



HAL
open science

**Projet Interreg Alcotra RESBA. Action 4.2.2 livrable 2.
Etude expérimentale de l'influence des débâcles brutales
sur le transport solide et la morphologie fluviale en
contexte de forte pente**

Alex Andréault, D. Laigle, Hippolyte Girard

► **To cite this version:**

Alex Andréault, D. Laigle, Hippolyte Girard. Projet Interreg Alcotra RESBA. Action 4.2.2 livrable 2. Etude expérimentale de l'influence des débâcles brutales sur le transport solide et la morphologie fluviale en contexte de forte pente. [Rapport de recherche] INRAE ETNA. 2020. hal-03130341

HAL Id: hal-03130341

<https://hal.science/hal-03130341>

Submitted on 3 Feb 2021

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.



Interreg
ALCOTRA



UNION EUROPÉENNE
UNIONE EUROPEA



UNIONE EUROPEA
UNION EUROPÉENNE



RESBA

WP 4.2.2 - Méthode pour la modélisation des sédiments déclenchés par la rupture d'un barrage en terre

Etude expérimentale de l'influence des débâcles brutales sur le transport solide et la morphologie fluviale en contexte de forte pente



Octobre 2020

Table des matières

Introduction	1
Etat de l'art	2
1. Connaissances actuelles sur les débâcles brutales.....	2
2. Comportement de la vague.....	2
3. Comportement morphodynamique en canal sous l'effet de débâcle brutale.....	3
4. Objectif scientifique	4
Matériels et méthodes	4
1. Construction du canal.....	5
2. Loi de similitude.....	6
3. Préparation du Canal / Cuve	7
4. Caractérisation de la propagation des vagues par capteurs ultrasonores.....	9
4.1. Installation des capteurs	9
4.2. Traitements des données US	10
5. Caractérisation de la dynamique sédimentaire par photogrammétrie	10
5.1. Historique	10
5.2. Acquisition Photo	11
5.3. Traitement des données photos.....	12
5.4. Nettoyages des nuages de points et calcul des volumes.....	13
5.5. Estimation des erreurs inhérentes à la photogrammétrie	13
6. Bilan sédimentaire par prélèvement direct.....	13
Résultats et discussion	14
1. Hydraulique.....	14
1.1. Epaisseur de l'écoulement	14
1.2. Vitesses d'écoulement	16
1.3. Débit instantané maximal.....	18
1.4. Nombre de Froude de propagation	19
2. Transport solide.....	21
2.1. Bilans sédimentaires selon collecte des sédiments	21
2.2. Bilans sédimentaires photogrammétriques.....	23
3. Morphodynamisme en conditions de forte pente	24
3.1. Phases morphodynamiquement actives.....	24
3.2. Représentativité des résultats en contexte naturel	26
Propositions d'amélioration du canal et du protocole	27
1. Photogrammétrie	27

2. Le canal	27
Conclusion.....	28
Bibliographie.....	30
Annexes.....	31

Contributeurs :

Alex ANDREAUULT, élève ingénieur de 5^{ème} année Polytech' Tours, Université de Tours, sous la supervision de Dominique LAIGLE, INRAE, 2020.

Dominique LAIGLE, Univ.-Grenoble-Alpes, INRAE, ETNA, F-38402 Saint-Martin-d'Hères.

Hippolyte GIRARD, étudiant en Licence professionnelle, Université Grenoble-Alpes, sous la supervision de Dominique LAIGLE, INRAE, 2019.

Société ERCT Industrie, pour la conception et la réalisation du canal expérimental, 2019.

Introduction

Les hydrosystèmes de montagne présentent des particularités physiques et dynamiques qui les rendent particulièrement complexes à étudier. A l'inverse des hydrosystèmes de plaine, leur fonctionnement du point de vue du transport sédimentaire est largement influencé par des apports soudains et importants de matériaux au chenal (Liébault et al., 2013). Généralement, ces apports sédimentaires sont contrôlés par divers facteurs parmi lesquels la géologie, le climat et la pente des versants jouent un rôle prépondérant. D'autre part, la variabilité des transferts sédimentaires rend la morphodynamique des hydrosystèmes montagnards très instable. Les processus de transfert sédimentaire des versants vers le chenal sont principalement de type gravitaire et induits par ruissellement ou par des phénomènes d'effondrement ou de glissement de terrain. Les volumes de sédiment alors transférés dans le chenal peuvent varier significativement. Une fois dans le chenal, les processus de transfert sédimentaire depuis l'amont vers l'aval du cours d'eau nécessitent des événements hydrologiques relativement intense, les phénomènes de transfert sont alors soit du type charriage soit du type lave torrentielle. Cette dernière est un mode de transport solide particulier puisqu'il s'agit d'un écoulement très fortement concentré en matériaux dont la composition granulométrique s'étend des particules fines à des blocs de plusieurs tonnes et dont le comportement s'écarte des fluides newtoniens classiques (Chambon et Laigle, 2013).

Cela étant, l'objectif du présent rapport se focalisera sur les phénomènes de charriage. Le charriage représente le transport solide survenant sur le fond du chenal. On distingue 2 types de charriages : le transport par saltation qui correspond à des particules qui vont être brièvement en suspension dans la lame d'eau puis se redéposer sur le fond ; et le transport par charriage qui correspond au déplacement par roulement des particules du fond sur une couche d'épaisseur équivalente à quelques grains. Ces deux derniers types de transport sont les centres d'intérêt de ce travail. Une des voies morphodynamiques pour les cours d'eau montagnards consiste en des débâcles brutales, processus rares et nécessitant des conditions particulières, mais très impactantes. On définit par débâcle brutale un événement exceptionnel tel qu'une rupture de barrage naturel ou anthropique et le lâché d'un volume d'eau conséquent. Ces écoulements sont alors caractérisés par une puissance spécifique importante et un régime extrêmement transitoire. De tels événements peuvent avoir un impact humain et matériel extrêmement important (Vuichard et Zimmermann, 1987). Les conditions de formation des débâcles peuvent être multiples. Dans le cas de barrages anthropiques, la rupture est souvent la conséquence d'un problème de construction ou d'un événement (crue) exceptionnel. Par exemple la vidange du lac Ha ! Ha ! (Québec) (Brooks et Lawrence, 1999) est la conséquence des deux derniers facteurs combinés. Dans le cas, des barrages naturels, les débâcles peuvent être la résultante d'un effondrement de versant en travers d'un cours d'eau puis d'une surverse, ou d'une vidange de lac glaciaire (supra, intra, péri, pro), par exemple la vidange d'une poche d'eau intraglacière du glacier de Tête Rousse (1892, Haute-Savoie)(pluiesextremes.meteo.fr).

Ces écoulements extrêmement transitoires et puissants ont un pouvoir morphogène significatif. Cependant, leurs actions sur les cours d'eau pentus de montagne restent assez méconnues. D'une part, car les mesures in-situ sont difficilement applicables à ce genre de phénomènes rares pour des raisons évidentes de sécurité et d'autre part, parce que la robustesse des installations devrait être particulièrement importante. La recherche dans ce domaine a donc focalisé son attention sur les modélisations numériques, physiques et souvent les deux combinées afin d'essayer de représenter au mieux le comportement et d'évaluer les possibles conséquences sur les implantations humaines. Dans le cadre du projet Interreg RESBA dans lequel s'inscrit ce rapport, l'étude porte principalement sur l'installation et l'utilisation d'un modèle physique. Les résultats des expérimentations seront confrontés plus tard à ceux obtenus dans un deuxième temps par modélisation numérique. Le présent rapport détaillera dans un premier temps un travail de recherche bibliographique sur le sujet. Puis, dans un second temps, les méthodologies employées pour mettre en place le canal, et les

expérimentations seront décrites. Enfin, dans un troisième et dernier temps, les résultats obtenus seront discutés.

Etat de l'art

1. Connaissances actuelles sur les débâcles brutales

Les études menées sur la thématique des débâcles brutales sont généralement divisées en 2 catégories. En effet, on trouve des articles qui se concentrent sur les aspects hydrauliques de la vague de débâcle (Lauber *et al.*, 1998 ; Janosi *et al.*, 2004 ; Capart *et al.*, 2011, Hung-chu *et al.*, 2014) et d'autres sur le domaine du transport solide (Pritchard *et al.*, 2002 ; Rushmer, 2007 ; Soares-Frazão *et al.*, 2007 ; Zech *et al.*, 2008 ; Spinewine *et al.*, 2013). La grande majorité des références axent leurs recherches sur la modélisation numérique de ces écoulements particuliers et utilisent la modélisation physique comme support aux résultats numériques. Les références présentées dans le tableau 1 montrent la variété des canaux qui ont été utilisés. Les longueurs varient d'une vingtaine de mètres à moins de 3 m et les largeurs de 5 m à 0,10 m. Les sédiments sont également variés tant sur leur nature que sur leur granulométrie. Les conditions abordées sont dans la plupart des cas avec des pentes nulles ou très faible (1,75%). Enfin, ces références présentent le point commun de représenter une rupture instantanée par une ouverture de vanne qui libère un volume d'eau (parfois de sédiments) contenu dans une cuve.

Tableau 1: Recensement des expérimentations menées en canal expérimental (Source: Carrivick *et al.*, 2011)

Experimental channel geometry (length, width, height, all in metres)	Channel planform and gradient	Channel substrate	Other notes	Reference
18.5 × 5.0 × 1.6	Horizontal, straight	Non-uniform coal ash	40 cm water depth in reservoir, 0.12 m water depth in channel. D50 of sediment = 0.135 mm	Xia <i>et al.</i> (2010)
9.0 × 0.8 × 0.45	1°; straight	Poorly sorted, rounded, fine to medium pebbles	Sediment also input to recirculating system	Rushmer (2007)
3.0 × 0.25 × 0.7	Horizontal, straight	Saturated mobile granules	Sand (>2.4 mm) and Polyvinyl Chloride (PVC) pellets (= 3.9 mm),	Spinewine and Zech (2007)
2.92 × 0.495 × 0.15	Horizontal, straight	Saturated mobile coarse sand	Initial bed layer thickness = 0.08 m. Erodable banks included as well as bed	Soares Frazão <i>et al.</i> (2007)
19.2 × 0.5 × 0.7	Horizontal, straight	Fixed bed, sand bed, and pumice bed	Sand diameter = 0.8 mm	As reported in Leal <i>et al.</i> (2009)
2.5 × 0.1 × 0.35	Horizontal; straight	Coarse cohesionless sediments saturated with water	Pumice diameter = 1.2 mm Initial channel sediment infill = 0.07 m. Initial water depth in channel = 0.21 m Initial water depth upstream = 0.40 m 'Sediment' was cylindrical 3.2 mm diameter PVC pellets, initially 5–6 cm thick	Fracarollo and Capart (2002)
12.0 × 0.2 × 0.7	Horizontal; straight	Mobile 'wet' granules on top of a mesh	Granules; uniform 6.1 mm diameter, initially 0.06 m thick	Capart and Young (1998)
10.0 × 0.3 × 0.3	Horizontal, straight	Plastic, acrylic and sand granules 0.13–3 mm	Recirculating water and sediment	Sumer <i>et al.</i> (1996)
12.7 × 1.4 × ?	0.002; Straight	Initially dry with Manning's 'n' of 0.012	Flume has a curved constriction 0.6 m wide	Bellos <i>et al.</i> (1992)
2.4 × 0.12 × 0.12	0.0025; Straight	Mobile sand-clay and gravel	Initial channel sediment thickness was 0.03 m. The sand clay bed layer was cut to form a rectangular sinuous channel	Chen and Simons (1979)

2. Comportement de la vague

Un point important dans le transport solide concerne le comportement de la phase liquide. Plusieurs études ont été menées en combinant la modélisation physique et numérique. Plusieurs études ont montré des résultats similaires, avec une vague qui présente 3 (Carrivick *et al.* 2011) ou 4 (Spinewine *et al.*, 2007) phases selon les sources, 1) d'effondrement, 2) Inertielle et 3) visqueuse ou

d'équilibre de transport, et 4) phase visqueuse. La première phase correspond à l'effondrement de la colonne d'eau du fait du retrait de la vanne et des forces de gravité. La phase inertielle est caractérisée par l'entraînement massif des sédiments du lit au droit du front de la vague. Les particules entraînées ont la même vitesse de déplacement que l'écoulement et leur concentration dans le fluide augmente vers le front de la vague jusqu'à obtenir un mélange relativement homogène entre liquide et solide. Spinewine et Zech (2007) observent la formation de formes sédimentaires assimilables à des antidunes au cours de cette phase. La phase d'équilibre du transport des sédiments telle que proposée par Spinewine et Zech (2007) correspond à une phase où le transport solide est à l'équilibre avec l'écoulement. Enfin, la phase visqueuse correspond à la phase où l'écoulement est dirigé par les forces de trainée et de frictions engendrées par les sédiments du lit. L'ensemble de ces différents régimes d'écoulement rend complexe la modélisation numérique combinée de l'écoulement liquide et solide. C'est principalement pour cette raison que la modélisation numérique ne prend que rarement en compte les deux phases de l'écoulement (Carrivick et al., 2011)

Il est à noter que le comportement de la phase liquide est extrêmement dépendant du substrat sur lequel elle s'écoule et ce autant en contexte naturel (Capart et al., 2007) qu'en contexte contrôlé (Zech et Soares-Frazão, 2007 ; Carrivick et al., 2011).

Il est également admis, dans certains articles, que le ratio d'aspect du canal est important pour éviter une influence des parois du canal sur les écoulements (Carrivick et al., 2011).

3. Comportement morphodynamique en canal sous l'effet de débâcle brutale

Le transport sédimentaire dans le cas de débâcles brutales peut être divisé en 2 types selon la forme de la vague. Un premier type concerne le transport solide au front de la vague où, du fait de la forte turbulence locale, les sédiments sont facilement mis en suspension et transportés à la même vitesse que le fluide. L'écoulement est alors un mélange homogène entre sédiments et eau dont la concentration granulaire peut varier en fonction des volumes de débâcle (Girard, 2019). Une stratification de la concentration granulaire au sein du flux s'établit et entraîne des modifications hydrauliques de l'écoulement (Hung-Chu et al. 2014). D'autre part, un transport solide se met en place après le front extrêmement turbulent de la vague, mais celui-ci correspond à du charriage, c'est-à-dire à un mouvement d'une couche de sédiments, d'épaisseur équivalente à quelques grains, par roulement sur le fond du lit. Une étude similaire au présent travail a été menée précédemment et a montré qu'il semblait que les zones érodées par la vague étaient recouvertes par les sédiments charriés par la suite de l'écoulement, les résultats topographiques ne montraient alors pas ou peu d'érosion (Girard, 2019). Dans le cas où la pente était considérée et pour des volumes importants, les écoulements engendraient une érosion généralisée du substrat puisque des sédiments étaient collectés en bout de canal (Girard, 2019).

Les phénomènes d'érosion et de dépôt semblent être spatialisés. En effet, dans plusieurs cas, autant expérimentaux (Spinewine et Zech, 2007 ; Hung-Chu et al. 2014 ; Girard, 2019) que naturels (Brooks et Lawrence, 1999 ; Alcrudo et Mulet, 2007), une fosse d'érosion se forme à l'aval direct de la rupture, puis des phénomènes de dépôt apparaissent plus en aval. En conditions expérimentales les processus dépendent principalement de l'évolution de la hauteur d'eau puisqu'il n'y a pas de variation de la pente du lit ni de sa largeur. En outre Hung-Chu et al. (2014) explique cette érosion localisée par les conditions hydrauliques au moment de la rupture du barrage. En effet, lors du retrait de la vanne les vitesses d'écoulement sont quasi-verticales et importantes. Puis, lorsque le flux arrive au contact du lit les vitesses deviennent horizontales et fortes engendrant alors une contrainte de Shields très élevée. La forme de la fosse semble être contrôlée par la gamme granulométrique (Xia et al., 2010). Dans le cas de sédiments uniformes, l'affouillement à l'aval de la rupture de barrage a une forme elliptique et dans le cas d'une gamme granulométrique plus étendue la fosse est circulaire, induisant une érosion latérale plus marquée. De même, Xia et al. (2010) avancent que si la gamme granulométrique est variée, les processus érosifs s'étendent plus horizontalement que verticalement et inversement si la granulométrie est relativement uniforme.

La morphologie du lit du canal est également contrôlée par la forme de l'hydrogramme. En effet, un cas de débâcle consiste en la rupture d'un verrou glaciaire et en la vidange de poche ou lacs glaciaire. Ce genre de rupture relâche des volumes extrêmement importants et sur des terrains pentus. Rushmer (2007) a étudié l'importance de la forme de l'hydrogramme de crue de ces débâcles car en fonction des caractéristiques de rupture, ces hydrogrammes peuvent présenter soit une montée progressive des débits et une chute brutale ou l'inverse. Les conclusions de ce travail ont montré que la couche de transport effective lors de la débâcle variait selon l'onde de crue et que la présence et l'organisation spatiale des formes sédimentaires en étaient également dépendantes. Enfin, le temps semble être un facteur essentiel à la morphodynamique sous effet de débâcles brutales (Rushmer, 2007).

En contexte naturel ces processus sont dépendants de plusieurs facteurs, tels que la pente, les variations de largeur du chenal, la végétation en place, et la géologie de surface au droit de l'hydrosystème et de son lit majeur (Capart et al., 2007).

Enfin, la présence d'un barrage est souvent accompagnée du dépôt de sédiments, plus fins que ceux du lit naturel de la rivière, à l'amont du barrage. Les volumes de sédiments stockés peuvent être conséquents et dans certains cas l'ouvrage peut être considéré comme transparent, c'est-à-dire que le barrage est rempli de sédiments. La destruction de ces édifices libère des quantités de sédiments phénoménales. Il est donc tout à fait possible que l'hydrosystème aval réagisse différemment en fonction de la quantité de sédiment stocké. Spinewine et Zech (2007) ont testé plusieurs configurations de canal. Ils ont fait varier les hauteurs de sédiment à l'amont et à l'aval de la trappe afin d'observer les conséquences sur la vague. Il s'avère que la vague est effectivement dépendante aux hauteurs de sédiments présentes initialement. Le cas du réservoir rempli présente un intérêt particulier de par le comportement du transport solide proche d'un écoulement du type lave torrentielle. De plus, Spinewine et Capart (2013) montrent que l'écoulement au front de vague est fortement concentré en sédiment. Ces éléments aux regards des discussions sur le sujet, montrent que la différenciation entre charriage et lave torrentielle n'est pas net. Il est possible que la différenciation entre les deux types de transport solide présente une phase intermédiaire.

4. Objectif scientifique

Les objectifs du projet Interreg RESBA dans lequel s'inscrit le présent rapport sont de caractériser et de comprendre les risques engendrés par la présence des barrages dans la région alpine franco-italienne. Au regard de la synthèse bibliographique qui précède, il est évident que les études qui ont été menées à ce jour, ne rendent compte que très imparfaitement de la situation rencontrée en montagne. En effet, la pente y est un facteur important dans le transport sédimentaire qui a très rarement été pris en compte dans les expérimentations. C'est donc cette lacune que ce travail cherche à combler. Pour cela, un modèle couplé (numérique et physique) est mis en place afin de comprendre le fonctionnement général d'un hydrosystème de montagne sous l'effet des débâcles brutales en contexte pentu. Ce travail se concentre sur la partie réalisation et exploitation d'un modèle physique. Les résultats de ce modèle physique seront ultérieurement confrontés au modèle numérique afin de valider ou d'infléchir les hypothèses de ce dernier.

Matériels et méthodes

Pour mener à bien notre étude, un canal conçu pour la thématique a été construit. Plusieurs techniques ont été mises en place pour pouvoir caractériser à la fois les aspects hydrauliques du phénomène de propagation mais également de dynamique sédimentaire. L'hydraulique est caractérisée par des sondes ultrasonores disposées sur toute la longueur du canal. Le transport solide ainsi que la morphologie fluviale sont déterminés grâce à une méthodologie directe s'appuyant sur la collecte de sédiments, et une méthodologie indirecte : la photogrammétrie.

1. Construction du canal

La construction du canal a nécessité plusieurs étapes avant sa mise en fonctionnement.

La première étape consistait en la construction de la structure principale. Pour cela une structure métallique a été réalisée par une entreprise extérieure. Elle comprend une partie support du canal et une partie réservoir. Le réservoir amont a une capacité maximale de 300 L mobilisables. Il comprend à l'intérieur un système de vanne s'ouvrant par le haut grâce à un vérin pneumatique. La structure métallique est reliée à un treuil ce qui permet de faire varier la pente du canal de 0 à 46 %.

La deuxième partie de la réalisation du canal expérimental concernait la mise en place de la partie canal. La partie canal hydraulique proprement dite présente un ensemble d'équerres permettant l'attache de panneaux de verre latéraux. Des panneaux en bois aggloméré ont été fixés sur la structure métallique. Ils ont été ensuite imperméabilisés en siliconant les espaces entre les panneaux puis en déposant un film plastique imperméable sur ces panneaux. Une fois le fond du canal totalement protégé, les vitres de verres (4X2m et 2X1m) ont été fixées aux accroches métalliques à l'aide de colle silicone. Les vitres sont attachées aux équerres latérales (figure 1). Enfin, la cuve est imperméabilisée en siliconant les interstices.

Une fois la cuve opérationnelle, des caillebotis sont positionnés au fond du canal pour représenter un substratum non mobilisable par l'écoulement. Il est rempli de sable de filtration de piscine dont la granulométrie varie entre 0,5 et 2 mm (absence de particules fines cohésives). Ce sable est versé dans le canal jusqu'à la hauteur de sédiment désirée (8 cm pour ce travail). Le sédiment est ensuite tassé et humecté pour retirer le plus d'air possible car sa présence au sein des pores peut engendrer lors de l'écoulement des surpressions et conduire à des transports de sédiments qui peuvent être incohérents (Spinewine et Zech, 2007).



Figure 2: Photographie du canal expérimental (droite d l'image : amont du canal, gauche : aval)

2. Loi de similitude

Le principe du modèle physique est défini par Hugues et Liu (1993) comme étant « *la reproduction d'un système physique (généralement à taille réduite) conçu de telle sorte que les forces prépondérantes qui agissent sur le système sont représentées sur le modèle en proportions convenables par rapport au système physique lui-même* ». La validité d'un modèle repose sur le respect de 3 similitudes : géométriques (distance), cinématique (vitesses) et dynamique (énergie) (Koulinski, 1993). La première étape avant d'établir les relations de similitude consiste à déterminer tous les nombres adimensionnels impliqués dans les expérimentations et de sélectionner les plus pertinents. Dans le cadre de ce projet, on recense des nombres adimensionnels en rapport avec l'hydraulique et le transport solide. En hydraulique il y a Darcy-Weisbach, le nombre de Froude, la submersion relative, le nombre de Reynolds et la loi de frottement d'après Rickenmann et Recking (2011). En transport solide on retrouve le nombre de Shields, le Reynolds particulaire et le débit solide adimensionnel. L'objectif suivant est de déterminer quel nombre adimensionnel permettra une cohérence globale entre les autres nombres. Ainsi, après l'analyse dimensionnelle de chacun des nombres, la cohérence est établie entre les nombres de Darcy-Weisbach, la loi de frottement de Rickenmann et Recking, Froude, la submersion relative, Shields et le débit solide adimensionnel selon le nombre de Froude et si l'analyse dimensionnelle de la submersion relative est égale à 1 (tableau 2). Seul le nombre de Reynolds et le Reynolds particulaire ne peuvent être respectés dans un raisonnement sur une similitude de Froude. Cela ne pose pas de problème si le Reynolds est tout le temps supérieur à 1000, permettant alors de négliger les effets de viscosité et donc que l'écoulement est franchement turbulent, ce qui est le cas de nos expériences.

Tableau 3: Nombres adimensionnels impliqués dans le canal expérimental et analyses dimensionnelles

Nombre adimensionnel	Equation	Analyse dimensionnelle
Darcy-Weisbach	$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{U}{\sqrt{ghs}} = \frac{u}{u^*} = Kh^{\frac{1}{6}}\sqrt{g}$	$\frac{[U]}{[h]^{0.5}}$
Rickenmann et Recking (2011)	$U^{**} = \frac{U}{\sqrt{gsD}}$	$\frac{[U]}{[D]^{0.5}} * \frac{[h]}{[D]}$
Froude	$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$	$\frac{[U]}{[h]^{0.5}}$
Submersion relative	$\frac{h}{D}$	$\frac{[h]}{[D]}$
Reynold	$Re = \frac{Uh}{\nu}$	$[U] * [h]$
Shields	$\tau^* = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gD_x} = \frac{\rho g h s}{(\rho_s - \rho)gD_x} = \frac{hs}{\Delta s D_x}$	$\frac{[h]}{[D]}$
Reynold particulaire	$Re^* = \frac{u^* D_x}{\nu} = \frac{\sqrt{ghs} D_x}{\nu}$	$[h]^{0.5} * [D]$
Débit solide adimensionnel	$\Phi = \frac{Q_s/W}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) g D_x^3}}$	$\frac{[U]}{[D]^{0.5}} * \frac{[h]}{[D]}$

Enfin, grâce à ces analyses dimensionnelles il est possible de déterminer les critères de similitude. Selon les grandeurs à investiguer, les facteurs multiplicatifs entre modèle et nature ne sont pas similaires (tableau 3) où λ est l'échelle sur les longueurs.

Tableau 4: Facteurs d'échelle des différentes grandeurs d'intérêt pour le modèle

[h]	[D]	[V]	[U]	[t]	[Q]
λ	λ	λ^3	$\lambda^{0,5}$	$\lambda^{0,5}$	$\lambda^{2,5}$

Avec h, une hauteur en m, D le diamètre des particules solide en m, V le volume en m^3 , U la vitesse $m.s^{-1}$, t le temps en s et Q le débit en $m^3.s^{-1}$.

Ainsi, dans le cadre d'une débâcle de volume 100 L en conditions de pente de 6,65 % et d'une échelle au 1/50, les valeurs prototypes sont indiquées dans le tableau 4

Tableau 5: Correspondances entre valeurs obtenues par le modèle et valeurs réelles

Grandeurs physiques	Valeurs modèle	Valeurs prototype
Hauteur d'écoulement (m)	0,055	2,75
Diamètre particule (m)	0,0005 – 0,002	0,025 – 0,1
Volume (m^3)	0,100	12500
Vitesse d'écoulement ($m.s^{-1}$)	1,23	8,70
Temps (s)	69,8	494
Débit ($m^3.s^{-1}$)	0,0678	1198
Largeur canal (m)	0,40	20
Longueur canal (m)	5	250
Épaisseur sédiments (m)	0,08	4

Remarque : Le canal n'ayant pas pour vocation de représenter un cours d'eau en particulier, l'établissement rigoureux de lois de similitude n'est pas obligatoire. Cependant, elle reste importante pour pouvoir établir des liens avec des cas d'études dans le futur et pour vérifier la pertinence du modèle.

3. Préparation du Canal / Cuve

Afin de savoir quel est le volume de la cuve qui sera effectif pour le transport solide, il a été effectué une évaluation du volume utile du réservoir. En effet, il apparait que la cuve présente un volume d'eau non mobilisable notamment au fond car l'ouverture ne commence qu'à partir de 0,13 m au-dessus du fond de la cuve. D'autre part, il existe entre la trappe et la sortie réelle de la cuve un espace qui ségrégue une partie du volume qui ne sera donc pas efficace pour le transport sédimentaire. Enfin, la vanne à l'intérieur de la cuve occupe également un volume qui varie lui aussi selon la pente. Considérant ces variables et la volonté de connaître le volume efficace au litre près, il a été nécessaire d'établir un outil permettant de déterminer la hauteur d'eau nécessaire dans la cuve pour un volume utile voulu. Cet outil a été développé sur la base de calculs géométriques en prenant en compte le fait que la forme des solides que représente l'eau change selon la hauteur d'eau et la pente. Ainsi, généralement, pour des hauteurs d'eau et des pentes faibles l'eau prend la forme d'un solide à 6 faces et pour des hauteurs d'eau faible et des fortes pentes, l'eau prend la forme d'un solide à 5 faces (figure 2).

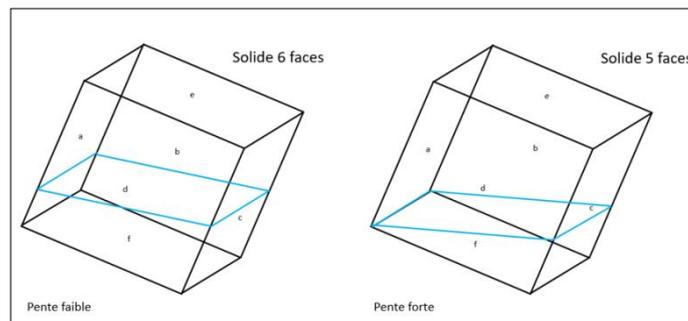


Figure 3: Schéma de la forme prise par l'eau en fonction de la pente

Les formes des solides variant selon les conditions de remplissage et de pente, il est nécessaire d'établir des courbes représentant le passage d'un solide à l'autre en fonction des conditions évoquées ci-dessus. Pour identifier le passage d'une forme à l'autre, la pente critique est extraite et représentée en fonction de la hauteur d'eau (Annexe 1). Cette pente critique est déterminée selon l'évolution de la longueur du segment de la petite base du trapèze considéré. En effet, lorsque pour une hauteur d'eau donnée la pente devient trop importante, géométriquement parlant, la longueur devient négative, cette information permet de déterminer ce changement de phase (figure 3). Il est à noter que dans le cas des expérimentations présentées dans ce rapport, le solide considéré était, dans tous les cas de pente et de hauteur d'eau, un solide à 6 faces.

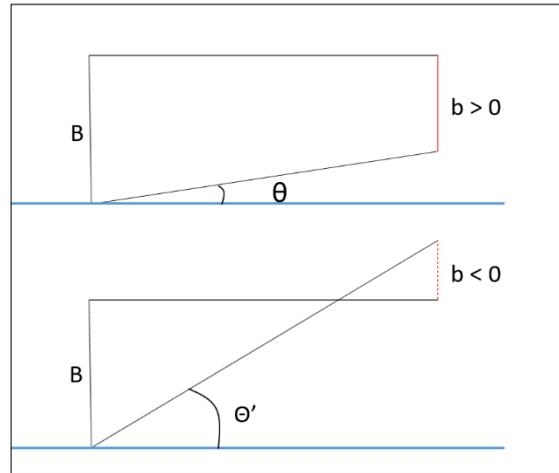


Figure 4: Schéma de l'évolution de la longueur de la petite base d'un trapèze en fonction de la pente (B : grande base ; b : petite base, Θ : pente)

La méthodologie de calcul des volumes de la cuve et des différents volumes mort se base sur l'équation (1)

$$V = A_{\text{face}} \cdot l_{\text{cuve}} \#(1)$$

Où A_{face} est l'aire d'une face trapézoïdale, l_{cuve} est la largeur de la cuve.

Cependant, il est nécessaire de déterminer l'aire d'un des trapèzes latéraux (équation (2))

$$A_{\text{face}} = \frac{(B + b) \cdot h}{2} \#(2)$$

Où B est le segment correspondant à la grande base d'un trapèze, b est le segment correspondant à la petite base du trapèze, h est la hauteur du trapèze.

Ensuite, dans le cas des trapèzes correspondant aux solides des volumes interporte et du fond de la cuve, la petite base du trapèze b est inconnue. Il est donc appliqué l'équation (3)

$$b = B - h \cdot \tan(\Theta) \#(3)$$

Où B est la grande base, h est la hauteur du trapèze, Θ est la pente du canal.

Enfin, dans le cas du volume occupé par la vanne à l'intérieur de la cuve, l'inconnue est B (équation (4))

$$B = b + l_{\text{vanne}} \cdot \tan(\Theta) \#(4)$$

Où b est la petite base, l_{vanne} est la largeur de la vanne, Θ est la pente du canal

Le calcul des volumes en conditions « solide à 5 faces » rejoint la même méthodologie. Cependant la variable correspond à la hauteur du triangle rectangle. Ainsi l'aire d'une face se détermine selon l'équation (5)

$$A_{face'} = \frac{L \cdot l}{2} \#(5)$$

Où L est un côté de la face triangulaire et l la hauteur du triangle.

Il faut ensuite, déterminer L selon l'équation (6)

$$L = \frac{l}{\tan(\theta)} \#(6)$$

Où l est la hauteur du triangle et θ est la pente du canal.

4. Caractérisation de la propagation des vagues par capteurs ultrasonores

4.1. Installation des capteurs

Des capteurs à ultrasons (US) sont installés le long du canal pour enregistrer les hauteurs d'eau au cours de la débâcle. Cinq sondes sont positionnées le long du canal. Deux types de capteurs ont été utilisés, un modèle ancien : *Weidmüller LRS3* et un modèle plus récent : le *Banner U-GAGE™ Analog Q45UR*. Les deux types de capteurs présentent des amplitudes d'acquisition différentes, les anciens capteurs ont la capacité d'enregistrer dans une gamme de hauteurs comprises entre 80 et 800 mm, et les capteurs récents enregistrent dans la gamme 50 à 250 mm. Les US ont donc été positionnés à 2 hauteurs différentes. L'ensemble des capteurs a été relié à une centrale d'acquisition *National Instruments* qui permet les premiers traitements des signaux bruts. Un code a été développé précédemment pour l'enregistrement des données. Cependant, avant toute opération de mesure il convient de vérifier la relation qui lie l'intensité électrique du signal avec la distance à laquelle ce signal correspond (figure 4). Pour cela nous faisons varier la hauteur du fond du canal en ajoutant des objets de hauteurs connues sous les US. Les espaces entre le capteur et le haut de l'objet sont ensuite relevés à l'aide d'un régllet puis la valeur de l'intensité du signal leur est associée. Cela permet d'établir des droites de régression et d'appliquer l'équation aux données brutes d'entrée pour produire un jeu de données dont les valeurs seront en millimètres.

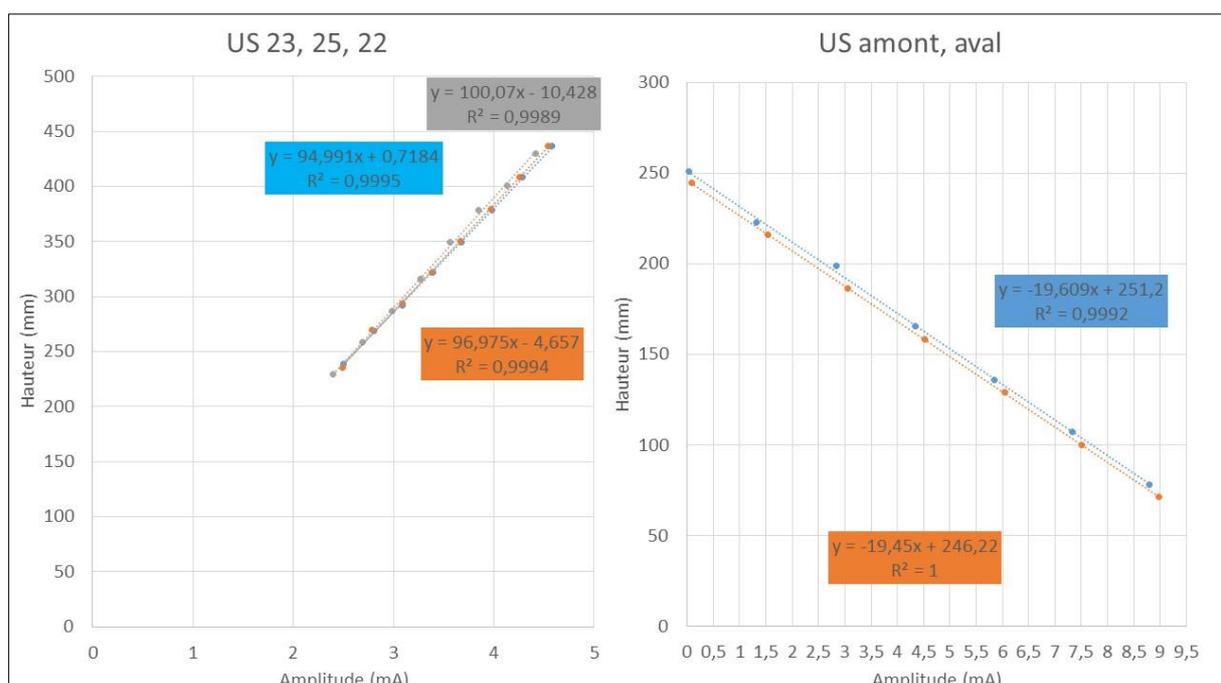


Figure 5: Equation de calibration des sondes ultrasonores

Il est à noter que le front de vague entraîne des bulles d'air ainsi que des sédiments en suspension ce qui peut engendrer des incohérences lors de l'enregistrement. De la même manière, le fond en sable du canal, lorsqu'il est suffisamment ressuyé et récemment nivelé, est difficilement repérable par les US du fait de l'atténuation du retour de l'onde ultrasonore. En effet, l'air présent dans la porosité du sable induit une perte de signal significative. Cet élément a posé problème lors des premières acquisitions à forte pente. Il a donc été nécessaire de l'investiguer pour en établir la cause. La solution trouvée a été de descendre la sonde plus proche du fond, ainsi le signal retour est plus puissant et moins bruité. De même, il s'est avéré que la qualité des branchements entre les sondes et la centrale d'acquisition était déterminante pour la qualité des mesures. En effet, lors des manipulations à forte pente, un branchement à la terre s'était légèrement détérioré et a entraîné un bruit de fond du signal équivalent à une vingtaine de millimètre (Annexe 2).

4.2. Traitements des données US

Les données brutes sont exportées au format Excel et les jeux de données sont nettoyés des valeurs aberrantes qui ont pu être enregistrées. Ensuite, pour remettre les courbes issues des 2 modèles de sondes différents à la même échelle, les données qui représentent le fond du canal avant le lâché sont moyennées pour chaque US et cette moyenne est soustraite aux valeurs brutes. Ainsi, les courbes sont toutes positionnées à la même échelle et les résultats sont exprimés en épaisseur d'eau. Ensuite, les vitesses de progression de la vague sont déterminées par lecture graphique en relevant les temps de passage de la vague puis en divisant la distance entre les points de passage par le temps relevé au niveau du début de la montée de la vague. La vitesse ainsi obtenue représente une vitesse moyenne du front d'écoulement entre deux points de passage. Enfin, la hauteur maximale de la vague est identifiée pour chaque US. Ces informations ont permis d'établir un nombre de Froude du front de l'écoulement.

5. Caractérisation de la dynamique sédimentaire par photogrammétrie

5.1. Historique

La photogrammétrie est une méthode de traitement d'images utilisée depuis le XIX^e siècle suite à l'apparition des chambres de prises de vue et des appareils de restitution. Cette technique se base sur un principe similaire à la vision humaine : la stéréoscopie, c'est-à-dire la prise d'une même scène à restituer mais de deux points de vue différents. Le traitement de ces données permet par la suite d'obtenir des représentations en trois dimensions (3D) sur lesquels peuvent être effectuées des mesures altimétriques ou volumiques. Cette méthode initialement développée pour la cartographie s'est ensuite démocratisée autant dans les domaines de la recherche que de l'appliqué. Ainsi, elle est utilisée en génie civil, urbanisme, architecture mais également dans les disciplines environnementales telles que la géomorphologie (versants, glaciers, montagnes, fleuves). C'est à partir des années 1970 que la photogrammétrie est appliquée au domaine fluvial (Painter et al., 1974, Collins et Moon, 1979). Elle a notamment permis l'acquisition de données topographiques précises en grande quantité et autorise l'étude de différents paramètres morphodynamiques et ce, à plusieurs échelles d'observation. En effet, il est possible de se placer à grande échelle afin d'observer le comportement latéral d'une rivière sous l'effet de conditions hydrauliques particulières ou d'effectuer des mesures à l'échelle du grain (Butler et al., 2001, Carbonneau et al., 2003). La photogrammétrie a été employée dans un premier temps en milieu naturel puis en conditions expérimentales en laboratoire sur des modèles physiques (Stojic et al., 1998) principalement en raison de sa facilité de mise en œuvre et de sa capacité à lever des informations topographiques avec autant de précision que certains LiDAR (*Light Detection and Ranging*) (Fonstad et al., 2013).

5.2. Acquisition Photo

Les photographies ont été prises avec des appareils photographiques Canon 200D et Canon 2000D et 2 objectifs à focale fixe de longueurs différentes : 28 et 50 mm. Au cours des expériences, les deux appareils photographiques et l'objectif 50 mm ont été retenus. Ce choix d'objectif a été motivé par plusieurs séries d'expérimentations avec l'objectif 28 mm qui montraient un phénomène de courbure des jeux de données (figure 5) ainsi que des temps de traitement de l'ordre de la quinzaine d'heure pour un jeu de photographies. La cause de ces problèmes a pu être identifiée. Il s'agissait de l'effet de distorsion existant sur la périphérie du capteur optique de l'appareil (figure 6). Cet effet est partiellement corrigé par le logiciel de traitement. Cependant, s'il est trop important les corrections apportées ne suffisent pas.

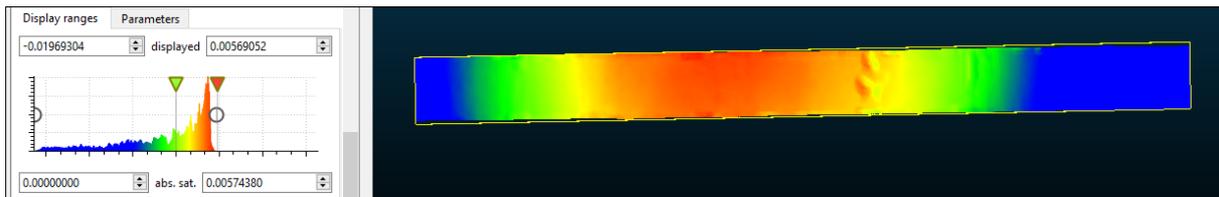


Figure 6: MNT représentant le phénomène de courbure du canal après traitement photogrammétrique

Ainsi, après essai de l'objectif 50 mm et constatation que ces problèmes disparaissaient, ce dernier a été choisi. En ce qui concerne les appareils photos, deux modèles ont été utilisés pour des raisons de faisabilité de la photogrammétrie. En effet, pour des pentes importantes, il n'était pas possible de voir la scène prise en photo avec l'appareil Canon 2000D. Alors que le Canon 200D, présentait une fenêtre mobile permettant d'avoir une vue claire de la scène dans n'importe quelles conditions de prises de vue.

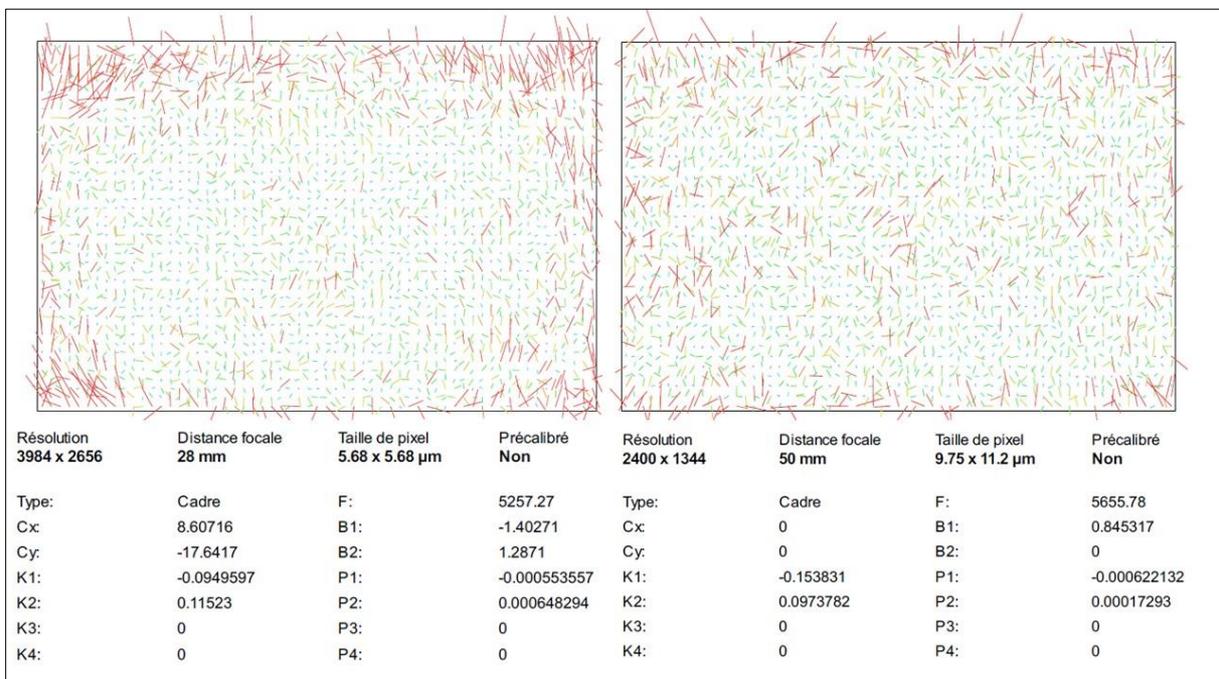


Figure 7: Représentation de l'importance et spatialisation des distorsions induites par l'objectif (à droite : objectif 50 mm ; à gauche : 28 mm) Le MNT représente la soustraction des MNT issus de 2 prises de vue d'une même configuration de canal.

Lors des prises de vue, il est nécessaire de respecter des contraintes pour que les résultats soient les plus précis possible. Ainsi, il faut que les photographies soient prises de 2 angles différents minimum.

Il faut également, que le recouvrement latéral entre une paire de photographies soit de 60 % minimum et de 80 % minimum en longitudinal. Dans le cas du canal expérimental utilisé dans le cadre de ce travail, la qualité du recouvrement est évaluée à partir des informations fournies par les rapports de traitement conçus par le logiciel Agisoft Photoscan. La qualité maximale est atteinte lorsque, pour une zone donnée du canal, 9 photos ou plus représentent le même objet (figure 7). Les photographies sont enregistrées au format JPEG et sont téléchargées sur l'ordinateur de traitement.

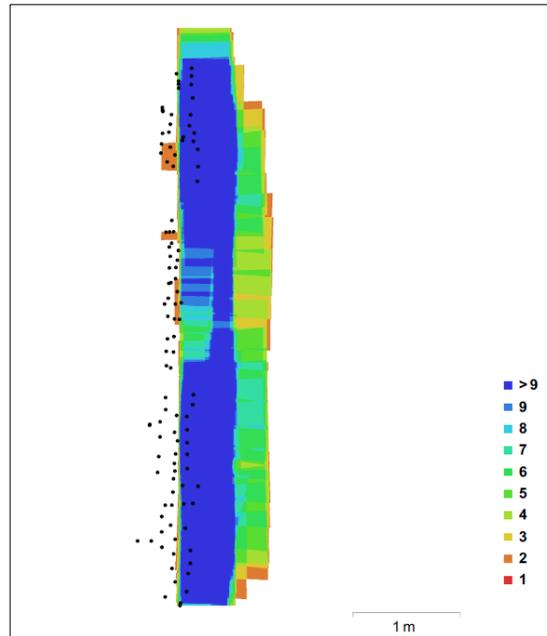


Figure 8: Importance du recouvrement du canal par les photographies et position de l'appareil lors de la prise de vue

5.3. Traitement des données photos

La première étape de la construction d'un nuage de points topographique consiste en l'alignement des photographies prises précédemment. Le principe d'alignement repose sur la recherche de points communs dans une paire de photographies sur la base du positionnement de l'appareil. Lorsque plusieurs points sont identifiés comme similaires entre 2 prises de vue alors cette corrélation est validée. Plusieurs paramètres sont proposés lors de cette étape d'alignement et leur modification impacte grandement la qualité des résultats. Il a donc été décidé de réaliser pour chaque photogrammétrie un alignement de haute qualité. La modification de la qualité a pour conséquence une variation du nombre de points de contrôle.

Ensuite, le nuage épars créé suite à l'alignement des photographies est densifié. Ici encore, plusieurs options sont disponibles et influent sur la densité de points du nuage final. Il a été décidé qu'une densification moyenne était suffisante pour pouvoir créer des modèles numériques de terrain (MNT) relativement précis. Cette décision a été prise suite à une longue réflexion sur l'intérêt d'un nuage très dense pour la construction d'un MNT. Il apparaît qu'un nuage moyennement densifié présente un nombre de points total variant entre 7-10 millions. Alors qu'un nuage hautement densifié aura un nombre de points compris entre 50-80 millions. Cette différence notable entraîne notamment un rallongement significatif du temps de traitement des données ce qui n'était pas envisageable du fait des conditions particulières de ce travail. D'autre part la couverture du canal avec un nuage moyennement densifié est largement acceptable pour effectuer une interpolation linéaire sur ces nuages de points (Heritage *et al.* 2009).

Le nuage dense est ensuite référencé avec les coordonnées des cibles Agisoft préalablement déterminées par un théodolite. Le logiciel procède alors à une consolidation du nuage de points sur

la base des coordonnées des cibles ainsi que la position des appareils. L'erreur recherchée dans le cadre de ce travail se devait d'être équivalente à la taille des sédiments soit de l'ordre du millimètre. Enfin, si les résultats des erreurs étaient satisfaisants les nuages de points étaient exportés au format *.txt* pour être lus sous CloudCompare où les étapes de nettoyage des nuages et calcul des volumes érodés et déposés ont été effectuées.

5.4. Nettoyages des nuages de points et calcul des volumes

Avant toute étape de traitement, il faut isoler la zone d'intérêt en supprimant tous les points qui n'interviennent pas dans les dynamiques sédimentaires et hydrologiques. Cela concerne l'armature du canal principalement.

Ensuite, les volumes de sédiments érodés et déposés sont déterminés en utilisant l'outil *Compute 2.5D Volume* de CloudCompare. Cet outil crée dans un premier temps les rasters à partir des nuages de points qui lui sont indiqués. Puis, l'équation (7) est appliquée pour déterminer les variations de volume.

$$\Delta V = L_{maille} \cdot l_{maille} \cdot \Delta h \# (7)$$

Le logiciel fournit à la fin du traitement un rapport dans lequel sont indiquées plusieurs caractéristiques quantitatives et statistiques parmi lesquelles on retrouve le bilan sédimentaire, les volumes érodés ou déposés, la surface concernée dans le calcul et le pourcentage de points qui ont été utilisés. Il fournit également un visuel des zones d'érosion et de dépôt mais qu'il n'est, toutefois, pas possible d'extraire directement.

5.5. Estimation des erreurs inhérentes à la photogrammétrie

Suite à la prise en main de la méthodologie de la photogrammétrie il est apparu nécessaire d'évaluer en partie les incertitudes de la méthodologie, c'est-à-dire le bruit de fond pouvant biaiser les résultats finaux. Pour cela, deux séries de photographies ont été prises sans modification du canal et traitées selon le protocole de traitement habituel. Les deux nuages de points obtenus sont ensuite comparés à l'aide du *plugin M3C2 distance* du logiciel de traitement CloudCompare. Cet outil permet de déterminer les distances entre 2 nuages de points. A la différence de l'outil *distance* du même logiciel qui définit une distance entre 2 points les plus proches sans considération du sens physique de la comparaison. L'outil *M3C2* compare 2 points selon un faisceau dont le rayon lui a été initialement renseigné. L'orientation du faisceau est établie selon la normale du point qui correspond à son sens d'exposition lors de la prise de vue. Les écarts sont ensuite représentés sous la forme d'un nuage de points dont les couleurs représentent leur importance. Cette étape avait pour objectif principal de constater le phénomène de courbure. Elle n'a cependant pas fait l'objet d'une investigation poussée dans le cadre de ce travail, faute de temps.

En outre, pour définir les erreurs associées aux volumes, une photogrammétrie a été faite sans objet dans le canal. Puis, une deuxième a été effectuée après avoir disposé dans le canal des objets aux dimensions connues. Enfin après traitement photogrammétrique, les deux nuages de points ont été comparés pour établir les volumes déposés et/ou érodés (Annexe 3). Dans notre cas, le volume total déposé devait correspondre à la somme des volumes des différents objets positionnés dans la cuve. Les résultats fournis en annexe sont à titre indicatif car cette partie n'a pas fait l'objet d'un travail approfondi. Toutefois, on remarque une déviation d'autant plus importante que le volume de l'objet était grand.

6. Bilan sédimentaire par prélèvement direct

Après chaque expérience des sédiments sont récoltés dans une bassine percée munie d'un tamis, disposée tout à l'aval du canal. Après l'écoulement, les sédiments sont laissés à ressuyer un moment

pour éliminer le maximum d'eau possible de l'échantillon. Ensuite, en fonction de la quantité de sédiments récoltée dans la bassine, soit la totalité du sable est récupérée, soit un échantillon est prélevé sur le volume total pour déterminer un taux d'humidité qui permettra de définir la masse d'eau présente dans le sable humide à retirer pour obtenir la masse du sable sec. Cependant, pour pouvoir comparer les données de photogrammétrie avec les données d'expérimentation, il est nécessaire de transformer les données de masse en volume. Pour cela, la masse volumique apparente du substrat utilisé dans le canal a été déterminée en pesant un volume connu de sédiment et en faisant le rapport masse/volume. Pour plus de précision dans la valeur de masse volumique apparente, ce protocole a été appliqué 9 fois avec 2 éprouvettes graduées de volumes différents. Les 3 premières séries de mesures ont été effectuées avec une éprouvette graduée de 2L et en la remplissant de sable sec mais non étuvé. Les 6 suivantes ont été faites avec une éprouvette graduée de 250 ml, 3 en utilisant un sable sec non étuvé et 3 en séchant ce même sable à l'étuve.

Enfin, les différentes mesures de masses sont effectuées avec 3 balances différentes selon les échantillons à peser. La bassine pleine de sédiments humides est pesée avec une balance *Kern FCB 24K2* de précision 2g, les barquettes en aluminium utilisées pour le passage à l'étuve du sable humide sont pesées avec une *Kern 440-35N* de précision 0.01 g et les barquettes avec le sable humide ou sec sont pesées avec une *Kern 440-47N* de précision 0.1 g.

Résultats et discussion

1. Hydraulique

1.1. Epaisseur de l'écoulement

Du fait du caractère très transitoire de l'écoulement liquide, la vague a été caractérisée selon son maximum de hauteur lors de la débâcle. Cette hauteur d'écoulement, présente une évolution croissante avec le volume initial de débâcle (figure 8). En effet, la figure 8 montre nettement une évolution homogène des valeurs extrêmes des diagrammes en boîtes, correspondant à la valeur maximale de l'écoulement. D'autre part, la figure 8a met en évidence, en partie, les incertitudes des mesures prises par les sondes ultrasonores. On constate que pour une pente de 3,32% la sonde 23 présente les quartiles 1 et 3 relativement resserrés ce qui signifie que 75 % des données utilisées dans cette boîte ont approximativement la même valeur. De plus, ces boîtes ne présentent que peu de variations entre les différents volumes de débâcle. Ceci indique que, d'une manière générale, les sédiments ont été assez bien nivelés entre chaque expérimentation mais également que les US captaient les données sans bruit de fond prédominant. Cependant, l'US la plus aval (USaval) (figure 8b) présente des boîtes plus larges, ce qui indique une plus grande variabilité du corps des données mais également une variabilité entre les volumes de débâcle. Ce dernier point peut être expliqué par le fait que les sédiments ont été moins bien nivelés au droit de cette US et/ou que la sonde présentait un bruit de fond plus important. Mais, il est également possible que ces variations soient le résultat de l'effet de seuil produit par la plaque verticale de plexiglass à l'aval du canal (assurant le blocage aval des sédiments) sur l'écoulement liquide qui stagne ici pendant quelques instants avant de se ressuyer, induisant alors des variations rapides de tirant d'air.

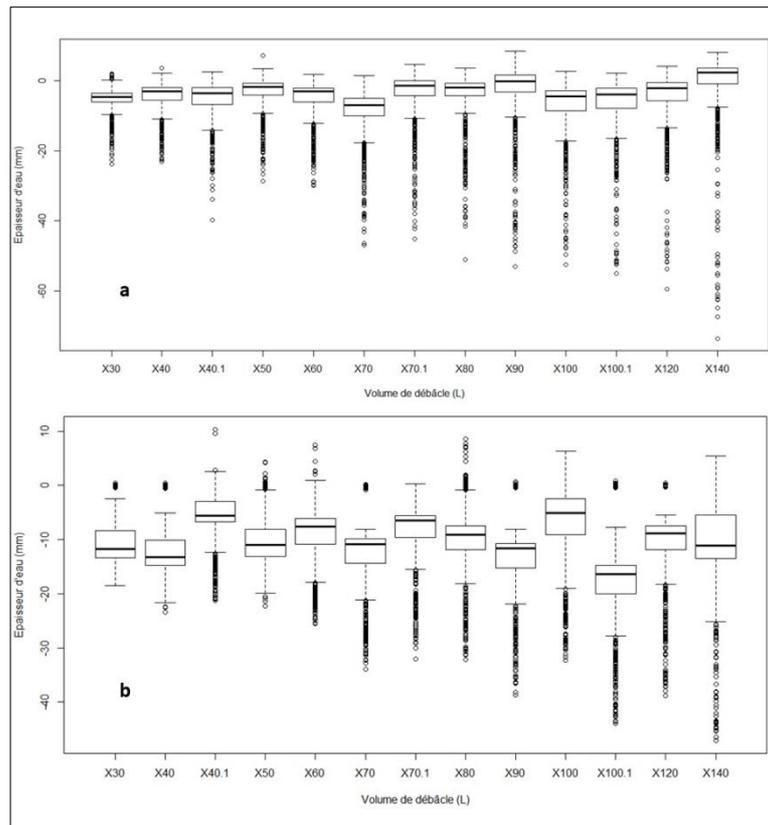


Figure 9: Evolution des épaisseurs d'eau enregistrées en fonction des volumes de débâcle en contexte de pente de 3,32 % (a : US 23 ; b : US aval)

D'autre part, les hydrogrammes de crue montrent le comportement de l'écoulement (figure 9). Ainsi, on constate que lorsque le volume de débâcle est important le pic de l'hydrogramme est bien plus grand que pour des faibles volumes. Cependant la croissance de la courbe indique que peu importe le volume, la hauteur maximale de la vague est atteinte à la même vitesse. Cependant, la redescente du pic de crue apparaît comme étant plus rapide et brusque pour des volumes importants de débâcle. Là où pour des petits volumes, la redescente est plus progressive. Il est également possible de constater que la hauteur atteinte à la fin du graphique ne correspond pas avec celle observée initialement. Cette apparente incohérence peut être le résultat de l'accrétion ou l'érosion de matériau du lit suite à l'écoulement.

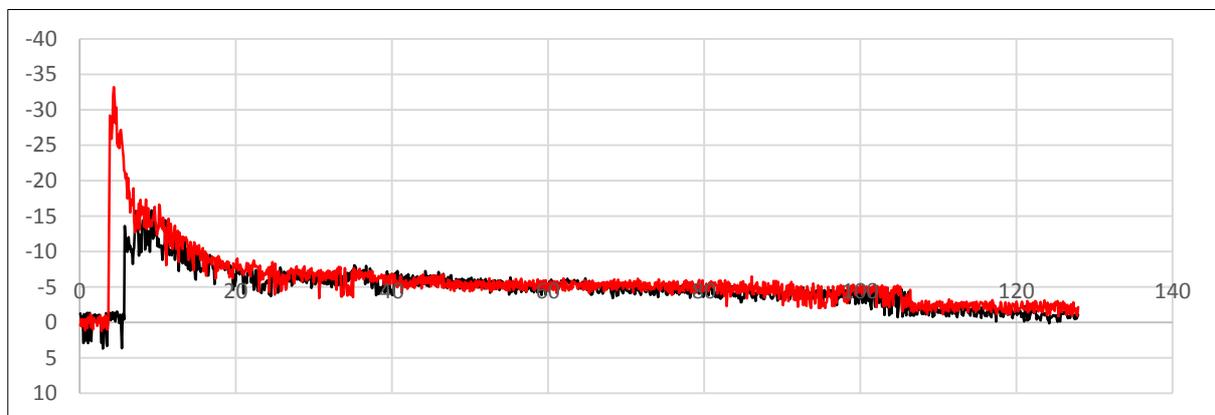


Figure 10: Comparaison de 2 hydrogrammes de crue de 2 volumes de débâcle différents pour une même sonde ultrasonore (rouge: 120L; noire: 30L)

Ce type d'hydrogramme de crue correspond à ce qui a été identifié par Rushmer (2007) comme *lineary rising*. Ce type d'hydrogramme entraîne un fonctionnement sédimentaire avec plus de variations d'altitudes, un tri granulométrique moins bien établi et le développement de formes sédimentaires sur une plus grande distance que pour un hydrogramme de crue *exponentially rising*. Dans notre cas, on observe le développement de rides de courant relativement en amont et jusqu'à l'aval du canal.

1.2. Vitesses d'écoulement

Les vitesses d'écoulement et les grandeurs qui en dépendent ont été déterminées selon la vitesse moyenne calculée à partir de l'identification du passage entre 2 US. Ainsi, la vitesse qui a été déterminée correspond à une vitesse moyenne du front et non à une vitesse instantanée. Cela implique donc des hypothèses quant aux valeurs qui sont obtenues par la suite. En effet, la vitesse déterminée n'étant pas la vitesse débitante, le calcul du débit s'en trouve inévitablement biaisé. C'est donc pour cela qu'a été calculé uniquement le débit de pointe selon la valeur maximale de hauteur d'eau de l'écoulement. Enfin, le nombre de Froude, ici encore a été approximé du fait de cette valeur de vitesse. Il s'agit donc d'un Froude moyen du front de l'écoulement.

Les vitesses d'écoulement semblent suivre 2 types de comportements : une tendance à l'accélération, et une autre à la décélération (figure 10). Cette dernière apparaît comme étant un comportement attendu car l'écoulement acquiert sa vitesse max à la sortie de la vanne puis en raison des forces de frottement exercées par le lit sédimentaire et par les effets de turbulence, l'écoulement dissipe son énergie et la vitesse se réduit. Le comportement avec une tendance à l'accélération présente une augmentation de la vitesse relativement notable entre la première US et la seconde puis une décélération vers l'aval. Toutefois on note que d'une manière générale, les vitesses d'écoulement augmentent avec le volume de débâcle et ce, pour toutes les pentes.

La pente semble donc jouer un rôle sur la dynamique de l'écoulement. En effet, l'hypothèse qui a été posée était que les pertes d'énergie étaient compensées par l'augmentation de la pente et qu'ainsi, la vitesse de la vague se conservait. La figure 11 montre cette tendance car les coefficients directeurs des droites de régression sont plus importants lorsque la pente est faible.

D'autre part, la figure 11 montre une dispersion des valeurs de vitesse d'autant plus importante que l'US se situe en aval du canal. La différence de dispersion des vitesses pour faible volume et pour fort volume peut être expliquée par le fait que les vitesses enregistrées par la sonde la plus amont sont directement dépendantes de l'ouverture de la vanne et que très peu influencées par le volume liquide de la cuve et la pente. Or, l'ouverture de la vanne est une condition fixe qui ne variait pas au cours des expérimentations. Ainsi, les données de la sonde la plus amont sont relativement similaires entre elles. A l'inverse, les vitesses enregistrées à l'aval du canal sont plus fortement influencées par la pente et le volume de débâcle. Cela peut expliquer en partie la plus forte dispersion des valeurs captées en aval.

Enfin, la figure 12 montre une relation positive entre la vitesse et le volume de débâcle. Cette tendance peut être le fait de la hauteur d'eau dans la cuve. En effet, plus la hauteur d'eau est grande plus les forces de pression exercées sur le fluide en fond de cuve sont importantes. Lors de l'ouverture de la vanne les forces verticales (pression) se transforment en composante horizontale (vitesse). Il existe toutefois quelques vitesses extrêmes peu cohérentes de par leur valeur et leur positionnement dans le canal (e.g. : vitesse de $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ enregistrée par la sonde aval). La méthodologie d'extraction des valeurs ainsi que le matériel sont mis en cause dans ces erreurs.

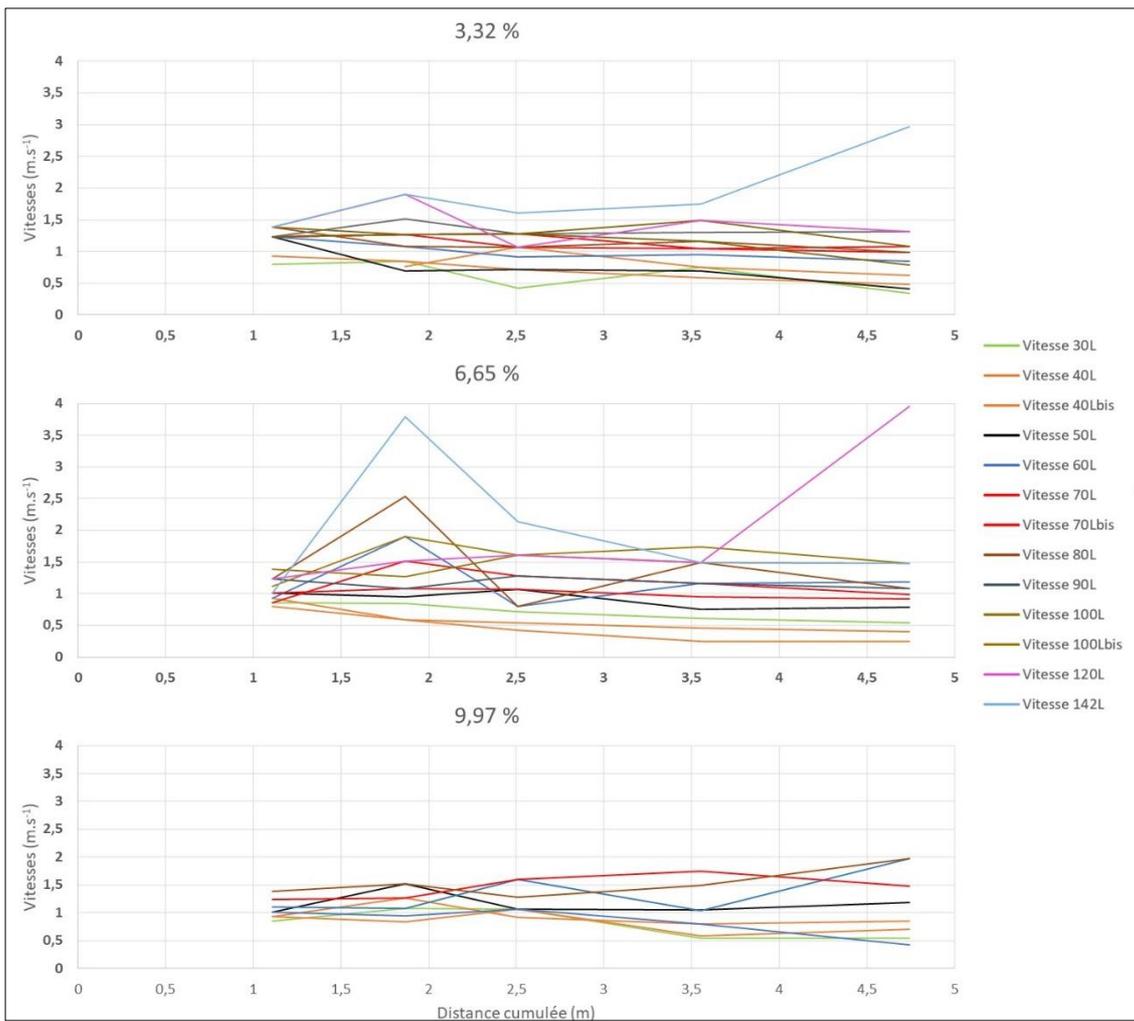


Figure 11: Evolution de la vitesse du front de vague en fonction de la distance à l'amont selon les volumes de débâcles et pour les 3 pentes étudiées

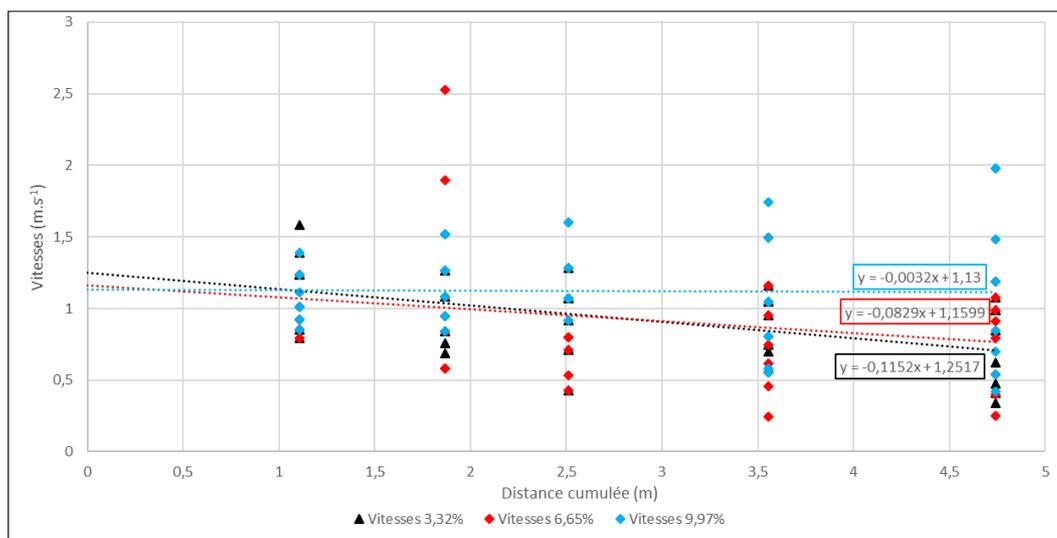


Figure 12: Evolution de la vitesse du front de vague en fonction de la distance à l'amont pour les 3 pentes étudiées

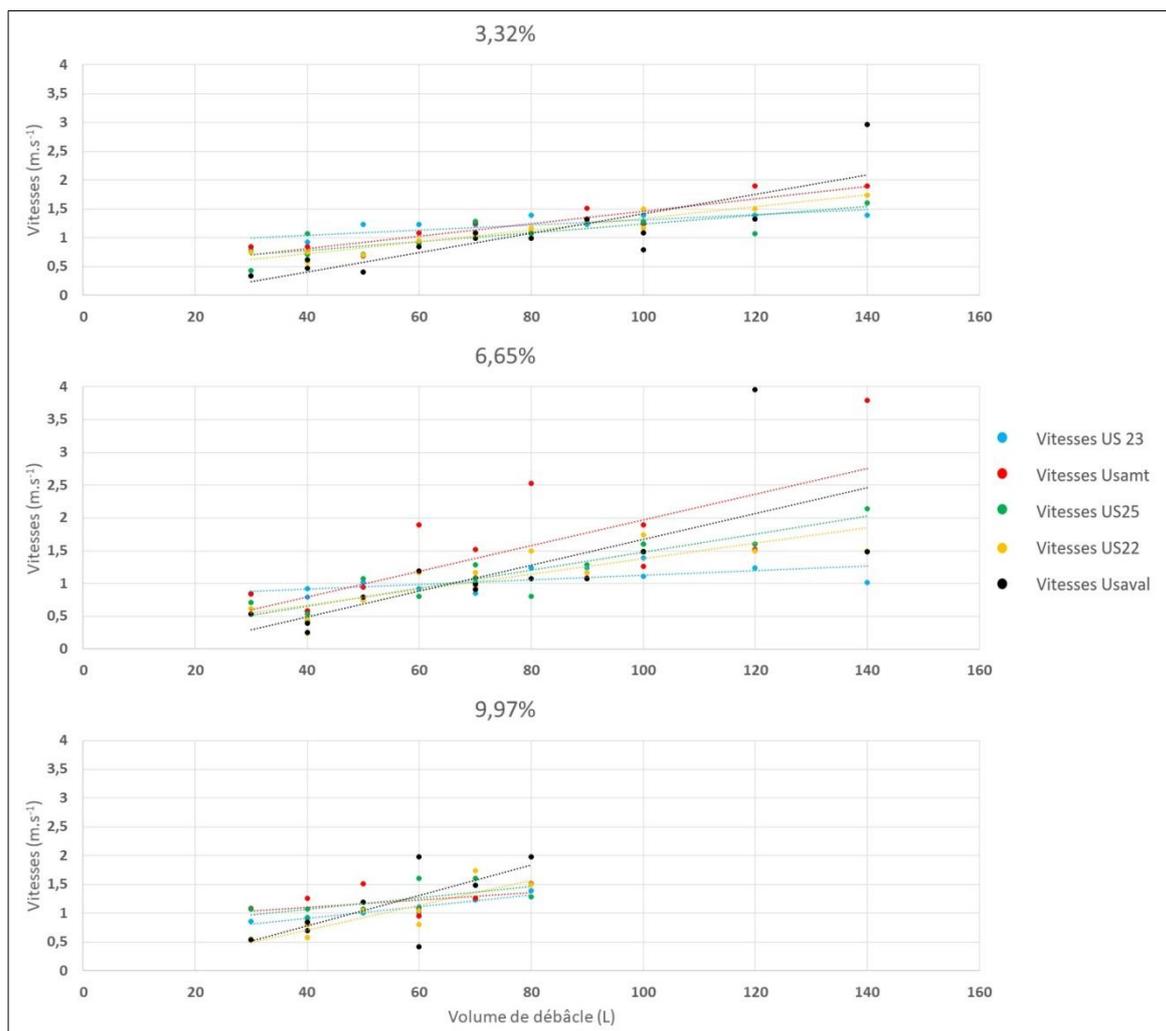


Figure 13: Evolution de la vitesse d'écoulement du front de vague en fonction du volume de débâcle pour les 3 pentes étudiées

1.3. Débit instantané maximal

Le calcul d'une chronique de débit n'étant pas faisable du fait de l'absence de mesure ponctuelle de la vitesse, il a été décidé de ne calculer que le débit instantané au pic de l'hydrogramme. Pour cela, la hauteur maximale de la vague a été multipliée par la vitesse du front d'écoulement précédemment établie. Globalement, les débits par unité de largeur obtenus suivent une relation linéaire positive avec le volume de la débâcle. Il apparaît également que les débits sont relativement similaires entre eux pour un même volume de débâcle et entre les US. Cela renforce l'aspect conservatif du débit et indique que peu d'eau est perdue dans la porosité du substrat. Toutefois, seul l'US « USamt » en condition de pente de 6,65 % (figure 13) semble présenter des valeurs significativement supérieures à celles des autres US. La raison de cette différence reste inexpliquée. Il peut s'agir d'une erreur lors de la mesure de la vitesse ou d'un bruit de fond des données trop important, ayant parasité l'extraction des valeurs.

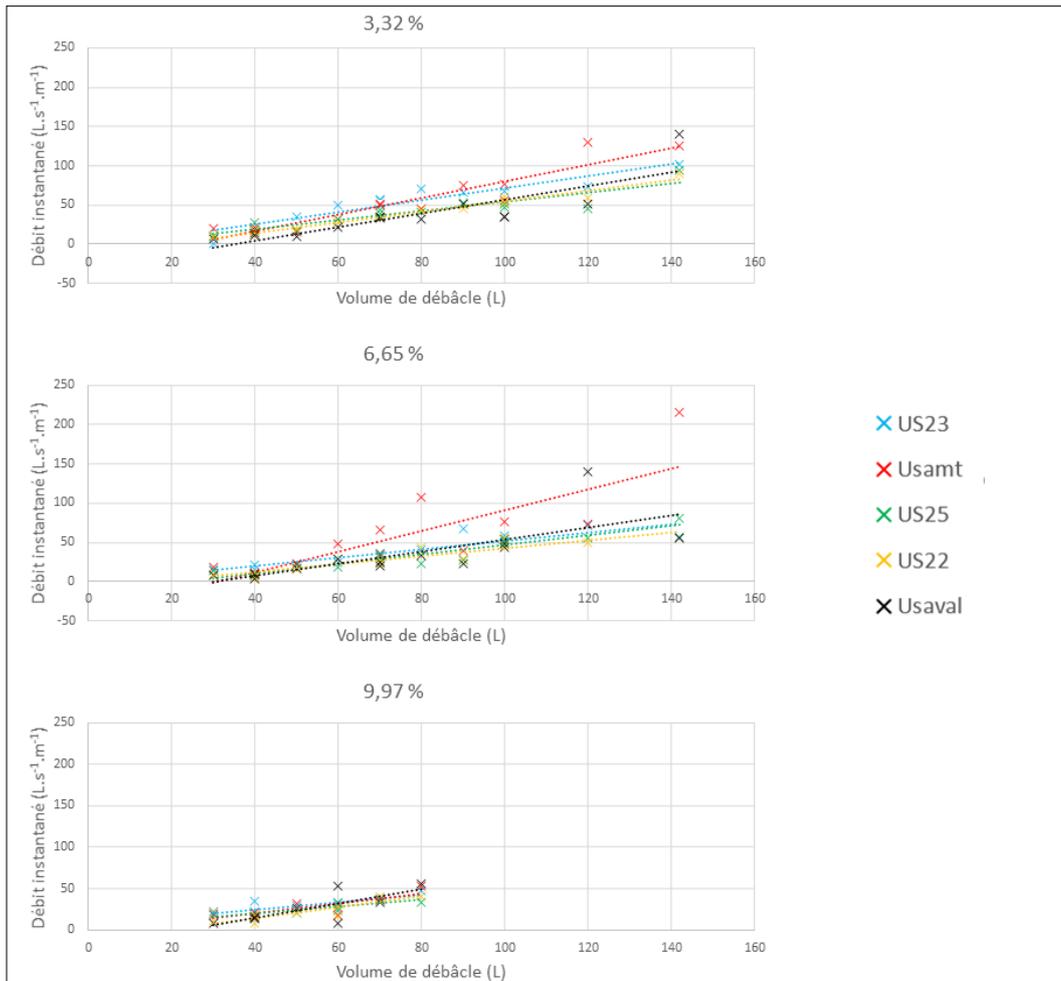


Figure 14: Evolution du débit maximal en fonction du volume de débâcle pour les 3 pentes étudiées

1.4. Nombre de Froude de propagation

Afin de connaître le régime d'écoulement au front de la vague, le nombre de Froude a été déterminé à partir des valeurs moyennes des vitesses précédemment citées et des valeurs maximales d'épaisseur d'écoulement. La figure 14 montre que le nombre de Froude augmente avec le volume de la débâcle. D'autre part, pour la pente de 3,32%, les valeurs de Froude pour un même volume de débâcle sont relativement similaires entre elles ce qui indique que le régime d'écoulement se conserve avec la distance à l'amont. Aux pentes supérieures les valeurs de Froude présentent une variation avec la distance à l'amont plus marquée qui peut être due au fait que les valeurs de vitesse précédemment calculées présentent une plus grande variabilité.

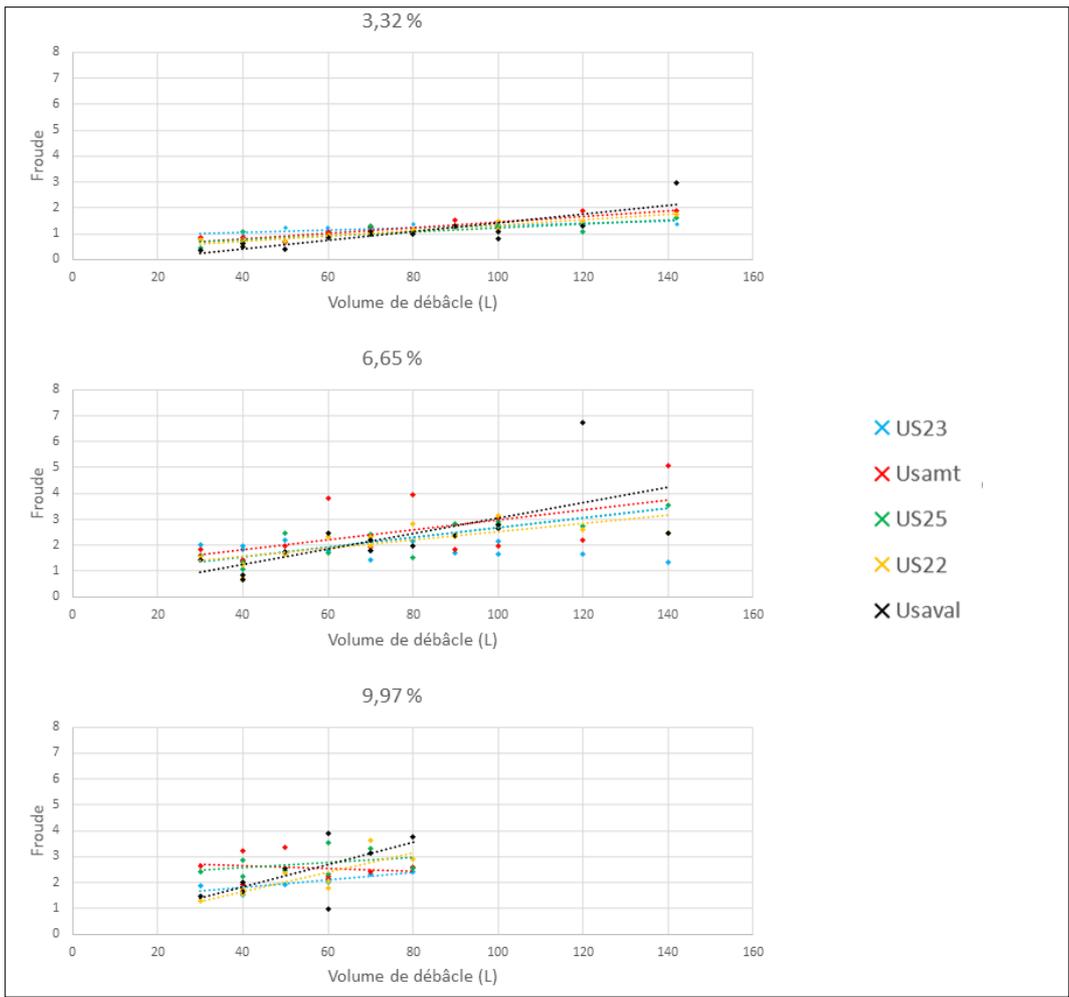


Figure 15: Evolution du nombre de Froude du front d'écoulement en fonction des volumes de débâcle

Le nombre de Froude semble également être influencé par la pente (figure 15). En effet, d'après les droites de régression présentées dans la figure 15, le Froude augmente globalement avec l'augmentation de la pente. Cela étant, le nombre de Froude, pour faible pente et pour petit volume, varie autour de 1 soit un écoulement critique. Le nombre de Froude atteint parfois des valeurs extrêmes supérieures à 5. Ces valeurs dénotant fortement du reste du nuage de points peuvent toutefois être la conséquence d'une valeur de vitesse incohérente. Le corps du jeu de données est cependant réparti de manière assez homogène entre des valeurs de 0,5 et 3.

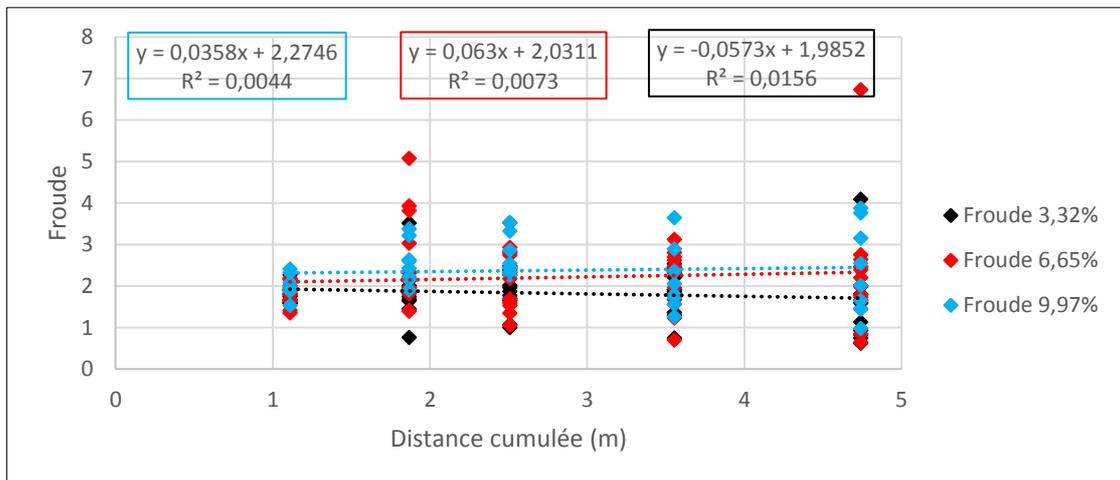


Figure 16: Evolution du nombre de Froude en fonction de la distance à l'amont pour les 3 pentes étudiées

Un nombre de Froude supérieur à 2 peut engendrer une instabilité de l'écoulement (roll-waves) qui peut avoir des conséquences sur la dynamique sédimentaire (Balmforth et Mandre, 2004).

Synthèse Hydraulique

Points importants :

- Vague à croissance rapide et linéaire puis redescende rapide
- Régime d'écoulement du front de vague **Critique à Torrentiel**
- Corrélation entre le volume de débâcle et les différentes caractéristiques (hauteurs d'eau, vitesses, débit, Froude).
- L'influence de la pente sur les caractéristiques de l'écoulement est peu évidente.
- Les valeurs déterminées sont issues d'un calcul de vitesse moyenne
- L'intensité des processus hydrauliques est grande
- Méthodologie d'extraction des valeurs discutable et perfectible

2. Transport solide

Les prochains résultats comprennent les données issues de ce travail mais également les données d'un précédent stage effectué par Hippolyte Girard (2019). Ainsi, c'est 3 pentes qui ont été investiguées dans le cadre du présent travail (3,32 %, 6,65 %, 9,97 %) et qui ont été comparées aux données acquises précédemment en conditions de pente de 3 %.

2.1. Bilans sédimentaires selon collecte des sédiments

La quantité de sédiments récupérés à l'aval du canal augmente avec le volume de la débâcle. Cette évolution est à seuil pour la pente de 3,32 % et 3 %. En effet, pas ou très peu de sédiments ont été retrouvés à l'aval pour les pentes de débâcles les plus faibles (30, 40, 60, 70 L). Cependant lorsque

le volume critique est dépassé, l'évolution des volumes de sédiments collectés est linéaire et positive (figure 16). L'effet de la pente est également notable. Premièrement, la pente supprime l'effet de seuil pour les faibles volumes. Deuxièmement, les volumes de sédiment évoluent selon un facteur 8 entre les pentes 3,32 % et 6,65 % et selon un facteur 3 entre les pentes 6,65 % et 9,97 %.

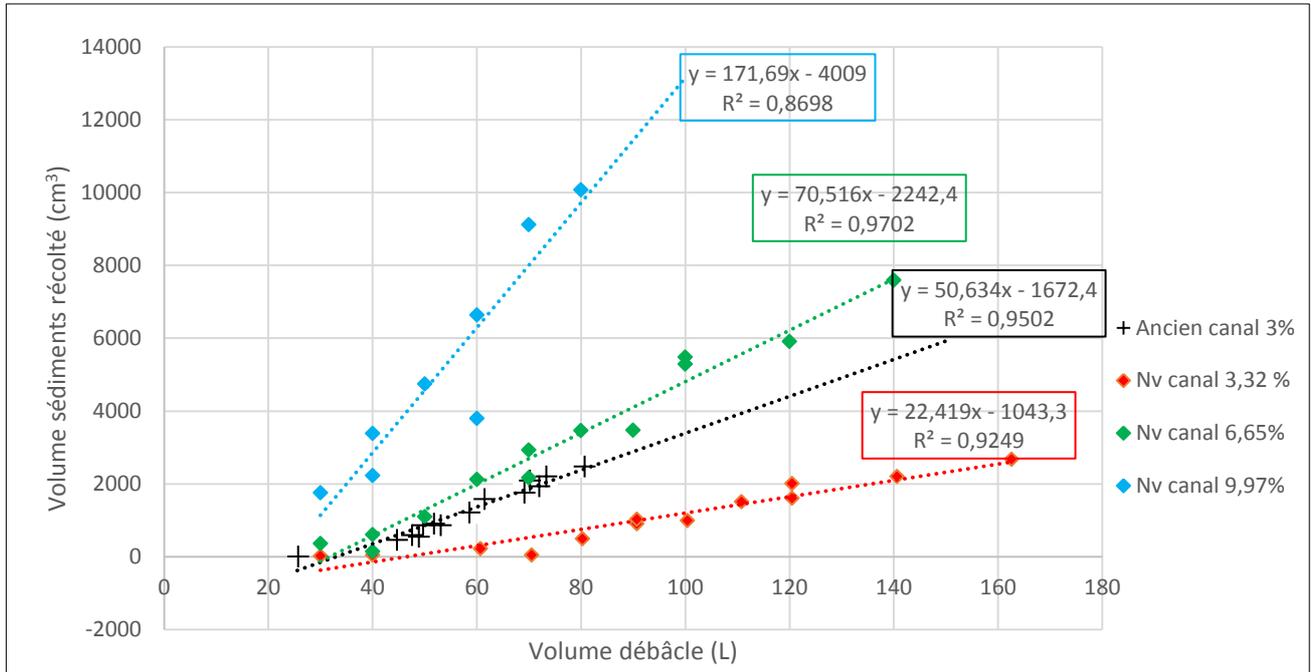


Figure 17: Evolution du volume des sédiments collectés en sortie du canal en fonction des volumes de débâcle

Enfin, la figure 16 montre également les valeurs qui ont été obtenues lors d'un précédent stage. Ces valeurs ont été acquises en condition de pente de 3 %. Les résultats montrent que les volumes sédimentaires qui ont été obtenus précédemment sont très semblables avec ceux obtenus dans ce travail en conditions de pente de 6,65 %. En effet, dans les deux cas l'évolution du volume de sédiments récupérés à l'aval présente un seuil puis est linéairement croissante. Cette similarité inattendue peut être expliquée par plusieurs hypothèses. La première concernait la masse volumique apparente du sédiment qui a été établie. En effet, la valeur déterminée ici et celle précédemment établie présentaient une différence. Cependant, cet écart n'est pas suffisant pour expliquer la position des deux courbes à 3 % (figure 17).

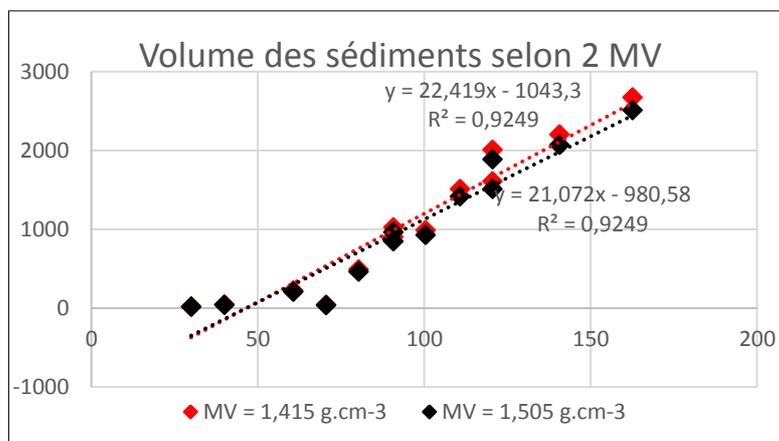
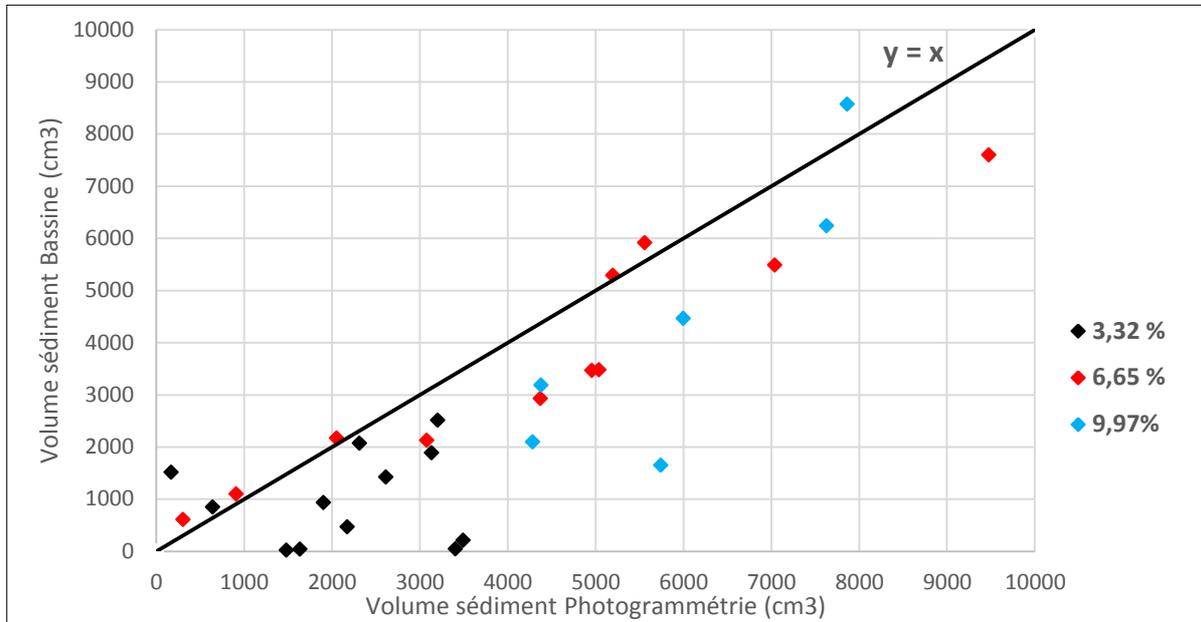


Figure 18: Comparaison des volumes calculés selon 2 masses volumiques (rouge: ancienne masse volumique; noire: nouvelle masse volumique)

Une autre hypothèse permettant d'expliquer l'incohérence, peut être intrinsèque aux caractéristiques physiques du canal. En effet, la largeur était de 0,3 m précédemment contre 0,4 m dans le cadre du présent projet. Le fait que la largeur soit plus faible peut entraîner des capacités de transport plus importantes car pour un même volume, les hauteurs d'eau lors de la débâcle sont plus grandes pour des largeurs plus faibles. Enfin, la dernière hypothèse explicative concerne la longueur du canal. Les sédiments sont remis en mouvement lors du passage du front de la vague puis redéposés plus loin dans le canal du fait de la dissipation de l'énergie de l'écoulement. Il est possible d'observer ce phénomène pour des volumes faibles, où une érosion marquée se produit à l'aval direct de la sortie d'eau puis un dépôt progressif vers l'aval. Il est possible que ce phénomène existe également pour des volumes plus importants mais dans les conditions actuelles d'expérimentation (longueur du canal, notamment) il n'était pas possible de l'observer car le dépôt s'observerait bien plus en aval. Cela étant, l'ancien canal faisait une longueur de 5 m dont 0,875 m et 0,60 m dédié respectivement au réservoir et à la plaque de PVC correctrice des écoulements, soit 3,525 m de longueur effective pour le transport sédimentaire. Le nouveau canal, à l'inverse, ne comprend pas le réservoir dans la partie écoulement mais il a une plaque PVC de 0,60 m de long nécessaire à la correction de l'écoulement liquide. La longueur effective du canal est donc de 4,4 m. Suite à ces réflexions, il paraîtrait intéressant de mener des investigations sur ce point afin de voir si, en conditions morphologiques relativement stables (seulement fond déformable et largeur constante), la distance du début du dépôt évolue avec les paramètres de pente et de volume de débâcle.

2.2. Bilans sédimentaires photogrammétriques

La méthodologie d'établissement des bilans sédimentaires par photogrammétrie a été comparée à celle par collecte de sédiments. Les résultats montrent clairement une surestimation des volumes calculés par photogrammétrie par rapport aux volumes collectés (figure 18). La dispersion des valeurs varie selon la pente qui a été appliquée au canal. Ainsi, pour une pente de 3,32 %, la dispersion est très importante, tandis que pour les pentes 6,65 % et 9,97 % les valeurs semblent s'articuler dans un faisceau relativement parallèle à la droite d'équation $y = x$. Cette information conforte le fait qu'il existe une erreur systématique qui n'est pas proportionnelle au volume calculé par photogrammétrie. Ainsi, l'importance de l'erreur dans les données n'est pas équivalente, pour des petits volumes l'erreur est extrêmement importante et pour des grands volumes l'erreur est beaucoup plus acceptable. Il est également possible d'avancer que le protocole de photogrammétrie semble plus sûr pour des processus sédimentaires intenses avec des volumes de collecte importants. Toutefois, au regard de ce qui a été obtenu, il apparaît que la méthodologie photogrammétrique n'est pas totalement adaptée à l'établissement de bilans sédimentaires précis en conditions de laboratoire.



des petits volumes.
 Figure 19: Comparaison des bilans sédimentaires pour les 3 pentes étudiées entre les volumes calculés par photogrammétrie et les volumes mesurés par collecte de sédiments (noire : 3,32 % ; rouge : 6,65 % ; bleue : 9,97 %)

3. Morphodynamisme en conditions de forte pente

3.1. Phases morphodynamiquement actives

Suite aux expérimentations, il est possible de distinguer plusieurs phases morphodynamiquement actives. La première phase fait suite au passage du front de la vague et à sa recharge rapide en sédiments. La conséquence est la saturation rapide du front de l'écoulement en sédiments et l'initiation du creusement d'une fosse dès que la phase aqueuse a la possibilité de se charger en sédiments (figure 19A). Il est alors observé un boudin sédimentaire équivalent à la largeur du canal et de quelques centimètres de long évoluant plus ou moins à la vitesse de l'écoulement liquide. De plus, les forces hydrauliques impliquées sont tellement importantes que la remobilisation de la couche active s'observe sur toute la longueur du canal lors du passage du front.

Cependant, malgré une érosion généralisée au premier abord, la deuxième phase de l'écoulement, caractérisée par un flux plus homogène et certainement moins turbulent, va continuer la mobilisation d'une couche active et entraîner un transport solide d'autant plus important que le volume de débâcle est grand. De plus, la diminution des vitesses d'écoulement à l'amont du canal et après le passage de la vague, entraîne une érosion plus marquée de la fosse car la pente de l'écoulement sortant de la cuve présente une pente significativement différente de la pente aval de l'écoulement (figure 19B). Enfin, ce qui a été érodé en aval par le front de vague est comblé en partie par des phénomènes de dépôt issus de la réduction de l'énergie de l'écoulement.

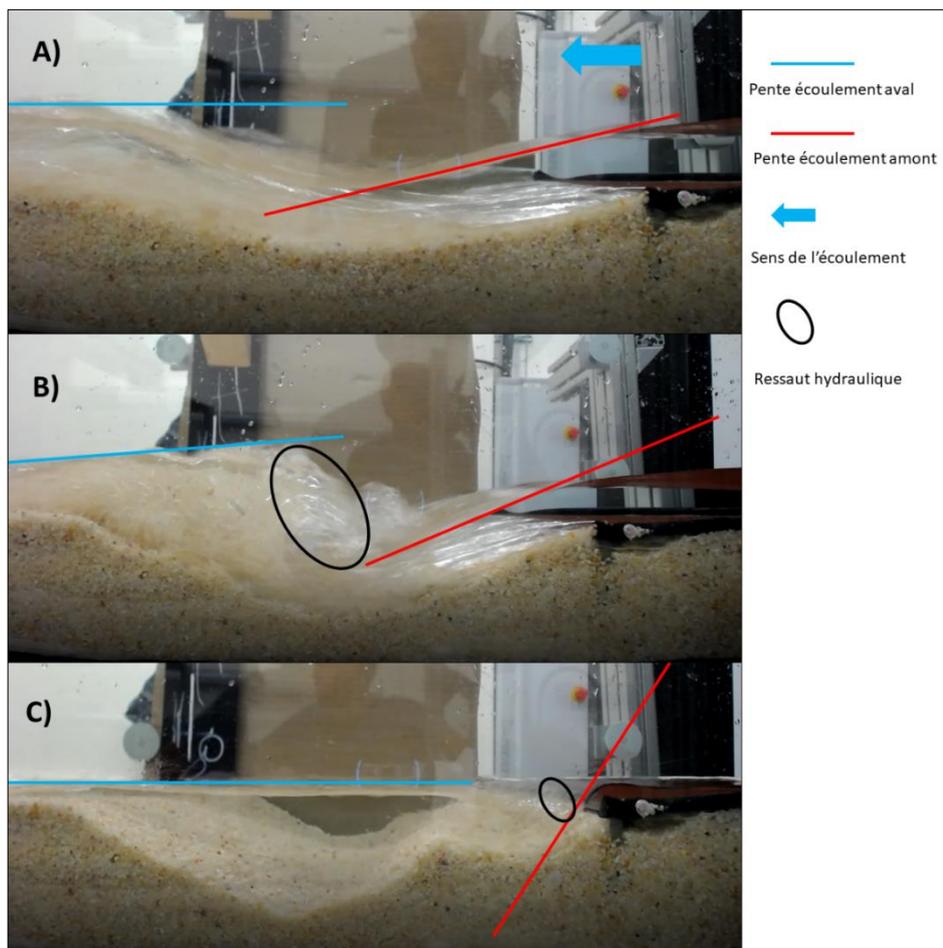


Figure 20 : Les 3 phases identifiées de l'écoulement (A: directement après le passage du front de vague ; B: transition écoulement torrentiel à critique ; C : écoulement superficiel de vidange)

La dernière phase, consiste en l'écoulement superficiel de fin d'hydrogramme issu de la vidange de la fosse situé tout à l'amont (figure 19C). Ce dernier écoulement est particulièrement intéressant car il est responsable des formes sédimentaires qui apparaissent à la fin de l'écoulement. Ces formes sédimentaires semblent être d'autant plus marquées que la pente est importante (figure 20). La morphologie fluviale adopte alors un style proche de la tresse se développant particulièrement sur la partie aval du système (figure 20c). Cependant, ce style est généralement présent lorsque la fourniture sédimentaire est excessive par rapport à l'écoulement liquide, pour des pentes relativement faibles et pour une dynamique hydraulique importante. Dans le cas de ce travail, la fourniture sédimentaire (érosion de la fosse amont) et l'intensité des processus hydrauliques sont importantes. Cependant, la pente appliquée au canal étant particulièrement forte, elle ne correspond pas aux valeurs de pente généralement rencontrées sur les rivières en tresses naturelles. De plus, pour les pentes les plus faibles investiguées ici, aucun style fluvial ne se distingue. Ainsi, il est possible que le volume de débâcle, à l'échelle du modèle, ne suffise pas pour permettre l'établissement de ce style morphologique en condition de faible pente. C'est donc l'accroissement de la pente qui compense le manque de dynamisme hydrologique et favorise l'apparition de formes sédimentaires.

Il existe une phase intermédiaire représentée ici par la figure 20b où on observe une divagation du chenal plus importante que pour une pente de 3,32% mais plus faible que pour une pente de 9,97%. Le flux emprunte une morphologie plus divagante qu'en tresse.

En outre, il est possible de remarquer la formation de structures sédimentaires se développant en partie aval du canal (figure 20a). En effet, le sédiment s'organise en rides de courant. Celles-ci ne

sont pas observables à l'amont du canal où les contraintes hydrauliques sont certainement trop importantes pour permettre cette formation. A l'inverse, avec la distance à l'amont, le flux perd en vitesse et le nombre de Froude tend vers un écoulement fluvial qui permet alors à ces rides de s'établir.

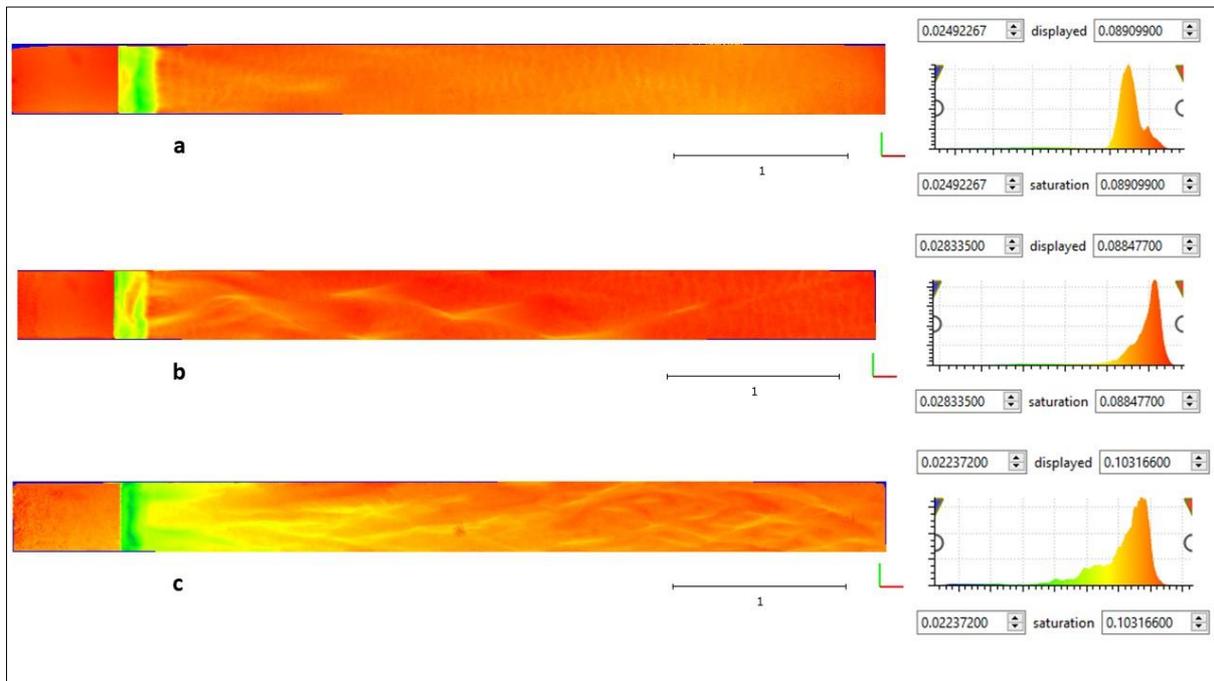


Figure 21: MNT du canal après écoulement pour un volume de débâcle de 70L et pour les 3 pentes étudiées (a : 3,32 %, b : 6,65 %, c : 9,97 %)

3.2. Représentativité des résultats en contexte naturel

Les observations qui ont été faites sur la dynamique de création de la fosse sont corroborées par plusieurs articles qui mettent en évidence le même phénomène, à la fois en contexte « naturel » mais également en conditions de laboratoire. Toutefois, d'autres références montrent un fonctionnement à l'opposé de ce qui a pu être constaté. En effet, Vuichard *et* Zimmermann (1987) ont produit une description d'une débâcle brutale en conditions comparables de celles approchées dans le cadre de cette étude. L'évènement décrit est la rupture d'un barrage morainique en haute altitude (<4000 m a.s.l.) et la vidange d'un lac proglaciaire (le Dig Tscho au Népal). De plus, le contexte montagnard induit la présence de fortes pentes sur l'émissaire du lac. Le volume d'eau vidangé approchait 5 millions de mètres cubes, la moraine érodée représentait un volume sédimentaire remobilisé de près de 900 000 m³ et le débit instantané reconstitué atteignait les 2000 m³.s⁻¹. Cependant, malgré des conditions initiales très proches de ce que le canal expérimental peut représenter, les processus morphodynamiques décrits par Vuichard *et* Zimmermann (1987) montrent une absence de fosse d'érosion à l'aval direct de la rupture du barrage, une érosion localisée dans les secteurs de fortes pentes (< 10%) et un dépôt sur des secteurs moins abrupts (5 – 7 %). Cette absence de fosse d'érosion est particulièrement intéressante car elle indique que le type, ainsi que la quantité de matériau composant la retenue, entraîne des processus sédimentaires différents. En effet, dans le cas de la rupture de la digue du lac Ha ! Ha ! précédemment décrite, une fosse de reprise sédimentaire s'est créée. Ce paradoxe nécessiterait une plus ample investigation en réalisant des modèles physiques représentant différentes situations ou la fourniture sédimentaire directe serait différente. Par exemple, dans le cas d'une vidange de poche d'eau intraglacière suite à la disparition d'un bouchon de glace (Glacier de Tête Rousse), le modèle actuel est adapté. Il n'est toutefois pas exactement représentatif de la situation observée au Népal.

D'autre part, les phénomènes de dépôt qui surviennent sur la partie aval du canal expérimental sont ici uniquement la conséquence de la perte d'énergie de l'écoulement. Toutefois, en conditions

naturelles il apparaît que les processus d'aggradation des sédiments sont plutôt le fait des variations de configuration du lit majeur, de la pente du chenal et de la géologie du secteur (Capart *et al.* 2007). Ainsi, sur les secteurs avec un fort élargissement du lit majeur, l'écoulement perd en capacité de transport et un engravement important est observé. Le même phénomène survient pour des changements brutaux de pente. A l'inverse, dans les secteurs très resserrés avec peu de possibilité d'ajustement morphologique du fait de la géologie, c'est l'érosion qui est majoritaire.

Synthèse morphodynamique :

Points importants :

- Différentes phases morphodynamiques.
- Plusieurs unités morphologiques apparentes : fosse d'érosion, dépôt, chenaux, barres sédimentaires.
- Influence de la pente sur le style fluvial.
- Mise en place d'un tressage d'autant plus établi que la pente est forte.
- Quelques incohérences entre certains cas naturels et les résultats obtenus.
- Apparente influence du matériau de la retenue sur le comportement adopté par l'écoulement.

Propositions d'amélioration du canal et du protocole

1. Photogrammétrie

Il est apparu au cours de ce travail que l'emploi de la photogrammétrie pour établir des MNE précis n'était pas au niveau des espérances attendues et ce malgré un travail d'optimisation du protocole. Plusieurs pistes d'amélioration sont toutefois possibles. La première et principale consisterait à fixer 2 rails au-dessus du canal pour y fixer 2 appareils photo. Ainsi, une fois les appareils paramétrés ces derniers n'auraient plus la possibilité de faire des translations verticales et la mise au point resterait la même. Dans le cadre de ce projet, les photographies ont été prises manuellement avec des variations de mise au point et d'angles. Les résultats obtenus par Leguern (2014) montrent l'intérêt d'une fixation des appareils.

La profondeur de champ est également un point qui mérite un aménagement du canal. En effet, le manque de luminosité du laboratoire engendre une ouverture focale plus grande pour prendre les photographies. Or, plus l'ouverture focale est grande, plus la profondeur de champs est réduite et plus le flou d'arrière-plan est important. Il est donc nécessaire d'avoir une ouverture focale faible pour avoir le plus de profondeur de champs possible. Mais, cela nécessite la mise en place de projecteurs relativement puissants.

En outre il serait judicieux de continuer le travail de recherche sur l'utilisation de certains objectifs pour la photogrammétrie. En effet, comme évoqué précédemment, l'utilisation de l'objectif 28 mm a conduit à une perte de temps significative puisqu'il s'est avéré être la cause principale de l'effet « banane », alors que d'après le manuel d'utilisation du logiciel Agisoft Photoscan, les objectifs qui peuvent être utilisés pour la photogrammétrie ne doivent pas descendre en dessous de 20 mm de longueur focale. Il est clair après cette étude, que cette limite basse est discutable. Il serait néanmoins judicieux de faire varier le protocole de prise de vue pour vérifier si la responsabilité provient effectivement de l'objectif et non de la méthodologie de prise de vue.

2. Le canal

La mise en activité du canal a nécessité plusieurs étapes de calibration pour faire en sorte que les expérimentations soient les plus homogènes possibles. Une prochaine approche devra se concentrer sur les aspects fins de l'hydraulique lors de l'ouverture de la cuve. En effet, du fait des conditions particulières dues à la présence d'un volume mort avant le canal, ce dernier peut engendrer des modifications de l'écoulement. Pour pallier cela, une plaque en PVC recouverte de papier de verre pour reproduire une certaine rugosité a été disposée en début de canal. Cependant, cette plaque a affecté la morphologie finale du sédiment car une voie d'eau s'établissait sous la plaque et entraînait un transport solide important qui remplissait en partie la fosse. Plusieurs modifications de la plaque ont permis de diminuer ces effets. Néanmoins, il est proposé de positionner un bloc de PVC plutôt qu'une simple plaque, on s'affranchirait alors de tous les problèmes de voies d'eau sous la plaque correctrice.

D'autre part, il serait intéressant d'améliorer la structure du canal en intégrant une plateforme mobile ou en mettant en place un échafaudage autour du canal. Cela permettrait de pouvoir effectuer les photogrammétriques et les opérations de maintenance en bien plus facilement.

De plus, il est apparu après les expériences que le nivellement du sédiment avant écoulement n'était pas parfaitement homogène. Or, une légère variation dans le substrat peut engendrer un écoulement préférentiel qui peut être responsable de la morphologie observée à la fin de l'expérience. Il est proposé de dessiner, préalablement, un trait à l'aide d'un niveau laser sur toute la cuve en verre pour niveler le sédiment parfaitement. Cependant, l'attention particulière apportée à ce point pourrait engendrer des temps d'expérimentation considérablement allongés.

Enfin, l'humectation du sédiment préalable à toutes les expériences s'est avérée compliquée à mettre en place du fait de la pente. En effet, plus la pente était importante plus le substrat se ressuyait vite et donc les pores étaient rapidement remplis d'air. Le problème est ici que lors d'un écoulement sur ce type de substrat, les forces appliquées par le flux entraînent des phénomènes de surpression de l'air dans les pores et donc des transports sédimentaires et des morphologies incohérentes. Donc, pour pallier à ce problème le protocole a été adapté de telle sorte que le sédiment était nivelé, puis les photographies étaient prises, puis un très léger écoulement était passé dans le canal tout en supprimant les formes sédimentaires qui apparaissaient et enfin l'expérience pouvait débiter rapidement après la fermeture de la cuve.

Conclusion

Les résultats qui ont été obtenus dans le cadre de cette étude ont apporté plusieurs éléments concernant à la fois les domaines de l'hydraulique, du transport solide et de la morphodynamique fluviale en contexte montagnard. En ce qui concerne les aspects hydrauliques de l'expérience il a été noté une forte dépendance de toutes les grandeurs physiques (hauteurs, vitesses, débits, Froude) au volume de débâcle. Cependant, la dépendance de ces mêmes caractéristiques à la pente n'a pas été clairement mise en évidence. Toutefois, l'ensemble des débâcles, peu importe le volume, montraient une dynamique hydraulique forte avec des vitesses et débits instantanés importants.

Concernant le transport solide, c'est à la fois une dépendance nette au volume de débâcle ainsi qu'à la pente qui a été mise en évidence. En effet, il a été établi que les volumes de sédiment érodés suivaient une tendance linéaire croissante à l'augmentation du volume de débâcle. Il apparaît que la pente impactait très fortement les volumes érodés. En effet, aux plus fortes pentes, même les faibles volumes de débâcle engendraient un transport sédimentaire important jusqu'à l'aval du canal, contrairement à ce qui a été observé pour les faibles pentes.

Enfin, l'étude de la morphodynamique en contexte de forte pente a montré que les 2 paramètres (pente et volume de débâcle) avaient une influence sur le style morphologique observé après un écoulement. Ainsi, il a été montré que la dynamique hydraulique et les conditions initiales d'écoulement, notamment la pente, avaient une influence significative sur l'apparition de formes sédimentaires plus ou moins marquées.

Cela étant, il est possible de conclure de manière logique que plus le volume initial de débâcle est grand plus la quantité de sédiments remis en mouvement est importante, ce qui peut en conditions naturelles entraîner des engravements d'aménagement et entraîner des coûts financiers et humains catastrophiques. De plus, l'étude de l'influence des débâcles en conditions de montagne concerne une proportion de la population globale non négligeable. En effet, une part importante des populations vivant à proximité de montagnes sont soumises à ce risque de débâcles car les régions alpines sont le lieu d'implantation d'infrastructures telles que des barrages ou retenues d'altitude. Les cours d'eau peuvent être obstrués par des glissements de terrain qui peuvent rompre, tout comme les glaciers qui, en ce contexte de réchauffement climatique accéléré, voient leur stabilité fortement affectée. Il convient donc de mieux comprendre les processus à l'œuvre afin de mieux les appréhender et ainsi gérer et prévenir les risques de débâcles et mettre en place des protocoles de sécurité pour les populations concernées.

Concernant les perspectives à ce travail, la configuration actuelle du canal était simple afin de pouvoir explorer progressivement la thématique. Il serait donc intéressant, dans un deuxième temps, de varier les configurations initiales en modelant le substrat d'une manière particulière ou en intégrant au canal des obstacles pour évaluer le comportement du flux en conditions aménagées par exemple. De la même façon, faire varier les granulométries vers des plus grandes tailles pourrait être une piste intéressante afin d'observer la morphodynamique du cours d'eau en intégrant une classe qui peut être importante dans certains torrents. Enfin, l'installation étant modulable tant sur la partie canal que sur la partie sortie de cuve, il serait grandement profitable de faire varier ces paramètres morphologiques et observer leur influence sur la dynamique sédimentaire et hydraulique. Pour finir, les résultats qui ont été acquis ici viendront en support des résultats qui auront été établis par modélisation numérique. Ainsi, ces modèles pourront être validés et appliqués à différentes situations non-étudiables expérimentalement.

En somme, les potentialités de cet objet de recherche sont multiples et méritent d'être explorées plus en détail en améliorant les protocoles qui ont été mis en place dans le cadre de ce travail exploratoire.

Bibliographie

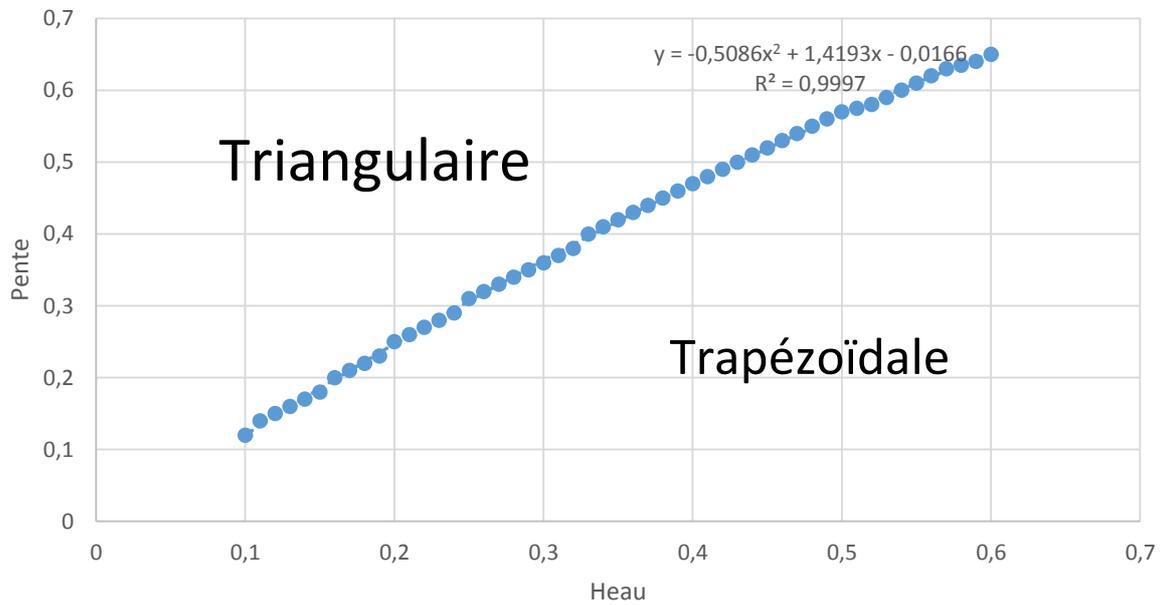
- Alcrudo F., Mulet J.**, 2007. Description of the Tous Dam break case study (Spain). *Journal of Hydraulic Research*, vol. 45, p. 45-57.
- Balmforth N.J., Mandre S.**, 2004. Dynamics of roll waves. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 514, p. 1-33.
- Bohorquez P., Fernandez-Feria R.**, 2008. Transport of suspended sediment under the dam-break flow on an inclined plane bed of arbitrary slope. *Hydrological Processes*, vol. 22, p. 2615-2633.
- Brooks G.R., Lawrence D.E.**, 1999. The drainage of the lake Ha! Ha! Reservoir and downstream geomorphic impacts along Ha! Ha! River, Saguenay area, Quebec, Canada. *Geomorphology*, vol. 28, p. 141-167
- 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, p.519-529.
- Capart H., Young D.L.**, 1998. Formation of a jump by the dam-break wave over a granular bed. *Journal of fluid Mechanics*, Vol. 372, p. 165-187.
- Capart H., Spinewine B., Young D.L., Zech Y., Brooks G.R., Leclerc M., Secretan Y.**, 2007. The 1996 Lake Ha! Ha! Breakout flood, Québec: Test data for geomorphic flood routing methods. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 45, p. 97-109.
- 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, p. 2837-2854.
- Carrivick J. L., Jones R., Keevil G.**, 2011. Experimental insights on geomorphological processes within dam-break outburst floods. *Journal of Hydrology*, vol. 408, p. 153-163.
- Chambon G., Laigle D.**, 2013. Les laves torrentielles *In* Recking A., Richard D., Degoutte G, coord. 2013, Torrents et rivières de montagne, Dynamique et aménagement.
- Collins S.H. et Moon G.C.**, 1979. Stereometric measurement of streambank erosion. *Photogrammetric Engineering and Remote sensing*, n°45, p. 183-190.
- 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*, Vol. 38, n°4, p. 421-430.
- Girard H.**, 2019. Modélisation d'une rupture de barrage sur un lit sédimentaire avec un canal expérimental. Rapport de Licence Professionnelle. Université Grenoble Alpes. 33 pages.
- Hsu H.C., Torres-Freyermuth A., Hsu T.J., Hwung H.H., Kuo P.C.**, 2014. On dam-break wave propagation and its implication to sediment erosion. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 52, p. 205-218.
- Hughes S., Liu P.L.F.**, 1993. Physical models and laboratory techniques in coastal engineering. Advanced series on ocean engineering. World Scie. Singapore.
- Janosi I.M., Jan D., Gabor Szabo K., Tél T.**, 2004. Turbulent drag reduction in dam-break flow. *Experiments in Fluids*, Vol. 37, p. 219-229.
- Kouliniski V.**, 1993. Etude la formation d'un lit torrentiel par confrontation d'essais sur modèle réduit et d'observation de terrain. Thèse, Université Joseph Fourier-Grenoble 1. 538 p.
- Lauber G., Hager W.H.**, 1998. Experiments to dambreak wave : slopping channel. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 36, n°5, p. 761-773.
- Liébault F., Remaître A., Peteuil C.**, 2013. Torrents et rivières de montagne (Recking et al., 2013), Chapitre 1 : Géomorphologie des rivières de montagne. Edition Quae, p. 15-89.
- Montgomery D.R., Buffington J.M.**, 1998. Channel processes, classification and responses. *River ecology and Management*, Naiman R, Bilby R (eds). Springer-Verlag: New York. P. 13-42.
- Painter R.B., Blyth K., Mosedale J.C., Kelly M.**, 1974. The effect of afforestation on erosion processes and sediment yield. *Effects of man on the Interface of the Hydrological Cycle with the Physical Environment*, International Association of Hydrological Sciences. N° 113, p. 62-68.
- Pritchard D., Hogg A.**, 2002. On sediment transport under dam-break flow. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 473, p. 265-274.
- Rickenmann D., Recking A.**, 2011. Evaluation of flow resistance in gravel-bed rivers through a large field data set. *Water Resources Research*, Vol. 47, 22p.
- Rushmer E.L.**, 2007. Physical-scale modelling of jökulhlaups (glacial outburst floods) with contrasting hydrograph shapes. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 32, p. 954-963.
- Soares-Frazão S., Le Grelle N., Spinewine B., Zech Y.**, 2007. Dam-break induced morphological changes in a channel with uniform sediments : measurements by a laser-sheet imaging technique. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, p. 87-95.

- Spinewine B., Capart H.,** 2013. Intense bed-load due to a sudden dam-break. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 731, p. 579-614.
- Spinewine B., Zech Y.,** 2007. Small-scale laboratory dam-break waves on movable beds. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 45, p. 73-86.
- Stojic M., Chandler J., Ashmore P., Luce J.,** 1998. The assessment of sediment transport rates by automated digital photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 64, n° 5., p. 387-395.
- Vuichard D., Zimmermann M.,** 1987. The 1985 Catastrophic Drainage of a Moraine-Dammed Lake, Khumbu Himal, Nepal : Cause and Consequences. Vol. 7, n°2, p. 91-110.
- Xia J., Lin B., Falconer R.A., Wang G.,** 2010. Modelling dam-break flows over mobile beds using a 2D coupled approach. *Advances in Water Resources*, vol. 33, p. 171-183.
- Zech Y., Soares-Frazão S.,** 2007. Dam-break flow experiments ad real-case data. A database from the European IMPACT research. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 45, p. 5-7.
- Zech Y., Soares-Frazão S., Spinewine B., Le Grelle N.,** 2008. Dam-break induced sediment movement: Experimental approaches and numerical modelling. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 46, n°2, p. 176-190.

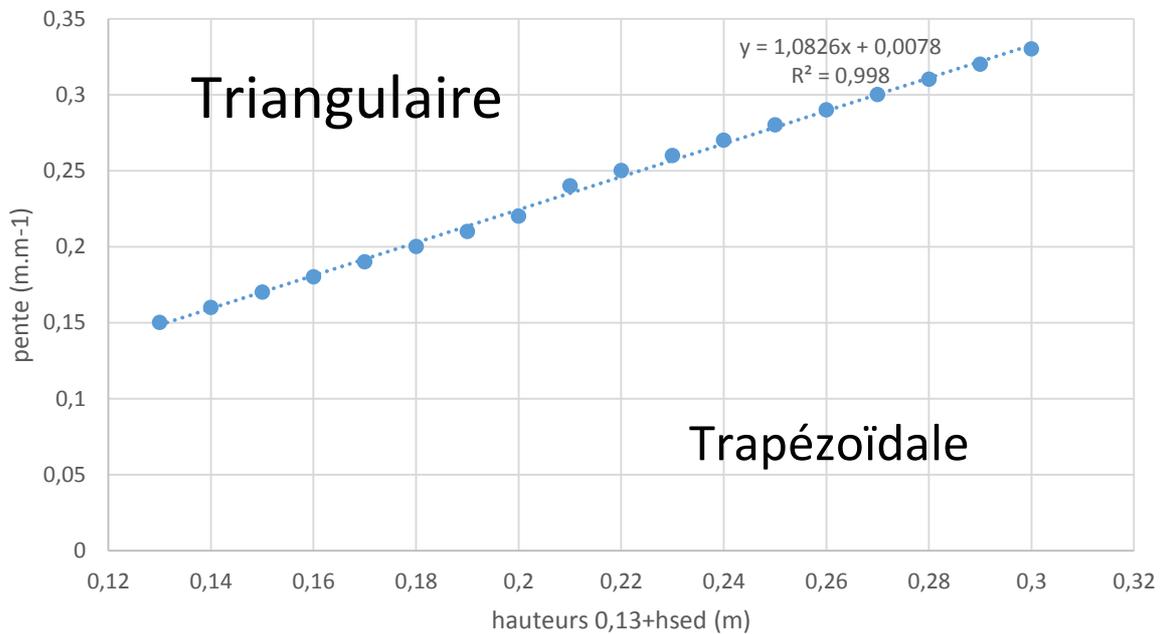
Annexes

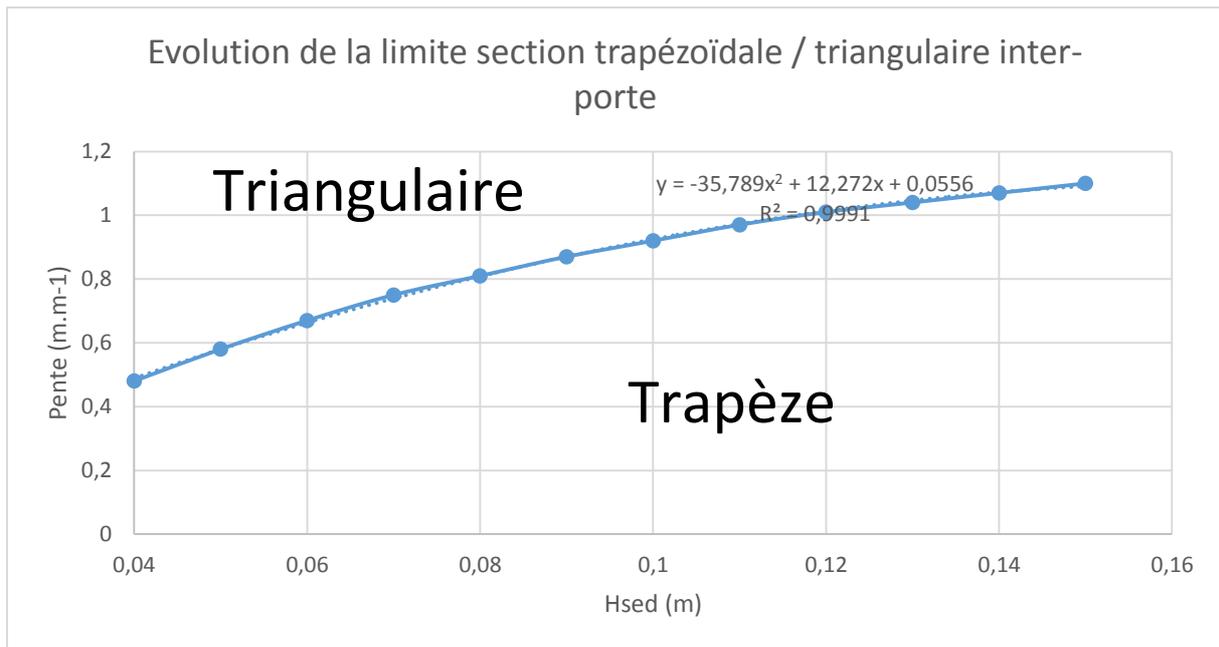
Annexe 1 : Courbes représentatives du passage d'une forme triangulaire à trapézoïdale pour les différents volumes de la cuve.

Evolution de la forme Trapézoïdale/triangulaire du volume total de la Cuve



Evolution de la limite section trapézoïdale/triangulaire volume mort de la cuve





Annexe 2 : Déviation entre le volume mesuré manuellement et calculé par photogrammétrie

