



HAL
open science

**Rapport final du projet 5.3.3 PAPROG / DFOGP
Déclenchement de laves torrentielles en conditions de
débâcles glaciaires, action 5.3 Risques en montagne du
Programme MTECT (DGPR/SRNH) – INRAE 2022
Connaissance et prévention des risques naturels et
hydrauliques**

Loïs Ribet, Dominique Laigle

► **To cite this version:**

Loïs Ribet, Dominique Laigle. Rapport final du projet 5.3.3 PAPROG / DFOGP Déclenchement de laves torrentielles en conditions de débâcles glaciaires, action 5.3 Risques en montagne du Programme MTECT (DGPR/SRNH) – INRAE 2022 Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques. Institut des géosciences de l'environnement (IGE), 38000 Grenoble; Inrae. 2023. hal-04727550

HAL Id: hal-04727550

<https://hal.inrae.fr/hal-04727550v1>

Submitted on 9 Oct 2024

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.



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET DE LA COHÉSION
DES TERRITOIRES**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Programme MTECT (DGPR/SRNH) – INRAE 2022

Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques

Ces travaux bénéficient du soutien du ministère chargé de la transition écologique et de la cohésion des territoires par décision de subvention n°2103680778.



5.3 Risques en montagne

5.3.3 PAPROG / DFOGP Déclenchement de laves torrentielles en conditions de débâcles glaciaires

Rédacteurs : L. Ribet, stage de Master 2 encadré par D. Laigle, UR ETNA

Étude de la variabilité des écoulements torrentiels en cas de débâcle rapide par modélisation physique



Réalisé à l'Institut Nationale de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE), sous la direction de Monsieur **LAIGLE Dominique**, ingénieur chercheur ICPEF (HDR).

Mémoire soutenu le 07 septembre 2022

Par : **RIBET Loïs**

Devant un jury constitué de :

Monsieur **SCHOENEICH Philippe**, Professeur des universités à l'UGA, Laboratoire PACTE UMR 5194 CNRS, tuteur pédagogique

Monsieur **GIAZZI Franck**, Maître de Conférences à l'UGA, Laboratoire PACTE UMR 5194 CNRS, enseignant référent

Année universitaire :

2021 – 2022

Sommaire

Remerciements	1
Résumé.....	2
Introduction.....	3
1 Etat de l'art.....	4
2 Objectifs du stage.....	11
3 Méthodologie.....	12
4 Résultats.....	17
5 Discussion.....	30
Conclusions.....	33
Perspectives.....	34
Bibliographie	40
Annexes	43
Résumé.....	68
Abstract	68

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier Dominique LAIGLE qui m'a encadré pour ce stage. J'ai beaucoup appris tout du long de ce stage avec toi, que ce soit sur la thématique des écoulements torrentiels ou sur la rigueur dans le travail. Merci pour tout le temps que tu as su me consacrer.

Je remercie également Frédéric LIEBAULT grâce à qui j'ai pu rejoindre l'unité ETNA pour faire ce stage, sans qui cette aventure ne se serait pas passée.

Merci à Philippe SCHOENEICH et Franck GIAZZI pour avoir accepté d'encadrer ce travail.

Un grand merci à Hervé BELLOT qui a su se rendre disponible pour m'aider sur le canal bien que tu étais débordé. Merci également pour tes bons conseils ainsi que pour les conversations très humaines qu'on a pu avoir.

Si ce stage s'est bien passé c'est également grâce à des personnes qui m'ont toujours aidé avec enthousiasme. Tout d'abord, merci à Christian EYMOND-GRIS et Thierry VASSEUR pour m'avoir aidé à rendre opérationnel le canal et pour toutes les bricoles qu'on a pu faire ensemble. Petite pensée au Micmo (Racing) qui nous a bien fait transpirer, hein Christian ? Merci Alexis BUFFET pour ta disponibilité et la joie que tu partages au quotidien.

Merci à tout le groupe de stagiaires de l'INRAE présent pendant ce stage. Ces 6 mois en votre compagnie ont été plus qu'agréables. Mention spéciale pour mes petits camarades de l'ETNA, Guillaume GRAILLE dit « Soufflerie » et Camille DEFERNAND. Merci pour avoir éclairci mes journées au CANAL ECOULEMENT DE BOUES.

Pour finir, je tiens à remercier mes amis avec qui j'ai pu vivre (littéralement pour certains) une incroyable et inoubliable dernière année d'étude. L'année est passée trop vite en votre compagnie. Merci.

Résumé

Par une approche expérimentale, ce mémoire vise à étudier la variabilité des écoulements torrentiels granulaires en cas de rupture brutale de barrage telle qu'une vidange d'un lac glaciaire ou une rupture de barrage naturel. Les écoulements ainsi formés peuvent mobiliser une grande quantité de matériaux à la faveur de fortes pentes et se révéler dangereux pour les enjeux anthropiques en aval. Ces écoulements peuvent cependant être de différentes natures (lave torrentielle, écoulement hyper-concentré, etc.), notamment selon la pente et le volume vidangé considérés.

C'est par une approche expérimentale que nous tentons ici d'apporter des éléments de compréhension sur l'influence de ces deux facteurs sur la nature des écoulements issus d'une rupture de barrage. Le modèle physique prend la forme d'un canal rectangulaire à fond mobile, respectant les similitudes de Froude. Pour des conditions initiales définies (géométrie, granulométrie et mode de formation), la versatilité des écoulements est étudiée pour un large spectre de pente allant de 1.70 à 36.24 % et des volumes d'eau claire vidangés différents.

Pour établir une analyse qualitative, trois caméras latérales et une zénithale, ont permis de décrire les écoulements. Le canal est en outre muni d'un dispositif de récupération des sédiments évacués et de cinq capteurs ultrasonores. Le traitement de ces données est venu appuyer l'analyse qualitative.

Les simulations ont révélé une multitude d'écoulements caractérisés par des traits morphologiques, des dynamiques et des modes de transport solide différents. Cette versatilité de phénomènes analogues à du charriage, de l'hyper-concentré, et des laves torrentielles traduit un continuum des types d'écoulement où la pente joue un rôle majeur.

Introduction

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'un stage de Master 2 GAED – GEOÏDES au sein de l'équipe tranSport solide, géomoRphologie, environneMent (STRIM) faisant partie de l'unité Érosion Torrentielle, Neiges et Avalanches (ETNA) de l'INRAE Grenoble. Il a pour objectif de décrire la variabilité des écoulements torrentiels granulaires en cas de rupture brutale de barrage. Pour ce faire, ce travail prend appui sur une approche expérimentale nouvelle au CANAL ECOULEMENT DE BOUE de l'INRAE. Un essai de typologie des écoulements sera ainsi proposé à partir d'une méthodologie combinant analyse qualitative et quantitative.

Aussi, ce mémoire est composé de cinq parties ; la première présente un état de l'art faisant tout d'abord un rappel du rôle joué par la pente dans les hydrosystèmes et son influence sur les différents écoulements qui y ont lieu. Il rend ensuite compte des connaissances actuelles sur la formation des écoulements torrentiels en cas de rupture de barrage en contexte de forte pente. À la suite de l'état de l'art, et le contextualisant, est introduit l'objectif du stage. S'en suit une présentation du dispositif et du protocole expérimental. Une quatrième partie présente et illustre les résultats obtenus par l'analyse des expérimentations. Pour finir, les résultats sont interprétés dans une cinquième et dernière partie dédiée à la discussion.

1 Etat de l'art

L'environnement montagnard conditionne le fonctionnement des cours d'eau qui s'y déploient. Tout d'abord, la topographie façonne des milieux avec de fortes pentes dans lesquels les chenaux d'écoulements évoluent. L'importante altitude des bassins versants donne lieu à des environnements favorables à la météorisation (gélifraction, végétation, etc...) des roches. La pente permet ensuite le transport de ces résidus jusqu'au talweg. Ce stock de sédiments est alors mobilisable à la faveur d'un forçage hydrologique qui prend soit la forme d'une crue provoquée par un épisode de précipitations intenses, localisées, d'origines orographiques, soit d'une débâcle provoquée par une rupture de barrage. Ces phénomènes s'illustrent par différents types d'écoulements favorables au transport solide.

1.1 La pente dans les hydrosystèmes de montagne

En 1927, Bernard (cité par Meunier, 1991) a mis en avant une classification des cours d'eau selon leur pente. Il distingue ainsi :

- Les rivières avec une pente inférieure à 1.5 % ;
- Les rivières torrentielles avec une pente comprise entre 1.5 et 6 % ;
- Les torrents avec une pente supérieure à 6 %.

Meunier (1991) affine cette typologie en ajoutant des attributs morphologiques et hydrologiques. Les torrents sont ainsi marqués par un lit et un profil plus irrégulier, leurs berges sont variables car plus facilement mobilisables par les écoulements. Ces cours d'eau sont par ailleurs caractérisés par un régime de crue induisant une forte variabilité hydrologique. La pente associée aux crues conduit à un comportement hydraulique très transitoire avec des écoulements à la fois plus rapides et plus turbulents. En outre, au regard de la taille du bassin versant, du faible débit, etc., les torrents ont une capacité de transport sédimentaire très importante (Piton et al., 2018). D'autres attributs peuvent être incorporés cette classification tels que l'activité géomorphologique ([Annexe 1](#)). La [Figure 1](#) propose une classification des rivières associant des critères hydrauliques et sédimentaires. De manière générale, il est admis qu'un torrent est un cours d'eau de versant proche des sources primaires de production sédimentaire tandis que les rivières torrentielles correspondent aux rivières de fond de vallées, exutoires des torrents (Recking, Degoutte, et al., 2013 ; Piton et al., 2018). Si la taille des bassins versant des rivières torrentielles est du même ordre de grandeur que celle des rivières de plaines, les phénomènes de transport solide qui s'y opèrent font que leur fonctionnement est similaire à celui des torrents (Laigle, 2015).

L'intérêt porté depuis plusieurs décennies aux systèmes torrentiels provient d'un changement de paradigme dans la gestion du risque torrentiel. Historiquement, l'étude des phénomènes impliquant le transport solide était cloisonnée aux grandes rivières torrentielles où la part de la phase solide est limitée (Couvert et Lefebvre, 1994). Les activités anthropiques s'étant développées plus haut dans les bassins, la vulnérabilité a elle aussi considérablement augmenté. Considéré auparavant comme une simple conséquence de l'écoulement torrentiel, le transport solide est alors apparu comme le phénomène dangereux pour les enjeux humains.

En conséquence, la gestion du risque torrentiel s'est orientée sur l'aménagement d'ouvrages passifs servant à contrôler (stocker, rediriger, etc.) le débit solide.

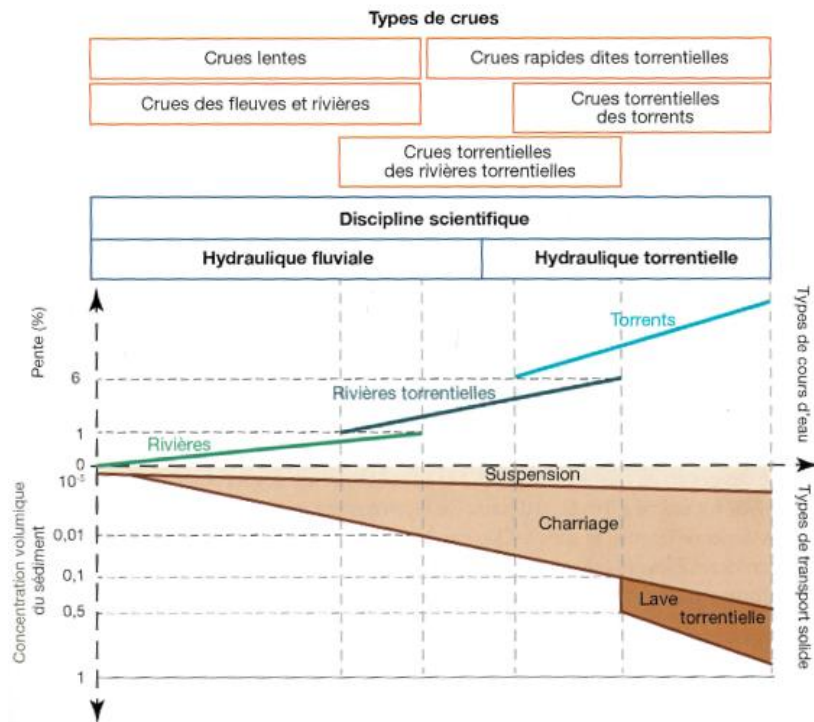


Figure 1 : Méthode de classification des types de rivières selon le transport solide et le type de crues (Laigle, 2015, adapté de Besson par A.-C. Lecomte)

Les cours d'eau de montagne sont caractérisés par un transport solide conséquent rendu possible par la présence d'une importante énergie gravitaire. Celle-ci se matérialise par la pente qui possède un double rôle. Tout d'abord, elle fournit le torrent en matériaux solides en provenance des versants (Meunier, 1991 ; Koulinski, 1994 ; Liébault et al., 2013). Très souvent les torrents finissent par stabiliser leur lit empêchant la mobilisation des matériaux du lit par les crues. Pour cela, le torrent joue sur la morphologie de son lit. Les pavages de surface ou les profils en long type step-pool sont des exemples d'un tel phénomène. Dans un contexte de stabilisation du lit, la mobilisation de matériaux au sein du lit est donc rendue possible par du matériau issu de l'érosion des versants. Le produit de la météorisation et de l'altération des versants est facilement transféré dans les talwegs par des processus gravitaires.

La pente caractérise par ailleurs l'énergie gravitaire disponible dans le chenal d'écoulement. Plus elle est forte et les débits importants, plus le cours d'eau peut mobiliser de grandes quantités de matériaux (Liébault et al., 2013). Or, lorsque la part du transport solide dans l'écoulement est conséquente, elle influe sensiblement l'hydraulique de ce dernier. En conséquence, la hauteur et la vitesse du fluide ne sont plus définies uniquement par le débit liquide mais aussi par le débit solide. La pente ôte ainsi la capacité qu'a l'hydraulique fluviale à caractériser le comportement de tels écoulements puisque cette dernière ne considère pas le transport solide dans ses formules. On parle alors d'écoulements torrentiels.

1.2 Les écoulements torrentiels

Liébault (2003) met en avant que plus la pente du cours d'eau est importante, plus le spectre des modes de transports sédimentaires y est important (Figure 1). De cette manière, les torrents sont marqués par quatre modes de transports différents : la suspension (*washload*), le charriage (*bedload*), les écoulements hyper-concentrés (*hyperconcentrated flow*) et les laves torrentielles (*debris flow*). D'après Meunier (1991), ces modes de transport sont répartis dans trois domaines différents. La Figure 2 dissocie l'hydraulique fluviale où le transport sédimentaire se limite à la suspension et au charriage, de l'hydraulique torrentielle avec des phénomènes relevant des écoulements hyper-concentrés et des laves torrentielles. La distinction entre ces deux domaines s'explique par l'utilisation de lois de comportements du fluide différentes. Dans le cadre de ce travail nous nous contenterons d'étudier les écoulements proches de l'axe des matériaux granulaires.

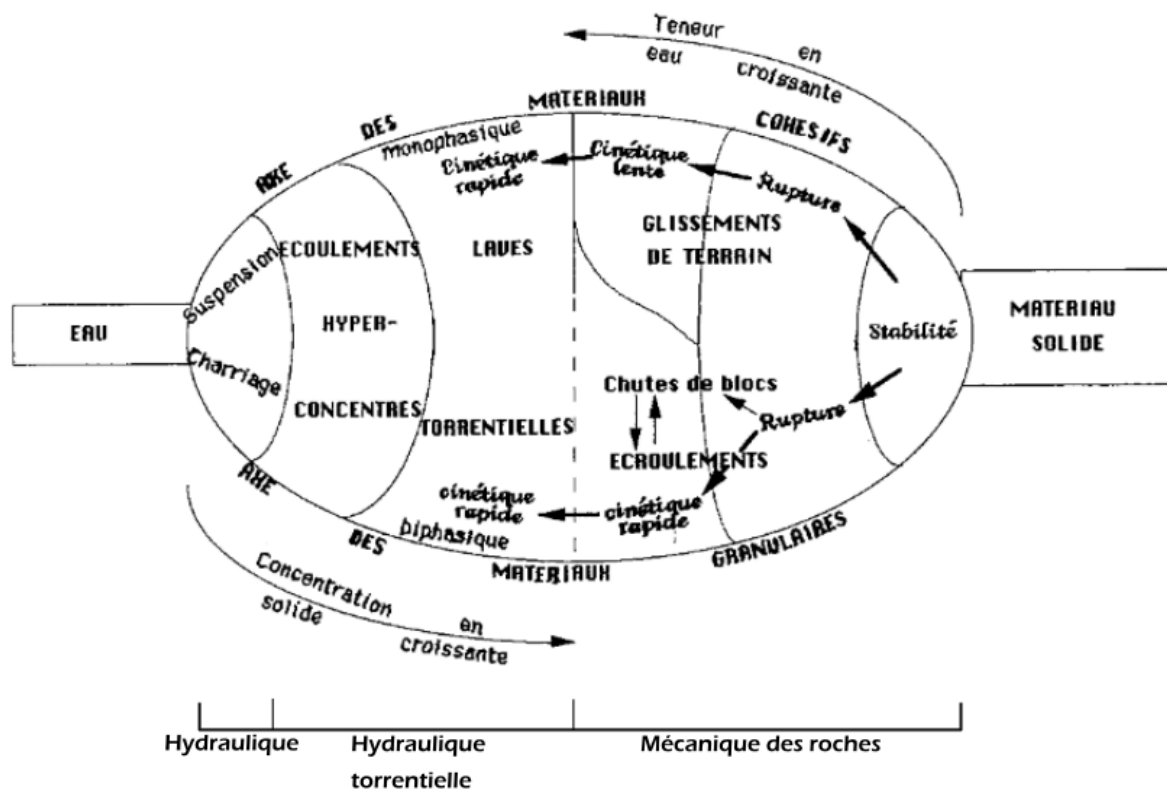


Figure 2 : Phénomènes relevant de l'hydraulique, de l'hydraulique torrentielle et de la mécanique des roches (d'après Meunier, 1991)

Le charriage correspond au transport sédimentaire en interaction avec le lit. Le déplacement des grains se fait par à coup à une vitesse bien inférieure à celle de l'eau (on parle d'écoulement bi-phasique) selon plusieurs modes : le roulement, le glissement et la saltation. Il est admis que le charriage peut avoir un caractère morphogène très important lors de crue et, dès lors être à l'origine d'une grande variété paysagère des hydrosystèmes (Liébault et al., 2013 ; Laigle, 2015).

1.2.1 Le domaine des écoulements hyper-concentrés

Les écoulements désignés comme hyper-concentrés correspondent aux phénomènes où le déplacement de la charge solide n'est plus identifiable comme du charriage et où les écoulements ne correspondent pas non plus aux laves torrentielles.

Pour des écoulements hyper-concentrés très proches de l'axe des matériaux granulaires de la [Figure 2](#), Takahashi (2007) a expérimentalement identifié des écoulements très transitoires, proches du domaine des laves torrentielles qu'il a appelé *immature debris flow*. Il a évalué leur concentration moyenne en particules grossières entre 0,02 et 0,2. Pour de telles gammes de concentrations, les sédiments en mouvement ne sont pas dispersés sur toute la hauteur de l'écoulement mais concentrés dans une couche inférieure sur laquelle une couche d'eau évolue avec potentiellement de la suspension. D'un point de vue purement phénoménologique, ces phénomènes se caractérisent par une charge de fond par charriage mais dont l'épaisseur est supérieure au diamètre des grains mobilisés (Meunier, 1991 ; Koulinski, 1994). L'instabilité de l'écoulement est un second critère mis en avant par Meunier. Elle s'interprète par des alternances de mouvements latéraux dues à un transport solide par paquets qui s'arrêtent et repartent. En France, ce type d'écoulement est plutôt désigné comme du charriage hyper-concentré (Meunier, 1991 ; Koulinski, 1994).

Du côté des écoulements hyper-concentrés avec une part importante de matériaux cohésifs, Pierson (2005) considère ces *hyperconcentrated flow* comme des écoulements à part entière, de transition entre les *water flow* et les *debris flow*. Le fluide porteur est régi par des lois de comportements qui lui sont spécifiques appartenant à la rhéologie. Ainsi à profondeur et pente égales, la vitesse moyenne de l'écoulement et la quantité de sédiment transporté sont plus importantes pour ces *hyperconcentrated flow* que pour du charriage classique. Ce type d'écoulement paraît correspondre à ce que Koulinski (1994) appelle de la suspension hyper-concentrée.

1.2.2 Le domaine des laves torrentielles

Les laves torrentielles (au sens de *debris flow*) sont des écoulements en masse, rapides, d'eau et de matériaux solides, ayant le plus souvent lieu dans les chenaux des systèmes torrentiels à la faveur de fortes pentes (de l'ordre de 30 % pour les zones de départ). Ces caractéristiques donnent aux laves torrentielles un fort potentiel de destruction (Laigle et Bardou, 2022).

Ces écoulements de masses composés d'un fluide et d'une quantité très importante de matériaux grossiers, sont contrôlés par la gravité et l'eau. Ceci confère des propriétés rhéologiques particulières aux laves permettant une distribution verticale du cisaillement qui explique en partie leur comportement en tant que fluide. Mécaniquement, la forte concentration volumique de matériaux (0,45 à 0,8) associée à une grande étendue granulométrique fait que ces écoulements ne sont plus uniquement contrôlés par l'hydraulique mais également par l'interaction des matériaux solides entre eux. Ceci donne à l'écoulement une apparence cinématiquement monophasique, homogène, plutôt laminaire et rapide (Chambon & Laigle, 2013). Cette vitesse est relative au domaine des mouvements de masse où, malgré la mobilisation d'éléments de grande taille et de fortes concentrations,

les laves torrentielles font parties des phénomènes les plus rapides (Takahashi, 2007 ; Laigle & Bardou, 2022).

L'écoulement lui-même est transitoire (débit très variable dans le temps) et leur propagation au sien d'un chenal d'écoulement se fait par bouffées successives et indépendantes prenant la forme d'une vague précédée d'un front raide. Ce mode de propagation entraîne des cycles de dépôts et de reprises des sédiments mobilisés. Dans les cas où la géométrie du chenal permet une contrainte latérale suffisamment importante et stable, les bouffées sont généralement constituées de quatre entités fonctionnelles (Figure 3) (Chambon & Laigle, 2013) :

- Un front granulaire constitué des plus gros blocs et parfois de corps étrangers (type troncs) et dont le mouvement semble être provoqué par la poussée du corps de la bouffée ;
- Un corps qui suit le front et présente un aspect plus boueux que ce dernier car le liquide interstitiel y est plus important, noyant ainsi les blocs ;
- Des bourrelets latéraux situés de part et d'autre du corps mais présentant un aspect similaire au front. Ils sont en fait constitués de blocs s'échappant du front et sont par conséquent plus grossiers que ceux du corps ;
- Une queue de coulée qui correspond au passage progressif vers un écoulement moins concentré et de ce fait, plus turbulent et bi-phasique.

Le domaine des laves torrentielles se distingue de l'hyper-concentré par ces traits morphologiques distinctifs et par son caractère transitoire par bouffées (Meunier, 1991).

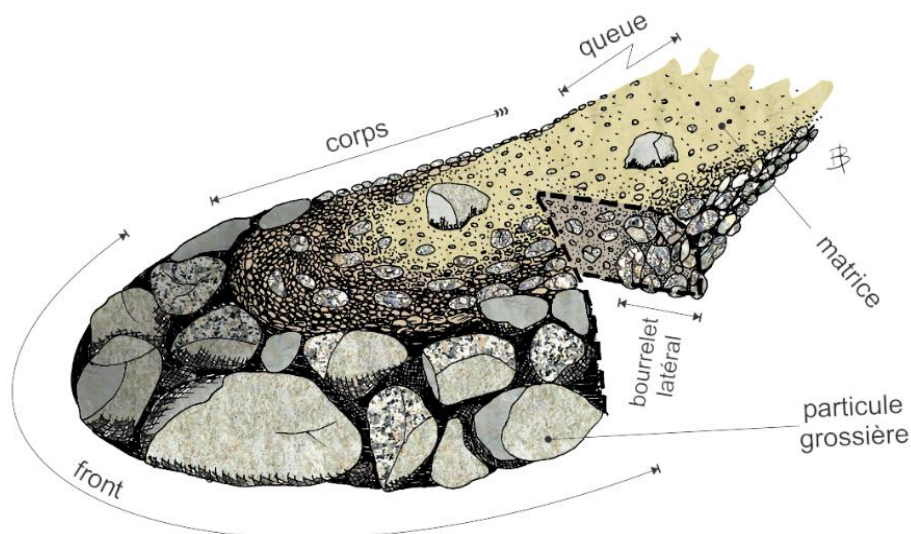


Figure 3 : Profil d'une bouffée d'une lave torrentielle (d'après Bardou, Chambon & Laigle, 2013)

La distribution granulométrique des laves torrentielles impacte le comportement du fluide porteur (Chambon & Laigle, 2013) . Ainsi il est possible d'organiser une classification des laves torrentielles selon leur mécanique d'écoulement (Annexe 2) (Chambon & Laigle, 2013 ; Wieczorek & Naeser, 2000 ; Takahashi, 2007). D'un point de vue granulométrique, Coussot (1994) considère les laves torrentielles granulaires lorsque la fraction granulométrique inférieure 40 µm représente moins de 1 % du volume de solide total mobilisé.

1.3 La rupture de barrage comme facteur de formation des écoulements torrentiels

Les ruptures de barrage peuvent être l'origine d'une importante entrée d'eau dans le système. L'Annexe 3 énumère les différents types de barrages qui peuvent être concernés par le sujet de ce travail. La vitesse de rupture est un des critères utilisés pour la caractérisation de ces événements car elle influe sur la magnitude du volume d'eau entrant dans le système. Il est ainsi possible de distinguer les ruptures brutales issues d'un effacement rapide de la structure (*dam failure*), des ruptures par submersion ou par fuite (*overtopping*). Dans le cas d'une rupture brutale, le forçage hydrologique, en plus d'être important, se fait sur une échelle de temps très courte. De telles débâcles peuvent provoquer des crues éclairs de magnitude nettement supérieure à ce que le régime naturel du cours d'eau peut produire (Brooks et Lawrence, 1999). Cet apport massif en eau entraîne des écoulements très turbulents, capables d'éroder et de mobiliser des volumes de matériaux, parfois à hauteur du volume d'eau initial vidangé (Spinewine et Zech, 2007) et, en contexte de pente, d'entraîner des écoulements torrentiels. De par leur concentration et leur importante étendue granulométrique, ces phénomènes ont un caractère morphogène exceptionnel compte tenu de l'échelle temporelle et spatiale sur laquelle ils se produisent (Brooks & Lawrence, 1999 ; Schuster, 2000 ; Soares-Frazão et al., 2007).

Ainsi, et malgré le fait que ce type d'évènement soit rare (Schuster, 2000), avec une augmentation de la vulnérabilité (humaine et matérielle) dans les vallées alpines, les autorités suisses ont été amenées à rendre obligatoire l'étude des ruptures de barrages pour le développement de ces territoires (Ancey et al., 2018). La rupture de la poche d'eau sous-glaciaire du glacier de la Griaiz dans le massif du Mont-Blanc en 2015 est une bonne illustration de cet enjeu dans les Alpes françaises. La débâcle a provoqué une lave torrentielle qui s'est écoulée jusqu'à la commune des Houches, 2000 m en-dessous du glacier. Cette inquiétude est manifeste dans d'autres chaînes de montagnes telles que dans l'Himalaya où, compte tenu du changement climatique, la formation de lacs glaciaires suite au retrait des glaciers est un phénomène particulièrement suivi (Bajracharya et al., 2007). En effet, d'après Schild (cité par Bajracharya et al., 2007) l'augmentation du nombre de lacs glaciaires mène intrinsèquement à une augmentation du risque potentiel d'inondation par rupture de lac glaciaire. Les impacts du changement climatique sur la cryosphère (fonte des neiges, glaces, glaciers et du permafrost) ont effectivement augmenté la fréquence et l'intensité des laves torrentielles dans la région Hindu Kouch-Himalaya et pourraient avoir des conséquences sur la distribution spatiale des zones de formation des laves torrentielles dans les Alpes italiennes (IPCC, 2022).

1.4 L'apport de la modélisation physique

De manière générale, il est complexe d'étudier les événements hydrologiques extrêmes. En effet, le danger, l'endommagement des stations de mesures, savoir quelle localisation pour quel type d'évènement, etc... (Alcrudo et Mulet, 2007) rendent l'observation et l'acquisition de données complexes. Ce constat est d'autant plus vrai pour les bassins de montagne car ils sont peu instrumentés et moins peuplés (Mathys et al., 2013). Ainsi, l'observation d'écoulements torrentiels en tête de bassin où ils se forment reste très rare. Par conséquent,

l'analyse de ces phénomènes est très souvent faite à partir de mesures indirectes (témoignages, laisses d'évènement, etc.) qui possèdent un certain degré d'inexactitude.

Si la modélisation physique possède de nombreux intérêts (Richard & Pestour, 2004 ; Le Guern, 2014), elle offre principalement la possibilité d'analyser des phénomènes et des processus ciblés avec une répétabilité des expériences. L'inconvénient est qu'en système réel les processus sont orchestrés par de nombreuses lois physiques ne pouvant pas toujours être satisfaites par le modèle réduit (Chambon & Laigle, 2013).

Malgré l'influence certaine de la pente sur le comportement des écoulements avec un transport solide non négligeable, la littérature n'a que très peu étudié l'influence de ce paramètre sur la formation d'écoulements torrentiels. Ceci est d'autant plus vrai pour des phénomènes granulaires formés par rupture de barrage. À ce titre, l'Annexe 4 propose un recensement non-exhaustif d'études utilisant un modèle physique dans des cadres d'études se rapprochant du présent travail. Les fortes pentes, et par extension les écoulements qui y sont associés, n'ont que très peu été considérées puisque les modèles utilisés, hors études menée par l'INRAE, atteignent rarement plus de 6 % de pente. Pareillement, les phénomènes de rupture brutale de barrage ne sont qu'à l'état de prospection. Ceci est dommageable pour les enjeux montagnards puisque le spectre de pente des thalwegs des vallées contenant des barrages (anthropiques) peut varier de quelques pourcents à 50 % (Lauber et Hager, 1998).

Hanson et al. (2005) ont montré que la crue générée par la submersion d'un barrage est dépendante de la taille de sa retenue, de la taille et la forme prise par la rupture mais aussi du temps de rupture. Rushmer (2007) a analysé ce dernier point dans le cas des G.L.O.F. (Glacial Lake Outburst Flow). Ses résultats montrent que la forme de l'hydrogramme de crue influe sur le taux d'accélération et de décélération de la vidange. Ceci impacte fortement la dynamique sédimentaire (sédiments transportés, déposés, et la morphologie du lit) de l'écoulement résultant de la débâcle. Il identifie les ruptures brutales, où l'hydrogramme s'illustre par une augmentation rapide et linéaire du débit puis, une décrue lente, exponentiellement descendante ; les ruptures progressives, où le volume de la débâcle augmente lentement et de manière exponentielle tandis que le débit de la décrue décroît de manière linéaire.

2 Objectifs du stage

Il est reconnu que la pente et les débits de crues fournissent l'énergie assurant le transport sédimentaire dans les cours d'eau de montagnes, ce dernier pouvant prendre différentes modalités (Liébault et al., 2013 ; Laigle, 2015). En effet, plus la pente augmente, plus les modes de transport solide peuvent être variés. Ce travail expérimental cherche ainsi à étudier cette versatilité pour des écoulements granulaires, à travers la variation de la pente et du volume de débâcle pour un état initial défini. En effet, ce stage se positionne sur des écoulements dont la formation est issue d'une rupture brutale de barrage et non d'une crue hydrologique.

Pour apporter des éléments de compréhension sur la formation de ces d'écoulements, ce travail s'inscrit dans une démarche d'analyse qualitative où l'observation est essentielle. Ceci permettra de caractériser les écoulements produits à partir de critères morphologiques et dynamiques définis à la fois par l'analyse des vidéos et de critères d'identification issus de la littérature. Cette approche sera accompagnée par l'exploitation de données instrumentales dans le but d'aider à l'identification de grands domaines d'écoulements. De cette manière, après avoir exploré le spectre des écoulements produits, il serait possible d'en établir une typologie.

Cette démarche est justifiée par le manque d'informations et de données sur ces phénomènes en contexte de fortes pentes. L'état de connaissances dressées précédemment a effectivement révélé l'absence d'études portant sur cet objet malgré des enjeux concrets.

3 Méthodologie

Le travail produit avec le CANAL ECOULEMENT DE BOUES de l'INRAE pour ce présent rapport est dans la continuité des travaux de Sow (2021), Andréault (2020) et Girard (2019). Il a été décidé de reprendre l'approche expérimentale mise en œuvre par ces prédécesseurs. Cependant, la méthodologie a été modifiée notamment parce que certains paramètres ont été redéfinis.

3.1 Dispositif expérimental

3.1.1 Principe du modèle physique à fond mobilisable

Un modèle physique cherche à reproduire les processus d'un système physique (« naturel ») à plus petite échelle (de manière générale). Ceci induit que les résultats déterminés par le modèle doivent avoir une réelle signification par rapport au terrain. Pour Hughes (1993), cette représentativité est vérifiée lorsque « *les forces prépondérantes qui agissent sur le système sont représentées sur le modèle en proportion convenable par rapport au système physique lui-même* ». Pour cela, le modèle se doit de respecter un ensemble de trois règles dites de similitudes par rapport au système réel (Koulinski, 1994) :

- Similitude géométrique : les rapports de dimension doivent être identiques ;
- Similitude cinématique : les vitesses doivent être identiques ;
- Similitude dynamique : les rapports de forces doivent être identiques.

Les similitudes de cinématique et de dynamique sont dépendantes du respect de la similitude géométrique. Cette dernière se détermine par une analyse dimensionnelle qui permet de vérifier l'homogénéité des grandeurs physiques étudiées entre un système et son modèle. Il est donc nécessaire de connaître les nombres adimensionnels pertinents au sujet d'étude.

Le modèle physique expérimental utilisé ici cherche à représenter les dynamiques hydrauliques et sédimentaires au sein d'un canal à fond mobile. Les principales forces qui interviennent dans la dynamique hydraulique sont (Martaud et Heywood 1999). :

- Les forces d'inertie ;
- Les forces de turbulence ;
- Les forces de viscosité ;
- L'action de la pesanteur ;
- La capillarité.

L'analyse dimensionnelle de ces forces pour la modélisation d'écoulement turbulent en surface libre requiert le respect des sept nombres adimensionnels présentés dans l'Annexe 5. L'hypothèse retenue est que le canal possède une similitude géométrique de 1/50 selon un système en milieu naturel. À l'instar d'un modèle générique, notre modèle n'est représentatif d'aucun chenal d'écoulement torrentiel naturel puisque c'est un modèle analogue. Cette échelle de 1/50 est donc tout à fait arbitraire. Le Tableau 1 permet de faire le lien entre les grandeurs d'un système naturel et celles du modèle physique en donnant pour chacune de ces grandeurs le facteur d'échelle à utiliser.

Grandeur	Facteur d'échelle
Longueur canal, en m (L)	λ
Largeur canal, en m (l)	λ
Hauteur d'écoulement, en m (h)	λ
Epaisseur de sédiment, en m (h_{sed})	λ
Diamètre particule, en m (D)	λ
Volume, en m ³ (V)	λ^3
Temps, en s (t)	$\sqrt{\lambda}$
Vitesse d'écoulement, en m.s ⁻¹ (U)	$\sqrt{\lambda}$
Débit, en m ³ .s ⁻¹ (Q)	$\lambda^{5/2}$

Tableau 1 : Facteur d'échelle pour chaque grandeur (avec $\lambda = 1/50$)

3.1.2 Le canal hydraulique

Les expérimentations ont été faites avec un canal expérimental (Figure 4). Le fond du canal est en bois aggloméré sur une longueur de 5 m. Sa largeur est déterminée par la présence de vitres de 0,5 m de hauteur et espacées de 0,2 m. Le canal est installé sur une structure métallique dont un treuil positionné à l'amont permet de faire varier la pente de 0 à 51,8 % via un système de taquet à même la structure. L'ensemble permet de modéliser un chenal d'écoulement analogue. Le canal est en outre muni à l'extrémité amont d'une cuve de dimensions : 0,785 m x 0,97 m x 0,745 m. La capacité maximale de la cuve est de 352 L (Annexe 6). Une vanne guillotine en métal s'ouvrant à l'aide d'un vérin pneumatique permet de libérer le volume à vidanger à la manière d'une rupture brutale d'un barrage.

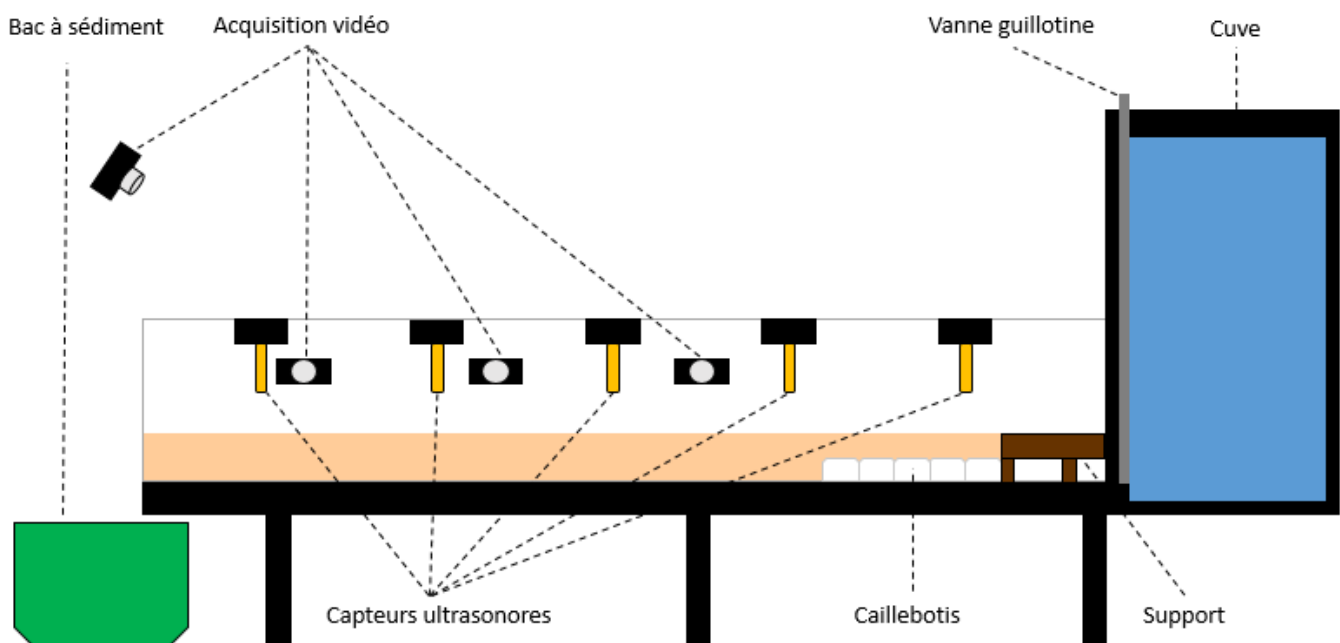


Figure 4 : Dispositif expérimental

Le canal est rempli d'une couche de sable (3.1.3) de 0,08 m de hauteur. Cette hauteur est contrôlée par deux plaques PVC à l'extrémité amont et à l'extrémité aval. Cette dernière est percée de plusieurs trous afin d'évacuer l'eau saturant le lit et est recouverte d'un tamis pour

empêcher les sédiments de s'évacuer en même temps que l'eau. L'ouverture instantanée de la vanne pouvant créer des écoulements très puissants capables d'éroder le lit de sable sur toute son épaisseur, il a été décidé d'ajouter un lit de caillebotis en alvéole (0,032 m de hauteur) dans l'objectif de créer un substratum non mobilisable analogue à un substratum rocheux.

3.1.3 La granulométrie

La granulométrie joue un rôle central dans la modélisation du transport sédimentaire au sein d'un modèle physique à fond mobile. Les sédiments utilisés lors des stages précédents étaient du sable de piscine dont la granulométrie est indiquée par le fournisseur comme allant de 0.5 à 2 mm. Pour rester dans la continuité de ces travaux, et pouvoir ainsi les comparer, ce sont les mêmes sédiments qui ont été utilisés ici. Une courbe granulométrique a cependant été produite dans le but de vérifier les informations du fournisseur. La [Figure 5](#) montre ainsi une granulométrie très peu étendue avec, selon l'échelle de Wentworth (1922), 100 % de sable [0.062 ; 2 mm]. Cependant presque 16 % des grains ont un diamètre inférieur à ce que le fournisseur indique.

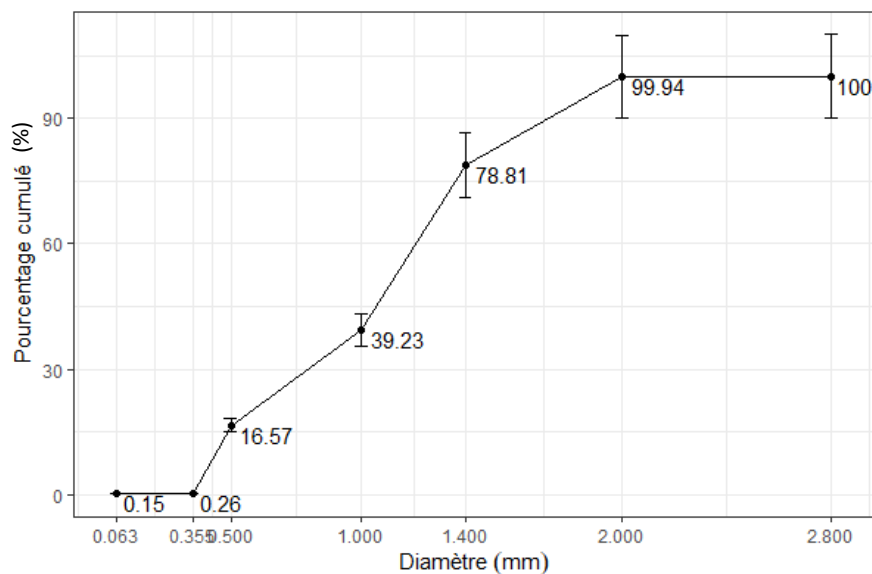


Figure 5 : Courbe granulométrique

Comme l'indique le [Tableau 1](#), les sédiments sont également soumis à la loi de similitude géométrique. Avec l'échelle au 1/50, ceci fait qu'en système naturel, les grains utilisés correspondent à des galets allant du très fin (*very fine pebble*) à de l'intermédiaire (*medium pebble*) (de 3.15 à 14 cm de diamètre). Cette granulométrie très peu étendue et sans particules fines fait que les simulations représentent un milieu granulaire.

3.2 Dispositifs de mesures

3.2.1 L'acquisition vidéo

Lors des expériences, a été mise en œuvre une acquisition vidéo par trois appareils photo et une webcam (**Annexe 7A ; B ; C ; D**) selon quatre points de vue différents. Leur positionnement est illustré sur la **Figure 4**. La webcam à l'amont permet d'avoir un grand angle sur le début de l'écoulement après la première phase d'érosion au droit du support à l'extrême amont.

De par son point de vue zénithal, l'appareil photo à l'extrême aval enregistre la totalité de l'écoulement, depuis la vidange jusqu'à l'évacuation des sédiments en aval. Ceci permet de caractériser la morphologie et la dynamique de la débâcle.

Pour qualifier le mode de transport solide, ce sont les prises de vues latérales enregistrant la dynamique interne de l'écoulement qui remplissent cet objectif. Toutefois, l'idée d'avoir un point de vue latéral est venu au milieu de la phase expérimentale du stage. Ainsi, il n'y a pas vidéo latérale jusqu'à 17.29 %.

3.2.2 Le bilan sédimentaire

Pour presque chaque expérience, la débâcle a mobilisé une certaine quantité de sédiment jusqu'à l'évacuer du canal. Pour quantifier ce volume sédimentaire évacué, le canal a été muni à son extrémité aval d'un dispositif de récupération du sédiment (**Annexe 7E**) : un bac dont le fond est troué et recouvert d'un tamis. Pour estimer le bilan sédimentaire de l'expérience, le dispositif de récupération est pesé (**Annexe 7F**) et deux échantillons de la masse totale de sédiment évacué sont prélevés, pesés (**Annexe 7G**) puis séchés à 70°C pendant 24h dans une étuve (**Annexe 7H**). L'estimation du bilan sédimentaire se fait ensuite par :

- Le calcul du taux d'humidité (H) par $\frac{m_{eau}}{m_{echh}}$.

Où m_{eau} est la masse d'eau présente dans les échantillons (g) et m_{echh} est la masse des échantillons (g) avant leur passage à l'étuve ;

- Le calcul de la masse totale de sédiment évacué ($m_{sed'}$) (g) par $m_{sed} * H - m_{sed}$.

Où m_{sed} est la masse totale de sédiment évacué plus l'humidité (en g) et H le taux d'humidité ;

- Et le calcul du volume sédimentaire (cm^3) par $\frac{m_{sed'}}{\rho_{grain}}$.

Où $m_{sed'}$ est masse totale de sédiment évacué (g) et ρ_{grain} la masse volumique du grain (2.59 g.cm⁻³).

La méthode pour estimer la masse volumique du grain sans porosité (ρ_{grain}) est disponible en **Annexe 8**.

3.2.3 Les capteurs ultrasonores

Le canal est muni de cinq capteurs ultrasonores (**Annexe 7I ; J**) qui établissent un limnigramme de l'écoulement produit par la vidange de la cuve via l'acquisition des hauteurs d'écoulement tous les centièmes de seconde. De l'amont vers l'aval, les capteurs sont nommés C1, C2, C3, C4 et C5. C1 et C5 sont des modèles *Banner U-GAGTEM Analog Q45UR* plus récents que les trois autres capteurs. Ces derniers (C2, C3, C4) sont des *Weidmüller LRS3*. Les deux *Banner* enregistrent sur une plage de hauteur comprise entre 5 et 25 cm tandis que les trois *Weidmüller* enregistrent une gamme de hauteur entre 8 et 80 cm.

C1 a été placé à 1,20 m de la cuve pour ne pas enregistrer ce que Sow (2021) a identifié comme un ressaut hydraulique qui érode le lit et forme une fosse de dissipation d'énergie. Le support de 0,6 m à l'aval immédiat de la cuve a pour objectif de diminuer l'influence de cette macro-forme lors de la vidange. Les autres capteurs ultrasonores sont installés à équidistance (0,85 m) les uns des autres dans le but d'avoir une bonne homogénéité de la mesure sur tout le canal.

Les données sont stockées en sortie dans un fichier au format *.TDMS*. Créé par *National Instruments*, ce format peut s'ouvrir sur EXCEL et de les convertir en *.xls*. Il est alors possible d'illustrer le comportement de la vague par sa hauteur en fonction du temps. Lors du dépouillement de ces données, il a été remarqué que les capteurs, notamment les *Weidmüller LRS3*, enregistraient ponctuellement des valeurs aberrantes. Ces anomalies ont été supprimées.

Une phase de calibration des capteurs a été faite au préalable des expérimentations. Sa méthodologie est disponible en [Annexe 9](#).

3.3 Protocole expérimental

Les paramètres ainsi choisis font que le canal possède à l'état initial une pente constante et une géométrie identique en tout point. Dans ces conditions, pour une pente et un volume de vidange donné, chaque vidange d'eau claire crée un écoulement qui, bien que brutale de par la nature de l'entrée, permet la répétabilité des expériences.

Le [Figure 6](#) illustre le déroulement type d'une expérimentation. Quelques étapes restent à clarifier car elles n'ont pas été abordées précédemment :

- Humectation des sédiments : cette étape est essentielle. Elle consiste à complètement saturer en eau le lit du canal par un léger écoulement pré-expérience afin d'atteindre des conditions d'humectation initiales comparables entre chaque expérience. L'humectation a deux autres avantages. Le second est que cette situation initiale est semblable au terrain où, la situation la plus favorable au déclenchement d'une lave torrentielle est lorsque les sols sont saturés. Le dernier avantage est que ça évacue l'air entre les grains qui, lors du passage de la vague, pourrait former des surpressions qui mobiliseraient des sédiments de manière incohérente (Spinewine & Zech, 2007) ;
- Rôle du contacteur : est un bouton transmettant un signal électrique à la centrale d'acquisition pour que débute l'acquisition des données ultrasonores. L'envoi de ce signal se fait donc simultanément à l'ouverture de la vanne.

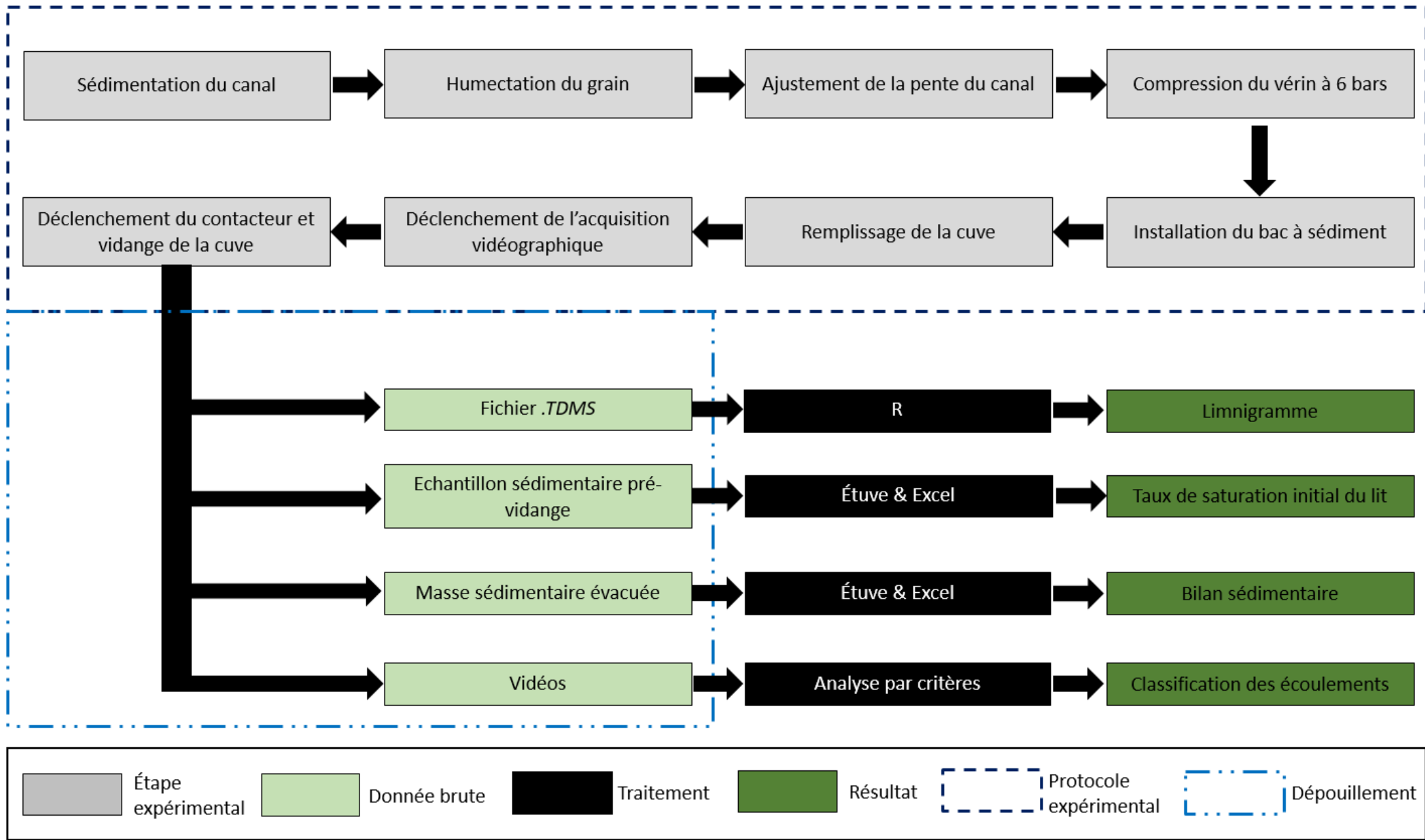


Figure 6 : Méthodologie expérimentale simplifiée

4 Résultats

Le travail expérimental a permis de balayer seize valeurs de pente pour un total de quatre-vingt-quatorze expériences ([Annexe 10](#)). Si les pentes et les divers volumes de vidange prospectés ont formé des écoulements différents, la répétabilité du modèle expérimental permet d'étudier et d'inter-comparer ces écoulements. Ceci permet d'explorer la variabilité des écoulements torrentiels et des phénomènes transitionnels qui peuvent avoir lieu. L'objectif est de dresser une typologie des écoulements produits. Pour cela, ils sont dans un premier temps étudiés selon une démarche qualitative puis une démarche quantitative.

4.1 Analyse qualitative

Cette partie repose sur l'analyse des vidéos qui nous a permis d'établir des critères discriminants pour décrire et comparer les écoulements observés.

4.1.1 Description des écoulements observés

Les 94 expériences produites ont très logiquement donné une multitude d'écoulements. Pour étudier cette variabilité il est nécessaire de pouvoir les différencier. À partir de la littérature ([cf 1.2](#)) et de l'analyse vidéo, dix-sept critères d'identification d'écoulement ont été établis. Le travail se basant sur la description de vidéo, ces critères caractérisent des éléments visibles, relatifs à la morphologie et à la dynamique des écoulements. Une première description a ainsi été produite ([Annexe 11](#)). Puisqu'ils décrivent les caractéristiques classiquement attribuées par la littérature aux laves torrentielles – *debris flow*, ce sont les sept critères présentés ci-dessous qui seront retenus pour la suite du travail.

Trois critères renseignent sur la morphologie de l'écoulement :

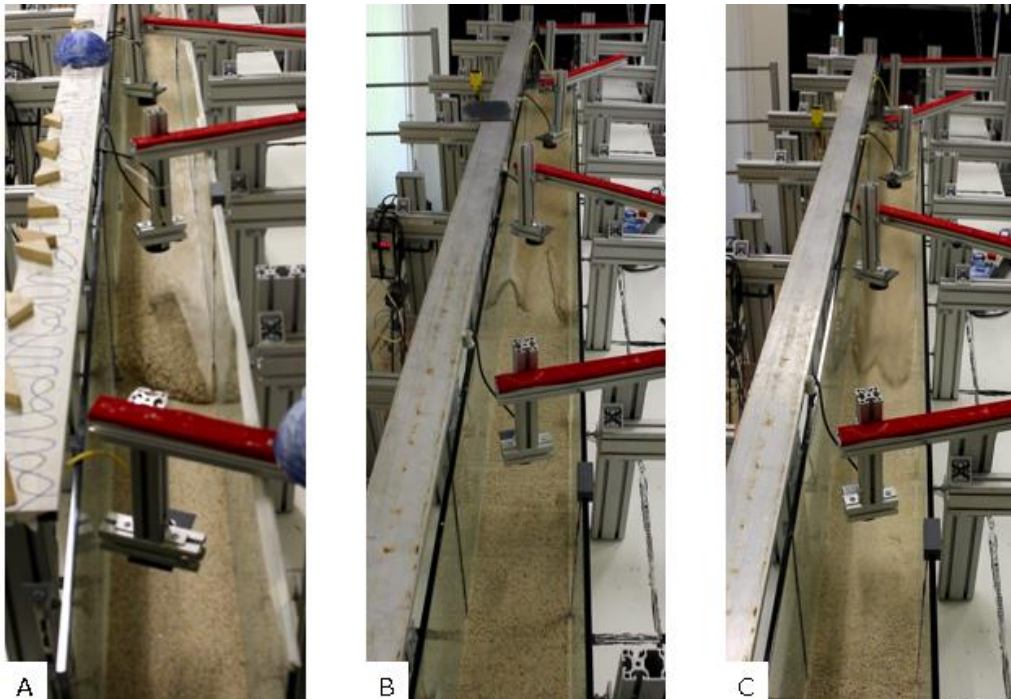
- Critère 1 : Stabilité du front ([Figure 7](#)) : définie comme la qualité morphologique du front sur son plan transversal. Si le front se forme et se maintient sur toute la largeur du canal alors il est dit *stable*. Dans le cas contraire il est qualifié d'*instable* et lorsqu'il est très peu marqué il est qualifié de *liquide*.
- Critère 2 : Longueur du front ([Figure 8](#)) : caractérise la qualité morphologique longitudinale du front comme pouvant être *long*, *intermédiaire* ou *court*. Pour définir un ordre de grandeur pour ces variables, il a été choisi d'utiliser un indicateur immuable dans le temps et l'espace et identifiable dans toutes les vidéos des expériences. Lorsque le front est qualifié de *long*, sa longueur est considérée comme étant supérieure à la moitié de la largeur du canal ($>$ à 10 cm) ; *intermédiaire* la longueur est comprise entre la moitié de la largeur du canal et quelques centimètres ($3 \text{ cm} < \text{longueur} < 10 \text{ cm}$) ; *court* la longueur est de l'ordre de quelques centimètres. Ce caractère longitudinal réfère à la quantité de sédiment constituant le front.
- Critère 3 : Présence d'un corps (*oui/non*) : le corps d'une lave torrentielle se différencie visuellement du front par une granulométrie beaucoup plus étendue. Or, la granulométrie employée ici ne peut donner lieu à de telles ségrégations. En

conséquence ce qui est identifié comme un corps, qualifié *oui*, correspond à la partie de l'écoulement derrière le front où le transport sédimentaire se fait par un cisaillement dans l'épaisseur. Lorsque le transport solide se fait autrement (par charriage), le critère est évalué *non*.

Quatre critères renseignent sur la dynamique de l'écoulement :

- Critère 4 : Épaisseur maximale de matériaux cisailés (*importante/intermédiaire/faible/ nulle*) : se quantifie par les réglets présents sur les prises de vues des caméras latérales. Elle est considérée :
 - *importante* lorsqu'elle est supérieure à 2 cm ;
 - *intermédiaire* lorsqu'elle est entre 2 et 1 cm ;
 - *faible* lorsqu'elle est inférieure à 1 cm ;
 - *nulle* lorsqu'il n'y a pas de cisaillement.

- Critère 5, 6 et 7 : La dynamique de la vague est caractérisé trois fois, au droit de : la webcam, la caméra latérale amont et la caméra latérale aval : l'*écoulement en masse* est identifié par les caméras latérales lorsque le cisaillement des matériaux est distribué dans la hauteur. La dynamique qualifiée *pulsé par l'amont* traduit l'incapacité du front à développer sa propre mobilité à cause de la puissance hydraulique de la débâcle. Certains écoulements sont caractérisés par une alternance gauche/droite de langues latérales qui se déposent puis qui sont reprises. Cette dynamique est qualifiée de *dépôt et reprise*. La *dislocation* décrit un écoulement qui s'est stoppé et dont le front s'est disloqué (par diffusion ou fracturation). La [Figure 9](#) illustre chacune de ces dynamiques.



[Figure 7](#) : Critère d'identification de la stabilité du front

A : 36.24 % - 28 L : Stable ; **B** : 24.56 % - 27 L : Instable ; **C** : 20.88 % - 53 L : Liquide

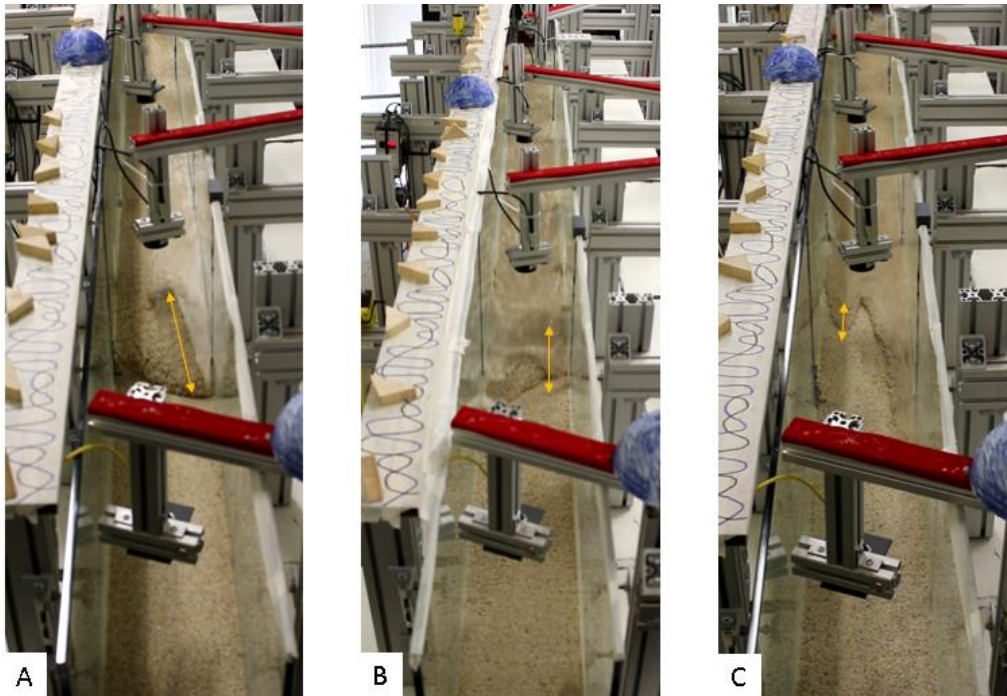


Figure 8 : Critère d'identification de la longueur du front
A : 36.24 % - 28 L : Long ; **B** : 28.33 % - 31 L : Intermédiaire ; **C** : 22.71 % - 33 L : Court



Figure 9 : Critère d'identification de la dynamique de l'écoulement
A : 28.33 % - 20 L : Cisaillement du front sur 1,5 cm ; **B** : 22.71 % - 33L : Pulsé par l'amont ; **C** : 20.88 % - 26 L : Dépôt et reprise. Le cercle montre un dépôt qui va être repris par la vague indiquée par la flèche ; **D** : Dislocation du front

4.1.2 Classification des écoulements

La classification des écoulements prend la forme d'un graphique avec en abscisse la pente, en ordonnée un indicateur capable de caractériser et de comparer les écoulements et les critères d'identification morphologiques et dynamiques propres à chaque expérience. L'objectif étant de créer une représentation claire et synthétique de la variabilité des écoulements ce sont les sept critères présentés précédemment (Figure 7, Figure 8, Figure 9) qui ont été utilisés.

L'Annexe 10 montre que plus la pente augmente, plus le volume sédimentaire évacué est important alors que le volume de vidange est faible. Pour caractériser ce phénomène il suffit de créer un indice prenant en compte le volume sédimentaire évacué et le volume de vidange. L'indice élaboré pour répondre à ce problème est le rapport $\frac{V_{sed}}{V_{vid}}$, où V_{sed} est le volume sédimentaire évacué (cm³) et V_{vid} le volume de vidange (cm³). Ce ratio adimensionnel indique une concentration moyenne de l'écoulement, notion essentielle pour caractériser des phénomènes où le transport solide est important (cf 1.1).

Cependant, un biais expérimental induit par la longueur du canal influence les résultats de l'indice de concentration moyenne. Les écoulements produits peuvent être grossièrement résumés par trois phases : une phase d'érosion, une phase de transport et une phase de dépôt. Selon la longueur du canal expérimental, le volume sédimentaire évacué est directement affecté par ce biais. Pour une pente et un volume de vidange donnés, dans le cas d'un petit canal (d'une faible longueur), la phase de dépôt ne peut avoir lieu et le volume total de sédiment érodé est évacué. À contrario pour un canal très long, elle peut être maximale et aucun sédiment n'est évacué. Le second indice vient corriger ce biais par l'ajustement de la relation du volume de sédiment évacué et du volume de vidange pour chaque pente de telle sorte que la droite de régression ait désormais pour origine 0 cm³ de sédiment évacué (Annexe 10 et Annexe 13). Cet indice s'appellera dans la suite du mémoire comme la concentration moyenne corrigée.

Après avoir été établis, les indices ont été discrétisés selon la formule de Scott : $\frac{(b-a)}{(3.5*EI*N^{\frac{1}{3}})}$. Où EI est l'écart interquartile, a et b le minimum et le maximum de la série et N

la population. Cette méthode a pour avantage de prendre en compte plusieurs paramètres de dispersion pour déterminer le nombre de classe. La distribution des valeurs de chaque indice est disponible à l'Annexe 14. Une fois le nombre de classe calculé, le découpage des bornes a été fait par la méthode des quantiles. Elle permet d'avoir *en théorie* un nombre d'effectif égal dans chacune des classes.

Au regard des limites conventionnelles imposées pour la taille du mémoire, le choix a été fait d'analyser uniquement les deux derniers indices. Bien qu'arbitraire, ce choix est également justifié par le fait que l'indice de concentration moyenne corrigé facilite l'interprétation des écoulements avec une dislocation du front. La figure de l'indice de concentration moyenne est disponible en Annexe 12.

La [Figure 10](#) distingue trois classes de concentration moyenne corrigée paraissant fonction de la pente. À noter que cette figure ne représente que les expérimentations sur les pentes allant de 20.88 à 36.24 % car l'acquisition vidéo n'était pas systématique pour les pentes inférieures.

Pour les pentes absentes à la [Figure 10](#), l'analyse des vidéos rend compte en substance des écoulements observés. Aux pentes inférieures à 8.55 %, quel que soit le volume de vidange, l'écoulement est caractérisé par une couche active de charge de fond ([Annexe 15A](#)) identifiable à du charriage.

De 8.55 à 17.29 %, le transport solide se fait également par charriage mais les écoulements transportent plus de sédiments. L'aval est parfois marqué d'une accumulation sédimentaire ([Annexe 15B](#)). Faute de vidéos latérales, il n'est pas possible d'estimer si la charge de fond est conséquente. Cependant, la présence d'un front laisse penser que nous ne sommes plus sur du charriage de rivière de plaine. Ainsi, ces écoulements semblent correspondre à un type de transport sédimentaire intermédiaire au charriage et aux écoulements hyper-concentrés.

4.1.2.1 Faible concentration moyenne corrigée

Dans la [Figure 10](#), les expériences à 20.88, 22.71 et 24.56 % occupent majoritairement la classe de concentration moyenne corrigée faible. Les critères s'y opposent à ceux des écoulements types laves torrentielles. Ce sont des écoulements dans lesquels le transport solide s'effectue par charriage et où l'accumulation granulaire identifiée pour les pentes inférieures est systématique. Le front est instable car il ne barre jamais l'écoulement sur toute la largeur du canal ([Annexe 15C](#)). La dynamique d'écoulement est, elle, caractérisée par des successions de dépôts et reprises ([Annexe 15C](#)). Les expériences faites à 24.56 % forment des fronts légèrement plus longs qu'aux deux autres pentes ([Annexe 15D](#)). Ces caractéristiques coïncident avec celles décrites dans la littérature pour désigner le charriage hyper-concentré ([cf 1.2.1](#)). Ces écoulements semblent donc leurs être analogues.

Une expérience à 28.33 % et une à 30.26 % sont également présentes dans cette classe. Dans ces deux dernières, le front est parfaitement formé ([Annexe 16A](#)) et, bien que l'épaisseur cisailée soit intermédiaire ([Annexe 16B](#)), la dynamique d'écoulement en masse laisse à penser qu'elles sont très proches d'une lave torrentielle.

Des phénomènes de fracturation du front ont également lieu aux plus faibles concentrations de cette classe.

4.1.2.2 Forte concentration moyenne corrigée

Les écoulements dont la concentration moyenne corrigée est forte sont caractéristiques des pentes de 32.21, 34.21 et 36.24 %. Les critères morphologiques et dynamiques conviennent à des écoulements analogues à une lave torrentielle. Le front est développé latéralement et longitudinalement et l'écoulement est en masse. Ainsi, c'est à 34.21 et 36.24 % que les écoulements sont les plus analogues à une lave torrentielle ([Annexe 17](#)).

Cependant plusieurs écoulements interpellent car leur dynamique n'est pas parfaitement conforme à celle de phénomènes analogues à une lave. Ils sont majoritairement présents à 32.21 % et sont similaires aux écoulements décrits précédemment pour 30.26%.

Effectivement, les écoulements suivent en premier lieu une dynamique de dépôt et reprise (identifiée sur deux caméras) puis le front se stabilise de manière à ce qu'un cisaillement distribué, caractéristique des écoulements en masses, se mette en place. D'autres écoulements possèdent une dynamique similaire mais ils sont caractérisés par un front instable. Il y a donc présence d'écoulements intermédiaires aux écoulements hyper-concentrés des pentes inférieures et aux laves torrentielles des pentes supérieures. Le caractère intermédiaire – frontière – transitionnel s'illustre par une instabilité pouvant être morphologique (*front instable*, etc...) et/ou dynamique (*dépôt & reprise*). Dans le cadre de ce travail, nous qualifierons ce type d'écoulement de lave immature. Si cette expression peut correspondre à la traduction du terme *immature debris flow* proposé par Takahashi (2007), le phénomène considéré est différent. L'*immature debris flow* désigne un charriage dont la quantité de matériaux impose de le prendre en compte dans la détermination des hauteurs d'écoulement, sans réel trait morphologique caractéristique. La lave torrentielle immature se distingue par des traits morphologiques analogues à ceux d'une lave torrentielle, couplés à une dynamique d'écoulement passant d'instable à de l'écoulement en masse. L'ajout du terme immature met en avant le caractère transitionnel de l'écoulement de l'hyper-concentré vers la lave ou inversement. Le terme charriage hyper-concentré paraît plus approprié que celui de *immature debris flow* justifiant ainsi l'appellation proposée.

Par ailleurs, pour les plus faibles concentrations de cette classe, les fronts se sont fracturés après une première phase d'écoulement en masse. Que ces phénomènes se situent dans la classe des écoulements les plus concentrés provient de la correction du biais. En effet dans l'**Annexe 12**, ces expériences sont attribuées aux plus faibles concentrations puisque très peu de sédiments sont sortis. Ainsi la concentration moyenne corrigée révèle que ces écoulements ont un comportement similaire aux autres écoulements de cette classe, c'est-à-dire analogue à une lave ou à une lave immature.

4.1.2.3 Concentration moyenne corrigée intermédiaire

La classe intermédiaire regroupe une grande hétérogénéité d'écoulements. En premier lieu des écoulements similaires à ceux décrits précédemment sont à l'œuvre. Les plus grosses vidanges à 28.33 % sont typiques des pentes inférieures avec un front instable et similaire aux accumulations granulaires identifiée sur les plus faibles pentes. Ceci semble être dû à la dynamique même de l'écoulement (*pulsé par l'amont*) contrôlée par la force hydraulique de la vidange. (**Annexe 18C**).

D'autres partagent, intrinsèquement, des critères d'identification appartenant à plusieurs types d'écoulement. Typiquement, les écoulements générés à 28.33 et 30.26 % ont les caractéristiques des laves immatures décrites précédemment. Bien qu'ils restent très liquides, la vidange mobilise une quantité de sédiment proportionnellement intermédiaire. Ceci permet d'avoir un front long mais instable (**Annexe 18A**) avec une dynamique qui lui est propre. En effet, sa cinématique paraît être en apparence monophasique. Ceci est confirmé par les caméras latérales qui filment un cisaillement sur toute l'épaisseur du front (**Annexe 18B**). En outre, un corps d'écoulement évolue sous une couche d'eau claire après le front.

		Pente (m.m-1)							Critère (cf 4.1.1)			
		0,208825968	0,227089399	0,245571529	0,264294108	0,28328015	0,302554101	0,322142017	0,342071767	0,362373264		
Concentration moyenne corrigée	Faible	instable	stable	instable		stable	stable				1	
		court	court	intermédiaire		long	long				2	
		non	non	non		n/d	oui				3	
		nulle	nulle	n/d		n/d	intermédiaire					4
		dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise		dépôt & reprise	dépôt & reprise					5
		dépôt & reprise	dislocation	dislocation		écoulement en masse	écoulement en masse					6
		dépôt & reprise	dislocation	dislocation		écoulement en masse	écoulement en masse					7
		instable	instable	instable								1
		court	court	intermédiaire								2
		non	non	non								3
		nulle	nulle	faible								4
		dépôt & reprise	puisé par l'amont	dépôt & reprise								5
	dépôt & reprise	puisé par l'amont	dépôt & reprise								6	
	dépôt & reprise	puisé par l'amont	puisé par l'amont								7	
	instable	instable	instable								1	
	court	court	intermédiaire								2	
	non	non	non								3	
	nulle	nulle	n/d								4	
	dépôt & reprise	puisé par l'amont	dépôt & reprise								5	
	dépôt & reprise	puisé par l'amont	dépôt & reprise								6	
	dépôt & reprise	puisé par l'amont	puisé par l'amont								7	
	instable		instable								1	
	court		intermédiaire								2	
	non		non								3	
	nulle		n/d								4	
	puisé par l'amont		dépôt & reprise								5	
	puisé par l'amont		dépôt & reprise								6	
	puisé par l'amont		puisé par l'amont								7	
	liquide										1	
	court										2	
	non										3	
	nulle										4	
	puisé par l'amont										5	
	puisé par l'amont										6	
	puisé par l'amont										7	
	Intermédiaire		instable	instable	stable	instable	stable			stable		1
		intermédiaire	intermédiaire	intermédiaire	long	long			long		2	
		non	non	non	faible	oui	importante		oui		3	
		faible	n/d	faible	intermédiaire	importante			importante		4	
		dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise			dépôt & reprise		5	
		dépôt & reprise	dépôt & reprise	puisé par l'amont	puisé par l'amont	dépôt & reprise			écoulement en masse		6	
		dépôt & reprise	puisé par l'amont	dislocation	écoulement en masse	écoulement en masse			dislocation		7	
				instable	instable	instable			stable		1	
				intermédiaire	intermédiaire	long			long		2	
				oui	n/d	oui			oui		3	
				intermédiaire	n/d	intermédiaire			importante		4	
				dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise			dépôt & reprise		5	
				puisé par l'amont	dépôt & reprise	dépôt & reprise			dislocation		6	
				écoulement en masse	puisé par l'amont	écoulement en masse			dislocation		7	
				instable	instable						1	
				intermédiaire	intermédiaire						2	
				oui	non						3	
				faible	n/d						4	
				dépôt & reprise	dépôt & reprise						5	
				puisé par l'amont	dépôt & reprise						6	
				écoulement en masse	puisé par l'amont						7	
				instable							1	
				intermédiaire							2	
				oui							3	
			faible							4		
			dépôt & reprise							5		
			puisé par l'amont							6		
			écoulement en masse							7		
Forte					stable	stable			stable		1	
					long	long			long		2	
					oui	oui			oui		3	
					importante	n/d			intermédiaire		4	
					écoulement en masse	écoulement en masse			dépôt & reprise		5	
					dislocation	dislocation			écoulement en masse		6	
					dislocation	dislocation			dislocation		7	
					stable	stable			stable		1	
					long	long			long		2	
					oui	oui			oui		3	
					importante	importante			intermédiaire		4	
					dépôt & reprise	dépôt & reprise			écoulement en masse		5	
					dépôt & reprise	écoulement en masse			écoulement en masse		6	
					écoulement en masse	écoulement en masse			écoulement en masse		7	
					instable	stable			instable		1	
					long	long			long		2	
					oui	oui			oui		3	
					n/d	importante			intermédiaire		4	
					dépôt & reprise	dépôt & reprise			écoulement en masse		5	
					dépôt & reprise	écoulement en masse			écoulement en masse		6	
					écoulement en masse	écoulement en masse			écoulement en masse		7	
					instable	instable			stable		1	
					imporant	long			long		2	
					oui	oui			oui		3	
				importante	importante			importante		4		
				dépôt & reprise	dépôt & reprise			écoulement en masse		5		
				dépôt & reprise	écoulement en masse			écoulement en masse		6		
				écoulement en masse	écoulement en masse			écoulement en masse		7		
					stable			stable		1		
					long			long		2		
					oui			oui		3		
					importante			importante		4		
					écoulement en masse			écoulement en masse		5		
					écoulement en masse			écoulement en masse		6		
					écoulement en masse			écoulement en masse		7		

Figure 10 : Classement des expériences en fonction de la concentration moyenne corrigée pour chaque pente

Le bleu clair met en avant la modalité optimale du critère à l'identification d'une lave torrentielle. Plus la couleur est sombre, plus on s'éloigne de ce phénomène

4.1.3 Inter-comparaison des écoulements

Si la [Figure 10](#) montre trois catégories d'écoulements, elle ne permet pas de les inter-comparer de manière optimale. La concentration moyenne corrigée est calculée à partir des volumes de vidange or, les gammes de vidange intra-pente ne sont pas les mêmes pour tout le spectre de pente balayé. Ainsi, les plus faibles litrages de vidange effectués sur les faibles pentes correspondent aux plus gros des plus grandes pentes. Afin de palier à ce problème, un troisième indice a été créé. Il s'appuie sur une démarche empirique exploitée dans la littérature pour estimer le débit maximum instantané d'une crue générée par la rupture d'un barrage. L'estimation du débit maximum instantané est liée à une valeur d'énergie potentielle disponible dans le système. Cette dernière se calcule par $Ep = \rho * g * h * V$. Où ρ est la masse volumique de l'eau (997 kg/m³), g la constante gravitationnelle, h la hauteur du barrage (m) et V le volume de la retenue (m³) (Costa & Schuster, 1987). Dans le cas appliqué aux expérimentations, il est envisageable d'adapter cette formule afin de renseigner l'énergie potentielle propre à chaque débâcle pour toutes les pentes. Le calcul se fait par le produit de $(5 * \sin(\text{Arctg}(I))) * V$. Où $(5 * \sin(\text{Arctg}(I)))$ est h (m), I est la pente (m.m⁻¹) et V le volume de vidange (cm³). Cet indice possède un réel intérêt puisque presque toutes les pentes sont présentes dans chaque classe d'énergie potentielle disponible de la [Figure 11](#).

La description des écoulements par la [Figure 10](#) a mis en évidence une diversité des écoulements selon la pente également illustrée par l'analyse intra-classe de la [Figure 11](#). Au sein de chaque classe d'énergie potentielle disponible, plus la pente augmente, plus les critères d'identification évoluent de sorte à ce qu'ils caractérisent au mieux un écoulement proche d'une lave torrentielle. De la même manière que pour les concentrations moyennes corrigées et, bien que l'évolution des écoulements ressemble à un continuum, il semble possible de distinguer trois classes de pentes en fonction des critères d'identification soit [20.88 % ; 24.55 %], [26.43 % ; 32.32 %] et [34.21 % ; 36.21 %].

L'intra-comparaison des écoulements au sein de ces classes suggère plusieurs constats. Tout d'abord, les phénomènes de fracturation au sein de la première classe sont possibles lorsque l'énergie potentielle disponible est faible. Dans ces pentes, plus elle est élevée, plus la débâcle sera liquide.

La seconde classe est affectée d'une grande variété d'écoulements selon l'énergie potentielle disponible et la pente. Si c'est à 26.43 % que les premières dynamiques d'écoulement en masse sont identifiées, les écoulements y restent très similaires malgré l'énergie potentielle disponible. L'influence de l'énergie potentielle disponible pour les écoulements des pentes est plus subtile. À 28.33 et 30.26 %, moins l'énergie potentielle est disponible, plus les critères d'identification se rapprochent de ceux d'une lave. C'est à ces deux pentes, pour une énergie potentielle faiblement disponible que les premiers écoulements analogues à une lave torrentielle sont observés.

C'est dans la troisième classe qu'il y a le premier écoulement dont tous les critères correspondent à un phénomène analogue à une lave torrentielle. Ici, quel que soit l'énergie potentielle disponible, les écoulements sont analogues à une lave torrentielle.

		Pente (m.m-1)								Critère (cf 4.1.1)	
		0,208825968	0,227089399	0,245571529	0,264294108	0,28328015	0,302554101	0,322142017	0,342071767		0,362373264
Energie potentielle disponible par expérience (L.m)	Faible	instable	stable	instable	stable	stable	stable	stable	stable	stable	1
		court	court	intermédiaire	intermédiaire	long	long	long	long	long	2
		non	non	non	non	n/d	oui	oui	oui	oui	3
		nulle	nulle	n/d	faible	n/d	intermédiaire	importante	n/d	n/d	4
		dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	écoulement en masse	écoulement en masse	5
		dépôt & reprise	dislocation	dislocation	pulsé par l'amont	écoulement en masse	écoulement en masse	dislocation	dislocation	6	
		dépôt & reprise	dislocation	dislocation	dislocation	écoulement en masse	écoulement en masse	dislocation	dislocation	7	
	instable								stable	1	
	court								long	2	
	non								oui	3	
	nulle								importante	4	
	dépôt & reprise								dépôt & reprise	5	
	dépôt & reprise								écoulement en masse	6	
	dépôt & reprise								écoulement en masse	7	
									stable	1	
									long	2	
									oui	3	
									importante	4	
									dépôt & reprise	5	
									écoulement en masse	6	
									écoulement en masse	7	
								instable	1		
								long	2		
								oui	3		
								n/d	4		
								dépôt & reprise	5		
								dépôt & reprise	6		
								écoulement en masse	7		
								stable	1		
								long	2		
								oui	3		
								importante	4		
								dépôt & reprise	5		
								écoulement en masse	6		
								écoulement en masse	7		
								stable	1		
								long	2		
								oui	3		
								intermédiaire	4		
								écoulement en masse	5		
								écoulement en masse	6		
								écoulement en masse	7		
								stable	1		
								long	2		
								oui	3		
								importante	4		
								écoulement en masse	5		
								écoulement en masse	6		
								écoulement en masse	7		
								stable	1		
								long	2		
								oui	3		
								importante	4		
								écoulement en masse	5		
								écoulement en masse	6		
								écoulement en masse	7		
								stable	1		
								long	2		
								oui	3		
								importante	4		
								écoulement en masse	5		
								écoulement en masse	6		
								écoulement en masse	7		

Figure 11 : Classement des expériences en fonction de l'énergie potentielle disponible pour chaque pente
 Le bleu clair met en avant la modalité optimale du critère à l'identification d'une lave torrentielle. Plus la couleur est sombre, plus on s'éloigne de cet écoulement.

4.2 Analyse quantitative

Relativement à la pente, l'analyse qualitative a mis en avant une variabilité certaine des types d'écoulement. La méthodologie établie contient une part de subjectivité non négligeable ce qui rend la démarche critiquable. Pour consolider ce début de typologie, les données instrumentales sont mises à profit. Ainsi, ce sont les données des bilans sédimentaires et des hauteurs d'écoulements qui sont exploitées.

4.2.1 Influence de la pente

En synthétisant les résultats de travaux portant sur la quantification du transport solide, Meunier (1991) met en avant le rôle prépondérant de la pente sur le débit solide. En effet, elle influe sur la concentration en solide selon une fonction puissance dont l'exposant peut varier de 1,5 à 2 pour du charriage selon les auteurs. Ces équations sont plus ou moins complexes selon leurs conditions d'application et l'Annexe 19 en présente quelques-unes.

Considérant que le volume de sédiment évacué lors des expériences est fortement dépendant du débit solide, Sow (2021) a obtenu une relation linéaire expliquant l'évolution du volume de sédiment évacué en fonction de la pente au carré (Annexe 20). Par conséquent, sur tout le spectre de pente balayé, ce résultat traduirait hypothétiquement la présence d'un seul et unique mode de transport solide.

L'objectif ici est d'identifier le comportement de cette relation alors que le confinement latéral est plus important (la largeur du canal est de 20 cm contre 40 cm pour celle de Sow) de façon à expliquer les types d'écoulements identifiés. Partant du constat qu'à pente égale les écoulements observés par Sow (2021) ne correspondent pas à ceux de ce travail, l'hypothèse est que l'augmentation de la contrainte latérale devrait induire un changement de la relation traduisant ainsi une multiplicité des modes de transport solide.

Pour une largeur de canal de 20 cm, la Figure 12 montre que le volume sédimentaire évacué et la pente au carré ne suivent pas une relation linéaire. Ce constat est seulement valable lorsque toutes les pentes sont considérées. En effet, au regard de la forme prise par la courbe, et pour des volumes de vidange de 50 000, 40 000 et 35 000 cm³, une gamme de pentes allant de 1.70 à 20.88 % apparaît de sorte qu'il y a une relation linéaire intra-gamme expliquant le volume sédimentaire évacué par la pente au carrée. Ainsi de 1.71 à 20.88%, l'alignement des points et le R² montrent une relation linéaire. Ceci est cohérent puisque le transport solide identifié pour ces pentes est du charriage.

À partir 20.88 % l'alignement des points ne suit plus cette première relation. En effet, de 20.88 % à 26.43 % les points s'alignent selon une nouvelle relation linéaire fortement corrélée (R²). Cependant la relation est stoppée par un palier se situant à 28.33 %.

La distribution des points à 30.24 %, 32.21 %, 34.21 % et 36.21 % est plus difficile à commenter. Un décrochage à 34.21 % se distingue par le pic de volume sédimentaire évacué. Ce pic est suivi d'une rechute du volume sédimentaire évacué à 36.24 %.

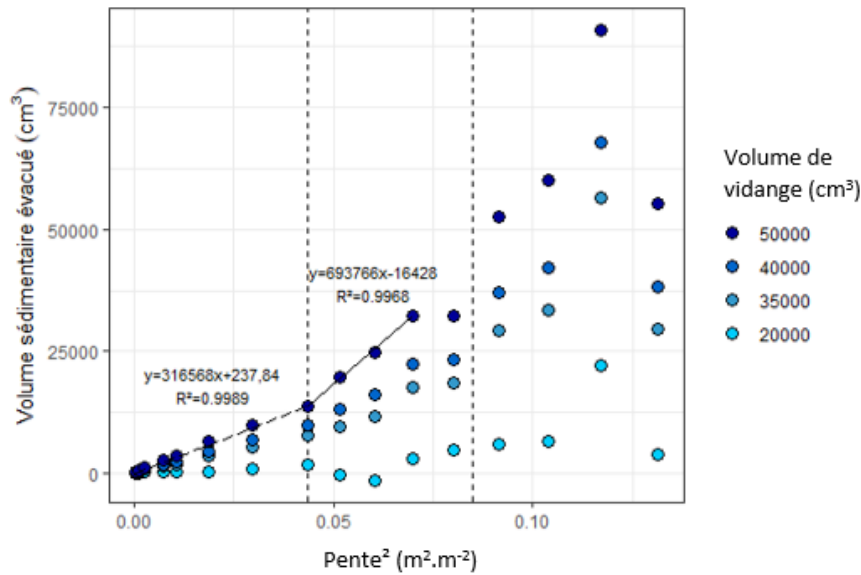


Figure 12 : Évolution du volume sédimentaire évacué en fonction de la pente au carré pour quatre volumes de vidange
 Les volumes sédimentaires évacués sont interpolés ou extrapolés des droites de régression en Annexe 10

Au regard du caractère chaotique des derniers points, des valeurs négatives du volume sédimentaire évacué pour la vidange à 20 000 cm³, une seconde figure intégrant cette fois-ci le volume sédimentaire corrigé a été produite. Ainsi, la Figure 13 est également marquée par des relations linéaires très fortes et des dérochements aux mêmes valeurs de pente pour les deux premières classes discernées dans la Figure 12. Toutefois, les volumes sédimentaires évacués pour les pentes 30.26, 32.21 et 34.21 % suivent ici une relation linéaire quasi-parfaite qui suggère un autre domaine d'écoulement. Ceci fait que 36.24 % constitue une classe à elle seule.

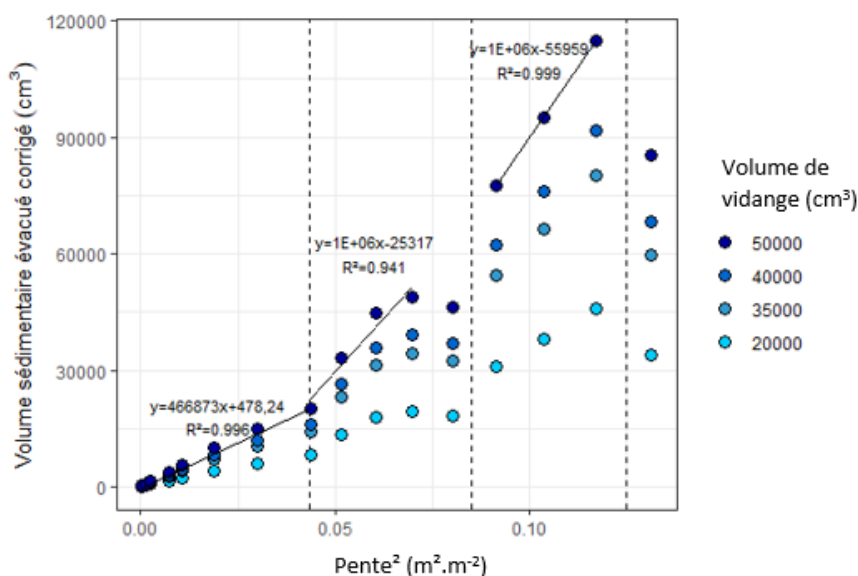


Figure 13 : Évolution du volume sédimentaire sorti corrigé en fonction de la pente au carré pour quatre volumes de vidange

4.2.2 Comportement des limnigrammes

Jusqu'ici, les analyses ont mis en avant le rôle prépondérant de la pente sur les écoulements. Ainsi, lorsqu'elle augmente, le bilan sédimentaire augmente également. Ceci s'observe sur l'apparence même de la débâcle. En effet, sa morphologie et sa dynamique évoluent conjointement à la pente ce qui paraît être à l'origine du changement de mode de transport sédimentaire évoqué précédemment. Or, la littérature indique que pour un transport solide conséquent, la hauteur et la vitesse du fluide sont définies par le débit liquide et le débit solide. De ce fait, il est envisageable que le comportement du limnigramme diffère selon le mode de transport solide et donc le type d'écoulement.

Après avoir été débarrassées de leurs reliques, les données enregistrées par les capteurs sont exploitées et mises sous la forme d'un limnigramme. Cependant, la qualité des signaux des trois capteurs *Weidmüller LRS3* étant relativement mauvaise à cause de fluctuations transitoires, une moyenne mobile sur 60 dixièmes de secondes a été faite pour chaque capteur. La [Figure 14](#) présente les limnigrammes de neuf expériences balayant chaque type d'écoulement identifié dans l'analyse qualitative.

Plusieurs grandes tendances se dégagent du comportement des limnigrammes lorsque la pente augmente. Le [Tableau 2](#) résume ce comportement selon la hauteur et la vitesse de la vague ainsi que l'érosion du lit. La hauteur maximale de la vague est significativement plus importante pour les pentes allant de 30.26 à 36.24 %, avec des valeurs se situant entre 6.5 et 8 cm contre 2 cm à 5.12 %. En outre, plus la pente est élevée, plus la hauteur maximale mesurée est enregistrée à l'aval. L'érosion suit également ce constat. Pour des pentes élevées, le lit est incisé plus loin à l'aval du canal (jusqu' à C4). De manière générale, il semble que la vitesse moyenne d'écoulement diminue alors que la pente augmente.

Expérience	Type d'écoulement	Pic de hauteur de la débâcle	Vitesse moyenne (m.s ⁻¹)	Érosion
5.12 % - 58.223 L	Charriage	3 cm à C1	0.766	Pas d'érosion
10.27 % - 41.104 L 17.29 % - 30.525 L	Charriage intermédiaire	2 cm à C2 ou C3	0.575 0.400	Érosion à C1 (-1 à -3 cm) et C2 (-1 cm)
24.56 % - 26.866 L 28.33 % - 31.306 L	Charriage hyper-concentré	4.5 cm à C4	0.263 0.447	Érosion plus intense (rapide et quantité) à C1 (-2 cm à -5 cm) et C2 (-1 à -5 cm)
30.26 % - 18.421 L	Lave torrentielle immature	6.5 cm à C5	0.184	Érosion à C1 (-5 cm) et à C2 (-2 cm)
34.21 % - 16.634 L 36.24 % - 28.145 L	Lave torrentielle	8 cm à C5	0.268 0.263	Érosion très intense à C1, C2 et C3 où le caillebotis est atteint
32.21 % - 15.413 L	Fracturation	6.5 cm à C4	0.082	Érosion à C1 (-5 cm) et C2 (-5 cm) et exhaussement à C3

Tableau 2 : Ordres de grandeur caractérisant les limnigrammes

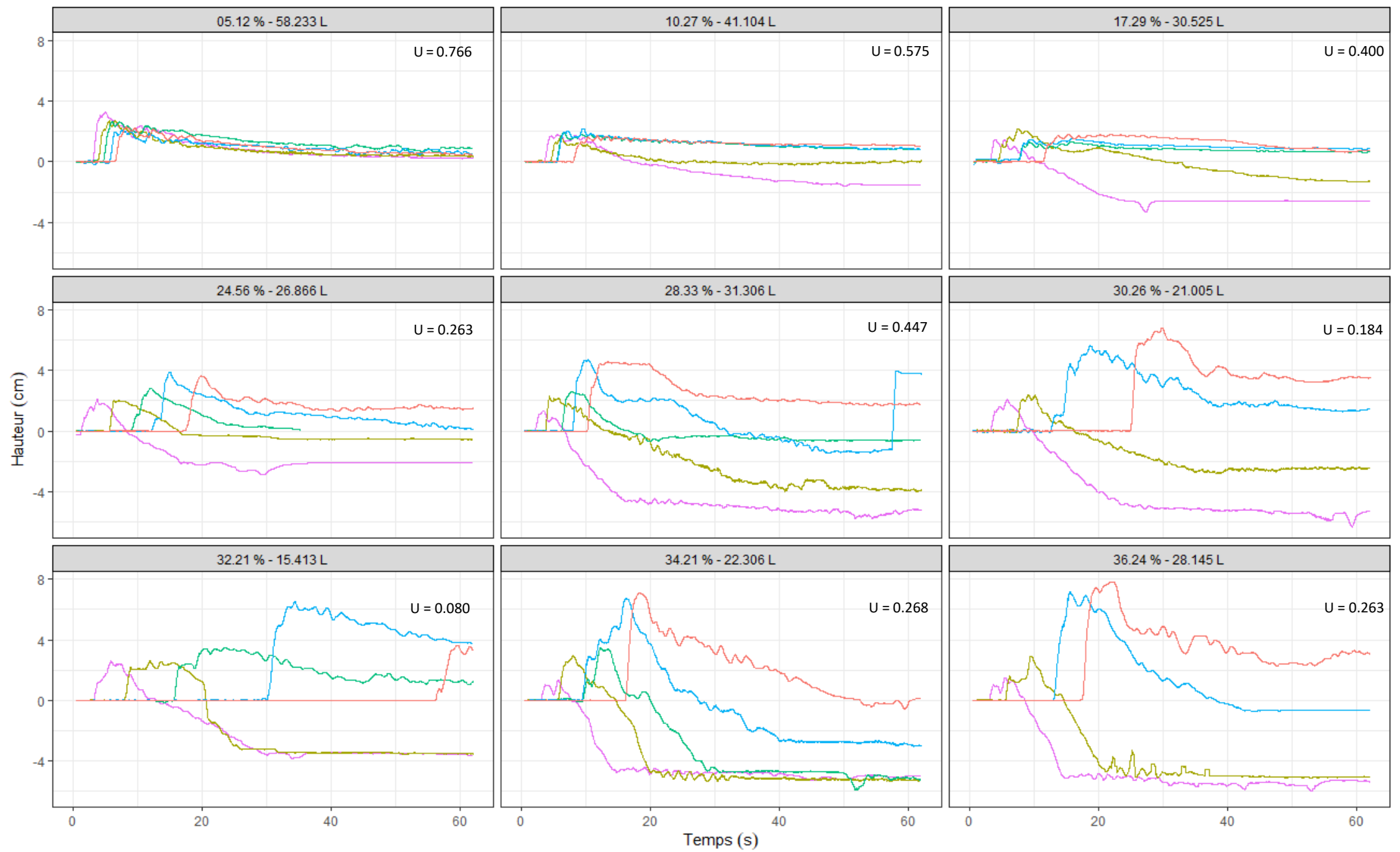


Figure 14 : Comportement des limnigrammes en fonction de la pente et du volume de vidange

En rose : la mesure du capteur 1 ; kaki : la mesure du capteur 2 ; vert ; la mesure du capteur 3 ; bleu : la mesure du capteur 4 ; rouge : la mesure du capteur 5.

U est la vitesse moyenne ($m.s^{-1}$) de la débâcle pour atteindre C5.

5 Discussion

5.1 Typologie

La multiplicité des résultats et leur nature nécessitent d'en faire une rapide synthèse afin de les interpréter plus facilement.

La classification des écoulements par des critères morphologiques et dynamiques selon la pente fonction de la concentration moyenne corrigée et fonction de l'énergie potentielle a mis en évidence une multiplicité des écoulements. Ce sont cinq types d'écoulements qui ont ainsi été distingués. Ont également été identifiés des phénomènes de dislocation du front s'apparentant à de la diffusion ou de la fracturation. Partant du constat que certains modes d'écoulements sont présents sur certaines gammes de pentes et pas d'autres, il est possible de tenter une première classification des écoulements identifiés selon la pente :

- [1.70 % ; 8.55 %] : charriage ;
- [8.55 % ; 17.29 %] : charriage intermédiaire/concentré ;
- [20.88 % ; 28.32 %] : charriage hyper-concentré ;
- [30.26 % ; 36.24 %] : lave torrentielle immature ;
- [28.32 % ; 36.24 %] : lave torrentielle.

L'analyse du comportement des hauteurs d'écoulement a confirmé la pluralité des écoulements. Ainsi, les limnigrammes possèdent des allures différentes pour les cinq types d'écoulements identifiés précédemment (plus le phénomène de dislocation) :

- 5.12 % : charriage ;
- 10.27 et 17.29 % : charriage intermédiaire ;
- 24.56 et 28.33% : charriage hyper-concentré ;
- 30.26 % : lave torrentielle immature ;
- 34.21 et 36.24 % : lave torrentielle ;
- 32.24 % : dislocation.

L'exploitation des données du bilan sédimentaire pour étudier la relation entre volume sédimentaire évacué et la pente au carré a cependant dégagé quatre modes de transport sédimentaire répartis tel que :

- [1.70 % ; 20.88 %] : charriage ;
- [20.88 % ; 28.33 %] : hyper-concentré ;
- [30.16 % ; 34.21 %] : lave immature torrentielle ;
- [36.24 %] : lave torrentielle.

Tout d'abord, l'écoulement identifié auparavant comme du charriage intermédiaire ne se démarque pas au vu des relations linéaires quasi-parfaites. L'accumulation granulaire caractéristique de ces pentes ne semble pas être un trait morphologique issu d'un transport sédimentaire distinct mais de la transition entre du charriage et du charriage hyper-concentré. Par ailleurs, au regard de la caractérisation des écoulements, la classe à 36.24 % n'a pas réellement lieu d'être puisque les écoulements qui ont lieu entre 30.16 et 36.24 % sont principalement des phénomènes analogues à des laves ou des phénomènes de transition vers des laves.

Il a donc été démontré que la pente et le volume du forçage hydrologique sont bien des facteurs explicatifs à la nature des écoulements. Qu'il ait été observé une variabilité des écoulements pour une même pente montre l'importance du volume de vidange sur leur nature et rejoint les résultats d'Hanson et al. (2005).

Néanmoins, cela n'explique pas la présence (ou l'absence) de certains types d'écoulements pour des plages de pente données. Cette variabilité entre les pentes s'illustre par le développement d'une accumulation granulaire à l'aval de l'écoulement. La pente et le volume de vidange étant les seuls facteurs modifiés d'une expérience à l'autre, de quelles manières commandent-ils la formation du front et de ce fait de l'écoulement ? Les critères établis en 4.1 montrent que le front d'écoulement est instable dans l'espace et le temps mais que plus la pente augmente, plus il semble s'approcher d'une stabilité. Celle-ci est atteinte pour la première fois à 28.33 %. L'écoulement se comporte alors de manière similaire à une lave torrentielle, avec un cisaillement du matériau dans l'épaisseur, très différent d'un écoulement liquide caractérisé par une charge de fond. Or, plus la pente est proche de 36.24 %, plus les phénomènes analogues à une lave sont régulièrement formés.

Au regard des données qui sont à disposition, l'hypothèse émise est que la stabilité du front est relative à l'intensité de ces processus de formation, soit l'érosion, la mobilisation puis l'accumulation des sédiments. L'indice d'énergie potentielle disponible traduit en quelque sorte la capacité érosive de la débâcle. Or pour 32.24, 34.21 et 36.24 %, la présence d'une lave est marquée par une énergie potentielle à minima forte (Figure 11), donc une vague de débâcle avec une forte capacité d'érosion. À ces pentes, le front se développe de la même façon qu'aux pentes inférieures, les sédiments érodés sont mobilisés vers l'aval où ils s'accumulent. Nonobstant, les processus s'opèrent plus rapidement, et le volume sédimentaire mobilisé est beaucoup plus important. Le front barre alors l'écoulement sur toute la largeur du canal. L'arrière de la bouffée ne pouvant pas évacuer les sédiments mobilisés à l'amont, un corps d'écoulement se met en place dont le mouvement, tout comme le front, se fait par un cisaillement du matériau dans l'épaisseur. À ces pentes, les laves torrentielles sont caractéristiques d'une plage de concentration moyenne très importante (Annexe 12) atteinte pour une valeur seuil d'énergie potentielle, c'est-à-dire de sédiments mobilisés. Si la concentration est en-dessous de cette plage, l'écoulement est trop saturé, liquide et les sédiments sont transportés par une charge de fond dont une partie est mobilisée à l'aval sous une forme d'accumulation sédimentaire peu développée. Pour des valeurs de concentration au-dessus de cette plage, le front sédimentaire formé à l'aval n'est plus suffisamment saturé, il se tank et se disloque. La vague de débâcle a donc érodé beaucoup plus de matériaux que ce que le volume d'eau peut en réalité mobiliser par écoulement. Les Figure 10, Figure 11 et l'Annexe 12 mettent en évidence un gradient croissant, suivant les valeurs de pente, des classes de concentration moyenne et de l'énergie potentielle.

5.2 Limites

Plusieurs limites expérimentales ont pu être identifiées au cours de ce travail. Ainsi, le canal est affecté d'une dissymétrie latérale avec une légère pente en direction de sa rive gauche. Ce défaut entraîne un biais lors des expériences car les écoulements sont plus concentrés en rive

gauche. Ceci rend l'érosion plus intenses en rive gauche qu'en rive droite et ce dès l'ouverture de la vanne.

Une incertitude liée à la position du canal par rapport à l'ouverture de la cuve est présente. Effectivement, le canal n'est pas positionné au centre de la cuve mais légèrement sur sa droite. Ceci fait que l'ouverture de la cuve n'est pas en son centre mais légèrement de côté. De la même manière que la dissymétrie, ce biais serait peut-être à l'origine d'une concentration latérale de l'écoulement.

Par ailleurs, le CANAL ECOULEMENT DE BOUE est un modèle physique à transport solide recyclé. Ainsi, après chaque expérience, le sable évacué est ré-exploité dans le canal. Ceci fait qu'il n'est pas possible d'étudier l'effet du pavage, ou dans le cas de notre granulométrie la compaction des grains, ce qui n'est pas dommageable au vu des objectifs du stage. En revanche, il est tout à fait concevable que des particules se soient affinées par abrasion. Il est donc possible que la granulométrie ait très légèrement été modifiée. Bien qu'étant négligeable au vu de la quantité de grain concernée et de l'échelle d'étude du travail, les conditions initiales ont peut-être changé.

Enfin, l'analyse qualitative sur laquelle ce travail est en grande partie basé est soumise à une importante subjectivité. Il a été tenté de réduire au minimum cette part de subjectivité en établissant des critères d'identification issus, pour la plupart, de la littérature. Malgré tout, leur identification sur les vidéos relève d'une appréciation personnelle. Pour passer outre cette limite il a donc été préféré d'illustrer les critères avancés par un maximum d'image.

Conclusions

L'étude de la versatilité des écoulements torrentiels possède un réel intérêt opérationnel et scientifique. Si les facteurs de prédisposition, c'est-à-dire la géologie, la topographie, la géomorphologie et l'hydrogéologie du bassin, peuvent être des indicateurs quant à la capacité du bassin à produire des écoulements torrentiels, le mode de déclenchement est également un facteur déterminant à leur formation.

La fluctuation temporelle de ces facteurs est à l'origine de la pluralité des types d'écoulements s'opérant dans un bassin. Or la gestion du risque torrentiel est efficace lorsque l'ensemble des phénomènes produit sur le bassin considéré est connu. Typiquement, les ouvrages de correction torrentielle sont dimensionnés en fonction des modes de transport solide. Tous les bassins n'étant pas équipés d'instruments (Liébault et al., 2013), leur identification par des traits morphologiques caractéristiques ou des laisses/dépôts n'est pas toujours évidente, d'autant que des phénomènes de transition entre les types d'écoulement peuvent être à l'œuvre. En effet, le caractère transitoire ainsi que les traits morphologiques et dynamiques qu'ils peuvent avoir en commun avec les écoulements qu'ils séparent, rendent leur distinction complexe. Il en est de même pour les formules utilisables pour les modéliser numériquement. Elles doivent être adaptées à ce continuum de phénomènes d'autant que sur le terrain, un même événement peut localement et/ou temporairement évoluer à la faveur d'un changement dans la géométrie du chenal, la saturation, la granulométrie, etc.

L'enjeu dans un premier temps est d'avoir connaissance de la variabilité des écoulements torrentiels et notamment des facteurs qui en sont à l'origine. Cette étude a apporté des éléments de réponses, principalement quant à l'influence, majeure, de la pente sur la nature des écoulements. Cependant, la pente n'est pas l'unique facteur explicatif puisque d'autres paramètres tels que le volume du forçage hydrologique, la granulométrie, la géométrie du chenal, le stock sédimentaire disponible, etc. interviennent aussi dans la formation des écoulements. La multiplicité des paramètres à considérer fait qu'il est par conséquent difficile de délimiter des domaines de formation propres à chaque type d'écoulement. Ceci s'est bien illustré par l'apparition de phénomènes distincts sur une même pente. Le second enjeu est d'être capable d'identifier ces phénomènes lorsqu'ils ont (eu) lieu. Dans le cas d'écoulements granulaires, les traits morphologiques et dynamiques distingués dans ce travail comme discriminants semblent être des critères d'identification cohérents et utilisables sur le terrain car ils ne sont pas exclusifs à de l'expérimental.

L'apport de l'expérimental à la thématique des phénomènes torrentiels est une vraie plus-value lorsqu'il s'agit d'explorer la variabilité des phénomènes. La typologie produite a mis en avant que les limites entre les types d'écoulements sont très floues. Ceci rejoint l'idée qu'il y a un continuum des phénomènes tel que Pierson (2005) l'évoque et non un cloisonnement des types d'écoulement dans des domaines d'écoulement. Il faut cependant rester critique quant à l'apport de ce travail puisque les écoulements étudiés restent spécifiques de par leur formation (rupture de barrage), la granulométrie (très faible étendue, sans cohésifs), la géométrie quasi parfaite du canal.

Perspectives

Les perspectives de ce travail et des travaux qui l'ont précédé sont nombreuses. Tout d'abord, il est tout à fait concevable de continuer l'étude de la variabilité des écoulements en fonction des mêmes valeurs d'entrées (pente et volume de vidange) mais en modifiant une des conditions initiales. Il est possible d'imaginer une quantité quasi-infinie de modification pour qualifier/quantifier l'impact des conditions initiales sur la formation et la nature d'écoulements torrentiels telles que :

- La géométrie du canal avec par exemple l'intégration d'un ou d'une série de modèle d'ouvrage de correction torrentielle dans le lit pour évaluer le comportement des écoulements, notamment celui des laves. Cette modification ajouterait en outre au travail un intérêt opérationnel quant aux rôles de ces ouvrages sur les écoulements granulaires. Il est envisageable que de telles ruptures de pente puissent modifier la nature de l'écoulement lors de son parcours ;
- Tout un travail sur la granulométrie peut également être fait. La granulométrie très resserrée utilisée ici est très théorique car elle n'est pas comparable à la granulométrie d'un système torrentiel réel. Pour l'étendre il est par exemple possible d'ajouter du matériau plus grossier. Ceci aurait plusieurs objectifs. D'une part, il est intéressant d'étudier l'impact de la présence de matériaux grossiers sur la formation d'écoulements torrentiels par comparaison avec la granulométrie actuelle. Il se peut que leur mobilisation soit différente selon leur emplacement sur le lit (patch, ponctuel). D'autre part, cela permettrait d'étudier les processus de ségrégation des blocs vers le front pour des écoulements granulaires. Par ailleurs, Spinewine & Zech (2007) ont pu mettre en avant l'influence qu'a la présence de charge solide dans la retenue influe sur l'écoulement de la vague de débâcle. Ce résultat peut être pertinent à transposer dans le cadre de fortes pentes. Il est également envisageable d'ajouter du matériau cohésif pour former des laves de type viscoplastique, plus courantes dans les alpes françaises (Chambon & Laigle, 2013).
- Les conditions d'ouverture de la vanne sont d'autres facteurs pouvant être intéressants à étudier. La forme de la rupture peut différer tout comme le type d'ouverture. À titre d'exemple, (Oguzhan & Aksoy, 2020) ont simulé des ruptures de barrage avec une ouverture triangulaire car elle est considérée comme plus courante en contexte naturel.

Une seconde perspective à l'issue de ce travail serait d'approfondir l'influence de la contrainte latérale sur les écoulements granulaires en analysant les résultats et les données des quatre stages. Girard (2019) avait travaillé avec une largeur de 30 cm, puis Andréault (2020) et Sow (2021) avec 40 cm. L'analyse des quelques vidéos faites par Sow (2021) a montré qu'à pente équivalente la nature des écoulements est totalement différente pour une largeur de 40 et de 20 cm. La figure [ci-dessous](#) donne un aperçu de l'influence que possède la contrainte latérale sur les volumes de sédiments évacués.

Pour finir, les stages précédents avaient recours à de la photogrammétrie. L'intérêt était de mettre en place une mesure indirecte du bilan sédimentaire afin de vérifier les résultats

obtenus par mesure directe (dispositif de récupération des sédiments). Les résultats montrent que les mesures manquent de précision pour des volumes sédimentaires évacués inférieurs à 10 000 cm³. Pour des volumes supérieurs, la photogrammétrie propose des résultats très cohérents avec la mesure directe. Il s'est également avéré que le Modèle Numérique de Terrain (MNT) permet d'analyser les changements morphologiques du lit induits par la débâcle.

L'objectif de ce stage étant de créer une typologie des écoulements traduisant leur variabilité, il a été décidé de stopper la photogrammétrie car ses résultats ne sont pas essentiels, d'autant que le traitement des données est chronophage. Il serait cependant intéressant de se pencher sur l'impact morphodynamique d'une débâcle sur un lit torrentiel notamment pour quantifier les processus d'érosion et de formation des fronts d'écoulement. L'INRAE a en outre fait l'acquisition d'un scanner 3D Artec Leo qui permet de produire des MNT plus précis et plus rapidement que la photogrammétrie. Au vu des configurations disponibles par le scanner, il serait possible de faire une acquisition semi-dynamique d'une expérience afin d'avoir une évolution presque en temps réel des processus d'érosion et de dépôts à l'œuvre.

Largeur ◆ 20 ◆ 30 ◆ 40

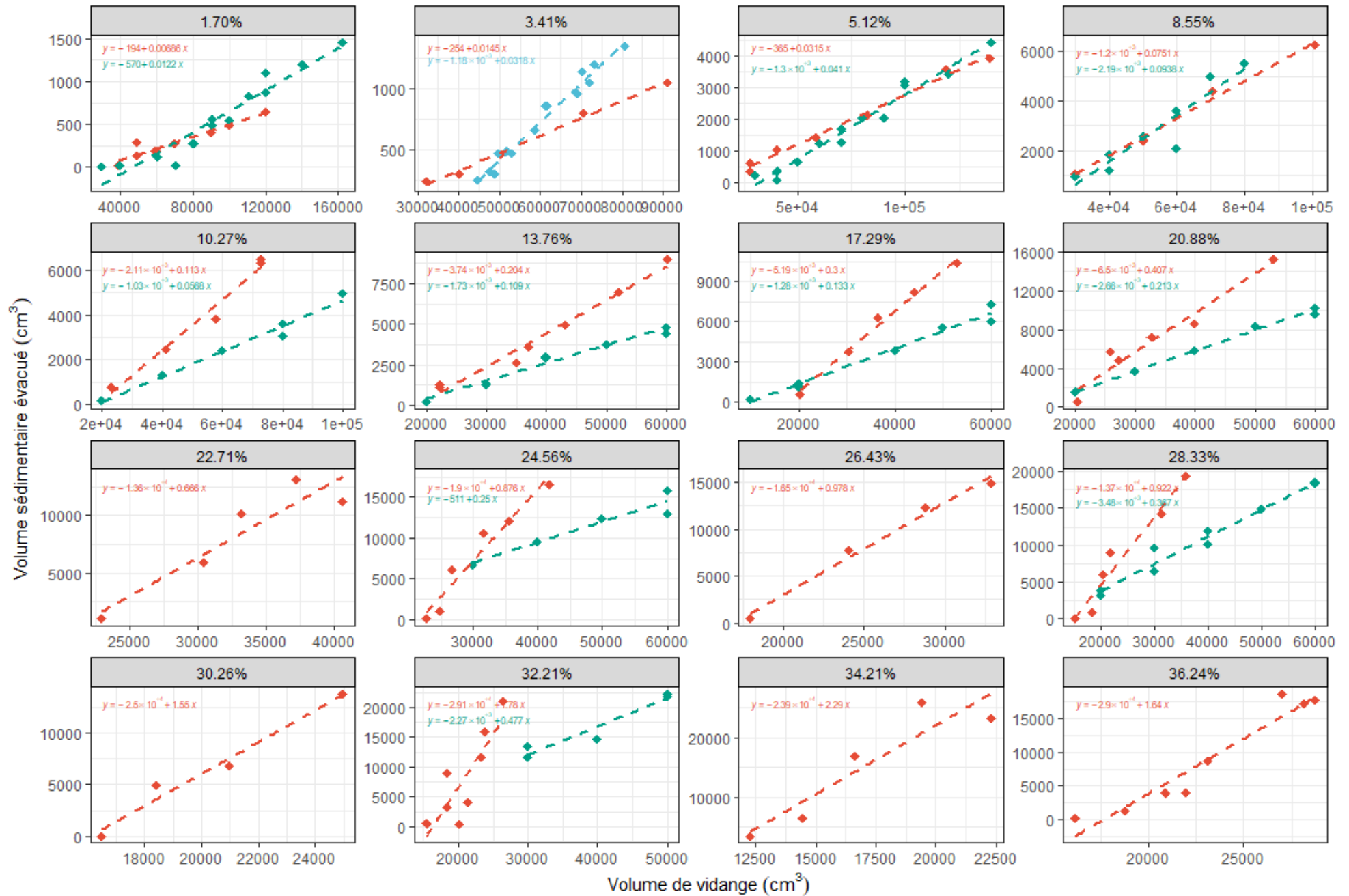


Figure 15 : Évolution du volume sédimentaire évacué en fonction du volume de vidange pour chaque pente. En bleu et vert, les données issues des travaux précédents et en rouge les données du présent travail

Table des figures

Figure 1 : Méthode de classification des types de rivières selon le transport solide et le type de crues	5
Figure 2 : Phénomènes relevant de l'hydraulique, de l'hydraulique torrentielle et de la mécanique des roches	6
Figure 3 : Profil d'une bouffée d'une lave torrentielle	8
Figure 4 : Dispositif expérimental	13
Figure 5 : Courbe granulométrique	14
Figure 6 : Méthodologie expérimentale simplifiée	17
Figure 7 : Critère d'identification de la stabilité du front	18
Figure 8 : Critère d'identification de la longueur du front	19
Figure 9 : Critère d'identification de la dynamique de l'écoulement	19
Figure 10 : Classement des expériences en fonction de la concentration moyenne corrigée pour chaque pente	23
Figure 11 : Classement des expériences en fonction de l'énergie potentielle disponible pour chaque pente.....	25
Figure 12 : Évolution du volume sédimentaire évacué en fonction de la pente au carré pour quatre volumes de vidange	27
Figure 13 : Évolution du volume sédimentaire sorti corrigé en fonction de la pente au carré pour quatre volumes de vidange	27
Figure 14 : Comportement des limnigrammes en fonction de la pente et du volume de vidange	29
Figure 15 : Évolution du volume sédimentaire évacué en fonction du volume de vidange pour chaque pente. En bleu et vert, les données issues des travaux précédents et en rouge les données du présent travail	36

Table des tableaux

Tableau 1 : Facteur d'échelle pour chaque grandeur	13
Tableau 2 : Ordres de grandeur caractérisant les limnigrammes	28

Table des matières

Remerciements	1
Résumé.....	2
Introduction.....	3
1 Etat de l'art.....	4
1.1 La pente dans les hydrosystèmes de montagne	4
1.2 Les écoulements torrentiels.....	6
1.2.1 Le domaine des écoulements hyper-concentrés	7
1.2.2 Le domaine des laves torrentielles	7
1.3 La rupture de barrage comme facteur de formation des écoulements torrentiels ..	9
1.4 L'apport de la modélisation physique	9
2 Objectifs du stage.....	11
3 Méthodologie.....	12
3.1 Dispositif expérimental	12
3.1.1 Principe du modèle physique à fond mobilisable	12
3.1.2 Le canal hydraulique	13
3.1.3 La granulométrie	14
3.2 Dispositifs de mesures.....	14
3.2.1 L'acquisition vidéo.....	14
3.2.2 Le bilan sédimentaire	15
3.2.3 Les capteurs ultrasonores	15
3.3 Protocole expérimental.....	16
4 Résultats.....	17
4.1 Analyse qualitative	17
4.1.1 Description des écoulements observés	17
4.1.2 Classification des écoulements	20
4.1.2.1 Faible concentration moyenne corrigée.....	21
4.1.2.2 Forte concentration moyenne corrigée.....	21
4.1.2.3 Concentration moyenne corrigée intermédiaire.....	22
4.1.3 Inter-comparaison des écoulements	24
4.2 Analyse quantitative.....	26

4.2.1	Influence de la pente.....	26
4.2.2	Comportement des limnigrammes	28
5	Discussion.....	30
5.1	Typologie.....	30
5.2	Limites	31
	Conclusions.....	33
	Perspectives.....	34
	Bibliographie	40
	Annexes.....	43
	Résumé.....	68
	Abstract	68

Bibliographie

Alcrudo, F., & Mulet, J. (2007). Description of the Tous Dam break case study (Spain). *Journal of Hydraulic Research*, 45(sup1), 45-57. <https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521832>

Ancey, C., Bardou, É., & Trehwela, T. (2018). *Reconstruction hydraulique de la débâcle glaciaire du Giétro de 1818*.

Andréault, A. (2020). *Etude expérimentale de l'influence des débâcles brutales sur le transport solide et la morphologie fluviale en contexte de forte pente [Rapport de stage de 5^{ème} année d'ingénieur à Polytech' Tours, Université de Tours]*.

Bajracharya, B., Shrestha, A. B., & Rajbhandari, L. (2007). Glacial Lake Outburst Floods in the Sagarmatha Region : Hazard Assessment Using GIS and Hydrodynamic Modeling. *Mountain Research and Development*, 27(4), 336-344. <https://doi.org/10.1659/mrd.0783>

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*, 28(1-2), 141-167. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(98\)00109-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(98)00109-3)

Chambon, G., & Laigle, D. (2013). Les laves torrentielles. In A. Recking, D. Richard, & G. Degoutte, *Torrents et rivières de montagne, dynamique et aménagement* (p. 200-266). Éd. Quae.

Costa, J., & Schuster, R. (1987). *The formation and failure of natural dams* (Open-File Report) [Open-File Report].

Coussot, P. (1994). Rhéologie des laves torrentielles. *La Houille Blanche*, 80(3), 32-37. <https://doi.org/10.1051/lhb/1994040>

Couyert, B., & Lefebvre, B. (1994). Contribution de modèles physiques à l'étude du charriage torrentiel. *La Houille Blanche*, 80(3), 81-90. <https://doi.org/10.1051/lhb/1994046>

Girard, H. (2019). *Modélisation d'une rupture du barrage sur un lit sédimentaire avec un canal sédimentaire*.

Hanson, G. J., Cook, K. R., & Hunt, S. L. (2005). Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments. *Transactions of the ASAE*, 48(5), 1783-1794. <https://doi.org/10.13031/2013.20012>

Hughes, S. A. (1993). *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering* (Vol. 7). WORLD SCIENTIFIC. <https://doi.org/10.1142/2154>

IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría,

M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.]). Cambridge University Press. In Press.

Koulinski, V. (1994). *Etude de la formation d'un lit torrentiel*. CEMAGREF.

Laigle, D. (2015). Érosion et crue torrentielles. In F. Naaim-Bouvet & D. Richard, *Les risques naturels en montagne*. Éditions Quae.

Laigle, D., & Bardou, E. (2022). Mass-Movement Types and Processes : Flow-Like Mass Movements, Debris Flows and Earth Flows. In *Treatise on Geomorphology* (p. 61-84). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818234-5.00152-8>

Lauber, G., & Hager, W. H. (1998). Experiments to dambreak wave : Sloping channel. *Journal of Hydraulic Research*, 36(5), 761-773. <https://doi.org/10.1080/00221689809498601>

Le Guern, J. (2014). *Modélisation physique et étude morphologique des dépôts dans les ouvrages de correction torrentielle (plage de dépôt)* [Sciences de l'environnement].

Liébault, F. (2003). *Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : Évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massifs du Diois et des Baronnie)*.

Liébault, F., Remaître, A., & Peteuil, C. (2013). Géomorphologie des rivières de montagne. In A. Recking, D. Richard, & G. Degoutte, *Torrents et rivières de montagne, dynamique et aménagement* (p. 15-89). Éd. Quae.

Martaud, M., & Heywood, S. P. (1999). Les modèles physiques en hydraulique urbaine. *Houille Blanche*, 67-74.

Mathys, N., Lang, M., Sauquet, É., Cipriani, T., & Peteuil, C. (2013). Hydrologie. In A. Recking, D. Richard, & G. Degoutte, *Torrents et rivières de montagne, dynamique et aménagement* (p. 90-132). Éd. Quae.

Meunier, M. (1991). *Éléments d'hydraulique torrentielle*. CEMAGREF, Groupement de Grenoble.

Oguzhan, S., & Aksoy, A. O. (2020). Experimental investigation of the effect of vegetation on dam break flood waves. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 68(3), 231-241. <https://doi.org/10.2478/johh-2020-0026>

Pierson, T. C. (2005). Hyperconcentrated flow—Transitional process between waterflow and debris flow. In M. Jakob & O. Hungr, *Debris-flow hazards and related phenomena* (p. 159-202). Springer.

Piton, G., Philippe, F., Richard, D., & Tacnet, J.-M. (2018). *Analyse comparative des méthodes dites « multicritère » dans le contexte torrentiel. Rapport de phase 1 : Caractérisation des phénomènes torrentiels*. IRSTEA.

Recking, A., Degoutte, G., Camenen, B., & Frey, P. (2013). Hydraulique et transport solide. In A. Recking, D. Richard, & G. Degoutte, *Torrents et rivières de montagne, dynamique et aménagement* (p. 133-199). Éd. Quae.

Recking, A., Richard, D., & Degoutte, G. (2013). *Torrents et rivières de montagne, dynamique et aménagement*. Éd. Quae.

Richard, P., & Pestour, J. L. (2004). Le modèle physique, outil privilégié de communication avec les riverains pour les projets d'aménagement torrentiel. *La Houille Blanche*, 90(4), 46-51. <https://doi.org/10.1051/lhb:200404005>

Rickenmann, D. (1990). *Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes* (p. 249 S.) [ETH Zurich; Application/pdf]. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-A-000555802>

Rushmer, E. L. (2007). Physical-scale modelling of jökulhlaups (glacial outburst floods) with contrasting hydrograph shapes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(6), 954-963. <https://doi.org/10.1002/esp.1461>

Schuster, R. (2000). Outburst debris-flow from failure of natural dams. In G. Wieczorek & N. Naeser, *Debris-Flow Hazards Mitigation : Mechanics, Prediction, and Assessment*.

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*, 45(sup1), 87-95-87-95. <https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521835>

Sow, A. (2021). *Etude expérimentale des conditions de formation des écoulements concentrés de type laves torrentielles en cas de libération brutale d'eau de type rupture de barrage*. [Mémoire de stage, Master 2 GAED, GEOÏDES, UGA].

Spinewine, B., & Zech, Y. (2007). Small-scale laboratory dam-break waves on movable beds. *Journal of Hydraulic Research*, 45(sup1), 73-86. <https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521834>

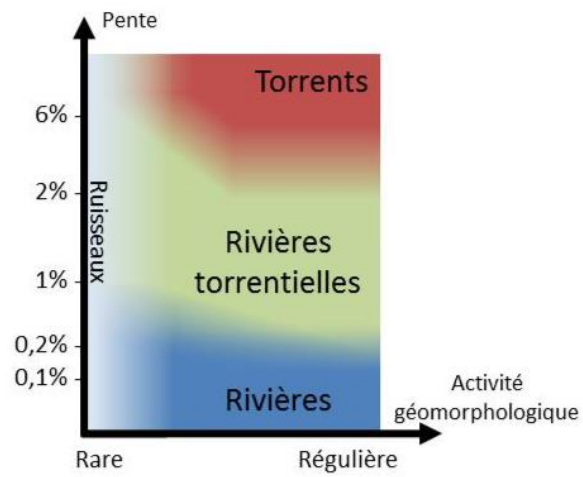
Takahashi, T. (2007). *Debris flow : Mechanics, prediction and countermeasures* (English ed.). Taylor & Francis.

Wentworth, C.K., 1922, A scale of grade and class terms for clastic sediments: *Journal of Geology*, v. 30, p. 377-392.

Wieczorek, G., & Naeser, N. (2000). *Debris-Flow Hazards Mitigation : Mechanics, Prediction, and Assessment*. A.A. Balkema Rotterdam.

Annexes

Annexe 1 : Diagramme conceptuel des limites ruisseaux - torrents - rivières torrentielles - rivières défini selon des considérations de pentes et d'activité géomorphologique (Piton et al., 2018)



Annexe 2 : Classification des laves torrentielles : aspects mécaniques (d'après Ancey (1999),

Nom scientifique proposé		Lave torrentielle à comportement viscoplastique	Lave torrentielle à comportement frictionnel-collisionnel	Lave torrentielle à comportement frictionnel-visqueux
Nom commun		Lave torrentielle à matrice boueuse	Lave torrentielle granulaire	Lahar
Caractéristiques mises en évidence en laboratoire	Rhéologie	Loi de comportement viscoplastique (Bingham, Herschel-Bulkley)	Loi de comportement de type Coulomb	Loi de comportement Coulomb aux faibles vitesses et Newton aux fortes vitesses
	Nombre de paramètres de la loi de comportement	2 ou 3 (K, n, τ_c)	2 (μ, K)	? (φ, μ)
	Granulométrie	Matrice fine importante avec quantité importante d'argiles	Matrice fine faible, peu d'argiles	M(atrice fine importante avec peu d'argiles et beaucoup de silt

Annexe 3 : Différents types de barrages

Barrage anthropique

Barrage formé par un mouvement de terrain (*natural dam*)

Barrage glaciaire issu d'un :

Lac pro-glaciaire :

Lac formé à l'aval des glaciers suite à leur retrait. La retenue d'eau est possible par la présence d'une moraine à l'aval du système.

Lac périglaciaire :

Lac formé par le barrage par un glacier d'une vallée libre de glace bloquant ainsi le ruissellement.

Lac supraglaciaire :

Lac présent à la surface d'un glacier.

Lac intraglaciaire :

Lac formé à l'intérieur même du glacier à la faveur d'une cavité et qui est alimenté par l'eau de fonte.

Lac subglaciaire :

Lac présent à l'interface du glacier et du substratum rocheux grâce à la chaleur géothermique qui permet à l'eau de garder un état liquide.

Annexe 4 : Recensement non exhaustif des modélisations physiques en canal (Modifié d'après Carrivick et al., 2011, vu Sow, 2021)

Experimental channel geometry (length, width, height, all in meters)	Channel planform and gradient	Channel substrat	Other notes	Référence
2.4 x 0.12 x 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)
12.7 x 1.4 x ?	0.002 ; straight	Initially dry with Manning's 'n' of 0,012	Flume has a curved constriction 0.6 m wide	Bellos and al. (1992)
10.0 x 0.3 x 0.3	Horizontal, straight	Plastic, acrylic an sand granules 0,13-3 mm	Recirculating water and sediment	Sumer and al. (1996)
14.0 x 0.5 x 1.2-0.7	Horizontal and Inclined	None?	Dry channel; plastic granular of average diameter 0.2 mm in the reservoir; slope up to 50%	Lauber and Hager (1998)
12.0 x 0.2 x 0.7	Horizontal; straight	Mobile 'wet' granules on top of a mesh	Granules; uniform 6.1 mm diameter, initially 0.06m thick	Capart and Young (1998)
2.5 x 0.1 x 0.35	Horizontal; straight	Coarse cohesionless sediments saturated with water	'Sediment' was cylindrical 3.2 mm diameter PVC pellets, initially 5-6 cm thick	Fracarollo and Capart (2002)
9.0 x 0.,8 x 0.45	1°; straight	Poorly sorted, rounded, fine to medium pebbles	Sediment also input to recirculating system	Rushmer (2007)
3.0 x 0.25 x 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 x 0.495 x 0.15	Horizontal, straight	Saturated mobile coarse sand	Initial bed layer thickness = 0.08 m. Erodable bancks included as well as bed	Soares Frazao and al. (2007)
19.2 x 0.5 x 0.7	Horizontal, straight	Fixed bed, sand bed, and pumice bed	Sand diameter = 0.8 mm	As reported in Leal et al. (2009)
18.5 x 5.0 x 1.6	Horizontal, straight	Non-uniform coal ash	40 cm water depth in reservoir, 0.12 m water depth in channel. D50 of sediment = 0135 mm	Xia et al. (2010)
5.0 x 0.2 x 0.3	Inclined, straight	PVC	Diameter ≈ 3.24 mm	Capart and Fraccarollo (2011)
26.59 x 0.37 x 0.6	Horizontal, straight	None	Investigation of the hydrodynamics of the initial stage of dam-break in order to validate the numeric model which look at the sediment transport	Hsu et al. (2014)

5.0 x 0.3 x 0.5	0.03, straight	Non-uniform sand	?	Girard (2019)
5.0 x 0.4 x 0.5	0.017;0.0512; 0.0855, straight	Non-uniform sand	0.5 mm < Sand diameter < 2 mm	Andreault (2020)
5.0 x 0.4 x 0.5	Until 0.32, straight	Non-uniform sand	0.5 mm < Sand diameter < 2 mm	Sow (2021)
5.0 x 0.2 x 0.5	Until 0.03X, straight	Non-uniform sand	0.5 mm < Sand diameter < 2 mm	Ribet (2022)

Annexe 5 : Nombres adimensionnels utilisés pour l'analyse dimensionnelle

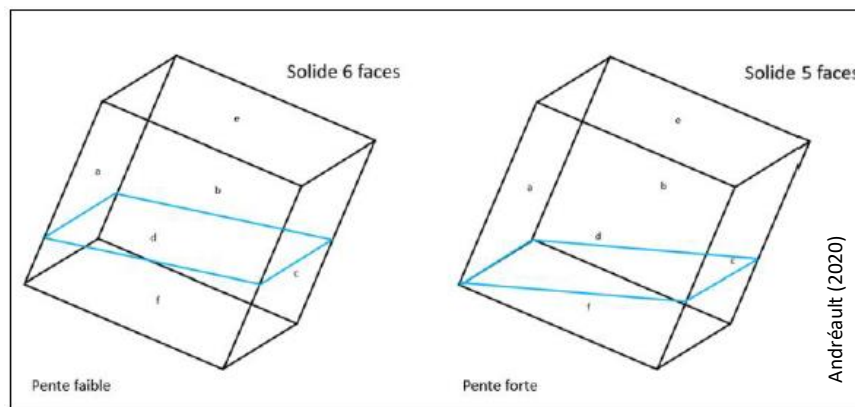
Nombre adimensionnel	Equation	Analyse dimensionnelle	
Loi de frottement	Darcy – Weisbach	$\sqrt{\frac{8}{f}} = \frac{U}{\sqrt{ghs}} = \frac{u}{u_*} = Kh^{\frac{1}{6}}\sqrt{g}$	$\frac{[U]}{[h]^{0.5}}$
	Rickenmann et Recking	$U_{**} = \frac{U}{\sqrt{ghs}}$	$\frac{[U]}{[D]^{0.5}} * \frac{[U]}{[D]}$
Force d'inertie et force de pesanteur	Froude	$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$	$\frac{[U]}{[h]^{0.5}}$
Dimension de l'écoulement / Dimension des rugosités	Submersion relative	$\frac{h}{D}$	$\frac{[H]}{[D]}$
Force d'inertie et force de viscosité dans l'écoulement moyen	Reynold	$Re = \frac{Uh}{\nu}$	$[U] * [h]$
Forces d'arrachements / forces stabilisatrices	Shields	$\tau^* = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gD_x} = \frac{\rho ghs}{(\rho_s - \rho)gD_x} = \frac{hs}{\Delta s D_x}$	$\frac{[H]}{[D]}$
Forces d'inertie / forces de viscosité dans la couche limite	Reynold particulaire	$Re_* = \frac{u_* D_x}{\nu} = \frac{\sqrt{ghs} D_x}{\nu}$	$[H]^{0.5} * [D]$
Transport solide	Débit solide adimensionnel	$\Phi = \frac{\frac{Q_s}{W}}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)gD_x^3}}$	$\frac{[U]}{[D]^{0.5}} * \frac{[U]}{[D]}$

Annexe 6 : Méthode pour calculer le volume de vidange

Il n'est pas si évident que ça de calculer le volume effectif de la cuve pour deux raisons. Tout d'abord, il y a plusieurs volumes morts non mobilisé :

- Volume mort de la cuve ;
- Volume mort inter-porte ;
- Volume mort de la vanne.

De plus, comme le montre la figure ci-dessous, la forme du volume d'eau total dans la cuve dépend de la pente et de la hauteur d'eau. C'est également le cas pour le volume mort de la cuve et le volume mort de la vanne. Le volume mort inter-porte peut également être impacté mais uniquement pour des pentes extrêmement élevée, qui n'ont pas été traitées ici.



Le tableau suivant présente les calculs pour les deux formes prises par le volume d'eau (en L). Le calcul du volume effectif prend ensuite en compte la forme prise par les différents volumes.

Solide à 6 faces		Conditions
Volume total cuve	$[(\frac{(h_{eau} + (h_{eau} - p_{cuve} * \theta))}{2}) * p_{cuve}] * L_{cuve}] * 1000$	
Volume mort cuve	$[(\frac{(B + b) * p_{cuve}}{2}) * L_{cuve}] * 1000$	
Volume mort inter-porte	$[(\frac{(h_{sed} + (h_{sed} - dvs * \theta))}{2}) * dvs] * p_{cuve}] * 1000$	
Volume mort vanne	$[(\frac{(h_{eau} - h_0) - E_{vanne} * p_{cuve} + (h_{eau} - h_0))}{2}) * E_{vanne} * L_{vanne}] * 1000$	
Solide à 5 faces		
Volume total cuve	$[h_{eau} * (\frac{h_{eau}}{\theta}) * L_{cuve} / 2] * 1000$	Dépend de θ et de h_{eau}
Volume mort cuve	$[(\frac{(h_0 + h_{sed} - dvs * \theta)^2}{h_0}) * L_{cuve} / 2] * 1000$	$\theta \geq 17 \text{ m.m}^{-1}$
Volume mort inter-porte	$[(\frac{(h_{sed} / \theta * h_{sed})}{2}) * 0.7] * 1000$	$\theta \geq 45 \text{ m.m}^{-1}$
Volume mort vanne	Même calcul que pour un solide à 6 faces	-
Volume effectif	$V_{totalcuve} - V_{mortcuve} - V_{mortinterporte} - V_{mortvanne}$	

Où :

- θ : pente ($m.m^{-1}$) ;
- h_0 : hauteur séparant le fond de la cuve et la vanne (m) ;
- h_{eau} : hauteur d'eau dans la cuve (m) ;
- h_{sed} : hauteur de sédiment dans le canal (m) ;
- p_{cuve} : profondeur de la cuve (m) ;
- L_{cuve} : largeur de la cuve (m) ;
- dvs : distance entre la vanne et la sortie (m) ;
- E_{vanne} : épaisseur de la vanne (m) ;
- L_{vanne} : largeur de la vanne (m) ;
- $B = 0.1887$;
- $b = -0.0336$.

Ainsi, pour une pente de $0.28328 m.m^{-1}$ et une hauteur d'eau dans la cuve de $0.228 m$, le volume total de la cuve est trapézoïdal et le volume mort cuve est triangulaire. Le volume effectif est donc égal à :

	Trapèze		Triangle	
Volume total cuve	88,947 L	<i>Si $f = 1$</i>	89,001 L	<i>Si $f = 0$</i>
Volume mort cuve	59,063 L	<i>Si $f' = 1$</i>	60,998 L	<i>Si $f' = 0$</i>
Volume mort inter porte	4,320 L	<i>Pas de triangle normalement</i>	8,718 L	<i>Triangle pour très fortes pentes</i>
Volume mort vanne	7,466 L		7,466 L	
Volume effectif	16,162			
Volume effectif - intercuve	20,483			
f	1			
f'	0			

Annexe 7 : Dispositifs de mesures

A : Logitech C930e à grand angle [720 p/30 ips] ; **B** : Canon EOS REBEL T6 [25 ips ; objectif 18-55 mm] ; **C** : Canon EOS 1200D (25 ips ; objectif 25 mm) ; **D** : Canon EOS 2000D 2 (25 ips ; objectif 18 mm) ; **E** : Dispositif de récupération du sédiment ; **F** : Kern [d = 0.01 kg] ; **G** : Kern 440-47N [d = 0.1 g] [précision] ; **H** : Etuve ; **I** Capteur *Banner U-GAGTEM Analog Q45UR* ; **J** : Capteur *Weidmüller LRS3*.



A



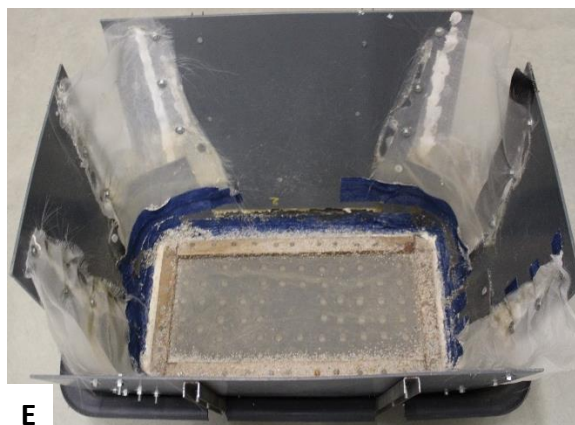
B



C



D



E



F



G



H



I



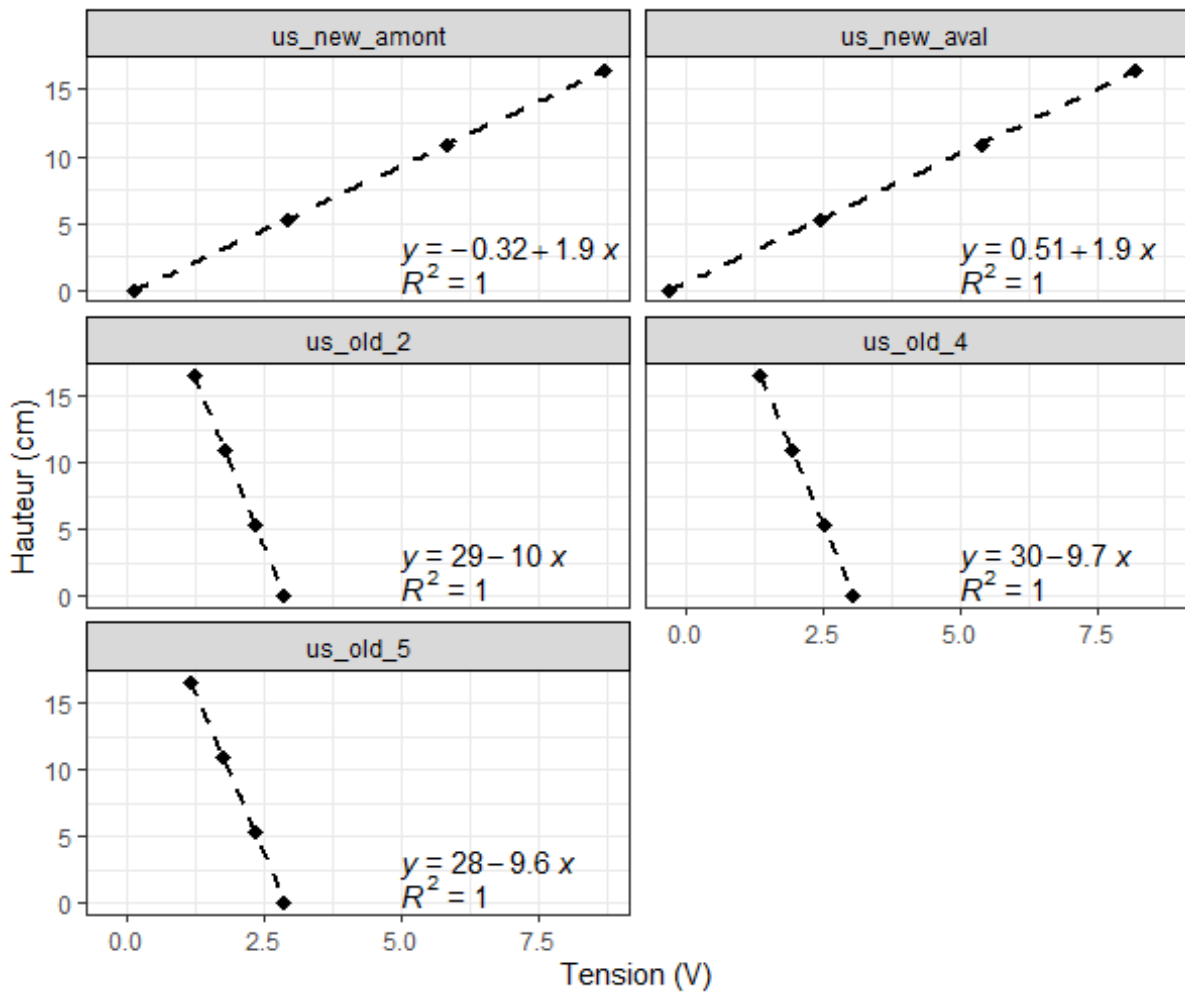
J

Annexe 8 : Méthode pour la détermination de la masse volumique du grain sans porosité

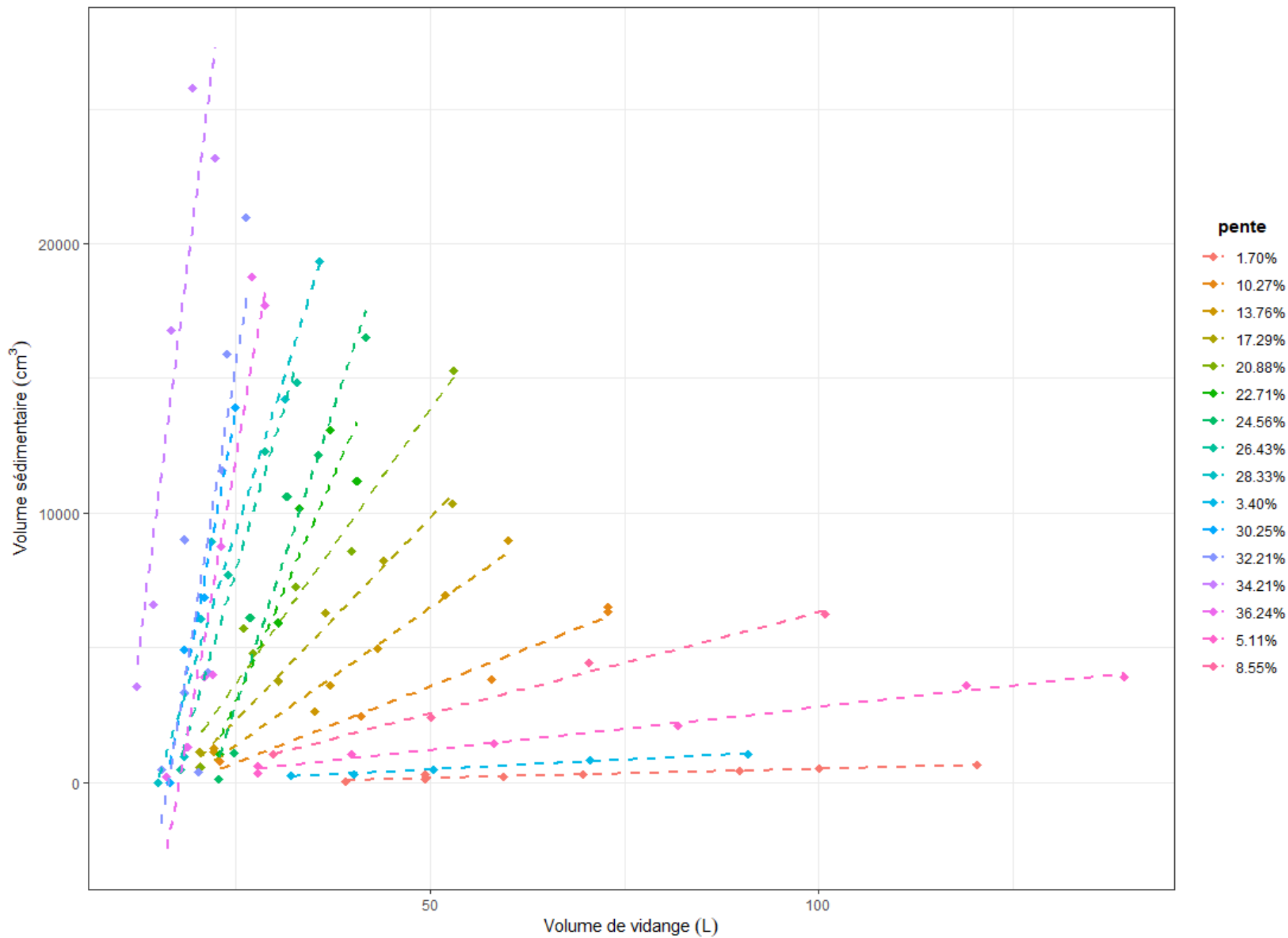
- Éprouvette graduée jusqu'à 2000 mL et dont la masse $m_{\text{epr}} = 470,7\text{g}$;
- Remplir l'éprouvette graduée de sédiment pour atteindre les 2000 mL. La masse du sable inclura ici la porosité selon : $m_{\text{sable}} = 3702 - 470,7 = 3231,3\text{ g}$;
- Injecter de l'eau dans l'éprouvette jusqu'à la graduation des 2000 mL ;
- Ainsi :
 - $m_{\text{sable+eau}} = 3988,3\text{ g}$;
 - $m_{\text{eau}} = 3988,3 - 3231,3 = 752\text{ g}$, soit $V_{\text{eau}} = 752\text{ cm}^3$;
 - $V_{\text{sed}} = 2000 - 752 = 1248\text{ cm}^3$;
 - $\rho_{\text{sed}} = \frac{3231,3}{1248} = 2,59\text{ g.cm}^3$, où ρ_{grain} est la masse volumique du grain sans porosité, c'est-à-dire sans air entre les grains ;
 - $\rho_{\text{sedp}} = \frac{3231,3}{2000} = 1,615\text{ g.cm}^3$, où ρ_{grainp} est la masse volumique du grain avec porosité (apparente).

Annexe 9 : Méthodologie pour calibrer les capteurs

La phase de calibration consiste à vérifier la tension du signal électrique (en V) émis puis reçu par les capteurs en fonction de hauteurs (en cm) connues. De la même façon que pour les stages précédents, pour chaque capteur, quatre mesures ont été faites : une mesure sans objet puis, trois avec des objets d'hauteurs connues (0 cm, 5,3 cm, 10,9 cm puis 16,5 cm) placés sous le capteur. Cela permet de tracer une droite de régression et de déterminer son coefficient R^2 renseignant ainsi la qualité de la calibration. Les droites de régression pour chaque capteur sont ci-dessous.



Annexe 10 : Évolution du bilan sédimentaire en fonction du volume de vidange



Annexe 11 : Première analyse des écoulements par des critères d'identification

			20,88%					
			20,555L	25,967L	27,32L	32,731L	39,946L	53L
Morphologie de l'écoulement	Front	Présence d'un front granulaire (oui/non)	oui	oui	oui	n/d	oui	oui
		Stabilité du front/barre l'écoulement (stable/instable/liquide)	instable	instable	instable	instable	instable	liquide
		Longueur du front (court/intermédiaire/long)	court	court	court	n/d	court	court
		Formation de l'optimum du front (amont/milieu/aval)	amont	amont	amont	n/d	amont	amont
		Lame d'eau en surface (oui/non)	oui	oui	oui	n/d	oui	oui
		Dislocation du front (oui/non)	non	non	non	n/d	non	non
Dynamique de l'écoulement	Corps	Localisation de la dislocation (amont/milieu/aval)				n/d		
		Présence d'un corps (oui/non)	non	non	non	n/d	non	non
		Lame d'eau en surface (oui/non)	oui	oui	oui	n/d	oui	oui
		Vitesse de propagation du front (rapide/intermédiaire/lente)	lente	intermédiaire	intermédiaire	n/d	rapide	rapide
		Épaisseur cisailée du front maximale (importante 2+ cm/intermédiaire 1-2 cm/faible -1 cm/nulle)	nulle	nulle	nulle	n/d	nulle	nulle
		Dynamique de la vague à Amont (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	n/d	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont
Dynamique de l'écoulement	Corps	Dynamique de la vague à Amont_2 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	n/d	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont
		Dynamique de la vague à Amont_3 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	n/d	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont
		Dynamique de la vague à Amont_3 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	n/d	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont

			22,71%				
			23,029L	30,47L	33,175L	37,23L	40,62L
Morphologie de l'écoulement	Front	Présence d'un front granulaire (oui/non)	oui	oui	oui	oui	oui
		Stabilité du front/barre l'écoulement (stable/instable/liquide)	stable	instable	instable	instable	instable
		Longueur du front (court/intermédiaire/long)	court	court	court	court	intermédiaire
		Formation de l'optimum du front (amont/milieu/aval)	amont	milieu	amont	amont	amont
		Lame d'eau en surface (oui/non)	oui	oui	oui	oui	oui
		Dislocation du front (oui/non)	oui	non	non	non	non
Dynamique de l'écoulement	Corps	Localisation de la dislocation (amont/milieu/aval)	aval				
		Présence d'un corps (oui/non)	non	non	non	non	non
		Lame d'eau en surface (oui/non)	oui	oui	oui	oui	oui
		Vitesse de propagation du front (rapide/intermédiaire/lente)	lente	lente	rapide	rapide	rapide
		Épaisseur cisailée du front maximale (importante 2+ cm/intermédiaire 1-2 cm/faible -1 cm/nulle)	nulle	nulle	nulle	nulle	nulle
		Dynamique de la vague à Amont (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	dépôt & reprise	dépôt & reprise	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont	dépôt & reprise
Dynamique de l'écoulement	Corps	Dynamique de la vague à Amont_2 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	diffusion	dépôt & reprise	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont	dépôt & reprise
		Dynamique de la vague à Amont_3 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	diffusion	dépôt & reprise	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont	dépôt & reprise
		Dynamique de la vague à Amont_3 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	diffusion	dépôt & reprise	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont	dépôt & reprise

			24,56%				
			22,807L	26,866L	31,601L	35,66L	41,748L
Morphologie de l'écoulement	Front	Présence d'un front granulaire (oui/non)	oui	oui	oui	oui	oui
		Stabilité du front/barre l'écoulement (stable/instable/liquide)	instable	instable	instable	instable	instable
		Longueur du front (court/intermédiaire/long)	intermédiaire	intermédiaire	intermédiaire	intermédiaire	intermédiaire
		Formation de l'optimum du front (amont/milieu/aval)	milieu	amont	amont	amont	amont
		Lame d'eau en surface (oui/non)	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d
		Dislocation du front (oui/non)	oui	non	non	non	non
Dynamique de l'écoulement	Corps	Localisation de la dislocation (amont/milieu/aval)	aval				
		Présence d'un corps (oui/non)	non	non	non	non	non
		Lame d'eau en surface (oui/non)	n/d	oui	oui	oui	oui
		Vitesse de propagation du front (rapide/intermédiaire/lente)	lente	intermédiaire	intermédiaire	intermédiaire	rapide
		Épaisseur cisailée du front maximale (importante 2+ cm/intermédiaire 1-2 cm/faible -1 cm/nulle)	n/d	faible	n/d	n/d	n/d
		Dynamique de la vague à Amont (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise
Dynamique de l'écoulement	Corps	Dynamique de la vague à Amont_2 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	diffusion	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise
		Dynamique de la vague à Amont_3 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	diffusion	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont
		Dynamique de la vague à Amont_3 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	diffusion	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont

			26,43%			
			17,998L	24,086L	28,821L	32,204L
Morphologie de l'écoulement	Front	Présence d'un front granulaire (oui/non)	oui	oui	oui	oui
		Stabilité du front/barre l'écoulement (stable/instable/liquide)	stable	instable	instable	instable
		Longueur du front (court/intermédiaire/long)	intermédiaire	intermédiaire	intermédiaire	intermédiaire
		Formation de l'optimum du front (amont/milieu/aval)	milieu	amont	amont	milieu
		Lame d'eau en surface (oui/non)	oui	oui	oui	oui
		Dislocation du front (oui/non)	oui	non	non	non
Dynamique de l'écoulement	Corps	Localisation de la dislocation (amont/milieu/aval)	aval			
		Présence d'un corps (oui/non)	non	oui	oui	oui
		Lame d'eau en surface (oui/non)	oui	oui	oui	oui
		Vitesse de propagation du front (rapide/intermédiaire/lente)	lente	intermédiaire	intermédiaire	rapide
		Épaisseur cisailée du front maximale (importante 2+ cm/intermédiaire 1-2 cm/faible -1 cm/nulle)	faible	intermédiaire	faible	faible
		Dynamique de la vague à Amont (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise
Dynamique de l'écoulement	Corps	Dynamique de la vague à Amont_2 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont
		Dynamique de la vague à Amont_3 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	diffusion	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse
		Dynamique de la vague à Amont_3 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	diffusion	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse

			28,33%			
			18,453L	20,483L	31,306L	35,78L
Morphologie de l'écoulement	Front	Présence d'un front granulaire (oui/non)	oui	oui	oui	oui
		Stabilité du front/barre l'écoulement (stable/instable/liquide)	stable	instable	instable	instable
Longueur du front (court/intermédiaire/long)		long	long	intermédiaire	intermédiaire	
Formation de l'optimum du front (amont/milieu/aval)		amont	aval	amont	amont	
Lame d'eau en surface (oui/non)		oui	oui	oui	oui	
Dislocation du front (oui/non)		non	non	non	non	
Morphologie de l'écoulement	Corps	Présence d'un corps (oui/non)	n/d	oui	n/d	non
		Lame d'eau en surface (oui/non)	oui	oui	oui	oui
Dynamique de l'écoulement		Vitesse de propagation du front (rapide/intermédiaire/lente)	lente	intermédiaire	rapide	rapide
		Épaisseur cisailée du front maximale (importante 2+ cm/intermédiaire 1-2 cm/faible -1 cm/nulle)	n/d	intermédiaire	n/d	n/d
		Dynamique de la vague à Amont (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise
		Dynamique de la vague à Amont_2 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	écoulement en masse	pulsé par l'amont	dépôt & reprise	dépôt & reprise
		Dynamique de la vague à Amont_3 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	écoulement en masse	écoulement en masse	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont

			30,26%			
			16,516L	18,421L	21,005L	24,997L
Morphologie de l'écoulement	Front	Présence d'un front granulaire (oui/non)	oui	oui	oui	oui
		Stabilité du front/barre l'écoulement (stable/instable/liquide)	stable	stable	stable	instable
Longueur du front (court/intermédiaire/long)		long	long	long	long	
Formation de l'optimum du front (amont/milieu/aval)		milieu	aval	aval	amont	
Lame d'eau en surface (oui/non)		non	non	non	non	
Dislocation du front (oui/non)		non	non	non	non	
Morphologie de l'écoulement	Corps	Présence d'un corps (oui/non)	oui	oui	oui	oui
		Lame d'eau en surface (oui/non)	oui	oui	oui	oui
Dynamique de l'écoulement		Vitesse de propagation du front (rapide/intermédiaire/lente)	lente	intermédiaire	intermédiaire	rapide
		Épaisseur cisailée du front maximale (importante 2+ cm/intermédiaire 1-2 cm/faible -1 cm/nulle)	intermédiaire	importante	importante	intermédiaire
		Dynamique de la vague à Amont (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise
		Dynamique de la vague à Amont_2 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	écoulement en masse	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise
		Dynamique de la vague à Amont_3 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse

			32,21%			
			15,413L	18,367L	23,252L	23,876L
Morphologie de l'écoulement	Front	Présence d'un front granulaire (oui/non)	oui	oui	oui	oui
		Stabilité du front/barre l'écoulement (stable/instable/liquide)	stable	stable	instable	instable
Longueur du front (court/intermédiaire/long)		long	long	long	important	
Formation de l'optimum du front (amont/milieu/aval)		milieu	aval	aval	aval	
Lame d'eau en surface (oui/non)		non	non	oui	oui	
Dislocation du front (oui/non)		oui	non	non	non	
Morphologie de l'écoulement	Corps	Présence d'un corps (oui/non)	oui	oui	oui	oui
		Lame d'eau en surface (oui/non)	non	non	oui	oui
Dynamique de l'écoulement		Vitesse de propagation du front (rapide/intermédiaire/lente)	lente	lente	rapide	rapide
		Épaisseur cisailée du front maximale (importante 2+ cm/intermédiaire 1-2 cm/faible -1 cm/nulle)	importante	importante	n/d	importante
		Dynamique de la vague à Amont (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	écoulement en masse	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise
		Dynamique de la vague à Amont_2 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	diffusion	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise
		Dynamique de la vague à Amont_3 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	diffusion	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse

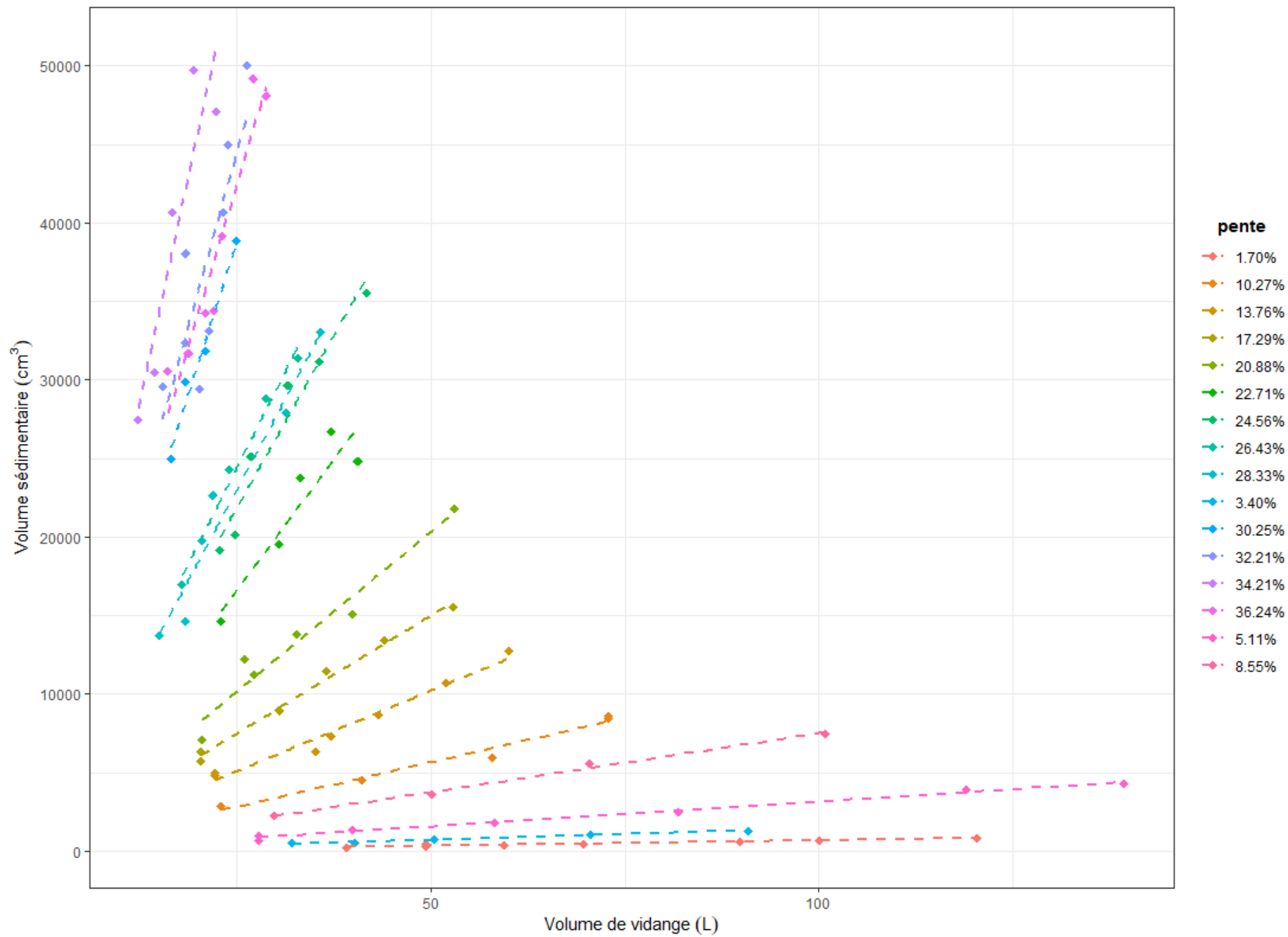
			34,21%				
			12,301L	14,445L	16,634L	19,435L	22,306L
Morphologie de l'écoulement	Front	Présence d'un front granulaire (oui/non)	oui	oui	oui	oui	oui
		Stabilité du front/barre l'écoulement (stable/instable/liquide)	stable	stable	stable	instable	stable
Longueur du front (court/intermédiaire/long)		long	long	long	long	long	
Formation de l'optimum du front (amont/milieu/aval)		amont	aval	aval	milieu	aval	
Lame d'eau en surface (oui/non)		non	non	non	non	non	
Dislocation du front (oui/non)		oui	non	non	non	non	
Morphologie de l'écoulement	Corps	Présence d'un corps (oui/non)	oui	oui	oui	oui	oui
		Lame d'eau en surface (oui/non)	non	non	oui	oui	oui
Dynamique de l'écoulement		Vitesse de propagation du front (rapide/intermédiaire/lente)	lente	lente	intermédiaire	rapide	rapide
		Épaisseur cisailée du front maximale (importante 2+ cm/intermédiaire 1-2 cm/faible -1 cm/nulle)	n/d	importante	importante	importante	importante
		Dynamique de la vague à Amont (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	écoulement en masse	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	écoulement en masse
		Dynamique de la vague à Amont_2 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	diffusion	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse
		Dynamique de la vague à Amont_3 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	diffusion	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse

			36,24%						
			16,147L	18,767L	21,999L	23,098L	27,028L	28,145L	28,752L
Morphologie de l'écoulement	Front	Présence d'un front granulaire (oui/non)	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
		Stabilité du front/barre l'écoulement (stable/instable/liquide)	stable	stable	stable	stable	instable	stable	stable
Longueur du front (court/intermédiaire/long)		long	long	long	long	long	long	long	
Formation de l'optimum du front (amont/milieu/aval)		milieu	milieu	milieu	aval	amont	aval	aval	
Lame d'eau en surface (oui/non)		non	non	non	non	oui	non	non	
Dislocation du front (oui/non)		oui	oui	oui	non	non	non	non	
Morphologie de l'écoulement	Corps	Présence d'un corps (oui/non)	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
		Lame d'eau en surface (oui/non)	non	non	non	non	oui	oui	oui
Dynamique de l'écoulement		Vitesse de propagation du front (rapide/intermédiaire/lente)	lente	lente	lente	lente	rapide	rapide	rapide
		Épaisseur cisailée du front maximale (importante 2+ cm/intermédiaire 1-2 cm/faible -1 cm/nulle)	importante	importante	intermédiaire	intermédiaire	intermédiaire	importante	importante
		Dynamique de la vague à Amont (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	dépôt & reprise	dépôt & reprise	dépôt & reprise	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse
		Dynamique de la vague à Amont_2 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	écoulement en masse	fracturation	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse
		Dynamique de la vague à Amont_3 (dépôt & reprise/pulsé par l'amont/écoulement en masse) ou de la dislocation du front (diffusion/rupture)	fracturation	fracturation	fracturation	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse

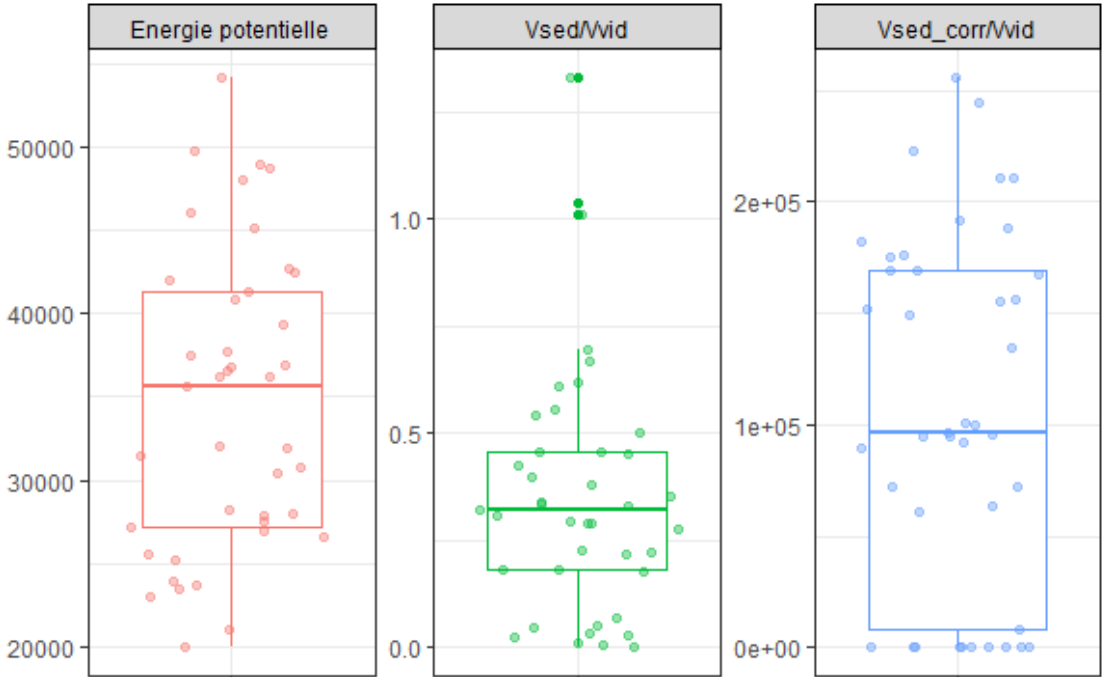
Annexe 12 : Classement des expériences en fonction de la pente et de la concentration moyenne

		Pente (m.m-1)								Critère (cf 4.1.1)		
		0,208825968	0,227089399	0,245571529	0,264294108	0,28328015	0,302554101	0,322142017	0,342071767		0,362373264	
Faible	instable	stable	instable	stable	stable	stable	stable	stable	stable	stable	1	
	court	court	intermédiaire	intermédiaire	long	long	long	long	long	long	2	
	non	non	non	non	n/d	oui	oui	oui	oui	oui	3	
	nulle	nulle	n/d	faible	n/d	intermédiaire	importante	importante	importante	importante	4	
	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	5	
	dépôt et reprise	dislocation	dislocation	pulsé par l'amont	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	6	
	dépôt et reprise	dislocation	dislocation	dislocation	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	7	
	instable							stable	stable	stable	1	
	faible							important	important	important	2	
	non							oui	oui	oui	3	
	nulle							importante	importante	importante	4	
	dépôt et reprise							dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	5	
	dépôt et reprise							dépôt et reprise	dislocation	dislocation	6	
	dépôt et reprise							écoulement en masse	dislocation	dislocation	7	
intermédiaire	instable	instable	instable		instable			stable	stable	stable	1	
	court	court	intermédiaire		intermédiaire			long	long	long	2	
	non	non	non		non			oui	oui	oui	3	
	nulle	nulle	n/d		n/d			n/d	intermédiaire	intermédiaire	4	
	dépôt et reprise	pulsé par l'amont	dépôt et reprise		dépôt et reprise			écoulement en masse	dépôt et reprise	dépôt et reprise	5	
	dépôt et reprise	pulsé par l'amont	dépôt et reprise		dépôt et reprise			dislocation	écoulement en masse	écoulement en masse	6	
	dépôt et reprise	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont		pulsé par l'amont			dislocation	dislocation	dislocation	7	
	instable	instable									1	
	court	intermédiaire									2	
	non	non									3	
	nulle	faible									4	
	pulsé par l'amont	dépôt et reprise									5	
	pulsé par l'amont	dépôt et reprise									6	
	pulsé par l'amont	dépôt et reprise									7	
Concentration moyenne	liquide										1	
	court										2	
	non										3	
	nulle										4	
	pulsé par l'amont										5	
	pulsé par l'amont										6	
	pulsé par l'amont										7	
	Importante	instable	instable	instable	instable	instable	stable			stable	stable	1
		court	court	intermédiaire	intermédiaire	long	long			long	long	2
		non	non	non	oui	oui	oui			oui	oui	3
		nulle	nulle	faible	intermédiaire	intermédiaire	importante			intermédiaire	intermédiaire	4
		pulsé par l'amont	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise			écoulement en masse	écoulement en masse	5
		pulsé par l'amont	dépôt et reprise	dépôt et reprise	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont	dépôt et reprise			écoulement en masse	écoulement en masse	6
		pulsé par l'amont	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse			écoulement en masse	écoulement en masse	7
Très importante		instable	instable	instable	instable	instable	stable			stable	stable	1
		intermédiaire	intermédiaire	intermédiaire	intermédiaire	long	long			long	long	2
		n/d	n/d	oui	oui	oui	oui			oui	oui	3
		n/d	n/d	faible	intermédiaire	intermédiaire	importante			intermédiaire	intermédiaire	4
		dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise			écoulement en masse	écoulement en masse	5
		dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	pulsé par l'amont	dépôt et reprise	dépôt et reprise			écoulement en masse	écoulement en masse	6
		pulsé par l'amont	pulsé par l'amont	pulsé par l'amont	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse			écoulement en masse	écoulement en masse	7
	Concentration moyenne	instable	instable	instable	instable	instable	stable			stable	stable	1
		important	important	important	important	important	important			important	important	2
		oui	oui	oui	oui	oui	oui			oui	oui	3
		importante	importante	importante	importante	importante	importante			importante	importante	4
		dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise			écoulement en masse	écoulement en masse	5
		dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	pulsé par l'amont	dépôt et reprise	dépôt et reprise			écoulement en masse	écoulement en masse	6
		écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse			écoulement en masse	écoulement en masse	7
Très importante		instable	instable	instable	instable	instable	stable			stable	stable	1
		important	important	important	important	important	important			important	important	2
		oui	oui	oui	oui	oui	oui			oui	oui	3
		importante	importante	importante	importante	importante	importante			importante	importante	4
		dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise			écoulement en masse	écoulement en masse	5
		dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	pulsé par l'amont	dépôt et reprise	dépôt et reprise			écoulement en masse	écoulement en masse	6
		écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse			écoulement en masse	écoulement en masse	7
	Très importante	instable	instable	instable	instable	instable	stable			stable	stable	1
		important	important	important	important	important	important			important	important	2
		oui	oui	oui	oui	oui	oui			oui	oui	3
		importante	importante	importante	importante	importante	importante			importante	importante	4
		dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise			écoulement en masse	écoulement en masse	5
		dépôt et reprise	dépôt et reprise	dépôt et reprise	pulsé par l'amont	dépôt et reprise	dépôt et reprise			écoulement en masse	écoulement en masse	6
		écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse	écoulement en masse			écoulement en masse	écoulement en masse	7

Annexe 13 : Évolution du bilan sédimentaire corrigé en fonction du volume de vidange



Annexe 14 : Distribution des indices



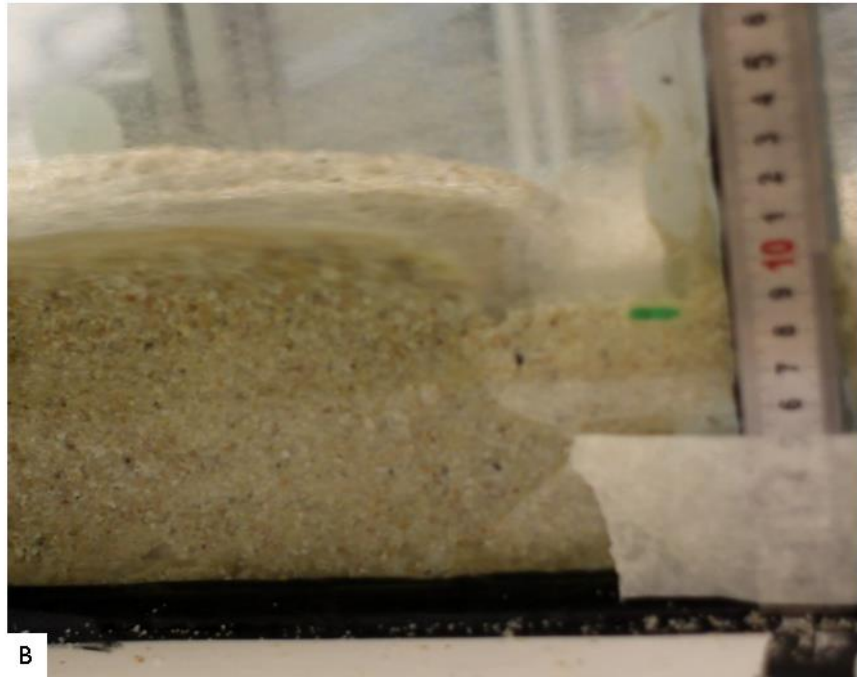
Annexe 15 : Écoulements types des pentes allant de 1.70 à 24.56 %

A : 5.12 % - 58 L : l'écoulement est caractérisé par une charge de fond de charriage ; **B** : 8.55 % - 58 L : présence d'une accumulation granulaire visible à l'aval ; **C** : 20.88 % - 26 L : le front instable rend la dynamique très saccadée avec des mouvements latéraux ; **D** : 24.56 % - 27 L : l'écoulement est caractérisé par un front de longueur intermédiaire.



Annexe 16 : Écoulements singuliers pour de faible concentration corrigée

A : 28.33 % - 18L : front parfaitement formé ; **B** 30.26 % - 16 L : cisaillement sur une épaisseur intermédiaire



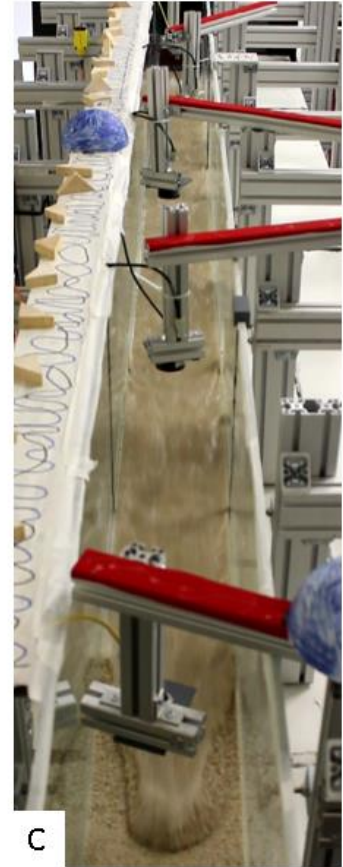
Annexe 17 : Écoulement type lave torrentielle pour 36.24 % - 28 L

A : le front stable, long ; **B** : le front est cisailé sur + de 3 cm d'épaisseur caractéristique d'un écoulement en masse



Annexe 18 : Écoulements types des pentes 26.43 et 28.33 %

A : 28.33 % - 20 L ; le front ne barre pas l'écoulement mais est relativement long ; **B** : 28.33 % - 20 L ; le front est cisailé sur environ 1,5 cm d'épaisseur ; **C** : 28.33 % - 31 L ; présence d'une accumulation granulaire.



Annexe 19 : Exemple d'équations du transport solide

- Mizuyama (1981) (vu dans Rickenmann, 1990) :

$$\frac{q_s}{q_l} = 5.5 * I^2$$

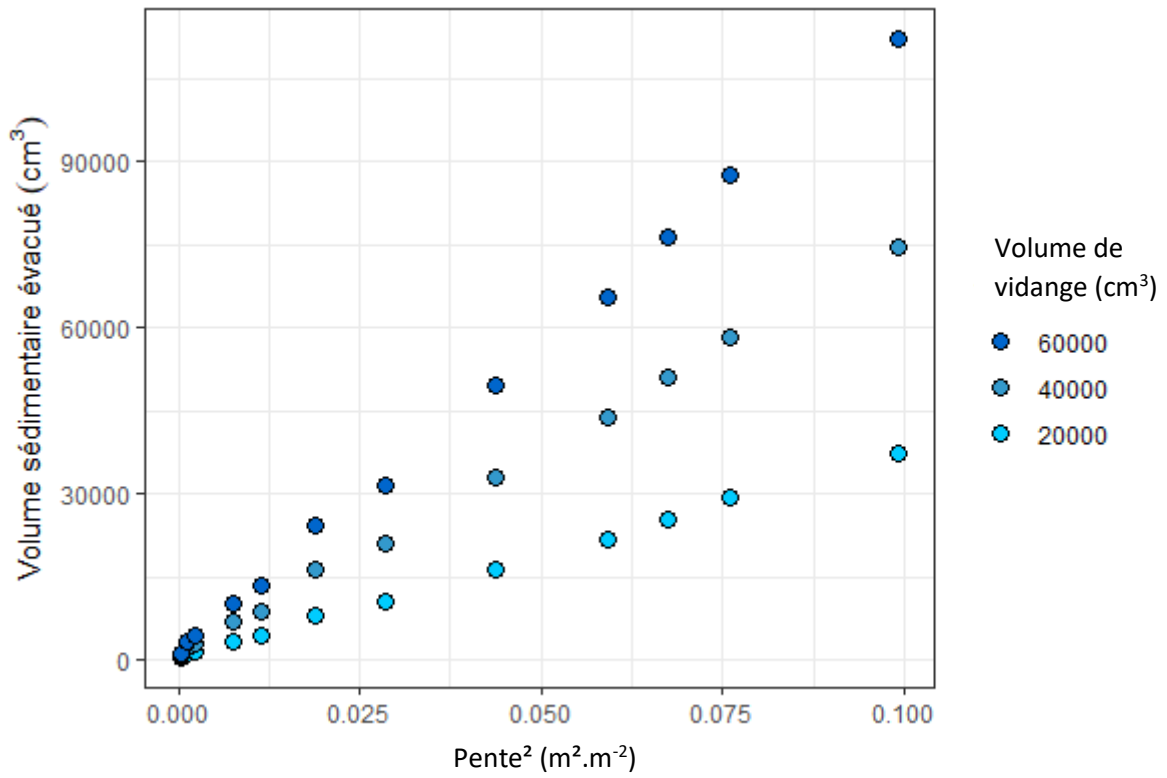
Où q_s est le débit solide par unité de largeur ($m^3/s.m$), q_l le débit liquide par unité de largeur ($m^3/s.m$) et I la pente ($m.m^{-1}$).

- Rickenmann (1990) :

$$\frac{Q_s}{Q_l} = 12.6 * \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right) * \left(\frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f}\right)^{1.6} * I^2 * \left(1 - \frac{Q_{l*c}}{Q_l}\right)$$

Pour $0.05 < I^2 < 0.20$, où Q_s est le débit solide (m^3/s), Q_l le débit liquide (m^3/s), ρ_f la masse volume du fluide ($kg.m^3$), ρ_s la masse volumique du matériau solide ($kg.m^3$), I la pente ($m.m^{-1}$), c le coefficient de résistance de l'écoulement.

Annexe 20 : Évolution du volume sédimentaire évacué en fonction de la pente au carré pour différents volume de vidange et une contrainte latérale inférieure (Données : Sow, 2021)



Résumé

Par une approche expérimentale, ce mémoire vise à étudier la variabilité des écoulements torrentiels granulaires en cas de rupture brutale de barrage telle qu'une vidange d'un lac glaciaire ou une rupture de barrage naturel. Les écoulements ainsi formés peuvent mobiliser une grande quantité de matériaux à la faveur de fortes pentes et se révéler dangereux pour les enjeux anthropiques en aval. Ces écoulements peuvent cependant être de différentes natures (lave torrentielle, écoulement hyper-concentré, etc.), notamment selon la pente et le volume vidangé considérés.

C'est par une approche expérimentale que nous tentons ici d'apporter des éléments de compréhension sur l'influence de ces deux facteurs sur la nature des écoulements issus d'une rupture de barrage. Le modèle physique prend la forme d'un canal rectangulaire à fond mobile, respectant les similitudes de Froude. Pour des conditions initiales définies (géométrie, granulométrie et mode de formation), la versatilité des écoulements est étudiée pour un large spectre de pente allant de 1.70 à 36.24 % et des volumes d'eau claire vidangés différents.

Pour établir une analyse qualitative, trois caméras latérales et une zénithale, ont permis de décrire les écoulements. Le canal est en outre muni d'un dispositif de récupération des sédiments évacués et de cinq capteurs ultrasonores. Le traitement de ces données est venu appuyer l'analyse qualitative.

Les simulations ont révélé une multitude d'écoulements caractérisés par des traits morphologiques, des dynamiques et des modes de transport solide différents. Cette versatilité de phénomènes analogues à du charriage, de l'hyper-concentré, et des laves torrentielles traduit un continuum des types d'écoulement où la pente joue un rôle majeur.

Abstract

This report aims to study the variability of torrential granular flows in case of dam failure as glacial lake or natural dam break. Due to steep slopes, those kind of flows can transport considerable amount of materials and therefore be dangerous for human stakes downstream. Various sort of flows can be formed that way (debris flow, hyperconcentrated flow, etc.), depending on the slope and the volume of drained water.

In order to bring some element of comprehension into the influence of these two factors on of dam break flows, this work makes use of a physical model with a flume that respect Froude similarity. Through a geometry, a granulometry and a formation mode that stay the same for all the experiments, the versatility of flows is examined for a slope range that extend from 1.70 to 36.24 % and for different drained volume of clean water.

To establish a qualitative analysis, two cameras and one webcam shot from sideways and one camera shot from above of the flume. Thereby, they enable to describe flows. Moreover, the flume is fitted with a sediment recuperation device downstream and with five ultrasonic sensors. The processing of these data heighten the work.

Simulation showed a large variability of granular flows that are characterized by morphological and dynamic features and various sediment transport. This versatility of phenomenon analogous of bed-load, hyperconcentrated flows and debris flows shows a continuum of flow that is mostly influenced by slope.



Centre siège Antony-Paris
Direction de l'Appui aux Politiques Publiques
1, rue Pierre-Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony Cedex
Tél. : +33 1 (0)1 40 96 61 21



Rejoignez-nous sur :

www.inrae.fr



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET DE LA COHÉSION
DES TERRITOIRES**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE