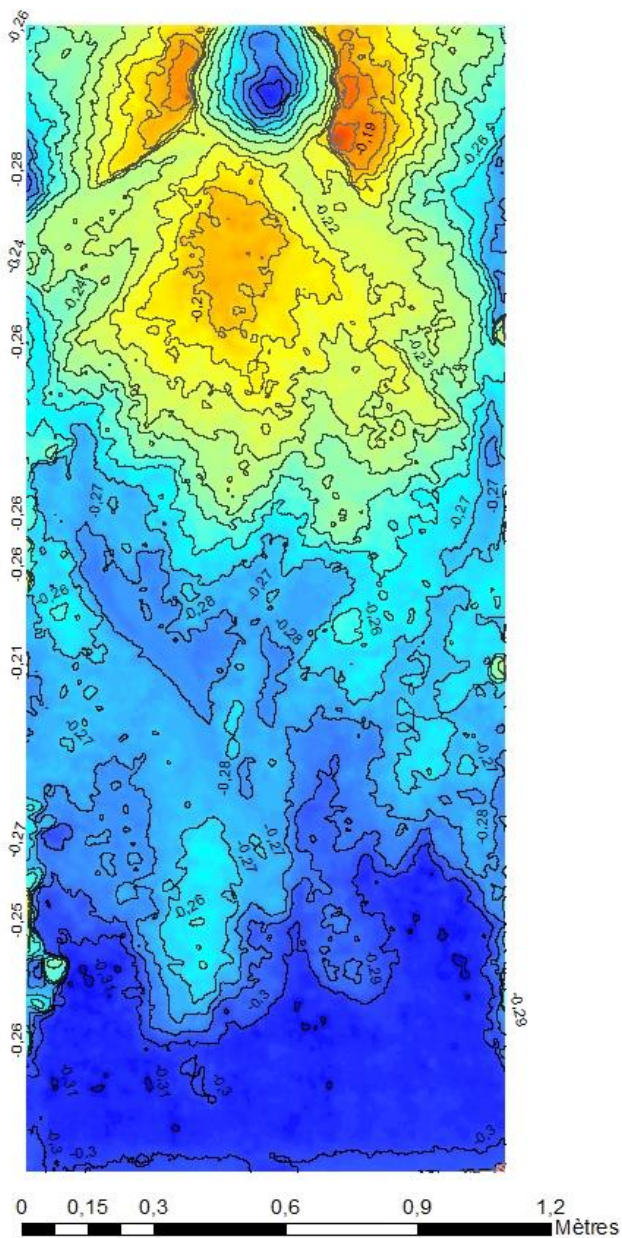
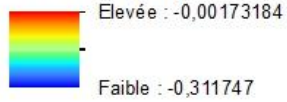




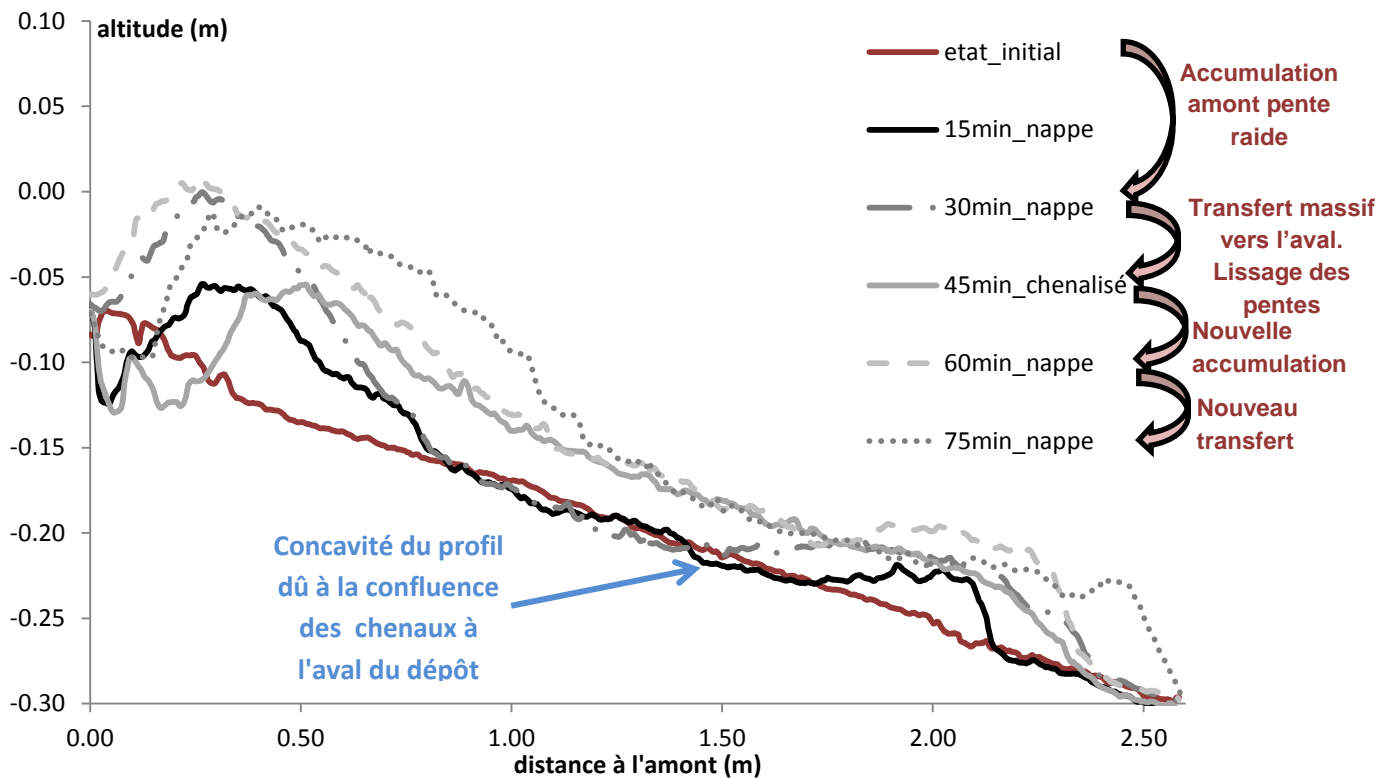
**Annexe 5 : MNT du canal après la seconde érosion du dépôt amont pour une concentration en débit solide de 3%.**

mnt

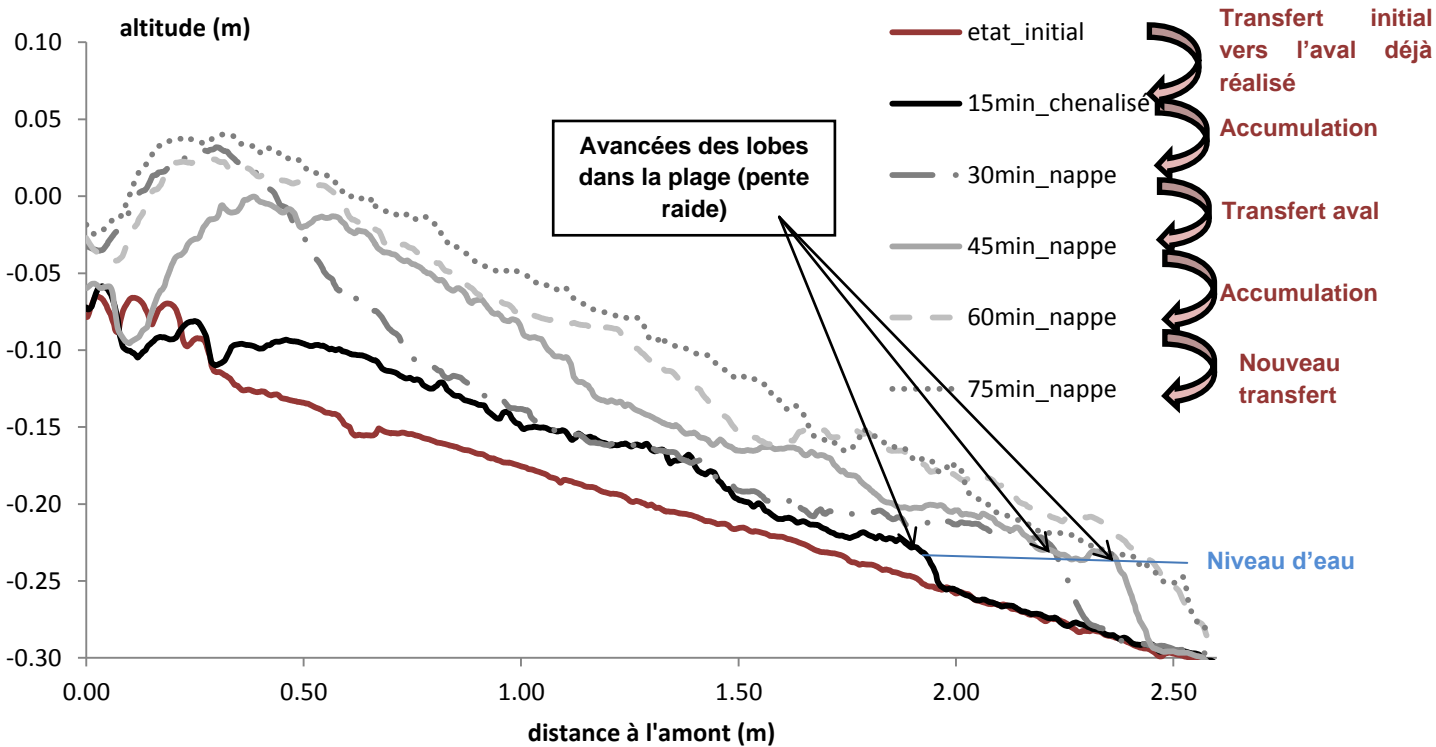
altitude (m)



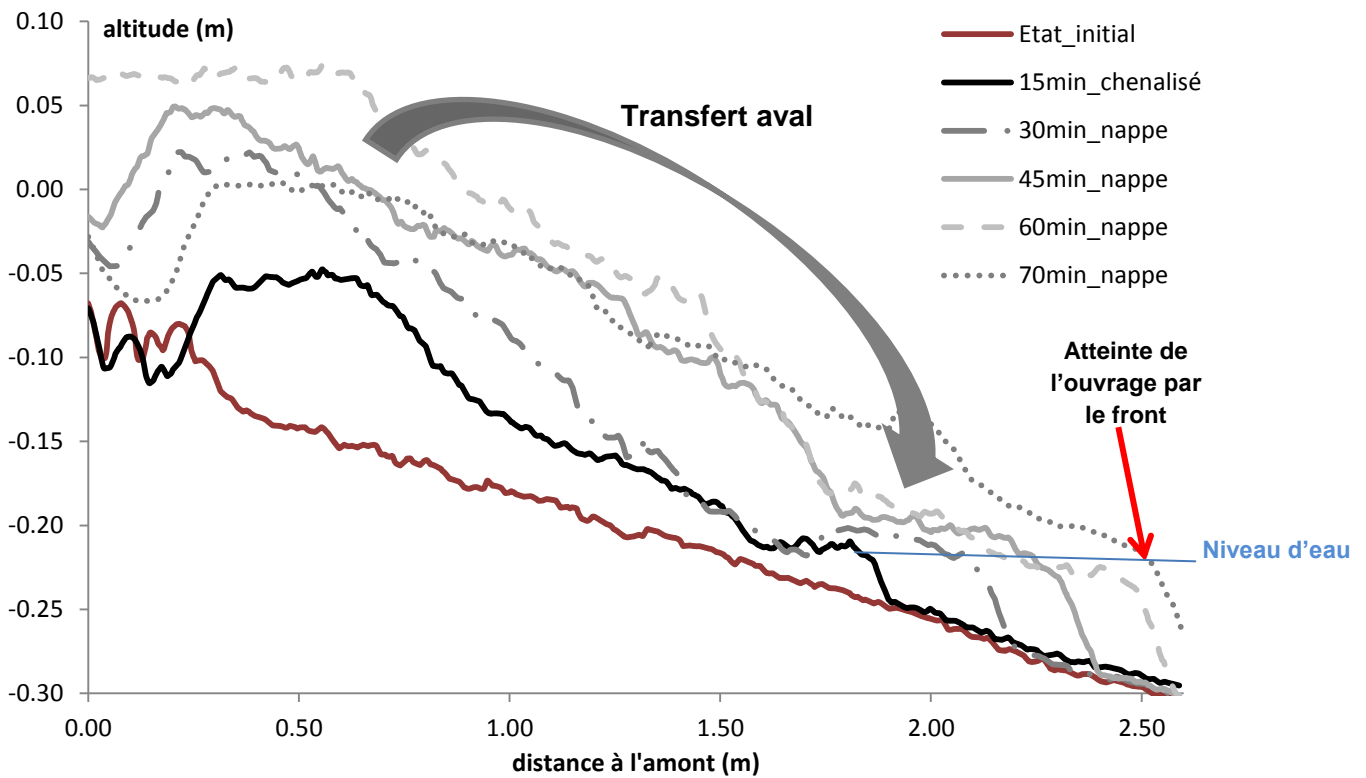
**Annexe 6** : Profils en long de la simulation à 1% de concentration en débit solide.



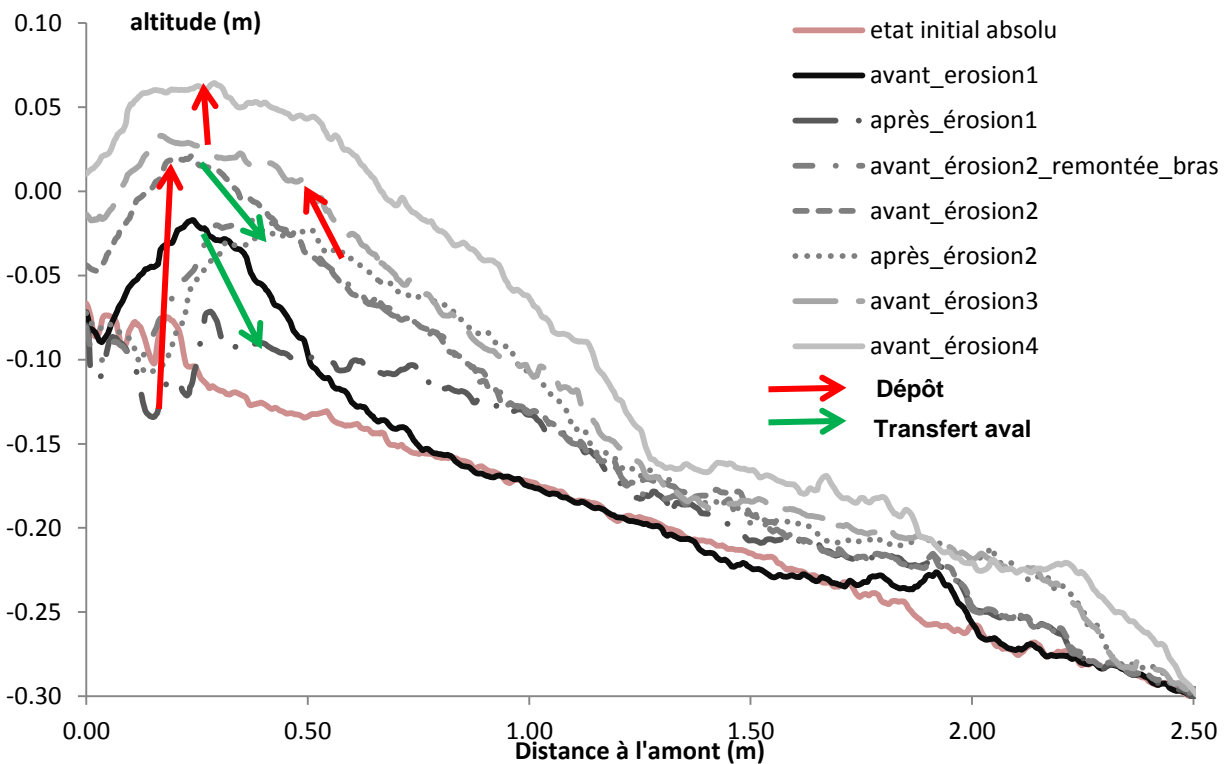
**Annexe 7** : Profils en long de la simulation à 2% de concentration en débit solide.



**Annexe 8 :** Profils en long extraits des MNT de la simulation à 3% de concentration en débit solide.



**Annexe 9 :** Profils en long extraits des MNT de la simulation à 3.5% de concentration en débit solide





## Résumé

Ce rapport vise à comprendre l'évolution morphologique des dépôts au sein d'ouvrages de correction torrentielle tels que les plages de dépôts. Ces ouvrages ont pour objectif de contrôler les apports sédimentaires, souvent massifs, des torrents afin de protéger les zones à enjeux situées directement à l'aval. Pour ce faire, un modèle physique a été réalisé en respectant les similitudes de Froude (Froude Scale Model). De cette manière, les observations réalisées peuvent être transposées à la nature par un facteur d'échelle. L'acquisition des données topographiques a été effectuée par photogrammétrie. Deux appareils fixés sur un rail au-dessus du canal hydraulique prennent des photos simultanées et le traitement de ces images est réalisé avec Agisoft Photoscan. Ce logiciel permet d'obtenir un modèle 3D du canal et d'en extraire un MNT (Modèle Numérique de Terrain). De cette manière, la morphologie des dépôts a pu être observée avec une précision satisfaisante (millimétrique). Au cours des simulations réalisées en régime uniforme avec différentes concentrations en débit solide, des cycles de dépôt suivis de nappes de charriage ont été observés. Un cycle se compose d'une accumulation à l'amont du canal, qui, lorsque sa pente est trop importante, est entraînée vers l'aval sous la forme d'une érosion massive. La fréquence de ces cycles est d'autant plus importante que la concentration en débit solide est forte. Cet équilibre dynamique ressemble à la dynamique des deltas et des cônes alluviaux. Ce rapport fournit donc une analyse qualitative des dépôts dans les zones d'apports massifs de sédiment.

## Abstract

This report aims to understand the morphological evolution of deposits in torrent control structures such as sediment trap using slit open check dam. These structures aim to control massive sediment supply of torrents to protect areas located directly downstream. To do this, a physical model was made respecting the similarities of Froude (Froude Scale Model). In this way, observations can be transposed at a natural scale by a scale factor. The topographic data acquisition was performed by photogrammetry. Two cameras mounted on a rail above the water channel taking simultaneous photos and processing of these images is done with Agisoft PhotoScan. This software provides a 3D channel model and to extract a DEM (Digital Elevation Model). In this manner, the morphology of deposits could be observed with satisfactory accuracy (millimetric). In simulations carried out in steady flow, with different solid concentrations, deposition cycles releasing bedload sheets were observed. A cycle consists of an accumulation upstream of the channel, which, when the slope is too steep, is driven downstream through massive erosion. The frequency of these cycles is even more important when the concentration of the solid flow is strong. This dynamic equilibrium is similar to the dynamics of deltas and alluvial fans. This report therefore provided a qualitative analysis of deposits in areas of massive sediment inflows.