UCLouvain

epl

École polytechnique de Louvain

Etude expérimentale de l'impact morphologique aval des chasses de barrage

Auteurs: **Brieuc Bosseler, Guillaume Noël**
Promoteur: **Sandra Soares-Frazão**
Lecteurs: **Robin Meurice, Benoît Herman**
Année académique 2022–2023
Master [120] : ingénieur civil des constructions

Remerciements

Après presque 1 an de travail sur ce mémoire, nous souhaiterions remercier les personnes sans qui tout cela n'aurait pas été possible.

Tout d'abord, nous voudrions remercier notre promotrice, Madame Sandra Soares Frazão, pour sa disponibilité, son écoute, ses précieux conseils ainsi que son suivi tout au long de cette année.

Nous tenions à remercier chaleureusement Robin Meurice qui nous a assisté du début à la fin dans cette longue aventure. Sans sa passion instructive et communicative pour la recherche en hydraulique, sa disponibilité, sa patience et sa bienveillance, ce mémoire n'aurait pas pu être mené de la même manière.

Sans le travail remarquable fourni par Pierre Mertens de Wilmars sur le canal expérimental du LEMSC, ce travail n'aurait tout simplement pas pu avoir lieu. Nous tenons également à remercier Antoine Bietlot ainsi que l'ensemble du personnel du LEMSC pour leur disponibilité à tout moment.

Un tout grand merci à Michel Henry pour son aide et son efficacité sans faille dans le développement de la technique de mesure de la concentration, technique qui s'est avérée être bien plus compliquée que prévue. Nous voudrions aussi remercier Hervé Capart qui nous a grandement aidé sur une autre méthode de mesure de concentration.

Merci également à Charles Ryckmans et Masoumeh Ebrahimi pour leurs conseils dans l'utilisation de différents outils nécessaires à ce mémoire.

Nous tenions à exprimer notre gratitude envers Benoît et Victor, étudiants qui ont partagé le même canal expérimental pour leurs recherches. Leur attitude conciliante et respectueuse tout au long de cette année a joué un rôle crucial dans la création d'un environnement propice à la réalisation harmonieuse de ce mémoire.

Enfin, nous souhaiterions remercier nos copines respectives, Emelyne et Valentine, ainsi que nos familles et amis pour leur présence et leur soutien inconditionnel dans la réalisation de ce mémoire.

Résumé

De nos jours, plus de 50 000 grands barrages sont répartis à travers le monde. Ces structures remplissent diverses fonctions telles que la protection contre les inondations, la rétention d'eau pour l'approvisionnement industriel et domestique ainsi que la production d'énergie hydroélectrique.

Cependant, malgré leurs avantages, la construction de barrages présente des aspects négatifs significatifs. Parmi ceux-ci figurent le déplacement de populations, les conflits géopolitiques et la rétention de sédiments. Tout au long d'un cours d'eau, les sédiments se déplacent continuellement soit par charriage, soit par suspension, or la présence d'un barrage bloque les sédiments et empêche en grande partie ce processus naturel. Une majorité des sédiments reste alors coincée à l'amont et s'accumule au fil du temps, diminuant la capacité de stockage du réservoir et menaçant les installations hydroélectriques du barrage s'il en comporte.

Une solution parmi d'autres pour pallier à ce problème est de procéder à des chasses de barrage. Il s'agit de l'ouverture contrôlée de vannes pour libérer les sédiments accumulés vers l'aval du cours d'eau.

Cependant, cette méthode, si elle n'est pas gérée avec précaution, peut engendrer des conséquences néfastes pour l'écosystème en aval. De fait, la réduction du taux d'oxygène dissous dans l'eau et l'augmentation de la turbidité de l'eau peuvent avoir des répercussions dramatiques sur certaines espèces de poissons altérant ainsi l'équilibre de la chaîne alimentaire. De plus, le lit de la rivière en aval subit une érosion, due au relâchement de sédiments, suivie d'un dépôt conséquent, entraînant la mort de larves et de jeunes poissons.

La question de l'impact morphologique à l'aval de ces chasses de barrage a été relativement peu explorée par la recherche. Ainsi, c'est précisément l'objet de ce mémoire que d'étudier expérimentalement les conséquences morphologiques des chasses de barrage à aval. Cette étude se concentrera sur une simulation idéalisée de chasse de barrage en laboratoire, dans le but de prendre une série de mesures afin de mieux comprendre les implications de cette pratique.

Table des matières

Remerciements **i**

Résumé **iii**

1 Introduction **1**
1.1 Les barrages et leurs enjeux 1
1.2 Discontinuité sédimentaire 3
1.3 Les chasses de barrage 4
1.4 Objectifs du mémoire 8
1.4.1 Instruments nécessaires à sa réalisation 8
1.5 Structure du mémoire 9

2 Design et description de l'expérience de chasse de barrage idéalisée **11**
2.1 Description du système de fonctionnement du canal expérimental . 11
2.2 Choix des différents paramètres d'expérience 14
2.2.1 Choix de l'ouverture de la porte du barrage 15
2.2.2 Choix du débit alimentant le canal en continu 16
2.2.3 Choix de la hauteur du trop-plein aval 17
2.2.4 Choix des sédiments formant le lit amont et aval 17
2.2.5 Récapitulatif des différents paramètres d'expérience choisis . 20

3 Prise de mesures **21**
3.1 Mesure de la hauteur d'eau 21
3.1.1 Principe de fonctionnement 22
3.1.2 Étalonnage 22
3.2 Mesure continue de la morphologie d'une section du lit aval 23
3.2.1 Principe de fonctionnement 23
3.2.2 Calibration 25
Canal à sec 25
Canal rempli d'eau 27

3.2.3 Utilisation de la technique de la feuille de laser sur les images d'une expérience . . . 30
3.3 Mesure de l'évolution morphologique de l'ensemble du lit aval . . . 32
3.3.1 Principe de fonctionnement de la photogramétrie . . . 32
3.4 Mesure des profils de vitesse de l'eau et de la concentration en sédiments dans l'eau . . . 34
3.4.1 Sondes UVP (Ultrasonic Velocity Profiling) . . . 34
Choix de la fréquence de la sonde . . . 37
Choix des différents paramètres . . . 37
3.4.2 Mesure des profils de vitesse dans l'eau . . . 39
Validation des mesures de vitesse . . . 40
3.4.3 Mesure de la concentration en sédiments . . . 42
Méthode implicite . . . 47
Méthode explicite . . . 48
Mesure de la concentration par feuille laser . . . 50
3.5 Mesure du débit . . . 51
3.5.1 Mesure du débit amont . . . 51
3.5.2 Mesure du débit aval . . . 51

4 Analyse des résultats 55
4.1 Reproductibilité . . . 55
4.1.1 Vérification de la reproductibilité par la hauteur d'eau à l'amont 56
4.1.2 Vérification de la reproductibilité par la hauteur d'eau à l'aval 59
4.1.3 Vérification de la reproductibilité par l'évolution morphologique du lit aval . . . 59
4.1.4 Conclusion de la reproductibilité . . . 62
4.2 Expériences menées . . . 62
4.2.1 Configuration 1 . . . 62
Durée de l'expérience . . . 63
Passage de *pressure flushing* à *drawdown flushing* . . . 65
Évolution de la topographie pendant l'écoulement . . . 66
Bilan morphologique final . . . 68
Évolution de la concentration en sédiments . . . 70
Conclusions de la configuration 1 . . . 77
4.2.2 Configuration 2 . . . 78
Durée de l'expérience . . . 78
Passage de *pressure flushing* à *drawdown flushing* . . . 80
Évolution de la topographie pendant l'écoulement . . . 81
Bilan morphologique final . . . 84
Évolution de la concentration en sédiments . . . 87
Conclusion de la configuration 2 . . . 93

4.2.3 Configuration 3 . . . 93
Durée de l'expérience . . . 94
Passage de *pressure flushing* à *drawdown flushing* . . . 95
Évolution de la topographie pendant l'écoulement . . . 96
Bilan morphologique final . . . 96
Évolution de la concentration en sédiments . . . 97
Conclusion de la configuration 3 . . . 99
4.2.4 Configuration 4 . . . 100
Durée de l'expérience . . . 101
Passage de *pressure flushing* à *drawdown flushing* . . . 102
Évolution de la topographie pendant l'écoulement . . . 102
Bilan morphologique final . . . 103
Évolution de la concentration en sédiments . . . 104
Conclusion de la configuration 4 . . . 108
4.2.5 Comparaison des différentes configurations . . . 109
Durée d'expérience . . . 109
Analyse des hydrogrammes . . . 109
Évolution de la concentration à l'aval . . . 110
Évolution de la topographie aval . . . 112
Bilan morphologique final . . . 112
Observation de phénomènes ponctuels . . . 113

5 Recommandations **115**

6 Conclusion **119**

7 Annexes **127**
7.1 Code python de la méthode implicite pour la mesure de la concentration en sédiments à l'aval . . . 127
7.2 Code python de la méthode explicite pour la mesure de la concentration en sédiments à l'aval . . . 132
7.3 Processus de réalisation d'une expérience reproductible . . . 134

Chapitre 1

Introduction

1.1 Les barrages et leurs enjeux

Les barrages sont d'importants ouvrages de génie civil construits en utilisant des matériaux tels que du remblais ou du béton, dans le but de retenir de grandes quantités d'eau. À ce jour, on estime qu'il existe plus de 50 000 grands barrages dans le monde, caractérisés par une hauteur supérieure à 15 mètres [Lehner and al., 2011]. La construction de ces barrages est motivée par plusieurs raisons principales [DC, 1987, International Commission on Large Dams, 2017].

Nous retrouvons en premier lieu la protection de zones rurales ou urbaines, proches de cours d'eau, contre les inondations découlant de crues.

La rétention de grandes quantités d'eau peut également être expliquée par le besoin de garantir un stock d'eau suffisant pour la consommation industrielle, agricole et/ou domestique dans des régions qui peuvent être fréquemment sujettes à des stress hydriques importants. Un stress hydrique a lieu lorsqu'une demande en eau est supérieure à la quantité disponible.

Une autre raison justifiant la construction d'un barrage réside dans leur capacité à créer de l'électricité grâce à l'énergie que peut offrir l'eau. Le principe d'une centrale hydroélectrique est d'installer dans le barrage des turbines qui se mettent en rotation avec le passage de l'eau. Une fois en action, ces turbines entraînent un alternateur qui crée un courant électrique alternatif. L'énergie hydroélectrique est une énergie renouvelable, ce qui explique son intérêt. A titre d'exemple, le barrage des Trois-Gorges, situé en Chine, est le barrage hydroélectrique ayant la plus grande capacité de production installée [Figaro, 2021]. D'une longueur de 2.3 kilomètres et d'une hauteur de 185 mètres, ce barrage peut produire 111.79 TWh/an. A

titre de comparaison, l'ensemble des barrages hydroélectriques de Belgique ont produit 27.531 Twh d'électricité en 2022 [Febeg, 2023], ce qui correspond à 1/4 de la production annuelle du barrage des Trois-Gorges.

De plus, maintenir un niveau d'eau suffisant dans les cours d'eau afin de garantir la navigabilité des bateaux ainsi que la viabilité de certaines espèces fluviales constitue aussi une fonctionnalité des barrages.

FIGURE 1.1 – Barrage des Trois-Gorges [Figaro, 2021].

Enfin, les barrages offrent une application non négligeable dans la création d'espaces récréatifs [Lehner and al., 2011]. Le barrage des Trois-Gorges, par exemple, a permis la formation d'un vaste lac artificiel à son amont. Cette expansion des eaux a considérablement amélioré les possibilités de navigation de plaisance dans cette partie de la rivière [Chine Escapade, 2023].

Malgré les nombreuses fonctions qu'ils remplissent, les barrages peuvent également être à l'origine de diverses problématiques qu'il est essentiel de savoir gérer.

En premier lieu, la création d'un barrage peut engendrer le déplacement d'une partie de la population vivant à l'amont. De fait, ces personnes peuvent avoir leurs habitations situées en zone inondée par le réservoir. Suite à la construction du barrage des Trois-Gorges, il est estimé que 1.2 million de personnes ont dû être relocalisées [GIS Asie, 2008]. Les humains ne sont cependant pas les seuls impactés. La biodiversité du fleuve Yangtsé sur lequel ce barrage fût construit l'est également et le dauphin de Chine en témoigne. Également appelé Dauphin de Yangtsé, cette espèce est "quasiment éteinte" depuis 2006 notamment en raison de la division de leur population et de la réduction de leurs proies du fait de la présence du barrage [Christiane Galus, 2007].

De plus, la présence d'un barrage sur un cours d'eau peut être la cause de conflits géopolitiques. Le barrage de la Renaissance construit sur le Nil Bleu par l'Ethiopie en est un exemple. Construit pour répondre aux demandes énergétiques de l'Ethiopie, ce barrage hydroélectrique est à l'origine de vives tensions avec l'Egypte et le Soudan situés en aval du Nil. En cause, la crainte de ces deux pays de voir leurs ressources en eau nécessaires pour leur économie s'amenuiser [Le Monde avec AFP, 2021]. Cet exemple témoigne des conflits géo-politiques qui peuvent émerger entre des pays voisins, dépendant d'un même cours d'eau, suite à la construction d'un

barrage.

De surcroît, la présence d'un barrage sur un cours d'eau a pour effet une diminution de la quantité totale d'eau disponible dans le cours d'eau en raison de l'évaporation d'une partie de l'eau présente dans son réservoir. Il est estimé qu'un total combiné de 208 milliards de mètres cubes d'eau se sont évaporés en 2000 depuis les réservoirs de barrage tout autour du monde. Avec la construction de nouveaux barrages, ce nombre devrait atteindre les 360 milliards de mètres cubes en 2050 [Jonard, 2022].

1.2 Discontinuité sédimentaire

Tout au long d'un cours d'eau, les sédiments se déplacent continuellement soit par charriage, soit par suspension. Or la présence d'un barrage bloque les sédiments et empêche en grande partie ce processus naturel. En effet, l'eau stagnante entraîne une chute des sédiments et engendre une grande diminution du transport sédimentaire, que ce soit par suspension ou par charriage. Une majorité des sédiments reste alors coincée à l'amont et s'accumule au fil du temps. Cette accumulation peut être détaillée en trois étapes : le court terme, le moyen terme et le long terme. A court terme, un ralentissement de l'écoulement se produit à l'amont du barrage, ce qui crée du dépôt de sédiments au droit de ces ralentissements menant à une augmentation du niveau de fond. Un envasement commence alors à apparaître. A moyen terme, le dépôt continu de sédiments a pour conséquence de créer un "bulbe" de sédiments qui avance petit à petit vers le barrage. Enfin, à long terme, le processus continue et crée un delta qui entraîne une diminution de plus en plus grande de la capacité de stockage en eau [Soares-Frazão, 2022a]. Un delta connu est le delta qui s'est formé dans le réservoir du barrage du Wushe à Taïwan. Sur la figure 1.2, nous pouvons très distinctement voir l'envasement progressif du réservoir par les sédiments en l'espace de 2 mois.

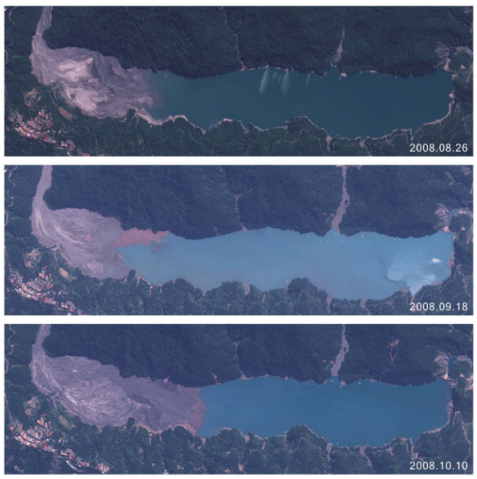


FIGURE 1.2 – Wushe réservoir à Taïwan [Soares-Frazão, 2022a].

De plus, la rétention des sédiments en amont a des répercussions sur l'aval. Lorsque de l'eau est relâchée en aval, elle est dépourvue de ses sédiments, ce qui la rend claire. Cependant, son rejet a des effets néfastes en provoquant l'érosion du lit en

aval. En effet, dans un écoulement permanent, une rivière possède une capacité de transport spécifique. Si l'eau en mouvement perd ses sédiments, bloqués par la présence d'un barrage, elle cherchera à rétablir son équilibre en érodant le lit aval. Si par la suite, la concentration en sédiments de l'eau est plus élevée que celle associée à sa capacité de transport, du dépôt sera entraîné pour rétablir son équilibre, influençant ainsi la morphologie du lit [Soares-Frazão, 2022a].

1.3 Les chasses de barrage

Il existe différentes solutions permettant d'éviter la sédimentation dans le réservoir d'un barrage ou de réaugmenter sa capacité de stockage en éliminant les sédiments accumulés. Parmi ces solutions, on trouve la déviation et la création d'un réservoir en dehors du cours d'eau pour éviter la sédimentation, ainsi que le dragage et les chasses de barrages pour réaugmenter la capacité de stockage [White, 2001].

- ➢ La déviation est une méthode permettant d'éviter la sédimentation dans le réservoir d'un barrage par la création d'un tunnel ou d'un canal déviant du réservoir les débris provenant de crues. Bien que la déviation soit une méthode efficace, elle présente néanmoins des coûts de construction importants, ce qui explique pourquoi cette approche est peu courante et majoritairement développée dans des pays comme le Japon et la Suisse [Morris, 2020].
- ➢ Une autre approche consiste à créer un réservoir en dehors du cours d'eau, qui se remplit via pompage ou gravité, afin de prévenir la sédimentation. Cette technique présente l'avantage de ne pas entraîner les plus gros sédiments vers le réservoir mais plutôt de les laisser dans le lit de la rivière [Morris, 2020].
- ➢ Une troisième option est d'avoir recours au dragage pour réaugmenter la capacité de stockage d'un réservoir. Le dragage est une méthode où l'on vient placer dans le réservoir d'un barrage un bateau doté d'un bras inclinable qui aura pour but d'aspirer les sédiments et de les rejeter en dehors du réservoir, à une position prédéfinie. Cependant, le problème majeur avec cette façon de faire est que l'habitat aquatique amont n'est pas épargné en addition au fait que le dragage est une méthode très énergivore et très coûteuse [Morris, 2020].
- ➢ Une façon différente de contrer ces problématiques liées à l'accumulation de sédiments est de procéder à des chasses de barrage. Une chasse de barrage est un processus lors duquel une ou plusieurs vannes situées dans le barrage sont ouvertes, ce qui aura pour effet d'entraîner les sédiments à l'aval, augmentant ainsi la capacité du réservoir en eau. La suppression de la présence d'une partie des sédiments est aussi un moyen de s'assurer que par leur accumulation,

ils ne puissent pas atteindre les installations hydroélectriques du barrage s'il en comporte [van der Spuy, 2020]. Dans ce mémoire, seule l'étude des chasses de barrage sera approfondie, laissant de côté les trois autres méthodes mentionnées précédemment.

Le principe d'une chasse est d'ouvrir une ou plusieurs vannes situées dans le fond du barrage [Morris, 2020], [van der Spuy, 2020], [Petkovšek et al., 2020]. Comme le montre la figure 1.3, la première étape, après ouverture, se nomme *pressure flushing*. Lors de cette étape, l'eau quitte le bassin suivant un courant submergé et le niveau de l'eau descend à grande vitesse. Une partie des sédiments et débris situés proches des vannes est entraînée avec l'eau. Une fois que le niveau de l'eau est descendu jusqu'aux vannes, l'écoulement passe en surface libre et nous atteignons la seconde étape, à savoir le *drawdown flushing*. Maintenant, une partie des sédiments restants est emmenée à l'aval. Dans cette phase, le niveau de l'eau est très bas, ce qui permet une érosion à l'amont très importante. Cependant, lors de cette étape, seulement une certaine partie du réservoir peut être érodée car avec ce niveau d'eau très bas, des zones ne sont plus couvertes d'eau. Ceci signifie que les chasses fonctionnent particulièrement bien pour les réservoirs longs et fins [White, 2001].

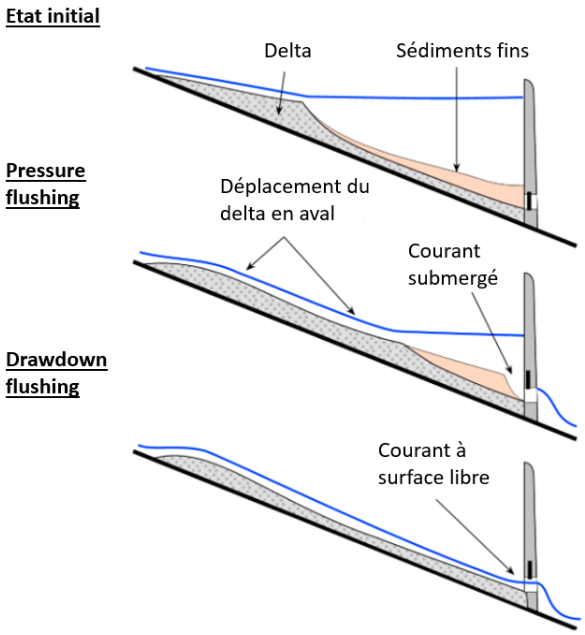


FIGURE 1.3 – Déroulement d'une chasse de barrage *pressure-drawdown flushing* [Morris, 2020].

Lors d'une chasse de type *pressure drawdown*, en fonction de la taille du bassin, jusqu'à des centaines de milliers de mètres cubes d'eau très riches en sédiments

peuvent être rejetés à l'aval. De fait, la chasse du barrage de Verbois (Suisse) en 2012 a par exemple permis de déplacer en l'espace de 11 jours 350 000 m^3 de sédiments accumulés à l'amont du barrage pendant 9 ans [RTS, 2012]. Une telle façon de faire peut être, si elle n'est pas correctement gérée, néfaste pour l'écosystème vivant à l'aval. En effet, pour respirer dans de bonnes conditions, les poissons ont besoin d'être dans un milieu avec un taux d'oxygène dissous suffisant [Clement, 2022]. Or, le rejet d'eau fortement chargée en sédiments à l'aval suite à une chasse diminue drastiquement cette concentration. Ce n'est qu'après une certaine distance, dépendante de la quantité de sédiments relâchée, que la concentration en oxygène dissous revient à la normale et permet à la vie aquatique de prospérer normalement. La figure 1.4 représente bien cette variation de la quantité en oxygène dissous suite à un relâchement d'eau chargée en sédiments. Si certaines espèces de poissons ont la capacité de se déplacer vers l'aval pour trouver des zones d'habitat alternatives, cela n'est pas possible pour les espèces territoriales ou celles ayant des capacités de déplacement limitées qui risquent d'être anéanties [Baran and Nasielski, 2021]. Les macroinvertébrés ne sont pas épargnés non plus, étant susceptibles de subir des taux de mortalité élevés [Doretto et al., 2019].

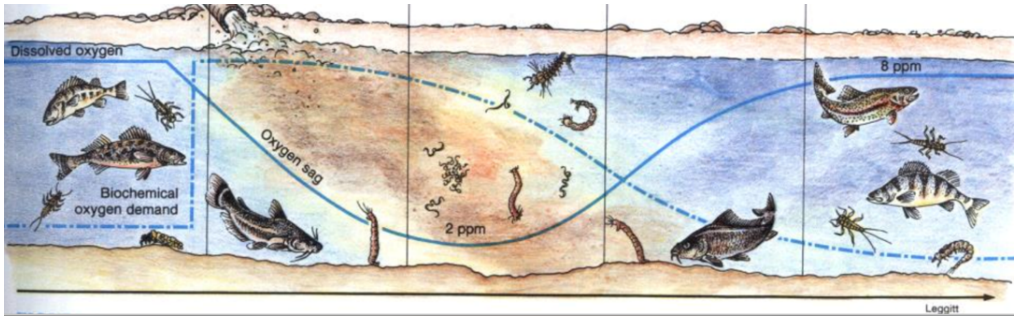


FIGURE 1.4 – Évolution de la concentration en oxygène à l'aval d'une chasse de barrage [Clement, 2022].

La figure 1.5 nous montre quant à elle plus clairement cet impact direct sur la vie aquatique. Cette photo a été prise après la chasse hydraulique du barrage de la micro-centrale de Pont-Baldy dans les Hautes-Alpes (France). Des milliers de truites sont mortes asphyxiées par manque d'oxygène et par colmatage de leurs branchies [Fédération de pêche des Hautes-Alpes, 2021].

FIGURE 1.5 – Truite asphyxiée suite à une chasse de barrage dans la Durance [Fédération de pêche des Hautes-Alpes, 2021].

De plus, la mise en suspension de sédiments à l'aval augmente la turbidité de l'eau de façon non-négligeable. La turbidité correspond au caractère trouble de l'eau. Plus l'eau est trouble, plus la turbidité est élevée. Plus la turbidité est élevée, plus la pénétration de la lumière dans l'eau diminue. Ceci implique que les plantes aquatiques enracinées ont leur photosynthèse altérée. De surcroît, avec une turbidité élevée, la visibilité de certains organismes décroît. Ceci est problématique car certaines espèces ne savent plus se déplacer et se repérer correctement. Leur capacité à se nourrir se voit alors altérée et l'équilibre de la chaîne alimentaire dans le cours d'eau est perturbé [Gouvernement du Canada, 2020].

Par ailleurs, une chasse remobilise des sédiments déposés à l'amont depuis longtemps. Il est possible de retrouver parmi ceux-ci des métaux lourds qui se sont accumulés avec le temps [Catheline, 1998]. Or, avec une chasse, ces métaux lourds peuvent être entièrement ou en partie remobilisés et relâchés en très peu de temps à l'aval. Dans le cas où ces éléments ne sont pas gérés correctement, la conséquence principale pour l'aval est la pollution de l'eau qui impacte toutes les formes de vie qui contribuent à l'écosystème fluvial.

Outre cette diminution d'oxygène et l'augmentation de la turbidité, la morphologie avale est aussi affectée. En effet, lors d'une chasse, le lit de la rivière aval va d'abord être érodé et va ensuite subir un dépôt conséquent de sédiments [Baran and Nasielski, 2021]. La couche de sédiments va commencer par remplir les interstices entre les pierres, détruisant alors l'habitat d'espèces vivant à ces endroits, pour ensuite continuer à se déposer plus en hauteur. Le dépôt va induire la mort de larves et de jeunes poissons, perturbant la diversité des espèces.

Par le passé, de nombreuses études se sont penchées sur l'évolution morphologique du lit amont de barrages lors de chasses [van der Spuy, 2020] [Guillén-Ludeña et al., 2022] [Petkovšek et al., 2020] [White, 2001], mais jusqu'à récemment, peu d'attention avait été portée à l'évolution morphologique aval. Cette lacune s'explique par l'intérêt limité des gestionnaires de barrage qui se concentraient principalement sur la capacité de leur réservoir et souhaitaient simplement que les chasses vident le réservoir de manière efficace et suffisante. Cependant, avec la prise de conscience croissante des enjeux environnementaux, il est devenu nécessaire de mener des recherches sur l'évolution morphologique aval à la suite d'une chasse de barrage [S. Soares-Frazão, correspondance personnelle]. Junjian Deng a notamment exploré ce sujet dans sa thèse achevée en novembre 2022.

Dans cette thèse, Junjian Deng a étudié l'évolution morphologique des rivières alpines aménagées lors des chasses de barrage. En utilisant des méthodes d'analyse d'images et de modélisation numérique sur un banc de galets, il a examiné la dynamique des sédiments fins tels que l'argile, le limon et le sable sur ce banc.

Les résultats de la recherche ont mis en évidence que l'évolution du dépôt dépend du rapport entre la contrainte hydraulique et la concentration en sédiments fins dans l'écoulement, ainsi que de l'humidité initiale du dépôt. De plus, l'étude a révélé que les vents peuvent éroder ces amas de sédiments fins, les dispersant vers le chenal principal des rivières. Ces conclusions soulignent l'importance de comprendre les processus qui influencent la dynamique des sédiments fins dans les rivières aménagées pour une meilleure gestion des chasses de barrage et une préservation efficace de la faune et la flore avale [Deng, 2022].

1.4 Objectifs du mémoire

Comme mentionné précédemment, la mesure de la concentration rejetée à l'aval lors d'une chasse de barrage représente un enjeu écologique considérable dans la mesure où elle impacte la concentration en oxygène, la turbidité et la composition morphologique du lit aval. Mener des expériences de chasses de barrages idéalisées sur un canal expérimental en laboratoire permettrait d'étudier l'évolution de la concentration et d'en évaluer l'impact morphologique, dans une situation contrôlée.

Les différents objectifs de ce mémoire sont donc :

— Reproduire un écoulement de chasse idéalisé en laboratoire.
— Caractériser les différentes étapes d'une chasse de barrage en fonction des paramètres initiaux.
— Étudier l'évolution morphologique du lit aval pour différentes configurations.
— Développer une technique permettant de relever des données de concentration à l'aval.

Les résultats expérimentaux collectés durant ce mémoire pourront également servir de matériau de calibration ou de validation pour des modèles numériques ayant à coeur de simuler des chasses de barrage.

1.4.1 Instruments nécessaires à sa réalisation

L'ensemble des expériences menées dans le cadre de ce mémoire ont été réalisée dans un canal expérimental du LEMSC (Laboratoire Essais mécaniques, Structures et Génie civil) de l'UCLouvain.

Les différents appareils de mesure utilisés pour parvenir à ces résultats sont :

— Des sondes UVP de la marque Met-Flow pour mesurer des profils de vitesse de l'eau [Met-Flow, 2011]. Ces sondes ont été détournées dans ce mémoire

pour également mesurer la concentration en sédiments. Un autre appareil de mesure de vitesse et de concentration, développé par la société Ubertone [Ubertone, 2023] aurait pu être utilisé mais en raison de son coût élevé et de la présence initiale des sondes UVP dans le matériel de l'UCLouvain, le choix ne s'est pas porté sur celui-ci.

— Des sondes Baumer, qui sont des capteurs à ultrasons, permettent de mesurer la hauteur d'eau à différents points du canal [Baumer, 2023]. Le choix s'est porté sur les sondes Baumer car ces sondes étaient disponibles au LEMSC et le personnel de l'UCLouvain avait l'habitude de travailler avec elles.

— Le système LPT pour étudier l'évolution morphologique sur une section du lit aval par l'association entre une caméra et une feuille laser [Meurice et al., 2022]. Cette technique de mesure a l'avantage d'être non-intrusive et d'avoir été récemment développéee au sein de l'équipe du pôle hydraulique de l'UCLouvain lors de recherches sur le canal expérimental du LEMSC.

— Le logiciel de photogrammétrie Metashape pour obtenir la topographie totale du canal après la chasse de barrage [Agisoft Metashape, 2023]. Ce logiciel, très efficace a déjà été utilisé plusieurs fois au LEMSC.

1.5 Structure du mémoire

Dans un premier temps, le design et la description de l'expérience de chasse de barrage idéalisée seront parcourus (chapitre 2). Ensuite, les différents outils de mesure permettant de tirer des résultats de ces expériences seront passés en revue (chapitre 3) avant de passer à l'analyse des résultats des expériences menées (chapitre 4). Pour finir, certaines recommandations seront apportées (chapitre 5).

Chapitre 2

Design et description de l'expérience de chasse de barrage idéalisée

2.1 Description du système de fonctionnement du canal expérimental

Le canal expérimental utilisé pour ce TFE est un canal du LEMSC (Laboratoire Essais mécaniques, Structures et Génie civil) de l'UCLouvain. Il est composé de quatre parties principales : le réservoir amont, le réservoir amont avec ou sans lit de sédiments, le canal avec lit de sédiments et le bassin de récolte de sédiments. La figure 2.1 détaille les différentes parties du canal.

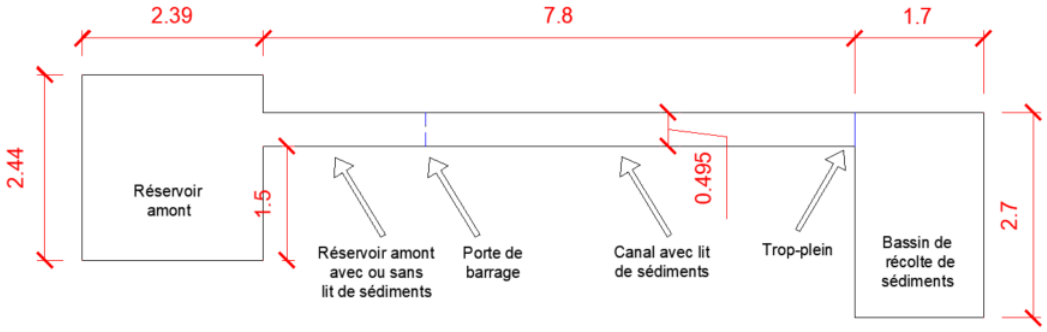


FIGURE 2.1 – Les différentes parties du canal expérimental ainsi que ses dimensions en mètres. Le sens de l'écoulement est de la gauche vers la droite.

L'eau passant par le canal est initialement stockée dans une cuve positionnée sous le plancher d'expérimentation. Elle est ensuite acheminée vers le réservoir amont à l'aide d'une pompe et d'un système de tuyaux. Pour garantir une pression suffisante et constante, un bassin d'eau surélevé est également présent, veillant à ce que l'eau atteigne le réservoir amont de manière adéquate.

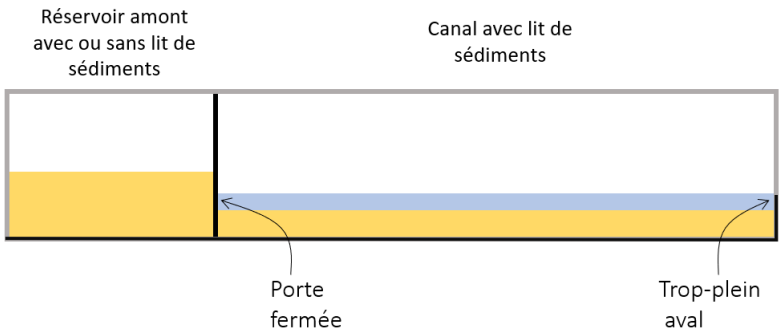


FIGURE 2.2 – Canal expérimental avant que l'eau ne parvienne dans le réservoir amont. De l'eau est déjà présente dans le canal avec lit de sédiments pour des raisons techniques qui seront détaillées dans la suite du chapitre.

Une fois arrivée dans le réservoir amont, l'eau s'accumule dans le réservoir amont chargé ou non en sédiments (voir figure 2.3). L'eau est bloquée par la porte.

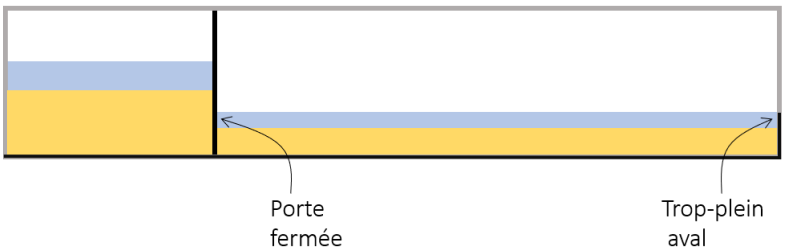


FIGURE 2.3 – Eau s'accumulant dans le réservoir amont possédant un lit de sédiments dans ce cas-ci. L'eau est bloquée par la porte de barrage encore fermée.

Au fur et à mesure, le niveau d'eau dans le réservoir amont augmente. Une fois que la hauteur d'eau voulue à l'amont est atteinte, la mise hors-service d'un électro-aimant actionne un contre-poids qui entraîne l'ouverture instantanée d'une plaque qui obstruait la porte de barrage (figure 2.5), permettant à l'eau de poursuivre son cheminement dans la partie avale du canal dotée d'un lit de sédiments et d'une hauteur d'eau initiale (voir figure 2.4).

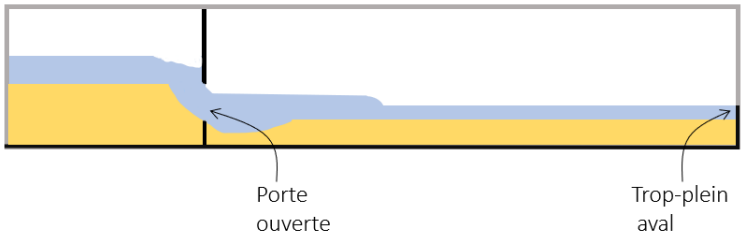


FIGURE 2.4 – Ouverture de la porte de barrage entraînant l'eau du réservoir vers l'aval.

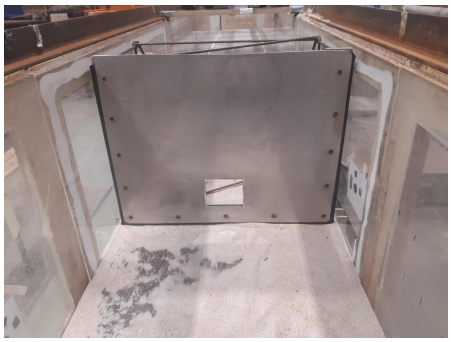


FIGURE 2.5 – Porte du barrage en position ouverte vue depuis l'aval.

Après avoir parcouru une distance de six mètres dans la partie aval du canal, l'eau atteint un trop-plein situé à son extrémité (voir figure 2.6). Ce trop-plein, qui consiste en une plaque d'acier à hauteur réglable (figure 2.7), a pour objectif de maintenir un niveau d'eau approprié en cours d'expérience dans la partie aval du canal. De plus, il permet d'avoir une hauteur d'eau initiale à l'aval qui contribue à éviter les phénomènes de vagues d'intumescences trop importantes qui pourraient se produire après l'ouverture de la porte du barrage.

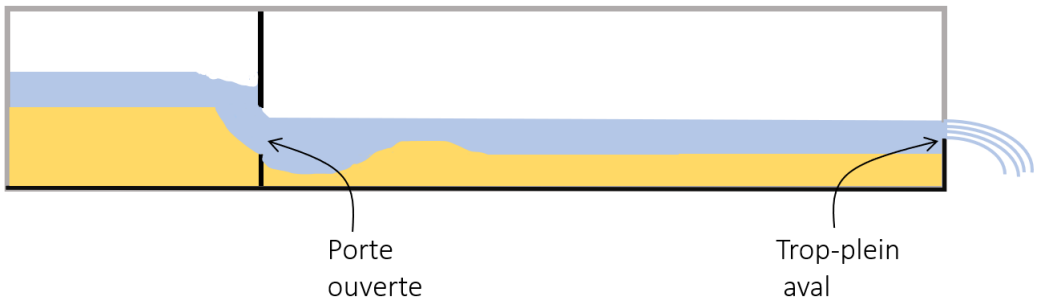


FIGURE 2.6 – Eau provenant de l'amont qui atteint le trop-plein aval avant de se déverser dans le bassin de récolte de sédiments.

FIGURE 2.7 – Trop-plein en acier situé en fin de canal.

Une fois le trop-plein franchi, l'eau se déverse dans le bassin de récolte de sédiments. Ce bassin est conçu pour permettre aux sédiments de se déposer au fond. Il agit comme un dispositif de décantation, permettant de collecter les sédiments en vue de leur réutilisation ultérieure. L'eau, quant à elle, est conduite vers la cuve pour être réutilisée dans le système expérimental.

La dernière étape consiste au passage de *pressure flushing* à *drawdown flushing* (figure 2.8) lorsque l'écoulement est à surface libre :

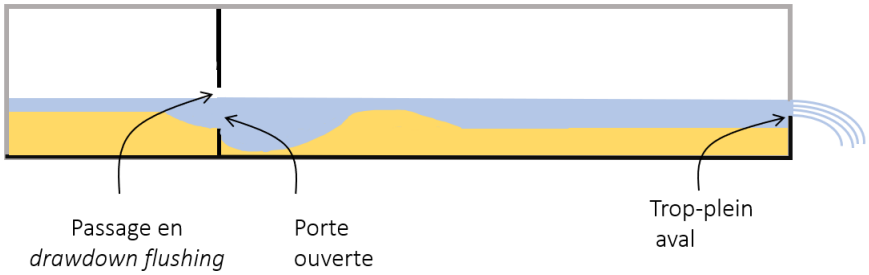


FIGURE 2.8 – Passage de *pressure flushing* à *drawdown flushing*.

2.2 Choix des différents paramètres d'expérience

Les conditions de l'écoulement dans le canal expérimental sont déterminées par des paramètres spécifiques qui seront examinés dans les prochaines sections de ce chapitre. Ces paramètres englobent plusieurs éléments, à savoir l'ouverture de la porte du barrage, le débit continu qui alimente le canal, la hauteur du trop-plein en aval et la composition des sédiments constituant les lits amont et aval. Il est

important de noter que ces paramètres interagissent entre eux et leur interaction a un impact significatif sur la nature de l'écoulement. La manière dont ces paramètres ont été sélectionnés et fixés est décrite dans cette section.

2.2.1 Choix de l'ouverture de la porte du barrage

Le choix de l'ouverture de porte nécessite de trouver un compromis entre deux conditions essentielles. Tout d'abord, il est crucial d'adapter la taille de la porte de manière à obtenir un jet d'eau vers l'aval symétrique. Une asymétrie du jet entraînerait une érosion avale non-contrôlée et résulterait en des résultats expérimentaux non-pertinents. Il a été observé au travers de plusieurs modifications de la porte que plus l'ouverture était petite, plus les imperfections généraient des asymétries importantes dans le jet d'eau sortant. Les imperfections présentes sont diverses : chanfreinage irrégulier sur les bords de l'ouverture, porte pas parfaitement perpendiculaire aux parois du canal, présence d'éléments en amont, etc. La plupart de ces imperfections sont contrôlables mais pas dans les limites de ce mémoire et sont donc nuisibles pour la reproductibilité des expériences.

Deuxièmement, il est important de sélectionner une taille appropriée pour l'ouverture de la porte afin de refléter au mieux les conditions réelles, tout en évitant des dimensions irréalistes. Cette deuxième condition permet de garantir la représentativité des résultats expérimentaux.

FIGURE 2.9 – Érosion non symétrique à l'aval de la porte de barrage avec une ouverture de porte de 7 cm sur 7 cm (49 cm^2). Les zones en brun foncé correspondent au plancher du canal. L'amont correspond au bas de la figure et l'aval au haut.

Trouver un compromis adéquat entre ces deux conditions est donc primordial pour assurer des résultats fiables et significatifs dans notre étude. Les tests de dimensionnement de l'ouverture de la porte ont été réalisés avec un débit continu de 5 l/s. Le débit optimal sélectionné sera détaillé dans la section 2.2.2.

Pour des raisons techniques liées à la conception de la porte de barrage, il était impératif que la pelle de la porte, soit la distance entre le plancher du canal et la base inférieure de la porte, ait une hauteur minimale de 5.5 cm.

Avec une ouverture centrée de 5 cm sur 5 cm (25 cm^2), le réservoir ne se vidait pas assez vite et il était impossible d'observer correctement le passage du phénomène de *pressure flushing* à celui de *drawdown flushing*.

La seconde tentative était une ouverture centrée de 7 cm sur 7 cm (49 cm^2). Avec cette disposition, le jet d'eau vers l'aval n'était pas symétrique, ce qui entraînait des recirculation d'eau et dès lors une érosion non-symétrique du lit aval. La figure 2.9 montre bien ce phénomène.

Finalement, une ouverture centrée de 7 cm de hauteur et 8 cm (56 cm^2) de largeur a été testée. Avec cette ouverture, le jet sortant à l'aval était symétrique, ce qui a permis d'obtenir un lit érodé de manière symétrique. C'est donc cette ouverture qui a été maintenue pour l'ensemble des expériences.

2.2.2 Choix du débit alimentant le canal en continu

Pour mener à bien les expériences, un paramètre essentiel à déterminer est le débit de la pompe, qui assure un apport continu d'eau dans le canal à chaque expérience. L'objectif était de trouver un débit optimal permettant de visualiser au mieux le passage du phénomène *pressure flushing* au phénomène de *drawdown flushing*. La configuration de la porte, avec sa base située à un niveau de 5.5 cm et le niveau de son plafond à 12.5 cm, implique que le *drawdown flushing* se produit lorsque le niveau de l'eau en amont descend en dessous de 12.5 cm. Afin d'observer clairement la transition entre les deux phénomènes, il a été décidé d'obtenir un niveau d'eau en régime à l'amont quelques centimètres inférieur à cette frontière. Le fonctionnement *en régime* signifie que l'écoulement est stable et que le niveau d'eau a atteint un équilibre.

Avec un débit de 3 litres par seconde, le niveau d'eau en amont atteint un minimum de 12 cm, ce qui est légèrement inférieur à la limite de transition. Bien que les deux phénomènes soient perceptibles, il n'est pas facile de les distinguer clairement.

En réduisant le débit à 2 litres par seconde, le niveau d'eau descend jusqu'à 10,4 cm. Cette diminution permet une meilleure visualisation des phénomènes, mais il est encore possible d'améliorer l'observation.

Finalement, en réglant le débit à 1 litre par seconde, le niveau d'eau minimal à l'amont atteint une valeur de 8.5 cm, offrant une vision nette et permettant d'observer clairement la transition entre les phénomènes de *pressure flushing* et *drawdown flushing*.

Ainsi, en ajustant le débit de la pompe, la configuration optimale de 1 l/s qui permet d'observer et d'analyser de manière précise les variations entre ces deux phénomènes hydrauliques a été choisie.

2.2.3 Choix de la hauteur du trop-plein aval

La figure 2.7 illustre le trop-plein, qui possède une hauteur verticale variable. Comme décrit dans la section 2.2.1, son rôle est d'éviter le phénomène de vague d'intumescence et de maintenir une hauteur d'eau avale optimale. Il est essentiel de déterminer cette hauteur idéale afin de faciliter l'observation des phénomènes de transformation morphologique du lit aval à l'aide d'outils de mesure spécifiques qui seront décrits dans la section 3. Des tests ont été effectués pour déterminer la hauteur optimale du trop-plein, qui s'est avérée être de 8.5 cm soit 3 cm de plus que la hauteur du lit de sable aval initial. Cette hauteur a été choisie car elle permet d'obtenir une hauteur d'eau suffisante pour que l'objectif de la caméra soit sous le niveau de l'eau et que le profil UVP soit suffisamment développé. Ces deux instruments de mesure seront détaillés dans le chapitre suivant.

2.2.4 Choix des sédiments formant le lit amont et aval

Le dernier paramètre à déterminer est le diamètre des sédiments formant le lit amont et aval du canal. Le critère principal est de choisir des sédiments d'une taille telle que le débit amont choisi puisse les mettre en suspension.

Le diagramme permettant de vérifier la mise en suspension des sédiments d'un lit est le diagramme de Shields-Van Rijn [Soares-Frazão, 2022b]. Celui-ci permet de déterminer si la combinaison du diamètre sédimentologique adimensionnel, représenté par d^*, et de la contrainte d'arrachement adimensionnelle, représentée par τ^*, conduit à une mise en suspension des sédiments formant le lit.

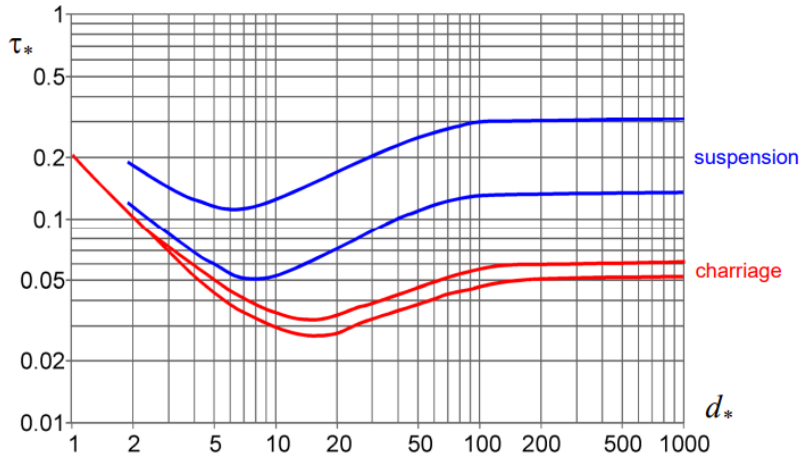


FIGURE 2.10 – Diagramme de Shields-Van Rijn qui met en relation le diamètre sédimentologique adimensionnel d^* à la contrainte d'arrachement adimensionnelle τ^* [Soares-Frazão, 2022b].

En conservant les différents paramètres d'expérience définis précédemment, il est maintenant possible de trouver un diamètre de sédiments garantissant la bonne mise en suspension de ceux-ci selon le diagramme de Shields-Van Rijn. Cette analyse est effectuée en état permanent, état durant lequel le débit passant à travers le porte de barrage est égal au débit fournit par la pompe en amont, ce qui correspond au débit le plus bas et donc à la contrainte d'arrachement la plus faible. La mise en suspension des sédiments peut être attendue au cours de l'expérience si le débit minimal garantit déjà cette suspension. Pour des raisons pratiques liées au LEMSC, le sable disponible avait un diamètre d_{50} de 0.366 mm. Ce diamètre d_{50} a été trouvé expérimentalement lors d'une analyse granulométrique par un groupe de mémorant de l'UCLouvain [Anciaux and Schoeps, 2023]. Il a été possible de l'analyser selon le diagramme de Shields-Van Rijn pour vérifier sa bonne mise en suspension théorique lors des expériences.

Dans un premier temps, le diamètre sédimentologique adimensionnel est calculé pour un sable ayant un $d_{50} = 0.366$ mm :

$$d^* = d_{50} \left(\frac{g\,(s-1)}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{2.1}$$

Dans cette équation, la densité relative des grains $s = 2.64$ et la viscosité de l'eau $\nu = 10^{-6} m^2/s$ donnent une valeur de $d^* = 9.24$.

Ensuite, la contrainte d'arrachement adimensionnelle τ^* se calcule de cette manière :

$$\tau^* = \frac{\tau}{(\rho_{sable} - \rho)\, g\, d_{50}} \tag{2.2}$$

L'équation 2.2 dépend de la masse volumique du sable $\rho_{\text{sable}} = 2640$ kg/m^3, de la masse volumique de l'eau $\rho = 1000$ kg/m^3, du diamètre des sédiments $d_{50} = 0.366$ mm, du débit Q $= 1\ l/s$, de l'accélération gravitationnelle $g = 9.81\ m/s^2$ et de l'effort de cisaillement τ. Il est donc nécessaire de déterminer τ qui se calcule comme suit :

$$\tau = \frac{\rho\, g\, n_{\text{sable}}^2\, \mathrm{Q}^2}{A_{\text{mouillée}}^2\, R_b^{1/3}} \tag{2.3}$$

Le nombre de Manning pour ce sable n_{sable} est déterminé de cette manière :

$$n_{\text{sable}} = \frac{d_{50}^{1/6}}{21.1} = \frac{0.000366^{1/6}}{21.1} = 0.01268 \frac{s}{m^{1/3}} \tag{2.4}$$

L'équation 2.3 dépend de l'aire mouillée $A_{\text{mouillée}}$ et du rayon hydraulique R_b. Le rayon hydraulique R_b dépend de l'aire mouillée $A_{\text{mouillée}}$ et du périmètre mouillé $P_{\text{mouillé}}$. La figure 2.11 montre que la hauteur d'eau en état permanent est en moyenne de 0.8 cm. Sachant que le canal fait 49.5 cm de largeur, l'aire mouillée = 0.00396 m^2. Le périmètre mouillé $P_{\text{mouillé}} = 0.511$ m. R_b vaut donc :

$$R_b = \frac{A_{\text{mouillée}}}{P_{mouillé}} = 0.0077m \tag{2.5}$$

FIGURE 2.11 – Hauteur d'eau à l'amont en état stable.

En connaissant R_b qui permet de déterminer $\tau = 0.51$ N/m^2, il est dès lors possible de trouver $\tau^* = 0.086$.

Maintenant que τ^* et d^* sont connus et en reportant leur valeur sur la figure 2.10, le diagramme montre que les coordonnées (d^* - τ^*) qui correspondent à (9.24 - 0.086) sont bien dans une zone où la suspension est possible. Visuellement, avec un débit de 1 l/s, de la suspension était bien constatée. Ceci signifie que le choix de sédiments avec un diamètre d_{50} de 0.366 mm permet effectivement une mise en suspension des sédiments formant le lit en état stable.

A l'état initial, la hauteur de sable à l'amont est variable en fonction des expériences menées. Afin de maintenir le sable, un système de grillage métallique, présenté à la figure 2.12 a été mis en place dans le canal. Ce système a pour caractéristique principale de maintenir le lit sans pour autant gêner l'écoulement. L'eau peut passer par le grillage sans être perturbée.

Pour ce qui est de l'aval, un niveleur en bois, présenté à la figure 2.13, a été conçu pour s'assurer que la hauteur initiale de 5.5 cm de sable soit la même sur tout le

tronçon aval. La hauteur de 5.5 cm a été choisie car elle est égale à la hauteur de la pelle de la porte du barrage. Cette hauteur de lit initiale à l'aval restera la même dans toutes les expériences.

FIGURE 2.12 – Structure permettant la retenue horizontale du lit de sédiments à l'amont de la porte de barrage.

FIGURE 2.13 – Niveleur en bois permettant au lit aval de la porte de barrage d'avoir une hauteur de 5.5 cm.

2.2.5 Récapitulatif des différents paramètres d'expérience choisis

Voici l'ensemble des différents paramètres à appliquer au canal expérimental. Ces valeurs seront utilisées sur les différentes expériences :

- Largeur du canal : 49.5 cm
- Largeur de la porte de barrage : 8 cm
- Hauteur de la porte de barrage : 7 cm
- Pelle de la porte de barrage : 5.5 cm
- Hauteur du trop-plein aval : 8.5 cm
- Diamètre des sédiments d_{50} : 0.366 mm
- Poids humide des sédiments : 2640 kg/m^3
- Débit provenant de l'amont : 1 l/s
- Hauteur de sable initiale à l'amont : la hauteur de sable à l'amont varie en fonction des expériences menées
- Hauteur de sable initiale à l'aval : 5.5 cm
- Coefficient de Manning du canal : 0.01268 $\frac{s}{m^{1/3}}$

Chapitre 3

Prise de mesures

Dans ce chapitre, le fonctionnement des différents outils de mesures utilisés lors des expériences ainsi que leur rôle sur le canal expérimental seront parcourus.

3.1 Mesure de la hauteur d'eau

Lors des expériences, il était important de connaître la hauteur de l'eau à tout moment dans le canal sans toutefois le perturber. Pour ce faire, 6 sondes Baumer situées à des points stratégiques du canal ont été positionnées. Les positions précises seront données dans le chapitre 4. Selon le type d'expérience menée, les résultats provenant de certaines sondes étaient d'un intérêt plus important, tandis que dans d'autres situations, les résultats d'autres sondes étaient davantage pertinents. Ainsi, toutes les sondes étaient utiles, mais leur intérêt variait en fonction du contexte spécifique de chaque expérience.

FIGURE 3.1 – 2 sondes Baumer (entourées en rouge) situées dans le réservoir amont et à proximité de la porte de barrage.

3.1.1 Principe de fonctionnement

Une sonde Baumer est un capteur à ultrasons permettant de connaître, à un intervalle de temps régulier, la hauteur de l'eau au droit de l'endroit où elle se situe. Pour ce faire, la sonde envoie une onde ultrasonique sur la surface de l'eau. Une fois que l'onde est réfléchie, elle revient vers la sonde qui, en fonction du temps entre l'émission et la réception, renvoie une tension. Cette tension, par une transformation linéaire, peut être convertie en une hauteur en millimètres [Baumer, 2023]. L'ensemble des niveaux d'eau, pour chaque sonde et à chaque pas de temps, est enregistré dans un fichier Excel.

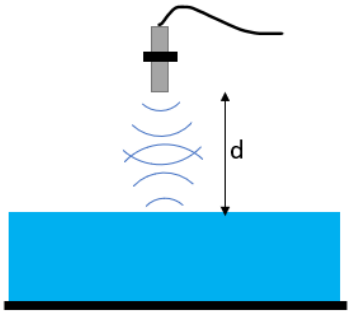


FIGURE 3.2 – Principe de fonctionnement d'une sonde Baumer.

3.1.2 Étalonnage

Comme mentionné précédemment, la hauteur d'eau (mm) est obtenue en convertissant la tension (V) par une relation linéaire de type $y = ax + b$. Dans cette équation, y correspond à la hauteur d'eau et x au voltage. Il est donc important de connaître précisément les valeurs des coefficients a et b afin que la conversion soit toujours bonne, quelle que soit la hauteur d'eau.

L'étalonnage d'une sonde se déroule comme suit : le canal est rempli à 7 niveaux d'eau distincts et pour chaque niveau, la tension fournie par la sonde ainsi que le niveau de l'eau mesuré par un trusquin sont reportés dans un fichier Excel. Il est ensuite possible de déterminer la relation linéaire liant les deux grâce à ces 7 mesures. Afin de s'assurer de la validité des coefficients a et b, deux étalonnages étaient menés pour chacune des 6 sondes et la moyenne du résultat de chaque coefficient était gardée. Enfin, il suffisait d'introduire dans le logiciel ContactProIV, pour chaque sonde, la relation linéaire reliant tension (V) et hauteur (mm).

Pour une bonne utilisation des sondes, il est à noter que dans le cas où le niveau de l'eau est à moins de 10 centimètres de la sonde, la hauteur retournée n'est pas valide. Les sondes ont donc dû être surélevées à l'amont pour éviter ce problème.

De plus, il est important que les sondes soient allumées 30 minutes avant l'utilisation de celles-ci car elles présentent une sensibilité à la chaleur.

3.2 Mesure continue de la morphologie d'une section du lit aval

La technique de la feuille laser [Meurice et al., 2022] est une méthode non-intrusive permettant de mesurer l'évolution morphologique du lit de sédiments au cours du temps sur un plan transversal ou longitudinal de canal choisi. Pour mettre cela en place, deux éléments sont nécessaires : une caméra et un laser. Dans cette section, uniquement le fonctionnement du cas de l'analyse d'un plan transversal sera détaillée, l'analyse d'un plan longitudinal étant similaire.

3.2.1 Principe de fonctionnement

La caméra et le laser sont liés l'un à l'autre par un système de profilés métalliques reposant sur un chariot amovible. Ceci signifie qu'il est possible de déplacer le système à la zone de mesure souhaitée sur le canal. La caméra est située sur le côté en dehors du canal, ce qui permet de ne pas perturber l'écoulement. Une fois actionnée, elle va capturer un certain nombre d'images à une vitesse d'images par seconde (IPS) choisi. La caméra utilisée est une monochrome Mako 131G de Allied Visions [Allied Vision Technologies GmbH, 2015] et peut enregistrer jusqu'à 62 images par seconde. Le laser est quant à lui situé au-dessus du canal et émet une lumière rouge sur toute la largeur du canal (voir figure 3.3). Dans le cas où le laser est utilisé sur une section longitudinale du canal, le laser est simplement tourné sur 90 degrés (voir figure 3.4) . Le laser utilisé est de la marque Flexpoint [Laser Components GmbH, 2023] et a une puissance de 100 mW.

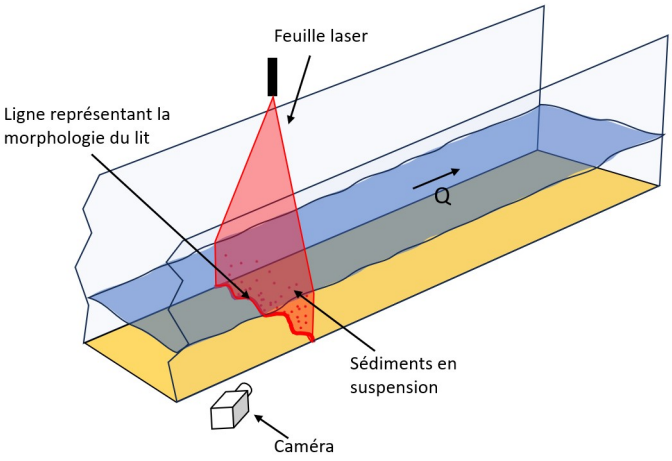


FIGURE 3.3 – Schéma de la technique de la feuille laser sur une section transversale du canal.

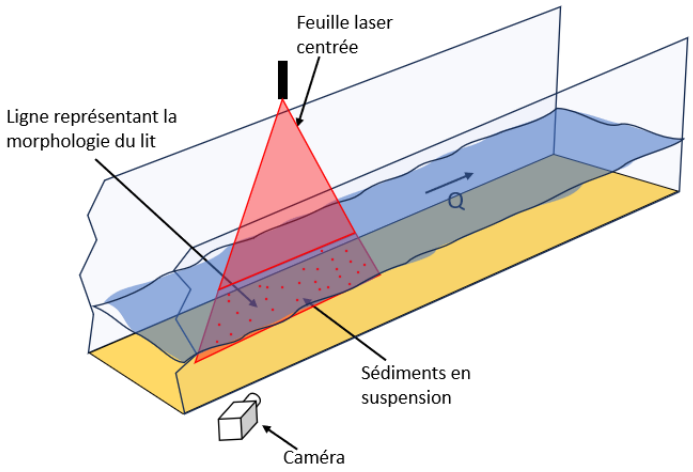


FIGURE 3.4 – Schéma de la technique de la feuille laser sur une section longitudinale du canal (technique non détaillée dans ce chapitre).

Lors d'une expérience, la caméra enregistre des images sur lesquelles le laser balaye le lit de sédiments. Chaque image prise va alors montrer une évolution du lit de sédiments grâce au reflet du laser rouge sur le lit. Lorsqu'une expérience est en cours, tout ce système est recouvert de draps noirs, ce qui crée une chambre noire. Le but de cette démarche est de préserver la caméra le plus possible de lumière extérieure qui pourrait diminuer la visibilité de la feuille laser sur le lit de sédiments.

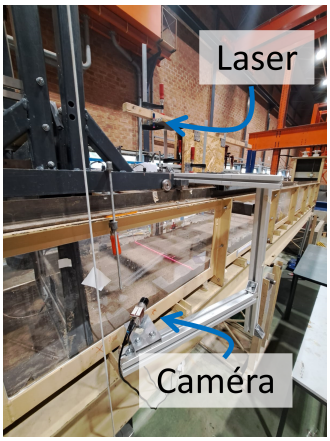


FIGURE 3.5 – Système caméra-laser avant le lancement d'une expérience.

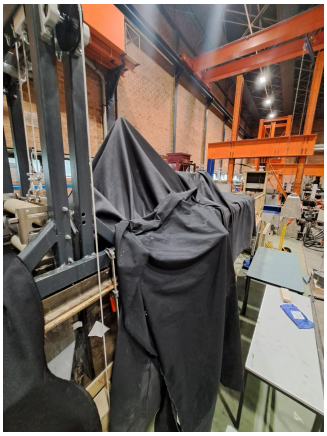


FIGURE 3.6 – Système caméra-laser recouvert de draps lors d'une expérience afin de créer une chambre noire.

Comme le montre le montage de la figure 3.5, le champ de la caméra est oblique par rapport au plan transversal du canal. Il est donc nécessaire de procéder à une orthorectification pour redresser ces images. L'orthorectifiaction permet de modifier les images de sorte à ce qu'elles donnent l'impression d'avoir été prises avec la caméra placée dans le canal avec une vue en plan. L'analyse des images prises par la caméra sont possibles grâce à une calibration.

3.2.2 Calibration

La calibration est à réaliser pour deux situations différentes : le canal à sec et le canal rempli d'eau au repos. La nécessité de deux calibrations découle des principes fondamentaux de l'optique, tels que les coefficients de réfraction et la loi de Snell-Descartes. En effet, en raison de la présence de l'eau dans le canal, les propriétés optiques de l'environnement changent de manière significative par rapport à la situation à sec. La présence de l'eau induit un changement de direction de la lumière lorsqu'elle passe du milieu où se trouve la caméra au canal rempli d'eau.

En conséquence, la calibration pour ces deux situations varie en fonction des propriétés optiques distinctes de l'air et de l'eau. L'utilisation d'un damier de calibration et d'un code Matlab permet de prendre en compte ces différences et d'effectuer des ajustements précis pour chaque configuration, garantissant ainsi la précision et la fiabilité des mesures optiques réalisées dans chaque cas [Abbeels and Messens, 2019]. En raison du fait que le laser et la caméra sont solidaires et peuvent se déplacer sur un chariot amovible, une recalibration n'est nécessaire que dans le cas où la position du laser bouge par rapport à la position de la caméra.

Canal à sec

Tout d'abord, un damier de calibration, aux dimensions connues, est inséré dans le canal, à sec et sans sédiments, transversalement à celui-ci de telle manière à ce qu'il soit tangent à la feuille laser. Une image est ensuite prise par la caméra afin d'être utilisée dans la fonction « Redressement » du code Matlab. Le but de cette fonction est de trouver un bon vecteur U (4x1) comportant les coordonnées cartésiennes de la position des pixels des 4 coins du damier. Ces 4 coins sont reliés et forment un rectangle rouge (voir figure 3.7). Cette étape se fait par essais-erreurs. Une fois réalisée, le code Matlab permet d'orthorectifier la zone de damier située dans le rectangle rouge. Ce même rectangle rouge sera utilisé pour la calibration avec eau.

L'étape suivante nécessite la fonction Matlab « profile_ex ». Elle a pour but de trouver l'échelle permettant de lier la taille horizontale et verticale des cases du damier mesurées par le code Matlab aux mesures réelles. Si les données ne coïncident pas, il est nécessaire d'adapter l'échelle.

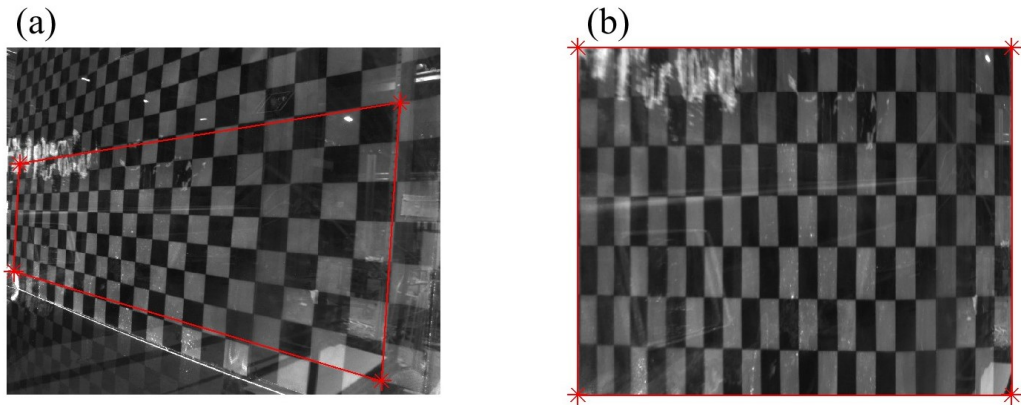


FIGURE 3.7 – Rectangle formé par les coordonnées cartésiennes de la position des pixels de 4 points du damier contenues dans le vecteur U (4x1). La figure (a) correspond à la photo prise par la caméra sur laquelle les 4 points sont dessinés et reliés, formant le rectangle rouge. La figure (b) correspond au rectangle rouge orthorectifié par le code Matlab.

Une fois la bonne échelle trouvée, il est nécessaire de vérifier que le code mesure correctement la distance entre les cases pour toute une ligne de damier horizontale et verticale. Dans le cas où il y aurait de grands écarts entre les distances trouvées par le code et la distance réelle entre les cases, cela signifierait qu'il y a de la distorsion.

Voici un exemple de vérification pour une ligne horizontale et verticale du damier (figure 3.8 et figure 3.9).

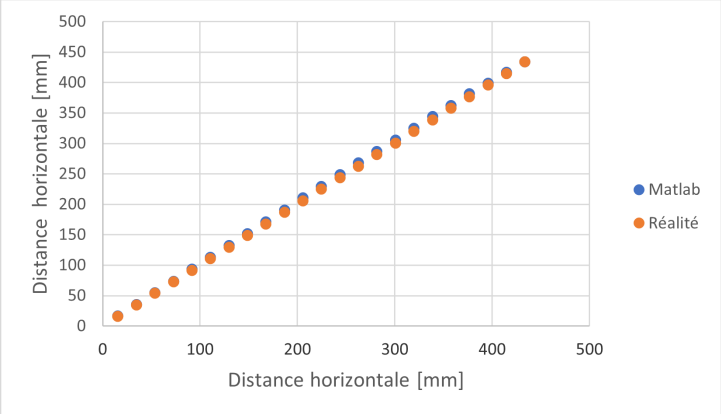


FIGURE 3.8 – Vérification de la calibration horizontale dans le cas du canal sec.

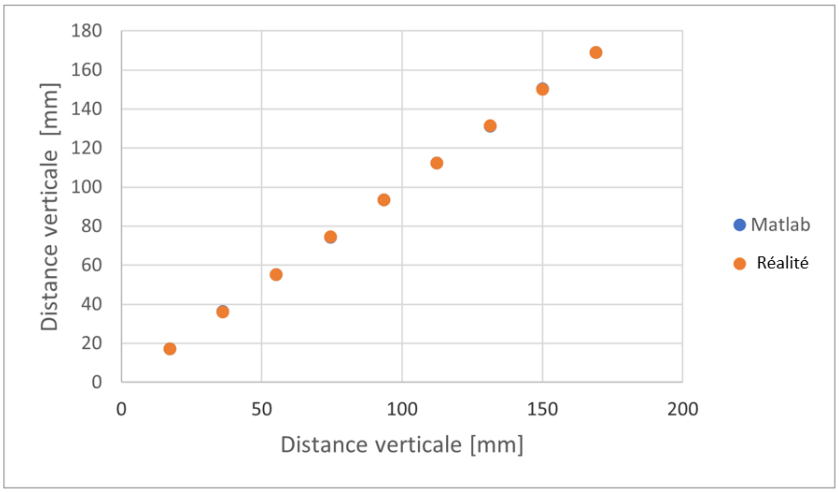


FIGURE 3.9 – Vérification de la calibration verticale dans le cas du canal sec.

La calibration à sec pour cette configuration de système caméra-laser montre une différence horizontale maximale de 5.5 mm et verticale de 0.4 mm. Ces deux valeurs sont acceptables, ce qui signifie qu'il n'y a pas de distorsion.

Une fois ces étapes finies, la calibration du système caméra-laser pour le canal à sec est terminée.

Canal rempli d'eau

Si la calibration à sec permet de trouver le bon rectangle rouge de calibration ainsi que de vérifier qu'il n'y ait pas de distorsion, la calibration avec eau sera très utile pour le traitement des images prises lors des expériences. En effet, tout au long des expériences, le canal ne sera jamais totalement à sec et il faudra donc s'appuyer sur cette deuxième calibration pour les analyses.

Comme pour le canal à sec, il faut d'abord trouver l'échelle permettant de lier la taille horizontale et verticale des cases du damier mesurées par le code Matlab aux mesures réelles et ensuite procéder à une vérification. La vérification permet à nouveau de s'assurer que le code mesure correctement la distance entre les cases pour toute une ligne de damier horizontale et verticale.

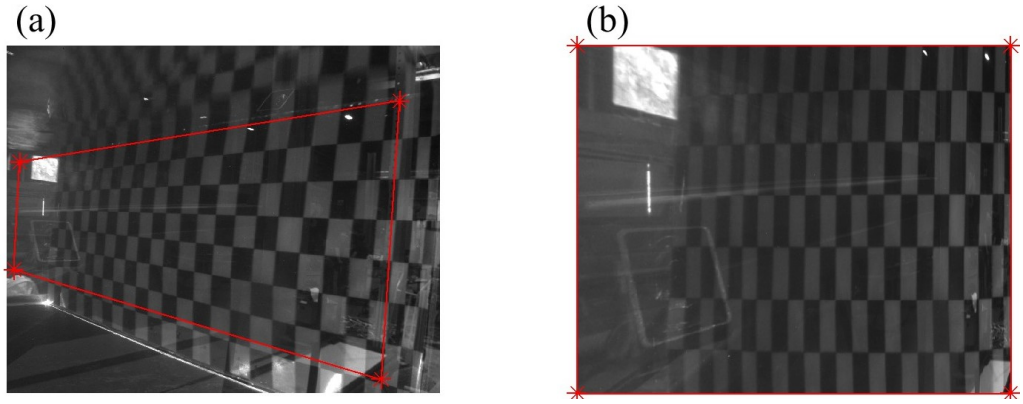


FIGURE 3.10 – Rectangle formé par les coordonnées cartésiennes de la position des pixels de 4 points du damier contenues dans le vecteur U (4x1). La figure (a) correspond à la photo prise par la caméra sur laquelle les 4 points sont dessinés et reliés, formant le rectangle rouge. En raison de la présence d'eau, le rectangle rouge crée dans la calibration à sec est déformé. La figure (b) correspond au rectangle rouge orthorectifié par le code Matlab.

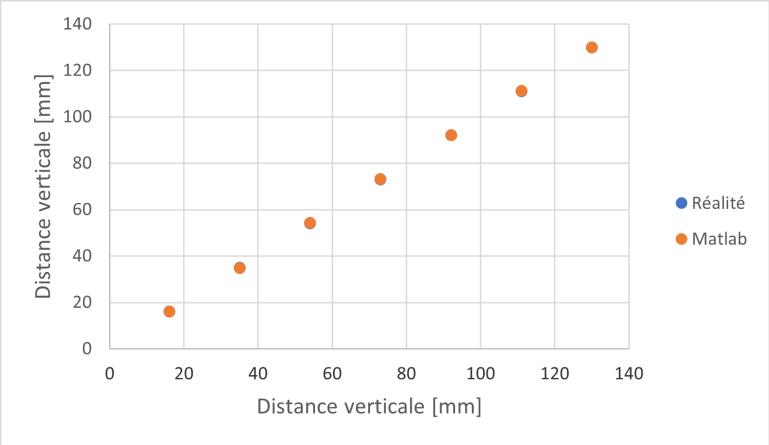


FIGURE 3.11 – Vérification de la calibration verticale dans le cas du canal sous eau.

La calibration sous eau pour cette configuration de système caméra-laser montre une différence verticale maximale de 0.33 mm, ce qui est acceptable 3.11.

Si cela ne pose pas de problème pour la vérification de la calibration sur une ligne verticale du damier, le cas d'une ligne horizontale est plus problématique en raison de la compression progressive de la largeur des cases par la présence de l'eau (voir figure 3.10). Il faut donc trouver un moyen pour que la dimension horizontale de

chaque case mesurée grâce au code Matlab reste la même sur toute la largeur du rectangle rouge, malgré l'effet de l'eau sur la perspective.

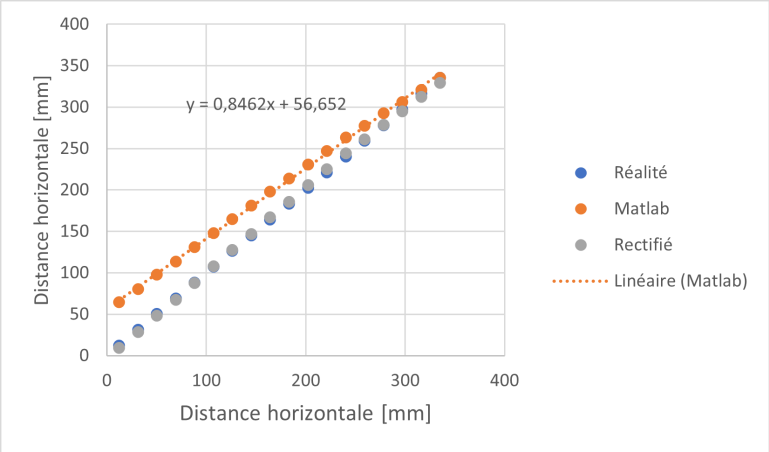


FIGURE 3.12 – Vérification de la calibration horizontale dans le cas du canal sous eau.

La figure 3.12 montre bien cette influence de l'eau si l'on compare la courbe orange qui représente le résultat obtenu par Matlab au graphe bleu qui représente la réalité.

Il est donc nécessaire de trouver une loi permettant de rapprocher les données de Matlab aux données réelles. Pour ce faire, il est possible de faire une démarche simplificatrice qui consiste à passer par la courbe de tendance linéaire des données Matlab donnant des résultats probants :

$$y = 0,8462x - 56,652 \tag{3.1}$$

Dans cette équation, y correspond aux valeurs horizontales obtenues par Matlab. En isolant x dans cette équation et en calculant sa valeur pour chaque coordonnée horizontale de point fournie de Matlab, de nouvelles valeurs horizontales sont obtenues. En les traçant sur le même repère, la courbe grise ("Rectifié") apparaît (figure 3.12). Celle-ci se rapproche bien de la réalité. De cette manière, en appliquant cette loi sur chaque image des expériences, il est possible d'évaluer l'évolution morphologique du canal sous eau sans être impacté par l'effet compressé de l'eau sur les images.

3.2.3 Utilisation de la technique de la feuille de laser sur les images d'une expérience

Une fois la calibration faite, il est possible de traiter les images fournies par la caméra lors des expériences grâce aux deux fonctions du code Matlab. La figure 3.13 est un exemple d'image prise par la caméra avant traitement sur laquelle le lit est visible grâce au reflet laser.

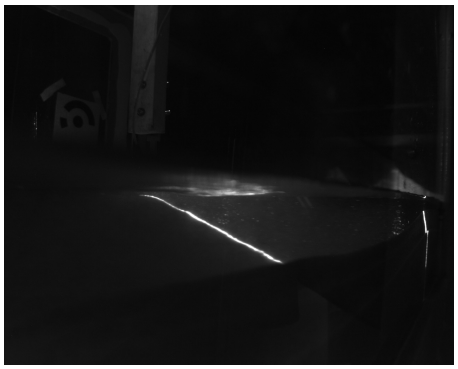


FIGURE 3.13 – Image brute prise lors d'une expérience avant traitement. La ligne oblique blanche correspond au laser se reflétant sur le lit de sédiments.

Pour chaque analyse, l'image va d'abord être orthorectifiée et remise à la bonne échelle, qui a été trouvée lors de la calibration (figure 3.14).

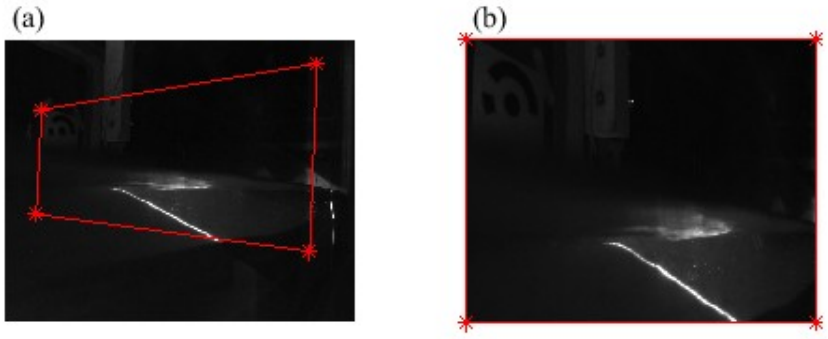


FIGURE 3.14 – Image orthorectifiée par le code Matlab.

Une fois cette étape finie, le reflet du laser sur le lit de sédiments est ensuite détecté par la seconde fonction ("ex_profile_extraction") du code Matlab (figure 3.15).

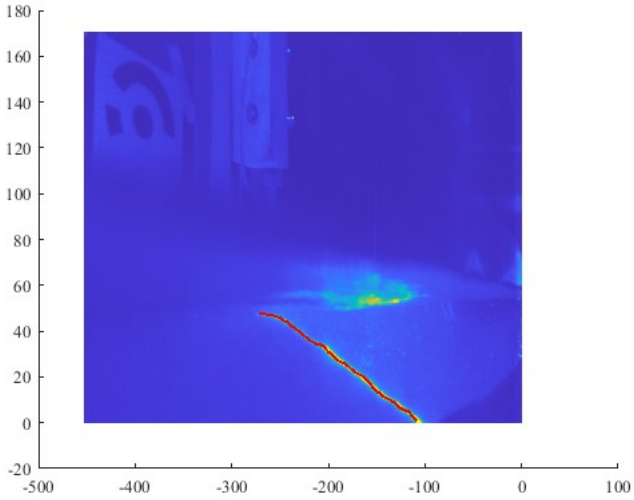


FIGURE 3.15 – Reflet du laser sur le lit de sédiments détecté en rouge par le code Matlab sur une image orthorectifiée.

Dans le cas où le laser ne serait pas bien détecté sur certaines zones, il est possible de venir tracer manuellement les points. Une fois cela fait, les coordonnées cartésiennes de l'ensemble des points du laser détectés par le code sont reprises dans un fichier Excel et peuvent être mises sous forme de graphique (3.16).

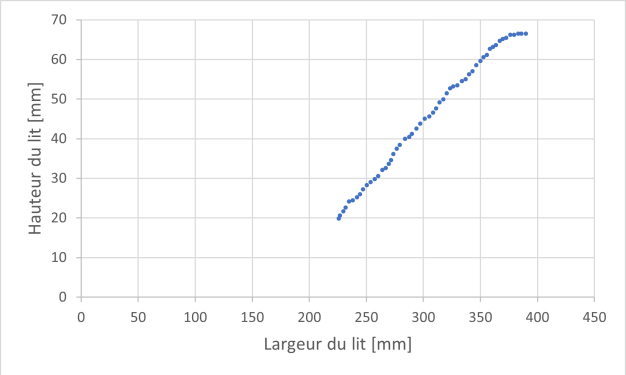


FIGURE 3.16 – Graphique de la morphologie du lit aval à partir d'une image prise par la caméra lors d'une expérience.

Une dernière étape peut être nécessaire d'une calibration à une autre. Dans ce cas-ci, sur l'image (a) de la figure 3.10, le cadre rouge de calibration donne l'illusion qu'il s'est déplacé horizontalement vers la gauche en comparaison au cadre rouge

de l'image (a) de la figure 3.7 en raison de la réfraction sur l'eau. Chaque graphique de la morphologie doit donc tenir compte de ce décalage dans le traitement des données.

L'ensemble de cette même procédure peut être appliquée à différentes images d'une même expérience, ce qui permet d'évaluer l'évolution morphologique du lit aval à une position précise au cours du temps.

3.3 Mesure de l'évolution morphologique de l'ensemble du lit aval

Le laser LPT, comme présenté dans la section 3.2, permet de mesurer continuellement l'évolution morphologique du lit aval en 2D sur une zone spécifique définie par le laser. Toutefois, étant donné que cette zone de mesure est limitée, il est également intéressant de pouvoir étudier le changement topographique de l'ensemble du lit après l'expérience. C'est là que la photogrammétrie entre en jeu et permet d'obtenir des résultats en 3D.

La photogrammétrie est un outil qui permet d'obtenir une topographie globale du lit aval avant et après l'expérience. Ainsi, il est possible de comparer le changement de l'ensemble du lit, contrairement au LPT qui fournit uniquement une évolution locale continue. Une considération importante est que la photogrammétrie ne permet pas de fournir l'évolution temporelle mais bien une évolution ponctuelle, ce qui représente une caractéristique distincte de cette méthode.

3.3.1 Principe de fonctionnement de la photogramétrie

Des images du canal avant et après l'expérience sont capturées à l'aide d'une GoPro Hero 9, puis sont traitées grâce au logiciel Metashape [Agisoft Metashape, 2023] qui va permettre de les assembler et de recréer un schéma topographique. Afin de permettre au logiciel de se repérer dans le canal, des balises fournies par Metashape sont soigneusement positionnées le long des parois du canal. Chaque photo doit contenir au moins deux balises, assurant ainsi la précision de la reconstitution. Toutes les photos doivent également se chevaucher afin d'avoir un recouvrement de l'ensemble de la zone. Au total, une vingtaine de photos étaient prises pour 2 mètres de photogrammétrie.

14 balises ont été placées le long du canal. Les positions des balises sont entrées dans Metashape suivant les axes x, y et z. Le fond du canal correspond à $z = 0$. Avec ces données, il est possible de calculer un volume de sédiment présent sur le lit du canal.

Le processus de modélisation de Metashape est le suivant : après avoir rentré toutes les photos dans le programme et après avoir inséré les coordonnées de chaque balise, le programme peut créer un modèle 3D avec un nuage de points. Une fois créé, il est possible de supprimer tous les points qui ne font pas partie de la zone à étudier. La figure 3.17 est un exemple du canal à l'aval après une ouverture de porte.

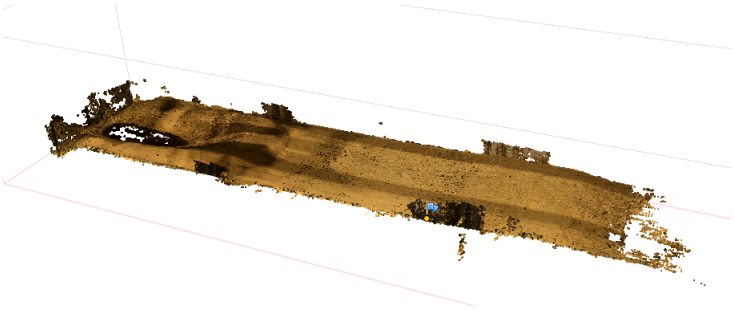


FIGURE 3.17 – Modèle 3D du lit du canal à l'aval de la porte après une chasse de barrage.

Ensuite, un modèle DEM (Digital Elevation Model) est généré depuis ce modèle 3D. Le DEM de la figure 3.17 est visible sur la figure 3.18. Ce plan topographique est fait avec un maillage qui prend comme noeuds tous les points générés par le modèle 3D.

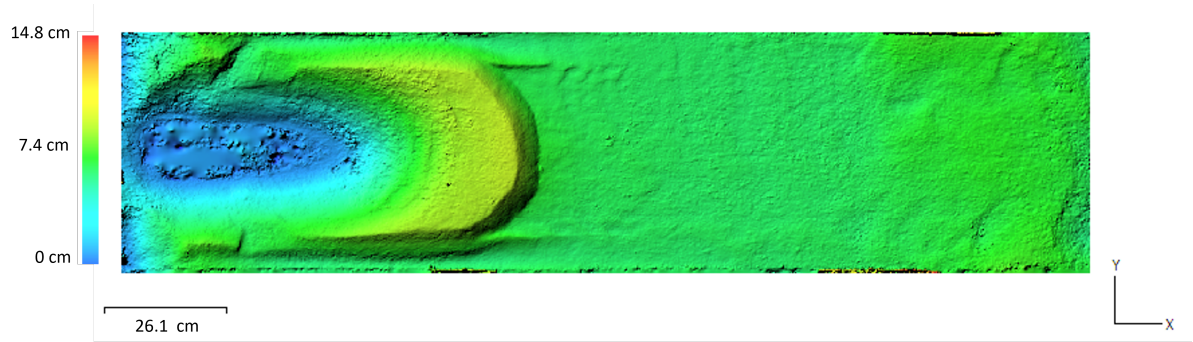


FIGURE 3.18 – Modèle DEM du lit du canal à l'aval de la porte après une chasse de barrage.

3.4 Mesure des profils de vitesse de l'eau et de la concentration en sédiments dans l'eau

3.4.1 Sondes UVP (Ultrasonic Velocity Profiling)

Les sondes UVP-DUO de Met-Flow permettent de mesurer le débit et la vitesse d'un fluide grâce à l'effet Doppler. En envoyant une onde à une certaine fréquence sur une particule en mouvement, l'onde sera réfléchie avec une modification de sa fréquence vers l'émetteur de l'onde. Cette fréquence modifiée est appelée la fréquence Doppler et elle permet de trouver, grâce à un calcul décrit plus loin, la différence de vitesse entre un observateur et un élément en mouvement.

Cependant, des chercheurs ont montré [Thorne and Hardcastle, 1997] qu'il est possible de les utiliser pour mesurer la concentration en sédiments grâce à l'intensité de l'onde réfléchie sur les particules en suspension [Met-Flow, 2011]. En effet, plus l'intensité de l'onde réfléchie est importante, plus il y a de particules en suspension. Ces sondes se déclinent en plusieurs modèles, chacun ayant un diamètre différent. Le diamètre peut atteindre 8 mm, ce qui permet de les introduire dans un flux d'eau sans générer une trop grande perturbation. De plus, elles peuvent prendre des mesures à travers un plexiglas, en s'assurant qu'un gel soit mis entre les deux afin d'éviter la présence de bulles d'air, auquel cas, l'air perturberait les prises de mesure. Les sondes, également appelées transducteurs connaissent 2 modes de fonctionnement : un mode émetteur et un mode récepteur. L'émission des ondes se fait par pulsions afin que la sonde puisse passer en mode réception entre 2 émissions. Ce principe est expliqué sur la figure 3.19. Les paramètres listés ci-dessous sont à configurer dans le logiciel de Met-Flow. Un channel représente un échantillon spatial dans lequel les mesures sont prises :

— *Maximum depth* : distance maximal sur l'axe de la sonde jusqu'où les mesures veulent être prises. Cette distance détermine le moment où la sonde passe du mode émetteur au mode récepteur, soit la fréquence d'émission des paquets d'onde. La sonde peut passer du mode émetteur au mode récepteur au moment ou une onde aura parcouru l'axe de mesure. En effet, la fréquence F_{prf} (pour *pulse repetition frequency*) est donnée par la formule suivante :

$$F_{prf} = \frac{c}{2P_{max}}.$$

— *Start channel* et *end channel* : ces paramètres déterminent le début et la fin de la fenêtre où les mesures seront prises.

— *Channel distance* : la distance entre deux pulsions d'ondes.

Dans cette représentation, *Channel width* représente la largeur d'un volume de mesure, qui détermine la résolution spatiale. La largeur du *channel* est donnée par

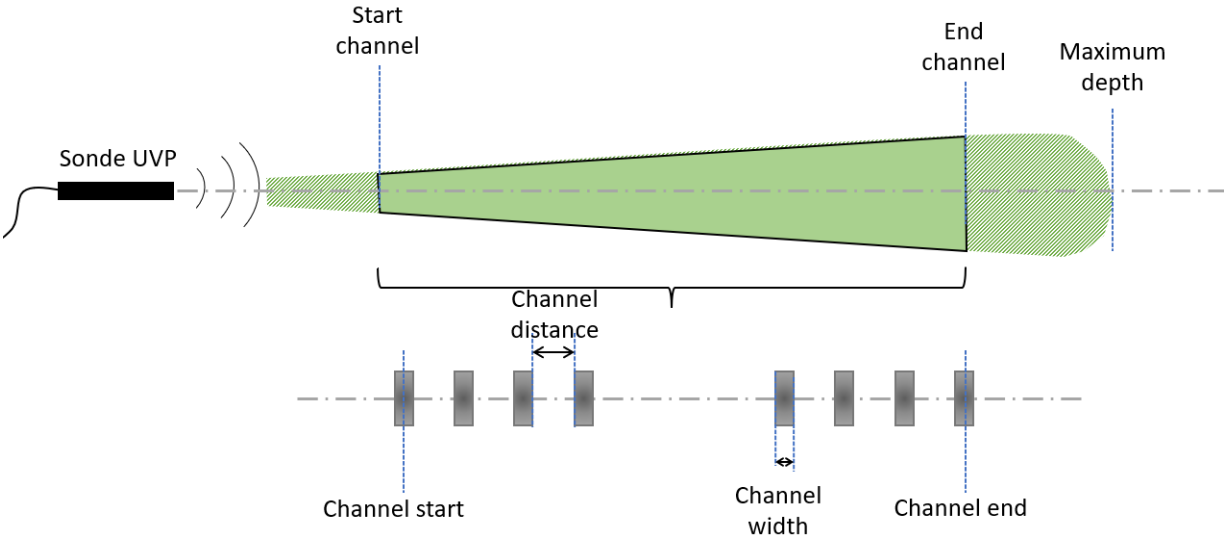


FIGURE 3.19 – Schéma du principe d'émission des ondes par un transducteur.

la formule suivante :

$$w = c\frac{n}{2f_0} = \frac{n\lambda_0}{2} \tag{3.2}$$

avec :

- w : la longueur du volume de mesure [m],
- c : la vitesse du son dans l'eau [m/s],
- n : le nombre d'ondes par pulsion,
- f_0 : la fréquence des ondes émises,
- λ_0 : la longueur d'onde associée à la fréquence f_0 [m].

La formule 3.2 montre que la longueur du volume de mesure vaut la moitié de la longueur d'une pulsion. La figure 3.20 représente un schéma typique de prise de mesure avec une sonde partiellement immergée dans un flux.

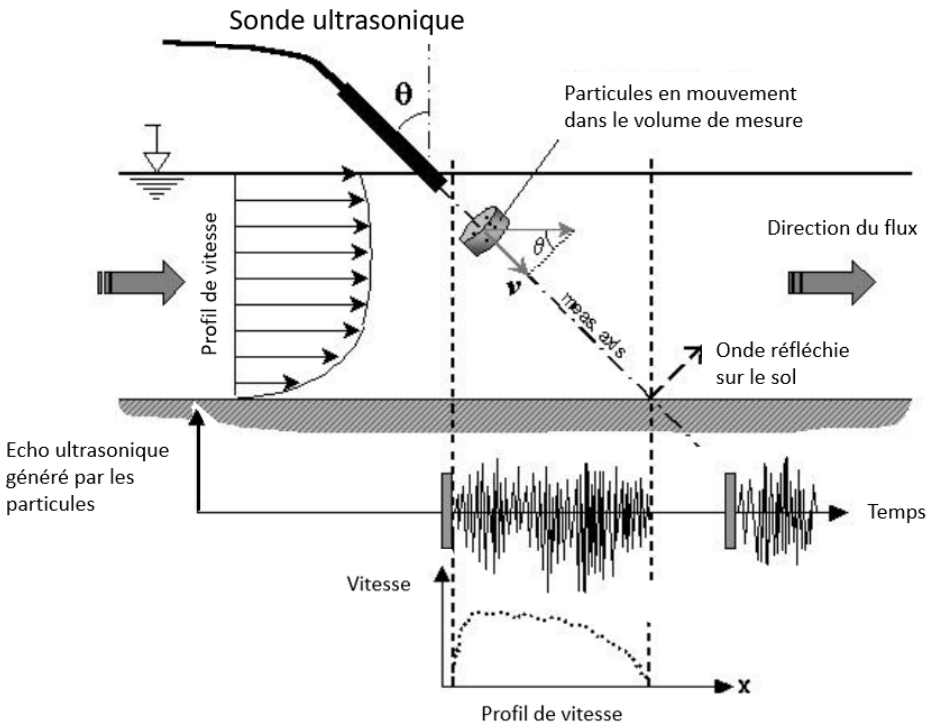


FIGURE 3.20 – Représentation schématique de la mesure de vitesse d'un flux à surface libre avec une sonde UVP. Illustration modifiée du manuel [Met-Flow, 2011].

Pour rendre les sondes moins intrusives dans l'eau lors des expériences, un dispositif a été conçu. Ce dispositif consiste en une pièce spécialement étudiée et imprimée en 3D, attachée à un morceau de bois qui descend à 25 cm au-dessus du fond du canal. Cette hauteur a été choisie parce que l'eau n'atteint jamais ce niveau et ainsi, le bois reste au sec. La pièce, beaucoup plus fine que le morceau de bois, est fixée à ce dernier et permet de descendre la sonde jusqu'au niveau de l'eau. En la maintenant avec un angle de 40 degrés par rapport à la verticale, on assure que la direction des profils de vitesse ne soit pas orthogonale à l'axe de mesure des UVP et que l'effet Doppler soit toujours présent. En résumé, le dispositif conçu permet de minimiser les perturbations dans l'eau causées par les sondes en les plaçant sur un support assez fin à un angle spécifique, assurant ainsi des mesures précises des profils de vitesse grâce à l'effet Doppler.

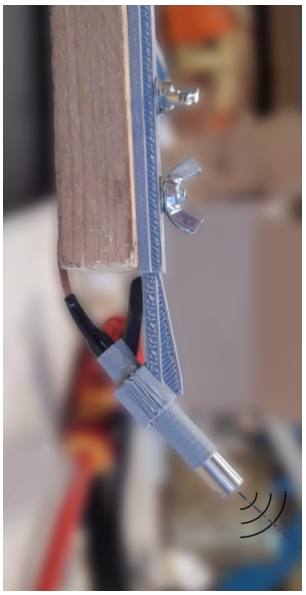


FIGURE 3.21 – Dispositif fixé à son support en bois permettant de maintenir la sonde avec un angle de 40 degrés.

Choix de la fréquence de la sonde

Les sondes utilisées tout au long des différentes expériences sont des sondes de 4MHz. Ce choix a été imposé par la taille des sédiments en suspension présents dans l'eau. Les sédiments utilisés dans le cadre de la chasse de barrage sont des sédiments avec un d_{50} de 0.366 mm de diamètre. Les particules en suspension doivent avoir un diamètre plus large que $\lambda/4$ [Met-Flow, 2011] afin que l'onde puisse se réfléchir sur l'élément. La longueur de l'onde dans l'eau dépend de la fréquence f et de la vitesse du son dans l'eau v : $\lambda = v/f$. Avec une vitesse du son dans l'eau de 1480 m/s, le tableau 3.1 reprend les diamètres minimum des particules en fonction de la fréquence utilisée.

f [MHz]	λ [mm]	Diamètre minimum des particules [mm]
0.5	2.96	0.74
1	1.48	0.37
4	0.37	0.093

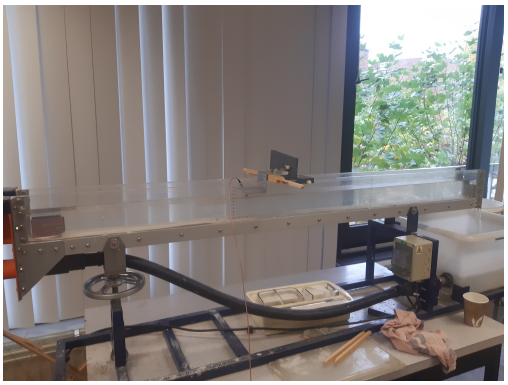
TABLE 3.1 – Diamètre minimum des particules détectables en fonction de 3 différentes fréquences.

Afin que les particules de 0.366 mm soient détectables par la sonde, il est nécessaire d'utiliser des sondes de 4 MHz.

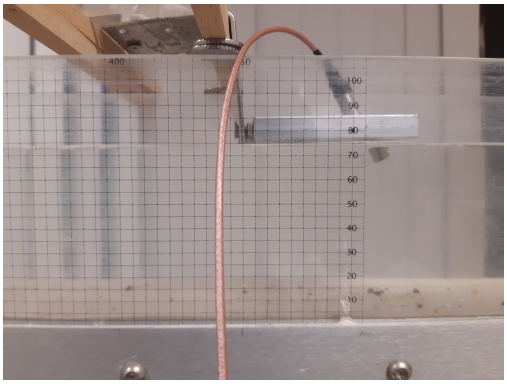
Choix des différents paramètres

Afin de s'assurer que les paramètres entrés dans le logiciel soient cohérents avec la situation expérimentale, différents essais ont été faits et les résultats ont été analysés. Ces essais ont été faits sur un canal rectangulaire avec une largeur de 7.8 cm. La sonde a été placée comme indiqué sur la figure 3.22b. Lors des prises de mesure, un débit de 0.67 l/s était envoyé dans le canal. Durant chaque prise de mesure, des sédiments en suspension étaient présents dans l'eau afin d'assurer une bonne réception du signal.

Un paramètre important est le gain appliqué sur le signal reçu. Lors d'une prise de mesures, l'eau et les impuretés génèrent une atténuation de l'onde. Plus le volume à mesurer se trouve éloigné de la sonde, plus les ondes réfléchies sont atténuées. Pour configurer ce gain, il faut entrer un gain de départ et un gain d'arrivée, qui correspondent aux gains du premier et du dernier volume mesurés. Le gain permet donc d'augmenter l'intensité du signal reçu et par conséquent, d'augmenter la précision de celui-ci. Il est conseillé dans le manuel [Met-Flow, 2011] de mettre un gain d'arrivée plus important que le gain de départ. Des gains différents ont été appliqués sur le signal : la figure 3.23 indique le signal reçu avec un gain de départ



(a) Petit canal utilisé pour la validation des paramètres des sondes UVP.



(b) Disposition de la sonde UVP dans l'eau. Photo prise au travers du plexiglas avec un niveau d'eau à 7,5 cm.

FIGURE 3.22 – Configuration du canal et de la mise en place de la sonde lors des prises de mesures pour la validation des paramètres initialisés dans le logiciel de Met-Flow.

de 1 et un gain d'arrivée de 3. La figure 3.24 montre le signal reçu avec un gain de départ de 7 et un gain d'arrivée de 9. Il est important de noter que ces deux prises de mesures ont été faites dans des conditions similaires, c'est à dire avec la même concentration en sédiment.

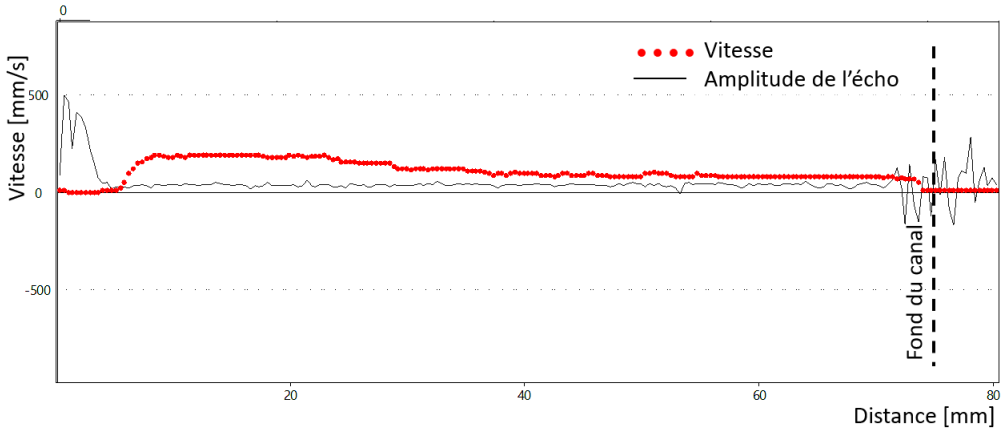


FIGURE 3.23 – Mesures prises avec un gain de départ de 1 et un gain d'arrivée de 3. L'axe *Distance* représente la distance verticale depuis la sonde jusqu'au fond du canal.

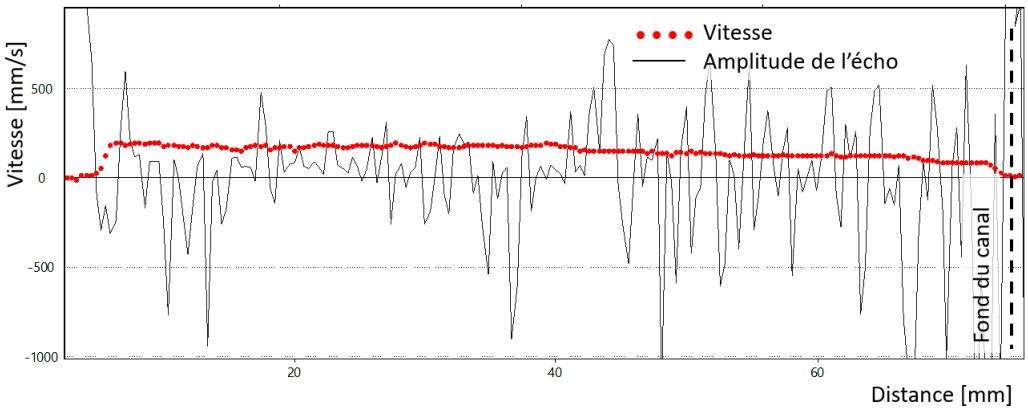


FIGURE 3.24 – Mesures prises avec un gain de départ de 7 et un gain d'arrivée de 9. L'axe *Distance* représente la distance verticale depuis la sonde jusqu'au fond du canal.

Sur ces deux figures, la différence se fait observer au niveau de l'amplitude de l'écho. Dans l'objectif de faire des mesures de concentration, il est utile d'avoir un retour d'écho important. En effet, l'intensité de l'écho (mesuré en V) est un indicateur de sédiments dans l'eau. De plus, afin de s'assurer de ne pas perdre le signal lors de phases avec beaucoup de sédiments dans l'eau, il est important de mettre un gain élevé. Un gain élevé permettra également de garder une précision plus importante qu'avec un petit gain.

Un gain d'amplification global peut également être contrôlé en modifiant l'intensité de l'émission d'ultrasons par la modification de la tension appliquée au transducteur (à savoir la tension d'émission US) [Met-Flow, 2011]. Dans les conditions de chasses de barrage, la concentration peut monter jusqu'à 300 g/l [Antoine et al., 2020]. Dans le but de garantir un niveau de signal adéquat sans une atténuation excessive avant d'atteindre la zone de mesure finale, des expériences ont été menées sur le canal représenté dans la figure 3.22a, en utilisant une concentration élevée de sédiments dans l'eau. Les résultats de ces expériences ont démontré la nécessité d'une tension de 150 V.

3.4.2 Mesure des profils de vitesse dans l'eau

Lors de l'émission, comme le montre la figure 3.19, le transducteur émet de brèves ondes à une fréquence de 4 MHz. Ces ondes se déplacent le long de l'axe de mesure et une fois que ces ondes sont réfléchies, le transducteur passe en mode récepteur.

L'écho atteint le transducteur après un délai équivalent à

$$t = \frac{2x}{c}$$

avec x la position par rapport à la sonde sur l'axe de mesure et c la vitesse de propagation de l'onde dans l'eau. Afin d'avoir un écho, il est nécessaire d'avoir des particules dans l'eau contre les quelle l'onde pourra se réfléchir.

Si la particule contre laquelle se réfléchit l'onde se déplace avec une composante de vitesse non nulle dans l'axe de mesure du transducteur, alors l'écho sera réceptionné par la sonde avec un effet Doppler. La vitesse dans l'axe du transducteur peut donc être calculée selon la formule suivante :

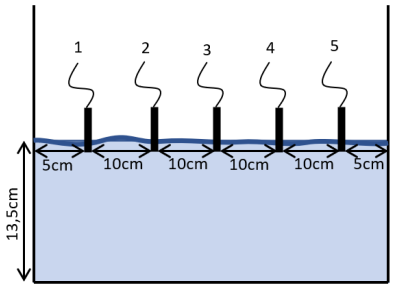
$$\frac{v}{c} = \frac{f_d}{2f_0}$$

avec v la vitesse de la particule, c la vitesse du son dans l'eau, f_d la fréquence Doppler en Hz et f_0 la fréquence d'émission en Hz.

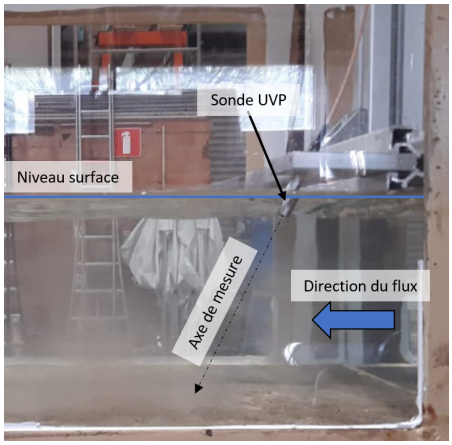
Validation des mesures de vitesse

Afin de s'assurer de la bonne mesure des vitesses, la démarche suivante a été faite. Un débit de 19.6 l/s est envoyé dans le canal expérimental détaillé dans le chapitre 2. Cette mesure de débit a été obtenue grâce au débitmètre installé sur la conduite amenant l'eau au canal. Cinq profils de vitesse ont été mesurés sur la largeur du canal afin de d'établir un profil en 2D par discrétisation. La sonde a été placée aux 5 emplacements indiqués sur la coupe de la figure 3.25a.

Une fois les mesures prises, chaque profil a été orthogonalisé, c'est à dire remis à la vertical par rapport au fond du canal. Cette manipulation doit être faite car les sondes prennent des mesures selon un axe formant un angle avec la verticale. Cet angle est indispensable car il permet aux particules en suspension d'avoir une composante de vitesse non nulle par rapport à l'axe de mesure des sondes. Ces profils de vitesse ont été intégrés sur la profondeur, ce qui a donné 5 valeurs en m^2/s qui sont représentées sur la figure 3.26. Pour intégrer ces profils sur la largeur du canal afin d'obtenir le débit en m^3/s, une intégration discrète a été faite en calculant l'aire sous la ligne bleue de la figure 3.26. Pour obtenir cette ligne, les vitesses contre les parois du canal sont égalées à zéro.



(a) Schéma du positionnement de la sonde UVP sur une coupe du canal pour faire un profil de vitesse discrétisé en 2D.



(b) Vue en coupe longitudinale lors de la prise de mesure d'un des 5 profils de vitesse.

FIGURE 3.25 – Disposition des sondes pour la prise des 5 mesures de profils de vitesse sur le canal.

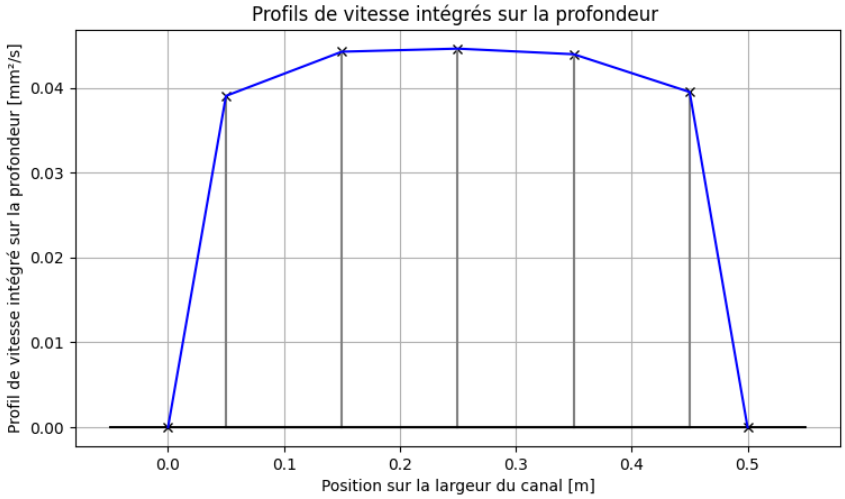


FIGURE 3.26 – Intégration en 2 dimensions des 5 profils de vitesse.

Cette intégration a permis de trouver un débit discrétisé sur une coupe du canal de 19,16 l/s, soit une erreur de 2% par rapport au débit réel. Cette erreur peut être expliquée du fait que l'intégration du profil en bleu sur la figure 3.26 sous-estime légèrement la courbe réelle des débits. Ce test a permis de valider les valeurs des paramètres configurés dans le programme de Met-Flow.

3.4.3 Mesure de la concentration en sédiments

L'utilisation des sondes UVP devrait également permettre de trouver la concentration en sédiments dans l'eau bien que l'équipement ne soit pas initialement prévu pour cela. Pour ce faire, il faut récupérer la valeur de l'amplitude de l'écho reçue par la sonde UVP. Cette valeur est traduite par une tension reçue par les transducteurs.

Pour commencer, il faut connaître la pression diffusée P_s venant d'une particule rencontrant une onde acoustique. La pression diffusée représente la pression acoustique d'une onde réfléchie sur une particule. Cette valeur de pression est donnée par l'équation suivante ([Sheng and Hay, 1988],[Thorne and Hanes, 2002]) :

$$P_s = \frac{a_s f P_i}{2r_1} e^{i(\omega t - r_1(k - i\alpha_w))} \tag{3.3}$$

avec a_s le rayon moyen d'une particule, f la fonction de forme qui décrit les propriétés de diffusion d'une particule en fonction de la fréquence de l'onde envoyée et du diamètre de la particule, r_1 la distance entre la source d'émission de l'onde et la particule, P_i la pression de l'onde incidente, ω la fréquence angulaire et k est le nombre d'onde acoustique dans l'eau (elle dépend donc de la vitesse du son dans le milieu de diffusion) : $k = 2\pi/\lambda$. Pour finir, α_w est un facteur représentant l'atténuation de l'onde uniquement due à l'eau. La pression incidente dans un domaine loin du transducteur est définie par l'équation suivante :

$$P_i = \frac{P_0 r_0}{r_2} D^2 e^{i(\omega t - r_2(k - i\alpha_w))} \tag{3.4}$$

Dans cette équation, on retrouve les termes suivants : P_0 est la pression de référence définie à $r_1 = 1$m, r_2 est la distance par rapport au transducteur et D est la fonction de directivité du transducteur. Lorsque le transducteur est à la fois l'émetteur et le récepteur, les équations (3.3) et (3.4) peuvent être assemblées en insérant P_i dans l'équation de P_s pour donner l'expression générale de la pression P suivante :

$$P = \frac{a_s f P_0 r_0 D^2}{2r^2} e^{i(\omega t - 2r(k - i\alpha))} \tag{3.5}$$

On peut observer que dans l'équation ci-dessus, le terme α_w est devenu α. En réalité, alpha est un terme générique pour parler de l'atténuation dans l'eau. Il comprend donc l'atténuation des sédiments : $\alpha = \alpha_w + \alpha_s$. La valeur de l'atténuation due aux sédiments est la suivante :

$$\alpha_s(r) = \frac{1}{r} \int_0^r \xi M(r) dr \tag{3.6}$$

Dans l'équation (3.6), le terme ξ représente une constante d'atténuation des sédiments et elle est donnée par l'équation suivante :

$$\xi = \frac{3}{4a_s\rho_s}\chi \tag{3.7}$$

$$\chi = \frac{1.1(4/3)0.18(ka_s)^4}{1 + 1.3(ka_s)^2 + (4/3)0.1(ka_s)^4} \tag{3.8}$$

Ensuite, le terme représentant l'atténuation due à l'eau claire α_w est donné par l'équation suivante [Fisher and Simmons, 1977] :

$$\alpha_w = 10^{-15}(55.9 - 2.37T + 4.77 \times 10^{-2}T^2 - 3.48 \times 10^{-4}T^3)F^2 \tag{3.9}$$

Le terme $M(r)$ représente la concentration en sédiments en kg/m^3. Pour un certain volume contenant N particules en mouvement, la pression diffusée est la somme des pressions venant de toutes les particules :

$$\sum p = \sum_{n=1}^{N} \frac{a_s f p_0 r_0 D^2}{2r_n^2} e^{i(\omega t - 2r_j(k - i\alpha))} \tag{3.10}$$

La pression totale renvoyée par le volume est une résultante de toutes les réverbérations des particules dans ce volume car ces particules en mouvement ont des vitesses différentes et des directions différentes. L'onde reçue par le transducteur est donc un signal aléatoire mais il est à noter que certaines caractéristiques sont reconnaissables. Par exemple, la moyenne du signal est égale à 0 et la valeur de la moyenne au carré vaut $\sigma_p^2 =< (\sum p)^2 >$. Il a été prouvé que ce cas correspond à un fonction de distribution de Rayleigh [Bendat and Piersol, 2011] et [Thorne and Hanes, 2002].

La pression acoustique totale renvoyée par un volume vaut

$$P^2 = \sum p (\sum p)^* \tag{3.11}$$

avec * pour le complexe conjugué de p. Cette pression vaut donc :

$$P^2 = \frac{(a_s f p_0 r_0)^2}{4} \sum_{n=1}^{N} \sum_{m=1}^{N} \frac{D_n^2 D_m^2}{r_n^2 r_m^2} e^{-2ik(r_n - r_m) - 2\alpha(r_n + r_m)} \tag{3.12}$$

Si le nombre de particules dans le volume est assez important, les termes avec les indices n et m peuvent s'égaler car avec une distribution aléatoire et un nombre d'échantillons suffisamment grand, on peut considérer une similarité entre n et

m [Pedocchi and García, 2012]. C'est pourquoi l'équation (3.12) peut se réécrire comme ceci :

$$P^2 = \frac{(a_s f p_0 r_0)^2}{4} \sum_{n=1}^{N} \frac{D^4}{r_n^4} e^{-4\alpha r_n} \tag{3.13}$$

Afin de résoudre cette équation, une intégration est faite sur une hémisphère d'une certaine épaisseur w comme indiqué sur la figure 3.27.

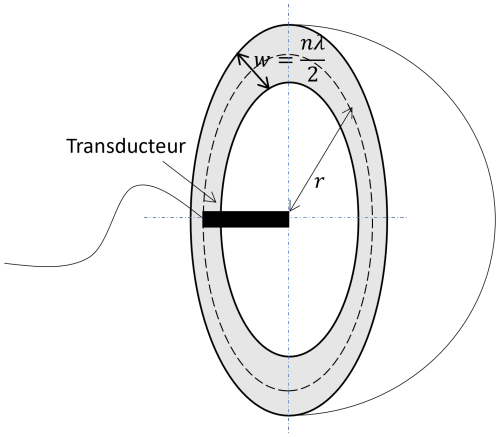


FIGURE 3.27 – Volume de mesure pour déterminer l'intensité acoustique d'une onde incidente.

Sur la figure 3.27, la valeur de n est le nombre d'ondes envoyées par pulsion. L'expression de la moyenne RMS de la pression est donc la suivante :

$$< p^2 >= (p_0 r_0 f)^2 a_s^2 N \int_{r-n\lambda/4}^{r+n\lambda/4} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \frac{e^{-4\alpha r}}{r^2} D^4 sin\theta d\phi d\theta dr \tag{3.14}$$

Lorsque les sédiments ont une taille uniforme, la concentration en sédiments peut être trouvée avec la concentration massique des particules ρ_s et avec leur diamètre moyen a_s. La concentration se trouve donc avec la formule suivante (3.15) et cette équation peut être introduite dans l'équation (3.14) pour donner l'équation (3.16).

$$M = \frac{4}{3} \pi a_s^3 \rho_s N \tag{3.15}$$

$$< p^2 >= (p_0 r_0 f)^2 \left(\frac{3M}{16\pi a_s \rho_s} \right) \int_{r-n\lambda/4}^{r+n\lambda/4} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \frac{e^{-4\alpha r}}{r^2} D^4 sin\theta d\phi d\theta dr \tag{3.16}$$

Si l'atténuation α n'est pas trop importante et que r est bien plus grand que $n\lambda/2$, ce qui est généralement le cas car $n\lambda/2$ tourne autour de 0,5 mm et r peut monter jusqu'à 15 cm, le terme exponentiel $e^{-4\alpha r}$ peut être sorti de l'intégrale.

Lors d'une prise de mesure, il est important de noter que la tension au carré $< V^2 >$ renvoyée par le transducteur est proportionnelle à l'intensité acoustique $< p^2 >$. L'apparition des termes K_s et K_t dans l'expression 3.17 permet de passer de pression à tension. L'expression de la tension donc peut être décrite comme ceci ([Thorne and Hardcastle, 1997] et [Thorne and Hanes, 2002]) :

$$< V^2 >= \left(\frac{K_s K_t}{r\psi}\right)^2 M e^{-4\alpha r} \tag{3.17}$$

Dans cette équation, K_s est une fonction de propriété de la diffusion de l'onde sur les sédiments en suspension et K_t est une constante du système ultrasonique.

$$K_s = \frac{f}{\sqrt{a_s \rho_s}} \tag{3.18}$$

$$K_t = R T_v p_0 r_0 \frac{0.96}{k a_t} \left(\frac{3}{16} n \lambda\right)^{1/2} \tag{3.19}$$

Dans l'équation (3.19), le terme R représente la sensibilité du transducteur et T_v la fonction de transfert de la tension des appareils de mesure. Cette valeur est trouvée de manière empirique. La méthode utilisée pour ce faire est la suivante : dans une colonne, une quantité connue de sédiments est mise en suspension à l'aide d'une hélice et une sonde vient mesurer l'intensité de l'onde d'écho. Connaissant la concentration en sédiments dans l'eau, le terme K_t peut être trouvé en inversant l'équation (3.17). Les travaux de [Thorne and Hanes, 2002] ont permis de trouver les valeurs suivantes indiquées sur la figure 3.28. Avec les sondes de 4 MHz, l'hypothèse a été faite que la situation présentée dans ce travaille était assez similaire au travail de [Thorne and Hanes, 2002] et donc que la valeur de K_t vallait donc 0.023 $[V m^{3/2}]$. Un travail plus approfondi aurait été nécessaire pour calibrer cette valeur.

$\psi(r)$ prend en compte la discontinuité du signal rétrodiffusé. En effet, près du transducteur, l'amplitude du champ de pression oscille mais une fois que l'on s'éloigne du transducteur, la pression décroît de manière continue [Downing et al., 1995].

$$\psi(r) = 1 + \frac{1}{0.43(\frac{r\lambda}{\pi a_t^2}) + 0.48(\frac{r\lambda}{\pi a_t^2})^{3,2}} \tag{3.20}$$

La valeur de a_t représente le diamètre actif du transducteur. Dans le cas d'une sonde de 4 MHz, le diamètre actif est de 5 mm.

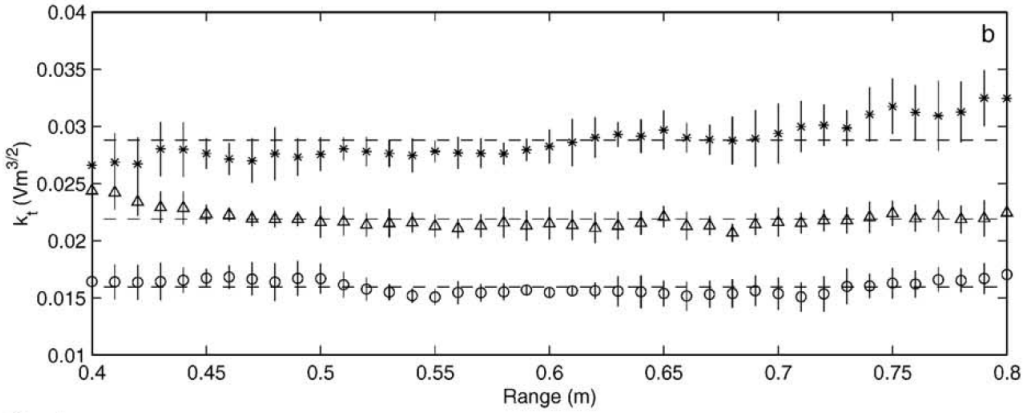


FIGURE 3.28 – Différentes valeurs trouvées empiriquement en fonction de la distance avec différentes sondes. o=1 MHz, *=2 MHz et $\Delta = 4$ MHz.

Maintenant que les termes de l'équation (3.17) sont connus, l'équation peut être inversée afin d'obtenir la concentration en fonction de la tension.

$$M =< V^2 > \left(\frac{\psi r}{K_s K_t}\right)^2 e^{4r(\alpha_w+\alpha_s)} \tag{3.21}$$

Avec pour rappel $\alpha_s = \frac{1}{r}\int_0^r \xi M dr$ La tension est obtenue depuis le logiciel des sondes UVP de Met-Flow. Le signal d'écho affiché par le logiciel est un signal adimensionnel. La conversion des valeurs obtenues en V est linéaire et correspond à 8191=2,5 V et -8192=-2,5 V. Une fois que cette transformation est faite, il faut maintenant tenir compte du gain. Ce paramètre est à configurer dans le logiciel avant l'utilisation d'une sonde.

Pour obtenir le signal non amplifié, la formule suivante doit être appliquée sur le signal brut :

$$V = \frac{V_{amp}}{G_s}\left(\frac{G_s}{G_e}\right)^{(r-r_s)/(r_e-r_s)} \tag{3.22}$$

avec G_s le gain de départ, G_e le gain de sortie, r la distance par rapport à la sonde le long de l'axe de mesure, r_s la distance entre la sonde et le premier point de mesure et r_e la distance entre la sonde et le point final de la zone à mesurer. En fonction de la fréquence utilisée, le facteur gain absolu entré dans le programme de Met-Flow doit être converti en un facteur absolu. Dans le cadre de ces expériences, avec une sonde de 4 MHz, le facteur de gain d'entrée de 7 et de sortie de 9 représentent respectivement un gain absolu de 15 et de 60 [O. Mariette, correspondance personnelle],[Pedocchi and García, 2012]. La valeur de G_s vaut donc 15 et G_e vaut 60. Le tableau 3.2 donne les correspondance entre le facteur gain et le gain absolu en fonction de la fréquence de la sonde.

Facteur gain	Fréquence de la sonde [MHz]		
	0.5/1	2/4	8
3	2.17	0.91	0.65
4	4.41	1.76	1.36
5	8.82	3.41	2.80
6	16.67	6.67	5.26
7	33.33	15.00	11.11
8	60.00	25.00	23.08
9	150.00	60.00	42.86

TABLE 3.2 – Tableau des correspondance entre le facteur gain et le gain absolu selon la fréquence de la sonde.

Étant donné que la formule de la concentration (3.21) fait appel à elle même dans son calcul, il faut mettre en place une méthode de calcul. Pour ce faire, il y a deux méthodes possibles : la méthode implicite et la méthode explicite.

Méthode implicite

Une méthode pour s'approcher de la concentration a été suggérée par [Thorne and Hanes, 2002] et [Pedocchi and García, 2012]. Pour simplifier la lecture de la technique, l'équation 3.21 est réécrite de la manière suivante : $M(r) = f(V, r)e^{4\alpha r}$. Cette méthode considère dans un premier temps que l'atténuation des sédiments α_s est nulle. La valeur de la concentration vaut donc $M_0 = f(V, r)e^{4\alpha_w}$. Ensuite, avec cette valeur M_0, il est possible d'évaluer une valeur pour l'atténuation : $\alpha_{s1} = \int_0^r cstM_0 dr$. Cette atténuation peut ensuite être injectée dans la formule de la concentration pour trouver une nouvelle concentration : $M_1 = f(V, r)e^{4\alpha_w + \alpha_{s1}}$. Ensuite, avec cette nouvelle valeur M_1, il est possible de réévaluer l'atténuation en sédiment pour trouver un α_{s2}. Ce processus est itératif jusqu'à converger vers une valeur de M à chaque distance r. Ce processus a été testé avec un code Python mais cette technique divergeait très rapidement et aucun résultat n'a pu en être tiré.

Avec l'aide de Michel Henry, doctorant à l'UCLouvain, une nouvelle méthode a été mise en place. Cette méthode consiste à approcher le résultat via une itération de Newton-Raphson. La méthode itérative de Newton-Raphson est un algorithme utilisé pour trouver les zéros d'une fonction. Elle commence par une estimation initiale de la solution, puis elle itère en utilisant la tangente à la courbe de la fonction à chaque étape pour affiner la solution. À chaque itération, la méthode raffine l'estimation en se déplaçant vers l'intersection de la tangente avec l'axe des abscisses. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que la solution converge vers une

valeur précise. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer une fonction égale à 0. En manipulant l'équation 3.21, on peut obtenir l'équation suivante :

$$M - < V^2 > \left(\frac{\psi r}{K_s K_t} \right)^2 e^{4r(\alpha_w + \alpha_s)} = 0 \tag{3.23}$$

avec $\alpha_s = \frac{1}{r} \int_0^r \xi M dr$. En discrétisant l'intégrale se trouvant dans α_s par une intégration rectangulaire et en posant une variable $\beta_i = \frac{V_{rms} \psi r^2}{k_s k_t}$, l'équation 3.23 devient :

$$f(M) = M_i - \beta_i e^{\frac{4\xi}{2}(M_i + M_{i-1})\Delta r} = 0. \tag{3.24}$$

Le processus itératif de Newton-Raphson consiste à résoudre l'équation suivante :

$$M^{n+1} = -J^{-1}(M^n) f(M^n) \tag{3.25}$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_0(\mathbf{M})}{\partial M_0} & \cdots & \frac{\partial f_0(\mathbf{M})}{\partial M_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m(\mathbf{M})}{\partial M_0} & \cdots & \frac{\partial f_m(\mathbf{M})}{\partial M_n} \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

Pour résoudre ce calcul, les valeurs de M ont été dérivées par rapport à M_0. Toutefois, cette méthode connaît ses limites. En effet, le principe itératif n'est pas toujours convergeant. De plus, les différents paramètres ont été déterminés en suivant certains travaux scientifiques qui utilisaient les mêmes équations mais dans des situations pas exactement similaires.

Le code python de cette méthode est repris dans l'annexe 7.1.

Méthode explicite

Avec l'équation 3.21, il est également possible de dessiner un profil de concentration en particules le long de l'axe de mesure de la sonde UVP [Lee and Hanes, 1995]. Premièrement, l'équation 3.21 est passé en logarithmique :

$$ln(M) = 2ln(V_{rms}) + 2ln(r) + 2ln(\psi) - 2ln(k_s) - 2ln(k_t) + 4r\alpha_w + 4 \int_0^r \xi M dr \tag{3.27}$$

avec toujours r qui représente la distance par rapport au transducteur. En utilisant la propriété des logarithmes suivante :

$$\frac{d}{dr} ln(F(r)) = \frac{F'(r)}{F(r)}, \tag{3.28}$$

il est possible de réécrire l'équation 3.27 de la manière suivante, en considérant que les primes " ′ " représentent la dérivée par rapport à r.

$$M' - 2\left(\frac{V'_{rms}}{V_{rms}} + \frac{1}{r} + \frac{\psi'}{\psi} - \frac{k'_s}{K_s} + 2\alpha_w\right) M = 4\xi M^2 \tag{3.29}$$

Il s'agit ici d'une équation différentielle de Bernoulli qui peut être linéarisée en faisant $z = M^{1-n}$. En appliquant ceci, l'équation suivante est obtenue :

$$z' + \gamma z = -4\xi \tag{3.30}$$

$$\gamma = 2\left(\frac{V'_{rms}}{V_{rms}} + \frac{1}{r} + \frac{\psi'}{\psi} - \frac{k'_s}{k_s}\right) + 4\alpha_w \tag{3.31}$$

L'équation 3.30 peut être résolue à l'aide de la méthode des facteurs intégrants. pour obtenir :

$$ze^{\int \gamma dr} = -4\int \xi e^{\int \gamma dr} + c \tag{3.32}$$

Dans cette équation, $\int \gamma dr$ peut être facilement calculé pour donner l'équation suivante :

$$z\beta^2 = -4\int \beta^2 \xi dr + c \tag{3.33}$$

avec $\beta = V_{rms} r \psi k_s^{-1} e^{2\alpha_w r}$. En connaissant une valeur initiale de la concentration M_r au point $r = r_r$, il est possible de trouver la concentration en tout point. En effet, en remplaçant z par M^{-1}, la formule de la concentration est la suivante :

$$M(r) = \frac{\beta^2}{\beta_r^2/M_r - 4\int_{r_r}^{r} \beta^2 \xi dr} \tag{3.34}$$

Il est maintenant possible de numériser cette équation en discrétisant l'intégrale.

$$M(r) = \frac{\beta^2}{\beta_r^2/M_r - 4\xi \sum_{i=1}^{i=r} \beta^2 dr} \tag{3.35}$$

Le terme en $i = 0$ est celui représentant l'échantillon pris en $r = r_r$. Le terme en $i = 1$ représente donc le premier volume de mesure après le volume de mesure où la concentration doit être connue. Un code python a été écrit pour traiter les données récupérées en fichier `.txt` depuis le programme Met-Flow. Ce code est présenté dans l'annexe 7.2.

Comme expliqué dans l'équation 3.35, il est nécessaire de connaître la valeur de M_r pour pouvoir dessiner le profil de concentration le long de l'axe de mesure de la sonde UVP. Cette valeur de M_r représente la concentration à la distance la plus proche de la sonde. Afin de trouver cette valeur de concentration, la technique calcul de concentration par feuille laser est utilisée.

Mesure de la concentration par feuille laser

La technique de mesure de concentration par feuille laser consiste à projeter une feuille laser dans l'eau et à faire des photos de la feuille laser toutes les secondes [Spinewine et al., 2011]. Les photos prises pour la technique du LPT décrite précédemment sont donc réutilisées pour cette technique. Ainsi, le montage est le même que celui décrit sur la figure 3.3. Une fois les images récupérées, les particules qui passent par le faisceau du laser sont en surbrillances et à l'aide d'un code développé par Monsieur Hervé Capart, il est possible de compter les particules présentes sur une fenêtre définie au préalable. La figure 3.29 représente une partie d'une photo prise par la technique LPT. Cette image a été prise 92 secondes après l'ouverture de la porte de barrage avec un lit initial de sable à l'aval et sans sable à l'amont. Sur cette image, on peut apercevoir sur la gauche une ligne blanche qui représente la pente du lit érodé. Les croix en bleu représentent une particule détectée par le code Matlab.

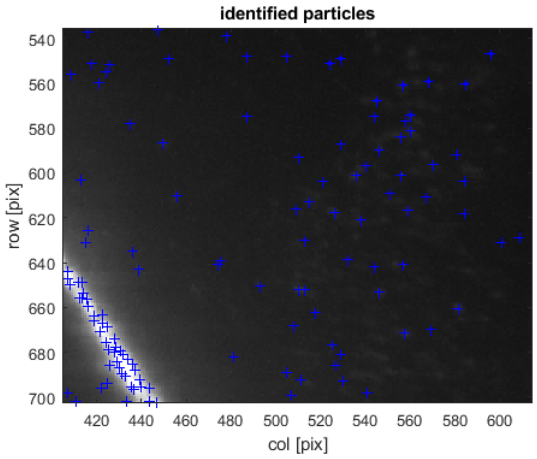


FIGURE 3.29 – Image prise 92 secondes après le début d'une chasse. Les croix en bleu représentent une détection de particule. La ligne blanche sur la gauche représente la pente du lit érodé.

En connaissant le nombre de particules sur une fenêtre bien définie, avec une granulométrie connue et après avoir mesuré l'épaisseur de la feuille laser, il est possible de calculer la concentration sur un volume précis. En effet, on peut retrouver la masse totale des particules sur ce volume grâce au diamètre moyen des particules et grâce à leur masse volumique.

$$m = \rho_{sable} \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_{50}}{2} \right)^3 n \quad [kg] \tag{3.36}$$

Avec n le nombre de particules, ρ_{sable} la densité humide du sable, ici 2640 kg/m^3 et d_{50} le diamètre moyen des particules.

Ensuite, il faut trouver le volume dans lequel les particules sont comptées. Pour ce faire, l'épaisseur de la feuille laser a été mesurée dans l'eau et celle-ci vaut 1.5 mm. Ensuite, une fenêtre est dessinée sur une photo qui superpose l'ensemble des photos prises durant l'expérience. Cette photo aide à choisir une zone qui n'est pas soumise à une surexposition de lumière à un moment de l'expérience. Ces surexpositions pourraient fausser les résultats et elles peuvent être causées par exemple par l'exposition du laser sur une dune de sable. La figure 3.30 est une image superposant toutes les images prises durant l'expérience. La zone en mauve représente la zone sélectionnée dans laquelle les particules vont être comptées. Ce calcul de particules sera ensuite fait sur chaque image dans la même fenêtre. Une image est prise à chaque seconde, ce qui permet de donner une évolution de la concentration par pas de 1 seconde.

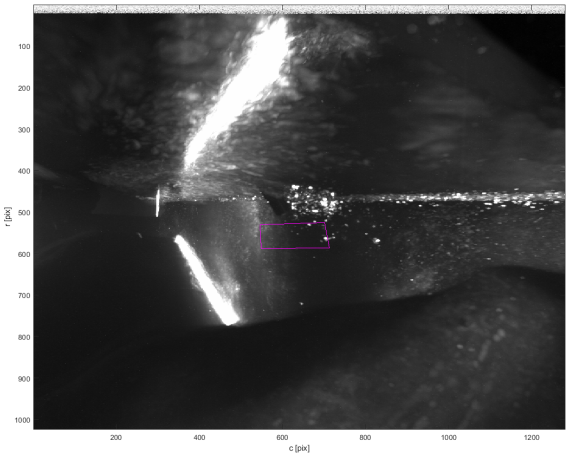


FIGURE 3.30 – Photo superposant l'ensemble de photos prises durant une expérience avec la zone de comptage de particule choisie en mauve.

3.5 Mesure du débit

3.5.1 Mesure du débit amont

Le tuyau alimentant le bassin versant de notre canal est équipé d'un débitmètre. Ceci nous permet de contrôler et de choisir le débit souhaité passant par le tuyau pour nos expériences. Tout comme les sondes Baumer, ce débitmètre fournit une tension (V) liée au débit affiché sur son écran. Il a donc été possible de l'étalonner pour pouvoir récolter le débit à un intervalle de temps régulier.

3.5.2 Mesure du débit aval

Afin de mesurer le débit à l'aval, 2 appareils de mesure ont été utilisés conjointement : une sonde Baumer et une sonde UVP. Celles-ci ont été placées au même endroit sur le canal, à 1.47 mètre à l'aval de la porte sur l'axe central. La sonde UVP fournit

un profil de vitesse en un point d'une section du canal. Avec cette information, il est possible d'intégrer ce profil. L'unité de cette intégration est le mm^2/s. Ensuite, il suffit de multiplier cette valeur par la largeur du canal pour obtenir une valeur de débit en mm^3/s. C'est ainsi qu'une approximation assez précise du débit peut être obtenue. Le problème avec cette technique est que, lors d'une expérience, la sonde UVP se retrouve parfois 2 à 3 cm en-dessous de la surface de l'eau et par conséquent, une partie du profil de vitesse y est alors négligée. Pour palier à ce problème, la sonde Baumer qui mesure la hauteur du niveau de l'eau peut aider. En connaissant la hauteur de la sonde UVP qui est fixe (h_{UVP}) et en connaissant le niveau de l'eau à tout moment grâce à la sonde Baumer (h_{Baumer}), il est possible de connaître la hauteur du profil qui n'a pas été mesurée ($h_{Baumer} - h_{UVP}$). Sur toute la hauteur qui n'a pas été mesurée par la sonde UVP, on considère une vitesse égale à la première vitesse mesurée par la sonde UVP. La figure 3.31 indique en rouge le profil de vitesse mesuré par la sonde UVP et en vert le profil extrapolé.

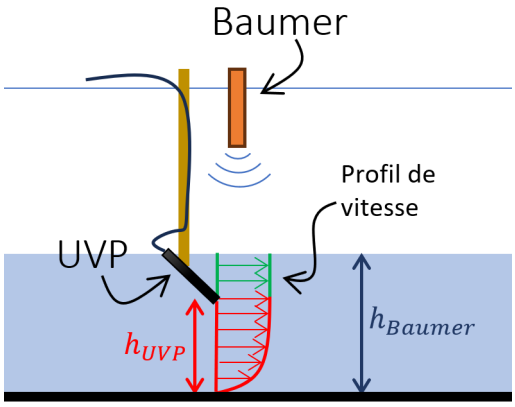


FIGURE 3.31 – Schéma de l'installation de la sonde Baumer et de la sonde UVP pour la mesure du débit. Le profil en rouge est le profil de vitesse mesuré par la sonde UVP et le profil en vert est celui extrapolé grâce aux données fournies par la sonde Baumer et la sonde UVP.

Les sondes Baumer fournissent une donnée par seconde tandis que les sondes UVP fournissent une donnée toutes les 59 ms. Pour aligner les résultats ensemble, un code Python a été développé. Ce code lit les données de la sonde Baumer dans un fichier `.res` et les classe dans une liste. Ensuite, le code lit toutes les données de la sonde UVP dans un fichier `.txt`. Il associe ensuite à chaque temps fourni par la Baumer le profil de vitesse le plus proche de ce temps. Le calcul suivant est ensuite fait pour trouver le débit à chaque seconde :

$$Q = \left(\sum^{n} v_n \Delta r + (h_{Baumer} - h_{UVP}) v_0 \right) \frac{L}{10^6} \quad [l/s] \tag{3.37}$$

Avec v_n la vitesse en un point n sur le profil de vitesse [mm/s], Δr la distance entre 2 données de vitesse [mm], v_0 la vitesse la plus proche de la sonde et L la largeur du canal [mm]. Le tout est divisé par 10^6 pour obtenir un résultat en l/s. L'intégration du profil de vitesse est donc une intégration par la méthode des rectangles.

Chapitre 4

Analyse des résultats

Dans ce chapitre, les résultats obtenus pour 4 configurations distinctes du canal vont être détaillés. Chaque configuration est associée à un niveau de lit de sédiments amont différent. Au cours de l'analyse de ces quatre configurations, les éléments suivants seront détaillés :

— La durée de l'expérience.
— Le passage de *pressure flushing* à *drawdown flushing*.
— L'évolution de la topographie pendant l'écoulement.
— Le bilan morphologique final.
— L'évolution de la concentration en sédiments.

Les résultats obtenus pour ces 4 cas de figure seront également comparés entre eux afin d'en tirer des conclusions.

Avant toute chose, la reproductibilité de la méthode expérimentale va être étudiée.

4.1 Reproductibilité

Dans le but de confirmer la fiabilité des résultats obtenus lors des expériences, il était nécessaire de tester à priori la reproductibilité d'une configuration et d'une mise en place spécifique des instruments de mesure. Plus précisément, l'intérêt était de vérifier si, en réalisant un nombre significatif d'expériences dans des conditions identiques avec les mêmes paramètres initiaux, il était possible d'obtenir des résultats similaires, permettant ainsi de s'assurer de la fiabilité des résultats futurs dans d'autres configurations. Par conséquent, une expérience préliminaire a été réalisée 7 fois afin de confirmer la reproductibilité de la méthode expérimentale.

Lors de ces 7 expériences préliminaires, la configuration suivante a été choisie (figure 4.1) :

- ➢ Sable uniquement à l'aval d'une épaisseur de 5.5 cm sur une longueur de 2.20 m. Cette longueur a été choisie car les effets de la chasse s'estompent environ 1.20 m après la porte de barrage et une longueur sécuritaire de 1 m a été ajoutée.
- ➢ Niveau d'eau initial à l'aval de 5.5 cm.
- ➢ Niveau d'eau initial à l'amont de 18 cm.

avec ce dispositif expérimental (figure 4.1) :

- ➢ Laser transversal au canal (voir figure 3.3) situé à 49 cm en aval de la porte du barrage.
- ➢ Une sonde Baumer située à 11 cm en amont de la porte du barrage.
- ➢ Une sonde Baumer située à 37 cm en aval de la porte du barrage.

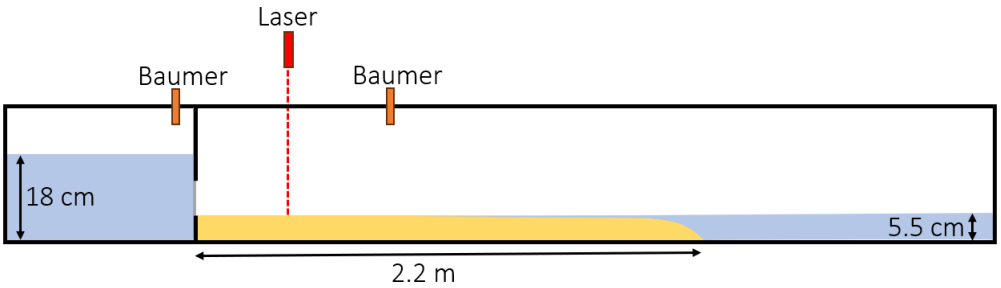


FIGURE 4.1 – Configuration du canal lors des essais de répétabilité.

La reproductibilité a été vérifiée par deux prises de mesure différentes détaillées par la suite. Ces trois prises de mesure permettent de vérifier la répétabilité sur 3 évolutions différentes en fonction du temps : l'évolution de la hauteur d'eau à l'amont, l'évolution de la hauteur d'eau à l'aval et l'évolution morphologique du lit aval.

4.1.1 Vérification de la reproductibilité par la hauteur d'eau à l'amont

Après avoir mené les 7 expériences, l'ensemble des résultats captés par la sonde Baumer située 11 cm en amont de la porte de barrage ont été rassemblés sur un même graphe, ce qui donne la figure 4.2. Dans un premier temps, une même allure générale peut être observée visuellement sur les 7 courbes.

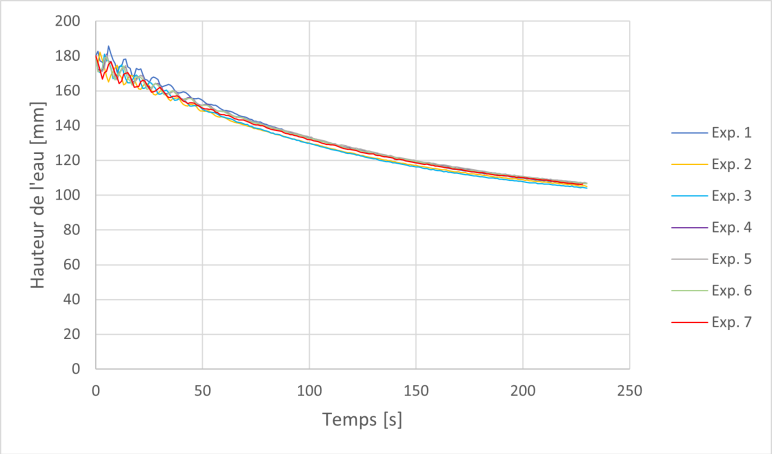


FIGURE 4.2 – Hauteur de l'eau en fonction du temps à 11 cm en amont de la porte du barrage pour 7 expériences différentes.

Dans un second temps, en comparant les écarts-types de la hauteur d'eau obtenue sur chaque courbe pour chaque seconde, la stabilité des mesures peut être évaluée, ce qui permet de s'assurer de la cohérence des résultats entre les différentes expériences. En effet, l'écart-type représente une mesure de dispersion qui évalue la variabilité des données par rapport à leur moyenne et estime dès lors la précision des mesures effectuées.

La formule de l'écart-type σ est donnée par :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n}} \tag{4.1}$$

Avec :

— n est le nombre d'expériences.

— x_i représente une valeur individuelle d'une expérience à un temps donné.

— $\bar{x}$ est la moyenne des valeurs.

Dans ce cas précis, l'écart-type moyen de la figure 4.3 s'élève à 1.68 mm, avec un maximum de 6.08 mm et un minimum de 0.95 mm. Ces valeurs sont tout à fait acceptables. Il est intéressant de noter que les écarts-types les plus élevés se produisent lors des 50 premières secondes, période pendant laquelle les vagues de retour, qui ne sont pas contrôlables, sont les plus importantes.

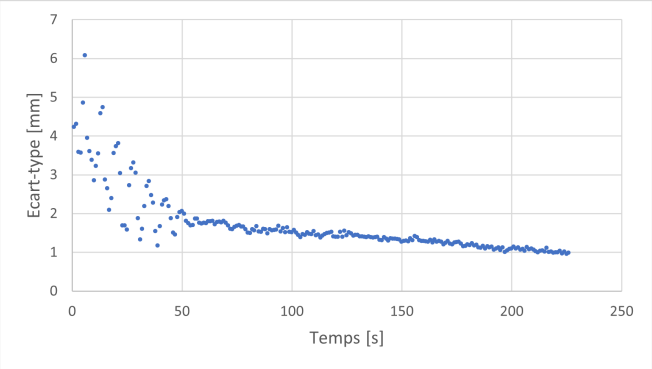


FIGURE 4.3 – Écart-type, mesuré en mm, de la hauteur de l'eau en fonction du temps à 10 cm en amont de la porte du barrage pour 7 expériences différentes.

Enfin, dans un troisième temps, l'écart-type relatif peut être calculé à chaque seconde (figure 4.4). Il représente une mesure de dispersion des résultats d'expériences par rapport à leur moyenne, ce qui permet de comparer la variabilité des résultats ayant des moyennes différentes. Plus il est petit, plus la dispersion par rapport à la moyenne est petite.

$$\sigma_{\text{relatif}} = \frac{\sigma}{\bar{x}} \tag{4.2}$$

Dans ce jeux d'expériences, l'écart-type relatif moyen est de 1.2%, avec un maximum de 3.4 % et un minimum de 0.7%. Une nouvelle fois, ces valeurs sont acceptables.

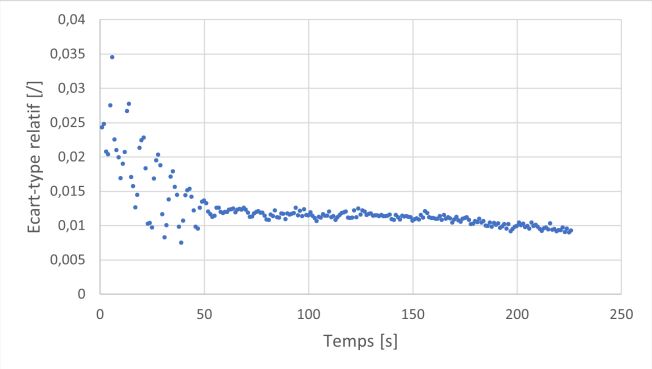


FIGURE 4.4 – Écart-type relatif de la hauteur de l'eau en fonction du temps à 10 cm en amont de la porte du barrage pour 7 expériences différentes.

Grâce à cette analyse, la reproductibilité des expériences en terme de hauteur de l'eau à l'amont en fonction du temps est bien vérifiée.

4.1.2 Vérification de la reproductibilité par la hauteur d'eau à l'aval

Le procédé développé dans la section 4.1.1 a été appliqué aux résultats obtenus par la sonde Baumer située 37 cm en aval de la porte de barrage (figure 4.5).

Dans cette situation, l'écart-type moyen est de 2.83 mm avec un maximum de 14.98 mm et un minimum de 0.59 mm. L'écart-type relatif moyen vaut quant à lui 3.1% avec un maximum de 17% et minimum de 0.7%. Ces valeurs restent tolérables et témoignent d'une bonne reproductibilité des expériences en terme de hauteur d'eau à l'aval en fonction du temps.

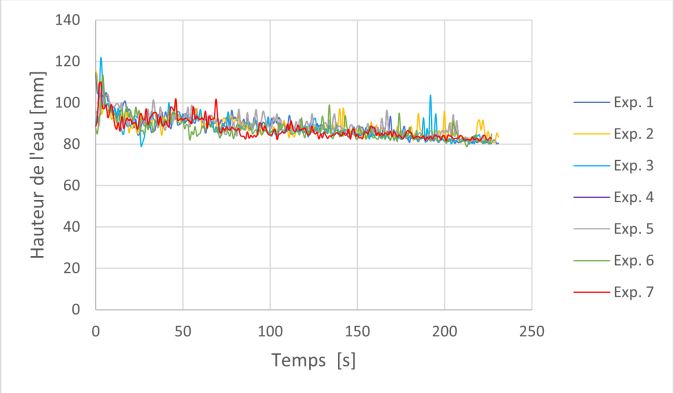


FIGURE 4.5 – Hauteur de l'eau en fonction du temps à 37 cm en aval de la porte du barrage pour 7 expériences différentes.

4.1.3 Vérification de la reproductibilité par l'évolution morphologique du lit aval

Une troisième façon de vérifier la reproductibilité de cette méthode expérimentale est de comparer la morphologie du lit aval, mesurée transversalement, à un temps précis pour les 7 expériences. Dans ce cas-ci, le laser se situe à 49 cm en aval de la porte de barrage et donne le graphe de la figure 4.6 après 74 secondes d'expérience.

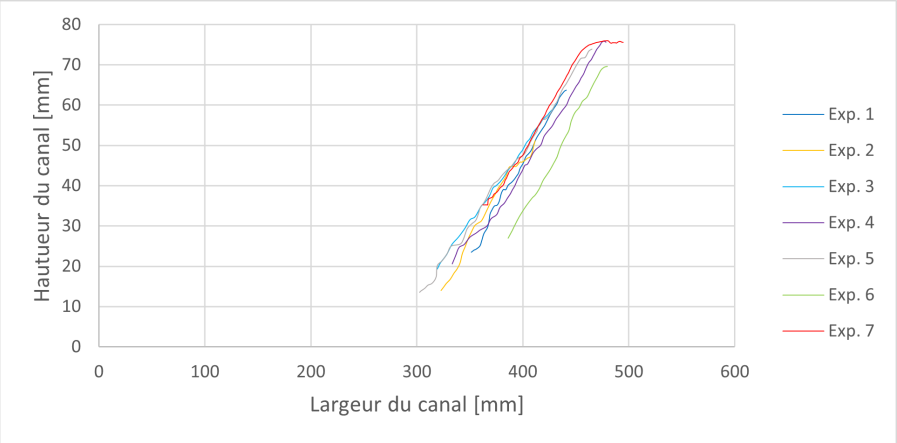


FIGURE 4.6 – Morphologie transversale du lit à 49 cm en aval de la porte du barrage après 74 secondes d'expérience pour les 7 expériences menées.

De prime abord, 6 courbes sur les 7 sont assez similaires, la seule courbe différant étant celle de l'expérience 6. Afin de savoir si les résultats d'une expérience entraînent son rejet ou non, un critère doit être posé. Pour savoir comparer les courbes de manière pertinente, une section de la largeur du canal où toutes les courbes sont présentes a été étudiée (figure 4.7). Celle ci est comprise entre 38.6 cm et 41 cm. Par interpolation, les courbes ont été discrétisées et projetées sur un ensemble d'abscisses identiques pour toutes les expériences, et ce afin de pouvoir étudier l'écart-type et poser le critère d'exclusion.

Pour chaque abscisse, une moyenne du talus du lit aval est calculée ainsi qu'un écart-type. Si les valeurs d'une courbe sont éloignées de plus de 2 fois l'écart-type de la moyenne, cette courbe est rejetée. Le tableau de la figure 4.8 reprend toutes ces valeurs. Les valeurs en rouge sont celles hors de la fenêtre acceptable. C'est donc de cette manière que l'expérience 6 peut être rejetée. Sur 7 expériences menées, une seule fait défaut selon ce critère, ce qui témoigne de la bonne reproductibilité du dispositif expérimental mis en place.

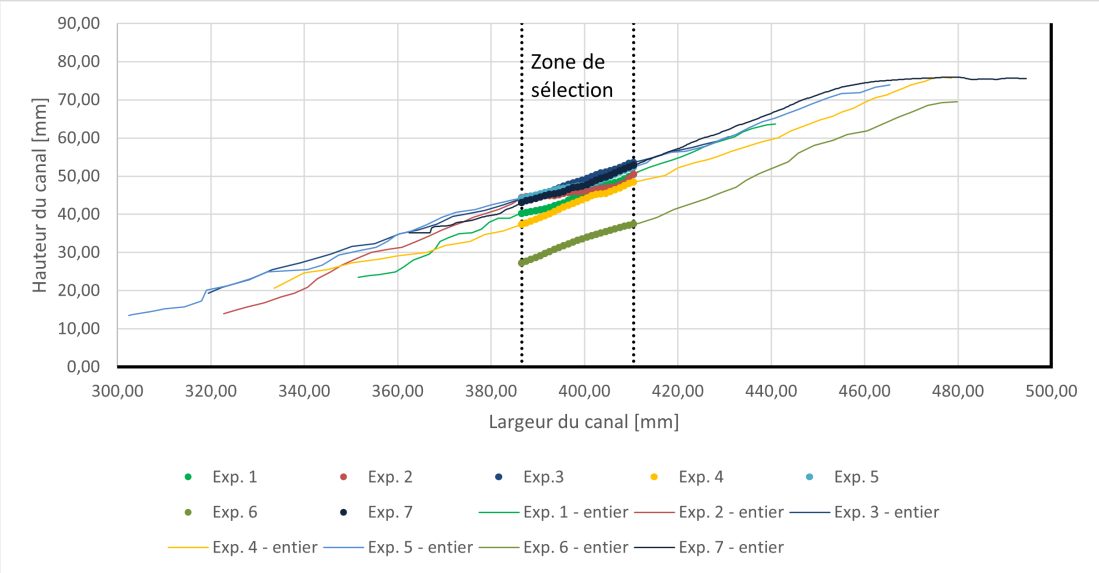


FIGURE 4.7 – Courbes des pentes de talus des différentes expériences menées pour la répétabilité. La zone entre tirets correspond à la section où toutes les courbes sont présentes. Les courbes en continu sont les courbes d'origine et les courbes entre les tirets en gros points représentent les interpolations faites tous les millimètres.

Position	Exp_1	Exp_2	Exp_3	Exp_4	Exp_5	Exp_6	Exp_7	Moyenne	Ecart type	borne inf	borne sup
386,56	40,16	44,31	44,07	37,32	44,21	27,16	43,05	40,04	6,25	27,54	52,54
387,56	40,42	44,63	44,36	37,70	44,44	27,65	43,56	40,39	6,19	28,01	52,77
388,56	40,63	44,69	44,65	38,12	44,68	28,13	43,82	40,68	6,08	28,52	52,83
389,56	40,86	44,76	44,94	38,64	44,95	28,62	44,10	40,98	5,97	29,05	52,91
390,56	41,15	44,82	45,22	39,13	45,29	29,15	44,43	41,31	5,86	29,59	53,03
391,56	41,44	44,84	45,51	39,57	45,63	29,69	44,85	41,65	5,75	30,14	53,15
392,56	41,79	44,84	45,93	40,01	45,96	30,23	45,17	41,99	5,65	30,68	53,30
393,56	42,18	44,85	46,41	40,61	46,30	30,75	45,36	42,35	5,55	31,25	53,45
394,56	42,57	45,13	46,88	41,22	46,63	31,24	45,55	42,75	5,48	31,78	53,71
395,56	42,95	45,41	47,36	41,81	46,80	31,74	45,85	43,13	5,41	32,32	53,95
396,56	43,62	45,70	47,79	42,30	46,96	32,23	46,50	43,59	5,36	32,86	54,31
397,56	44,37	45,86	48,14	42,78	47,12	32,67	46,92	43,98	5,30	33,37	54,59
398,56	44,80	45,86	48,49	43,26	47,29	33,10	47,15	44,28	5,23	33,83	54,73
399,56	45,24	45,94	48,85	43,73	47,45	33,52	47,39	44,59	5,16	34,27	54,90
400,56	45,70	46,11	49,32	44,27	47,61	33,94	47,75	44,96	5,12	34,71	55,21
401,56	46,37	46,29	49,81	44,83	47,99	34,33	48,31	45,42	5,15	35,12	55,72
402,56	47,04	46,49	50,31	45,15	48,42	34,73	48,92	45,87	5,20	35,47	56,26
403,56	47,39	46,71	50,77	45,27	48,85	35,12	49,34	46,21	5,21	35,78	56,63
404,56	47,68	46,91	51,08	45,46	49,31	35,47	49,73	46,52	5,22	36,07	56,97
405,56	47,99	47,02	51,40	45,91	49,90	35,81	50,22	46,89	5,25	36,39	57,39
406,56	48,33	47,13	51,71	46,36	50,49	36,15	50,83	47,29	5,30	36,69	57,88
407,56	48,66	47,64	52,23	46,91	51,01	36,50	51,35	47,76	5,35	37,06	58,46
408,56	49,23	48,19	52,76	47,46	51,48	36,84	51,86	48,26	5,41	37,44	59,07
409,56	49,79	49,37	53,27	48,01	51,95	37,13	52,30	48,83	5,48	37,87	59,80
410,56	50,42	50,38	53,58	48,39	52,39	37,39	52,79	49,34	5,56	38,23	60,45

FIGURE 4.8 – Valeur de la position du talus pour chaque expérience en mm. Les valeurs en rouge sont celles hors de l'intervalle acceptable.

4.1.4 Conclusion de la reproductibilité

Pour conclure, les méthodes mises en œuvre pour la réalisation des expériences ont globalement montré leur efficacité et leur faisabilité, ce qui permet d'envisager la reproductibilité du processus dans une certaine mesure. Plus tard, certains aspects à caractère aléatoire seront relevés et les variabilités entre expériences seront expliquées. Il est important de noter que l'expérience 6, par exemple, n'a pas produit des résultats convaincants selon l'évolution morphologique du lit aval lors de la vérification de la reproductibilité. Malgré ces considérations, cette section confirme que l'approche méthodologique mise en place (voir annexe 7.3) offre une fiabilité suffisante que pour pouvoir être étudiée.

4.2 Expériences menées

Afin d'observer l'impact morphologique aval d'une chasse de barrage, 4 configurations différentes ont été analysées. Elle se distinguent par des hauteurs initiales du lit de sédiments en amont différentes.

Pour chaque configuration expérimentale, plusieurs paramètres ont été observés et analysés :

— Sa durée.
— Son passage de *pressure flushing* à *drawdown flushing*.
— L'évolution de sa topographie aval pendant l'écoulement.
— Son bilan morphologique final.
— L'évolution de sa concentration en sédiments.

De cette manière, il est possible de se rendre compte de l'impact de la hauteur du lit de sédiments initial à l'amont sur ces différents paramètres.

Une fois que chaque configuration sera passée en revue, une comparaison générale sera réalisée.

4.2.1 Configuration 1

Dans cette première configuration, sans sable à l'amont, l'objectif est de décrire l'impact aval du relâchement d'une quantité importante d'eau. Il s'agit ici de regarder principalement l'érosion aval causée par l'eau lors d'une chasse. Il est également intéressant d'observer les zones où les sédiments érodés vont se déposer. Cette configuration est disposée comme indiqué sur la figure 4.9 en situation initiale, avec un lit aval sur une longueur de 2.20 m.

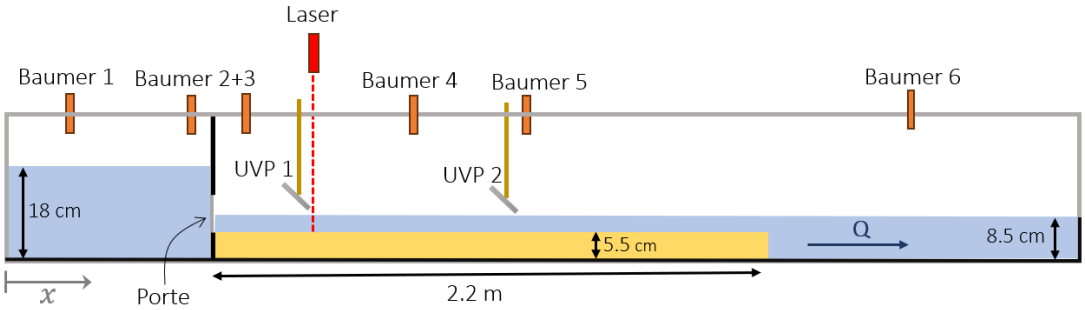


FIGURE 4.9 – Configuration avant l'ouverture de la porte avec la position des appareils de mesure.

Les positions des différents appareils de mesure sont repris dans le tableau 4.1. Toutes les mesures sont prises depuis le début du réservoir, selon l'axe x. L'ensemble des sondes Baumer et UVP sont sur l'axe de symétrie longitudinal du canal.

Porte	Baumer						UVP 1	UVP 2	Laser
	1	2	3	4	5	6			
2.14	1.72	2.03	2.45	3.12	3.72	6.08	2.28	3.61	2.28

TABLE 4.1 – Tableau reprenant l'emplacement des différents appareils de mesure (en mètre) par rapport à l'axe des x.

Les positions des appareils de mesure resteront les mêmes dans les 3 configurations qui suivront.

L'ensemble des données qui seront analysées se basent sur les résultats collectés par les différents appareils de mesure lors d'une seule expérience. Sur les 3 expériences menées avec cette configuration, le choix s'est porté sur l'expérience ayant les résultats les plus proches de la moyenne.

Durée de l'expérience

Avec cette configuration, il a clairement été observé que les 50 premiers centimètres à l'aval de la porte subissent une érosion considérable assez rapidement. Cette érosion s'interrompt à un certain moment, laissant place à une situation stable d'après les divers instruments de mesure et d'après une analyse visuelle. Par conséquent, le débit a été interrompu après 300 secondes. Cela a permis de vider le canal de son eau et de réaliser la photogrammétrie. Les différentes mesures prises attestant de cette stabilité sont présentées ci-dessous :

➢ Stabilisation du débit :
Pour mesurer le débit, la technique développée dans la section 3.5.2 est utilisée avec la sonde UVP 2 et la sonde Baumer 5 (figure 4.9). Les débits de 3 différentes expériences ont été mesurés et ils sont affichés sur la figure 4.10.

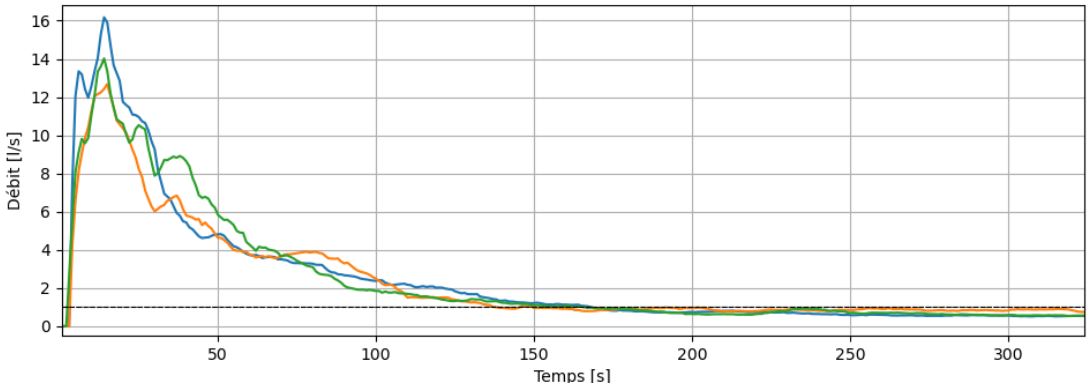


FIGURE 4.10 – Débit mesuré à 1.47 m à l'aval de la porte sur 3 expériences différentes. L'ouverture de la porte se fait au temps t=0 s.

On peut observer qu'au bout de 300 secondes, le débit se stabilise et atteint le débit de régime venant de l'amont, soit 1 l/s. En réalité, le débit affiché est légèrement inférieur à 1 l/s et cela peut s'expliquer par les hypothèses faites dans la méthode expliquée en section 3.5.2. Ce graphique représente également l'hydrogramme de la configuration 1.

➢ Stabilisation du niveau de l'eau :

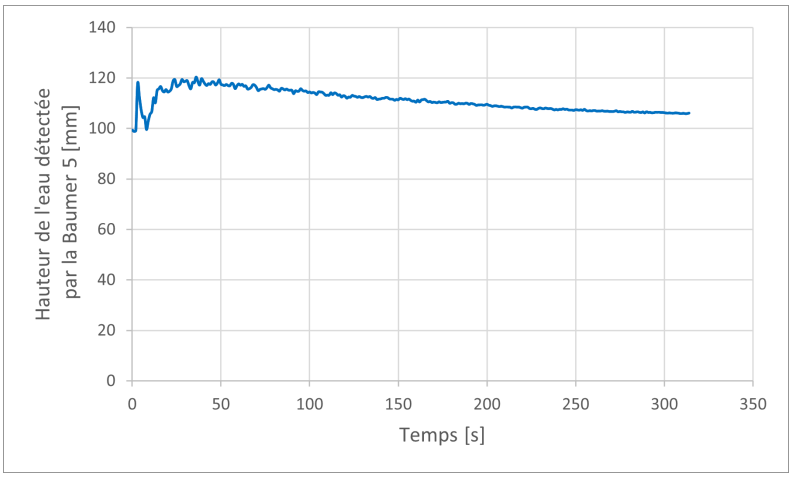


FIGURE 4.11 – Hauteur de l'eau en fonction du temps captée par la Baumer 5. Il s'agit donc de la hauteur d'eau 158 cm en aval de la porte de barrage.

Comme le montre la figure 4.11, après 300 secondes d'expérience, la hauteur d'eau captée par la Baumer 5 s'établit à 112.8 mm. Après 300 secondes, cette valeur se stabilise et n'évolue plus de manière significative par la suite.

Passage de *pressure flushing* à *drawdown flushing*

Comme indiqué sur la figure 4.9, en raison de la structure de la porte de barrage, il n'était pas possible de placer une sonde Baumer directement au droit de cette porte de barrage. Par conséquent, aucune sonde ne pouvait témoigner du passage de la hauteur d'eau à l'amont sous les 12.5 cm, marquant le changement du *pressure flushing* au *drawdown flushing*. Pour pallier à cela, une alternative a été mise en place en plaçant une sonde Baumer au plus proche de la porte, à savoir 11 cm en amont de celle-ci. En observant et en filmant plusieurs fois le moment où la hauteur d'eau passait sous les 12.5 cm au niveau de la porte, le temps d'expérience écoulé était systématiquement de 150 secondes. Ce temps a été comparé aux valeurs fournies par la Baumer 2, et il a été remarqué que pour chaque expérience, la Baumer 2 affichait une hauteur de 12.9 cm à 150 secondes. Cette sonde a ainsi été utilisée comme repère, indiquant que le passage en *drawdown flushing* était atteint une fois que son signal renvoyait une hauteur de 12.9 cm.

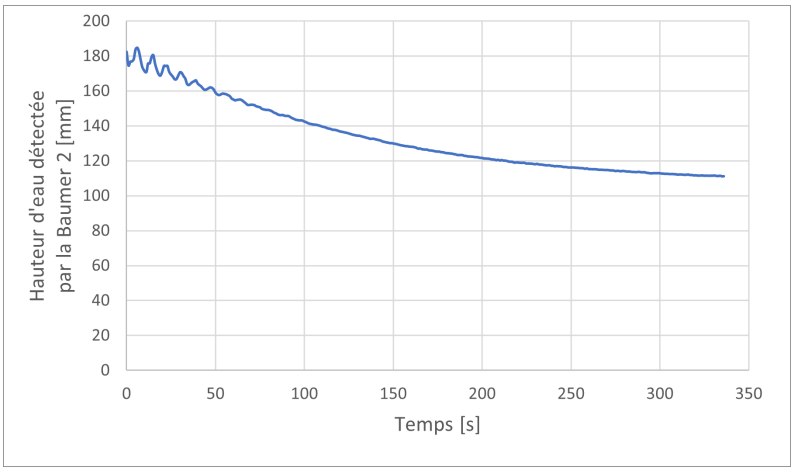


FIGURE 4.12 – Hauteur de l'eau en fonction du temps captée par la Baumer 2. Il s'agit donc de la hauteur d'eau à 11 cm en amont de la porte de barrage.

Comme expliqué dans le chapitre 1, le passage à l'étape de *drawdown flushing* se caractérise par une hauteur d'eau très faible qui permet une érosion très importante du sable à l'amont. Le sable érodé est ensuite transporté vers l'aval, provoquant un dépôt de sédiments sur le lit en aval. Cependant, dans cette première configuration,

le fait qu'il n'y ait pas de sable en amont signifie que le processus de *drawdown flushing* n'a aucune influence sur l'aval.

Évolution de la topographie pendant l'écoulement

L'érosion du lit aval se voit dans un premier temps à l'aide de la technique de la feuille laser LPT transversale à 14 cm en aval de la porte de barrage. La figure 4.13 témoigne de cette érosion progressive qui influence le lit aval. Après 22 secondes d'expérience, l'eau, qui n'est initialement pas chargée en sédiment étant donné qu'il n'y a pas de sédiments à l'amont, érode de manière significative le lit aval et se charge en sédiments. Cette érosion se poursuit pendant 68 secondes supplémentaires pour atteindre les 90 secondes d'expérience. Une fois ce stade atteint, l'érosion se stabilise et ne se développe plus de manière significative sur le reste de l'expérience. Des valeurs chiffrées sur l'érosion et le dépôt totaux seront apportées dans la section 4.2.1 grâce au logiciel Metashape.

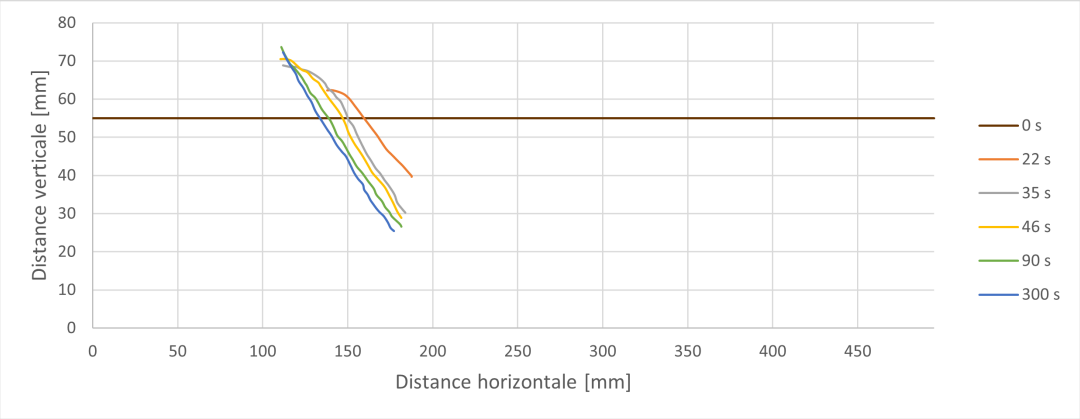


FIGURE 4.13 – Évolution morphologique transversale du lit aval au cours du temps. Les abscisses correspondent à la position sur la largeur du canal.

Ces analyses visuelles portées sur la figure 4.13 peuvent être confirmées en se penchant sur l'analyse de la pente des talus de sédiments. Pour chacune des 6 courbes, une pente approchée a été obtenue en lui ajustant une courbe de tendance linéaire. Les valeurs des pentes approchées pour chaque courbe sont disponibles dans le tableau 4.2 suivant. Il est important de noter que chaque courbe s'arrondit près du bord du canal, ce qui influence la pente de chaque courbe de tendance linéaire.

	Pente de la courbe de tendance associée au lit de sédiments [/]	Angle du talus de sédiments [°]
0 sec	0	0
22 sec	0.506	26.8
35 sec	0.605	31.2
46 sec	0.633	32.3
90 sec	0.674	34
300 sec	0.725	35.9

TABLE 4.2 – Pente de la courbe de tendance associée au lit de sédiments mesurée à différents moments de l'expérience.

Après 90 secondes, l'angle du talus atteint 34°. Au bout de 300 secondes, elle augmente légèrement pour atteindre 35.9°. Cela signifie qu'en 210 secondes à partir de 90 secondes, la pente n'augmente que de 1.9°. Le talus commence donc à se stabiliser une fois les 90 secondes d'expérience atteintes et ne continue à s'éroder que partiellement. Il est toutefois important de remarquer que bien que la pente augmente, c'est avant tout le talus qui se déplace vers la gauche du graphe. La figure 4.14 permet de voir l'évolution de la pente du talus en fonction du temps.

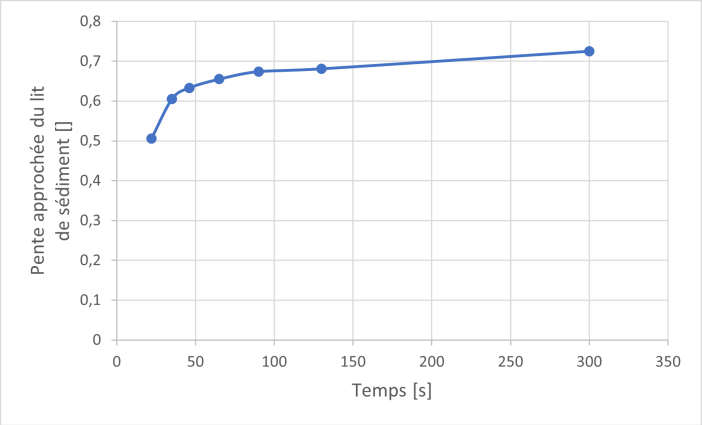


FIGURE 4.14 – Pente de la courbe de tendance approchant le lit de sédiments en fonction du temps.

Dans le cas d'un sable sec, un talus de sédiments présente généralement un angle de stabilité d'environ 30-35 degrés. Cependant, lorsqu'il est dans un écoulement, la situation diffère. L'angle de stabilité immergé, c'est-à-dire l'angle de stabilité d'un talus sous l'eau, dépend de diverses conditions telles que la hauteur d'eau, la vitesse de l'écoulement, le diamètre et la forme des grains, ainsi que le taux de compaction.

En raison de cette complexité, il n'est pas évident de calculer cet angle à l'avance de manière précise. L'angle de stabilité immergé ne peut pas être calculé par les modèles théoriques, et même les modèles numériques qui peuvent estimer l'évolution de cet angle ne garantissent pas toujours leur exactitude [Al-Hashemi and Al-Amoudi, 2018] [Meurice and Soares-Frazão, 2023]. Ainsi, les données présentées dans le tableau 4.2 seront intéressantes pour confirmer l'évolution prévue de l'angle de talus fournie par des modèles numériques reproduisant ces conditions d'écoulement.

Bilan morphologique final

Il est possible d'étudier le bilan global de sédiments érodés et déposés au cours de l'expérience à l'aide de la photogrammétrie. Celle-ci permet d'observer d'une part la zone d'érosion et d'autre part, la zone de dépôt. Ces deux zones sont observables sur la figure 4.15. Le lit initial était situé à 5.5 cm de haut, l'échelle de couleur permet de discerner les zones sujettes à de l'érosion et celles sujettes à du dépôt.

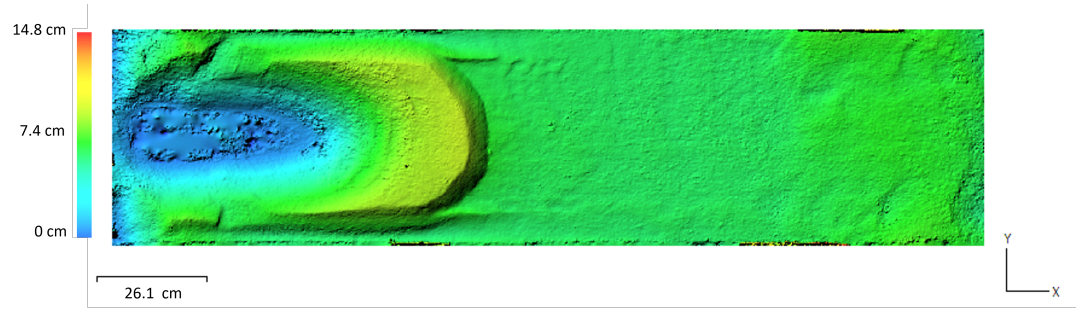


FIGURE 4.15 – Relevé topographique du lit à l'aval de la porte après l'ouverture. La porte se situe sur la gauche de la photo et le sens du débit est dirigé vers la droite.

Grâce au programme Metashape, il est possible de calculer le volume de sédiments érodés et le volume de sédiments qui s'est déposé plus en aval sur la durée totale de l'expérience. La figure 4.16 indique la zone dans laquelle les mesures de volume ont été faites. Cette zone représente le plus gros du dépôt de sédiments, mais le résultat du calcul de volume montrera qu'une grande partie des sédiments sont envoyés encore plus à l'aval.

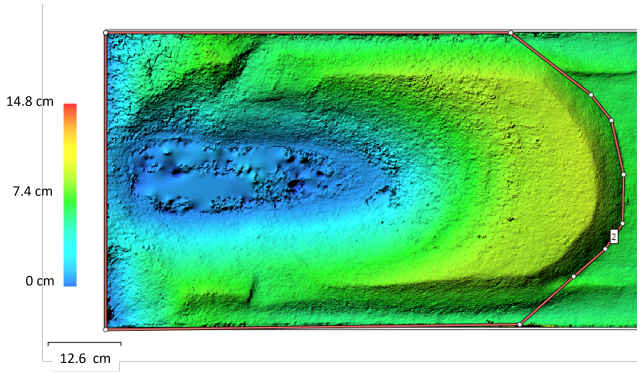


FIGURE 4.16 – Zone principale d'érosion et de dépôt de sédiments entourée en rouge.

Le logiciel Metashape effectue un calcul qui permet de déterminer deux volumes distincts. En spécifiant un niveau à partir duquel le calcul du volume doit être réalisé, Metashape fournit d'une part le volume situé au-dessus de ce niveau et d'autre part, le volume du vide en-dessous de ce niveau, comme indiqué sur la figure 4.17. Dans le cas présent, le niveau a été choisi à 5.5 cm car ce niveau représente le niveau initial du lit de sable à l'aval.

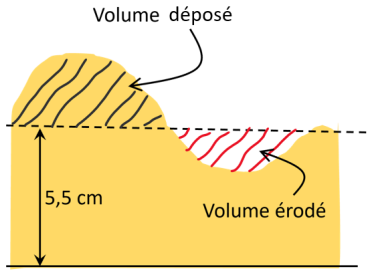


FIGURE 4.17 – Schéma du calcul de volume fourni par Metashape.

Le calcul de volume donne un volume érodé de 6.883 dm^3 tandis que le volume déposé au dessus du niveau de 5.5 cm est égal à 3.617 dm^3. On peut donc conclure que 3.267 dm^3 sont partis à l'aval de la zone entourée en rouge sur la figure 4.16, soit environ 50%.

Le volume total de sédiments sur une longueur de 2 mètres a également été calculé. Avant l'expérience, le volume de sable était de 0.055 m^3 (longueur = 2 m, largeur = 0.5 m et hauteur = 0.055 m). Après l'expérience, le volume mesuré est de 0.0527 m^3, ce qui indique que 0.0023 m^3 de sable ont été déplacé au-delà des 2 mètres après la porte. Ce volume équivaut à 4% du volume total de sable, ce qui nous conduit à conclure que la majeure partie du déplacement du lit se produit dans les deux premiers mètres du canal.

Évolution de la concentration en sédiments

La figure 4.14 montre clairement que le principal de l'érosion se produit durant les premières 30 secondes. Ce phénomène est également visible lorsque l'on récupère les valeurs des tensions d'échos de la sonde UVP numéro 1 située à 14 cm à l'aval de la porte. Pour ce faire, la valeur de l'écho est prise sur chaque échantillon temporel à 3.5 cm de la sonde et cet écho est tracé en fonction du temps sur la figure 4.18. La sonde est positionnée à 9.5 cm au-dessus du sol du canal. Le point de mesure à 3.5 cm de la sonde correspond ainsi à une distance de 6 cm par rapport au plancher du canal. Cette valeur a été choisie comme représentative de la situation car elle se trouve entre la hauteur initiale du lit de sable et la hauteur d'eau initiale.

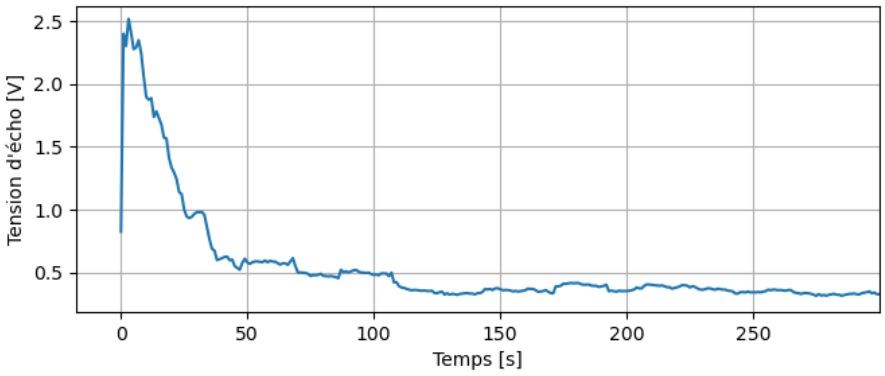


FIGURE 4.18 – Valeur de l'écho de retour à 6 cm au dessus du plancher du canal. Mesure prise avec la sonde située à 14 cm à l'aval de la porte. Ce graphe montre la forte concentration en sédiment en suspension lors des premières 50 secondes.

L'utilisation de l'écho de retour de l'onde permet également de trouver à quel moment le fond du canal est atteint. En effet, en retraçant le profil de l'écho, il est possible de trouver à quelle distance se trouve un obstacle. L'onde envoie un pic d'intensité lorsqu'elle percute un obstacle solide, à savoir le lit du canal. La figure 4.19 montre au point 1 en bleu un pic à 40 mm à la verticale de la sonde au temps $t = 0s$, ce qui correspond à une hauteur de lit de 55 mm (pour rappel, la sonde se trouve à 95 mm au dessus du fond du canal), ce qui est logique étant donné que c'est la hauteur du lit initialement installée dans le canal. Un pic est également observable au point 2. Il correspond au temps $t = 4s$ après l'ouverture de la porte. Ce pic indique un lit à 50 mm de la sonde, soit un lit de sable d'une épaisseur de 45 mm. Le point 3 en vert indique un pic à 95 mm de la sonde au bout de 8 secondes. Ceci correspond au fond du canal. Il faut noter que, le signal étant assez bruyant, certains échantillons n'indiquent pas clairement un pic cohérent. Ce bruit provient du fait qu'en début d'expérience, les grandes turbulences créent des bulles d'air

dans l'eau et la sonde envoie donc des pics importants et non pertinents. Après avoir étudié différents profils d'échos, ceux représentés sur la figures 4.19 sont ceux avec lesquels cette recherche a été faite. Il a été conclu que le lit est érodé jusqu'au fond du canal entre la 4ème et la 8ème seconde.

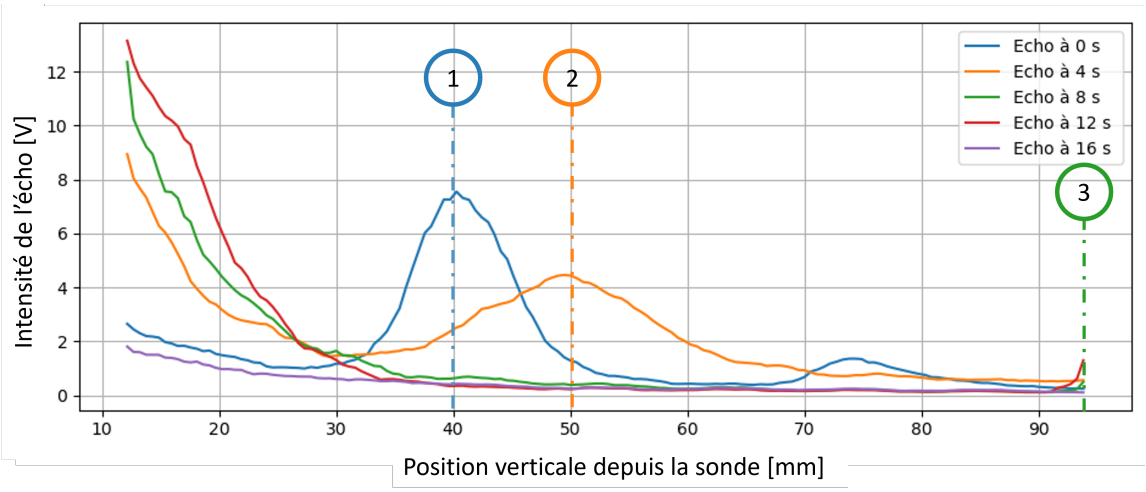


FIGURE 4.19 – Évolution de la hauteur du lit de sédiments par la lecture des pics d'écho renvoyés à différents temps.

Afin de pouvoir exploiter le signal reçu par la sonde, les deux méthodes présentées en section 3.4.3 vont être étudiées et leurs forces et faiblesses y seront présentées.

➢ Mesure de concentration par la méthode explicite :

Comme expliqué dans la section 3.4.3, cette méthode regroupe 2 techniques : la technique de comptage des particules avec la feuille laser et la technique qui prend en compte l'atténuation des ondes dans l'eau en fonction des particules. Pour mesurer la concentration initiale, une fenêtre est choisie juste à la sortie de la sonde. Cette concentration fera office de point de départ pour pouvoir dessiner les profils à l'aide du signal reçu par la sonde. La fenêtre sélectionnée est visible sur la figure 4.20. Elle se situe entre un niveau de 6.7 cm et 9 cm afin de prendre un échantillon juste en dessous de la sonde UVP et au dessus du lit initial. La fenêtre, avec une épaisseur de 1.5 mm, représente un volume de 7.5 cm^3.

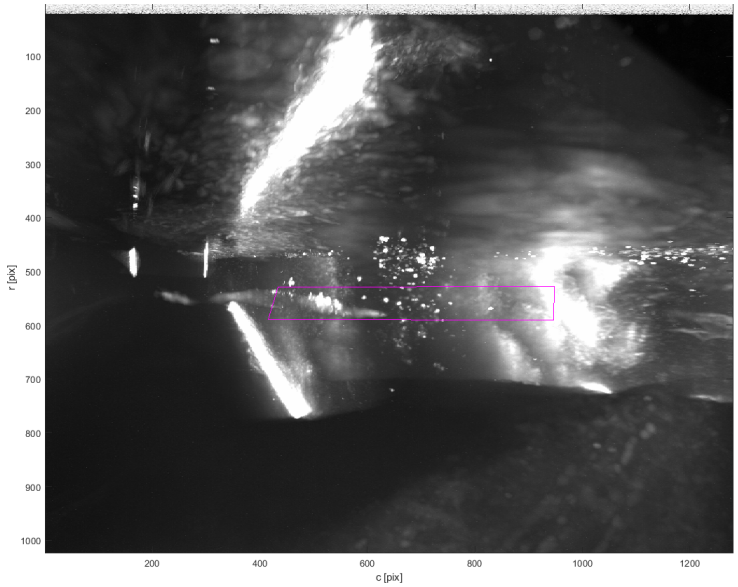


FIGURE 4.20 – Fenêtre en mauve représentant la zone où les sédiments sont comptés.

Pour chaque seconde, en connaissant la masse volumique du sable, le nombre de particules et le volume dans lequel ces particules sont comptées, le calcul de la concentration en g/l peut être effectué. Sans sable à l'amont, l'évolution de la concentration en g/l dans la fenêtre est indiquée sur le graphe 4.21.

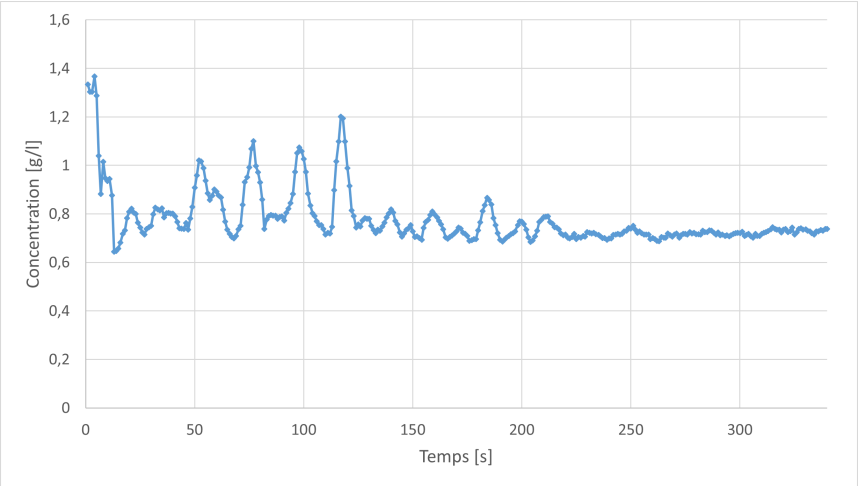


FIGURE 4.21 – Évolution temporelle de la concentration en g/l dans la fenêtre.

Il est important de noter que les 20 premières secondes sont peu fiables. En effet, il y a d'une part une trop grande turbidité dans l'eau, ce qui engendre

une visibilité plus faible pour la caméra. D'autre part, le phénomène de vague d'intumescence provoque parfois une baisse du niveau de l'eau, ce qui empêche la caméra d'observer les particules dans l'eau. Un phénomène intéressant est également observé et visible sur la figure 4.21. Certains pics ponctuels apparaissent, les plus importants sont situés à 52 s, 76 s, 98 s et 117 s. Ces pics représentent en réalité un effondrement des talus formés par l'érosion et ceci engendre une augmentation de la concentration. Afin de mieux comprendre ce phénomène d'effondrement des talus, la figure 4.22 regroupe 6 images prises de 115 à 120 secondes. On peut clairement observer une grande turbidité à partir de 117 secondes au point que la ligne du laser sur le lit du canal n'est plus nettement visible. Ce phénomène est beaucoup moins observable avec la sonde UVP. En effet, la sonde prend des mesures au milieu du canal et les effondrements se produisent sur les bords. Il est également intéressant d'observer que ce phénomène s'atténue au cours du temps et qu'une certaine stabilité est atteinte après environ 200 secondes.

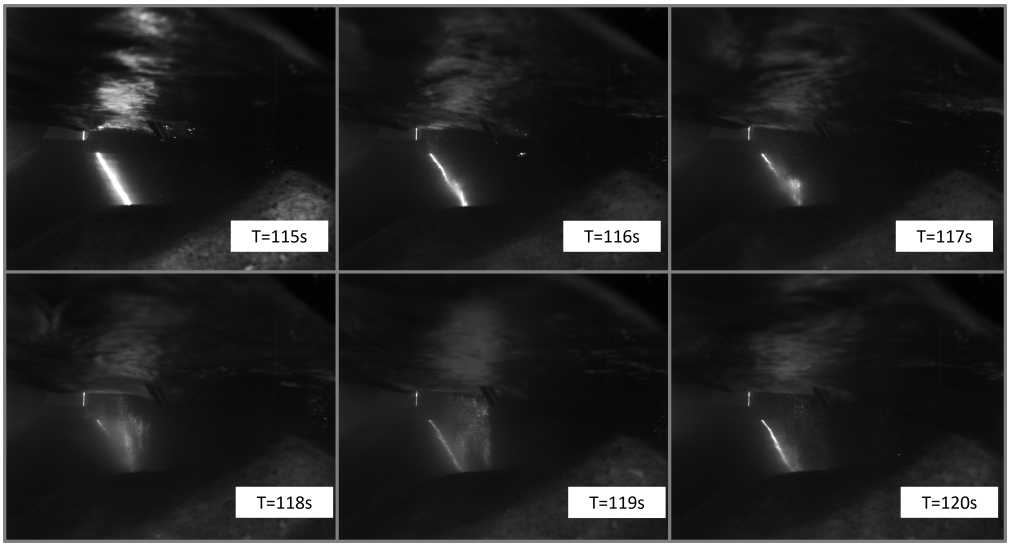


FIGURE 4.22 – Photos prises de 115 à 120 secondes montrant la présence intermittente d'amas de sédiments en suspension.

Ce phénomène d'effondrement, bien qu'intéressant, n'est pas très représentatif de la concentration au droit de la sonde UVP, or la méthode implicite a besoin d'une concentration initiale pour pouvoir tracer des profils de concentration. Sur la figure 4.20, la zone entourée en mauve s'étend jusqu'aux bords du talus mais c'est là que la plupart des sédiments y sont concentrés. La figure 4.23 montre la totalité des points où le programme a détecté une particule, et ce, cumulé sur toutes les photos prise durant toute l'expérience. Chaque particule

y est représentée par un point bleu. Cette image montre bien une répartition non homogène des sédiments sur la fenêtre avec une grande majorité des sédiments sur les bords.

FIGURE 4.23 – Répartition des sédiments détectés dans la fenêtre en mauve sur la figure 4.20 durant toute l'expérience. Chaque particule détectée est représentée par un point bleu.

Pour le calcul de la concentration initiale, il est donc plus pertinent de travailler sur une fenêtre plus petite et plus proche de la sonde. Cette fenêtre est visible sur la figure 4.24.

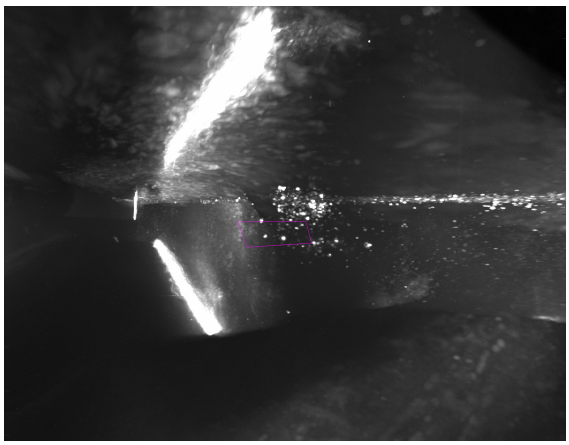


FIGURE 4.24 – Nouvelle fenêtre choisie pour le comptage des sédiments en suspension au droit de la sonde.

Cette nouvelle fenêtre donne une évolution de la concentration sur une zone plus petite (volume de 1.2 cm^3) et cette évolution est présentée sur la figure 4.25. On peut encore y observer les 4 pics précédemment mentionnés mais la concentration en générale est plus faible, ce qui indique que les effets sur les bords des talus ont un impact réduit.

Avec ces informations, il est possible de dessiner un profil de la concentration à l'aide des échos renvoyés par la sonde UVP. Sur la figure 4.26, 3 profils ont été tracés. Ces profils représentent les concentrations à 20 s, 140 s et 300 s. Comme mentionné plus haut, les sondes ne peuvent pas observer un changement de concentration lors d'un phénomène d'effondrement étant donné que ces sondes se trouvent au milieu du canal.

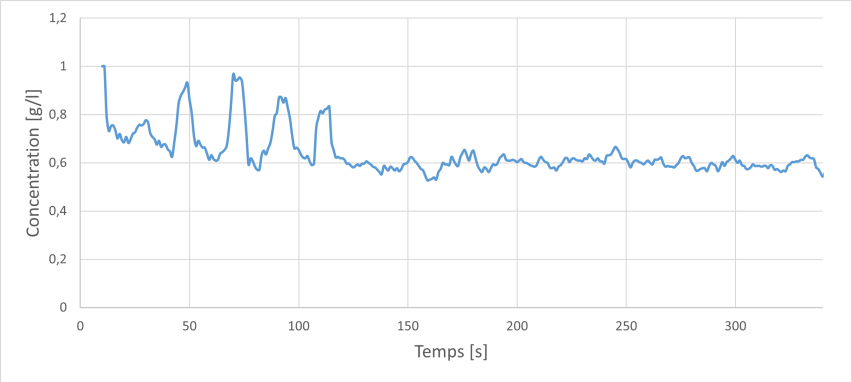


FIGURE 4.25 – Évolution de la concentration en sédiment sur la zone entourée en mauve dans la figure 4.24.

Le tableau 4.3 reprend les valeurs des concentrations initiales nécessaires pour la méthode explicite. Ces valeurs sont les concentrations juste à la sortie de la sonde.

Temps [s]	20	140	300
Concentration initiale [g/l]	0,81	0,62	0,61

TABLE 4.3 – Concentration initiales à 3 temps différents.

La figure 4.26 montre les profils de concentrations. La distance de 95 mm représente le fond du canal. On observe que la concentration au bout de 200 secondes reste très faible, ce qui est cohérent car la totalité du sable dans cette zone s'est déjà faite éroder et que le transport y est faible.

➢ Mesure de la concentration par la méthode implicite :

Cette méthode est expliquée dans la section 3.4.3 et elle permet théoriquement de trouver la concentration sans avoir besoin de mesures supplémentaires. Cette méthode est innovante et un travail plus profond pourrait être fait mais ça n'est pas l'objet principal de cette recherche. Cette méthode donne du moins une idée de l'évolution d'un point de vue qualitatif plus que quantitatif. Les résultats de la méthode implicite pour la configuration 1 sont visible sur la figure 4.27.

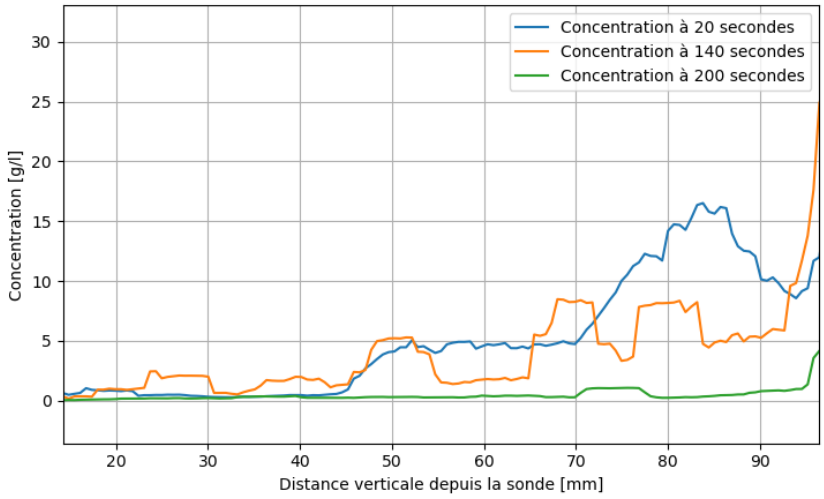


FIGURE 4.26 – 3 profils de concentration à 3 temps différents. La distance 95 mm représente le fond du canal.

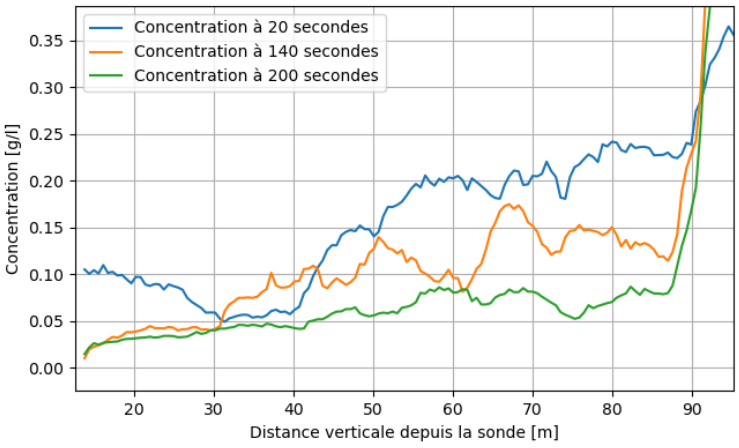


FIGURE 4.27 – Profil de la concentration en sédiment avec la méthode implicite sur 3 temps différents. Le fond du canal représente une distance de 95 mm par rapport à la sonde.

Sur la figure 4.27, on peut observer une augmentation brutale de la concentration sur les derniers millimètres. Ceci peut s'expliquer par 2 raisons. Premièrement, l'équation de la concentration en un point est inversement proportionnelle à la concentration intégrée avant ce point, c'est à dire que

plus la concentration initiale est faible, plus plus le pic de concentration final est important. Deuxièmement, une moyenne glissante a été appliquée sur la courbe afin d'atténuer le bruit du signal, c'est pourquoi la concentration est soudainement plus élevée sur la fin du signal. D'un point de vue qualitatif, cette technique a un certain potentiel, étant donné que les profils sont tout à fait cohérents. Malgré cela, une calibration plus précise des différents paramètres serait nécessaire afin de s'assurer de la fiabilité des valeurs de concentration renvoyées.

Conclusions de la configuration 1

L'objectif de cette configuration était principalement de voir l'évolution de l'érosion suite au relâchement d'une grande quantité d'eau. En conséquence de cette érosion du lit de sédiments, un dépôt se forme également en aval. Ces deux aspects sont très visibles et les points importants à identifier sont les suivants :

- L'érosion la plus importante se déroule durant les 20 premières secondes. Ce constat est confirmé par plusieurs analyses différentes. Premièrement, l'étude de la pente des talus. La figure 4.14 montre qu'à 22 secondes, le lit s'est creusé en créant une pente de talus avec un angle de 26.8°. Après une stabilisation des talus, ils forment un angle de 35.9°. Deuxièmement, l'analyse de l'évolution du niveau du lit sous la sonde UVP 1 indique également une importante dégradation assez rapide.
- Le sable érodé vient se déposer en grande partie sur les pourtours de la zone creusée (environ 50% du volume érodé) (figure 4.16). Ensuite, en soustrayant le volume de sable après expérience au volume de sable initial sur 2 mètres de long, on peut observer que seulement 4% du volume a été transporté au delà de ces 2 mètres.
- Une forte corrélation est observable entre l'érosion du lit et l'hydrogramme. En effet, l'hydrogramme (figure 4.10) montre un important débit sur les premières 30 secondes. De plus, la sonde UVP à 14 cm à l'aval de la porte indique, avec l'amplitude de l'écho, que l'érosion atteint le fond du canal avant les 8 premières secondes (figure 4.19).
- Un phénomène d'effondrement des talus est présent jusqu'à environ 200 secondes. Ce phénomène est ponctuel et son intensité est difficilement prévisible mais il engendre une augmentation importante de la concentration en sédiments dans l'eau, du moins aux alentours des talus.

4.2.2 Configuration 2

Après avoir étudié l'impact d'une ouverture de porte de barrage avec uniquement de l'eau à l'amont, il est intéressant d'étudier une chasse avec des sédiments à l'amont, ce qui est bien plus représentatif de la réalité. Dans la situation suivante, un banc de sable a été installé sur une longueur de 74 cm à l'amont de la porte et sur 12,5 cm de hauteur. Dans cette configuration, le sable arrive juste au dessus du niveau supérieur de la porte. Cette configuration est schématisée sur la figure 4.28.

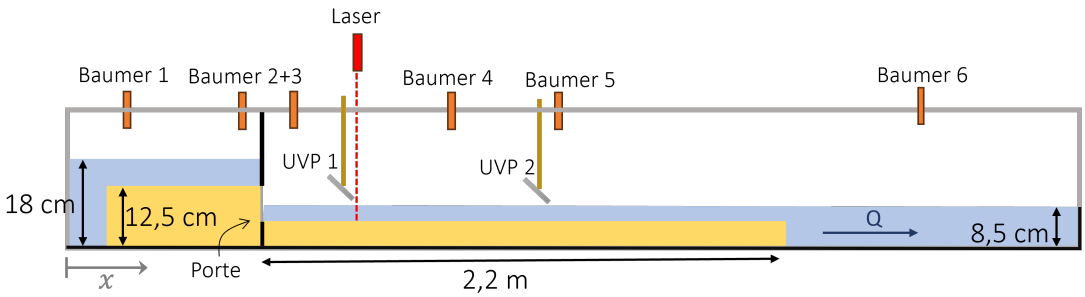


FIGURE 4.28 – Configuration avant l'ouverture de la porte avec la position des appareils de mesure.

Les positions des différents appareils de mesure sont identiques à la configuration 1 et sont repris dans le tableau 4.1. Toutes les mesures sont prises depuis le début du réservoir, selon l'axe x.

En présence de sable à l'amont, il s'est avéré difficile d'obtenir des résultats très similaires lors des trois expériences menées pour cette configuration. Ainsi, parmi les trois expériences réalisées, l'une a été sélectionnée comme expérience témoin en raison de ses résultats particulièrement intéressants. Les analyses présentées dans cette section sont donc basées sur les résultats de cette expérience témoin. Néanmoins, certains phénomènes sont récurrents sur toutes les expériences et ces récurrences seront abordées.

Durée de l'expérience

Comme pour la configuration 1, la durée de cette expérience a été étudiée. En effet, pour procéder à la photogrammétrie, le canal doit être vidé de son eau. Le choix du moment où arrêter la pompe et stopper le débit dans le canal s'est fait en analysant plusieurs données : la stabilisation du débit et la stabilisation du niveau de l'eau.

- ➢ Stabilisation du débit : La même technique utilisée dans la configuration 1 a été appliquée pour mesurer le débit. Pour 3 expériences faites, l'évolution des

débits se trouve sur la figure 4.29.

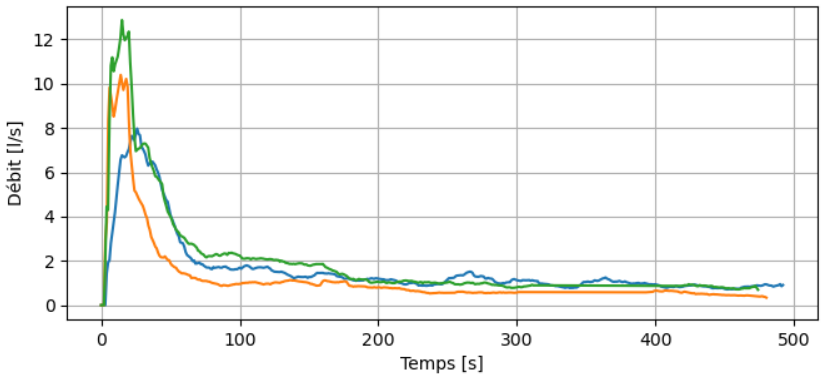


FIGURE 4.29 – Débit mesuré à 1,47 m à l'aval de la porte sur 3 expériences différentes. L'ouverture de la porte se fait au temps t=0 s.

Au bout de 8 minutes, soit 480 secondes, le débit est bien stable et la situation a atteint son régime de 1 l/s. Ce graphique fait office d'hydrogramme d'une chasse de barrage avec des sédiments à l'amont sur une hauteur de 12.5 cm.

➢ Stabilisation des niveaux de l'eau :

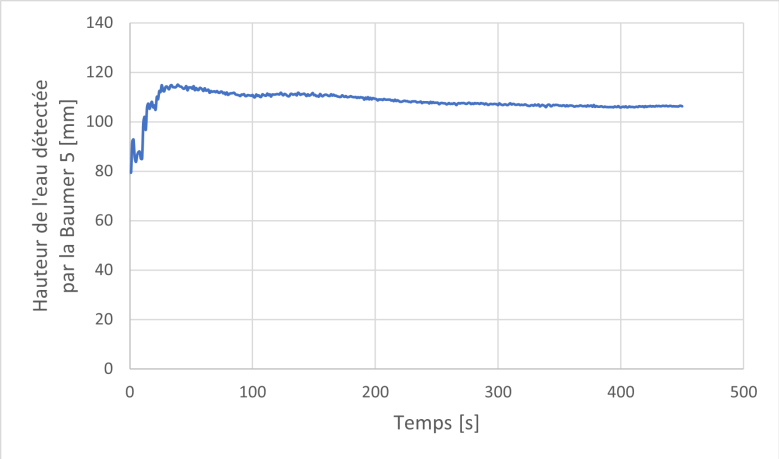


FIGURE 4.30 – Hauteur de l'eau en fonction du temps captée par la Baumer 5. Il s'agit donc de la hauteur d'eau 158 cm en aval de la porte de barrage.

Comme le montre la figure 4.30, après 480 secondes, la hauteur d'eau la plus basse est atteinte, elle est de 105.18 mm de haut et oscille très légèrement par la suite. Il est donc correct d'estimer que la hauteur d'eau se stabilise après 480 secondes d'expérience.

Passage de *pressure flushing* à *drawdown flushing*

Dans cette deuxième configuration, la détermination du moment où la chasse passe en *drawdown flushing* est faite de la même manière qu'avec la configuration 1. Le passage en *drawdown flushing* se passe ici après 150 secondes, quand la Baumer 2 indique une hauteur de 125.63 mm (figure 4.31).

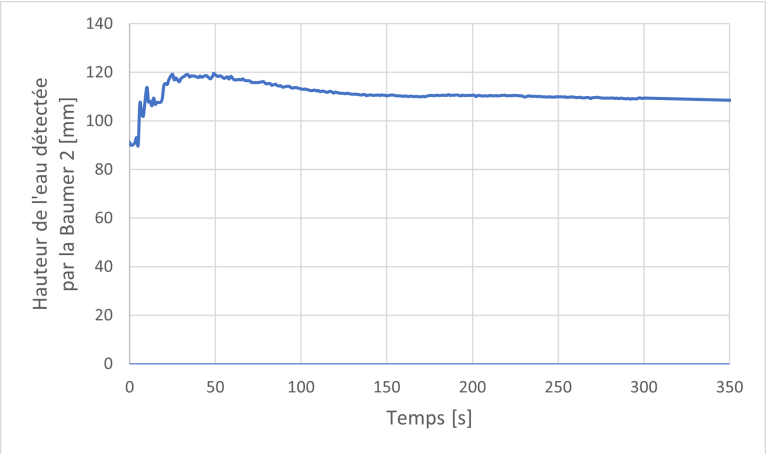


FIGURE 4.31 – Hauteur de l'eau en fonction du temps captée par la Baumer 2. Il s'agit de la hauteur d'eau à 11 cm en amont de la porte de barrage.

Comme expliqué dans le chapitre 1, le passage à l'étape de *drawdown flushing* se caractérise par une hauteur d'eau très faible qui permet une érosion très importante du sable à l'amont. Le sable érodé est ensuite transporté vers l'aval, provoquant un dépôt de sédiments sur le lit en aval. Il sera donc intéressant de regarder l'impact du passage en *drawdown flushing* sur l'évolution morphologique.

Cette influence de la diminution de la hauteur d'eau peut être expliquée par l'équation 4.3 de Meyer-Peter-Müller [Soares-Frazão, 2022a] :

$$q_* = 8(\tau_* - 0.047)^{3/2} \tag{4.3}$$

Dans cette équation, la capacité de transport adimensionnelle q_* dépend de la contrainte de cisaillement adimensionnelle $\tau*$. La contrainte de cisaillement τ est calculée comme suit :

$$\tau = \gamma\, R_b\, S_f = \tau^*\,(\gamma_s - \gamma)\, d_{50} \tag{4.4}$$

Cette contrainte de cisaillement dépend elle-même du rayon hydraulique R_b et de la pente d'énergie S_f calculés de cette manière :

$$R_b = \frac{A_{\text{mouillée}}}{P_{\text{mouillé}}} \tag{4.5}$$

$$S_f = \frac{n^2 V^2}{h^{4/3}} \tag{4.6}$$

Il est important de souligner que S_f est influencé par le nombre de Manning n, la hauteur d'eau h et la vitesse V. Par conséquent, une diminution de la hauteur d'eau h entraîne une augmentation de S_f, qui à son tour se traduit par une augmentation de la contrainte de cisaillement sur le fond τ. Cette augmentation de la contrainte de cisaillement adimensionnelle accroît la capacité de transport adimensionnelle, ce qui favorise l'érosion. Par conséquent, une réduction de la hauteur d'eau entraîne effectivement une augmentation de l'érosion. Cette relation met en évidence l'importance d'atteindre l'étape de *drawdown flushing* lors d'une opération de chasse de barrage.

Évolution de la topographie pendant l'écoulement

Pour constater l'évolution de l'érosion et du dépôt des sédiments au cours de l'expérience, deux configurations du laser LPT ont été utilisées, la configuration transversale et longitudinale (détaillées dans le chapitre 3.2.1).

Dans un premier temps, la configuration transversale donne le graphe de la figure 4.32 :

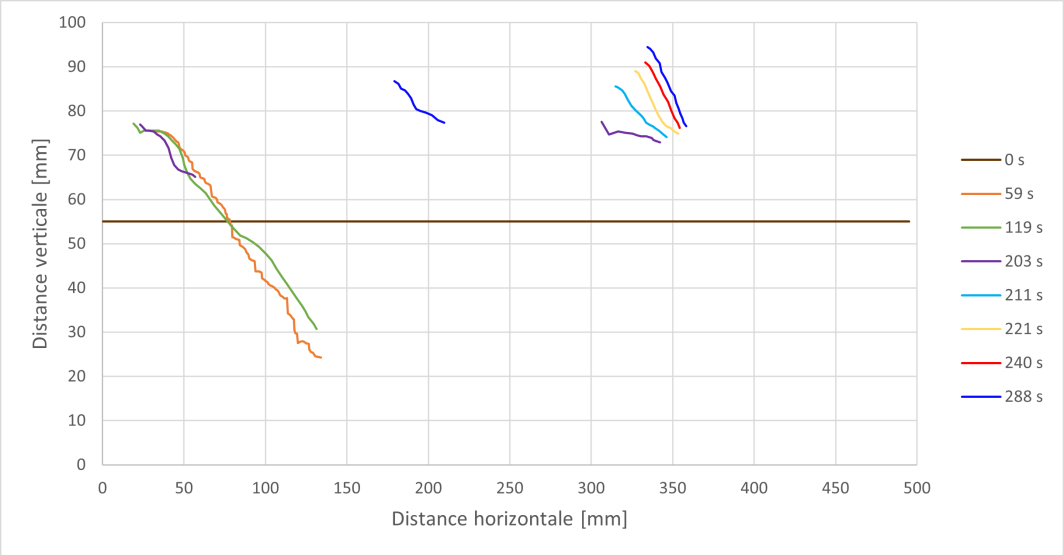


FIGURE 4.32 – Evolution morphologique transversale du lit aval au cours du temps. Les abscisses correspondent à la position sur la largeur du canal.

Pour mieux comprendre la figure 4.32 et les courbes morphologiques qui la composent, il est nécessaire de passer en revue certaines images prises par la caméra du système LPT avant traitement par le code Matlab.

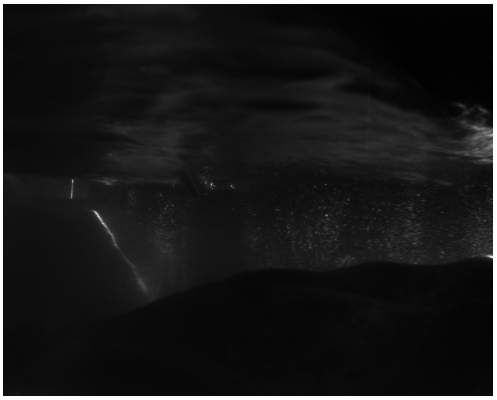


FIGURE 4.33 – Photo capturée par la caméra du système LPT après 59 secondes d'expérience avant d'être traitée par Matlab.

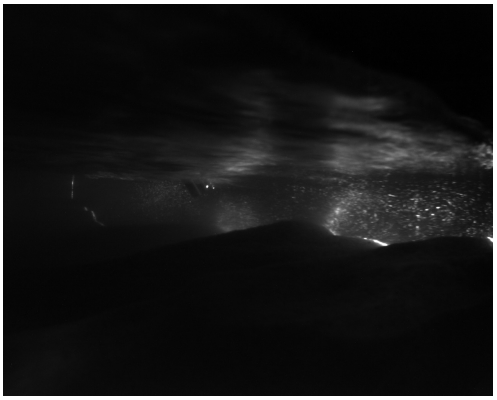


FIGURE 4.34 – Photo capturée par la caméra du système LPT après 203 secondes d'expérience avant d'être traitée par Matlab.

Après 59 secondes d'expérience, la figure 4.33 illustre clairement la visibilité du laser du système LPT. Cependant, à partir de 203 secondes, l'apparition d'un talus de dépôt sur la partie droite de l'image limite la vision des phénomènes se produisant à gauche de l'image. En effet, comme le montre la figure 4.34, la caméra ne peut plus capturer l'intégralité des processus d'érosion et de dépôt sur la partie gauche de la photo. Ainsi, la partie gauche de la courbe de la figure 4.32 à 203 secondes ne représente qu'une partie des événements, le reste étant caché par le talus, empêchant une connaissance complète de la morphologie du lit à cet instant précis avec la technique du laser LPT.

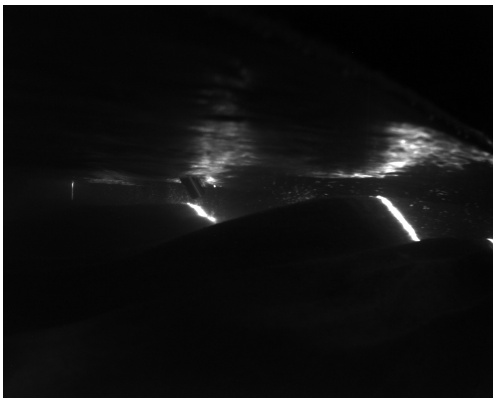


FIGURE 4.35 – Photo avant traitement capturée par la caméra du système LPT après 288 secondes d'expérience avant d'être traitée par Matlab.

En regardant la figure 4.32, une érosion assez nette est visible 59 secondes après le début d'expérience. Un dépôt est également visible sur cette courbe dont une partie est au-dessus du lit initial de sédiments.

A partir de 203 secondes, un phénomène de dépôt commence à démarrer sur la partie droite du graphe et va progresser continuellement jusqu'à 288 secondes où le dépôt se stabilise. Les courbes à 211 s, 221 s, 240 s et 288 s témoignent de cette évolution.

Après 288 secondes, au centre du graphe, le laser LPT affiche une partie de la morphologie qui laisse présager qu'en fin d'expérience, l'ensemble du lit sera surélevé par rapport au lit initial.

En raison de la grande quantité de sédiments se déposant en cours d'expérience, la configuration transversale de la technique de la feuille laser LPT ne permet pas d'avoir des informations complètes sur les processus d'érosion et de dépôt. Différents positionnements de caméra ont été testés mais ne menaient pas à de meilleurs résultats. Afin d'avoir des données supplémentaires, le système LPT a été positionné longitudinalement par rapport au canal (position du laser schématisée sur la figure 3.4). La figure 4.36 offre de nouvelles informations quant au dépôt occasionné à l'aval par la chasse de barrage :

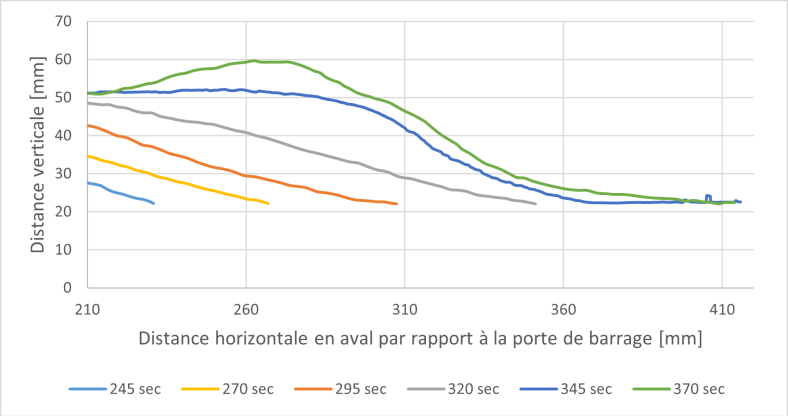


FIGURE 4.36 – Évolution morphologique du lit aval au cours du temps. Les abscisses correspondent à la distance en aval par rapport à la porte de barrage.

Sur la figure 4.36, une augmentation progressive du dépôt à partir de 245 secondes d'expérience est visible. Ce dépôt va s'étendre pendant 125 secondes supplémentaires jusqu'à atteindre les 370 secondes d'expérience où il n'y a plus d'évolution morphologique captée par l'appareil de mesure. L'ensemble de ces courbes sont obtenues en période de *drawdown flushing* qui intervient après 150 secondes. C'est donc à partir de ce moment-là que la plus grande quantité de sédiments se fait éroder à l'amont, créant du dépôt à l'aval.

Bilan morphologique final

Dans cette configuration, on peut globalement observer deux zones de dépôt de sable. Quelles que soient les expériences menées, ces deux zones sont toujours présentes. La différence d'une expérience à l'autre est l'endroit exact et la manière dont ces zones de dépôt sont formées. Cette différence peut être expliquée par plusieurs raisons. Premièrement, le seuil de la porte étant assez fin, de l'ordre du millimètre, le jet d'eau sortant ne peut pas être dirigé avec une grande précision vers le centre du canal. Ensuite, le sable présent à l'amont n'est pas homogène à 100%. Par exemple, lors de l'érosion du sable à l'amont, des petit cailloux de plusieurs millimètres de diamètres créaient un affouillement autour d'eux et ceci perturbait le flux. Ce flux perturbé créait donc une asymétrie dans l'érosion du sable dans le réservoir et ainsi donnait une direction non centrée au flux lors de son passage au travers de la porte. Dans le contexte de ces expériences, ces paramètres étaient difficilement contrôlables. Pour une meilleur compréhension du sujet, la figure 4.37 montre 2 photogrammétries de deux expériences différentes avec la même configuration initiale.

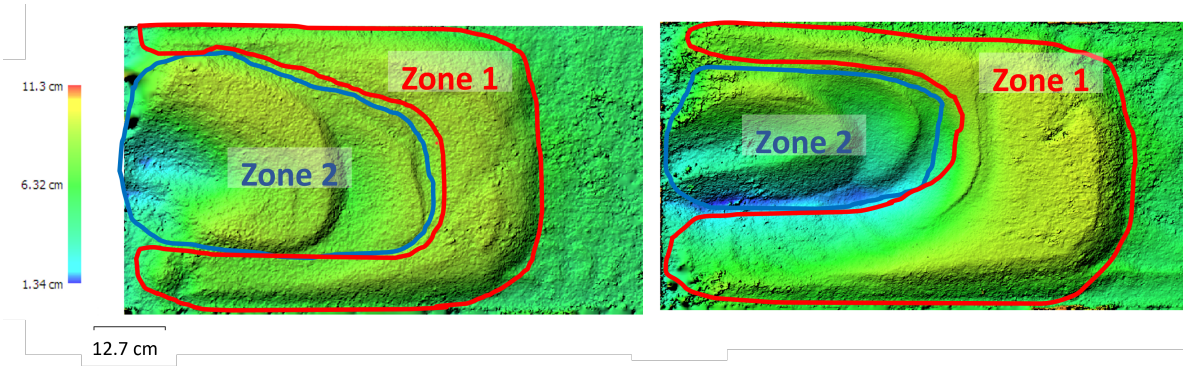


FIGURE 4.37 – Zones de dépôt de deux expériences différentes pour la configuration 2. Sur ces deux photos, la porte se situe sur la gauche et l'eau s'écoule vers la droite.

La zone 1 est entourée en rouge et la zone 2 est entourée en bleu. L'origine de ces deux zones est expliquée ci-dessous :

➢ Zone 1 : le dépôt de sable correspond au sable venant de l'érosion du lit à l'aval de la porte. Ce dépôt est semblable au dépôt observé avec la configuration 1. Pour s'en assurer, une forme à été tracée sur la photogrammétrie de la configuration 1 et cette même forme a été importée sur la photogrammétrie d'une expérience de la configuration 2. La figure 4.38 montre que cette forme représente bien un talus de dépôt de sable similaire sur les deux configurations.

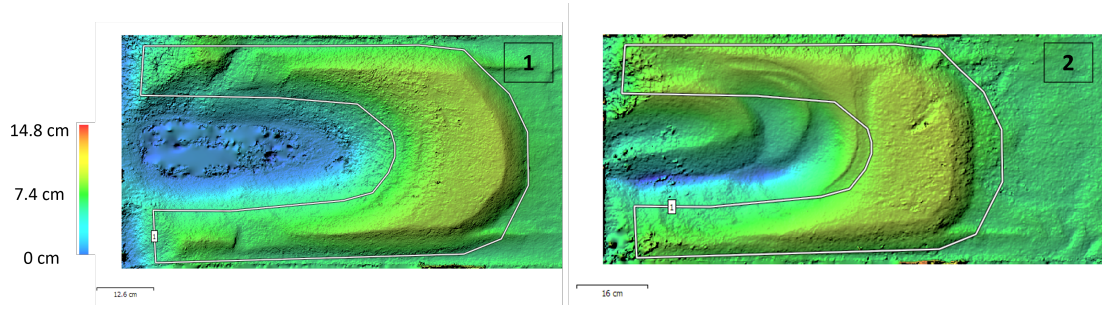


FIGURE 4.38 – Zone de dépôt des sédiments qui ont été érodés juste à l'aval de la porte. L'image 1 vient de la configuration 1 et l'image 2 de la configuration 2. Sur ces deux photos, la porte se situe sur la gauche et l'eau s'écoule vers la droite.

Il faut souligner que, dans la deuxième configuration, la quantité totale du sable dans cette zone ne vient pas seulement du sable qui a été érodé en aval de la porte, mais provient aussi en partie de l'érosion du sable dans le

réservoir. Dans le cas présenté sur la figure 4.38, on a un volume au dessus du niveau de sable initial de 5.5 cm légèrement différent dans les deux situations. Ces volumes sont repris dans le tableau 4.4.

Configuration	1	2
Volume [m³]	0.0036	0.0056

TABLE 4.4 – Tableau des volumes de sédiments déposés au dessus du lit initial à 5.5 cm au dessus du fond du canal dans la zone 1 et ce pour la configuration 1 et 2.

On pourrait donc faire l'hypothèse que dans la configuration 2, 0.0020 m^3 du volume présent au dessus de 5.5 cm vient de l'érosion du sable dans le réservoir, à l'amont de la porte. Cette hypothèse est à prendre avec précaution car une partie du volume de la zone 2 peut se confondre avec la zone 1 et la frontière entre les deux n'est pas toujours très claire.

➢ Zone 2 : sans sable à l'amont, cette zone est complètement érodée, comme l'ont montré les expériences de la configuration 1. Dans ce cas ci, on peut observer que du sable y a été déposé. L'hypothèse est donc faite que tout le sable déposé dans cette zone provient de l'érosion à l'amont. La zone entourée en rouge sur la figure 4.39 représente donc le volume de sédiment venant de l'amont. Encore une fois, la frontière entre la zone 1 et la zone 2 est difficilement distinguable. La zone dessinée par le tracé en blanc vient de la configuration 1 et c'est donc celle-ci qui a servi à déterminer la frontière.

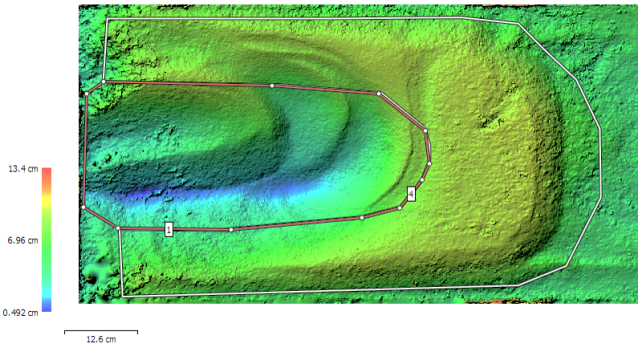


FIGURE 4.39 – La zone entourée en rouge représente le dépôt de sable venant de l'amont. La porte se situe sur la gauche et l'eau s'écoule vers la droite.

Le volume de sédiments présent dans la zone en rouge sur la figure 4.39 vaut 0.0058 m^3. Encore une fois, ces résultats sont à lire avec un oeil attentif. Il est difficile de distinguer clairement où ont été se déposer les sédiments venant de l'amont. Ces deux zones sont des phénomènes observés d'une part par la

technique du LPT et d'autre part par la photogrammétrie. Y associer des valeurs est une démarche très hypothétique.

Maintenant, il est possible de faire le bilan total des sédiments sur 2 mètres de long. Le volume de sédiments à l'aval après l'expérience vaut 0.0600 m^3. Par rapport au volume initial à l'aval de 0.055 m^3, il y a une augmentation de 0.005 m^3. Si l'on fait l'hypothèse que l'impacte du sable de l'amont n'atteint pas les 2 mètres à l'aval, l'approche suivante peut être faite. En se référant aux résultats de la configuration 1, on peut considérer que 0.0023 m^3 de sédiments sont partis au-delà des 2 m vers l'aval. Afin de s'approcher de la quantité de sédiments venant de l'amont, on peut faire la calcul suivant :

$$S_a = S_f + S_p - S_i \tag{4.7}$$

avec S_a le volume de sédiments venant de l'amont, S_f le volume de sédiments présent après l'expérience (0.0600 m^3), S_p le volume de sédiments perdu à l'aval des 2 mètres (0.0023 m^3) et S_i le volume de sédiments présent initialement avant la chasse à l'aval (0.055 m^3). On peut donc considérer qu'un volume de 0.0073 m^3 a été chassé du réservoir amont vers le canal à l'aval.

Évolution de la concentration en sédiments

Premièrement, comme calculé pour la configuration 1, l'observation de l'écho de retour de la sonde UVP numéro 1 est un bon indicateur de la présence de sédiments à l'aval. Plus la tension de retour est haute, plus la concentration est élevée. Cette évolution peut être tracée au cours du temps à un niveau choisi. Dans ce cas, comme avec la configuration 1, le niveau choisi est à 6 cm du fond du canal. Pour rappel, ce niveau a été choisi car il se situe entre le niveau d'eau initial (8.5 cm) et le niveau de sable initial (5.5 cm). Cette tension est représentée sur la figure 4.40.

Pour cette configuration, on peut observer dés les premières secondes un pic de sédiments. Il s'agit en réalité de sédiments venant de l'amont juste à l'entrée de la porte. Ces sédiment se dégagent vers l'aval pour libérer l'ouverture de la porte et cela forme un cône au niveau du réservoir à l'amont. La photo 4.41 montre bien ce phénomène. Elle a été prise 5 secondes après l'ouverture de la porte et on peut y observer un dégagement de sédiments juste à l'entrée, ce qui indique la rapidité de cette formation.

Maintenant, il est possible d'étudier l'évolution du niveau du lit en fonction des pics renvoyés par la sonde UVP. La démarche est la même que pour la configuration 1. Ce qui est maintenant intéressant à observer est la formation d'un talus au milieu de la zone 2 mentionnée précédemment sur la figure 4.37. Ce talus commence à apparaître 130 secondes après l'ouverture de la porte. La figure 4.42 montre cette évolution entre 100 secondes et 300 secondes au travers des 5 pics visibles. C'est

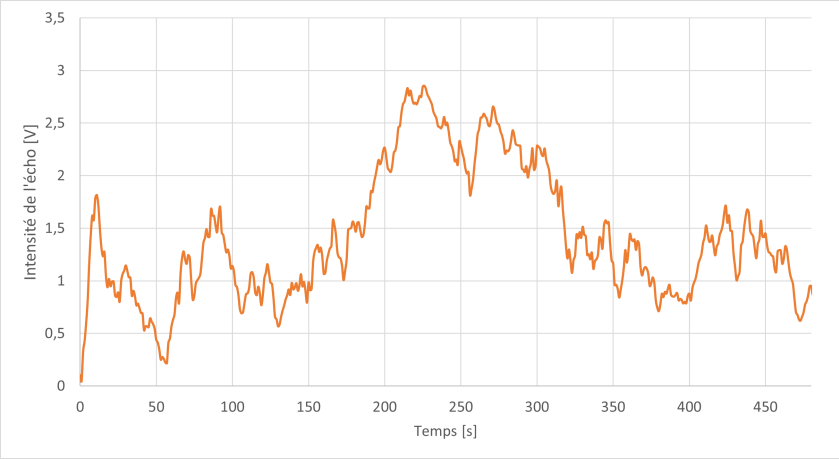


FIGURE 4.40 – Tension de l'écho de retour d'une onde envoyée par la sonde UVP 1 en fonction du temps. Cette tension est prise à 6 cm au dessus du plancher du canal.

au bout de 300 secondes que le talus formé en dessous de la sonde atteint son maximum. Ce niveau maximum est indiqué par le point 5 sur la figure 4.42 et il représente une hauteur de 57 mm par rapport au plancher du canal. Il restera ensuite stable jusqu'à la fin de l'expérience. L'amas de sable formé en dessous de la sonde passe donc de 0 mm à 57 mm en 170 secondes.

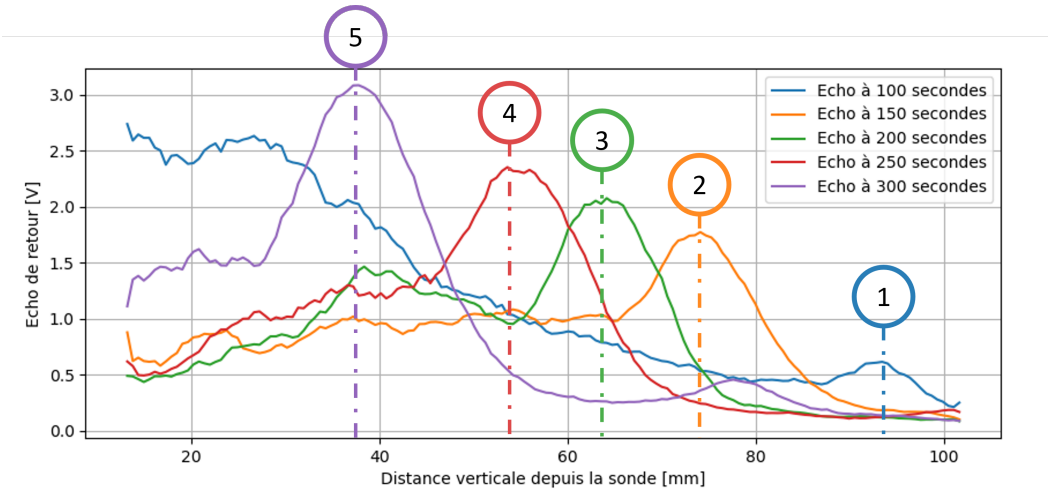


FIGURE 4.42 – Évolution du fond du canal au niveau de la sonde UVP 1 placée à 14 cm à l'aval de la porte entre 100 et 300 secondes. La sonde étant placée à 95 mm de hauteur, cette distance indique le fond du canal.

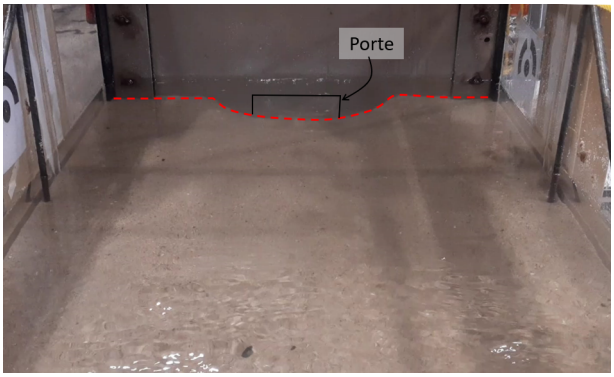


FIGURE 4.41 – Photo prise 5 secondes après l'ouverture de la porte. Un cône se forme à l'entrée de la porte. Le forme du cône est marquée par les tirets en rouge et les contours de la porte sont marqués par un trait noir.

Avec les données de la sonde UVP, il est maintenant possible de passer au calcul de concentration.

➢ Mesure de concentration par la méthode explicite :

A nouveau, pour pouvoir tracer des profils avec cette méthode, il est nécessaire d'avoir la valeur de la première concentration au droit de la sonde. Pour trouver cette concentration, la technique de comptage de particules avec la feuille laser est utilisée. La fenêtre choisie est encadrée en mauve sur la figure 4.43. Celle-ci est choisie sur une hauteur entre 6 et 7.5 cm afin qu'elle soit toujours dans un niveau en présence d'eau, étant donné que le talus ne monte que jusqu'à 5.7 cm.

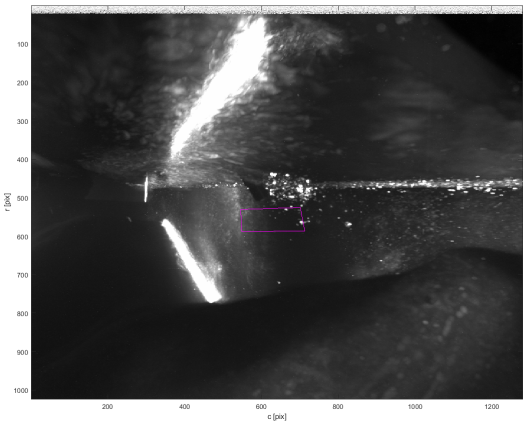


FIGURE 4.43 – Fenêtre en mauve dans laquelle les particules sont comptées.

Les résultats de cette technique de comptage de particules sont visibles sur la courbe bleue de la figure 4.44. La fenêtre utilisée représente un volume de 1.53 cm^3. En parallèle de cette courbe, on peut retrouver la courbe du retour d'écho. Cette figure montre bien que la tendance est identique. Une différence est cependant observée entre 0 secondes et 100 secondes. A cet instant, on peut observer que l'écho présente des pics importants. Ceci s'explique du

fait de la grande turbidité dans l'eau et des grands remous qui créent des bulles d'air. Ceci a pu être constaté sur les photos renvoyées par la caméra du système LPT.

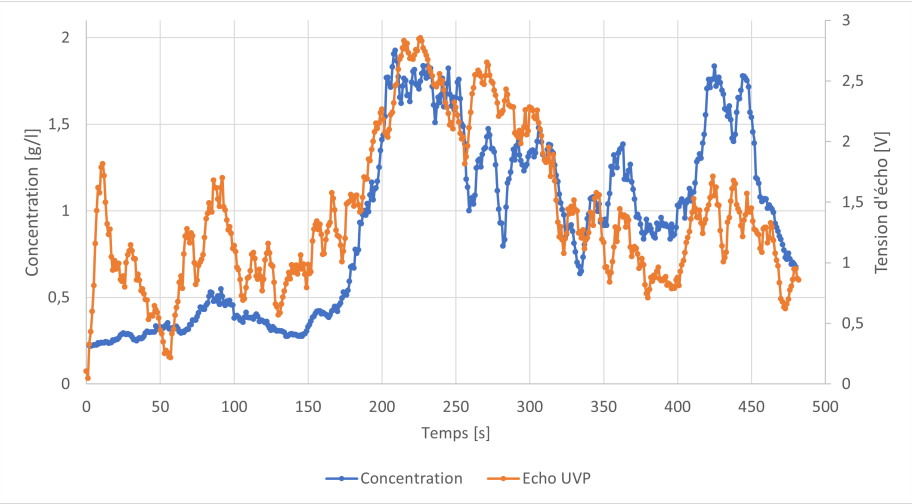


FIGURE 4.44 – Concentration en sédiments au droit de la sonde UVP. En parralèle, en orange, l'écho renvoyé par les sondes UVP.

Ces courbes montrent bien qu'au bout de 150 secondes, il y a une augmentation des particules en suspension. Ce temps correspond au passage de *pressure flushing* à *drawdown flushing*. Ces deux courbes en parallèles indiquent également une augmentation ponctuelle des sédiments entre 400 et 460 secondes. En analysant les images prises par la caméra du système laser, on peut observer la création d'une dune qui avance et cette dune dégage une quantité de sédiments autour d'elle, comme le montre la figure 4.45.

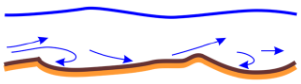


FIGURE 4.45 – Mise en suspension de sédiments autour de la formation d'une dune.

Cette dune peut être observée sur la figure 4.46. Pour une meilleure visibilité, la luminosité de ces images a été augmentée. Sur cette figure, on trouve l'axe de la sonde en tirets noirs. La ligne en tirets rouges représente le sommet du talus formé sous la sonde. La flèche bleue indique le front de la dune qui avance sur ce talus. Au temps t=410 s, le front de la dune n'est pas particulièrement visible. A t=425 s, on distingue clairement le front de dune et ce jusqu'à 450 s.

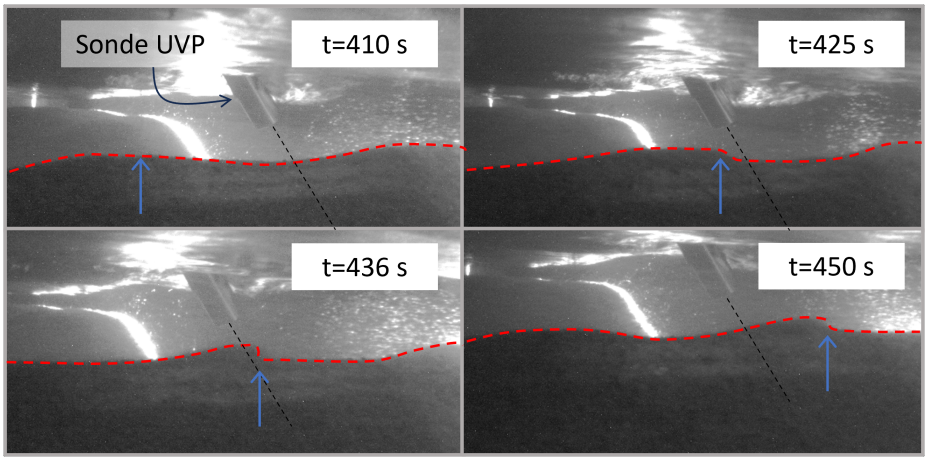


FIGURE 4.46 – Evolution d'une dune sur le talus formé sous la sonde entre 410 s et 450 s. La flèche bleue indique le front de la dune.

Maintenant, certains profils de concentration peuvent être tracés. Un profil sera tracé à 100 secondes, avant le *drawdown flushing*, un second à 250 secondes, lorsqu'une grande quantité de sédiments est chassée depuis l'amont et un troisième à 400 secondes, lorsque la phase la plus importante du *drawdown flushing* s'est calmée. Les concentrations initiales trouvées par la techniques de comptage de particules sont données dans le tableau 4.5.

Temps [s]	100	250	400
Concentration initiale [g/l]	0.45	2.11	1.04

TABLE 4.5 – Tableau des concentration initiales au droit de la sonde UVP à trois temps différents.

Les différents profils sont présentés sur la figure 4.47. Pour rappel, le niveau 0 représente la hauteur de la sonde. La grosse ligne verticale orange représente le niveau du lit. Il y ressort que durant la phase à 100 secondes, une grande partie des sédiments transportés est en suspension alors qu'après 250 secondes, les sédiments sont plus proches du lit du canal et le transport tend plus à un transport par charriage.

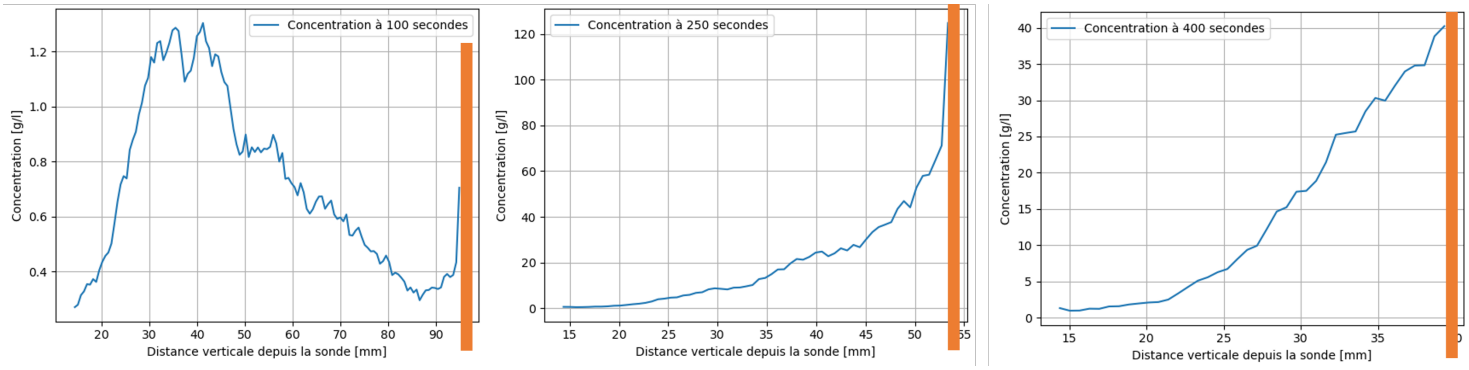


FIGURE 4.47 – Profils de concentrations à trois temps différents : 100 s, 250 s et 400 s. La ligne verticale orange représente le lit de sédiments.

➢ Mesure de concentration par la méthode implicite :

Ici, les trois profils dessinés sur la figure 4.47 vont être recalculés avec la méthode implicite. L'idée est de vérifier si la tendance est similaire. Les courbes tracées par la méthode implicite se trouvent sur la figure 4.48.

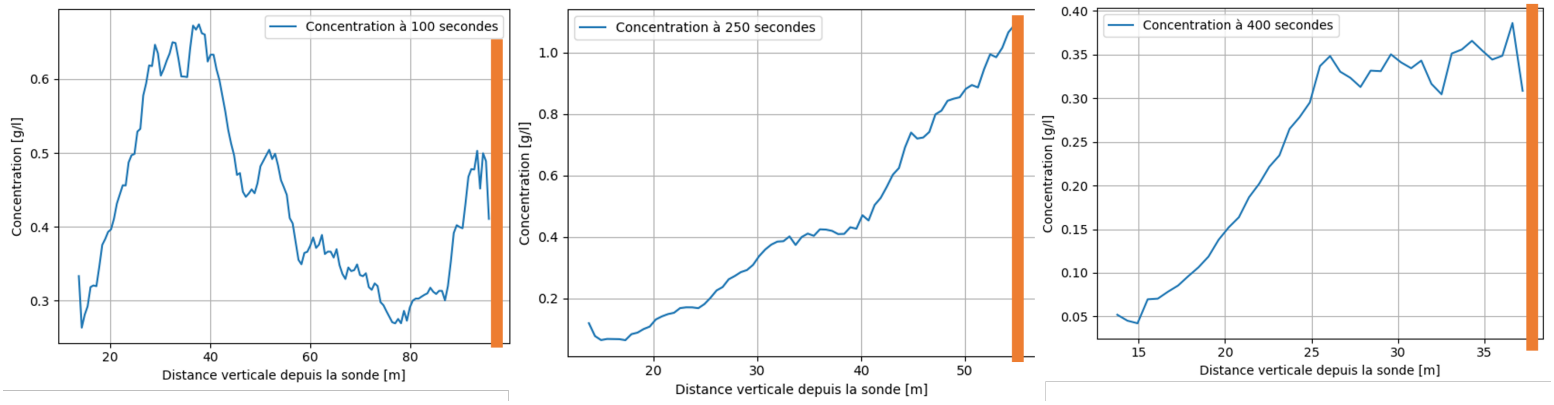


FIGURE 4.48 – Calcul de 3 profils à 3 temps différents avec la méthode implicite. De gauche à droite, à 100 secondes, à 250 secondes et à 400 secondes.

La méthode implicite montre bien des similarités avec les courbes de la méthode explicite. En effet, on observe bien au temps t=100 secondes qu'une grande partie des sédiments est en suspension. Ensuite, une fois que la chasse passe en *drawdown flushing*, le transport de sédiment se fait plutôt par le fond du canal et une plus grande partie se fait par charriage. Ceci peut être expliqué par le fait qu'en *pressure flushing*, le lit est totalement érodé sous la sonde UVP et le fond du canal est donc un plancher en bois. Le charriage y est donc fortement limité.

D'un point de vue quantitatif, la méthode explicite est la plus fiable. En effet, la technique de comptage de particules est une technique connue et a déjà été validée. Cependant, les tendances observées sont intéressantes dans les deux méthodes.

Conclusion de la configuration 2

Dans cette configuration, l'évolution morphologique et de la concentration en sédiments dans l'eau est différente de la configuration 1 en raison de la présence de sédiments à l'amont. L'intérêt ici est de montrer l'impact de la présence de sédiments à l'amont. Les observations sont les suivantes :

- ➢ Le passage en *drawdown flushing* intervient après 150 secondes et ce passage est accompagné d'une augmentation de la concentration en sédiments se traduisant en une augmentation du dépôt qui se voit avec le système LPT sur la figure 4.32. Cette augmentation de la concentration et donc du dépôt suite au passage en *drawdown flushing* suit bien ce qui est décrit par la théorie [White, 2001].
- ➢ Ce passage en *drawdown flushing* vient créer une seconde zone de dépôt avec les sédiments venant du réservoir (figure 4.39). L'analyse de l'évolution du fond du canal fait avec la sonde UVP 1 indique que le lit est totalement érodé à 100 secondes et qu'un dépôt commence à apparaître à 130 secondes. Ce dépôt augmente jusqu'à 300 secondes pour former un talus de 57 mm de hauteur (figure 4.42).
- ➢ L'évolution de la concentration peut être décrite en 2 phases importantes : dés l'ouverture de la porte, une concentration importante en sédiment apparaît à l'aval suite à la création d'un cône juste à l'amont de la porte qui libère une certaine quantité de sable. Ensuite, une deuxième augmentation de la concentration en sédiments apparaît à 150 secondes, ce qui correspond au passage de *pressure flushing* à *drawdown flushing*.
- ➢ Un phénomène plus ponctuel a pu être observé. Une petite dune est apparue au sommet du talus et celle-ci avançait dans le sens du courant.

4.2.3 Configuration 3

Afin de vérifier la présence ou l'absence de ces phénomènes avec des paramètres différents, une troisième configuration a été menée pour voir l'impact d'une augmentation de la hauteur du lit de sédiments initial à l'amont. Dans cette expérience supplémentaire, la hauteur du lit de sédiments à l'amont était de 16 cm avec cette disposition des appareils de mesure :

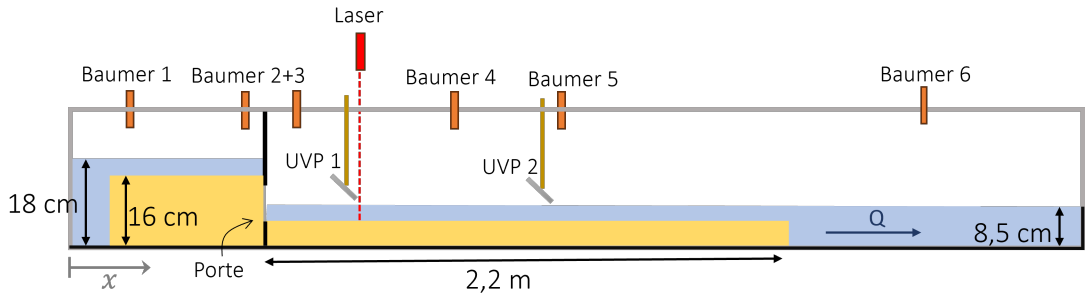


FIGURE 4.49 – Configuration avant l'ouverture de la porte avec la position des appareils de mesure. Les positions exactes se trouvent dans le tableau 4.1.

L'ensemble de l'analyse a été réalisée en se basant sur les résultats de la seule expérience menée en raison de la difficulté de traitement de cette configuration. Ces raisons seront détaillées par la suite.

Durée de l'expérience

➢ Stabilisation du débit :
Le débit est mesuré de la même manière que pour la configuration 1 et 2. Ce débit représente l'hydrogramme de l'expérience. La figure 4.50 montre l'évolution de ce débit en fonction du temps. Le débit envoyé à l'amont qui est de 1 l/s est atteint à 180 secondes, ce qui signifie que le débit est stable. Cependant, on peut observer des petites augmentation de ce débit vers 250 secondes. Le débit est totalement stable au bout de 360 secondes.

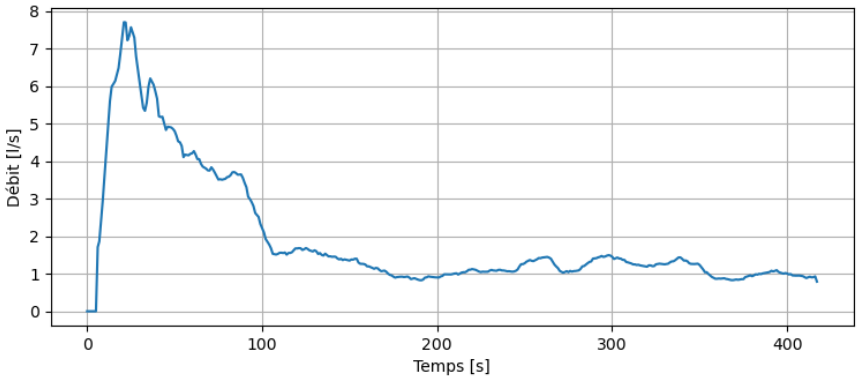


FIGURE 4.50 – Hydrogramme de la chasse de barrage selon la configuration 3.

➢ Stabilisation du niveau de l'eau :

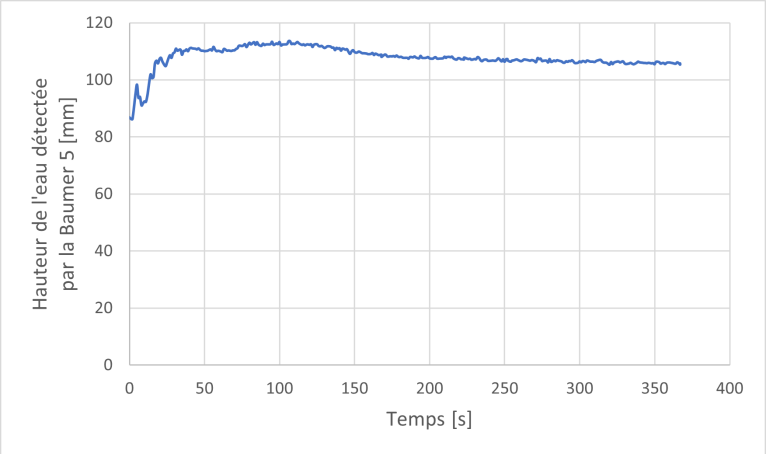


FIGURE 4.51 – Hauteur de l'eau en fonction du temps captée par la Baumer 5. Il s'agit donc de la hauteur d'eau 158 cm en aval de la porte de barrage.

Comme le montre la figure 4.51, après 360 secondes d'expérience, la hauteur d'eau captée par la Baumer 5 s'établit à 106.08 mm. Le niveau de l'eau se stabilise à partir de ce moment-là.

Passage de *pressure flushing* à *drawdown flushing*

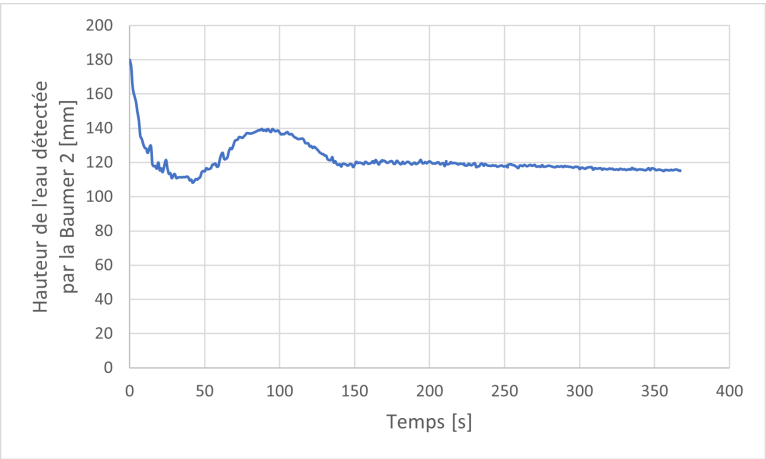


FIGURE 4.52 – Hauteur de l'eau en fonction du temps captée par la Baumer 2. Il s'agit donc de la hauteur d'eau à 11 cm en amont de la porte de barrage.

La figure 4.52 n'a pas du tout un comportement semblable à la figure 4.12 de l'expérience 1 et de la figure 4.31 de l'expérience 2. Il a été mesuré visuellement que le passage en *drawdown flushing* se passe après 123 secondes, quand la Baumer 2

indique une hauteur de 129.25 mm. Ici, le passage de *presure flushing* à *drawdown flushing* intervient donc une première fois mais l'écoulement repasse en *pressure flushing* car la hauteur d'eau augmente de nouveau pour ensuite passer une seconde fois en *drawdown flushing*. Le passage final en *drawdown flushing* est donc considéré après 123 secondes d'expérience.

Évolution de la topographie pendant l'écoulement

En raison de la grande quantité initiale de sédiments à l'amont, dès le commencement de l'expérience, les sédiments transportés vers l'aval donnent lieu à la formation de larges monticules qui ne permettent pas une visualisation correcte du laser par la caméra et ce avec plusieurs dispositions laser-caméra testées. La technique du LPT ne peut donc pas être appliquée sur cette expérience, ce qui empêche d'analyser le phénomène d'érosion et celui de dépôt en cours d'expérience. La seule information concernant le lit est donc le relevé topographique avec la photogrammétrie.

Bilan morphologique final

A la fin de l'expérience, un relevé topographique a été fait à l'aide de la photogrammétrie. Ce relevé est visible sur la figure 4.54. Avec beaucoup plus de sédiments initialement à l'amont, la zone d'érosion à l'aval après expérience est beaucoup moins présente que dans les configurations précédentes. Comme le montre la coupe 4.55, cette érosion est présente sur une dizaine de centimètres après la porte mais elle n'atteint pas le plancher. La figure 4.53 montre le lit de sable après l'expérience.

FIGURE 4.53 – Photo du dépôt de sable à l'aval de la porte.

Le bilan total de sédiments sur 2 mètres de canal est de 0.0691 m^3. En suivant la formule $S_a = S_f + S_p - S_i$ expliquée dans la section de la configuration 2, on peut considérer qu'un volume de 0.0164 m^3 a été érodé à l'amont et s'est déposé à l'aval. Ce dépôt va jusqu'à 76 cm à l'aval de la porte. La coupe longitudinale sur le milieu du canal indique que le niveau monte jusqu'à 9.45 cm (figure 4.55).

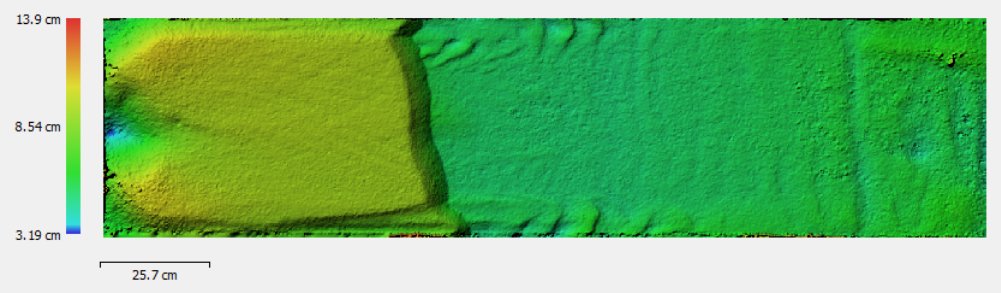


FIGURE 4.54 – Relevé topographique du lit à l'aval de la porte après expérience. La porte se trouve à gauche et l'aval se trouve à droite.

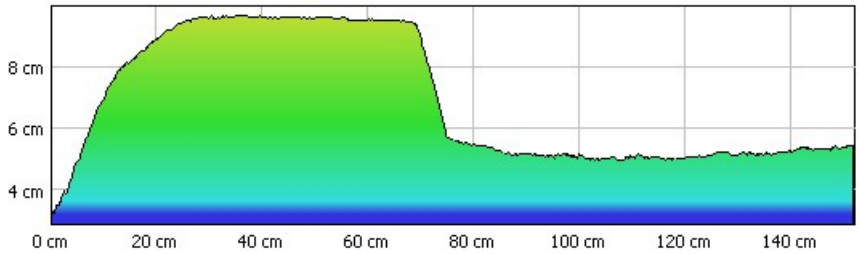


FIGURE 4.55 – Coupe longitudinal sur l'axe central du canal montrant le niveau des sédiments à l'aval après la chasse. 0 représente la position de la porte.

Évolution de la concentration en sédiments

Afin de connaître l'évolution du transport de sédiments durant l'expérience, la courbe de l'intensité de l'écho est tracée en fonction du temps, et ce à 8 cm de hauteur par rapport au plancher du canal grâce à la UVP 1. La figure 4.56 montre très vite une présence de sédiments en suspension dans l'eau. Cette tendance diminue très légèrement au cours du temps mais la concentration reste importante.

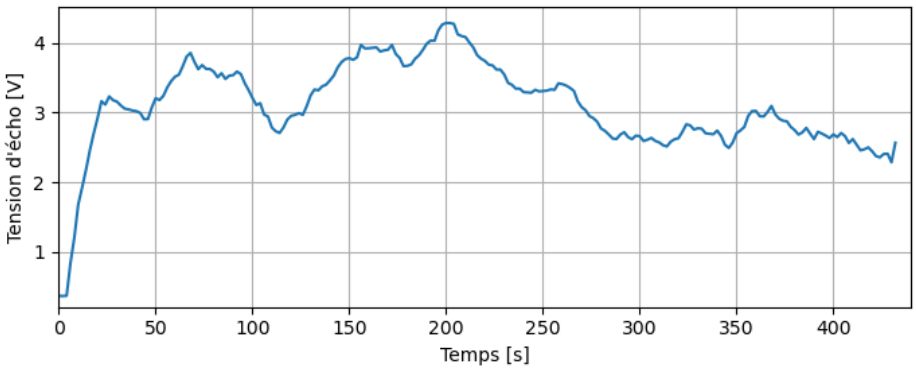


FIGURE 4.56 – Évolution de l'intensité de l'écho en fonction du temps. Mesures prises à un niveau de 8 cm par rapport au plancher du canal.

Dans ce cas présent, la turbidité étant très élevée, l'atténuation de l'onde est très importante, il est donc difficile de pouvoir distinguer le niveau du lit. Cependant, on peut dire avec beaucoup de confiance qu'à 100 secondes, aucun lit de sable n'est présent car l'écho renvoie un pic à 95 mm, soit à la distance entre la sonde et le plancher en bois (représenté par le point 1 sur la figure 4.57). De plus, un pic peut quand même être observé à 150 secondes. Ce pique indique que le lit est à 30 mm de la sonde, c'est à dire à 65 mm au dessus du plancher du canal (représenté par le point 2 sur la figure 4.57). Cette turbidité empêche la feuille laser de montrer clairement les particules en suspension, c'est pourquoi il n'est pas possible d'utiliser la méthode explicite dans cette situation.

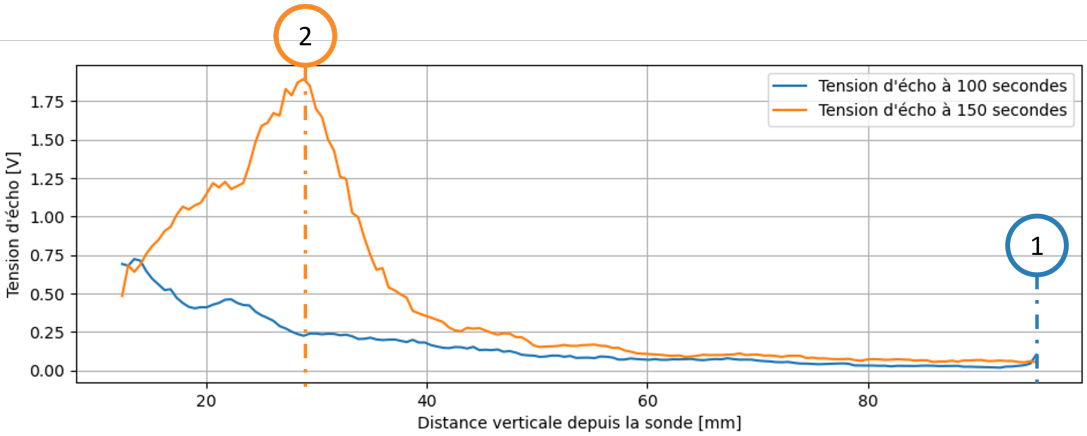


FIGURE 4.57 – Détection des pics d'intensité de l'écho reçu par la sonde UVP 1. Les pics indiquent la présence du lit à 100 s et à 150 s.

Afin d'avoir une idée de la forme des profils de concentration, la méthode implicite peut tout de même être faite.

➢ Mesure de concentration par la méthode implicite :

3 profils différents vont être analysés : un profil à 50 s, un à 100 s et un dernier à 150 s d'expérience. Ceci permettra d'observer les profils avant et après la présence d'un lit de sédiments. Pour rappel, l'axe x représente la distance verticale depuis la sonde et cette sonde se trouve à 95 mm à la verticale du plancher du canal.

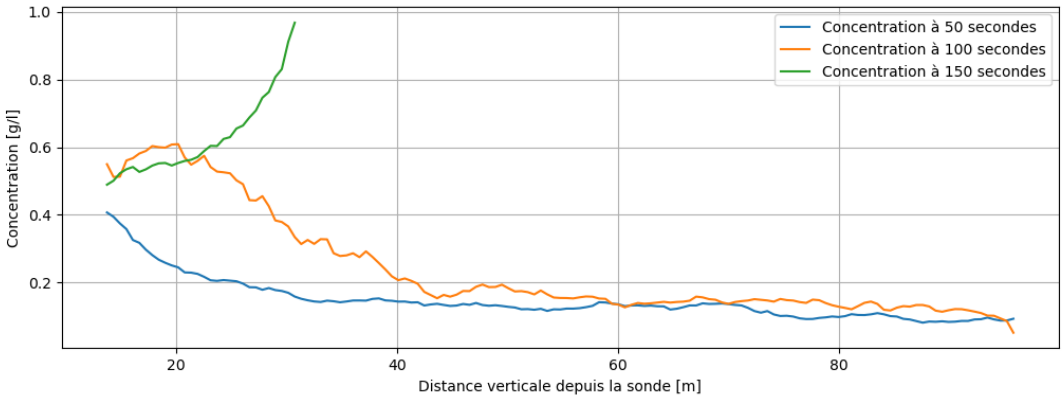


FIGURE 4.58 – 3 différents profils de concentration.

La courbe verte dessinée à 150 secondes s'arrête à 30 mm de la sonde car le profil de concentration est stoppé par le lit de sédiments. La figure 4.58 indique via cette courbe à 150 secondes qu'un lit de sédiments engendre un plus grand transport de sédiments au niveau du lit. Une partie de ce transport se fait par charriage et c'est pourquoi la concentration à tendance à augmenter en se rapprochant du fond.

Conclusion de la configuration 3

Dans cette troisième configuration, en raison de la présence d'une quantité considérable de sable en amont (16 cm de sable dans le réservoir), il y avait des limitations dans les mesures car la caméra était inutilisable. Par conséquent, il était impossible d'obtenir une évolution de la topographie pendant l'écoulement mais également de réaliser des mesures de concentration par la méthode explicite.

Cependant, malgré ces limites, des conclusions ont pu être tirées :

- ➢ Le niveau de l'eau à l'amont a une tendance différente en comparaison aux autres configurations, ce qui indique que la dynamique de l'écoulement n'est pas semblable lorsque le sable dépasse le niveau supérieur de la porte. Cette dynamique serait cependant intéressante à étudier mais le dispositif mis en place ne permettait pas de faire des mesures exploitables.
- ➢ La seconde transition vers le processus de *drawdown flushing* après 123 secondes a conduit à une élévation de la concentration et du dépôt final en aval. En effet, une augmentation de la concentration a été observée après 123 secondes, et cette concentration a augmenté de manière encore plus marquée après 150 secondes (figure 4.56), ce qui confirme la théorie liée au passage en *drawdown flushing*.
- ➢ À la fin de l'expérience, un dépôt considérable a été mesuré, provoquant un relèvement d'une partie du lit à plus de 9.5 cm sur une longueur de 75 cm.

4.2.4 Configuration 4

L'objectif de cette configuration est de voir d'une part ce qu'il se passe une fois qu'on passe de *pressure flushing* à *drawdown flushing* avec une hauteur de sédiment à l'amont de seulement 9 cm. D'autre part, il sera intéressant de voir les phénomènes de dépôt et d'érosion avec cette configuration. La figure 4.59 est un schéma montrant comment est configuré le canal avant l'ouverture de la porte.

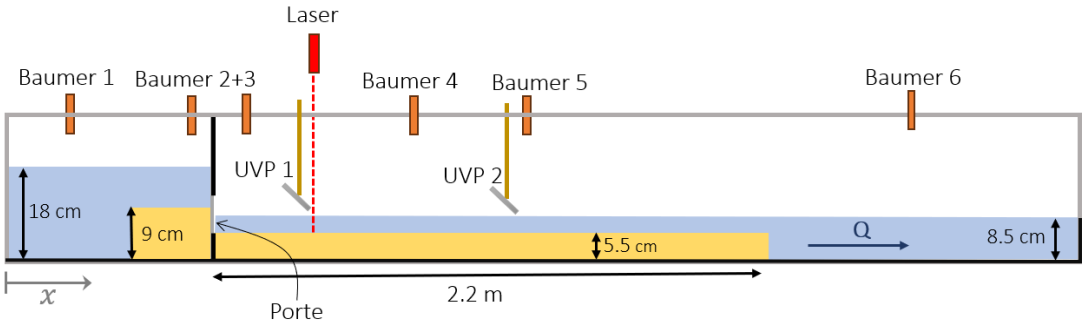


FIGURE 4.59 – Configuration avant l'ouverture de la porte avec la position des appareils de mesure. L'emplacement exact de ces instruments est donné dans le tableau 4.1.

Cette configuration, dont les résultats servent à compléter le jeu de données collecté, est étudiée sur une expérience assez représentative. Les analyses suivantes se basent donc sur cette expérience :

Durée de l'expérience

➢ Stabilisation du débit :
Le débit est toujours calculé de la même manière avec la sonde UVP 2 et la sonde Baumer 5. Son évolution au cours du temps est donnée sur la figure 4.60.

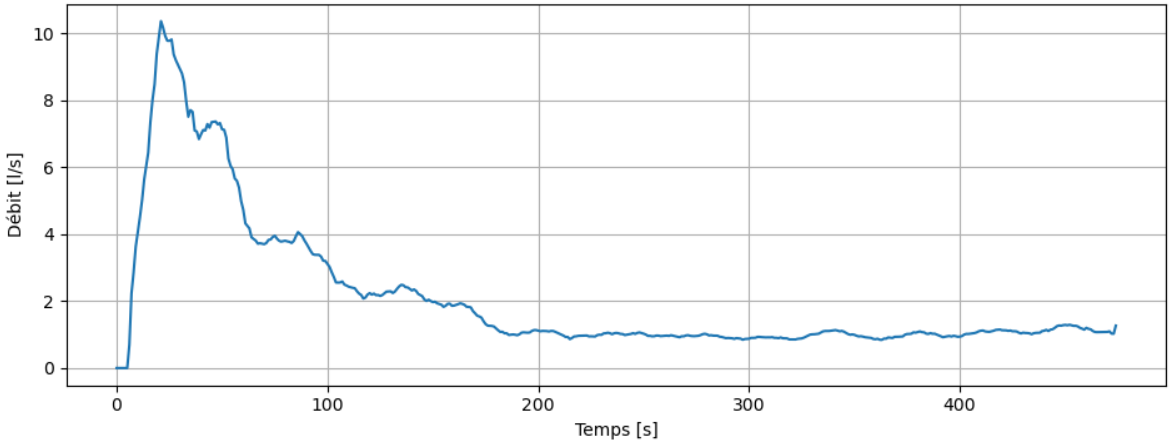


FIGURE 4.60 – Hydrogramme de la quatrième configuration.

Le débit se stabilise au bout d'environ 200 secondes. Le temps final sera de 360 secondes.

➢ Stabilisation du niveau de l'eau :

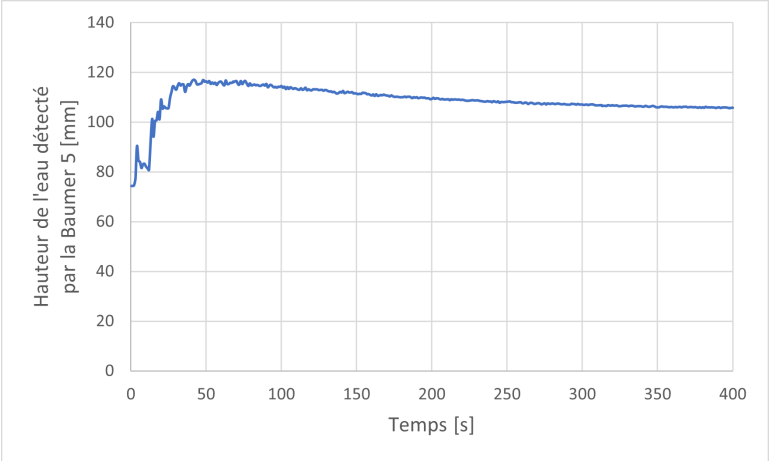


FIGURE 4.61 – Hauteur de l'eau en fonction du temps captée par la Baumer 5. Il s'agit donc de la hauteur d'eau 158 cm en aval de la porte de barrage.

Après 360 secondes, le niveau de l'eau se stabilise et est à 106.01 mm. L'expérience a donc une durée totale de 360 secondes.

Passage de *pressure flushing* à *drawdown flushing*

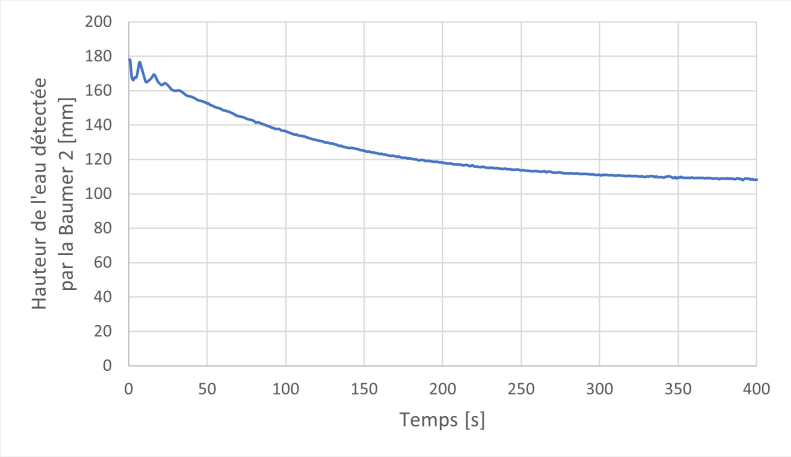


FIGURE 4.62 – Hauteur de l'eau en fonction du temps captée par la Baumer 2. Il s'agit donc de la hauteur d'eau à 11 cm en amont de la porte de barrage.

Dans cette dernière configuration, le passage au *drawdown flushing* survient visiblement après 136 secondes, lorsque la Baumer 2 affiche une hauteur de 127.2 mm. Ainsi, la Baumer 2 sert de référence, indiquant que le seuil du *drawdown flushing* est atteint dès que son signal montre une hauteur de 127.2 mm.

Évolution de la topographie pendant l'écoulement

Avec cette nouvelle configuration, l'impossibilité de traiter les images prises par la caméra rencontrée dans la configuration 3 n'est plus rencontrée.

L'érosion est progressive et se stabilise après 124 secondes d'expérience pour n'évoluer que très légèrement sur les 163 secondes suivantes.

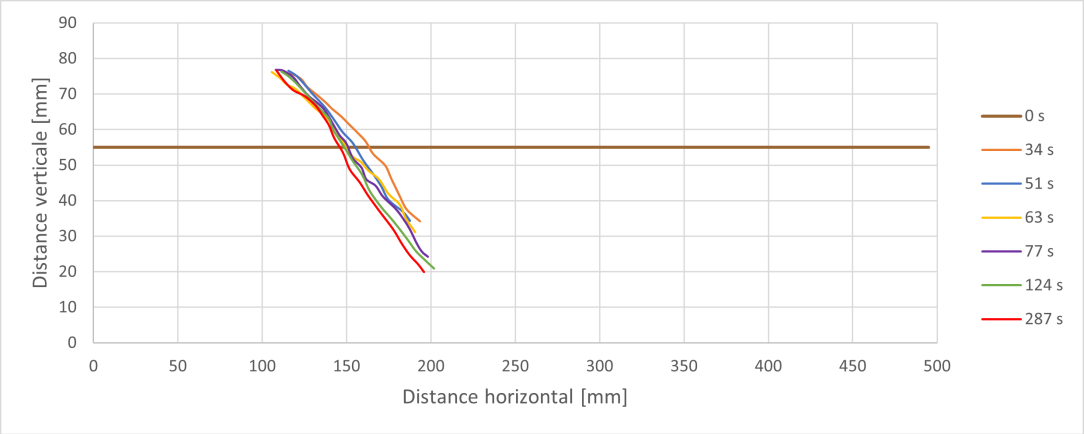


FIGURE 4.63 – Evolution morphologique transversale du lit aval au cours du temps. Les abscisses correspondent à la position sur la largeur du canal.

La pente approchée du talus après 287 s d'expérience peut être approchée, tout comme dans la configuration 1, par une courbe de tendance linéaire formant un angle de 34.38° ou 68.42%.

Bilan morphologique final

Avec cette configuration, on peut observer qu'une plus petite quantité de sable à l'amont permet à l'eau de s'évacuer avec une plus grande énergie et ainsi créer une zone érodée à l'aval de la porte. On peut bien distinguer cette zone sur la figure 4.64 où le plancher est visible sur environ 50 cm vers l'amont et ce avec une largeur d'environ 10 cm. L'image 4.65 montre un relevé topographique réalisé grâce à la photogrammétrie.

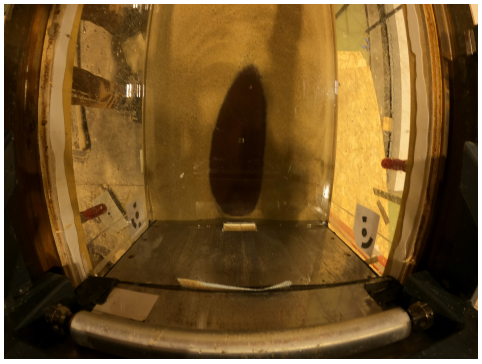


FIGURE 4.64 – Photo de l'érosion à l'aval de la porte. Le sens de l'écoulement est vers le haut.

Malheureusement, la photogrammétrie pour cette expérience a été réalisée avec un sable encore trop mouillé, ce qui créait des reflets sur les photos. C'est la raison pour laquelle l'image de la figure 4.65 est légèrement brouillée. Cependant, on peut tout de même observer une zone d'érosion en bleu et sur les pourtours de cette zone, une zone de dépôt. Cette situation est assez semblable d'un premier

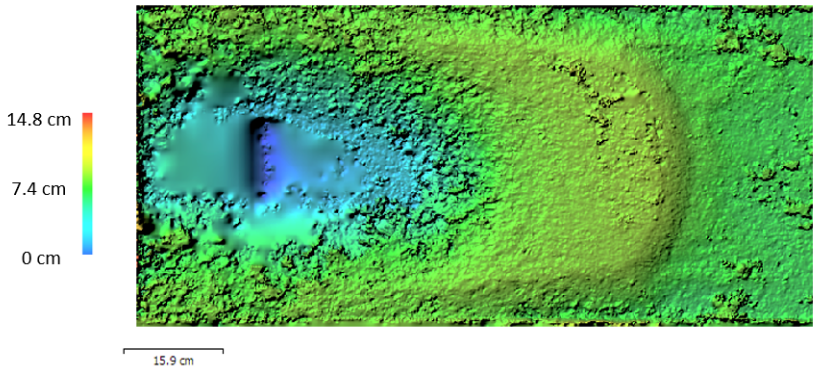


FIGURE 4.65 – Relevé topographique réalisé avec la photogrammétrie de la configuration 4 après expérience.

abord à la configuration 1 sans sable à l'amont mais une différence en terme de volume de sable est tout de même présente. Le volume total de sédiment à l'aval calculé par Metashape en fin d'expérience pour cette configuration est de 0.0559 m^3 tandis que le volume calculé durant la configuration 1 était de 0.0527 m^3. Il est tout a fait normal que cette nouvelle configuration renvoie un volume plus important, étant donné qu'il y a du sable provenant de l'amont de la porte. Afin de s'approcher du volume de sédiments chassé du réservoir vers l'aval, le calcul présenté en configuration 2 peut être fait :

$$S_a = S_f + S_p - S_i \tag{4.8}$$

avec S_a le volume de sable venant de l'amont, S_f le volume final de sable sur 2 mètre à l'aval de la porte, ici 0.0559 m^3, S_p le volume de sable parti au delà des 2 mètres (0.0023 m^3, valeur calculée en configuration 1) et S_i le volume de sable initial, donc 0.055 m^3. Après calcul, S_a vaut 0.0032 m^3.

Évolution de la concentration en sédiments

Premièrement, il est intéressant d'observer la tendance du transport de sédiments. Pour observer cela, la mesure prise est la même que pour la configuration 1, 2 et 3. Il s'agit de regarder à l'intensité de l'écho reçu par la sonde UVP 1 à un niveau de 6.5 cm par rapport au plancher du canal. La figure 4.66 montre la tendance du transport en suspension. C'est durant les 100 premières secondes que la plus grande partie des sédiments en suspension est présente, ensuite la présence de sédiments s'atténue et se stabilise. Il est important de noter que cette mesure est prise à 6.5 cm du fond du canal et que cela ne représente qu'un échantillon à une hauteur

précise du canal.

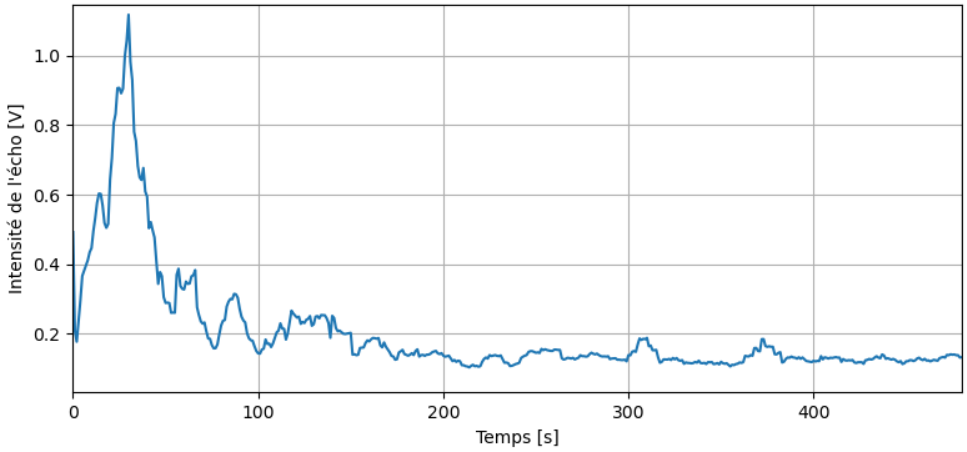


FIGURE 4.66 – Intensité de l'écho reçu par la sonde UVP à une hauteur de 65 mm par rapport au plancher du canal.

Il est intéressant maintenant d'observer à quel moment l'érosion atteint le plancher du canal. Pour ce faire, la figure 4.67 montre 2 profils d'intensité de l'écho. Un premier profil en bleu indique que le fond du canal a déjà été atteint au bout de 10 secondes. On peut y observer un pic à 95 mm de la sonde, soit au niveau du plancher. Un autre profil en orange à 100 secondes est également tracé et on y retrouve également ce pic. Cela veut dire que le niveau du fond n'évolue plus au droit de la sonde à partir de 10 secondes.

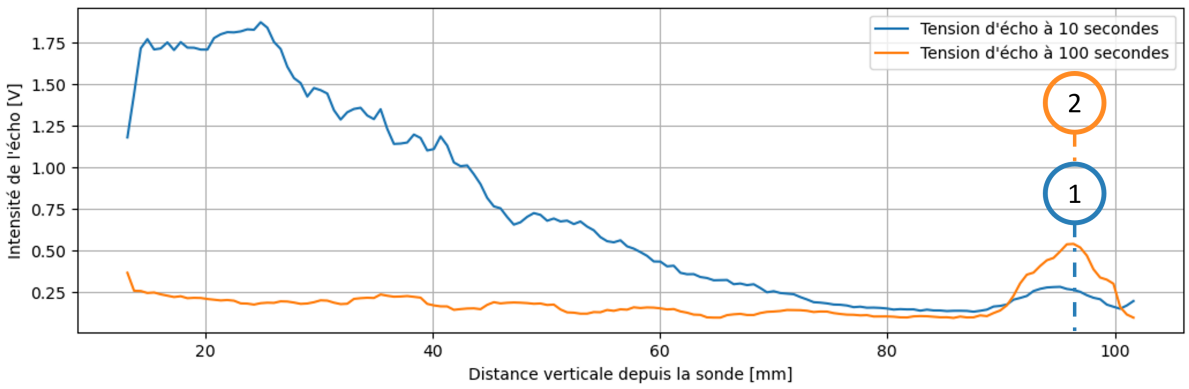


FIGURE 4.67 – Intensité de l'écho reçu par la sonde à 10 s et 100 s. La sonde se trouve à 95 mm de hauteur, pics aux points 1 et 2 indiquent que le lit du canal est érodé jusqu'au plancher.

Comme pour les configurations 1 et 2, les profils de concentration en sédiments peuvent être trouvés via la méthode explicite et la méthode implicite.

➢ Mesure de concentration par la méthode explicite :

Comme expliqué précédemment, la méthode explicite nécessite de connaître la première valeur de concentration du profil. Pour connaître la première valeur, la technique de comptage de particules avec la feuille laser est utilisée. Ce comptage se fait dans la fenêtre en mauve sur l'image 4.68 et cette fenêtre représente un volume de 6.2 cm^3.

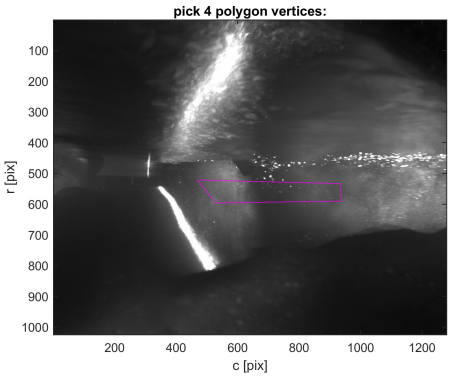


FIGURE 4.68 – Fenêtre en mauve dans laquelle les particules sont comptées.

Cette évolution de la concentration en sédiments au droit de la sonde UVP est présentée sur la figure 4.69. Ce qui ressort de cette figure est que la concentration est relativement élevée mais également assez constante. Le début présente des pics mais au bout de 135 secondes, la concentration se stabilise.

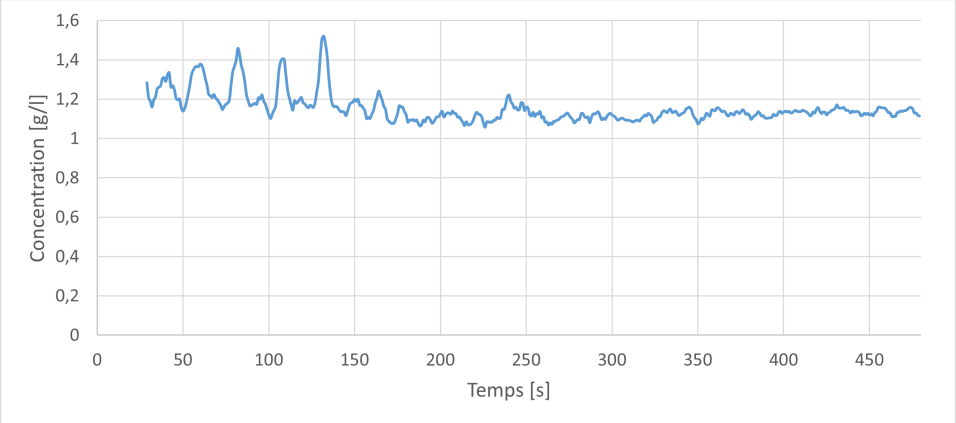


FIGURE 4.69 – Évolution de la concentration au droit de la sonde UVP 1.

En connaissant la valeur initiale de concentration, il est possible de dessiner des profils de concentration. Le tableau 4.6 présente 3 valeurs de concentration

pour dessiner ces profils à 50 s, 200 s et 350 s. Ces 3 profils sont dessinés sur la figure 4.70. On peut y observer qu'une concentration plus importante est présente sur le profil de concentration à 50 secondes.

Temps [s]	50	200	350
Concentration initiale [g/l]	1.14	1.11	1.05

TABLE 4.6 – Tableau des concentration initiales au droit de la sonde UVP à trois temps différents.

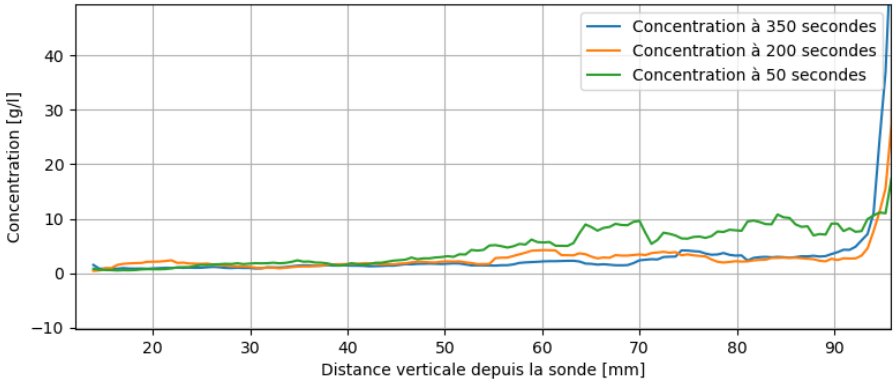


FIGURE 4.70 – 3 profils de concentration à 50, 200 et 350 secondes. La distance 95 mm représente le fond du canal tandis que 0 mm représente la hauteur de la sonde.

➢ Mesure de concentration par la méthode implicite :

La figure 4.71 présente les profils calculés avec la méthode implicite. Ces profils ont la même allure que les profils de la méthode explicite. Comme pour la méthode implicite, le profil à 50 secondes a une concentration plus élevée que sur les autres profils. Encore une fois, les valeurs de concentrations sont différentes et un travail plus approfondi de calibration de la méthode devrait être fait afin de valider cette dernière.

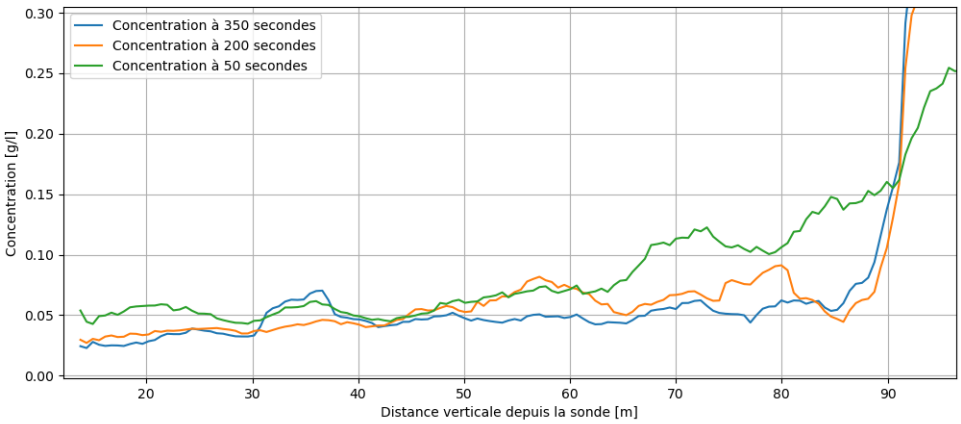


FIGURE 4.71 – Profil de concentration à 3 temps différents calculé avec la méthode implicite.

Conclusion de la configuration 4

Cette configuration avait pour objectif d'étudier la concentration en sédiments ainsi que l'érosion et le dépôt lorsque le réservoir avait un niveau de sédiment de 9 cm. Cette hauteur se situe sous le niveau supérieur de la porte. Les points suivants ont pu être observés :

- L'hydrogramme présente une valeur maximale supérieure aux configurations avec plus de sable à l'amont. Ceci peut s'expliquer par la hauteur d'eau entre le lit de sédiment du réservoir et la surface de l'eau qui est plus importante (figure 4.60).
- La technique du LPT a montré que la plus grande partie de l'érosion à l'aval s'est produite durant les premières 50 secondes. La sonde UVP 1 a montré que cette érosion a atteint le plancher du canal et aucun dépot ne s'est accumulé à la sortie de la porte. Ceci indique que les sédiments chassés du réservoir ont été se déposer sur les pourtours et plus à l'aval de la zone érodée.
- L'évolution de la concentration au cours du temps est plutôt stable. La turbidité provoquée juste après l'ouverture de la porte n'a pas permis de récolter des informations intéressantes sur les 25 premières secondes avec la technique de comptage de particules dans la feuille laser.
- La méthode implicite montre que le profil à 50 secondes est plus chargé en sédiment, et ce surtout au niveau du fond du canal.

4.2.5 Comparaison des différentes configurations

Dans le but de comparer les 4 configurations menées, une partie des résultats principaux ont été rassemblés dans le tableau suivant :

Configuration	Config. 1	Config. 2	Config. 3	Config. 4
Niveau initial des sédiments à l'amont [mm]	0	125	160	90
Durée de l'expérience [s]	300	480	360	360
Passage de pressure flushing à drawdown flushing [s]	150	150	123	136
Volume déposé final [dm^3]	0	5	16.4	0.9

TABLE 4.7 – Comparaison de différents résultats des 4 configurations.

Il faut noter que la configuration 3 a un niveau de sédiments plus élevé à l'amont que les configurations 2 et 4. Cette présentation des configurations ne suit pas une logique en terme de niveau de sédiment à l'amont. Ceci est justifié par le fait que seules les configurations 1 et 2 devaient être étudiées dans un premier temps. Les configurations 3 et 4 ont donc été réalisées par la suite pour approfondir l'analyse de l'influence de la hauteur du lit de sédiment amont initial sur les résultats obtenus.

Durée d'expérience

La durée des expériences a été décidée par la stabilisation du débit à l'aval et de la hauteur de la hauteur d'eau à l'aval. Il est possible de constater dans la tableau 4.7 que les temps d'expérience n'est pas proportionnel à la hauteur du lit de sédiment initial à l'amont. Ceci signifie qu'aucune relation n'a pu être établie entre le temps d'expérience et la configuration initiale.

Le même constat se pose pour le temps de passage de *pressure flushing* à *drawdown flushing*.

Analyse des hydrogrammes

Dans un second temps, la figure 4.72 permet de conclure que dans les 2 configurations où le lit de sédiments initial est le plus grand, à savoir la configuration 2 et 3, le

débit maximal enregistré en aval est inférieur à la situation où il y a moins et pas de sédiments en amont. Ceci peut s'expliquer par une plus faible hauteur d'eau initialement présente dans le réservoir et donc une plus faible pression à l'amont, ce qui génère un débit plus faible.

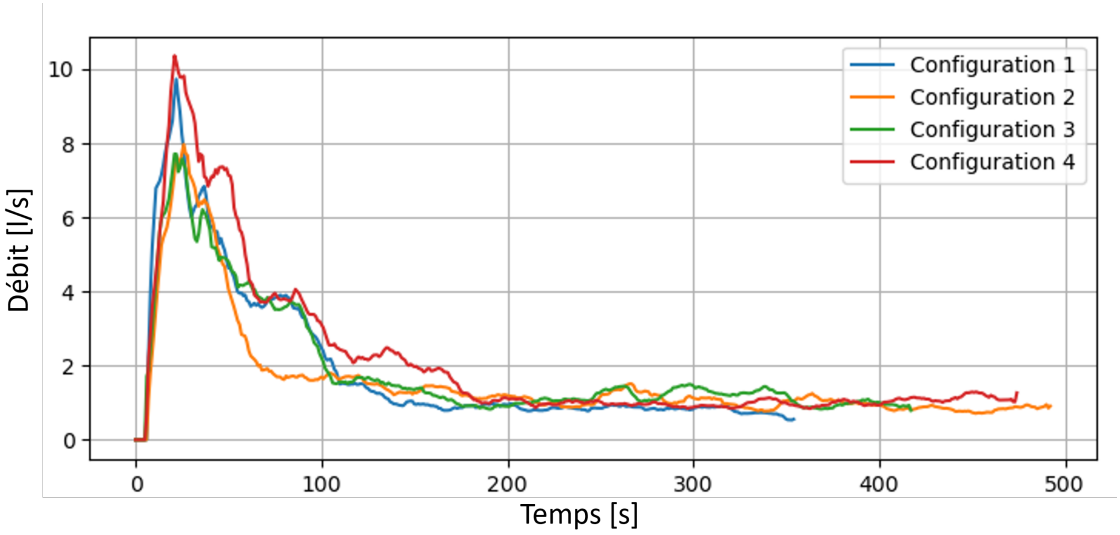


FIGURE 4.72 – Hydrogramme des 4 configurations.

Évolution de la concentration à l'aval

Dans un troisième temps, en regroupant les courbes d'évolution de la concentration pour les 3 configurations exploitables, la figure 4.73 est obtenue :

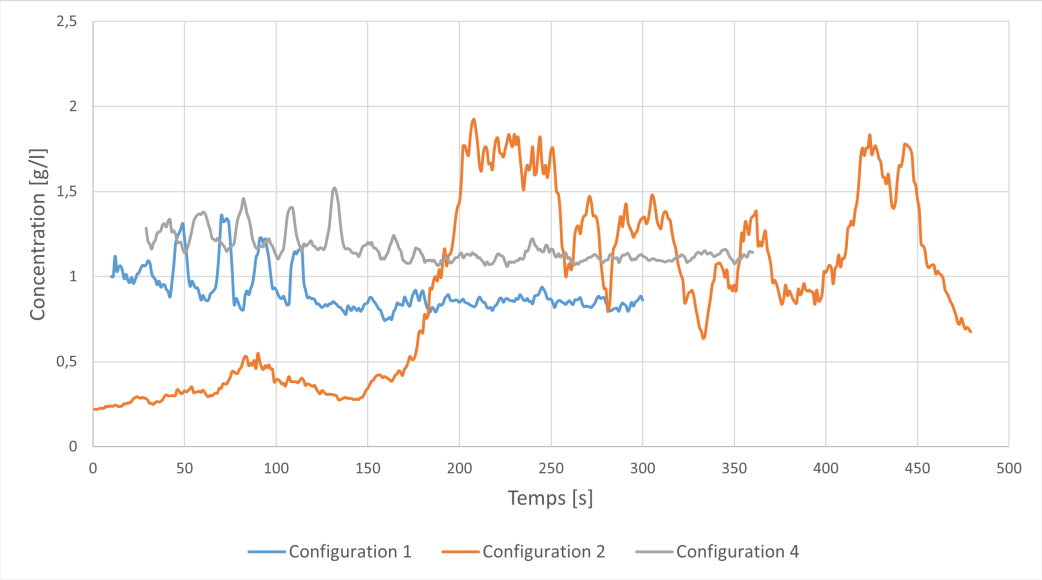


FIGURE 4.73 – Évolution de la concentration à l'aval en fonction du temps pour 3 configurations mesurée avec la technique de comptage de particules par la feuille laser.

Sur la figure 4.73, la configuration montrant le plus clairement le passage de *pressure flushing* à *drawdown flushing* est la configuration 2. Ce changement de phase se produit à 150 secondes et la concentration y est soudainement bien plus importante, ce qui confirme la théorie de [White, 2001]. La configuration 2 est celle avec un lit amont de 12.5 cm tandis que la configuration 1 et 4 ont un lit à l'amont de respectivement 0 cm et 9 cm. Pour rappel, le niveau 12.5 cm est le niveau du seuil supérieur de la porte. La figure 4.74 schématise cette configuration. Au temps $t = 0s$, la porte est fermée. Presque instantanément après ouverture, dans les 10 premières secondes, un cône se forme juste à l'amont de la porte. Ensuite, une fois que l'écoulement passe en surface libre, il développe une tendance beaucoup plus laminaire. De plus, la hauteur h sur la figure 4.74 est beaucoup plus petite, ce qui engendre une vitesse bien plus importante et une augmentation de la contrainte de cisaillement. Dès lors, la capacité de transport, d'après l'équation de Meyer-Peter-Müller [Soares-Frazão, 2022a], augmente, ce qui provoque une érosion plus importante.

La configuration 4 a seulement 9 cm de sédiments à l'amont et l'érosion du réservoir se fait donc progressivement car la hauteur d'eau est plus grande. Le passage en *drawdown flushing* n'est pas aussi marqué. Cette érosion progressive est la raison pour laquelle l'évolution de la concentration est beaucoup plus constante. Elle est schématisée sur la figure 4.75.

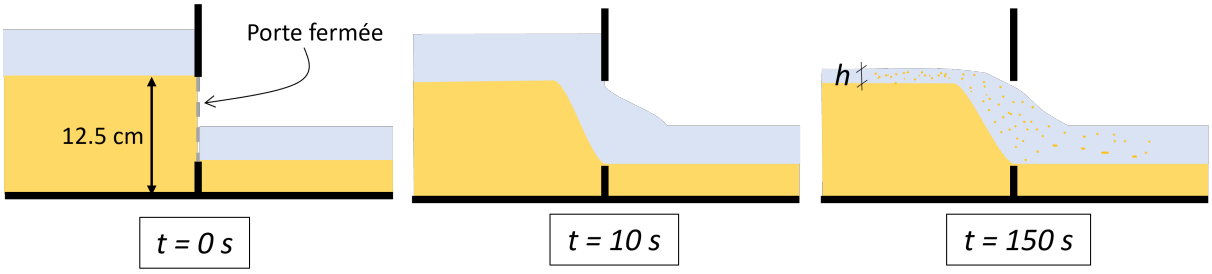


FIGURE 4.74 – Coupe longitudinale du canal lors de différentes phases de la chasse pour la configuration 2.

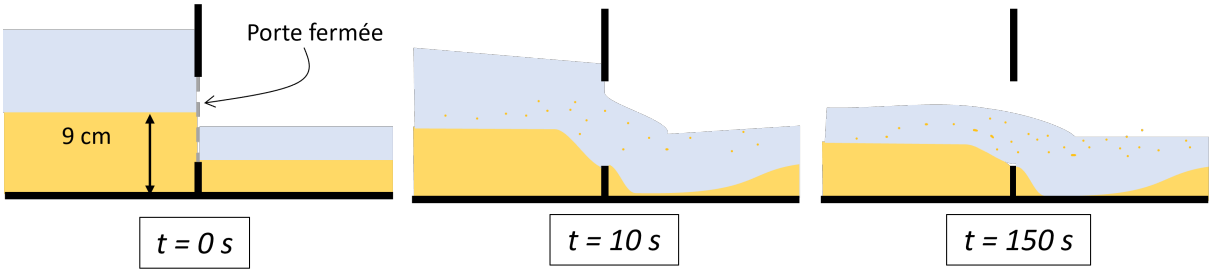


FIGURE 4.75 – Coupe longitudinale du canal lors de différentes phases de la chasse pour la configuration 4.

Évolution de la topographie aval

L'étude de l'évolution temporelle de la topographie se faisait principalement avec le système LPT. Dans la configuration 3, ce système n'a pas pu être exploité en raison de la grande turbidité dans l'eau et en raison d'amas trop important de sédiments devant la caméra.

Concernant les autres configurations, il a été observé que l'érosion du lit à l'aval de la porte était très rapide. L'ouverture de la porte pouvait créer des dépôts conséquents sur les bords de la zone érodée en moins de 30 secondes. De plus, lors de la configuration 2 avec 12.5 cm de sable à l'amont, un dépôt de sable a pu être observé à la sortie de la porte après le passage en *drawdown flushing*.

Bilan morphologique final

La hauteur initiale du lit en amont dans chaque configuration a engendré divers phénomènes observables sur les 2 m étudié de lit aval :

Dans la première configuration, où il n'y a pas de sable initialement en amont, les premiers centimètres subissent une érosion jusqu'au plancher du canal et la majeure

partie du sable érodé se dépose sur les pourtours de cette zone érodée (figure 4.15).

Dans la deuxième configuration, avec un réservoir rempli à 12.5 cm de sable, l'eau érode de nouveau les premiers centimètres du lit en aval, qui se déposent de la même manière que lors de la configuration 1, mais le creux laissé par l'érosion est comblé par du sable venant de l'amont lors de la phase de *drawdown flushing* (figure 4.37). Lors des expériences pour cette configuration, les dépôts n'étaient pas toujours similaires et pas toujours centrés sur l'axe du canal mais les comportements avant et après le *drawdown flushing* étaient comparables.

Dans la troisième configuration avec des sédiments sur 16 cm de hauteur dans le réservoir, le dépôt venant de l'amont est si conséquent qu'aucune trace d'érosion n'est visible en aval à la fin de l'expérience, à l'exception des quelques centimètres juste après la porte (figure 4.54).

Finalement, dans la quatrième configuration, la hauteur initiale limitée du lit en amont (9 cm) ne permet pas la création d'un dépôt suffisant en aval pour créer un dépôt dans la zone érodée qui s'est formée (figure 4.65).

En toute logique, plus la hauteur du lit en amont est élevée, plus le dépôt aval augmente. La différence notoire est que lorsque le lit à l'amont est plus haut que le seuil supérieur de la porte, une différence entre les phase de *pressure* et *drawdown flushing* est visible, que ce soit par l'évolution de la concentration dans l'eau ou par la formation d'un dépôt à la sortie de la porte.

Observation de phénomènes ponctuels

Durant les expériences, certains phénomènes ont été observés. Les réponses envoyées par les différents instruments de mesures pouvaient parfois être surprenantes, c'est pourquoi une analyse approfondie de ces différents phénomènes devait être menée afin de pouvoir expliquer ce qui était observé. Il y a par exemple la création d'une dune observée sur le dépôt de la configuration 2 (figure 4.46). Il y a également l'observation de l'arrachement d'amas de sable sur les pentes des talus (figure 4.22). Ces phénomènes rappellent qu'il est compliqué de garder le contrôle sur tout ce qui se passe lors d'une expérience.

Chapitre 5

Recommandations

A posteriori, plusieurs pistes d'améliorations ont été recensées. Elles visent à obtenir des résultats plus précis et sont répertoriées dans l'optique d'aider toute personne venant à travailler sur un sujet semblable à l'avenir.

- ➢ En raison de la faible épaisseur de la porte de barrage, les effets de bord sont inévitables et la symétrie du jet sortant n'est pas garantie. Par conséquent, pour mieux refléter les conditions réelles au niveau de la porte, il serait nécessaire d'approfondir le seuil de la porte du barrage. Ceci permettrait à l'eau et aux sédiments de circuler à travers un conduit de plusieurs centimètres de large en vue de l'obtention d'un jet sortant plus symétrique.
- ➢ Utiliser une caméra avec une meilleure résolution pourrait s'avérer bénéfique pour obtenir des images de qualité optimale qui seraient plus compatibles avec le code élaboré par le Professeur Hervé Capart. Ce code permet compter le nombre de particules dans une fenêtre et ainsi d'en déduire une concentration, comme expliqué dans la section 3.4.3 [Spinewine et al., 2011]. Il est important de préciser que les images capturées au cours de ce mémoire étaient légèrement floues, ce qui a engendré de petites imprécisions lors du dénombrement des particules. De plus, l'utilisation d'une caméra dotée d'une ouverture plus grande serait avantageuse pour minimiser les traînées visibles derrière les particules. En effet, une caméra avec une petite ouverture capture la lumière sur un plus grand laps de temps et la traînée d'une particule y est fortement visible, comme on peut l'observer sur l'image 5.1. Idéalement, un travail devrait être fait afin de trouve le bon équilibre entre le temps d'ouverture de la lentille et ta taille de l'ouverture.
- ➢ Il aurait été pertinent d'effectuer un bilan final de la topographie sur le lit amont. Cependant, en raison de la configuration de la porte de barrage (comme

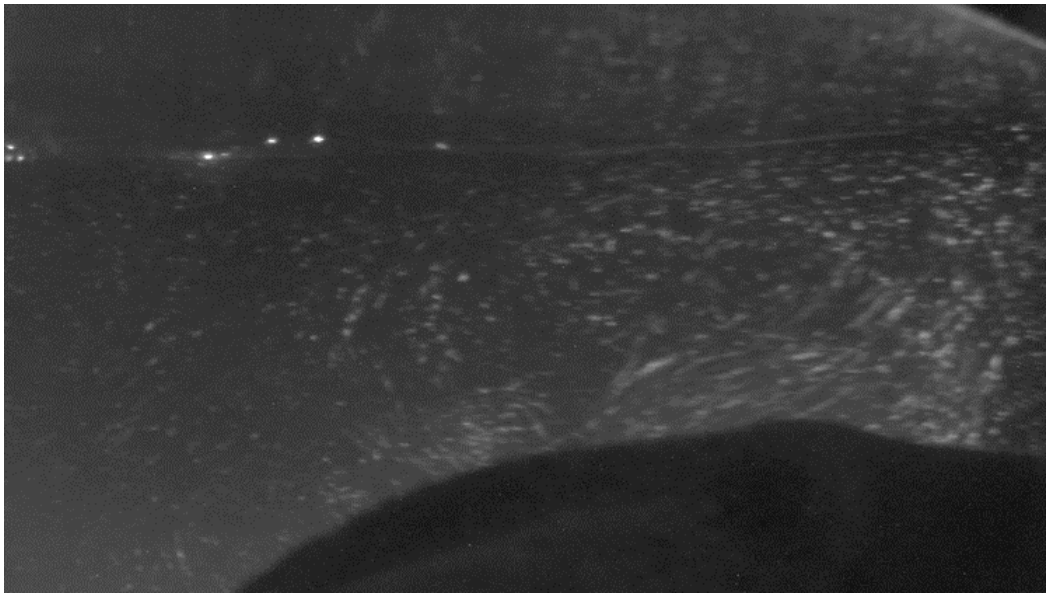


FIGURE 5.1 – Image montrant des traînées de lumières derrières les particules en mouvement due à une trop petite ouverture de la lentille de la caméra.

illustré dans la figure 5.2), la capture d'images exploitables par le logiciel Metashape était impossible. En effet, les barres d'armatures gênaient la bonne prise d'images. En essayant de faire des photos en dessous de ces armatures, les images capturées avaient un champ trop réduit et le recouvrement entre photos n'était pas possible. Afin de remédier à cette limitation, il serait intéressant de repenser la structure de la porte de barrage.

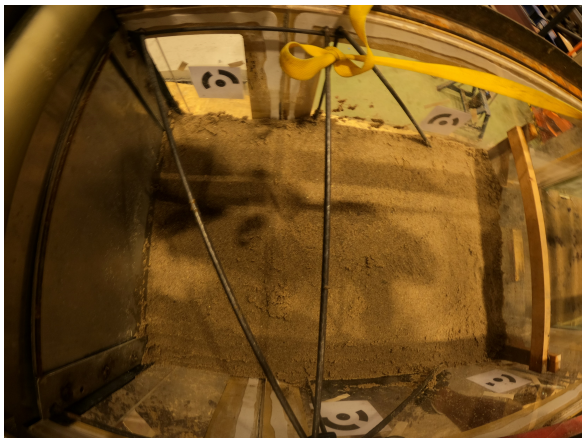


FIGURE 5.2 – Photo de la structure de la porte du barrage à l'amont avec un lit de sable installé.

- ➢ Pour réaliser un bilan topographique propre, la photogrammétrie est d'application. Cette technique nécessite des photos du canal après l'expérience. Pour faire ces photos, de nombreuses conditions doivent être réunies. Premièrement, il est important de faire en sorte que les photos prises puissent se chevaucher. Ensuite, le programme réagit très mal lorsqu'il y a présence d'eau sur les photos car cette présence crée des reflets.
- ➢ Comme détaillé dans l'analyse de la configuration 3, dans le cas où le lit de sable initial à l'amont devrait dépasser le seuil supérieur de la porte, il faudrait repenser la porte ainsi que les différents paramètres d'expérience afin de permettre une bonne récolte de données par l'ensemble des appareils de mesures utilisés.

Chapitre 6

Conclusion

Au travers de ce mémoire, l'ensemble des objectifs fixés dans le chapitre 1 ont été abordés. Certains résultats clés ont pu confirmer les attentes tandis que d'autres ont apporté un nouvel éclairage. Certaines limites au protocole expérimental et aux méthodes de mesure utilisées ont également pu être identifiées.

Dans un premier temps, le design d'une méthode expérimentale et le choix des différents paramètres initiaux à appliquer a permis de reproduire une chasse idéalisée en laboratoire. L'ensemble de ces choix a été détaillé dans le chapitre 2.

Ensuite, l'apprentissage de l'utilisation de divers appareils de mesure a été effectué (chapitre 3). Parallèlement, une méthode permettant de tirer des informations sur la concentration en sédiments à l'aide de sonde UVP a été développée. Dans un premier temps, la méthode explicite a été étudiée, mais cette méthode nécessite de connaître les concentrations sur un échantillon au droit de la sonde pour pouvoir dessiner un profil complet de concentration. Pour trouver cette valeur de concentration, une autre technique a été utilisée : la technique de comptage de particules au travers d'une feuille laser. Cette technique, développée par le Professeur Hervé Capart, a été adaptée au cas présent et à permis d'étudier l'évolution de la concentration au cours du temps en un point du canal. Ensuite, une méthode implicite a été développée. Cette méthode, avec un processus itératif de Newton-Raphson, permet de s'approcher de la valeur de la concentration. Néanmoins, un travail important aurait pu être fait afin de calibrer cette mesure mais le dispositif à mettre en place afin de faire cela dépassait le cadre de ce travail.

Ces appareils de mesure ont été mis en application directe dans le canal expérimental et il a été possible d'étudier les différentes étapes d'une chasse de barrage, à savoir le passage de *pressure flushing* à *drawdown flushing* (tableau 4.44). Les influences à l'aval de ces différentes phases ont pu y être observées. L'analyse complète des

4 différentes configurations a permis de dresser une comparaison générale et d'en tirer une série de conclusions détaillées en fin de chapitre 4 qui sont reprises de manière succincte ici :

- ➢ Avec une présence importante de sédiments à l'amont, l'évolution de la concentration montre une forte amplitude sur les premières secondes. Ceci s'explique par le dégagement de la porte à l'amont pour former un cône.
- ➢ La transition entre *pressure flushing* et *drawdown flusing* étapes se traduit par une augmentation de la concentration en sédiments mesurée à l'aval (figure 4.73). Néanmoins, cette transition n'est clairement observable que lorsque le niveau de sédiments initiale à l'amont arrive au niveau du seuil supérieur de la porte.
- ➢ Lorsque le niveau du lit de sédiments à l'amont est initialement inférieur au seuil supérieur de la porte, l'érosion à l'amont est constante et régulière, ce qui engendre une évolution de la concentration en sédiments relativement constante au cours du temps.
- ➢ Plus la hauteur du lit initial à l'amont est élevée, plus le dépôt qui se forme en aval augmente. Ce dépôt s'installe en partie dans la zone qui a été érodée à l'aval lors du *pressure flushing*.
- ➢ Moins le lit de sédiments initial à l'amont est élevé, plus le débit maximal enregistré en aval est élevé (figure 4.72).

Au travers de ce mémoire, les limites de cette méthode expérimentale ont été découvertes et c'est pour cela que des recommandations ont finalement été apportées dans le but d'aider toute personne se lançant sur l'étude d'un sujet similaire.

En plus de poursuivre ces divers objectifs, ce mémoire nous a permis d'améliorer nos compétences en conception d'expérience, en rigueur, en sens critique et en analyse. Ce mémoire a également renforcé notre capacité à collaborer en binôme et a contribué à renforcer notre esprit d'équipe, compétences essentielles pour notre vie future.

Bibliographie

Bernhard Lehner and al. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(9) :494–502, 2011. doi : 10.1890/100125.

CORPS OF ENGINEERS WASHINGTON DC. Engineering and design : Hydraulic design of navigation dams. 1987.

International Commission on Large Dams. The role of dams. online, 2017. URL `https://www.icold-cigb.org/GB/dams/role_of_dams.asp`. Consulté le 3 mai 2023.

Le Figaro. Le barrage chinois des Trois Gorges bat le record mondial de production électrique. `https://www.lefigaro.fr/conjoncture/le-barrage-chinois-des-trois-gorges-bat-le-record-mondial-de-production-electric` janvier 2021. Consulté le 2 mai 2023.

Febeg. Statistiques de l'électricité. Online, 2023. URL `https://www.febeg.be/fr/statistiques-electricite`. Consulté le 8 juillet 2023.

Chine Escapade. Barrage des trois gorges, 2023. URL `https://www.chineescapade.com/guide-touristique/Yichang/Barrage-des-Trois-Gorges.html`. Consulté le 16 juillet 2023.

GIS Asie. Les déplacés des trois gorges. Online, 2008. URL `https://www.gis-reseau-asie.org/fr/les-deplaces-des-trois-gorges`. Consulté le 21 mai 2023.

Christiane Galus. La fin de baiji, déesse du fleuve. *Le Monde*, août 2007. URL `https://www.lemonde.fr/planete/article/2007/08/10/la-fin-de-baiji-deesse-du-fleuve_943415_3244.html`.

Le Monde avec AFP. Barrage sur le nil : l'Égypte dénonce la poursuite du remplissage par l'Éthiopie. *Le Monde*, juillet 2021. URL `https://www.lemonde.fr/afrique/article/2021/07/06/`

barrage-sur-le-nil-l-egypte-denonce-la-poursuite-du-remplissage-par-l-ethiopie_6087174_3212.html. Consulté le 8 juillet 2023.

F. Jonard. LBRES2204 - Gestion intégrée des ressources en eau - Partie 1. 2022. URL https://moodle.uclouvain.be/course/view.php?id=1331.

S. Soares-Frazão. LGCIV2053 - Fluvial hydraulics - Morphological evolution of rivers - principles. 2022a. URL https://moodle.uclouvain.be/mod/folder/view.php?id=235405.

R. White. Evacuation of sediments from reservoirs. 2001.

Gregory Morris. Classification of management alternatives to combat reservoir sedimentation. *Water*, 12(3) :861, Mar 2020. ISSN 2073-4441. doi : 10.3390/w12030861. URL http://dx.doi.org/10.3390/w12030861.

L. van der Spuy. Hydraulic optimisation of a postuled sediment flushing system in low-level dam outlets. 2020.

G. Petkovšek, M. Roca, and Y. Kitamura. Sediment flushing from reservoirs : a review. 2020. URL https://doi.org/10.1680/jdare.20.00005.

RTS. Vidange du barrage de verbois. Online, 2012. URL https://www.rts.ch/info/galeries-photos/4066446-vidange-du-barrage-de-verbois.html. Consulté le 19 mai 2023.

A. Clement. BMEEOVKMV62 - WATER QUALITY MANAGEMENT - Basics of water quality. 2022. URL https://moodle.uclouvain.be/mod/folder/view.php?id=235405.

E. Baran and J. Nasielski. Reservoir sediment flushing and fishresources. natural heritage institute, program report for :a climate resilient mekong : Maintaining the flows thatnourish life. 2021. URL https://n-h-i.org/wp-content/uploads/2017/02/Report_1_Reservoir_Sediment_Flushing_and_Fish_Resources.pdf.

Aldo Doretto, Tiziano Bo, Francesca Bona, Maria Apostolo, Diego Bonetto, and Stefano Fenoglio. Effectiveness of artificial floods for benthic community recovery after sediment flushing from a dam. *Environmental monitoring and assessment*, 191(2) :88, 2019.

Fédération de pêche des Hautes-Alpes. Durance : Vidange de la micro-centrale de pont baldy, chronique d'une catastrophe écologique annoncée. Online, 2021. URL https://peche-hautes-alpes.com/durance-vidange-de-la-micro-centrale-de-pont-baldy-chronique-dune-catastrophe-ec
Consulté le 2 mai 2023.

Gouvernement du Canada. Agriculture et qualité de l'eau, 2020. URL https://agriculture.canada.ca/fr/environnement/protection-bassins-hydrographiques/agriculture-qualite-leau. Consulté le 16 juillet 2023.

C. Catheline. Vidange des barrages edf : quels impacts sur l'environnement. 1998. URL https://www.u-picardie.fr/beauchamp/duee/cathelin/cathelin.htm.

Stephanie Guillén-Ludeña, Juan A. Toapaxi, and Luis G. Castillo. Flushing capacity of a stored volume of water : An experimental study. *Water*, 14 :2607, 2022. doi : 10.3390/w14172607. URL https://doi.org/10.3390/w14172607. Academic Editors : Sanjay Giri and Biswa Bhattacharya.

Junjian Deng. Dynamique des sédiments fins dans les systèmes de bancs de galets alternés d'une rivière de montagne aménagée. 2022.

Met-Flow. *UVP Monitor User's Guide*. Met-Flow SA, Lausanne, 2011.

Ubertone. River sediment transport. online, 2023. URL https://ubertone.com/applications-river_sediment_transport.html. Consulté le 2 août 2023.

Baumer. Fonctionnement et technologie de la mesure de niveau et des capteurs de niveau. Online, 2023. URL https://www.baumer.com/ch/fr/service-assistance/fonctionnement/fonctionnement-et-technologie-de-la-mesure-de-niveau/a/Know-how_Function_Level-sensors#ultrasonic. Consulté le 5 mai 2023.

R. Meurice, S. Martínez-Aranda, M. Ebrahimi, S. Soares-Frazão, and P. García-Navarro. Laser profilometry to measure the bed evolution in a dam-break flow. *Journal of Hydraulic Research*, 60(5) :725–737, 2022. ISSN 2073-4441. doi : 10.1080/00221686.2022.2059584. URL https://doi.org/10.1080/00221686.2022.2059584.

Agisoft Metashape. Online, 2023. URL https://www.agisoft.com/. Consulté le 15 juin 2023.

S. Soares-Frazão. LGCIV2053 - Fluvial hydraulics - Sedimentology. 2022b. URL https://moodle.uclouvain.be/mod/folder/view.php?id=235405.

Victor Anciaux and Benoît Schoeps. *Design of a mechanical system for the experimental study of the collapse of a granular column in water at rest : validation and flow measurements using imaging techniques*. PhD thesis, Ecole polytechnique de Louvain, Université catholique de Louvain, 2023.

Allied Vision Technologies GmbH. Allied vision gige cameras. Online, March

2015. URL https://www.alliedvision.com/en/products/cameras/gige.html. Consulté le 12 mai 2023.

Laser Components GmbH. FLEXPOINT® line laser modules. Online, 2023. URL https://www.lasercomponents.com/de-en/product/flexpoint-line-laser-modules/. Consulté le 12 mai 2023.

S. Abbeels and M. Messens. Etude expérimentale et numérique du transport de sédiment dans un coude à 90°. 2019. URL http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:19563.

Peter D Thorne and Peter J Hardcastle. Acoustic measurements of suspended sediments in turbulent currents and comparison with in-situ samples. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 101(5) :2603–2614, 1997.

G Antoine, Benoît Camenen, M Jodeau, J Némery, and Michel Esteves. Downstream erosion and deposition dynamics of fine suspended sediments due to dam flushing. *Journal of Hydrology*, 585 :124763, 2020.

Jinyu Sheng and Alex E. Hay. An examination of the spherical scatterer approximation in aqueous suspensions of sand. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 83(2) :598–610, 02 1988. ISSN 0001-4966. doi : 10.1121/1.396153. URL https://doi.org/10.1121/1.396153.

Peter D Thorne and Daniel M Hanes. A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. *Continental shelf research*, 22(4) :603–632, 2002.

FH Fisher and VP Simmons. Sound absorption in sea water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 62(3) :558–564, 1977.

Julius S Bendat and Allan G Piersol. *Random data : analysis and measurement procedures*. John Wiley & Sons, 2011.

Francisco Pedocchi and Marcelo H García. Acoustic measurement of suspended sediment concentration profiles in an oscillatory boundary layer. *Continental Shelf Research*, 46 :87–95, 2012.

Andrew Downing, Peter D Thorne, and Christopher E Vincent. Backscattering from a suspension in the near field of a piston transducer. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97(3) :1614–1620, 1995.

Tae Hwan Lee and Daniel M Hanes. Direct inversion method to measure the concentration profile of suspended particles using backscattered sound. *Journal of Geophysical Research : Oceans*, 100(C2) :2649–2657, 1995.

Benoit Spinewine, Hervé Capart, Luigi Fraccarollo, and Michele Larcher. Laser

stripe measurements of near-wall solid fraction in channel flows of liquid-granular mixtures. *Experiments in fluids*, 50 :1507–1525, 2011.

Hamzah M. Beakawi Al-Hashemi and Omar S. Baghabra Al-Amoudi. A review on the angle of repose of granular materials. *Journal Name*, Volume(Issue) :Page numbers, 2018. doi : DOI. URL URL.

R. Meurice and S. Soares-Frazão. Machine learning rather than trial and error to close morphodynamical tunable parameters. 2023.

Chapitre 7

Annexes

7.1 Code python de la méthode implicite pour la mesure de la concentration en sédiments à l'aval

```
#Michel Henry, Guillaume Noel et Brieuc Bosseler
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

fich=open("expeLEMSC35.2.txt", "r", encoding="iso-8859-1")
lignes = fich.readlines()

a_s=0.00035          #taille des sediments [m]
rhos=2650            #masse volumique sediments [kg/m ]
temperature=20       #temperature en C
NumChan=0
NumProf=0
i=0
at=0.0025
M1=1                 #Concentration initiale sur laquelle iterer

#debut du reader pour recuperer les information des sondes UVP
indic=' '
while indic!='Time[s]':
    ligne=lignes[i].split()
    if len(ligne)>1:
        indic=ligne[0]+ligne[1]
        if indic == 'Numberof':
            if ligne[2]=='channels' :
                NumChan=int(ligne[4])
            else :
```

```
                NumProf=int(ligne[4])
        if indic == 'Samplingperiod':
            SamplingP=float(ligne[3])*10**-3 #temps d'
                                              echantillonnage en s
        if indic =='Maximumdepth':
            if ligne[3]=='=':
                MaxDepth = float(ligne[3])      #en mm
        if indic == 'Pulserep.' :
            PRF=float(ligne[4])             #en kHz
        if indic == 'Windowstart' :
            WindowStart = float(ligne[3])*10**-3
        if indic =='Angle=' :
            angle=float(ligne[2])
        if indic == 'Windowend' :
            WindowEnd=float(ligne[3])*10**-3
        if indic == 'Channeldistance':
            ChannelDistance = float(ligne[3])*10**-3
        if indic == 'Frequency=':
            f=float(ligne[2])
        if indic =='Cycles=':
            cycles=float(ligne[2])
        if indic =='Repetitions=':
            Repetitions=float(ligne[2])
        if indic =='USVoltage':
            Voltage=float(ligne[3])
        if indic=='Gainstart':
            gs=int(ligne[3])
        if indic=='Gainend':
            ge=int(ligne[3])
        i=i+1
    else:
        i=i+1
#fin du reader

#c = vitesse de l'onde dans l'eau
c=1405.03+4.624*temperature-3.83*10**-2*temperature**2
lambdaa=c/(f*10**6)

# transformation du facteur de gain au gain absolu
tf1=[1 ,1 , 2.17, 4.41, 8.82, 16.67, 33.33, 60, 150]
tf2=[1, 1, 0.91, 1.76, 3.41, 6.67, 15, 25, 60]
tf3=[1, 1, 0.65, 1.36, 2.8, 5.26, 11.11, 23.08, 42.86]
if f==0.5 or f==1 :
    g1=tf1[(gs-1)]
    g2=tf1[(ge-1)]
if f==2 or f==4 :
    g1=tf2[(gs-1)]
    g2=tf2[(ge-1)]
if f==8 :
```

```
    g1=tf3[(gs-1)]
    g2=tf3[(ge-1)]

#faire tableau de temps
temps=lignes[i-1].split()[2:]
r=0
for r in range(len(temps)):
    temps[r]=float(temps[r])
    r+=1
temps=np.array(temps)

j=lignes.index('Channel #\tDistance [mm]\tDistance*cos [mm]
\tEcho amplitude\n')

#discretisation temporelle --> a choisir
DeltaT=np.arange(1,max(temps),1)

#fonction pour faire une moyenne glissante
def lissage(signal_brut,L):
    res = np.copy(signal_brut)
    for i in range (1,len(signal_brut)-1):
        L_g = min(i,L)
        L_d = min(len(signal_brut)-i-1,L)
        Li=min(L_g,L_d)
        res[i]=np.sum(signal_brut[i-Li:i+Li+1])/(2*Li+1)
    return res
#fonction qui choisi un echantillon de donnees a un temps voulu
def choix_temps(data_list, temps):
    ecart=1000000
    new_ecart=100000
    k=1
    while ecart>new_ecart:
        ecart=new_ecart
        new_ecart=abs(temps-float(data_list[k]))
        k+=1
        if k>=len(data_list) :
            new_ecart=ecart+1
    return (k-1)

#creation du tableau posTemps qui donne la position
#de chaque temps de DeltaT
k=0
posTemps=np.zeros(len(DeltaT))
for k in range(len(DeltaT)):
    indice=choix_temps(temps,DeltaT[k])
    posTemps[k]=indice
limitstart=0
if (WindowStart<=16.9*10**-3):
    limitstart=np.ceil((16.9*10**-3-WindowStart)/ChannelDistance)
```

```
#creation du tableau MeanEcho qui reprend l'echo et en fait une
                                    moyenne sur son pas de
                                    discretisation
MeanEcho=np.zeros((NumChan,len(DeltaT)-1))
k=0
position=np.zeros(NumChan)
for k in range(NumChan):
    EchoAmp=lignes[j+k+1].split()
    if k==0:
        continue
    Ech=0
    #print(EchoAmp)
    for Ech in range(len(EchoAmp)):
        EchoAmp[Ech]=float(EchoAmp[Ech])
    EchoAmp=np.array(EchoAmp)
    #retirer les points (ex. : 1.053 -> 1053)
    for m in range(3,len(EchoAmp)):
        if EchoAmp[m]%1!=0:
            EchoAmp[m]=EchoAmp[m]*1000
    position[k]=EchoAmp[1]
    r=float(EchoAmp[1])*10**-3
    for l in range(len(DeltaT)-1):
        MeanEcho[k][l]=np.mean(np.abs(EchoAmp[(int(posTemps[l])+3)
                                    :(int(posTemps[l+1])+3)])
                                    )/g1*(g1/g2)**((r-
                                    WindowStart)/(WindowEnd-
                                    WindowStart))/8191*2.5

alphaW=10**(-15)*(55.9-2.37*temperature+4.77*10**-2*temperature**2
                                    -3.48*10**(-4)*temperature**3)*(f
                                    *10**6)**2

ri = position*1e-3
flag = ri > 0
ri = ri[flag]
n = ri.shape[0]
dr = ri[-1] - ri[-2]
kt = 0.025
c = 0.1
#fonction qui donne l'attenuation des sediments dans l'eau
#au temps i
def alpha(i): #i=moment argument de DeltaT
    Alpha = c*MeanEcho[flag,i]*ri*np.exp(4*alphaW*ri)
    return Alpha
numbWav=2*np.pi/c*f*10**6
xi=(1.1*4/3*0.18*(numbWav*a_s)**4)/(1+1.3*(numbWav*a_s)**2
+4/3*0.18*(numbWav*a_s)**4) * (-1)
```

```
#equation de la fonction egale a 0
def g(x,j):
    yi = np.zeros_like(x)
    for i in range(1,n):
        yi[i] = (x[0] + 2*np.sum(x[1:i-1]) + x[i])*dr/2
    return x - alpha(j)*np.exp(4*xi*yi)

#derivee de l'equation g par rapport a la concentration
def dgdx(x,i):
    rv = np.eye(x.shape[0], x.shape[0])
    alphaa=alpha(i)
    for i in range(1,n):
        yi = (x[0] + 2*np.sum(x[1:i-1]) + x[-1])*dr/2
        rv[:,0] = rv[:,0] - alphaa*np.exp(4*xi*yi)*2*xi*dr
        rv[:,1:i-1] = rv[:,1:i-1] -
        alphaa[:,None]*np.exp(4*xi*yi)*4*xi*dr
        rv[:,i] = rv[:,i] - alphaa*np.exp(4*xi*yi)*2*xi*dr
    return rv

#fonction iterative
def iterate(i, xn, f, df):
    fn = f(xn,i)
    dfn = df(xn,i)
    dx = -np.linalg.solve(dfn, fn)
    tol = np.linalg.norm(dx)
    return dx, tol

#Application de la methode de Newton-Raphson
def newton_raphson(i, f, df, x0, itermax=100, tol=1e-6):
    error = 1
    iter = 0
    xn = x0.copy()
    while error > tol and iter < itermax:
        dx, error = iterate(i, xn, f, df)
        xn += dx
#         print(f"{iter=} ------ {error=}")
        iter += 1
    return xn

#exemple d'application au temps t=20 s
x = newton_raphson(20, g, dgdx, np.full_like(ri, M1),)
plt.plot(ri/12*9.5*1000, lissage(x,5),
label="Concentration a 20 secondes")
plt.legend()
plt.xlabel("Distance verticale depuis la sonde [m]")
plt.ylabel("Concentration [g/l]")
plt.grid()
plt.show()
```

7.2 Code python de la méthode explicite pour la mesure de la concentration en sédiments à l'aval

Dans ce code, la partie `reader` du code de la méthode implicite est nécessaire mais elle ne sera pas réécrite ici. La fonction `choix_temps` y est également nécessaire mais elle est décrite dans le code implicite.

```
    #faire tableau avec temps
temps=lignes[i-1].split()[2:]
r=0
for r in range(len(temps)):
    temps[r]=float(temps[r])
    r+=1
temps=np.array(temps)

j=lignes.index('Channel #\tDistance [mm]\tDistance*cos [mm]\tEcho
                                    amplitude\n')

#discretisation temporelle
DeltaT=np.arange(0,max(temps),1)

k=0
posTemps=np.zeros(len(DeltaT))
for k in range(len(DeltaT)):
    indice=choix_temps(temps,DeltaT[k])
    posTemps[k]=indice
limitstart=0
if (WindowStart<=16.9*10**-3):
    limitstart=math.ceil((16.9*10**-3-WindowStart)/ChannelDistance
                                                    )

MeanEcho=np.zeros((NumChan,len(DeltaT)-1))
k=0
position=np.zeros(NumChan)
for k in range(NumChan):
    EchoAmp=lignes[j+k+1].split()
    Ech=0
    #print(EchoAmp)
    for Ech in range(len(EchoAmp)):
        EchoAmp[Ech]=float(EchoAmp[Ech])
    EchoAmp=np.array(EchoAmp)
    #retirer les points (ex. : 1.053 -> 1053)
    for m in range(3,len(EchoAmp)):
        if EchoAmp[m]%1!=0:
            EchoAmp[m]=EchoAmp[m]*1000
```

```
    position[k]=EchoAmp[1]
    r=float(EchoAmp[1])*10**-3
    for l in range(len(DeltaT)-1):
        MeanEcho[k][l]=np.mean(np.abs(EchoAmp[(int(posTemps[l])+3)
                                              :(int(posTemps[l+1])+3)])
                                              )/g1*(g1/g2)**((r-
                                              WindowStart)/(WindowEnd-
                                              WindowStart))/8191*2.5
alphaW=10**(-15)*(55.9-2.37*temperature+4.77*10**-2*temperature**2
                                    -3.48*10**(-4)*temperature**3)*(f
                                    *10**6)**2
DenomG=np.zeros(len(DeltaT)-1)
for k in range(len(DeltaT)-1):
    DenomG[k]=1/M1*(position[limitstart]*10**-3*MeanEcho[
                                        limitstart][k])**2*np.exp(4*
                                        alphaW*position[limitstart]*
                                        10**-3)

numbWav=2*np.pi/c*f*10**6
xi=(1.1*4/3*0.18*(numbWav*a_s)**4)/(1+1.3*(numbWav*a_s)**2+4/3*0.
                                    18*(numbWav*a_s)**4)
chi=3/(4*a_s*rhos)*xi*0.1
num=np.zeros((NumChan,len(DeltaT)-1))
somme=np.zeros((NumChan,len(DeltaT)-1))
DenomD=np.zeros((NumChan,len(DeltaT)-1))
concentration=np.zeros((NumChan,len(DeltaT)-1))
for k in range(NumChan):
    for l in range(len(DeltaT)-1):
        num[k][l]=(position[k]*10**-3*MeanEcho[k][l])**2*np.exp(4*
                                        alphaW*position[k]*10**-3
                                        )
        if k<=limitstart:
            somme[k][l]=0
            DenomD[k][l]=0
        else:
            somme[k][l]=somme[k-1][l]+((position[k]*10**-3)**2*
                                        MeanEcho[k][l]**2*np.
                                        exp(4*alphaW*position
                                        [k]*10**-3)+(position
                                        [k-1]*10**-3)**2*
                                        MeanEcho[k-1][l]**2*
                                        np.exp(4*alphaW*
                                        position[k-1]*10**-3)
                                        )/2
            DenomD[k][l]=4*chi*ChannelDistance*somme[k][l]
        concentration[k][l]=num[k][l]/(DenomG[l]-DenomD[k][l])
```

7.3 Processus de réalisation d'une expérience reproductible

1. Allumer le conditionneur et y brancher les Baumers et le débitmètre. (Opérateur 1)
2. Allumer la machine et y brancher les UVP. (Opérateur 2)
3. Baisser la porte du barrage. (Opérateur 2)
4. Installer et niveler le sable à l'aval. (Opérateur 1)
5. Installer et niveler le sable à l'amont. (Opérateur 2)
6. Photographier le lit amont et aval. (Opérateur 2)
7. Déplacer le chariot du dispositif LPT à l'endroit souhaité et le fixer avec un serre-joint. (Opérateur 1 et 2)
8. Installer les sondes UVP et Baumer aux points souhaités. (Opérateur 1 et 2)
9. Installer les draps à l'aval. (Opérateur 1)
10. Retirer les sécurités sur le dispositif de la porte de barrage. (Opérateur 2)
11. Allumer la pompe et régler le débit à la valeur souhaitée. (Opérateur 1)
12. Démarrer les 3 logiciels de prise de mesures simultanément. (Opérateur 1 et 2)
13. Déclencher l'ouverture de la porte de barrage une fois que la sonde Baumer à l'amont indique le niveau d'eau souhaité. (Opérateur 1)
14. Couper les logiciels de prise de mesures après un temps préalablement déterminé.
15. Couper la pompe et fermer la vanne d'alimentation du canal. (Opérateur 1)
16. Déplacer les outils de mesure du canal. (Opérateur 1 et 2)
17. Photographier le lit amont et aval. (Opérateur 2)

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain
Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | **www.uclouvain.be/epl**