

École polytechnique de Louvain

Analyse par imagerie de la rupture de digue et mesure du débit à travers la brèche

Auteur: **Lucien MARON**

Promoteur: **Sandra SOARES-FRAZAO**

Lecteurs: **Masoumeh EBRAHIMI, Hadrien RATTEZ**

Année académique 2025–2026

Master [120] : ingénieur civil des constructions

Remerciements

Avant toute chose, je tiens à remercier les personnes suivantes, sans qui ce travail de fin d'études n'aurait pas été possible.

Ma promotrice, la professeure Sandra Soares-Frazao, pour son encadrement, sa disponibilité et ses précieux conseils durant toute l'année.

L'assistante, Madame Masoumeh Ebrahimi, pour ses nombreuses réponses à mes questions, son suivi du travail, son accompagnement constant lors des essais, son aide précieuse et ses encouragements lorsque j'ai fait face à des difficultés.

Monsieur Hadrien Rattez, qui a généreusement accepté la lecture de ce travail.

Monsieur Didier Bousmar, et toute l'équipe du laboratoire des recherches hydrauliques du Service Public de Wallonie (SPW) de Châtelet, pour leur assistance et leur travail dans la mise en œuvre des essais.

Pour terminer, je souhaite sincèrement remercier ma famille et mes amis pour leur soutien, leurs encouragements soutenus et leur aide, notamment dans la relecture et la correction de ce mémoire.

Abstract

Face à l'augmentation de la fréquence des épisodes de crues dans le monde, la mise en place de moyens de prévention, bien qu'en permanente progression, peine à limiter la force destructrice déployée par la nature. Les digues en remblai fournissent une solution économique et rapide pour limiter les dégâts. Cependant, ces dispositifs restent vulnérables et menacent de se rompre en cas de fortes inondations. Il est donc primordial de poursuivre les recherches sur leur comportement en cas de rupture.

Ce travail s'inscrit dans la continuité des campagnes expérimentales réalisées par Gilles et Delforge (2023) et Jergeay et Zhang (2024) sur des digues à moyenne échelle. La plateforme d'essai utilisée lors de ces campagnes est identique pour ce travail.

L'objectif étant d'analyser l'évolution temporelle de la brèche, deux essais supplémentaires ont été réalisés avec les mêmes paramètres que lors des précédents ouvrages. Un essai avec un débit constant et du sable moyen, et un essai avec un niveau constant dans le réservoir et du sable fin ont été reproduits. Ces données s'ajoutent aux données des six essais valides réalisés en 2023 et 2024 afin de réaliser une comparaison globale. Le type d'essai avec un débit constant et du sable fin n'a pas été reproduit pour ce travail. L'analyse simultanée des trois différents types d'essais permet de définir l'influence du type de sable ou du mode d'alimentation sur l'évolution temporelle de la brèche.

L'évolution des débits passant à travers la brèche est calculée avec plusieurs méthodes dont certaines qui utilisent la méthode PIV afin d'obtenir la vitesse de l'écoulement. La comparaison entre ces méthodes permet de définir l'efficacité de la méthode PIV.

Ce travail vise à améliorer la compréhension des mécanismes de rupture des digues par surverse, dans le but de développer des stratégies de prévention et de gestion des catastrophes associées à ces phénomènes.

Table des matières

1	Introduction	10
1.1	Mise en contexte et problématique	10
1.2	Enjeux liés à la rupture de digues	12
1.2.1	Enjeux humains	12
1.2.2	Enjeux économiques	12
1.2.3	Enjeux environnementaux	13
1.3	Objectifs de l'étude	14
2	Revue de la littérature	17
2.1	Mécanismes de rupture des digues (surverse, érosion interne/externe, glissement)	17
2.2	Théories sur l'évolution d'une brèche et modèles existants	19
2.2.1	Evolution de la brèche des digues en sable (Visser)	20
2.2.2	Rupture par surverse de digues homogènes non cohésives (Coleman et al.)	22
2.2.3	Formation de brèche : essais sur le terrain et expériences en laboratoire (Hassan et al.)	23
2.2.4	Paramètres contrôlant la géométrie de la brèche et la forme de l'hydrogramme lors de la surverse de barrages en matériaux non cohésifs (Walder et al.)	25
2.3	Travaux sur les essais à moyenne échelle réalisés à l'UCLouvain	27

3	Matériaux et méthodes	28
3.1	Caractéristiques des matériaux utilisés	28
3.1.1	Granulométrie et classification	28
3.1.2	Essais de compactage	29
3.2	Plateforme expérimentale	30
3.2.1	Description du bassin et du circuit hydraulique	30
3.2.2	Système de contrôle de l'alimentation du bassin	33
3.2.3	Dimension de la digue	33
3.3	Construction des digues	35
3.3.1	1. Procédure de mise en place	35
3.3.2	2. Humidification du sable	36
3.3.3	3. Compactage du sable	37
3.3.4	4. Répétition des étapes	38
3.3.5	5. Construction des pentes	38
3.3.6	6. Formation de la brèche	39
3.4	Plan d'essais	40
3.4.1	Description des campagnes expérimentales	40
3.5	Instrumentation et acquisition de données	41
3.5.1	Débitmètres	41
3.5.2	Sondes	43
3.5.3	Déversoir	46
3.5.4	Débit de brèche	48
3.5.5	Balles colorées	49
3.5.6	Photogrammétrie	51
3.5.7	Lidar	58
3.5.8	Sondes sur la crête de la digue	60
3.5.9	Appareils supplémentaires	62
3.5.10	Particules pour l'analyse PIV	63
4	Résultats expérimentaux	65
4.1	Résultat de l'essai Qm3	65
4.1.1	Analyse de l'évolution temporelle et spatiale de la brèche	65
4.2	Résultat de l'essai Hf3	72
4.2.1	Analyse de l'évolution temporelle et spatiale de la brèche	73
4.3	Comparaison des essais à débit constant avec le sable moyen : Qm	81
4.3.1	Construction de la digue	81
4.3.2	Evolution visuelle de la brèche	82
4.3.3	Profondeur de la brèche	84
4.3.4	Largeur de la brèche	85
4.3.5	Débit de brèche et évolution du niveau d'eau	87
4.3.6	Vérification de la reproductibilité	88

4.4	Comparaison des essais à débit constant avec le sable fin : Q_f	88
4.4.1	Construction de la digue	89
4.4.2	Evolution visuelle de la brèche	89
4.4.3	Profondeur de la brèche	92
4.4.4	Largeur de la brèche	94
4.4.5	Débit de brèche et évolution du niveau d'eau	96
4.5	Comparaison des essais à niveau constant avec le sable fin : H_f . . .	97
4.5.1	Construction de la digue	97
4.5.2	Evolution visuelle de la brèche	98
4.5.3	Profondeur de la brèche	100
4.5.4	Largeur de la brèche	102
4.5.5	Débit de brèche et évolution du niveau d'eau dans le bassin .	104
4.5.6	Vérification de la reproductibilité	105
4.6	Analyse de l'influence du type de sable : essais Q_m et Q_f	105
4.6.1	Construction de la digue	106
4.6.2	Evolution visuelle de la brèche	106
4.6.3	Profondeur de la brèche	109
4.6.4	Largeur de la brèche	112
4.6.5	Débit de brèche et évolution du niveau d'eau dans le bassin .	114
4.7	Analyse de l'influence du mode d'alimentation : essai H_f et Q_f . . .	115
4.7.1	Construction de la digue	115
4.7.2	Evolution visuelle de la brèche	116
4.7.3	Profondeur de la brèche	119
4.7.4	Largeur de la brèche	122
4.7.5	Débit de brèche et évolution du niveau d'eau dans le bassin .	124
4.8	Conclusion	125
5	Détermination des débits à partir des vitesses	127
5.1	Analyse du débit de brèche avec la méthode PIV	127
5.1.1	Choix des essais	127
5.1.2	Logiciel open source OpenPIV	129
5.1.3	Programme DaVis de LaVision	134
5.2	Comparaison des méthodes de calcul du débit	137
6	Conclusion	139
	Bibliographie	147
7	Annexes	158
7.1	Données de l'essai Q_{m3}	158
7.2	Données de l'essai H_{f3}	162

7.3	Comparaison des essais Qm	166
7.4	Comparaison des essais Qf	169
7.5	Comparaison des essais Hf	173
7.6	Données des méthodes PIV	176
7.7	Accès aux codes Python	179

Chapitre 1

Introduction

1.1 Mise en contexte et problématique

A l'heure actuelle, la fréquence et l'intensité des épisodes de précipitations extrêmes ne cessent d'augmenter en Europe sous l'effet du réchauffement climatique. Les évaluations du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) concluent avec un niveau de confiance élevé qu'une hausse des précipitations extrêmes et du risque d'inondations pluviales est à prévoir dans la plupart des régions européennes, tandis que la probabilité de crues est en hausse et continuera d'augmenter avec l'élévation du niveau marin et l'intensification des pluies fortes. Au vu des observations in situ disponibles, on constate d'ores et déjà une augmentation en nombre et en intensité des fortes précipitations dans certaines régions du globe, notamment en Europe et en Amérique du Nord où l'on dispose de séries de mesures relativement longues.^[1]

Les impacts récents illustrent ce contexte. En juillet 2021, des pluies exceptionnelles ont causé des crues dévastatrices en Europe occidentale, avec des dizaines de décès en Allemagne et en Belgique, de lourds dommages aux infrastructures et une remise en question des dispositifs d'alerte et de préparation. Des analyses montrent que de nombreux riverains n'ont pas reçu d'alerte ou n'ont pas perçu la sévérité de la menace, révélant des manquements dans la chaîne « alerte-réaction ».^[2]

Dans ce contexte d'aléa croissant, la performance et la résilience des digues de protection deviennent critiques. Les statistiques internationales sur les barrages en remblai indiquent que les défaillances sont dominées par l'érosion interne et la surverse.^[3]

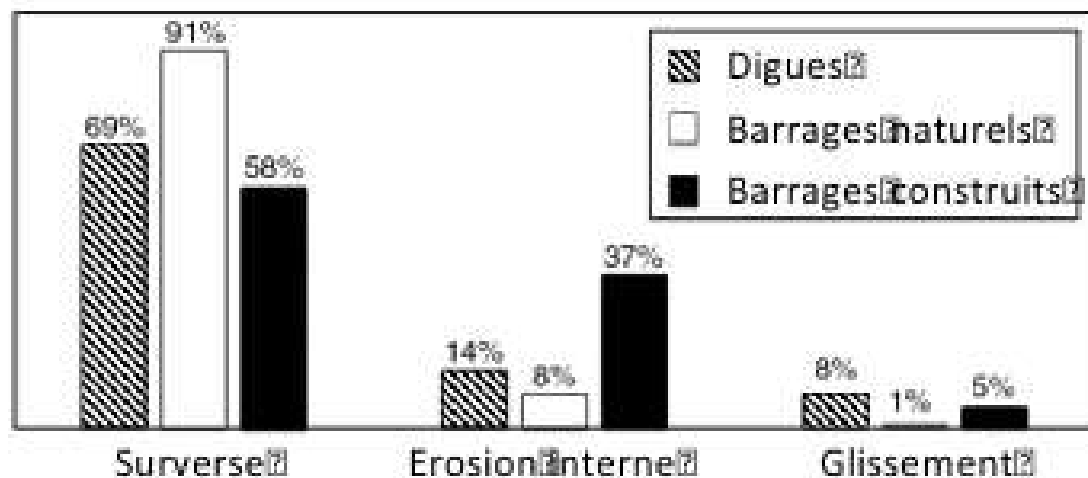


FIGURE 1.1 – Statistiques de rupture des barrages et des digues par mode de rupture[3]

Les statistiques de la figure 1.1 concernant les digues proviennent de 1004 cas de ruptures de digues (digue fluviales et digues de canaux), essentiellement en Hongrie, en Allemagne, en Chine, aux États-Unis et aux Pays-Bas. La majorité des digues ont une hauteur comprise entre 2 et 4 m. On remarque que la rupture par surverse est largement le mode de rupture le plus fréquent.

La rupture par surverse se produit lorsque le niveau d'eau excède la crête. L'érosion rapide du parement aval induit alors l'initiation et la croissance d'une brèche. Cette réalité motive des travaux expérimentaux et numériques dédiés à l'évolution de l'ouverture des brèches et au débit de vidange associé.

Plusieurs études de référence ont décrit les étapes de l'érosion et de l'élargissement d'une brèche dans des digues sableuses soumises à la surverse. Ces résultats, issus d'essais en laboratoire et sur le terrain, constituent la base scientifique de la modélisation physique et numérique du phénomène. Cependant, cette base de données reste limitée, justifiant de nouveaux essais à moyenne échelle ainsi que des comparaisons avec les travaux précédents.

1.2 Enjeux liés à la rupture de digues

1.2.1 Enjeux humains

Les ruptures de digues par surverse se caractérisent par des débits de pointe élevés et des temps de montée très courts, générant des flux rapides et profonds. Les inondations de 2021 en Europe ont mis en évidence un nombre élevé de victimes ainsi que des difficultés d'alerte, d'évacuation et de protection des populations. La létalité est fortement corrélée à la surprise de l'événement, à la vitesse de l'eau, à l'accessibilité et à la robustesse des bâtiments exposés.[2]

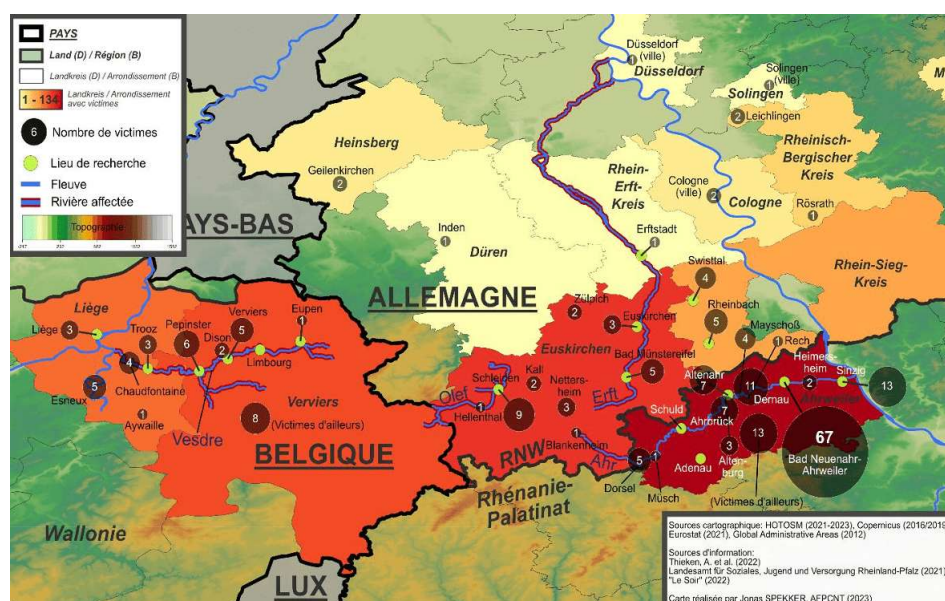


FIGURE 1.2 – Décès suite aux inondations de 2021 en Allemagne et en Belgique [2]

La figure 1.2. témoigne de la violence de la catastrophe et cartographie les décès suite aux inondations. Les cours d'eau les plus sinistrés ont été l'Ahr en Allemagne comptabilisant 126 décès, et la Vesdre en Belgique, comptabilisant 35 décès.[2]

1.2.2 Enjeux économiques

Les ruptures induisent des dommages majeurs sur les logements, les entreprises, les réseaux (routes, ponts, énergie, télécommunications) et les services publics. En Europe, les pertes économiques liées aux aléas hydro-météorologiques se chiffrent en dizaines de milliards d'euros par an depuis le début des années 2020. L'événement de 2021 a eu un coût considérable avec plus de 40 milliards d'euros de dégâts en Allemagne et 5 milliards en Belgique.[2]

1.2.3 Enjeux environnementaux

Les brèches engendrent des inondations soudaines transportant des sédiments, nutriments et polluants (hydrocarbures, effluents, boues), avec des effets sur les sols et les écosystèmes aquatiques. À l'échelle du bassin, les épisodes de crue extrême et de submersion peuvent s'additionner à d'autres pressions climatiques (sécheresses, canicules), ce qui complexifie la restauration écologique et la gestion de l'eau.[4]

La catastrophe de 2021 illustre malheureusement les conséquences dramatiques de la rupture des digues. Il faut remonter jusqu'à fin janvier 1953 pour retrouver des traces d'une catastrophe naturelle aussi dévastatrice en Europe centrale. Une forte tempête hivernale, combinée aux grandes marées, va provoquer ce qui reste l'une des pires catastrophes naturelles aux Pays-Bas et en Angleterre durant ces dernières décennies. L'eau s'élève alors jusqu'à 4,50 mètres au-dessus du niveau normal.



FIGURE 1.3 – Vue aérienne de la catastrophe de 1953 aux Pays-Bas [5]

La pression atteinte est tellement élevée que 89 digues, dont le manque d'entretien avait été préalablement signalé, rompent durant la nuit. Les habitants, étant pris au dépourvu, essaient tant bien que mal de rejoindre le toit de leur habitation, mais la plupart de ces bâtiments s'effondrent sous les assauts des flots. Le bilan dépasse les 1800 morts. 200.000 têtes de bétail périssent, et il faudra plusieurs années avant de pouvoir cultiver à nouveau des milliers d'hectares rendus stériles

par le sel. Cet événement illustre fortement les conséquences liées à la rupture de digue et prouve que ces événements ne sont pas isolés et vont se reproduire dans le futur.[5]

1.3 Objectifs de l'étude

De nombreux ouvrages ont déjà exploré la rupture des digues en sable par surverse avec une brèche initialement amorcée. Ce travail a pour but de poursuivre et enrichir ces recherches en réalisant des expériences supplémentaires à moyenne échelle afin de mieux comprendre les dynamiques de la rupture par surverse.

Nos essais sont réalisés avec du sable car la majorité des expériences réalisées dans la littérature étudie la rupture des digues en sable. Le choix de ce matériau permet donc de poursuivre ces recherches dans les mêmes conditions. Les essais à moyenne échelle sont donc des digues en sable avec une brèche pré-existante avant le remplissage du bassin. La plateforme d'essais et son bassin sont situés au sein du laboratoire hydraulique du Service Public de Wallonie (SPW) à Châtelet. La création de l'amorce de la brèche avant l'essai permet de contrôler l'endroit et la direction de la rupture afin de mieux l'observer et la mesurer.

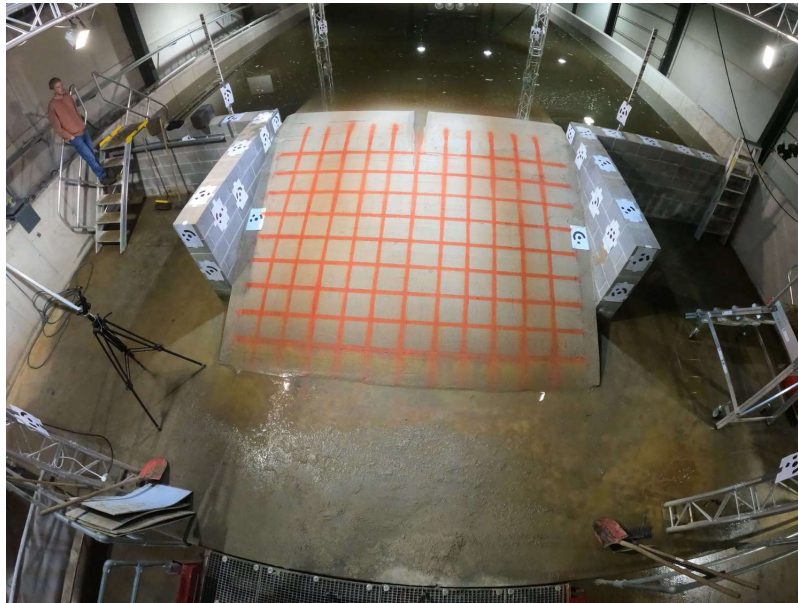


FIGURE 1.4 – Plateforme d'essai

Trois travaux de fin d'études ont été menés concernant la rupture des digues en

sable par surverse. Le premier à petite échelle (avec une digue de vingt centimètres de haut) a été réalisé par Descantons et Dujardin en 2014. Les travaux suivants ont été réalisés à moyenne échelle (avec une digue de un mètre de haut) par Gilles et Delforge (2023) [6] et par Jergeay et Zhang (2024)[7]. Ces deux travaux de fin d'étude constituent une base de données et de résultats très importants pour ce travail. En effet, Jergeay et Zhang se sont déjà consacrés à l'étude de l'influence de la mise à échelle puis ont analysé l'influence de différents paramètres sur l'évolution de la brèche.

1. Le type de sable utilisé

Le type de sable peut influencer le comportement de rupture de la digue selon sa granulométrie. En effet, un sable plus fin ayant une cohésion apparente peut induire une érosion de la digue différente par rapport à l'utilisation d'un sable plus grossier.

2. Le type d'alimentation du bassin

Le type d'alimentation du bassin en amont de la digue va également influencer le comportement de rupture. Le bassin est soit alimenté par un débit constant durant l'intégralité de l'essai, soit alimenté par un niveau maintenu constant par les pompes pendant l'essai. Les conditions de niveau constant se rapprochent le plus des conditions réelles et offrent une meilleure simulation du phénomène mais elles restent très complexes à obtenir et à maintenir lors d'un essai. Tandis que le débit constant est plus simple à mettre en place et à contrôler durant l'essai. L'objectif étant de prouver que les résultats sont comparables afin de pouvoir faciliter la réalisation des futurs essais tout en restant fidèle aux phénomènes réels.

Le but est d'analyser l'évolution de la brèche dans le temps et l'espace comme cela a été fait dans les travaux de 2023 et 2024 en apportant les données de deux essais supplémentaires réalisés dans les mêmes conditions. Les données d'un ensemble de 8 essais au total permettront l'analyse et la comparaison de chaque résultat afin de mieux comprendre l'influence qu'ont le type de sable ou le type d'alimentation du bassin. Cette démarche permet d'étudier l'effet des conditions de surverse sur les changements morphologiques de la digue et de renforcer la base de données sur ce phénomène. Cela permettra également plus de clarté quant aux résultats et aux conclusions puisque ces 8 essais, listés dans le tableau 1.1, seront comparés et analysés au sein d'un même travail.

TABLE 1.1 – Récapitulatif des essais valides

Essai	Date	Condition de surverse	$d_{50}[mm]$	$h_d[m]$	$h_b[m]$	$h_w[m]$	Acronymes
1	25.05.2023	Niveau constant*	0,314	1	0,9	0,95	Hf1
2	14.09.2023	Niveau constant	0,314	1	0,93	0,98	Hf2
3	14.03.2024	Débit constant	0,314	1	0,8	/	Qf3
4	10.04.2024	Débit constant	0,314	1	0,8	/	Qf4
5	28.03.2024	Débit constant	0,632	1	0,8	/	Qm1
6	24.04.2024	Débit constant	0,632	1	0,8	/	Qm2
7	05.12.2024	Niveau constant**	0,314	1	0,9	0,95	Hf3
8	20.03.2025	Débit constant	0,632	1	0,8	/	Qm3

Un autre objectif est la réalisation d’une analyse PIV (Particle Image Velocimetry) de l’écoulement dans la brèche pour ces essais. Cette technique d’imagerie topographique permet la mesure de la vitesse d’écoulement de fluides ensemencés de particules. Ces particules doivent être en forte concentration et diffuser suffisamment de lumière. La sciure de bois a été choisie comme particule et parsemée dans le bassin durant les essais.[8]

L’importance des essais à moyenne échelle est indéniable car ils permettent de réduire les coûts et les risques par rapport aux essais à grande échelle qui cherchent à reproduire des digues de dimensions réelles. Un essai à moyenne échelle permet également une meilleure maîtrise des paramètres expérimentaux.

Concernant les essais à petite échelle, avec des digues de quelques dizaines de centimètres, ils ne permettent pas d’obtenir des résultats aussi fiables que lors d’essais à moyenne échelle.

L’approche de moyenne échelle apparaît comme une solution équilibrée, permettant d’obtenir des résultats réalistes tout en restant peu coûteuse et simple à mettre en œuvre.[7] Cette approche vise donc à améliorer notre base de données afin de mieux comprendre les mécanismes de rupture et à construire des simulations fiables qui permettront de mieux prédire le comportement de la digue lors d’une rupture par surverse.

Chapitre 2

Revue de la littérature

Cette étude se concentre sur un mécanisme particulier de rupture des digues mais il est important de comprendre l'ensemble des mécanismes pouvant mener à la rupture. En effet, la rupture par surverse est la plus courante, mais il existe trois autres mécanismes. Ensuite, plusieurs théories et modèles sur la rupture des digues par surverse seront analysés afin de comprendre au mieux le phénomène et d'appliquer ces observations aux différents essais. Finalement, deux travaux de fin d'étude menés à l'UCLouvain permettront de comparer les 2 derniers essais avec les essais précédemment réalisés dans les mêmes conditions.

2.1 Mécanismes de rupture des digues (surverse, érosion interne/externe, glissement)

Il existe donc quatre principaux mécanismes qui peuvent entraîner la rupture partielle ou totale d'une digue en remblai. Ces mécanismes peuvent se combiner et accélérer la rupture ou bien un seul mécanisme peut mener seul à la rupture, bien que ce soit assez rare dans la réalité.[\[9\]](#)

1. La surverse, mécanisme étudié pour ce travail, se produit lorsque le niveau d'eau s'élève au dessus de la crête de la digue. L'eau érode alors la digue et crée une brèche qui va s'approfondir et s'allonger jusqu'à la rupture. Ce mécanisme survient généralement lors des épisodes de fortes précipitations, de crues ou bien encore de marées hautes.

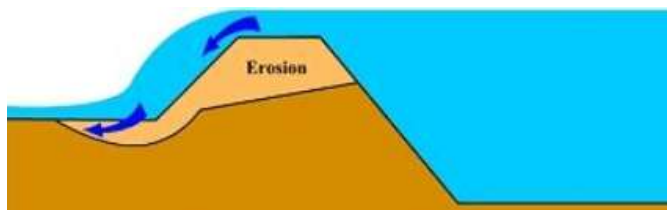


FIGURE 2.1 – Schéma représentant la surverse

2. L'érosion interne ou renard hydraulique se produit lorsque l'eau s'écoule dans la digue et érode l'intérieur jusqu'à la formation d'un tunnel et souvent d'une brèche. Un sable mal compacté peut favoriser l'infiltration de l'eau et donc aggraver le phénomène d'érosion ainsi que provoquer des instabilités locales. Ce mécanisme est composé de beaucoup de scénarios différents comme le montre le schéma suivant.

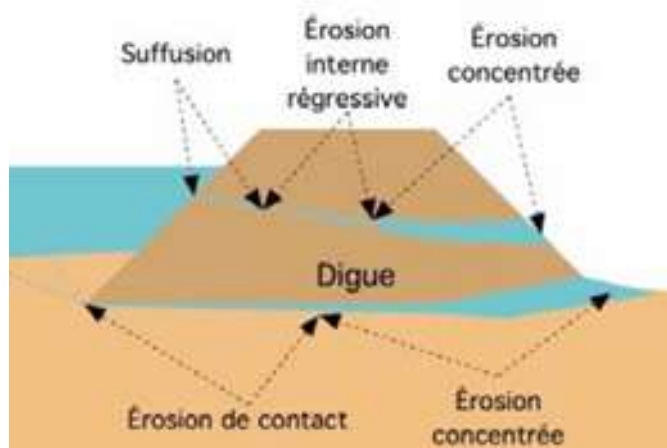


FIGURE 2.2 – Schéma représentant l'érosion interne (renard hydraulique)

3. L'érosion externe se produit lorsque le courant en amont érode la digue. Ce phénomène est d'autant plus important lors des crues : un affouillement à la base de la digue peut se former et augmenter la pente locale, la rendant instable. Cette portion de digue va alors s'effondrer comme on peut le voir sur le schéma suivant.

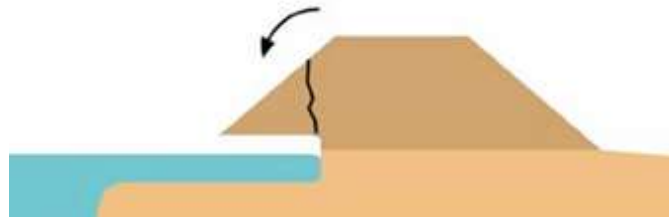


FIGURE 2.3 – Schéma représentant l'érosion externe

4. Le glissement de terrain est un mécanisme lié à l'instabilité globale de la digue. Il peut se produire suite à une inclinaison trop forte de la pente amont, un compactage insuffisant, une saturation de la pente amont en eau, un taux d'infiltration trop important,... L'ensemble de ces causes peut mener à l'érosion interne qui va menacer la stabilité de certaines portions de la digue. Ce phénomène peut alors mener à l'effondrement de grandes portions de digue à l'amont comme sur le schéma ou bien à l'aval également.

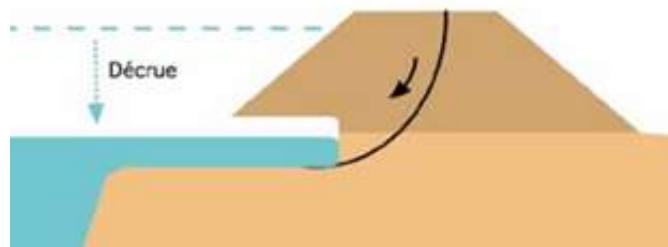


FIGURE 2.4 – Schéma représentant le glissement de terrain

2.2 Théories sur l'évolution d'une brèche et modèles existants

Plusieurs études ont déjà été menées sur la rupture par surverse des digues en remblai et sur l'évolution des brèches. Ces études ont été réalisées avec des paramètres et des échelles différentes. Nous nous concentrons principalement sur les théories et modèles obtenus à partir d'essais à moyenne échelle. L'ensemble de ces études peut être classé en deux catégories : les ruptures de digues pour des matériaux cohésif et non cohésif. Cette distinction est très intéressante pour notre étude afin de pouvoir analyser l'influence du type de sable dans le chapitre 4.

2.2.1 Evolution de la brèche des digues en sable (Visser)

Les travaux de Visser (1998) [10] apportent une contribution majeure à la compréhension des mécanismes d'érosion et de rupture des digues en sable. Cette étude combine des essais réalisés en laboratoire ainsi que des expérimentations en conditions réelles, afin d'analyser la cinématique de la brèche à différentes échelles et d'identifier les processus physiques dominants.

Visser décrit le développement d'une brèche en cinq phases successives (figure 2.5) :

1. Augmentation de l'angle de la pente

Dans un premier temps, l'écoulement interne génère une augmentation progressive de l'angle de la pente de fond de la brèche. Entre les instants t_0 et t_1 , la pente atteint une valeur critique au-delà de laquelle la structure devient instable, favorisant le début de l'érosion.

2. Érosion de la pente aval

Entre t_1 et t_2 , la pente de fond migre vers l'amont tout en conservant un angle quasi constant. Ce processus entraîne une réduction progressive de la largeur de la crête au droit de la brèche, jusqu'à sa disparition totale en t_2 . À partir de ce moment, le débit traversant la brèche augmente drastiquement.

3. Abaissement du sommet de la digue et érosion verticale

De t_2 à t_3 , le sommet de la digue s'abaisse sous l'effet de l'érosion verticale, tandis que l'angle des parois de la brèche demeure constant. En t_3 , l'érosion atteint la base de la structure, ce qui accentue l'élargissement de la brèche.

4. Écoulement critique et érosion latérale

Durant la transition de t_3 à t_4 , le régime d'écoulement devient critique. L'érosion est alors essentiellement latérale. La résistance mécanique du matériau de la digue joue un rôle déterminant dans l'intensité et la progression de cette érosion.

5. Écoulement subcritique

Au-delà de t_4 , l'écoulement passe en régime subcritique. L'élargissement de la brèche se poursuit jusqu'à t_5 , stade auquel la vitesse devient insuffisante pour maintenir l'entraînement des particules. L'érosion cesse lorsque les niveaux d'eau amont et aval s'équilibrent.

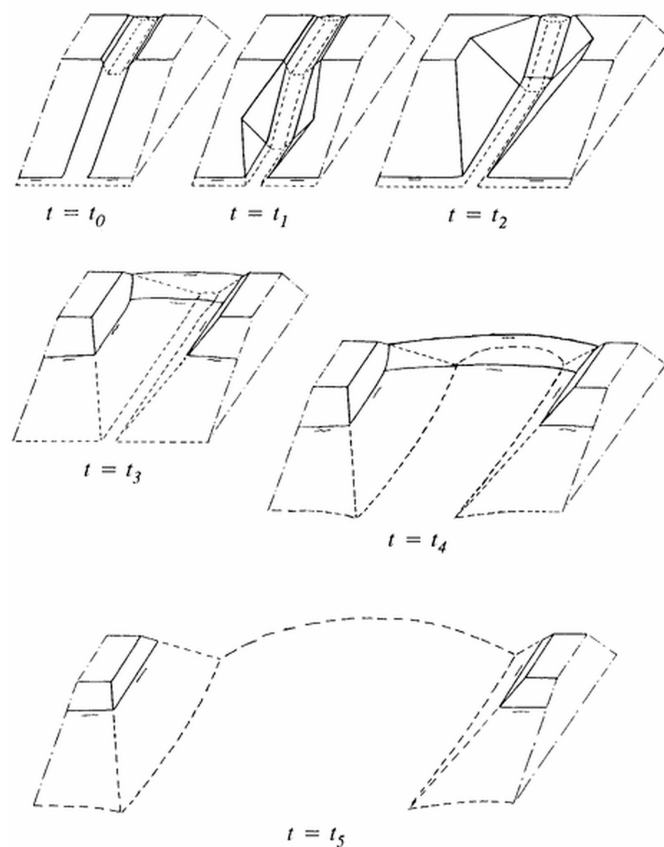


FIGURE 2.5 – Etapes de rupture d’une digue selon Visser[10]

Les trois premières phases sont caractérisées par un approfondissement principalement vertical de la brèche, accompagné d’un débit encore modéré à travers celle-ci. Les étapes 4 et 5 conduisent au contraire à une érosion latérale intense, responsable d’un élargissement rapide de la brèche et d’une forte augmentation du débit évacué.

Visser a validé ce modèle par des essais en grandeur réelle menés en 1994 dans le chenal du Zwin, à partir d’une digue en sable de 3,3 m de hauteur construite avec deux sables fins ($d_{50} = 0,185$ mm et $d_{50} = 0,315$ mm). Une brèche initiale avait été aménagée pour permettre à la marée montante de déclencher la rupture par surverse.

En complément, neuf essais en laboratoire ont été conduits sur une digue réduite à 15 cm de hauteur en sable fin ($d_{50} = 0,088$ mm). Le niveau d’eau amont était maintenu aussi constant que possible au moyen de deux pompes de capacité

maximale égale à $0,66 [m^3/s]$.

Ces expérimentations, à la fois à grande et à petite échelle, ont confirmé la validité du schéma en cinq phases proposé par Visser pour décrire le processus de formation et d'évolution d'une brèche. Cette description constitue une base pertinente pour l'analyse des mécanismes d'érosion et de rupture des digues soumises à la surverse.

2.2.2 Rupture par surverse de digues homogènes non cohésives (Coleman et al.)

Dans leur étude, Coleman et al. (2002)[11] analysent l'érosion de digues non cohésives soumises à la surverse à partir d'essais en laboratoire sur des modèles de petite échelle (0,3 m et 0,6 m de hauteur). Les digues sont testées pour quatre sables distincts dont les diamètres médians sont de 0,5 mm, 0,9 mm, 1,6 mm et 2,4 mm. Le dispositif expérimental consiste en un canal de 2,4 m de large et 12 m de long, dans lequel une brèche triangulaire est creusée afin de simuler une rupture par surverse.

L'écoulement traversant la brèche est dirigé vers un bassin de stabilisation, puis vers un déversoir rectangulaire de mesure. Le débit est déterminé grâce à des sondes capacitatives disposées le long du canal.

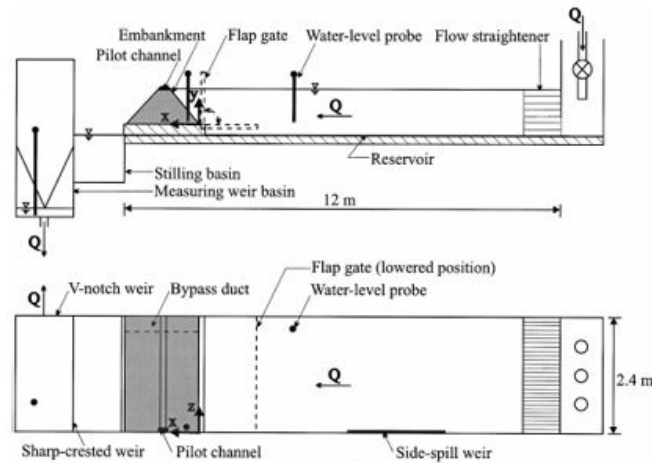


FIGURE 2.6 – Setup expérimental de Coleman (2002)[11]

Les résultats montrent que la brèche évolue initialement par érosion verticale, suivie d'une érosion latérale marquée dès que la pente du fond atteint le pied aval, conformément aux observations de Visser. L'érosion latérale est dominée par les

effets de cisaillement et les turbulences, entraînant l'effondrement de blocs de sable vers l'aval.

Sur le plan longitudinal, la brèche se développe sous forme d'un canal dont la pente initiale suit celle du parement aval. Ce canal s'approfondit jusqu'à atteindre le fond, puis se propage vers l'amont jusqu'au « point de pivot », zone où la pente se modifie et s'adoucit progressivement. Lorsque cette pente minimale (environ 1,5 % pour des matériaux non cohésifs) est atteinte, l'élargissement latéral s'accroît.

En vue en plan, la brèche adopte une géométrie incurvée, en forme de sablier.

Coleman et ses collègues proposent également plusieurs relations empiriques permettant d'estimer l'évolution temporelle de la section de brèche, du profil longitudinal, des volumes érodés et du débit. Ils soulignent toutefois que leur validité hors du domaine expérimental doit être considérée avec prudence, notamment en raison des effets d'échelle, des propriétés granulaires et de la tension superficielle.

2.2.3 Formation de brèche : essais sur le terrain et expériences en laboratoire (Hassan et al.)

Le projet IMPACT, conduit par Morris, Hassan et Vaskinn (2007) [12], a pour objet l'évaluation et la réduction des risques associés aux crues extrêmes dues à des phénomènes naturels ou à la rupture de barrages ou d'ouvrages de protection contre les crues. Il vise donc à améliorer les outils de modélisation de la formation de brèches dans les digues soumises à la surverse.

Le programme expérimental comprend une campagne de cinq essais à grande échelle sur des digues de 4 à 6 m de hauteur.



FIGURE 2.7 – Essais à grande échelle pour le projet Impact [12]

La seconde campagne comprend 22 essais à échelle moyenne réalisés en laboratoire sur des digues de 0,6 m de hauteur.



FIGURE 2.8 – Essais à moyenne échelle pour le projet Impact[12]

Les essais à grande échelle ont été menés en aval du barrage de Røssvass (Norvège), un site permettant le contrôle d'un niveau d'eau constant grâce à un réservoir amont de grande capacité visible sur l'illustration suivante. Les expériences en laboratoire reproduisent ces conditions selon un facteur d'échelle 1 :10 et utilisent les mêmes matériaux.



FIGURE 2.9 – Site des essais à grande échelle pour le projet Impact[12]

La croissance de la brèche est suivie par des marqueurs visuels, des capteurs internes et la mesure du débit via les hauteurs d'eau. Les deux campagnes ont permis de nombreuses observations concernant l'évolution de la brèche.

La brèche évolue successivement verticalement, puis latéralement. L'érosion initiale de la face aval est lente, mais s'accélère fortement lorsque l'érosion atteint le bord amont de la crête. Les parois de la brèche restent globalement verticales durant la phase d'érosion active, cela peut s'expliquer par l'élargissement latéral qui

résulte souvent de la rupture de blocs discrets de matériaux, rapidement évacués par l'écoulement.

L'évolution de la brèche dépend fortement des propriétés du sol (cohésion, compactage, teneur en eau), pouvant modifier le taux d'érosion d'un facteur supérieur à 10. En effet, les sols cohésifs présentent une érosion initiale en marches d'escalier, ce qui modifie la vitesse d'érosion. Les méthodes de construction et l'homogénéité des matériaux influencent donc significativement la reproductibilité des résultats, notamment l'emplacement de la brèche qui affecte l'hydraulique. Une brèche excentrée réduit le débit de pointe d'environ 13 % par rapport à une brèche centrée.

Ces résultats contribuent à une meilleure compréhension des mécanismes de rupture des digues non cohésives et cohésives sous surverse.

2.2.4 Paramètres contrôlant la géométrie de la brèche et la forme de l'hydrogramme lors de la surverse de barrages en matériaux non cohésifs (Walder et al.)

L'étude de Walder et ses collègues (2015)[13] analyse la rupture de digues en sable fin ($d_{50} = 0,21$ mm) à travers 13 essais à moyenne échelle, réalisés sur des digues de 0,55 à 0,98 m de hauteur. Les objectifs principaux étaient :

1. Caractériser l'évolution temporelle de la section transversale de la brèche.
2. Reproduire expérimentalement des hydrogrammes de crue.
3. Evaluer l'influence de la hauteur initiale de la digue et du niveau d'eau amont sur la dynamique de la brèche.

Pour suivre précisément l'évolution géométrique de la brèche, les chercheurs ont utilisé des techniques de photogrammétrie et de vidéographie sous-marine.

Les résultats montrent que les hydrogrammes peuvent être reproduits de manière cohérente lorsque le temps initial est défini comme l'instant où l'écoulement atteint la crête de la brèche, indépendamment de la hauteur initiale de la digue. L'étude révèle aussi que le canal de brèche, initialement uniforme, évolue en une succession de zones à fortes et faibles pentes. Ces zones forment une morphologie en escalier et migrent vers l'amont. Cela finit par générer une tranchée prononcée en amont, suivie d'un canal à pente douce, séparés par un ressaut hydraulique.

Dans la partie aval, l'écoulement est fortement instable et turbulent, favorisant l'effondrement des berges et un transport sédimentaire important. Les petits blocs

sont exportés presque intacts, tandis que les blocs plus volumineux restent piégés dans le canal où ils sont progressivement érodés.

Walder décrit plusieurs étapes successives de la rupture :

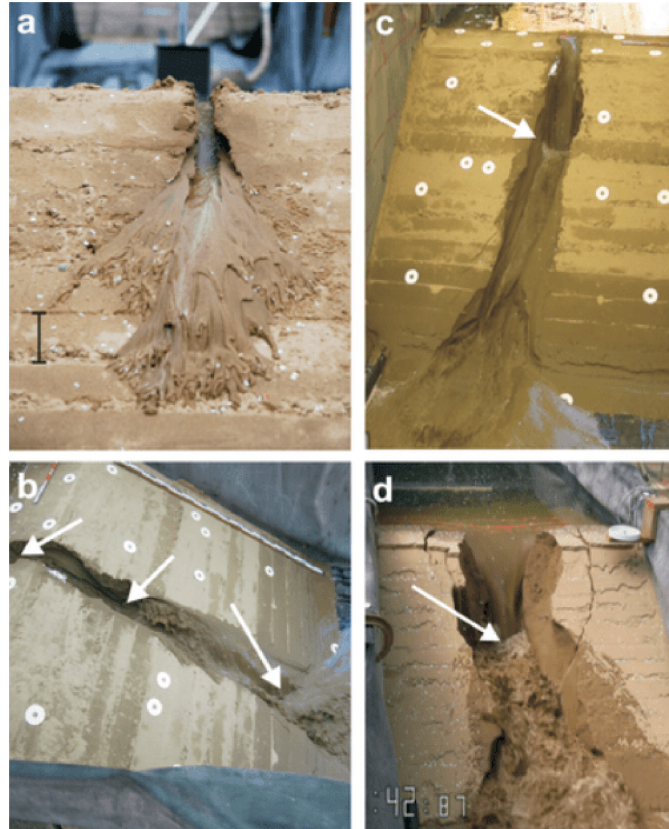


FIGURE 2.10 – Différentes étapes de la rupture selon Walder [13]

- a) Formation initiale d'un cône alluvial lors de l'infiltration de l'écoulement dans la face aval.
- b) Incision du cône jusqu'au pied de la digue et transition d'un écoulement supercritique à sous-critique.
- c) Développement et migration amont de la structure en escalier, avec apparition d'un bassin profond à sa base.
- d) Déstabilisation et glissement de blocs sédimentaires délimités par des fissures, accompagnés d'une turbulence marquée en aval du bassin profond.

2.3 Travaux sur les essais à moyenne échelle réalisés à l’UCLouvain

Plusieurs études menées à l’UCLouvain se concentrent déjà sur la rupture des digues en remblai. Le travail de Descantons et Dujardin en 2014 s’est concentré sur les essais à petite échelle. Cependant, ce travail a déjà été largement analysé par Gilles et Delforge en 2023[6] ainsi que par Jergeay et Zhang en 2024[7] pour déterminer les effets d’échelle.

L’important est donc de se concentrer sur les résultats et les conclusions obtenus lors de ces précédents essais à moyenne échelle. En effet, les travaux de 2023 et 2024 regroupent plusieurs analyses et comparaisons des différents essais réalisés. Les résultats reprennent l’évolution morphologique de la brèche, les hydrogrammes des débits de brèches ainsi que d’autres données très intéressantes.

L’ensemble de ces essais a évidemment été réalisé dans les mêmes conditions : sur la même plateforme d’essai, avec deux types de sables (fin : $d_{50} = 0,314mm$ et moyen : $d_{50} = 0,632mm$) et une digue de dimension moyenne. La digue de chaque essai mesure 1 mètre de hauteur pour une longueur de 6,5 mètres à la base et 0,5 mètre à la crête. La largeur est de 4 mètres.

Le débit de consigne, déterminé en 2024 par Jergeay et Zhang à partir du facteur d’échelle[7], est de 224 [l/s] et reste identique pour les essais à débit constant. Le niveau d’eau imposé lors d’un essai à niveau constant est également inchangé.

Chapitre 3

Matériaux et méthodes

3.1 Caractéristiques des matériaux utilisés

Afin d'analyser l'influence du type de sable utilisé lors de la construction de la digue, nous choisissons deux types de sable différents. Le premier est un sable fin présentant une cohésion apparente tandis que le deuxième est un sable moyen.

Afin de poursuivre nos essais dans des conditions identiques à celles de 2023 et 2024, nous utilisons les mêmes sables que Gilles et Delforge (2023). La granulométrie de ces sables a été analysée par Jergeay et Zhang (2024) qui ont confirmé la reproductibilité des essais.

3.1.1 Granulométrie et classification

La granulométrie est l'étude de la distribution statistique des différentes tailles de particules constituant un type de sol. Elle constitue un des paramètres principaux qui caractérisent un sol, car elle permet de comprendre le comportement mécanique et hydraulique du sol.

Pour les sols dont les grains dépassent 0,061 mm, comme les sables employés dans nos essais, Jergeay et Zhang ont retenu deux normes belges, la NBN EN 933-1 (2012) et la NBN EN 933-2, ainsi qu'une norme internationale, la NBN ISO 17892-4 [10]. Les normes ISO, largement utilisées en Belgique et en Europe, servent de référence, mais il est important de noter qu'elles n'ont aucun caractère obligatoire et ne sont fournies qu'à titre indicatif.[7]

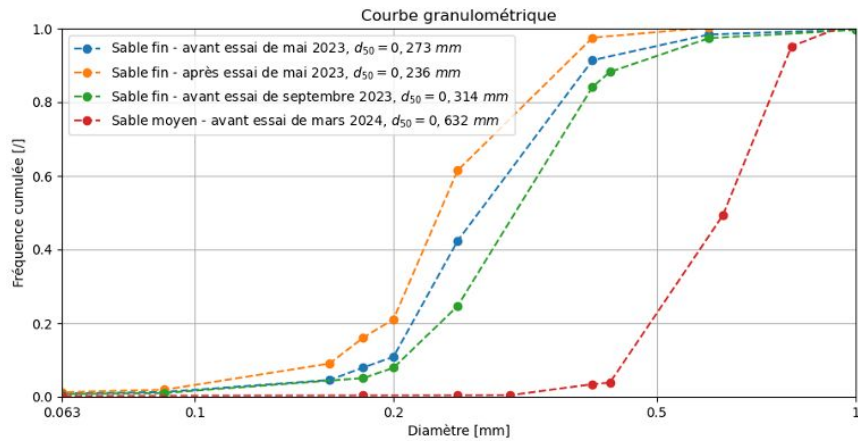


FIGURE 3.1 – Courbe granulométrique[7]

Les sables fin et moyen utilisés dans le cadre de ce mémoire sont identiques aux sables utilisés lors des précédents essais de 2023 et 2024. En effet, Jergeay et Zhang ont prouvé, comme on peut le voir sur la courbe granulométrique de la figure 3.1, qu'il n'y a pas de différence significative avant et après essai, ce qui signifie que nous pouvons réutiliser le sable d'un essai à l'autre.

- **Sable fin** $d_{50} = 0,314 \text{ mm}$

Le diamètre médian du sable fin est égal à $d_{50} = 0,314 \text{ mm}$.

- **Sable moyen** $d_{50} = 0,632 \text{ mm}$

Ce sable est du "silica 0.4-0.8" et son diamètre médian est égal à $d_{50} = 0,632 \text{ mm}$.

3.1.2 Essais de compactage

L'essai Proctor permet de déterminer la teneur en eau qui donne au sable sa compacité maximale, appelée optimum Proctor. À cette teneur en eau, la densité sèche du sol est la plus élevée, ce qui améliore sa résistance à l'érosion et limite les infiltrations dans une digue.

L'essai, réalisé selon la norme NBN EN 13286-2, utilise :

1. un moule cylindrique
2. une dame de compactage chutant de 305 mm
3. une balance précise

L'échantillon est préparé puis légèrement humidifié et ensuite compacté dans

le moule en trois couches. Chaque couche est frappée par 25 coups. On mesure ensuite la masse volumique humide, la masse volumique sèche après séchage et la teneur en eau. L'opération est répétée pour plusieurs teneurs en eau afin d'établir la courbe Proctor, qui permet d'identifier l'optimum.

Les résultats de Jergeay et Zhang fournissent les optimums suivants :

1. **Pour le sable fin** ($d_{50} = 0,314 \text{ mm}$) : optimum à 14 % d'eau et densité sèche de $1800 \text{ [kg/m}^3\text{]}$.
2. **Pour le sable moyen** ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$) : optimum à 10 % d'eau et densité sèche de $1700 \text{ [kg/m}^3\text{]}$.

3.2 Plateforme expérimentale

L'ensemble des essais s'est déroulé au laboratoire hydraulique du Service Public de Wallonie (SPW), situé à Châtelet. La plateforme d'essai est identique à celle utilisée pour les travaux de Gilles et Delforge (2023) et Jergeay et Zhang (2024). La seule différence notable est l'addition de certains équipements de mesure supplémentaires.

3.2.1 Description du bassin et du circuit hydraulique

Le bassin en amont de la digue mesure 10,8 mètres de large et 17,4 mètres de long pour une profondeur égale à un mètre. Il totalise donc un volume d'environ 188 m^3 .

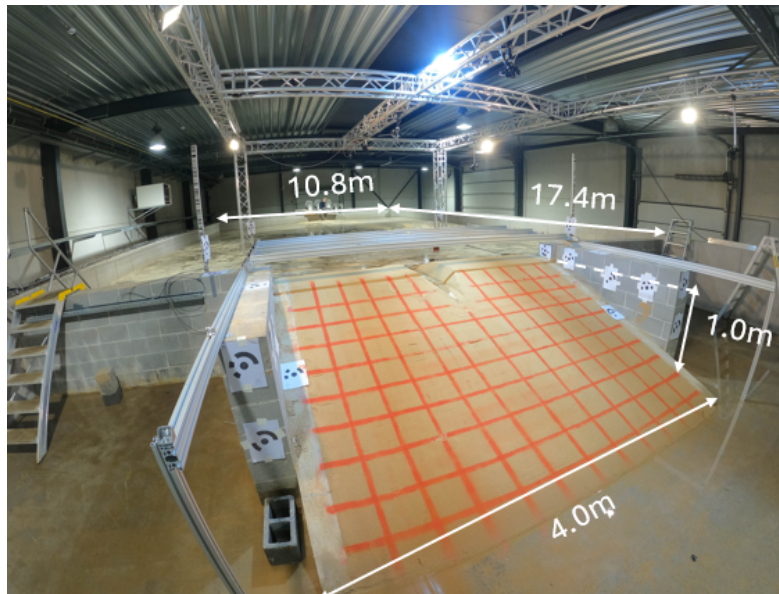


FIGURE 3.2 – Dimensions de la plateforme d'essai

Le bassin est alimenté par cinq pompes captant l'eau directement dans la Sambre. L'eau pompée est également rejetée dans la Sambre.

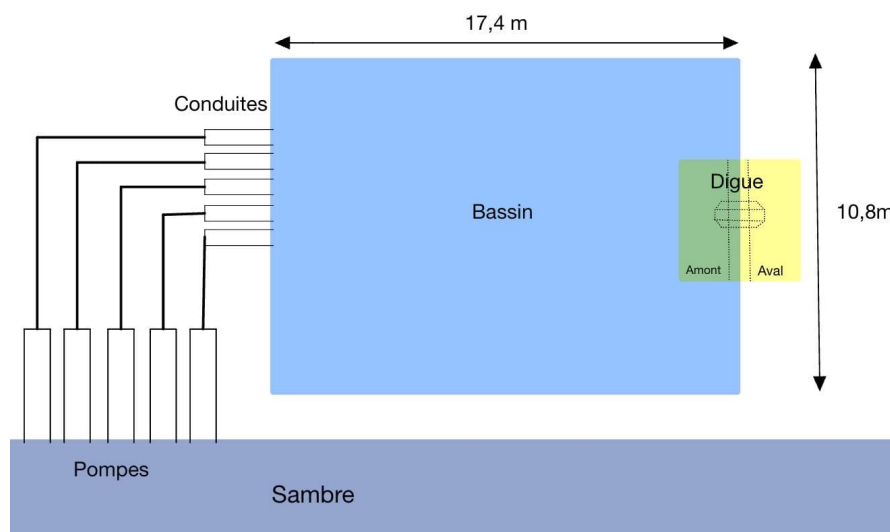


FIGURE 3.3 – Schéma du fonctionnement du bassin



(a) Vue du bassin



(b) Vue arrière

FIGURE 3.4 – Pompes alimentant le bassin

Les cinq pompes peuvent délivrer ensemble un débit maximum de 900 [l/s]. Un automate contrôle simultanément le débit des cinq pompes. L'algorithme de l'automate permet de fonctionner selon deux modes d'alimentations différentes.



FIGURE 3.5 – Automate

3.2.2 Système de contrôle de l'alimentation du bassin

Le premier mode permet d'introduire un débit dans l'automate, le "mode débit constant". L'automate contrôle alors les pompes pour que le débit fourni par les cinq pompes simultanément reste exactement égal au débit d'entrée pendant l'intégralité de l'essai.

Le second mode est appelé le "mode hauteur d'eau constante", il nécessite un niveau d'eau de consigne qui sera maintenu durant l'intégralité de l'essai. L'automate va alors calculer la hauteur d'eau du bassin comme la moyenne de toutes les sondes intégrées à celui-ci. Le débit va alors rester constant jusqu'à ce que cette hauteur soit atteinte puis les pompes vont s'arrêter. Les pompes se réactiveront pour maintenir la hauteur d'entrée dès que le niveau commencera à diminuer.

3.2.3 Dimension de la digue

La digue en sable est construite sur une plateforme d'essai en béton composé de murets guides. La largeur de la digue entre ces 2 murets est de 4 mètres. La digue est longue de 6,5 mètres et haute de un mètre. Ces dimensions correspondent à la

plateforme d'essai utilisée lors des travaux précédents. La digue est donc identique à celles des essais de Gilles et Delforge (2023) et Jergeay et Zhang (2024).

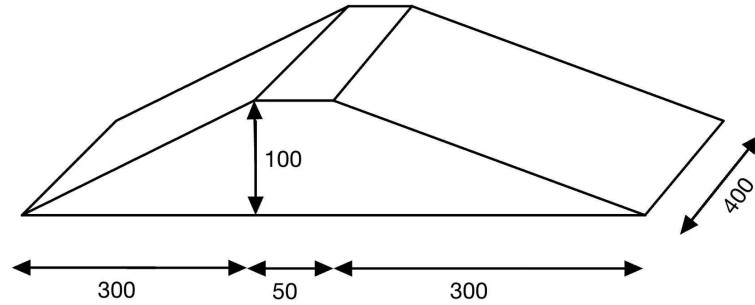


FIGURE 3.6 – Dimensions de la digue (cm)

La brèche est creusée dans la digue lorsque sa construction est complètement terminée. Le gabarit utilisé reste le même que pour les précédents essais afin de garantir la reproductibilité. Il mesure 15 cm de large au niveau inférieur et 55 cm de large au niveau supérieur avec une hauteur de 20 cm. Cependant, pour certains essais, la hauteur est réduite à 10 cm, ce qui modifie également les largeurs de brèche.



FIGURE 3.7 – Gabarit de la brèche

Cette brèche est creusée au milieu de la crête afin que la rupture soit contrôlée

et afin de faciliter les mesures. L'inclinaison exacte de la brèche est de 45° au niveau des berges.

3.3 Construction des digues

3.3.1 1. Procédure de mise en place

La première étape a été réalisée en 2024 par Jergeay et Zhang qui ont posé un drain enveloppé de géotextile dans la largeur de la digue. Ce drain permet d'éviter une rupture par infiltration en évacuant l'eau qui s'infiltre dans la digue durant les essais. Ce dispositif transporte l'eau sous le bassin qui est ensuite acheminée dans un déversoir. Des sondes présentes dans le déversoir mesurent son niveau en permanence nous permettant de calculer le débit de drainage.



(a) Drain posé en 2024[7]



(b) Déversoir

FIGURE 3.8 – Dispositif permettant d'éviter la rupture par infiltration

Le drain ayant déjà été posé et étant fonctionnel, la mise en place du sable est la première étape. Grâce à l'aide du personnel du laboratoire, le sable est acheminé d'un silo extérieur vers la plateforme d'essai grâce à un télescopique. Cet engin motorisé permet de prendre de grandes quantités de sable dans son godet. Le sable est alors déposé en tas sur l'emplacement de la digue puis éparpillé à l'aide de pelles à la main.

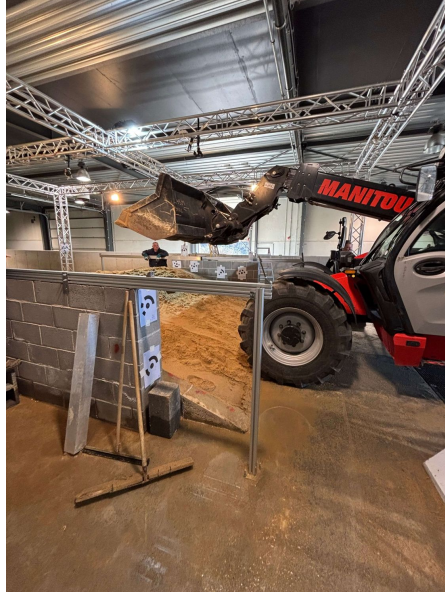


FIGURE 3.9 – Mise en place du sable

Le sable a été mis en place par couche de 10 cm avec l'humidification du sol, la prise d'échantillons et le compactage pour chaque couche.

3.3.2 2. Humidification du sable

Une des étapes importantes pendant la mise en place du sable est l'humidification du sable. Une fois qu'une couche de 10 cm de sable est mise en place, un échantillon cylindrique est prélevé après le compactage. On peut ensuite mesurer sa teneur en eau grâce à la formule suivante :

$$\text{teneur en eau } [\%] = \frac{m_{humide} - m_{sec}}{m_{sec}} \cdot 100$$

avec :

- $m_{humide}[g]$: masse de l'échantillon juste après prélèvement
- $m_{sec}[g]$: masse de l'échantillon après chauffage et évaporation de l'eau

La teneur en eau doit être le plus proche possible de l'optimum Proctor, (14% pour le sable fin et 10% pour le sable moyen) déterminé par l'essai Proctor en 2024, afin que le compactage soit optimal.

L'échantillon est prélevé avec un cylindre creux de volume intérieur égal à 90 cm^3 . Nous pouvons également utiliser ces deux formules :

$$\rho_{humide} = \frac{m_{humide}}{V}$$

$$\rho_{sec} = \frac{m_{sec}}{V}$$

avec :

- $\rho_{humide}[kg/m^3]$: masse volumique de l'échantillon juste après prélèvement
- $\rho_{sec}[kg/m^3]$: masse volumique de l'échantillon après chauffage et évaporation de l'eau
- $m_{humide}[g]$: masse de l'échantillon juste après prélèvement
- $m_{sec}[g]$: masse de l'échantillon après chauffage et évaporation de l'eau

Afin d'obtenir une compaction optimale, la masse volumique sèche doit tendre vers l'optimum Proctor. Plus la différence est faible, meilleure est la compaction. La comparaison entre ces différences permet également de déterminer si une digue est mieux compactée qu'une autre. On peut donc ajuster la quantité d'eau ajoutée au godet de sable en fonction de la teneur en eau et des masses volumiques obtenues à la couche précédente.

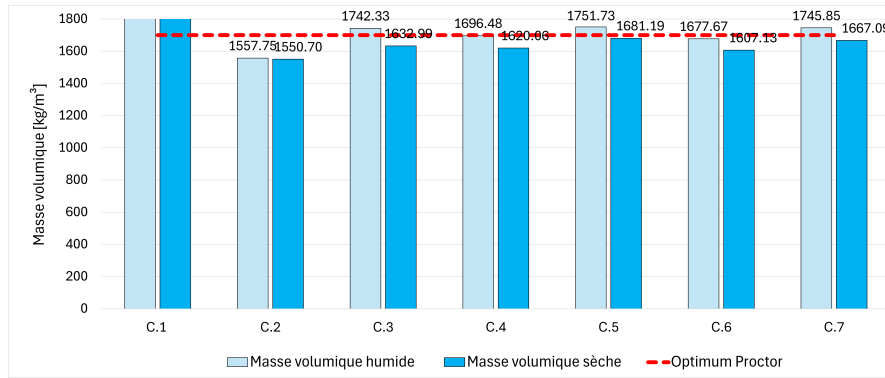


FIGURE 3.10 – Essai Qm3 : Masse volumique sèche de chaque couche

La figure 3.10 représente l'évolution de la masse volumique sèche lors de l'essai de 2025. On remarque que cette masse volumique sèche est proche de l'optimum Proctor à chaque couche donc la digue a une compaction optimale.

3.3.3 3. Compactage du sable

Lorsque le sable humidifié est mis en place de manière à peu près égale sur une couche de 10 cm, il est nécessaire de le compacter après le prélèvement du premier échantillon. La digue est compactée à l'aide d'une dameuse de masse égale à 70 kg. Cette machine permet de compacter la couche de sable en trois passages sur les berges tandis qu'un quatrième passage est réalisé sur la crête. La dameuse applique une pression de surface de $8,1 \text{ N/cm}^2$



FIGURE 3.11 – Compaction à l'aide de la dameuse

3.3.4 4. Répétition des étapes

Les étapes 1 à 3 sont réalisées pour chaque couche de 10-15 cm de sable humidifié mise en place. Il y a un prélèvement par couche, il est effectué après la compaction. La procédure est répétée jusqu'à atteindre une hauteur de digue de 1 mètre après compaction.

3.3.5 5. Construction des pentes

Lorsque la digue atteint 1 mètre de hauteur, il faut passer à la construction des pentes. Ces pentes sont réalisées par "lissage" à l'aide d'une barre métallique. Les sommets de la barre sont posés sur les murets guides et celle-ci est ensuite lentement glissée de haut en bas de la pente. Cette opération délicate est réalisée sur les deux pentes afin qu'elles soient bien uniformes et lisses.



FIGURE 3.12 – Réalisation des pentes

3.3.6 6. Formation de la brèche

L'étape finale est la création de la brèche en creusant à l'aide du gabarit métallique. Grâce à ce gabarit, la brèche est symétrique, sans pente apparente et bien située au centre de la digue.



FIGURE 3.13 – Gabarit de la brèche

3.4 Plan d’essais

De nombreux essais ont été réalisés lors de précédentes campagnes expérimentales en suivant le même mode opératoire, avec les mêmes matériaux et dans les mêmes conditions. Il est donc important de retenir uniquement les essais valides afin de pouvoir vérifier leur reproductibilité. L’ensemble des résultats de ces essais valides va être analysé et comparé pour déterminer l’influence de certains paramètres.

3.4.1 Description des campagnes expérimentales

Le tableau 3.1 récapitule l’ensemble des huit essais valides. Un essai valide s’est déroulé correctement avec les bons paramètres d’entrée. C’est à dire avec un débit qui est resté constant durant l’essai, ou bien lorsque le niveau d’eau durant l’expérience a été maintenu constant. Il est également important que la surverse ne se produise pas sur l’intégralité de la digue.

Les essais 1 et 2 proviennent de la campagne expérimentale de Gilles et Delforge (2023) tandis que les essais 3 à 6 ont été réalisés par Jergeay et Zhang (2024). Les essais 7 et 8 ont été réalisés dans le cadre de ce mémoire.

TABLE 3.1 – Récapitulatif des essais valides

Essai	Date	Condition de surverse	$d_{50}[mm]$	$h_d[m]$	$h_b[m]$	$h_w[m]$	Acronymes
1	25.05.2023	Niveau constant*	0,314	1	0,9	0,95	Hf1
2	14.09.2023	Niveau constant	0,314	1	0,93	0,98	Hf2
3	14.03.2024	Débit constant	0,314	1	0,8	/	Qf3
4	10.04.2024	Débit constant	0,314	1	0,8	/	Qf4
5	28.03.2024	Débit constant	0,632	1	0,8	/	Qm1
6	24.04.2024	Débit constant	0,632	1	0,8	/	Qm2
7	05.12.2024	Niveau constant**	0,314	1	0,9	0,95	Hf3
8	20.03.2025	Débit constant	0,632	1	0,8	/	Qm3

Les essais sont nommés par des acronymes afin de mieux les distinguer selon le type de sable et les conditions de surverse :

- Hf : Digue en sable fin (f) soumise à un niveau d’eau constant (H)
- Qf : Digue en sable fin (f) soumise à un débit constant (Q)
- Qm : Digue en sable moyen (m) soumise à un débit constant (Q)

Les autres colonnes représentent :

- $d_{50}[mm]$: diamètre médian des grains de sable
- $h_d[m]$: hauteur de la digue
- $h_b[m]$: hauteur de la brèche
- $h_w[m]$: hauteur du niveau d'eau (en cas de niveau d'eau constant durant l'essai)

L'essai 1 a évolué avec un niveau d'eau constant*, cet astérisque signale que le débit a malheureusement chuté avant la fin de l'essai. Il est important de le noter pour l'analyse des résultats.

L'essai 7 a également connu des difficultés avec le niveau d'eau constant**. Le débit a atteint des valeurs anormalement élevées sur les débitmètres, suite à un problème de calibrage. Ce phénomène est expliqué en détail dans le chapitre 4.

L'objectif des essais à niveau constant est de se rapprocher de phénomènes réels. La hauteur d'eau en amont des digues qui stockent des grandes quantités d'eau reste généralement assez constante.

Tandis que l'objectif des essais à débit constant est de comprendre l'influence du sable fin ou moyen sur la rupture et son évolution.

Les essais à débit constant sont plus simples à réaliser et à contrôler à moyenne échelle donc il est primordial de comprendre la différence et les points communs entre les deux. Cela permettrait de reproduire potentiellement des conditions réelles (niveau constant) à partir d'essais à débits constant, facile à réaliser et à répéter.

3.5 Instrumentation et acquisition de données

De nombreux instruments différents ont été utilisés lors des essais. Ils ont enregistré de précieuses mesures permettant de définir l'évolution de la brèche lors de la rupture par surverse. Cette section reprend l'ensemble des données obtenues grâce à ces appareils ainsi que les résultats qui peuvent en être tirés.

3.5.1 Débitmètres

Chaque pompe est équipée d'un débitmètre calculant en temps réel le débit pompé dans le bassin par chacune. Le débit entrant total vaut la somme des valeurs des cinq débitmètres.

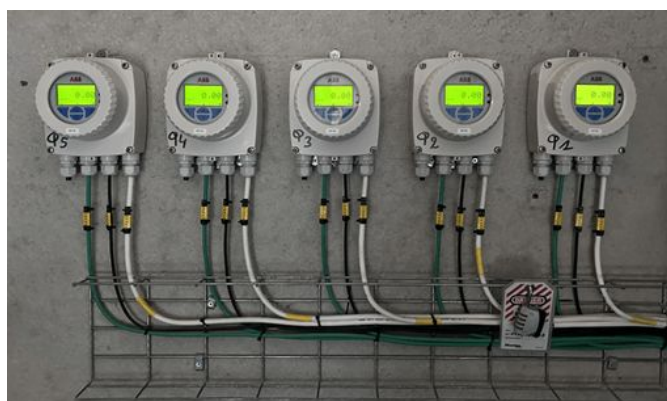


FIGURE 3.14 – Débitmètres

Le débit d'entrée lors des essais à débit constant est de 224 [l/s] . Ce débit n'est pas anodin et provient du calcul de Jergeay et Zhang en 2024[7]. Il correspond au débit d'entrée utilisé à petite échelle lors de précédents travaux multiplié par le facteur d'échelle également calculé par Jergeay et Zhang. Ce débit a été choisi afin de pouvoir comparer les essais à petite et moyenne échelle.

Les débitmètres sont connectés à l'automate afin que celui-ci coordonne l'ensemble des pompes pour alimenter le bassin selon le mode voulu lors de l'essai. Si le mode choisi est "débit constant", les pompes vont se coordonner pour produire un débit total de 224 [l/s] en permanence.

Tandis que pour un mode "niveau constant", les pompes vont se relayer pour maintenir un niveau d'eau exact. C'est à dire que les pompes vont s'arrêter net dès que le niveau est atteint et vont se remettre en route lorsque le niveau baisse. Ce mécanisme est possible grâce à tout un ensemble de sondes.

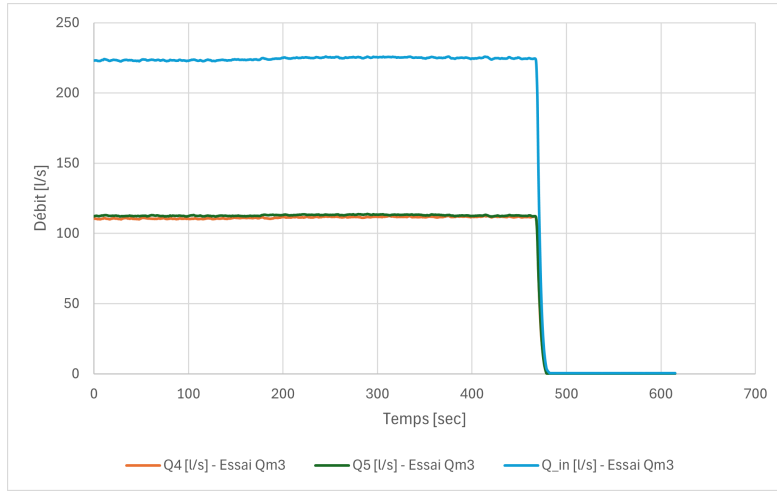


FIGURE 3.15 – Essai Qm3 : Evolution des débits d'entrée

On remarque à la figure 3.15 que les pompes 4 et 5 produisent exactement le même débit afin que le débit soit de 224 [l/s] au total. Il est également possible que les pompes travaillent dans des proportions différentes.

Le débit est déjà constant au temps $t = 0\text{s}$ car celui-ci représente le début de l'essai. Cela correspond au début de l'écoulement sur la face aval de la digue. Ce temps initial a pu être choisi avec précision grâce aux photos Gopro. Cependant, une petite manipulation est nécessaire pour retrouver ce moment dans les graphes de données. En effet, il faut également trouver le moment correspondant au niveau d'eau atteignant la brèche. Il dépend de la condition de surverse. Cette technique a été utilisée pour l'ensemble des résultats et également par mes prédécesseurs en 2023 et 2024.

3.5.2 Sondes

Les sondes font partie des instruments centraux de cette plateforme d'essai. Elles permettent de connaître en permanence le niveau d'eau dans le bassin. Il en existe deux types différents :

- Sondes hydrostatiques : Elles possèdent une couverture étendue du niveau d'eau mais avec une précision inférieure.
- Sondes ultrasoniques : Elles possèdent une plage de mesure restreinte mais ont une précision jusqu'au millimètre près. La plage s'étend de 85 cm à un mètre de hauteur d'eau.



FIGURE 3.16 – Sondes ultrasoniques

Le schéma de la figure 3.17 représente l'ensemble des sondes positionnées à travers la plateforme. Les sondes rouges sont des sondes ultrasoniques tandis que les vertes sont des sondes hydrostatiques. Le vert clair correspond aux sondes hydrostatiques présentes pour les sept premiers essais du tableau récapitulatif tandis que les neuf sondes vertes foncées sont des sondes hydrostatiques ajoutées pour le huitième essai.

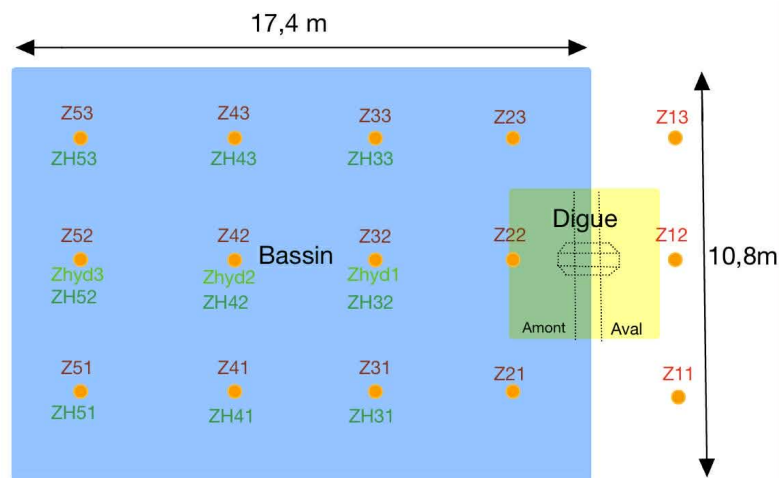


FIGURE 3.17 – Schéma du positionnement des sondes

On remarque assez rapidement que les sondes Z11, Z12 et Z13 sont situées à l'extérieur du bassin et ne donneront donc pas de résultats pertinents. La sonde Z22 quant à elle se trouve sous la digue donc elle ne nous servira pas non plus.

L'ensemble des autres sondes permet l'obtention des hauteurs d'eau à plusieurs endroits du bassin durant les essais.

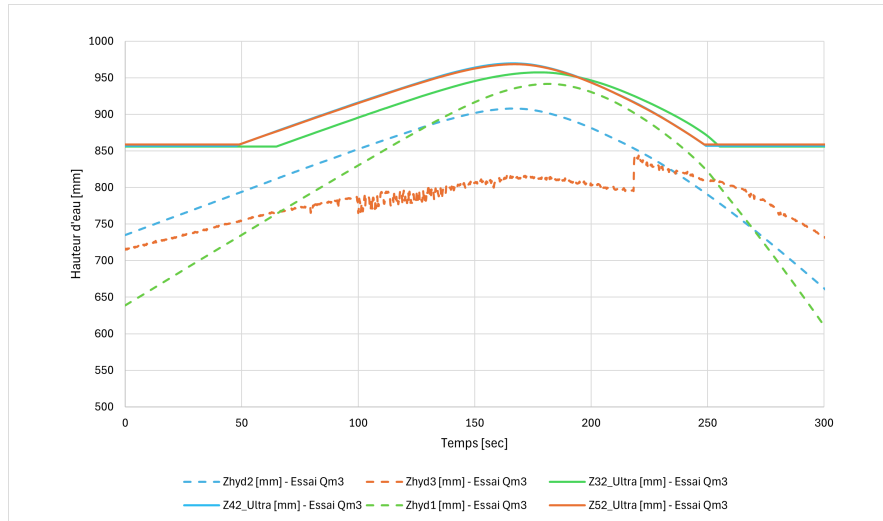


FIGURE 3.18 – Essai Qm3 : Evolution des hauteurs d'eau des sondes ultrasoniques et hydrostatiques dans l'axe de la brèche

On remarque qu'il y a un net écart de plusieurs dizaines de millimètres entre les sondes hydrostatiques et ultrasoniques au même endroit. Par définition, les sondes ultrasoniques demeurent plus précises que les sondes hydrostatiques, il faut donc corriger les courbes des sondes hydrostatiques avec celles des sondes ultrasoniques.

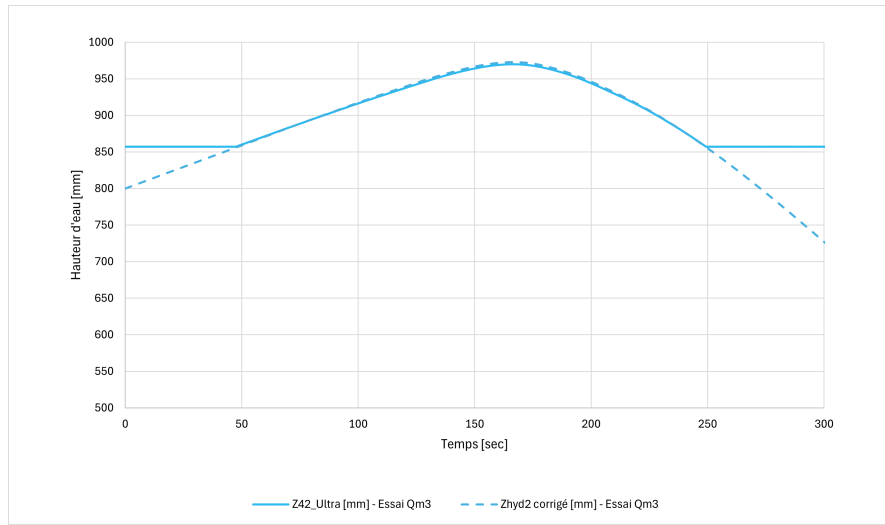


FIGURE 3.19 – Essai Qm3 : Evolution des hauteurs d’eau mesurées par les sondes Zhyd 2 (hydrostatique) et Z42_{Ultra} (ultrasonique)

Après correction de l’ensemble des courbes, il est nécessaire de repérer la sonde hydrostatique dont la courbe épouse le plus celle de son homologue ultrasonique. Pour l’essai Qm3, cette sonde est la Zhyd2, qui est représentée à la figure 3.19. Etant donné que la plage de mesure des sondes ultrasoniques est assez restreinte, il est primordial d’utiliser la courbe corrigée de Zhyd2 pour décrire l’évolution du niveau de l’eau dans le bassin durant l’essai.

3.5.3 Déversoir

Un déversoir est installé sur un côté à l’extérieur du bassin et est relié à un drain installé sous la digue en largeur. Ce déversoir est équipé de sondes qui permettent d’obtenir le débit passant par le drain.



(a) Drain



(b) Déversoir

FIGURE 3.20 – Dispositif permettant d'obtenir le débit dans le drain

La sonde nommée ZDev2 est placée au dessus du déversoir et fourni la hauteur d'eau à partir du point bas de l'échancrure triangulaire. Le débit d'eau du drain, celui qui arrive dans le déversoir, peut être calculé sur base de la formule suivante d'un déversoir à 90° (angle d'ouverture de l'échancrure triangulaire) :

$$Q_{drain} = C_e \frac{8}{15} \tan(\theta \frac{\pi}{180.2}) (ZDev2 + 0,85.10^{-3})^2 \sqrt{2.9,81.(ZDev2 + 0,85.10^{-3})} [m^3/s]$$

avec :

$$C_e = -0,00554(\frac{ZDev2}{p})^4 + 0,02128(\frac{ZDev2}{p})^3 - 0,0141(\frac{ZDev2}{p})^2 + 0,0025(\frac{ZDev2}{p}) + 0,57798$$

avec :

$p = 0,4$ m : la hauteur du point bas de l'échancrure triangulaire par rapport au fond du déversoir.

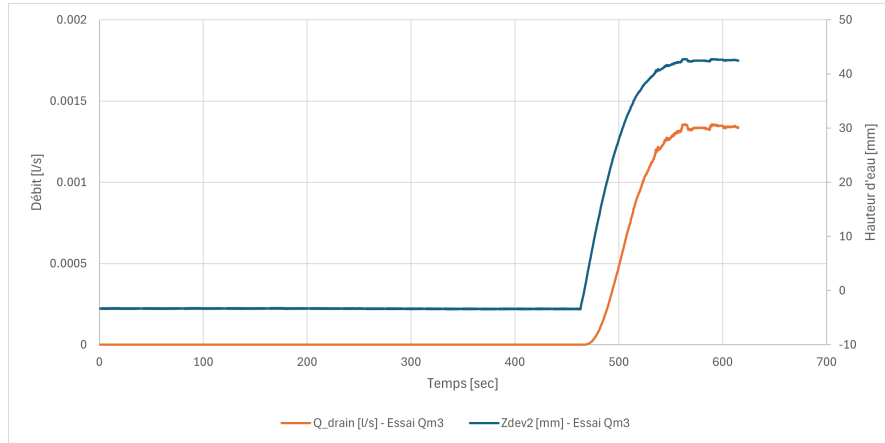


FIGURE 3.21 – Essai Qm3 : Evolution du débit dans le drain et de la hauteur d'eau dans le déversoir

En analysant la figure 3.21, on remarque que le débit du drain augmente 450 secondes après le début de l'essai. Cela signifie que cette augmentation soudaine se déroule tardivement et donc au moment où il n'y a plus de sable sur le drain. Il ne représente donc pas l'eau qui s'infiltre dans la digue durant l'essai mais bien l'eau en contact direct avec le drain bien après la rupture de la digue.

Les essais se sont déroulés relativement rapidement. Il faut environ 20 minutes pour que le bassin se remplisse et que la digue rompe. Ce court délai ne laisse en fait pas le temps à l'eau de s'infiltre donc on ne détecte aucune infiltration dans le drain avant la rupture.

3.5.4 Débit de brèche

Le débit à travers la brèche est un résultat très important pour l'analyse de la rupture de digue par surverse. Il permet de représenter l'évolution des conséquences à l'aval lors de la rupture.

Il est obtenu en réalisant la conservation de la masse dans le bassin. En effet, le débit qui alimente le bassin Q_{in} , fournit par les débitmètres, doit être égal au débit qui sort du bassin. Les différentes sondes permettent d'obtenir l'évolution des hauteurs d'eau dont nous avons besoin pour cette formule :

$$Q_{in} = A_{res} \cdot \frac{dZ}{dt} + Q_{brèche} + Q_{drain}$$

qui donne :

$$Q_{brèche} = Q_{in} - A_{res} \cdot \frac{dZ}{dt} - Q_{drain}$$

avec :

- $A_{res} = 189,864m^2$: l'aire du bassin
- $\frac{dZ}{dt}$: la variation de hauteur d'eau du bassin au cours du temps :

$$\frac{dZ}{dt} \approx \frac{dZ_{hyd2}}{\Delta t}$$

avec $\Delta Z_{hyd2}(t_i) = Z_{hyd2}(t_i) - Z_{hyd2}(t_i-1s)$ et $\Delta t = 1s$. Les valeurs de Z_{hyd2} correspondent bien aux valeurs corrigées à l'aide des autres sondes.

Cette formule pour obtenir $Q_{brèche}$ est identique à celle des précédents travaux[7]. A l'aide des instruments de mesure et de cette formule, il est possible d'obtenir l'évolution du débit entrant dans le bassin, du débit à travers la brèche et des hauteurs d'eau au cours du temps.

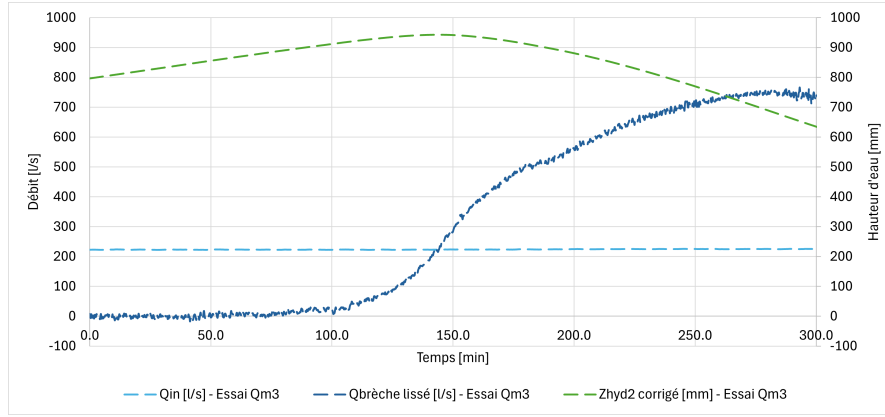


FIGURE 3.22 – Essai Qm3 : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin(Z_{hyd2} corrigé)

Le temps 0 de la figure 3.22 correspond au début de l'écoulement sur la pente aval. Le débit de brèche augmente après environ 100 secondes. Cependant, la courbe calculée initialement présentait beaucoup de fluctuations ; il a donc fallu la lisser à l'aide d'une moyenne mobile entre les temps $t+3$ et $t-3$ secondes.

Le temps final, quant à lui, a été déterminé comme le moment où le débit de brèche atteint son maximum, c'est à dire après 300 secondes. Après ce temps, la digue est quasiment totalement érodée et l'évolution de la brèche est limitée par les deux murets guides en béton.

3.5.5 Balles colorées

L'évolution de la profondeur de la brèche a pu être obtenue grâce à un ensemble de balles colorées enterrées dans la digue durant sa construction. Les balles sont

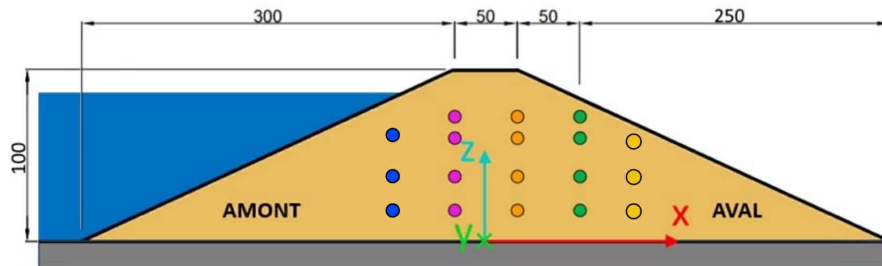


FIGURE 3.23 – Positionnement des balles dans la digue

Les balles bleues et jaunes, respectivement placées en $x = -75\text{cm}$ et $x = 125\text{cm}$, sont au nombre de cinq sur la hauteur. Tandis que les balles roses, oranges et vertes sont placées en $x = -25\text{cm}$, $x = 25\text{cm}$ et $x = 75\text{cm}$ et sont au nombre de sept sur la hauteur de la digue. Il y a donc cinq positions de balles, deux supplémentaires par rapport aux essais de 2023 et 2024.

Il est important de noter que le repaire de la figure 3.23 sera utilisé tout au long de ce travail, notamment pour définir la position des sections transversales ainsi que pour définir l'évolution de l'érosion verticale et latérale.

En analysant les vidéos de l'essai, il est possible de définir le temps 0 (lorsque l'écoulement sur la face aval commence) puis le Δt avec l'apparition de chaque balle afin de connaître l'évolution de la profondeur de la brèche au cours du temps à cinq endroits différents. Le graphique de la figure 3.24 représente ce résultat pour l'essai Qm3.

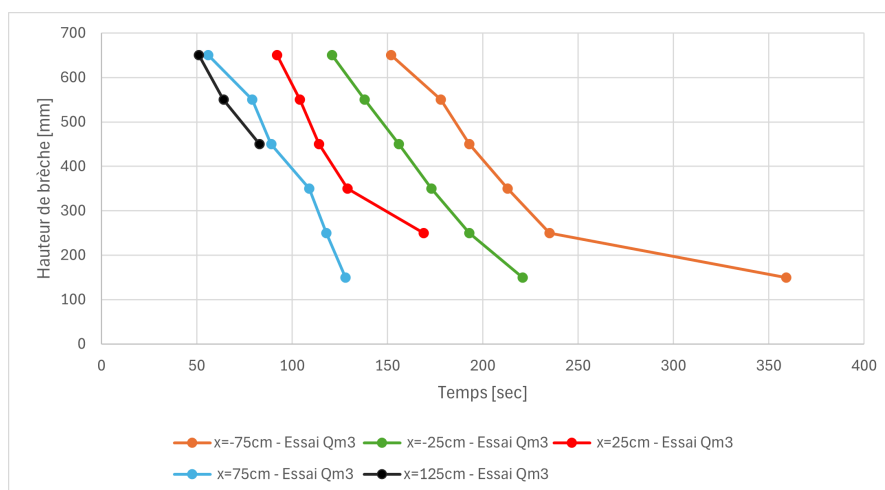


FIGURE 3.24 – Essai Qm3 : Evolution de la profondeur de la brèche

Ce graphique permet de déterminer l'évolution de l'érosion verticale de la digue en différents endroits de celle-ci. Ces résultats permettront également de déterminer la profondeur de la brèche afin de connaître sa section à l'aide de la photogrammétrie.

3.5.6 Photogrammétrie

La photogrammétrie est un élément essentiel dans l'analyse de l'évolution morphologique de la brèche. A l'aide de différentes caméras, il a été possible de réaliser un modèle 3D de la digue grâce au logiciel Agisoft Metashape. Les différents outils disponibles sur ce logiciel ont permis d'obtenir l'évolution de l'érosion latérale et verticale ainsi que du profil longitudinal de la digue au niveau de la brèche.

Caméras

La plateforme d'essai était équipée d'une cage métallique avec des supports de caméras GoPro. Il y avait un total de 14 caméras dont 12 ont pris des photos partout autour de la digue. Les deux dernières ont capturé une vidéo face à la digue et au niveau de la crête.

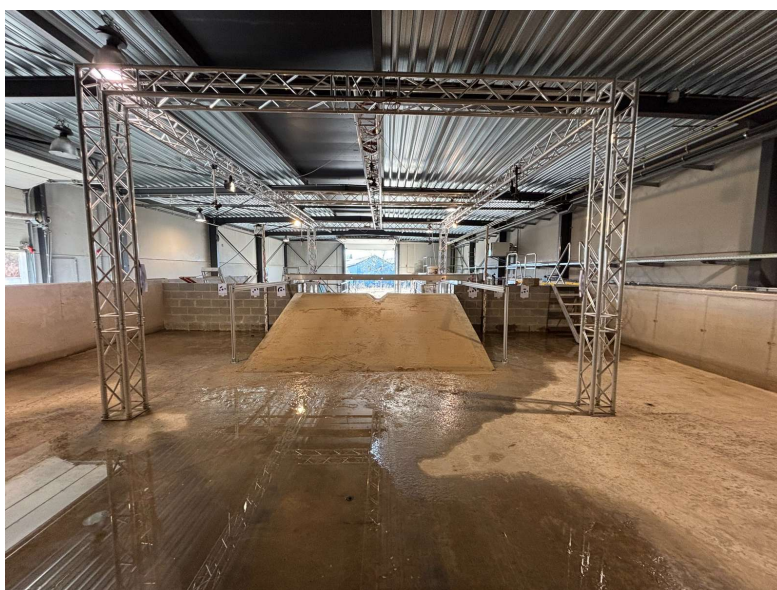


FIGURE 3.25 – Cage métallique permettant la capture photo

Les caméras capturant des photos ont été lancées en même temps à l'aide d'une application mobile. Cela permet d'obtenir une capture simultanée de la digue à 12 points de vue différents à un intervalle d'une demi seconde. C'est un élément crucial pour obtenir des résultats de qualités lors de l'utilisation du logiciel de photogrammétrie.

Agisoft Metashape

Agisoft Metashape est un logiciel autonome qui réalise le traitement photogramétrique d'images numériques et génère des données spatiales 3D.

La première étape consiste à rassembler l'ensemble des photos de chaque caméra correspondant au temps 0, le début de l'écoulement sur la face aval de la digue. Pour ce faire, il est nécessaire de vérifier dans les propriétés des fichiers photo, que le moment de la capture est identique pour chaque point de vue.

La seconde étape consistait à continuer à classer ces photos en les sélectionnant avec un intervalle de 20 secondes donc 40 captures. Ces ensembles de photos ont permis la réalisation de modèles 3D sur ce logiciel à l'aide de la détection des GCP et du quadrillage orange de la digue.

Le logiciel possède donc des repères fixes de la plateforme et permet de recréer un nuage de points de la digue à l'aide des 12 captures de chaque instant. Il est

important que les 12 photos soient alignées lorsque tous les GCP sont bien positionnés. Un exemple de modèle extrait à partir du nuage de points est visible à figure 3.26

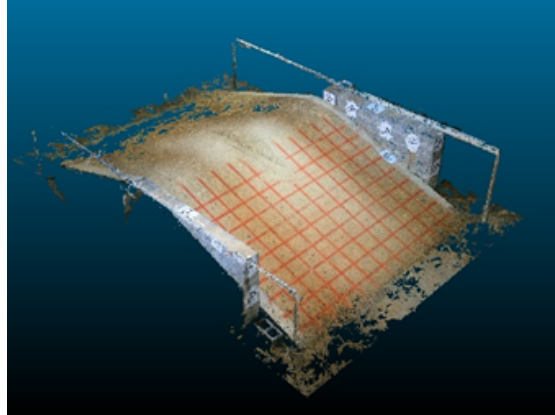


FIGURE 3.26 – Modèle 3D obtenu à partir du nuage de points

Les résultats les plus pertinents sont les fichiers DEM qui peuvent être extraits par ce logiciel. Un DEM (Digital Elevation Model) est un type de fichier qui représente la surface du terrain sous forme numérique. Il contient des données d'altitude qui permet d'obtenir la largeur de la digue, sa section et le profil longitudinal à l'aide d'un code python. La figure 3.27 représente un fichier DEM de la digue pendant la rupture après 180 secondes.

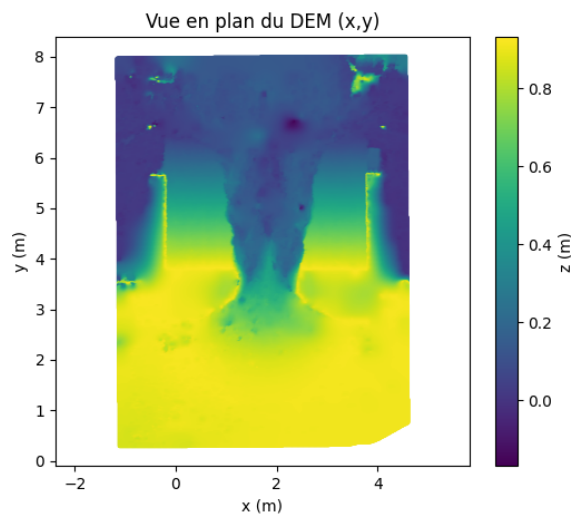


FIGURE 3.27 – Fichier DEM extrait avec Python

Ce script permet d'extraire le DEM de l'instant t afin de définir les cinq coordonnées en y pour faire les cinq coupes ainsi que l'intervalle de quatre mètres en x correspondant à la largeur de la digue. Ensuite, deux graphes contenant le profil longitudinal et les cinq sections à l'instant sont affichés. Le code extrait également les données dans un tableau Excel afin de rendre les graphes plus compréhensibles, les corriger et les comparer avec les résultats des autres essais.

La figure 3.28 représente l'évolution de la largeur de la brèche de l'essai Qm3 obtenue grâce à cette méthode. En effet, avec les données, il est possible de représenter chaque section à chaque instant afin de calculer la largeur supérieure de la brèche. On remarque que trois des cinq endroits ont été représentés afin de comparer les mêmes endroits que les précédents essais. Il faut également noter que ces positions sont les plus pertinentes : une à l'amont, une à l'aval et la dernière entre les deux. En effet, les positions $x=-75\text{cm}$ et $x=125\text{cm}$ sont trop aux extrémités pour être pertinentes dans cette analyse.

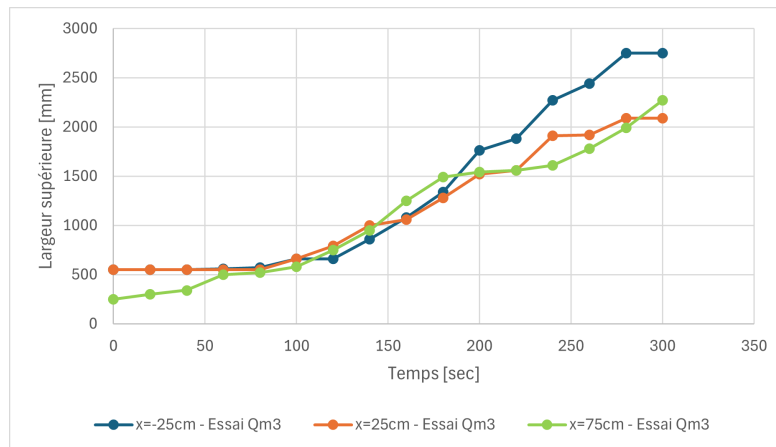


FIGURE 3.28 – Essai Qm3 : Evolution de la largeur supérieur de la brèche

Il est ensuite possible de déterminer la vitesse moyenne de l'érosion transversale afin de la comparer dans le chapitre 4.

Un autre résultat de cette méthode est l'obtention de la courbe représentant les coupes dans la section de la digue en $x=-75\text{cm}$; $x=-25\text{cm}$; $x=25\text{cm}$; $x=75\text{cm}$; $x=125\text{cm}$ selon le repère du schéma à la figure 3.23. La figure 3.29 représente les cinq sections de la digue lors de l'essai Qm3 après 200 secondes.

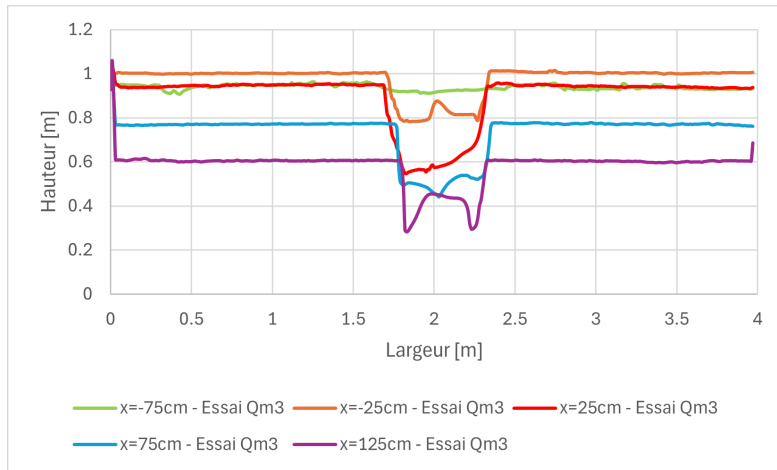


FIGURE 3.29 – Essai Qm3 : Comparaison de 5 sections de la digue en $t=200$ secondes

L'obtention des sections sera très utile pour déterminer le débit dans la brèche à l'aide des vitesses obtenues dans le chapitre 5. Ces sections devront cependant être corrigées car la photogrammétrie ne considère pas la réelle profondeur de la brèche, mais plutôt la surface de l'écoulement à cause des particules (sciure de bois) répandues dans le bassin à la surface de l'eau. Ce sont les balles colorées qui permettent d'obtenir la profondeur réelle de la brèche afin de corriger les sections comme à la figure 3.30. Ce graphique représente les sections corrigées au moment opportun à l'aide des balles pour l'essai Qm3.

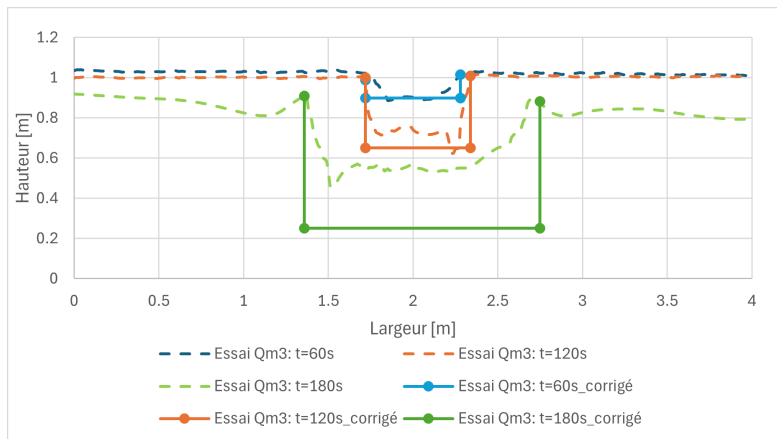


FIGURE 3.30 – Essai Qm3 : Sections corrigés en $x=-25\text{cm}$

Le dernier résultat est le profil longitudinal de la digue réalisé exactement au

centre de la brèche.

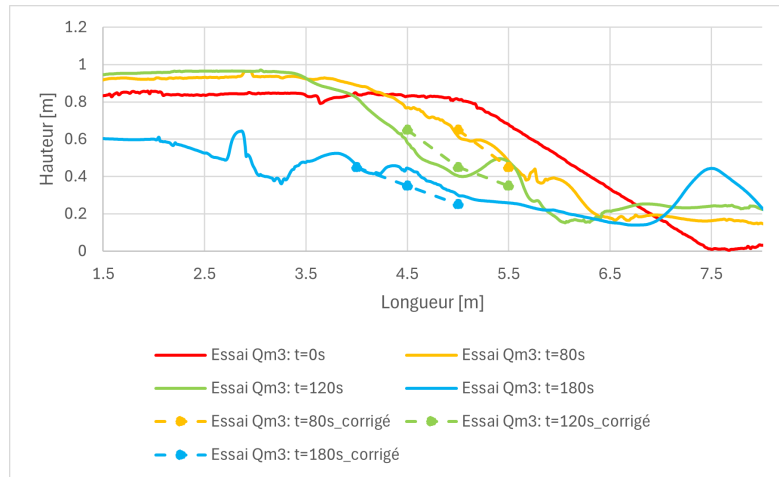


FIGURE 3.31 – Essai Qm3 : Evolution du profil longitudinal

La figure 3.31 permet d’obtenir une idée globale de l’évolution temporelle du lit de la brèche. Cependant, ces profils doivent également être corrigés à l’aide des balles. Les courbes pointillées correspondent donc au fond exact obtenu à certains instants et à certains endroits à l’aide des balles. Nous avons donc la profondeur exacte au moment où la balle est libérée, mais pas avant ni après. C’est pourquoi il y a peu de points de correction, mais ils permettent de confirmer, malgré les imprécisions des fichiers DEM pour la profondeur, que les profils ont la bonne allure.

Ground Control Points (GCP)

Les Ground Control Points, représentés à la figure 3.32, sont des repères numérotés placés partout sur les murets guides et sur la cage métallique. Ils ont des symboles particuliers qui sont reconnus par le logiciel Agisoft Metashape qui connaît la coordonnée exacte de chacun d’entre eux.

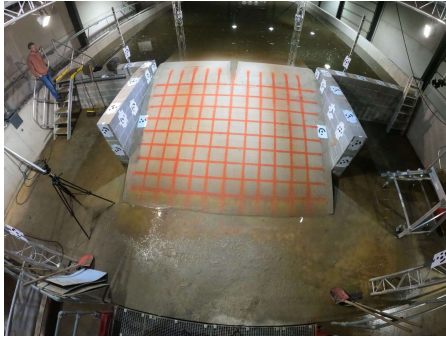


FIGURE 3.32 – GCP présent sur la plateforme d’essai

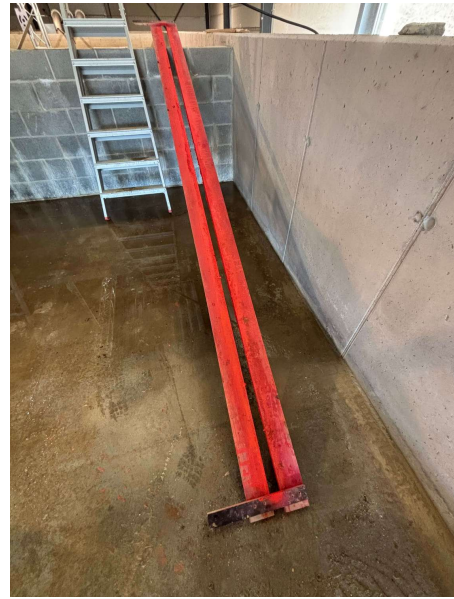
Ces points de repères fixes aident le logiciel à recréer correctement le modèle 3D bien qu’il faille parfois corriger la position des GCP sur les images de la photogrammétrie afin d’obtenir les résultats les plus précis possible.

Quadrillage orange

La figure 3.33 représente le quadrillage orange réalisé sur la digue avant l’essai Hf3. Ce motif sur la face aval permet de faciliter la perception de la pente par le logiciel pour la photogrammétrie. La peinture a été réalisée à l’aide de bombonnes de peinture orange et du guide en bois de la figure 3.33



(a) Quadrillage réalisé sur la digue



(b) Guide en bois

FIGURE 3.33 – Dispositif permettant de faciliter la photogrammétrie

3.5.7 Lidar

Le LiDAR (Light Detection And Ranging) est une technologie de mesure à distance qui utilise un faisceau laser pour déterminer la distance entre un capteur et un objet. Le concept associe un instrument équipé d'un ou plusieurs lasers , des processus d'interaction lumière-matière avec des cibles microscopiques ou macroscopiques. Et une propagation aller-retour du rayonnement laser puis de la lumière diffusée/réfléchie[14].

Cet appareil a seulement été utilisé dans le cadre de l'essai Qm3. Il a été déployé une première fois avant l'essai et une seconde après la rupture et l'évacuation totale du bassin.

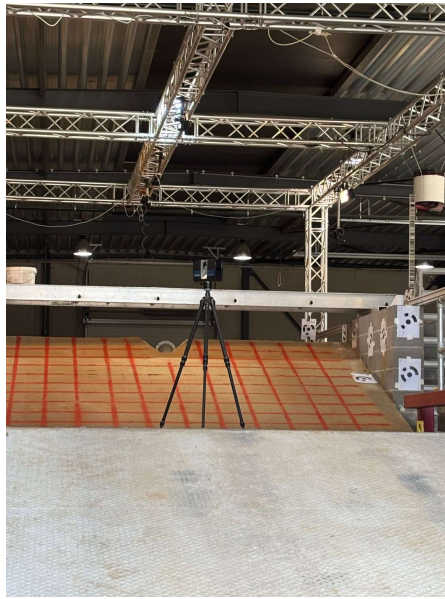


FIGURE 3.34 – Lidar placé lors de l'essai Qm3

La Figure 3.35 représente le modèle 3D obtenu par le LiDAR.

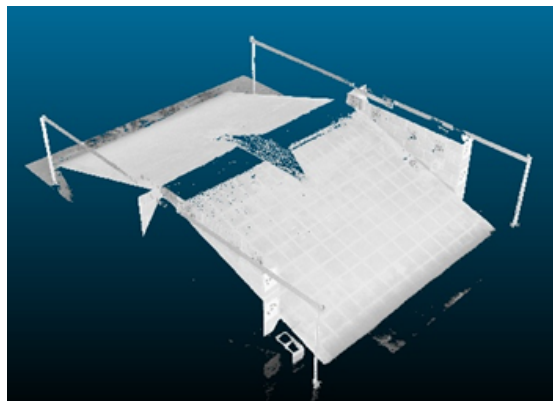


FIGURE 3.35 – Modèle 3D obtenu par le LiDAR

On compare ensuite avec le modèle 3D obtenu par photogrammétrie.

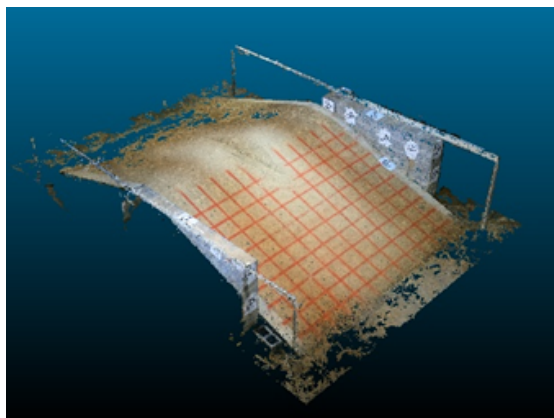


FIGURE 3.36 – Modèle 3D obtenu par photogrammétrie

Et on obtient la figure 3.37, qui confirme bien que la photogrammétrie est fidèle pour représenter la 3D de la digue. En effet, le modèle très précis du LiDAR se superpose parfaitement avec le modèle obtenu à l'aide du logiciel Agisoft Metashape.

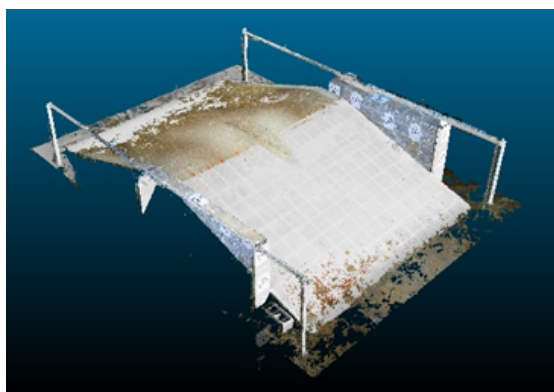


FIGURE 3.37 – Superposition des Modèles 3D obtenu par photogrammétrie et avec le LiDAR

3.5.8 Sondes sur la crête de la digue

Un ensemble de trois sondes hydrostatiques a été ajouté lors de l'essai Qm3 afin d'obtenir, avec plus de précision, la hauteur de l'eau dans la brèche. Ces sondes ont été positionnées sur des rails au dessus de la digue, au niveau de l'axe de la brèche, comme on peut le voir à la figure 3.38. Elles permettent d'obtenir la hauteur de la surface de l'écoulement avec plus de précision que les fichiers DEM.



FIGURE 3.38 – Rails avec les sondes de niveau ajoutées lors de l'essai Qm3

Malheureusement, comme on peut le remarquer à la figure 3.39, les sondes les plus proches de l'aval ont énormément de "bruit". Même une fois corrigées par une moyenne mobile, ces deux courbes ne sont pas exploitables. On va donc se contenter de celle la plus à l'amont, Zdi1 qui ne possède qu'une zone de "bruit" relativement courte.

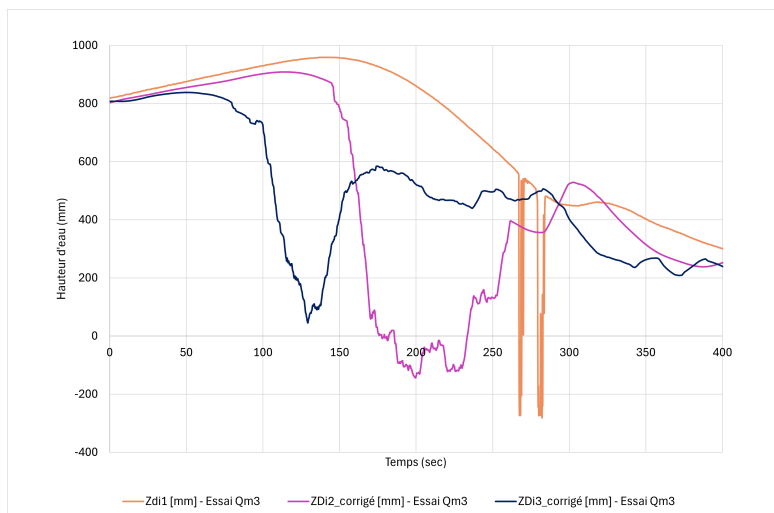


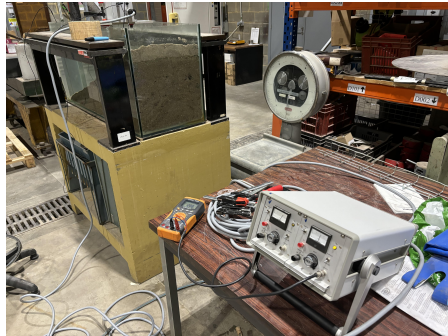
FIGURE 3.39 – Essai Qm3 : Evolution des niveaux des sondes ajoutées

3.5.9 Appareils supplémentaires

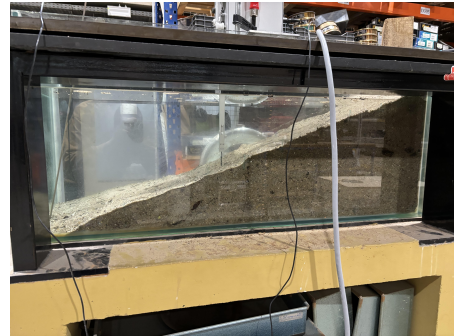
Plusieurs semaines avant la réalisation de l'essai Hf3, plusieurs appareils de mesure de profil ont été empruntés au laboratoire hydraulique du Service Public de Wallonie (SPW) afin de potentiellement les ajouter lors des essais pour ce travail.

L'objectif était de vérifier leur fonctionnement et de les calibrer à petite échelle lors d'un essai dans le canal du LEMSC.

Ces deux appareils sont des "BedProfiler" et permettent d'obtenir le niveau de remblai, donc de sable dans notre cas, en fonction du temps. Le premier appareil est le "profile indicator PV11" et le second est le "profile indicator PV09". La figure 3.40 représente le setup expérimental mis en place afin de calibrer ces instruments.



(a) Setup expérimental avec le générateur de courant et le multimètre



(b) Aquarium lors de la calibration du PV 09

FIGURE 3.40 – Dispositif permettant de calibrer les "BedProfiler"

Le PV11 est constitué d'une roulette en contact avec le sable et d'un axe qui permet le mouvement vertical lorsqu'il y a une pente. L'appareil est alimenté par le générateur de courant à droite sur la photo a) de la figure 3.40 et il envoie un signal électrique différent en fonction de la hauteur de la roue. Ce signal est mesuré par un multimètre numérique portable présent à gauche du générateur. Ce signal est enregistré et mis en relation avec la hauteur réelle du fond afin de calibrer l'appareil.

Le PV09, quant à lui, fonctionne sensiblement de la même manière, à la différence que c'est une sonde qui est au bout de l'appareil au fond de l'eau. Une électrode doit également être reliée à la terre au fond de l'eau. Un champ électromagnétique naît alors et la sonde reste en permanence proche du fond sans le toucher. Un signal électrique est également émis en fonction de la hauteur.

Lors de la calibration, le PV11 s'est avéré peu fiable car la roue ne tournait pas correctement. En effet, l'objectif est de réaliser le profil en avançant l'appareil sur un rail le long de l'aquarium mais la roue s'engouffrait dans le sable sans arrêt.

Le PV09 fonctionnait bien lors de la calibration mais l'essai à petite échelle dans le canal du LEMSC a démontré les limites de l'appareil. En effet, la sonde s'est retrouvée plantée dans le sable lors de l'érosion de la digue et de l'augmentation du courant. Les données traitées n'avaient aucune valeur, étant donné que la sonde est restée plantée dans le remblai sans mesurer l'évolution du fond.

Il a donc été déterminé que ces deux instruments de mesure ne conviendraient pas pour les essais à moyenne échelle.

3.5.10 Particules pour l'analyse PIV

Un ensemble de particules a été dispersé dans le bassin durant les essais. C'est de la sciure de bois qui a été choisie afin de créer une couche de particules à la surface de l'eau. Ces particules sont utilisées afin de réaliser l'analyse PIV des essais. La figure 3.41 représente l'essai Qm3 lorsque la sciure a été dispersée depuis les pompes tandis que pour d'anciens essais, la dispersion a été réalisée depuis le bord de la digue directement en amont de la brèche.



FIGURE 3.41 – Essai Qm3 : Couche de sciure de bois à la surface

L'analyse PIV consiste en la détermination des champs de vitesses de l'écoulement en traitant les images. Chaque image est découpée en petites zones appelées interrogation windows (ex. 32×32 pixels). On cherche le déplacement moyen des particules dans chaque zone. Pour chaque fenêtre, on compare la première et la seconde image grâce à un calcul mathématique appelé corrélation croisée. Le pic de corrélation indique le déplacement moyen des particules dans la zone. La formule permettant d'obtenir la vitesse est la suivante :

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

avec :

- Δx = déplacement trouvé par corrélation
- Δt = temps entre deux images successives = $\frac{1}{23.98 fps}$

Ensuite, il y a toute une série d'outils de post-traitement qui permettent d'affiner et de mieux représenter les résultats. Il est donc possible de filtrer les vecteurs erronés et d'interpoler des zones vides par exemple. Deux méthodes différentes d'analyse seront utilisées dans le chapitre 5.

Chapitre 4

Résultats expérimentaux

Ce chapitre se concentre sur l'analyse et la comparaison des résultats. La première partie concerne les essais Qm3 et Hf4 qui ont été réalisés dans le cadre de ce travail et elle se concentre uniquement sur les résultats. L'obtention de ces résultats est décrite au chapitre 3. Tandis que la seconde partie présente la comparaison avec les 6 essais tirés des travaux précédents [6] [7] ainsi que l'analyse de l'influence des conditions d'essai.

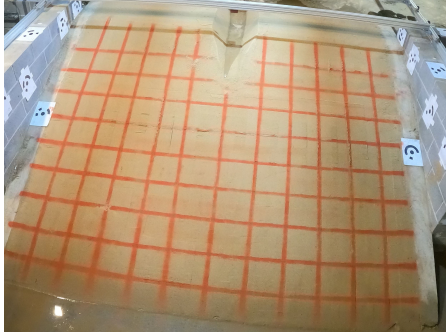
4.1 Résultat de l'essai Qm3

L'essai Qm3, comme son nom l'indique, est un essai avec une digue de sable moyen ($d_{50}=0,632$ [mm]) soumise à un débit constant. Il a été réalisé le 20.03.2025 dans le laboratoire hydraulique du Service Public de Wallonie (SPW).

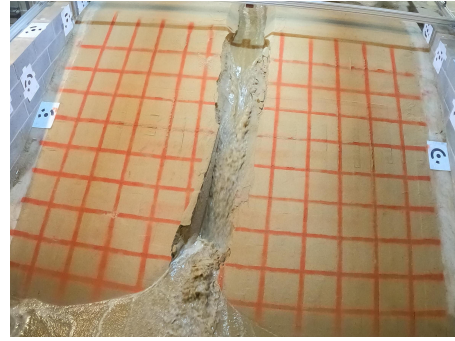
4.1.1 Analyse de l'évolution temporelle et spatiale de la brèche

Validation des théories

L'essai Qm3 démarre lorsque l'écoulement atteint la pente aval, c'est le temps $t = 0s$. La hauteur de la brèche pour cet essai est de 20cm donc elle est située à 80 cm du sol.



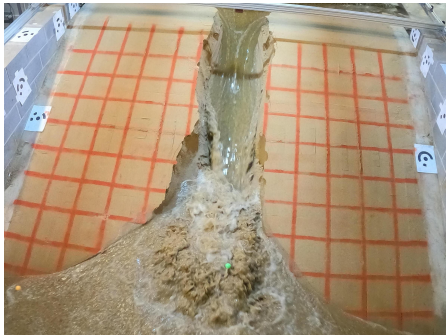
(a) $t = 0s$



(b) $t = 60s$

FIGURE 4.1 – Photos prises lors de l'essai Qm3

Comme on peut le voir sur les photos de la figure 4.1, l'érosion a déjà commencé après 60 secondes. Conformément aux théories, la pente de la brèche s'est développée parallèlement à la pente aval jusqu'à atteindre le fond comme on peut le voir en bas de la digue. On remarque que l'érosion, verticale pour le moment, se propage vers l'amont. Le ressaut hydraulique, visible dans la brèche, indique la transition d'un écoulement supercritique à forte pente à un écoulement sous-critique à faible pente.



(a) $t = 120s$



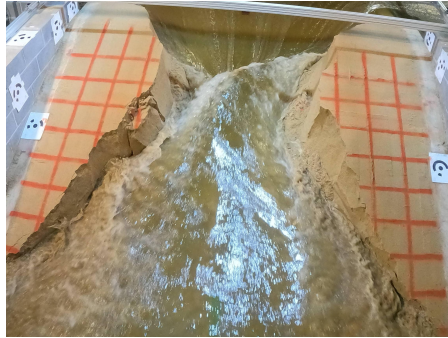
(b) $t = 180s$

FIGURE 4.2 – Photos prises lors de l'essai Qm3

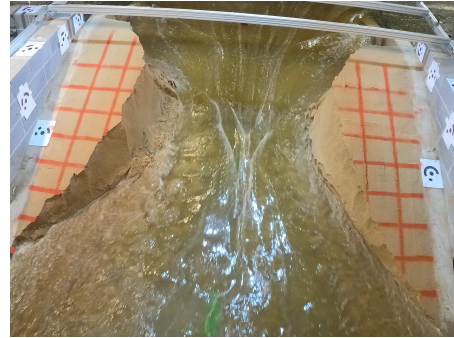
Après $t = 120s$, l'érosion s'est propagée jusqu'à l'amont mais est restée principalement verticale. Le ressaut hydraulique est encore visible et on voit très clairement la transition de l'écoulement super-critique à sous-critique. La pente de fond commence à diminuer car le point de pivot (théorie de Coleman[11]) a été atteint.

Tandis que 60 secondes plus tard, plusieurs blocs de sable moyen se sont décrochés et la brèche s'est fortement élargie. Cela correspond, selon les théories, au

moment où la pente minimale est atteinte et l'élargissement latéral s'accroît. Le débit de brèche augmente alors fortement.



(a) $t = 240s$



(b) $t = 300s$

FIGURE 4.3 – Photos prises lors de l'essai Qm3

L'érosion a atteint le fond de la digue en $t = 240s$ tandis que l'élargissement de la brèche se poursuit avec la chute de nombreux blocs de remblai. Après $t = 300s$, la forme caractéristique de sablier pour le sable moyen est clairement visible.

Construction de la digue

Lors de la construction de la digue de l'essai Qm3, les masses volumiques humides et sèches suivantes ont été mesurées.

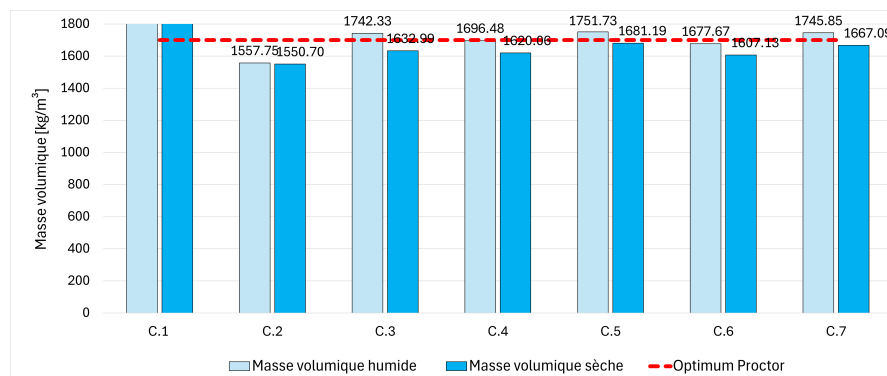


FIGURE 4.4 – Essai Qm3 : Evolution des masses volumiques humides et sèches

On remarque rapidement que le compactage de cet essai est optimal car les masses volumiques sèches sont très proches de l'optimum Proctor pour chaque

couche, sauf pour la première. Ce résultat pour la première couche est normal car c'est le premier échantillon, celui pour lequel il n'y a pas de donnée précédente. Pour les couches suivantes, nous avons pu augmenter ou diminuer la quantité d'eau afin de tendre vers l'optimum Proctor en fonction du résultat de la couche précédente.

L'essai Qm3 est donc bien compacté car chaque couche de sable moyen tend vers une masse volumique sèche égale à $1700 \text{ [kg/m}^3\text{]}$.

Profondeur de la brèche

L'approfondissement de la brèche a pu être déterminé grâce à cinq séries de balles disposées à différentes hauteurs et à différents endroits dans l'axe de la brèche (repère 3.23).

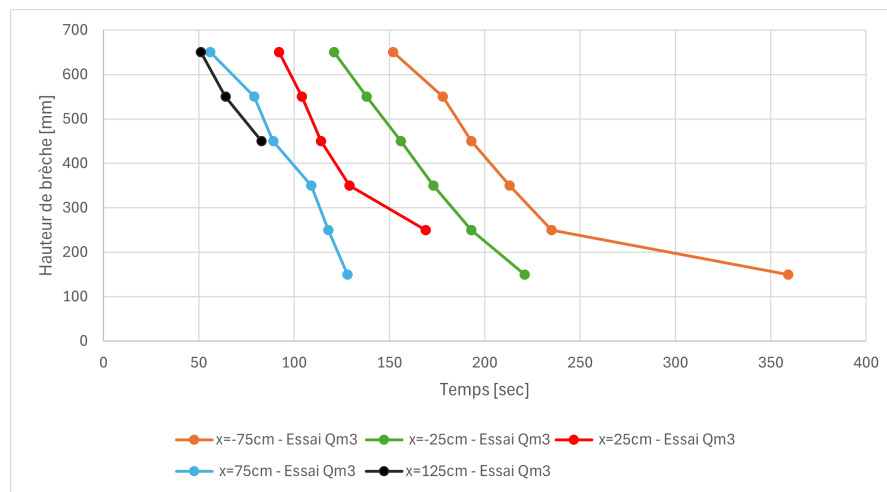


FIGURE 4.5 – Essai Qm3 : Evolution de la profondeur de la brèche

On remarque bien que l'érosion verticale se propage de l'aval en $x=125\text{cm}$ à l'amont en $x=-75\text{cm}$. Les vitesses moyennes de l'érosion verticale à chaque endroit sont les suivantes :

- $x = 125 \text{ cm} : 375 \text{ [mm/min]}$
- $x = 75 \text{ cm} : 417 \text{ [mm/min]}$
- $x = 25 \text{ cm} : 312 \text{ [mm/min]}$
- $x = -25 \text{ cm} : 300 \text{ [mm/min]}$
- $x = -75 \text{ cm} : 145 \text{ [mm/min]}$

L'érosion verticale est plus rapide à l'aval et diminue légèrement en se propageant vers l'amont.

Largeur de la brèche

L'évolution de la largeur supérieure de la brèche est obtenue grâce au code Python et aux fichiers DEM. On remarque à la figure 4.6 que l'érosion latérale est plus forte à l'amont de la crête ($x=-25\text{cm}$), surtout durant la deuxième moitié de l'essai. Tandis que l'érosion latérale à l'aval de la crête ($x=25\text{cm}$) et sur la pente aval ($x=75\text{cm}$) reste assez proche, sauf vers $t = 240\text{s}$ lorsque l'érosion à l'aval de la crête augmente fortement. On peut également apercevoir la forme de sablier en fin d'essai à travers ces résultats. En effet, en $t = 300\text{s}$, la largeur est plus grande aux extrémités ($x=-25\text{cm}$ et $x=75\text{cm}$) par rapport au milieu de la digue ($x=25\text{cm}$).

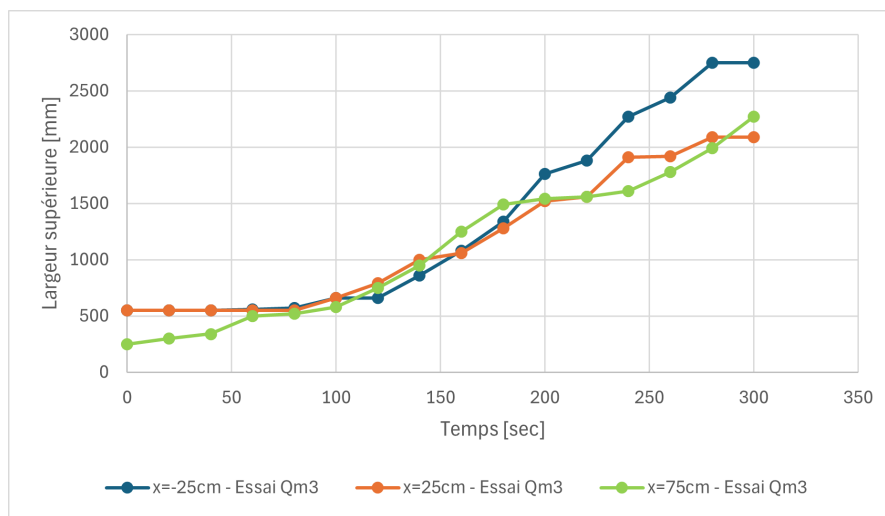


FIGURE 4.6 – Essai Qm3 : Evolution de la largeur supérieure de la brèche

Concernant les vitesses moyennes de l'érosion latérale, elles sont relativement proches à l'amont et à l'aval, mais plus faibles au milieu :

- $x = 75\text{ cm}$: 404 [mm/min]
- $x = 25\text{ cm}$: 308 [mm/min]
- $x = -25\text{ cm}$: 440 [mm/min]

Ces vitesses correspondent bien à la formation d'un sablier dans la digue avec un élargissement plus rapide aux extrémités par rapport au centre.

L'évolution de la profondeur et de la largeur permet d'obtenir les sections corrigées des figures 4.7, 4.8 et 4.9. Ces différentes sections de l'écoulement permettent

d'obtenir le débit à travers la brèche grâce à la vitesse à la surface. Ces calculs sont réalisés dans le chapitre 5.

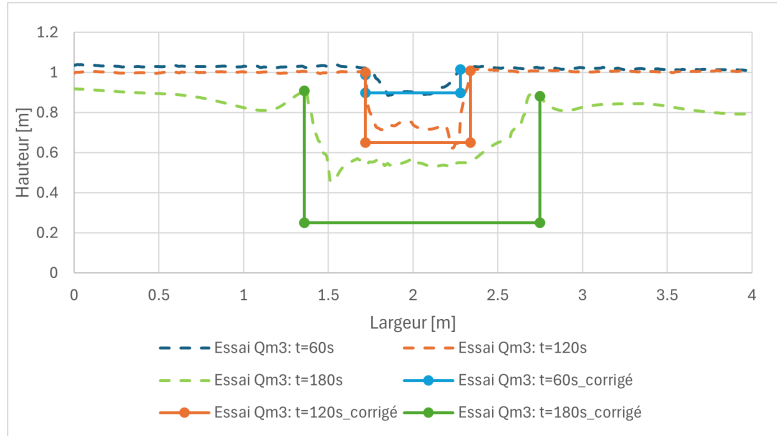


FIGURE 4.7 – Essai Qm3 : Sections en $x = -25cm$

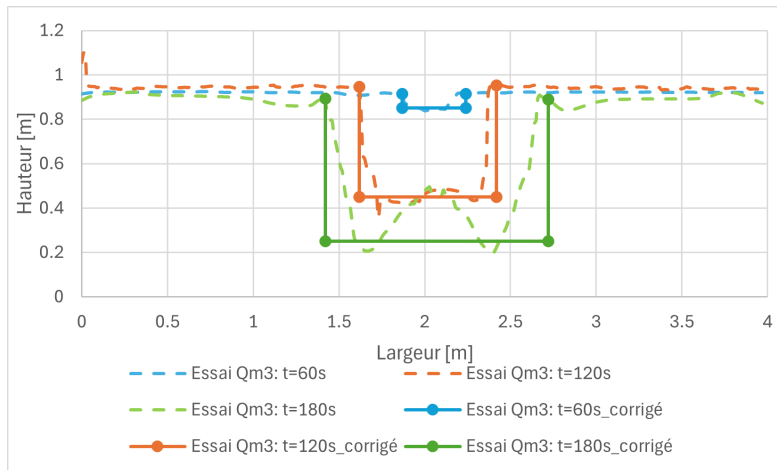


FIGURE 4.8 – Essai Qm3 : Section en $x = 25cm$

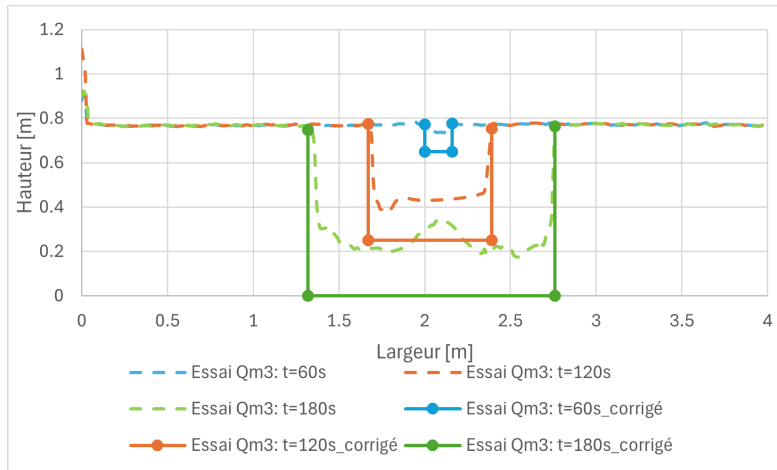


FIGURE 4.9 – Essai Qm3 : Sections en $x = 75cm$

Profil longitudinal de la brèche

L'évolution du profil longitudinal de la brèche est corrigée à l'aide des balles pour les moments où cela est possible. Les courbes en pointillés correspondent donc au fond réel de la brèche.

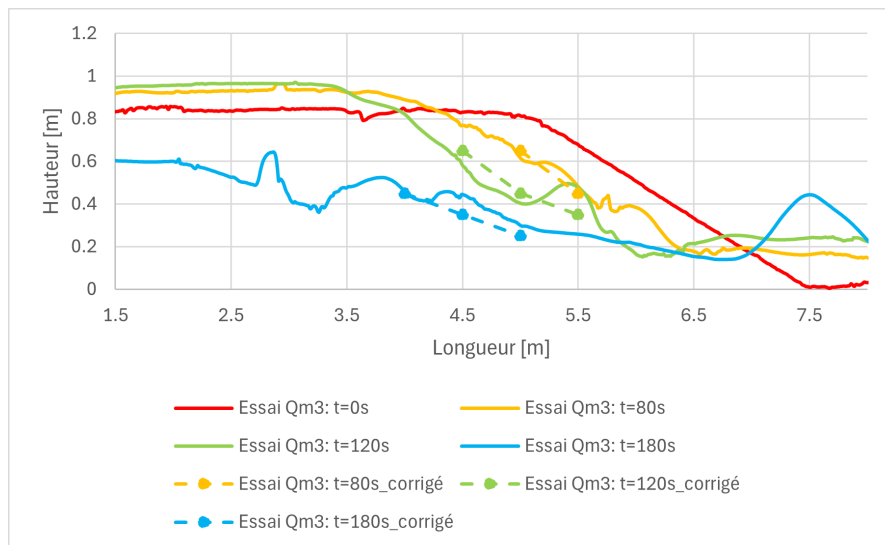


FIGURE 4.10 – Essai Qm3 : Evolution du profil longitudinal

On remarque en $t = 80s$ que la pente de la brèche est parallèle à la pente aval. Puis en $t = 120s$, l'érosion s'est propagée vers l'amont avec une accumulation de

remblai vers 5,5m et un ressaut hydraulique à cet endroit. En $t = 180s$, l'érosion a fortement creusé la digue à l'amont et il y a une accumulation de remblai à l'aval.

Débit de brèche et évolution du niveau d'eau

Le débit de brèche a été obtenu à l'aide de plusieurs formules dans le chapitre 3. La donnée la plus importante pour ce calcul est la hauteur d'eau Zhyd2 qui a été corrigée à l'aide d'autres sondes de niveau.

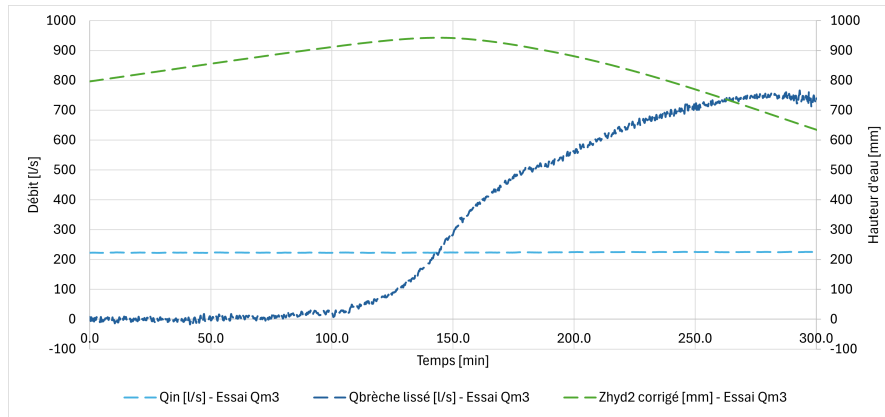


FIGURE 4.11 – Essai Qm3 : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Zhyd2 corrigé)

On remarque directement que l'essai a bien été réalisé avec un débit entrant constant $Q_{in}=224$ [l/s]. Le débit de brèche, quant à lui, augmente fortement de $t = 100s$ jusqu'à $t = 250s$. Ce moment correspond à l'accélération de l'érosion latérale qui provoque une forte augmentation de la section de l'écoulement et donc du débit. L'érosion était principalement verticale avant que le débit de brèche n'augmente.

Concernant le niveau d'eau, il augmente jusqu'à atteindre son maximum en $t = 150s$, cela correspond au moment où l'augmentation du débit de brèche est la plus forte. Ensuite, le niveau diminue car le débit est tellement fort que le bassin se vide.

4.2 Résultat de l'essai Hf3

L'essai Hf3 est un essai avec une digue en sable fin ($d_{50}=0,314$ [mm]) soumise à un niveau d'eau constant dans le bassin. Il a été réalisé le 04.12.2024 dans le

laboratoire hydraulique du Service Public de Wallonie (SPW). Malheureusement, lors de l'analyse des résultats, nous avons remarqué un problème de calibration au niveau des débitmètres des pompes. En effet, les débitmètres avaient été recalibrés, mais l'affichage et l'enregistrement des données de débit n'étaient pas corrects via l'Hydrocap. Il a donc été nécessaire d'utiliser le fichier enregistré par l'automate afin de corriger les débits d'entrée.

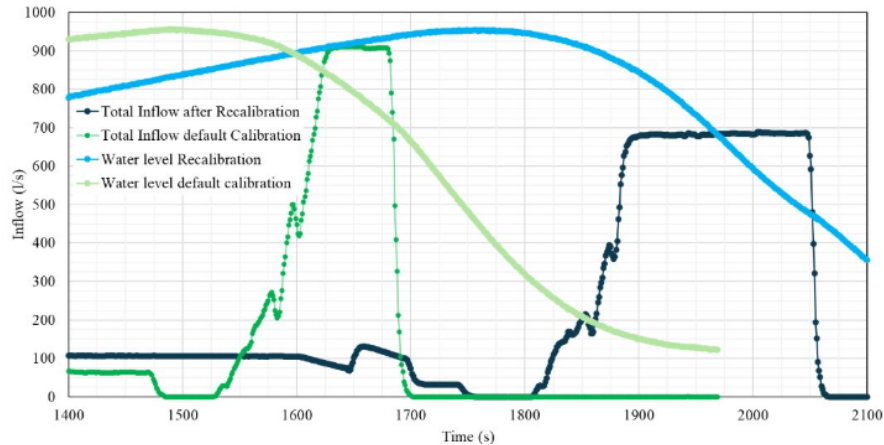


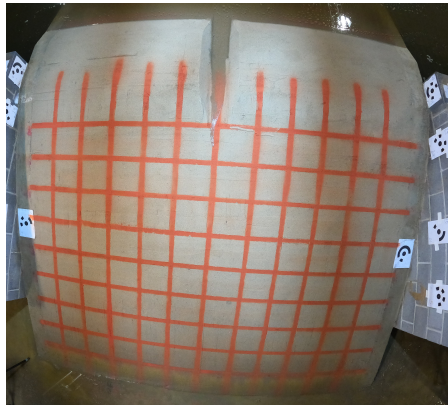
FIGURE 4.12 – Essai Hf3 : Effet de la recalibration des débitmètres

Ce phénomène de recalibration provoque une réduction des capacités des pompes (saturation des pompes plus tôt). Cela modifie donc légèrement l'hydrogramme des pompes, ce qui allonge la durée de remplissage du bassin. Les essais en mode de régulation de niveau ne seront pas identiques à ceux réalisés précédemment.

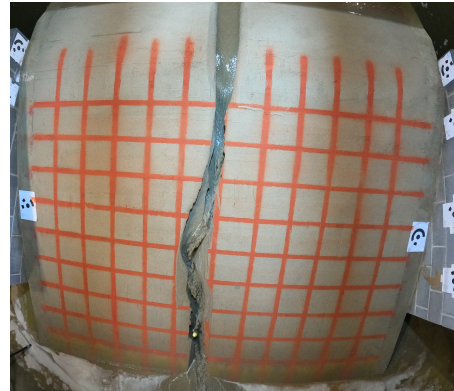
4.2.1 Analyse de l'évolution temporelle et spatiale de la brèche

Validation des théories

L'essai Hf3 démarre lorsque l'écoulement atteint la pente aval en $t = 0s$. La hauteur de la brèche pour cet essai est de 10cm donc elle est située à 90cm du sol.



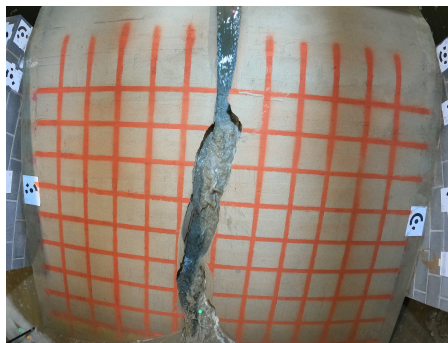
(a) $t = 0s$



(b) $t = 60s$

FIGURE 4.13 – Photos prises lors de l'essai Hf3

Conformément aux théories, l'érosion en $t = 60s$ est uniquement verticale. La pente de brèche commence à se développer en escalier avec une érosion non-uniforme. On peut le remarquer avec les balles qui s'échappent déjà à l'aval. L'érosion a donc déjà atteint l'aval et commence à se diriger vers l'amont.



(a) $t = 120s$



(b) $t = 180s$

FIGURE 4.14 – Photos prises lors de l'essai Hf3

En $t = 120s$, l'escalier s'est propagé vers l'amont avec une faible érosion au milieu de la pente aval tandis que la profondeur de la brèche augmente vers l'aval. L'érosion reste surtout verticale et on observe le passage d'un écoulement supercritique à forte pente à un écoulement sous-critique à faible pente avec un ressaut hydraulique au niveau de l'escalier. Tandis que en $t = 180s$, l'escalier a atteint l'amont et comme selon les théories, la rupture s'accélère à ce moment précis. En effet, l'érosion est désormais majoritairement latérale et provoquée par la chute de blocs de sable fin qui augmente fortement le débit dans la brèche. Cela

correspond au moment où la pente minimale est atteinte et l'élargissement latéral s'accroît.



(a) $t = 240s$



(b) $t = 300s$

FIGURE 4.15 – Photos prises lors de l'essai Hf3

L'érosion latérale a continué jusqu'en $t = 240s$ avec la chute de nombreux blocs de sable et un fort élargissement de la brèche. On remarque également que les parois de la brèche sont restées verticales durant la rupture. En $t = 300s$, la rupture est quasiment terminée et la brèche a une forme rectangulaire, caractéristique des essais avec le sable fin.

Construction de la digue

Lors de la construction de la digue de l'essai Hf3, les masses volumiques humides et sèches suivantes ont été mesurées.

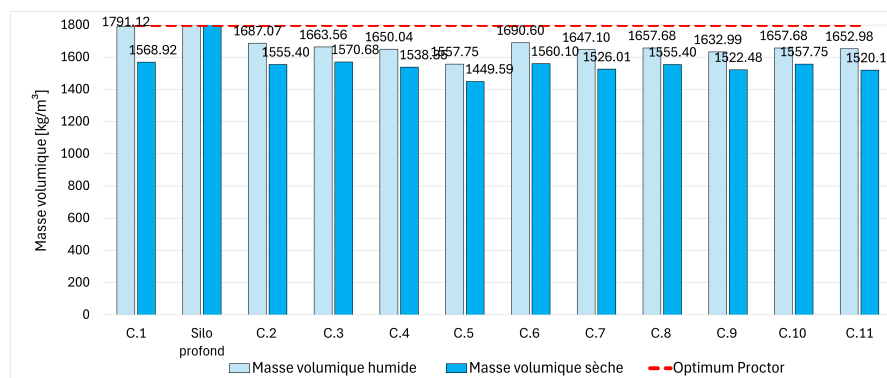


FIGURE 4.16 – Essai Hf3 : Evolution des masses volumiques humide et sèche

On remarque que le compactage de cet essai est bon car les masses volumiques sèches sont relativement proches de l'optimum Proctor. L'essai Hf3 est donc suffisamment compacté malgré que les masses volumiques sèches soient en dessous de la valeur optimale de $1800 \text{ [kg/m}^3\text{]}$.

Profondeur de la brèche

L'approfondissement de la brèche a pu être déterminé grâce à cinq séries de balles disposées à différentes hauteurs et à différents endroits dans l'axe de la brèche (repère 3.23).

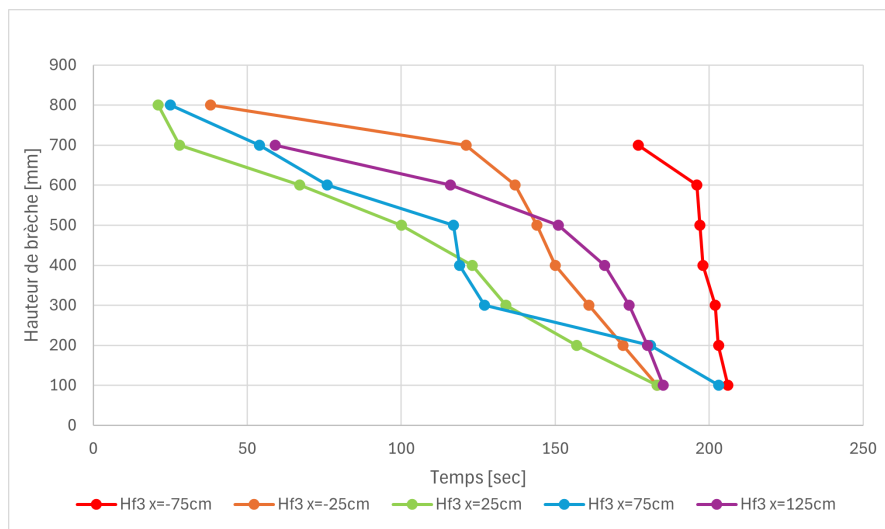


FIGURE 4.17 – Essai Hf3 : Evolution de la profondeur de la brèche

On remarque que l'érosion verticale a tendance à être plus rapide au centre de la digue en $x=25 \text{ cm}$ par rapport aux extrémités en $x=-75 \text{ cm}$ et $x=125 \text{ cm}$, bien que ce ne soit pas parfaitement uniforme. C'est le phénomène d'escalier qui provoque cela : l'érosion est faible lorsque qu'il se forme à l'aval, puis il se propage vers l'amont et peut emporter plusieurs balles en peu de temps lorsqu'il atteint chaque position. Cela provoque donc une érosion non-uniforme.

- $x = 125 \text{ cm}$: 286 [mm/min]
- $x = 75 \text{ cm}$: 236 [mm/min]
- $x = 25 \text{ cm}$: 259 [mm/min]
- $x = -25 \text{ cm}$: 290 [mm/min]
- $x = -75 \text{ cm}$: 1241 [mm/min]

Les vitesses moyennes de l'érosion verticale restent relativement semblables avec

une augmentation vers les extrémités. Le phénomène de propagation en escalier explique la très grande vitesse en $x = -75\text{cm}$. En effet, lorsque l'escalier a atteint cette position, l'ensemble des balles sont emportées en très peu de temps comme on peut le voir sur la figure 4.17 .

Largeur de la brèche

L'évolution de la largeur supérieure de la brèche est obtenue grâce au code Python et aux fichiers DEM. On aperçoit sur la figure 4.18 que l'érosion latérale s'intensifie après $t = 150\text{s}$. Cela se traduit par la chute de blocs de remblai entre $t = 200\text{s}$ et $t = 250\text{s}$, qui correspond à une forte augmentation de la pente pour chaque position.

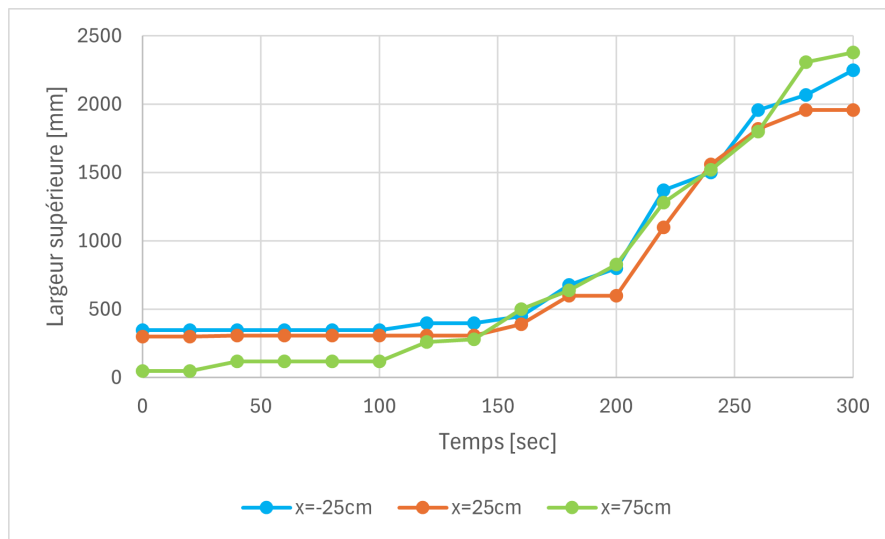


FIGURE 4.18 – Essai Hf3 : Evolution de la largeur supérieure de la brèche

Les vitesses moyennes de l'érosion latérale sont les suivantes.

- $x = 75\text{ cm}$: 466 [mm/min]
- $x = 25\text{ cm}$: 332 [mm/min]
- $x = -25\text{ cm}$: 380 [mm/min]

Ces vitesses moyennes ainsi que le graphique confirment que l'érosion latérale, comme l'érosion verticale, est plus rapide aux extrémités de la digue en $x = 75\text{ cm}$ et $x = -25\text{ cm}$ par rapport au milieu de la digue en $x = 25\text{ cm}$. Cependant, les vitesses restent assez proches et correspondent bien à une forme de brèche plutôt rectangulaire en fin d'essai.

L'évolution de la profondeur et de la largeur permet d'obtenir les sections corrigées des figures 4.19, 4.20 et 4.21. Ces différentes sections de l'écoulement permettent d'obtenir le débit à travers la brèche grâce à la vitesse à la surface de l'écoulement. Ces calculs sont réalisés dans le chapitre 5.

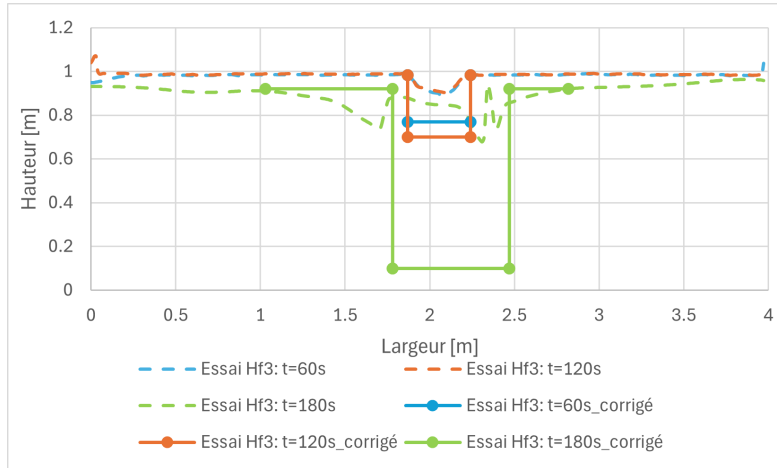


FIGURE 4.19 – Essai Hf3 : Sections en $x = -25cm$

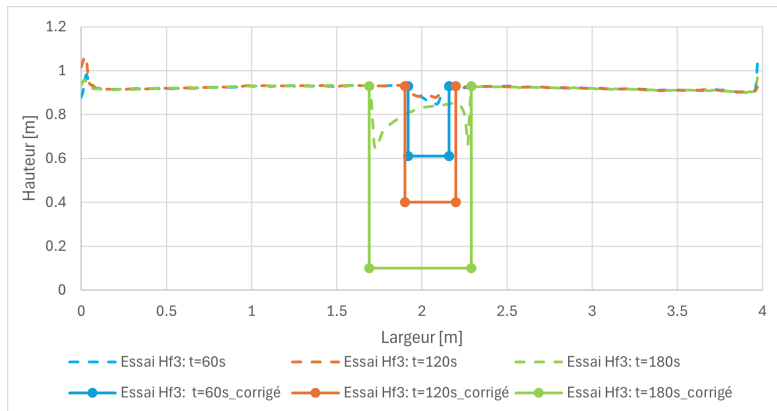


FIGURE 4.20 – Essai Hf3 : Section en $x = 25cm$

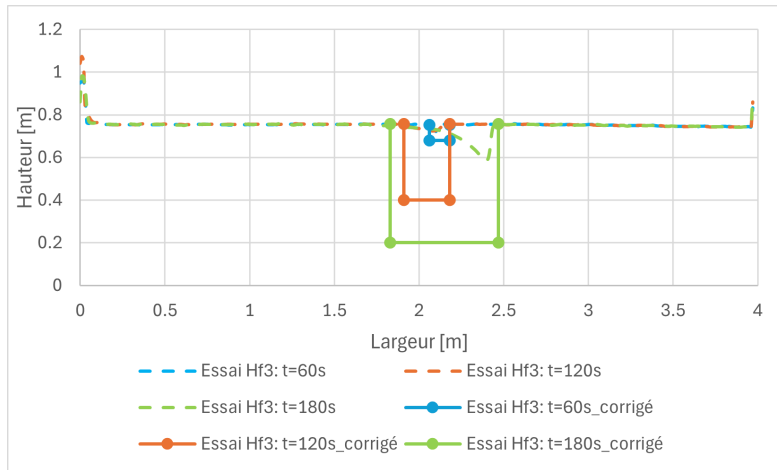


FIGURE 4.21 – Essai Hf3 : Sections en $x = 75cm$

Profil longitudinal de la brèche

L'évolution du profil longitudinal de la brèche est corrigée à l'aide des balles pour les moments où cela est possible. Les courbes pointillées correspondent donc au fond réel de la brèche tandis que les courbes de base sont obtenues à l'aide des fichiers DEM et du code Python.

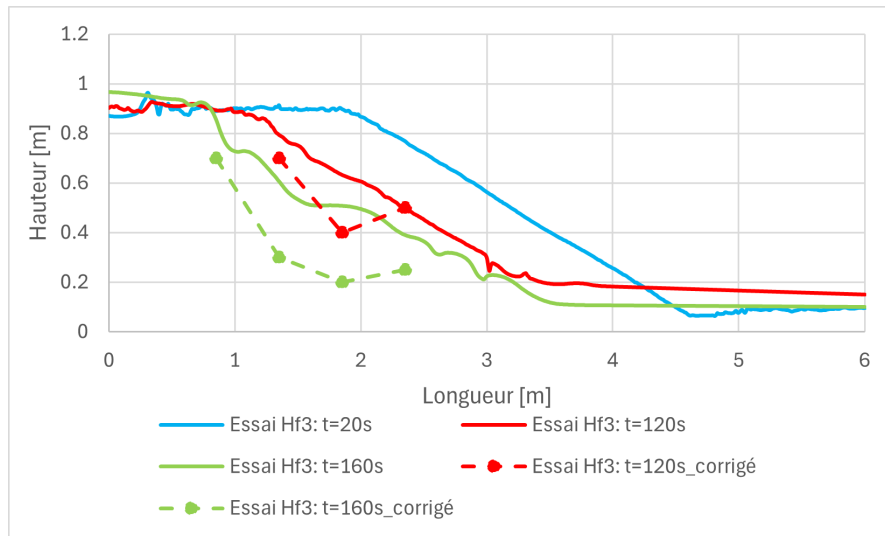


FIGURE 4.22 – Essai Hf3 : Evolution du profil longitudinal

En $t = 20s$, le profil correspond au profil initial et il y a peu d'érosion. Tandis que en $t = 120s$, l'érosion a déjà bien creusé la brèche mais la courbe corrigée

indique la présence d'un creux, correspondant au phénomène d'érosion en escalier. En $t = 160s$, la brèche continue de s'approfondir et la courbe corrigée indique à nouveau la présence d'un creux un peu plus vers l'amont, témoignant de l'avancée de l'escalier vers l'amont.

Débit de brèche et évolution du niveau d'eau

Le débit de brèche a été obtenu à l'aide de plusieurs formules dans le chapitre 3. La donnée la plus importante pour ce calcul est la hauteur d'eau Zhyd2 qui a été corrigée à l'aide d'autres sondes de niveau.

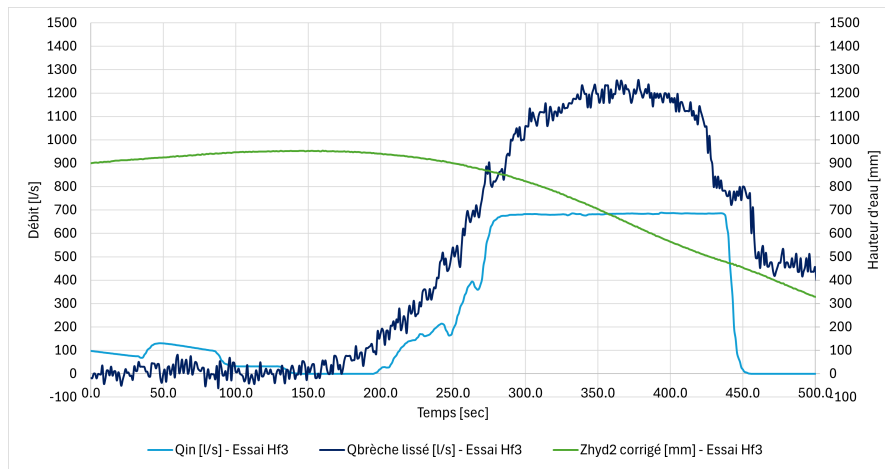


FIGURE 4.23 – Essai Hf3 : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Zhyd2 corrigé)

On remarque que le niveau est resté à peu près constant (entre 900 et 950 [mm]) jusque $t = 250s$ lorsque le débit de brèche a fortement augmenté. Les pompes ont bel et bien augmenté leurs débits afin de palier à la baisse du niveau dans le réservoir mais le débit de brèche était déjà trop élevé. Le souci de recalibration peut expliquer cette baisse de niveau : l'action simultanée des pompes a été limitée à 700 [l/s] au lieu de 900 [l/s] pour les précédents essais dans les mêmes conditions. Le débit de brèche augmente très fortement et seulement après $t = 200s$. Cela peut s'expliquer par la chute de nombreux blocs de sable fin sur une courte période de temps.

4.3 Comparaison des essais à débit constant avec le sable moyen : Qm

Les essais Qm sont des essais qui ont été réalisés avec une digue de sable moyen ($d_{50}=0,632$ [mm]) soumise à un débit constant égal à 224 [l/s]. Trois essais différents vont être comparés afin de déterminer la reproductibilité de Qm3 par rapport à Qm1 et Qm2.

TABLE 4.1 – Récapitulatif des essais Qm

Essai	Date	Condition de surverse	$d_{50}[mm]$	$h_d[m]$	$h_b[m]$	$h_w[m]$	Acronymes
5	28.03.2024	Débit constant	0,632	1	0,8	/	Qm1
6	24.04.2024	Débit constant	0,632	1	0,8	/	Qm2
8	20.03.2025	Débit constant	0,632	1	0,8	/	Qm3

4.3.1 Construction de la digue

Concernant la construction de la digue, la compaction des différents essais est reprise à la figure 4.24.

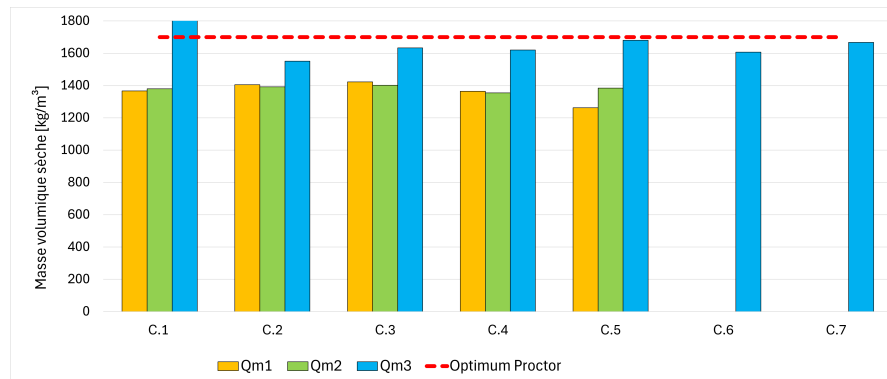


FIGURE 4.24 – Essais Qm : Evolution des masses volumiques sèches

On s'aperçoit rapidement que la compaction de l'essai Qm3 est bien meilleur que pour les essais Qm1 et Qm2. En effet, la masse volumique sèche de Qm3 tend vers l'optimum Proctor qui est égal à 1700 [kg/m³] tandis que pour Qm1 et Qm2, les valeurs tendent seulement vers 1400 [kg/m³]. Cela s'explique notamment par la construction avec 2 couches supplémentaires pour Qm3 qui a permis de mieux

adapter l'humidification du sable durant la réalisation de la digue.

De manière générale, le fait que ce soit le troisième essai dans ces conditions a permis de perfectionner la technique de construction afin d'obtenir une meilleure compaction.

4.3.2 Evolution visuelle de la brèche

Le temps 0 pour l'ensemble des trois essais correspond toujours au moment où l'écoulement atteint la pente aval. Durant le début des essais, la pente de la brèche est parallèle à la pente aval.

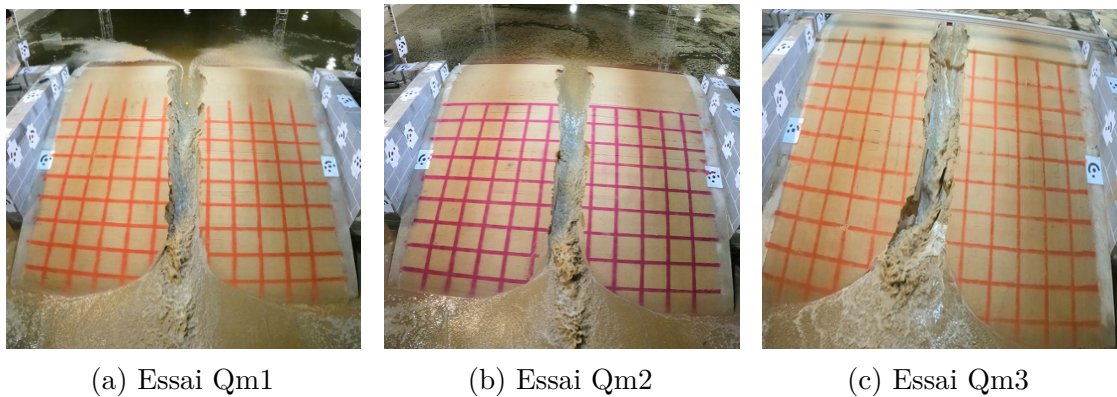


FIGURE 4.25 – Photos prises en $t = 80s$

Le fond de la brèche continue ensuite de s'approfondir en restant parallèle à la pente.

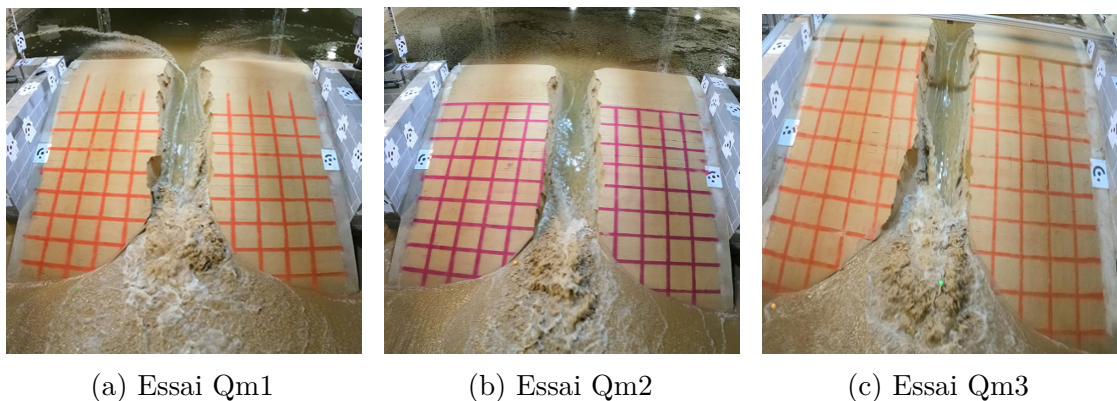


FIGURE 4.26 – Photos prises en $t = 120s$

Sur les photos prises en $t = 120s$, on s'aperçoit que la digue s'est érodée surtout verticalement et peu latéralement. On remarque également un ressaut hydraulique dans la brèche témoignant de la transition d'un écoulement supercritique à un écoulement sous-critique. Celui-ci se forme car la pente de la brèche n'est plus parfaitement parallèle à la pente aval due à l'accumulation de remblai à l'aval.

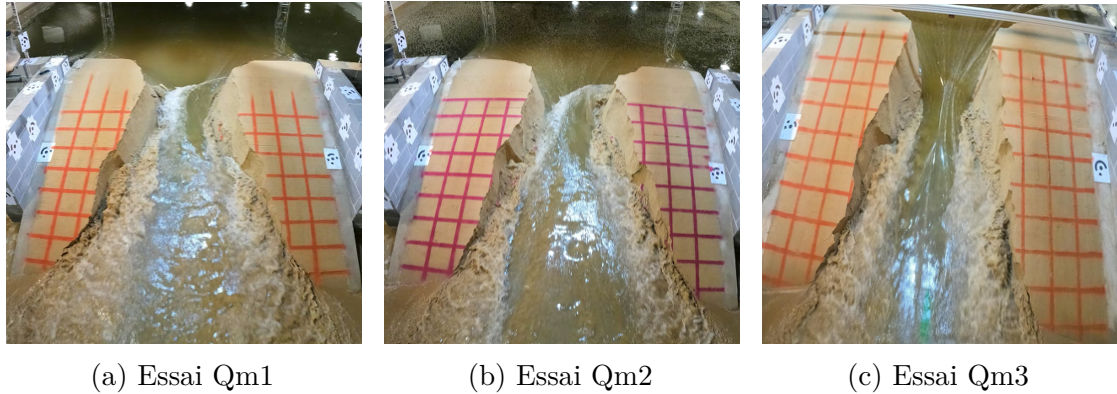


FIGURE 4.27 – Photos prises en $t = 180s$

Tandis que sur les photos en $t = 180s$, on remarque clairement que l'érosion latérale s'accélère progressivement pour les trois essais.

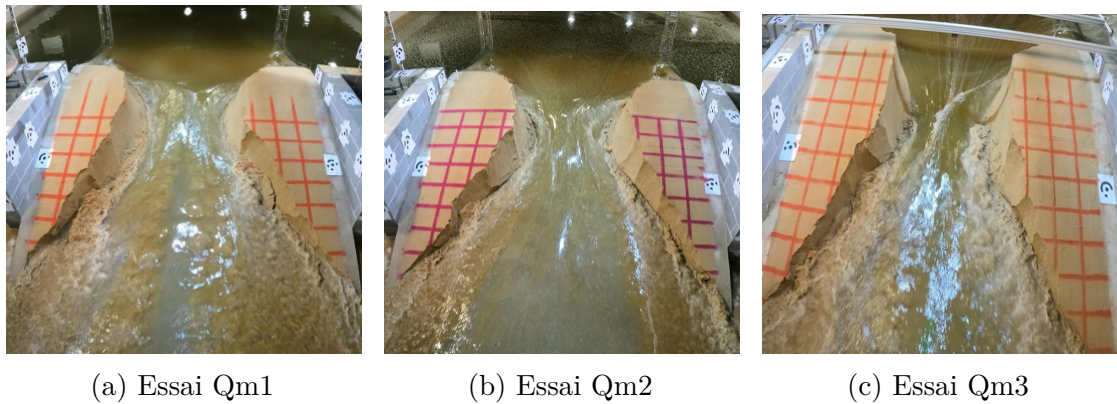


FIGURE 4.28 – Photos prises en $t = 220s$

En $t = 220s$, la digue s'est fortement érodée latéralement et la forme de sablier propre au sable moyen commence à se former pour les trois essais.

L'évolution de la brèche des trois essais Qm est semblable dans l'ensemble de ces photos.

4.3.3 Profondeur de la brèche

L'étude de l'apparition des balles colorées placées à différentes hauteurs et à différents endroits (en $x=-25\text{cm}$, $x=25\text{cm}$ et $x=75\text{cm}$) pour les essais Qm1 (courbe bleue), Qm2 (courbe rouge) et Qm3 (courbe verte) donne les trois résultats des figures 4.29, 4.30 et 4.31.

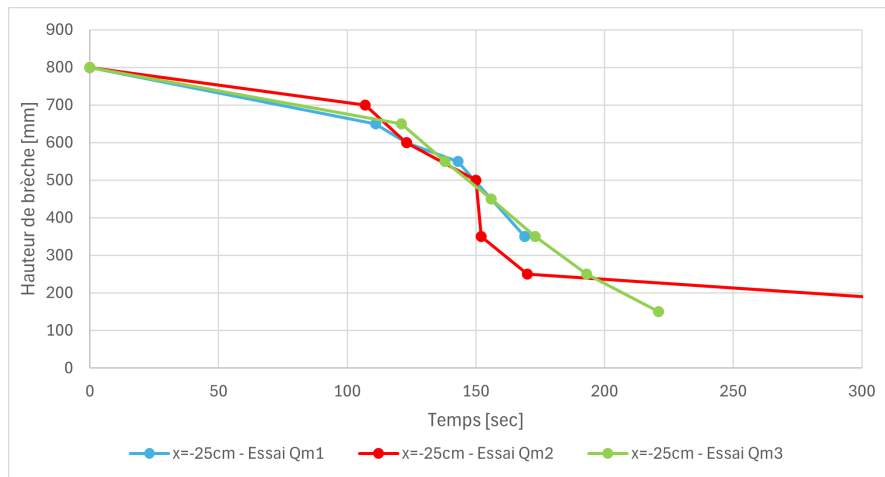


FIGURE 4.29 – Essais Qm : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en amont de la crête

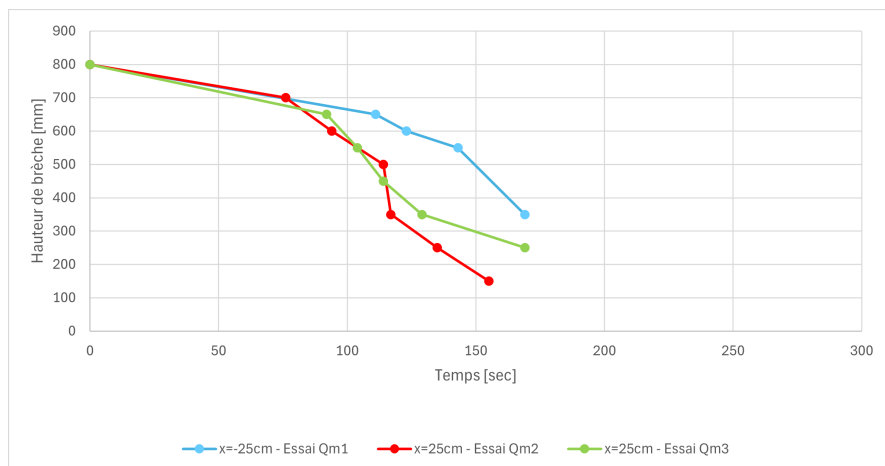


FIGURE 4.30 – Essais Qm : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en aval de la crête

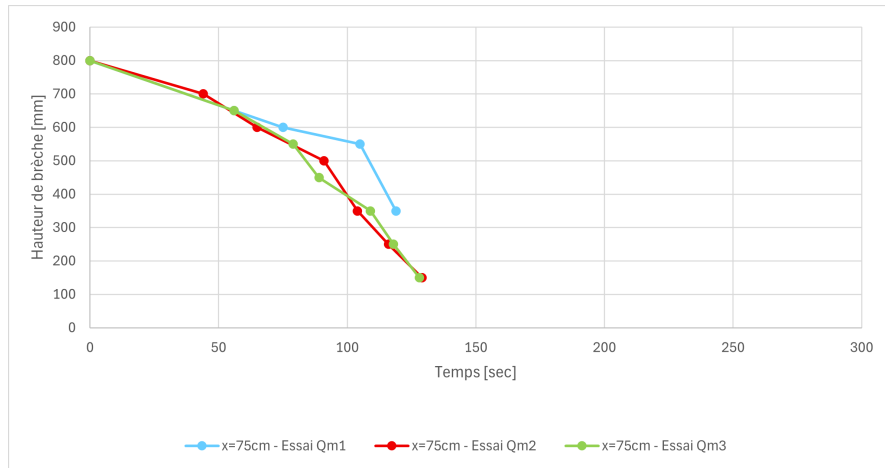


FIGURE 4.31 – Essais Qm : Evolution de la hauteur du fond de la brèche sur la pente aval

On remarque que l'évolution de la hauteur de fond pour les essais Qm est semblable en amont de la crête ($x=-25\text{cm}$) et sur la pente aval ($x=75\text{cm}$). Tandis que en aval de la crête ($x=25\text{cm}$), l'essai Qm1 s'érode légèrement plus tard par rapport aux deux autres essais Qm2 et Qm3.

TABLE 4.2 – Récapitulatif des vitesses d'érosion verticale des essais Qm

Position	Qm1	Qm2	Qm3
$x=-25\text{cm}$	310 [mm/min]	118 [mm/min]	300 [mm/min]
$x=25\text{cm}$	375 [mm/min]	418 [mm/min]	312 [mm/min]
$x=75\text{cm}$	286 [mm/min]	388 [mm/min]	417 [mm/min]

Ce tableau permet de confirmer les observations à l'aide des vitesses moyennes d'érosion verticale à chaque endroit. Ces valeurs sont semblables pour ces trois essais Qm à l'exception des 118 [mm/min] en $x=-25\text{cm}$ pour l'essai Qm2. Cela s'explique par l'imprécision liée aux balles lorsqu'elles se bloquent dans l'écoulement et faussent les résultats.

4.3.4 Largeur de la brèche

La largeur supérieure de la brèche a évolué sensiblement de la même manière lors des essais Qm, surtout en aval de la crête ($x= 25\text{ cm}$) et sur la pente aval (en $x= 75\text{ cm}$) comme nous pouvons l'observer sur les figures 4.32, 4.33 et 4.34.

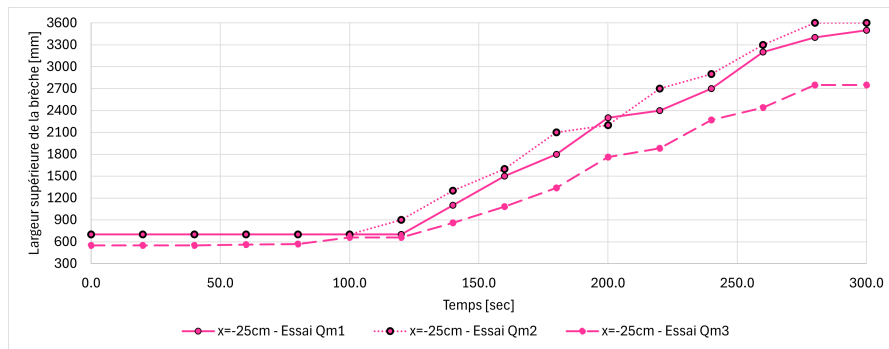


FIGURE 4.32 – Essais Qm : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête

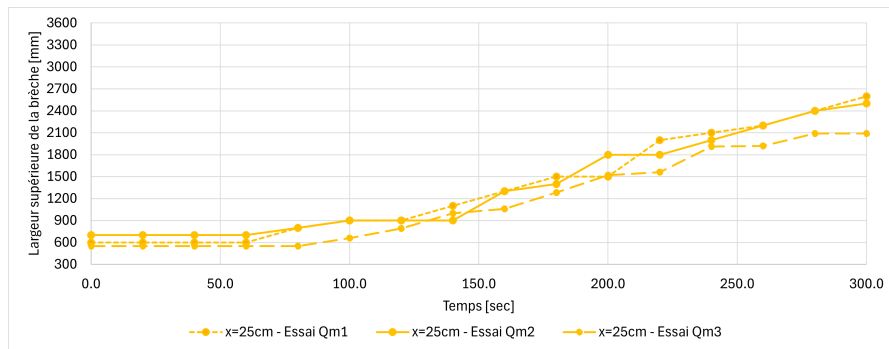


FIGURE 4.33 – Essais Qm : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en aval de la crête

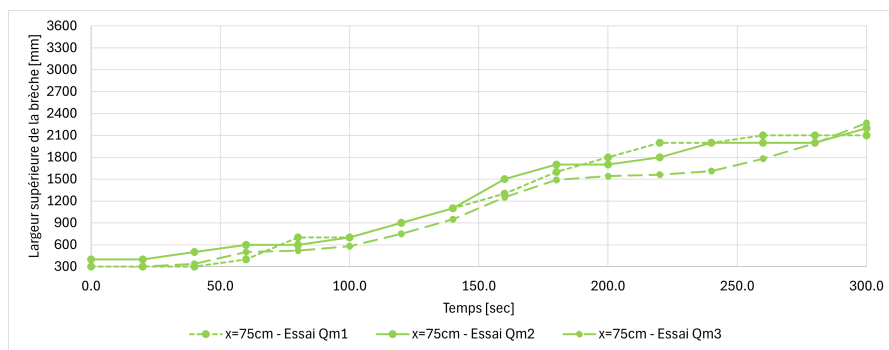


FIGURE 4.34 – Essais Qm : Evolution de la largeur supérieure de la brèche sur la pente aval

Cependant, on remarque que la largeur supérieure de la brèche en amont de la

crête ($x = -25$ cm) pour Qm3 est légèrement inférieure à celle de Qm1 et Qm2.

TABLE 4.3 – Récapitulatif des vitesses d'érosion latérale des essais Qm

Position	Qm1	Qm2	Qm3
x=-25cm	560 [mm/min]	400 [mm/min]	360 [mm/min]
x=25cm	580 [mm/min]	360 [mm/min]	360 [mm/min]
x=75cm	440 [mm/min]	308 [mm/min]	404 [mm/min]

De plus, les vitesses moyennes d'érosion latérale confirment les observations car elles sont très proches pour l'ensemble des essais Qm.

4.3.5 Débit de brèche et évolution du niveau d'eau

Le débit alimentant le bassin, le débit passant par la brèche et la hauteur d'eau dans le bassin mesurés lors des essais Qm sont représentés sur le graphique de la figure 4.35.

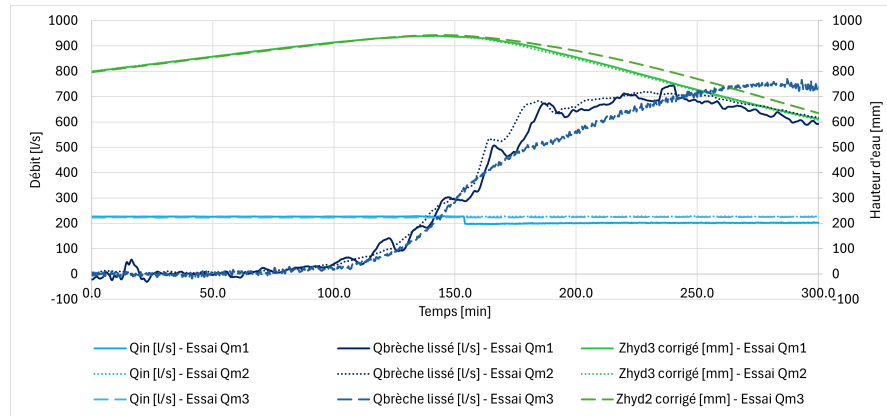


FIGURE 4.35 – Essais Qm : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin

Le débit alimentant le bassin était bien constant et égal à 224 [l/s] lors des trois essais comme en témoigne les courbes bleues ciel. Cependant, ce débit a chuté à 220 [l/s] en $t = 155$ s lors de l'essai Qm1. Cette variation n'impacte pas les résultats concernant le débit de brèche.

La hauteur d'eau dans le bassin est également fortement semblable avec une diminution qui commence en $t = 150s$. Cette diminution de niveau est légèrement moins rapide lors de l'essai Qm3.

Concernant les débits traversant la brèche, on observe la même tendance pour les trois essais Qm avec le débit qui augmente fortement de $t = 100s$ à $t = 250s$. Le débit de brèche de Qm3 atteint un maximum plus élevé de 50 [l/s] par rapport aux deux autres et environ 100s plus tard. Le débit de brèche maximal de Qm1 et Qm2 est donc de 700 [l/s] contre 750 [l/s] pour Qm3. Cela peut s'expliquer par la meilleure compaction de Qm3 qui aurait retardé le moment où le débit est maximal.

4.3.6 Vérification de la reproductibilité

Après avoir analysé la construction de la digue, l'évolution de la brèche (visuel, largeur et profondeur) et l'évolution du débit dans la brèche, l'essai Qm3 est déterminé comme semblable aux autres essais Qm avec des résultats cohérents. En effet, l'érosion latérale et verticale se déroule à la même vitesse et l'ensemble des graphiques et observations sont semblables. Ces résultats vont donc être utilisés lors de l'analyse de l'influence du type de sable.

4.4 Comparaison des essais à débit constant avec le sable fin : Qf

Les essais Qf sont des essais qui ont été réalisés avec une digue de sable fin ($d_{50}=0,314$ [mm]) soumise à un débit constant égal à 224 [l/s]. Ces essais et leurs comparaisons ont été réalisés durant les précédentes campagnes expérimentales. Cette partie énonce donc seulement les résultats qui seront utilisés afin de décrire l'influence du mode d'alimentation et du type de sable lors des essais.

TABLE 4.4 – Récapitulatif des essais valides

Essai	Date	Condition de surverse	$d_{50}[mm]$	$h_d[m]$	$h_b[m]$	$h_w[m]$	Acronymes
3	14.03.2024	Débit constant	0,314	1	0,8	/	Qf3
4	10.04.204	Débit constant	0,314	1	0,8	/	Qf4

4.4.1 Construction de la digue

Les données concernant les masses volumiques sèches des essais Qf ont été recueillies dans la figure 4.36.

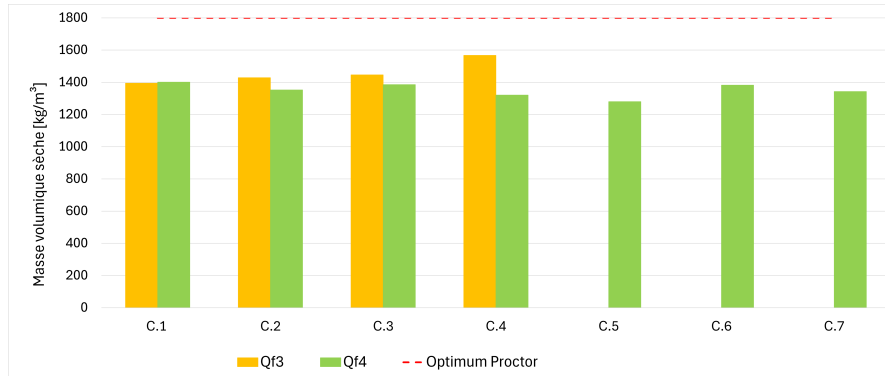
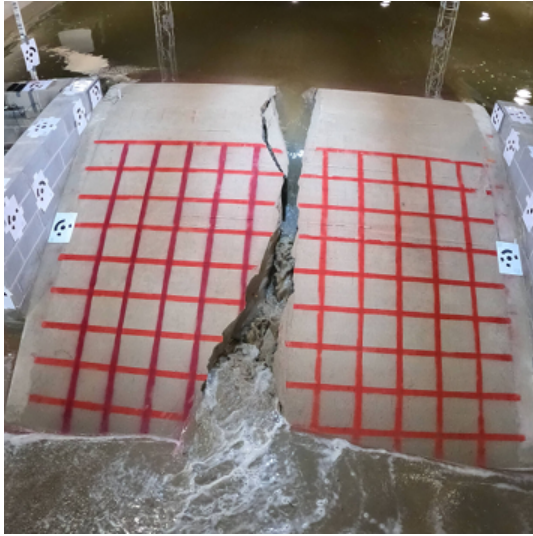


FIGURE 4.36 – Essais Qf : Evolution des masses volumiques sèches

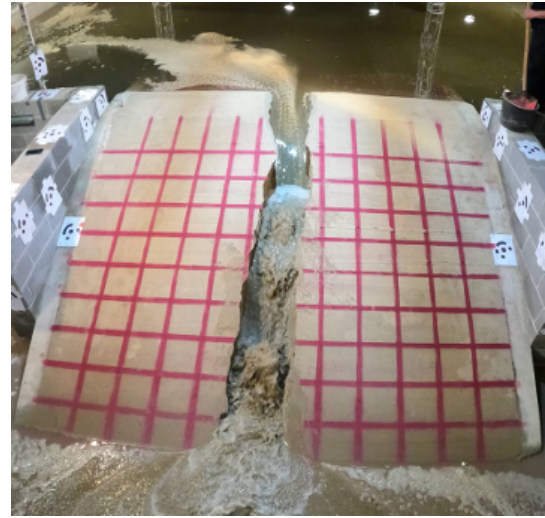
On remarque que la compaction des deux essais n'est pas optimale car la masse volumique sèche est relativement éloignée de l'optimum Proctor qui est égal à $1800 [kg/m^3]$ pour un sable fin. On peut cependant remarquer que l'essai Qf3 est légèrement mieux compacté que Qf4.

4.4.2 Evolution visuelle de la brèche

Le temps $t = 0s$ est toujours défini comme l'instant où l'écoulement atteint la pente aval de la digue. Au bout de 40 secondes d'essai, on commence à apercevoir la formation d'un escalier au fond de la brèche.



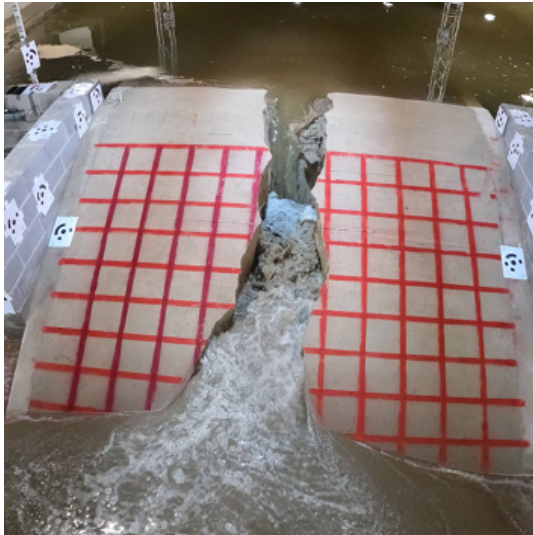
(a) Essai Qf3



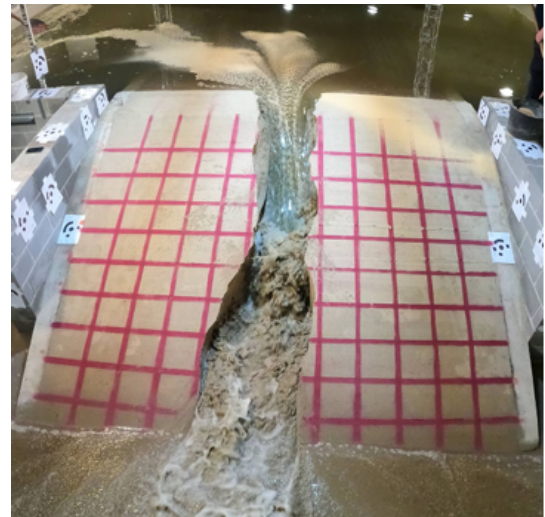
(b) Essai Qf4

FIGURE 4.37 – Photos prises en $t = 80s$

En $t = 80s$, l'escalier s'est déplacé vers l'amont et on peut clairement observer ce phénomène pour les deux essais. En effet, on observe dans la brèche que l'écoulement génère une tranchée prononcée en amont, suivie d'un canal à pente douce, séparés par un ressaut hydraulique.



(a) Essai Qf3



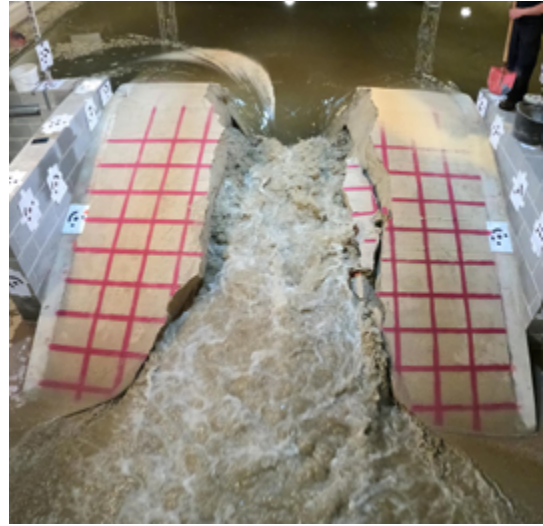
(b) Essai Qf4

FIGURE 4.38 – Photos prises en $t = 120s$

Sur les photos prises en $t = 120s$, le phénomène d'escalier continue à se déplacer vers l'amont et le ressaut hydraulique est clairement visible pour les deux essais Qf. L'érosion reste encore à ce stade majoritairement verticale.



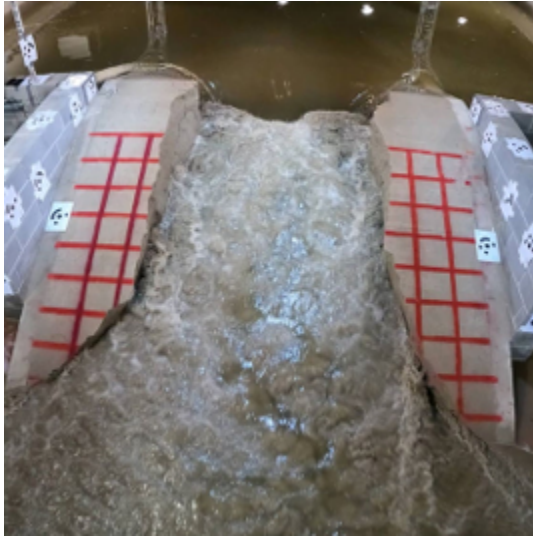
(a) Essai Qf3



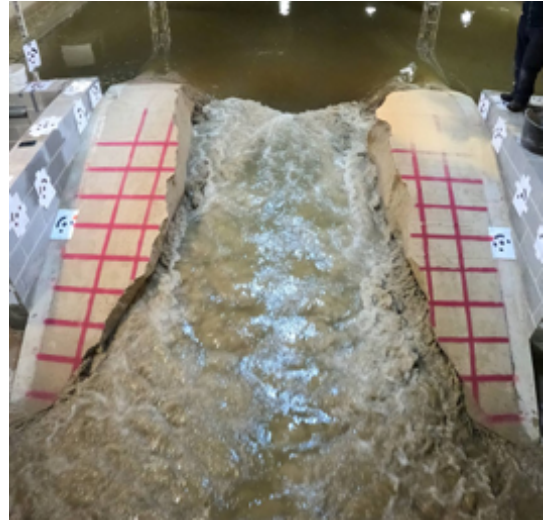
(b) Essai Qf4

FIGURE 4.39 – Photos prises en $t = 180s$

Une minute plus tard, en $t = 180s$, l'érosion latérale s'est fortement accélérée avec la chute de nombreux blocs de remblai. Le débit passant par la brèche a alors fortement augmenté.



(a) Essai Qf3



(b) Essai Qf4

FIGURE 4.40 – Photos prises en $t = 220s$

Finalement en $t = 220s$, la chute de blocs s'est accentuée et la brèche a quasiment atteint sa largeur maximale. On observe clairement la forme rectangulaire de la brèche, caractéristique de la rupture pour un sable fin.

4.4.3 Profondeur de la brèche

L'étude de l'apparition des balles colorées placées à différentes hauteurs et à différents endroits (en $x=-25cm$, $x=25cm$ et $x=75cm$) pour les essais Qf3 (courbe bleue), Qf4 (courbe rouge) donne les trois résultats des figures 4.41, 4.42 et 4.43.

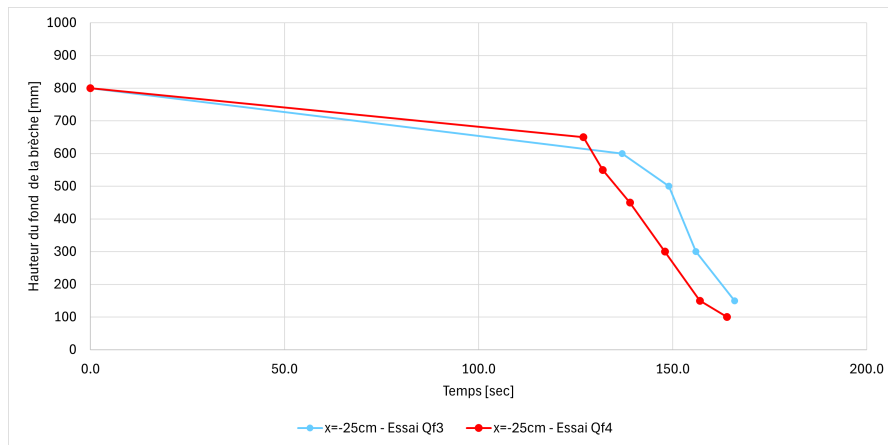


FIGURE 4.41 – Essais Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en amont de la crête

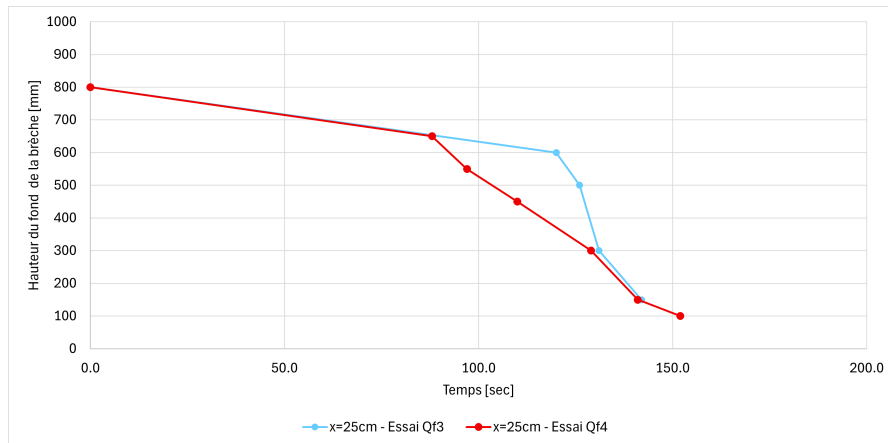


FIGURE 4.42 – Essais Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en aval de la crête

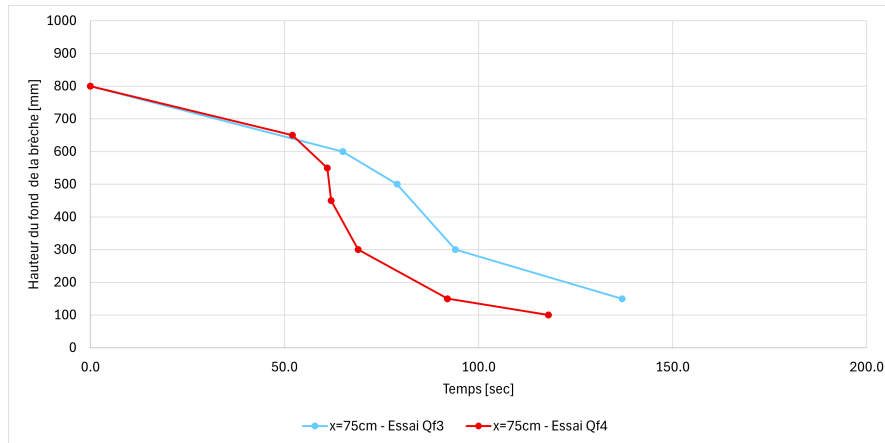


FIGURE 4.43 – Essais Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche sur la pente aval

On remarque que l'évolution de la hauteur de fond pour les essais Qf est semblable en amont de la crête ($x=-25\text{cm}$). Cependant, sur la pente aval ($x=75\text{cm}$) et en aval de la crête ($x=25\text{cm}$), l'essai Qf3 s'érode légèrement plus tard, cela s'explique par la meilleure compaction de l'essai Qf3 par rapport à Qf4.

TABLE 4.5 – Récapitulatif des vitesses d'érosion verticale des essais Qf

Position	Qf3	Qf4
$x=-25\text{cm}$	931 [mm/min]	892 [mm/min]
$x=25\text{cm}$	1227 [mm/min]	516 [mm/min]
$x=75\text{cm}$	375 [mm/min]	500 [mm/min]

Ces observations sont confirmées par les vitesses moyennes d'érosion verticale. En effet, ces vitesses sont relativement proches en amont de la crête ($x=-25\text{cm}$) mais sont légèrement éloignées sur la pente aval ($x=75\text{cm}$). La plus grande différence notable est en aval de la crête ($x=25\text{cm}$) où la vitesse d'érosion de Qf3 vaut plus du double de celle de Qf4.

4.4.4 Largeur de la brèche

La largeur supérieure de la brèche a évolué sensiblement de la même manière lors des essais Qf, comme nous pouvons l'observer sur les figures 4.44, 4.45 et 4.46.

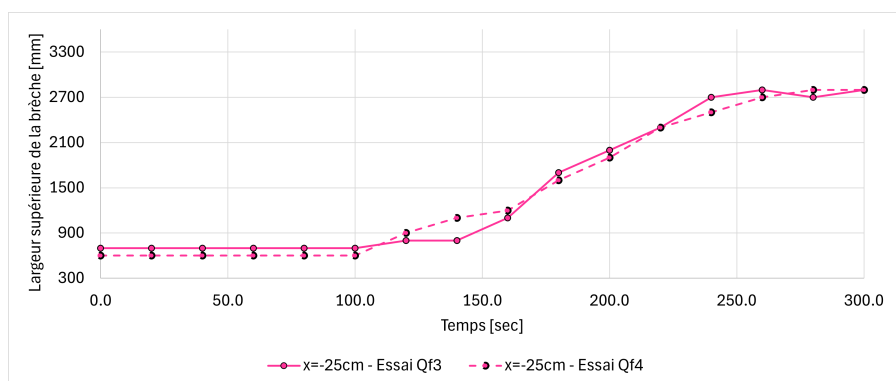


FIGURE 4.44 – Essais Qf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête

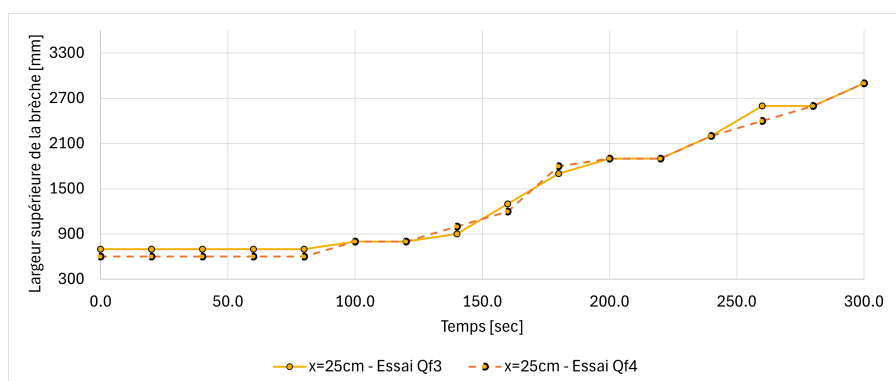


FIGURE 4.45 – Essais Qf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en aval de la crête

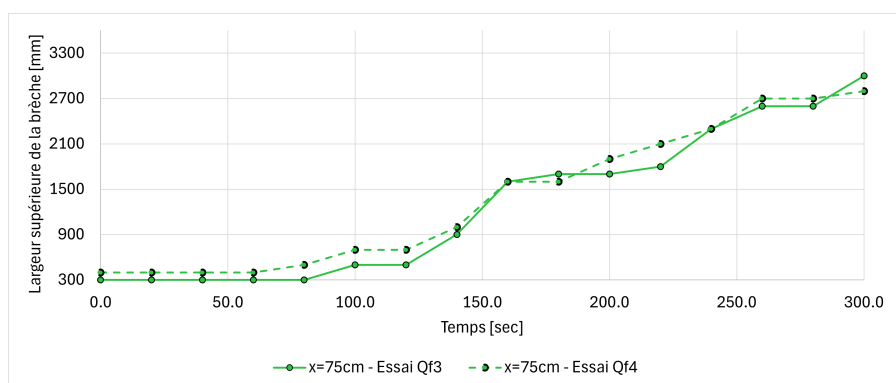


FIGURE 4.46 – Essais Qf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche sur la pente aval

Cependant, on remarque de légères différences de largeur sur la pente aval ($x=75\text{cm}$) malgré que les tendances restent semblables. Cela s'explique par le caractère parfois aléatoire de la chute de blocs de sable fin.

TABLE 4.6 – Récapitulatif des vitesses d'érosion latérale des essais Qf

Position	Qf3	Qf4
$x=-25\text{cm}$	420 [mm/min]	440 [mm/min]
$x=25\text{cm}$	440 [mm/min]	460 [mm/min]
$x=75\text{cm}$	540 [mm/min]	480 [mm/min]

Les vitesses moyennes d'érosion latérale sont très proches et confirment que les deux essais Qf se sont déroulés de la même manière concernant l'évolution de la largeur supérieure de la brèche.

4.4.5 Débit de brèche et évolution du niveau d'eau

Le débit alimentant le bassin, le débit passant par la brèche et la hauteur d'eau dans le bassin mesurés lors des essais Qf sont représentés à la figure 4.47.

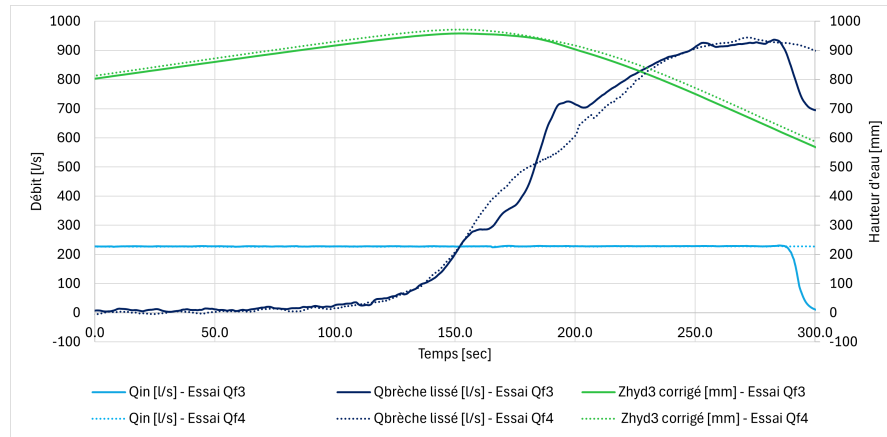


FIGURE 4.47 – Essais Qf : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin

Concernant le débit alimentant le bassin, il est bien resté constant et égal à 224 [l/s] durant les essais Qf.

Les hauteurs d'eau dans le bassin pour chaque essai se superposent quasiment parfaitement et suivent la même tendance avec une légère différence de 2cm.

Finalement, les débits passant par la brèche suivent la même tendance et restent très proches, sauf entre $t = 160s$ et $t = 200s$ où une différence maximale de 160 [l/s] est observée. La différence moyenne entre les débits de brèche est de 7,1 [l/s] et son écart-type est de 41,4 [l/s]. Lorsque l'on met ces valeurs en perspective avec le débit maximal atteint de 940 [l/s] pour les deux essais, on considère que ces valeurs sont faibles et donc que les débits de brèche sont bien reproduits entre les deux essais.

4.5 Comparaison des essais à niveau constant avec le sable fin : Hf

Les essais Hf sont des essais qui ont été réalisés avec une digue de sable fin ($d_{50}=0,314$ [mm]) soumise à un niveau constant de consigne dans le réservoir. Trois essais différents vont être comparés afin de déterminer la reproductibilité de Hf3 par rapport à Hf1 et Hf2 malgré l'influence de la recalibration des pompes.

TABLE 4.7 – Récapitulatif des essais Hf

Essai	Date	Condition de surverse	$d_{50}[mm]$	$h_d[m]$	$h_b[m]$	$h_w[m]$	Acronymes
1	25.05.2023	Niveau constant*	0,314	1	0,9	0,95	Hf1
2	14.09.2023	Niveau constant	0,314	1	0,93	0,98	Hf2
7	05.12.2024	Niveau constant**	0,314	1	0,9	0,95	Hf3

4.5.1 Construction de la digue

Lors de la construction des essais digues des essais Hf, les masses volumiques sèches de la figure 4.48 ont été calculées. Cependant, il n'y a pas de données concernant la construction de l'essai Hf1.

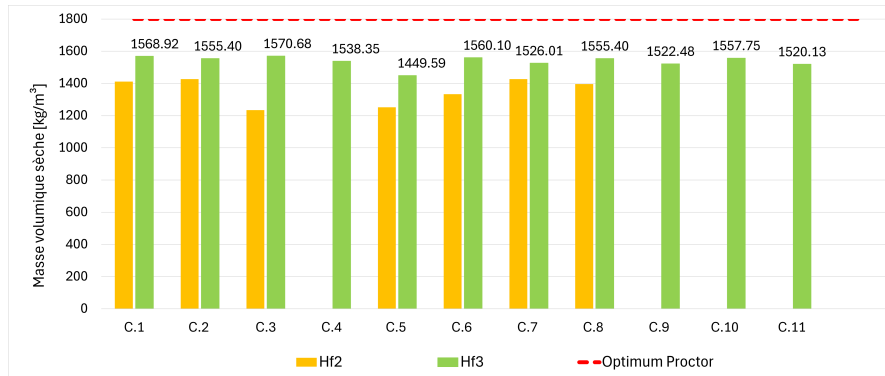
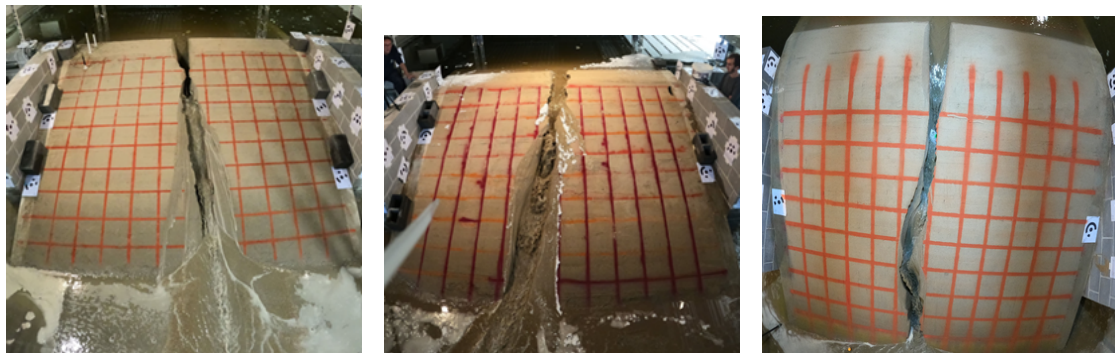


FIGURE 4.48 – Essais Hf : Evolution des masses volumiques sèches

On observe clairement que la compaction de Hf3 est bien meilleure. Les masses volumiques sèches se rapprochent de l'optimum Proctor égal à $1800 [kg/m^3]$ par rapport aux valeurs de Hf2 qui sont trop faibles.

4.5.2 Evolution visuelle de la brèche

Le temps $t = 0s$ pour Hf1 et Hf3 est déterminé comme le moment où l'écoulement atteint la pente aval de la digue. Cependant, le déroulement de l'essai Hf2 a connu des difficultés. En effet, une fois le niveau de consigne atteint, l'eau ne s'écoulait pas sur la pente aval mais plus en aval via les bords de la digue. Ce qui explique la présence d'eau sur le quadrillage de la digue. La brèche a donc dû être creusée en urgence durant l'essai, mais cela n'a pas suffi et le niveau de consigne a dû être augmenté. Ces modifications peuvent avoir un impact sur les résultats et il y a donc un décalage temporel pour Hf2 du à ces difficultés.



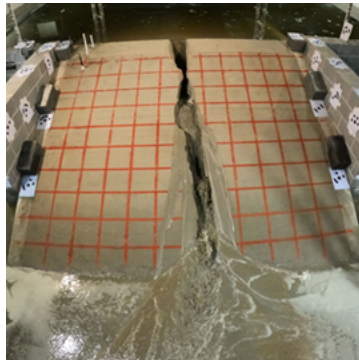
(a) Essai Hf1

(b) Essai Hf2 ($t = 30s$)

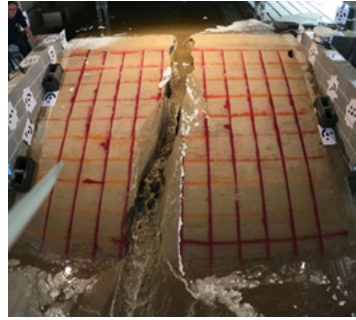
(c) Essai Hf3

FIGURE 4.49 – Photos prises en $t = 80s$

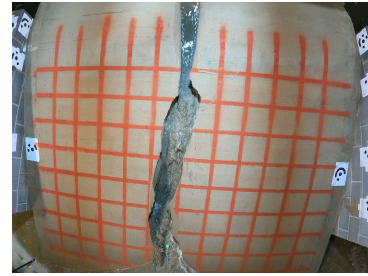
En $t = 80s$, on observe la formation d'un escalier dans le fond de la brèche.



(a) Essai Hf1



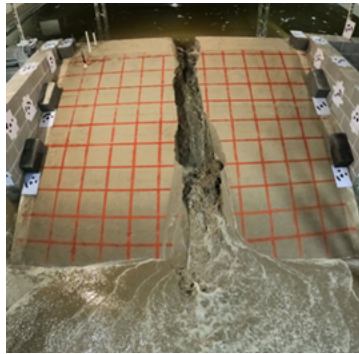
(b) Essai Hf2 ($t = 50s$)



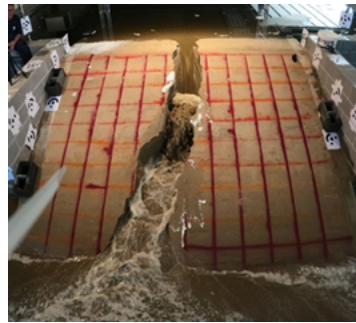
(c) Essai Hf3

FIGURE 4.50 – Photos prises en $t = 120s$

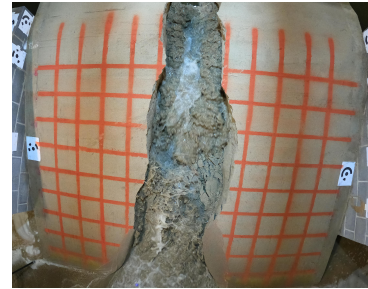
Cet escalier, phénomène tyique des essais avec du sable fin, a ensuite migré vers l'amont en $t = 120s$. A ce moment, on distingue clairement le ressaut hydraulique présent dans la brèche et on remarque que la digue s'est plus érodée verticalement que latéralement.



(a) Essai Hf1



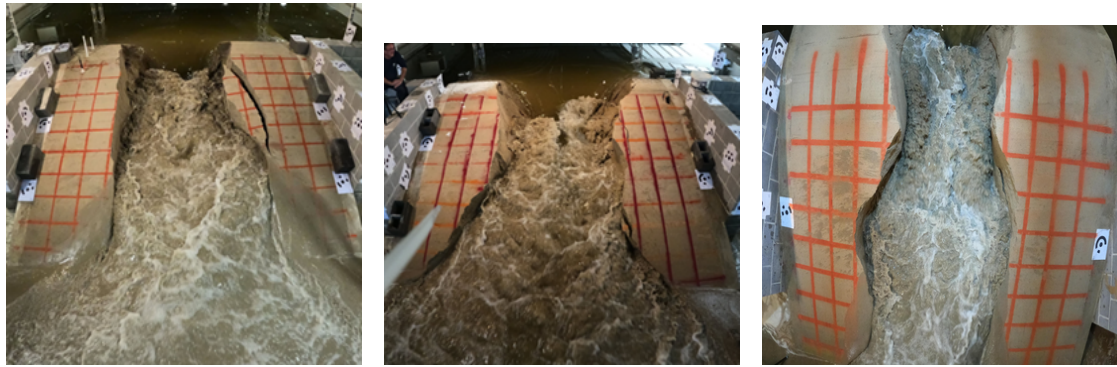
(b) Essai Hf2 ($t = 80s$)



(c) Essai Hf3

FIGURE 4.51 – Photos prises en $t = 180s$

Ensuite, en $t = 80s$, on distingue toujours l'escalier mais on remarque que l'érosion latérale s'accélère.



(a) Essai Hf1

(b) Essai Hf2 ($t = 180s$)

(c) Essai Hf3

FIGURE 4.52 – Photos prises en $t = 220s$

Finalement, la chute de blocs de sable fin, comme on l'observe sur la photo de Hf1, a induit une forte accélération de l'érosion latérale en $t = 220s$ et le débit de brèche a donc fortement augmenté.

4.5.3 Profondeur de la brèche

L'étude de l'apparition des balles colorées placées à différentes hauteurs et à différents endroits (en $x=-25cm$, $x=25cm$ et $x=75cm$) pour les essais Hf1 (courbe rouge), Hf2 (courbe bleue) et Hf3 (courbe verte) donne les trois résultats des figures 4.53, 4.54 et 4.55.

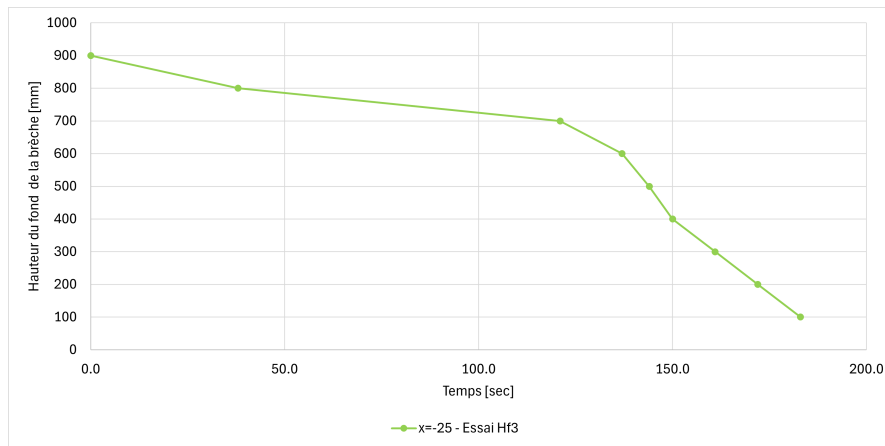


FIGURE 4.53 – Essais Hf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en amont de la crête

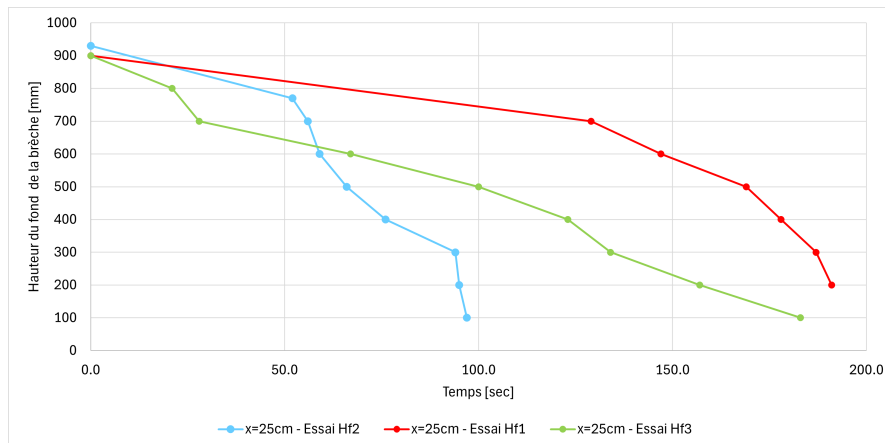


FIGURE 4.54 – Essais Hf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en aval de la crête

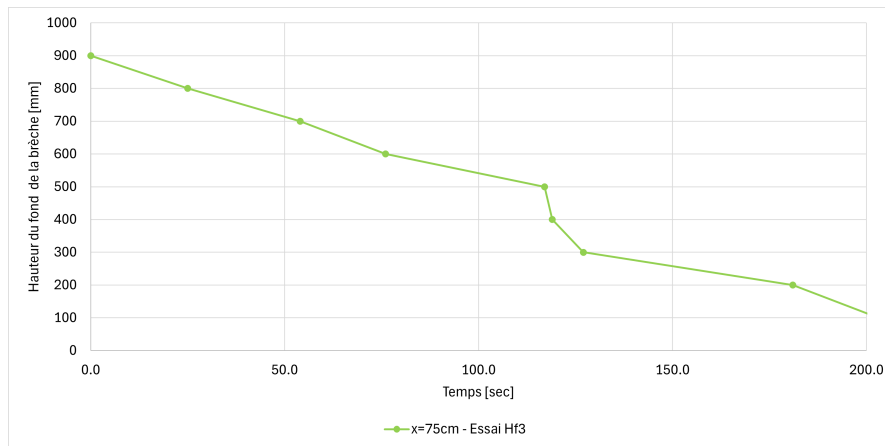


FIGURE 4.55 – Essais Hf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche sur la pente aval

Malheureusement, les essais Hf 1 et Hf2 ne possédaient des balles que en aval de la crête ($x=25\text{cm}$). La comparaison est donc uniquement possible à cet endroit. On observe une tendance semblable pour Hf1 et Hf3 avec un décalage temporel variant entre 30s et 150s. Tandis que l'érosion verticale de Hf2 a un comportement différent des deux autres essais avec une érosion verticale beaucoup plus rapide. Cette rapidité s'explique par le décalage temporel d'environ 50s provoqué par les difficultés de lancement de l'essai Hf2.

TABLE 4.8 – Récapitulatif des vitesses d'érosion verticale des essais Hf

Position	Hf1	Hf2	Hf3
x=-25cm	/ [mm/min]	/ [mm/min]	290 [mm/min]
x=25cm	484 [mm/min]	893 [mm/min]	259 [mm/min]
x=75cm	/ [mm/min]	/ [mm/min]	236 [mm/min]

Concernant les vitesses moyennes d'érosion verticale, on remarque que les valeurs sont assez éloignées avec Hf3 qui a la plus petite vitesse d'érosion et Hf2 la plus grande. Cela s'explique par la meilleure compaction de Hf3 par rapport à Hf2. Les difficultés rencontrées lors de l'essai Hf2 peuvent également expliquer cette très grande vitesse d'érosion.

4.5.4 Largeur de la brèche

La largeur supérieure de la brèche a évolué relativement de la même manière lors des essais Hf1 et Hf3 avec un décalage moyen d'environ 300 [mm] comme nous pouvons l'observer sur les figures 4.56, 4.57 et 4.58.

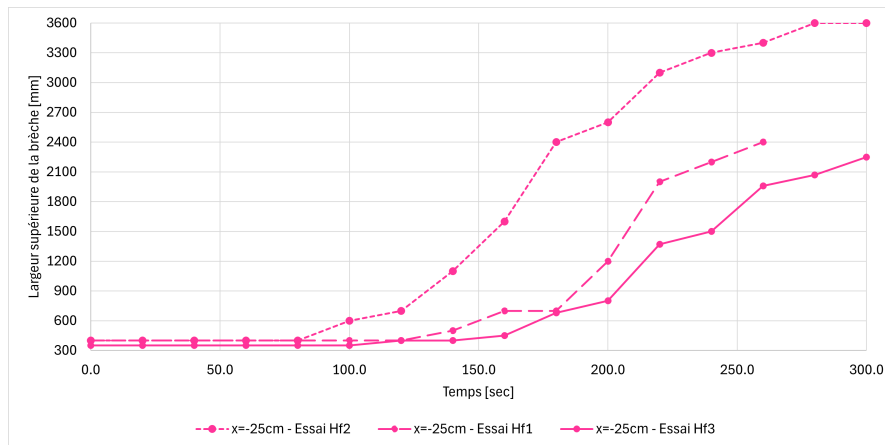


FIGURE 4.56 – Essais Hf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête

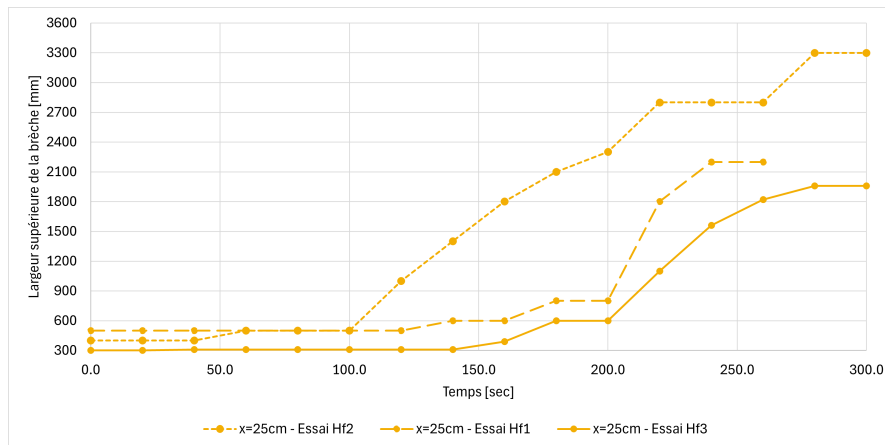


FIGURE 4.57 – Essais Hf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en aval de la crête

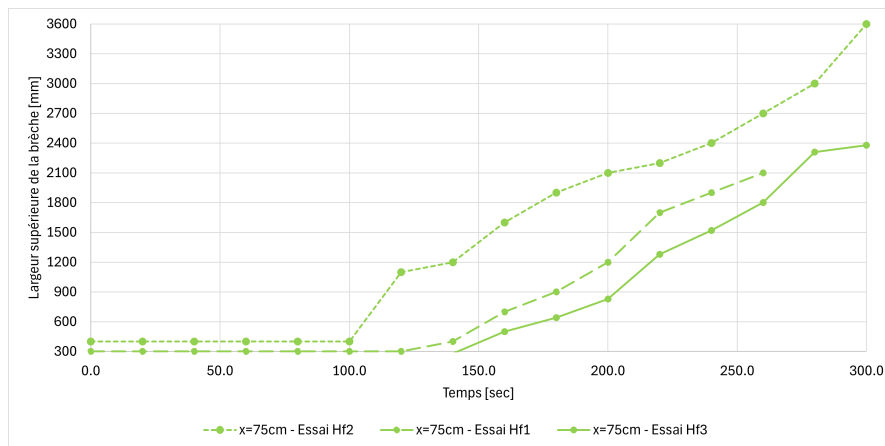


FIGURE 4.58 – Essais Hf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche sur la pente aval

Concernant l'essai Hf2, les difficultés rencontrées durant l'essai ont un fort impact sur l'évolution de la largeur supérieure. En effet, pour chaque position, la courbe de Hf2 suit une tendance similaire aux deux autres essais Hf mais toujours avec un décalage temporel d'au moins 50s.

TABLE 4.9 – Récapitulatif des vitesses d'érosion latérale des essais Hf

Position	Hf1	Hf2	Hf3
x=-25cm	462 [mm/min]	640 [mm/min]	380 [mm/min]
x=25cm	392 [mm/min]	580 [mm/min]	332 [mm/min]
x=75cm	415 [mm/min]	640 [mm/min]	466 [mm/min]

Les vitesses moyennes d'érosion latérale confirment ces observations. En effet, les valeurs sont semblables pour Hf1 et Hf3, mais relativement plus élevées pour Hf2. Cette différence notable s'explique à nouveau par le décalage temporel provoqué par les problèmes survenus au début de l'essai Hf2.

4.5.5 Débit de brèche et évolution du niveau d'eau dans le bassin

Le débit alimentant le bassin, le débit passant par la brèche et la hauteur d'eau dans le bassin mesurés lors des essais Hf sont représentés à la figure 4.59.

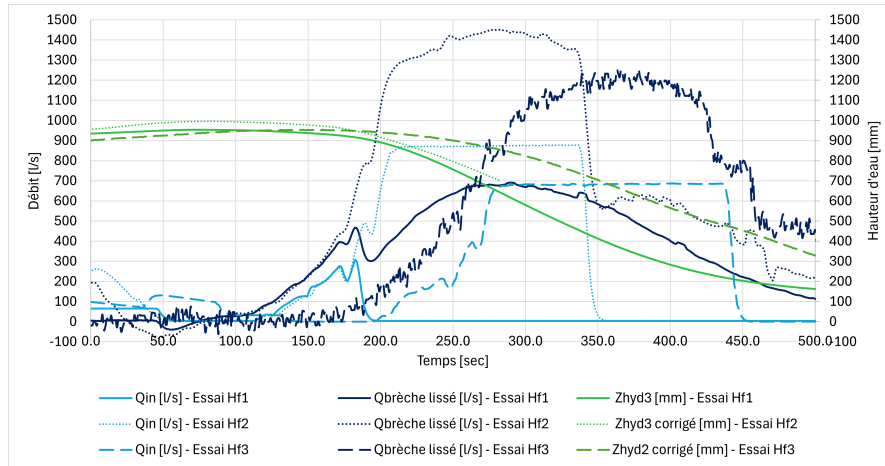


FIGURE 4.59 – Essais Hf : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin

Concernant les hauteurs d'eau dans le bassin, on remarque qu'elles sont très proches pour Hf1 et Hf2 avec une différence de 3cm et restent quasiment constantes jusque $t = 200s$. Cependant, la hauteur d'eau de Hf3 diminue 50s plus tard en $t = 250s$.

Les débits alimentant le bassin des essais Hf2 et Hf3 suivent le même pattern, mais ces débits ont un décalage de 75s lors de l'augmentation du débit et de 100s lors de sa chute. Le maximum atteint pour Hf2 est de 900 [l/s] contre 700 [l/s] pour Hf3. Cette différence de valeur maximale s'explique par la recalibration des pompes qui a plafonné le débit à 700 [l/s]. Tandis que le débit qui alimente le bassin lors de l'essai Hf1 chute très rapidement en $t = 185s$ pour atteindre 0 [l/s].

Enfin, les débits traversant la brèche pour l'essai Hf2 et Hf3 ont également le même pattern avec un décalage de 75s. Le débit de brèche maximum est de 1450 [l/s] pour Hf2 contre 1200[l/s] pour Hf3. Malheureusement, Le débit passant par la brèche lors de Hf1 est quant à lui beaucoup plus faible avec un maximum de 700 [l/s], il augmente au même moment que le débit de brèche de Hf1 mais subit une chute en $t = 185s$ puis son augmentation devient relativement faible. On considère donc que les débits calculés lors de l'essai Hf1 ne sont pas fiables et ne seront pas utilisés pour évaluer l'influence du mode d'alimentation du bassin.

4.5.6 Vérification de la reproductibilité

La première conclusion à tirer de cette comparaison concerne les essais réalisés avec un niveau de consigne constant dans le bassin : ils sont difficilement reproductibles. Cependant, on observe que, malgré les différences liées à la recalibration des pompes lors de l'essai Hf3 et aux difficultés rencontrées lors du lancement de Hf2 ; les essais Hf présentent des similarités avec parfois un décalage temporel. Ils pourront donc être utilisés afin d'analyser l'influence du mode d'alimentation du bassin à l'exception des débits calculés lors de l'essai Hf1 qui sont trop faibles par rapport aux débits des essais Hf2 et Hf3.

De plus, les différences de compaction et de mise en route expliquent les décalages temporels, certaines pentes de courbes différentes, mais les signatures physiques sont identiques : escalier, chutes de blocs, débits de pointe très élevés, chute brutale finale.

4.6 Analyse de l'influence du type de sable : essais Qm et Qf

Les différences entre un essai avec une digue en sable fin ou en sable moyen peuvent être analysées à l'aide de la comparaison entre les essais Qm et Qf. En effet, ces essais sont tous réalisés avec un débit alimentant le bassin égal à 224 [l/s]. La différence entre ces essais repose uniquement sur le type de sable composant la digue. Les trois essais Qm ayant été déterminés comme semblables, l'ensemble de

leurs résultats sont analysés dans cette section. De la même manière, les résultats des deux essais Qf sont utilisés lors de cette comparaison.

4.6.1 Construction de la digue

Le graphique de la figure 4.60 représente la moyenne des masses volumiques sèches recueillies pour les essais Qm et Qf.

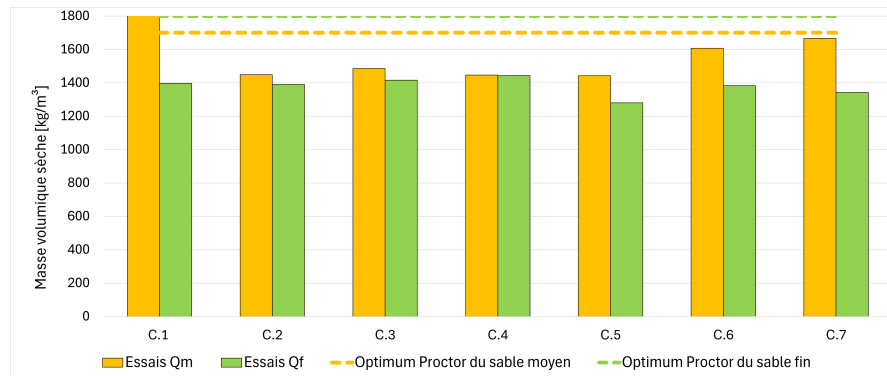
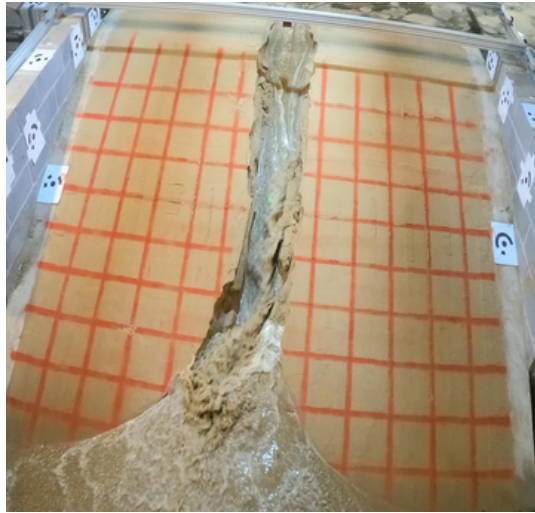


FIGURE 4.60 – Essais Qm et Qf : Evolution des masses volumiques sèches moyennes

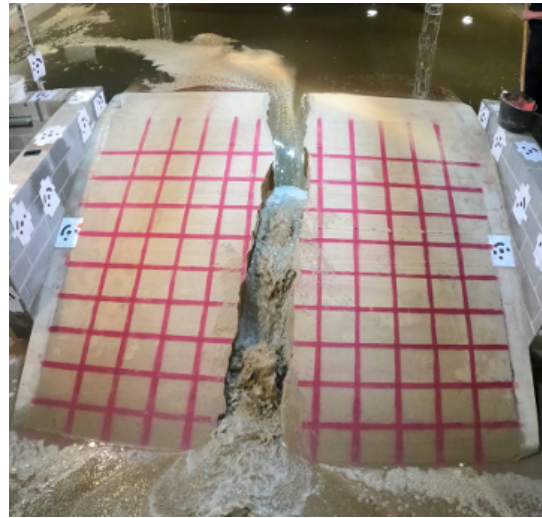
On observe rapidement que la compaction des essais Qm est bien meilleure. En effet, les masses volumiques sèches des essais Qm sont supérieures à celles des essais Qf alors que le sable fin doit tendre vers un optimum Proctor plus élevé par rapport à celui du sable moyen (1700 kg/m^3 pour le sable fin contre 1800 kg/m^3 pour le sable moyen).

4.6.2 Evolution visuelle de la brèche

Le choix des essais représentés dans les photos suivantes est arbitraire car l'évolution visuelle de la brèche est semblable pour les trois essais Qm. La même conclusion a été tirée pour les essais Qf. Le temps $t = 0s$ correspond toujours à l'écoulement qui atteint la pente aval de la digue.



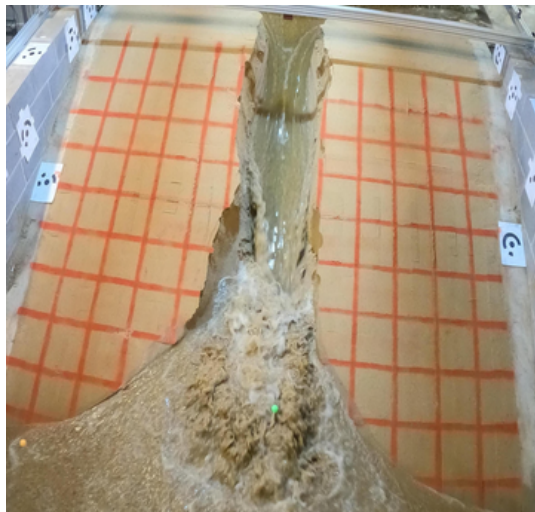
(a) Essai Qm3



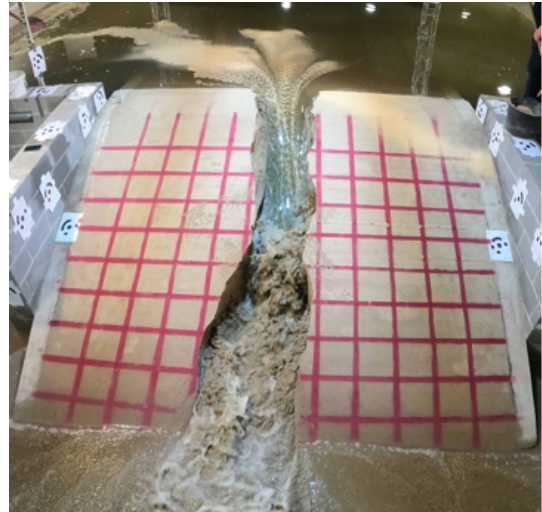
(b) Essai Qf4

FIGURE 4.61 – Photos prises en $t = 80s$

Après 80 secondes, pour le sable moyen, l'érosion est principalement verticale et la pente de brèche est parallèle à la pente aval. Tandis que pour le sable fin, l'érosion, également verticale, a provoqué la formation d'un escalier à l'aval avec un ressaut hydraulique.



(a) Essai Qm3



(b) Essai Qf4

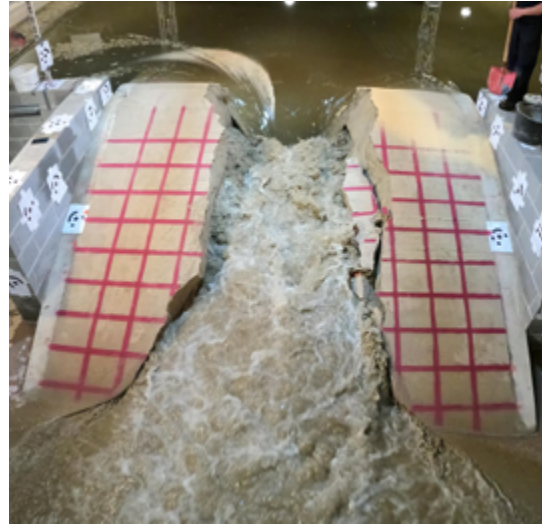
FIGURE 4.62 – Photos prises en $t = 120s$

Ensuite, en $t = 120s$, on observe l'apparition d'un ressaut hydraulique à

l'aval pour le sable moyen avec toujours une pente assez uniforme pour la brèche. Contrairement au sable fin ou l'escalier s'est déplacé vers l'amont, le ressaut hydraulique est toujours présent. L'érosion reste majoritairement verticale pour les deux sables.



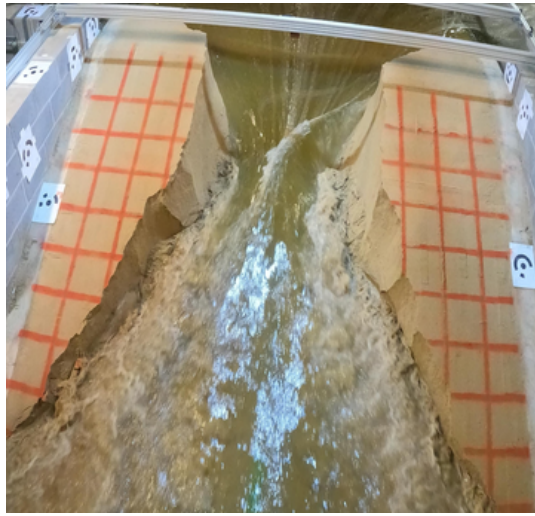
(a) Essai Qm3



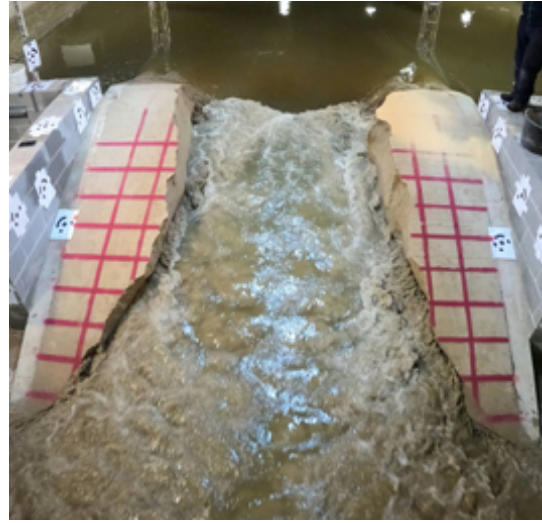
(b) Essai Qf4

FIGURE 4.63 – Photos prises en $t = 180s$

180 secondes après le début de l'essai, l'érosion latérale s'est fortement accélérée pour les deux types d'essais. Cependant, comme on peut le remarquer pour la photo de l'essai Qf4, cet élargissement se caractérise par la chute de larges blocs de sable fin d'environ 30 cm de large, les parois sont instables. Concernant l'essai Qm3, la chute de blocs est plutôt uniforme et continue, avec des blocs bien moins larges.



(a) Essai Qm3



(b) Essai Qf4

FIGURE 4.64 – Photos prises en $t = 220s$

Finalement, en $t = 220s$, l'érosion est quasiment uniquement latérale et on aperçoit les formes caractéristiques des brèches pour chaque sable. En effet, la brèche du sable moyen est en forme de sablier tandis que la digue en sable fin adopte une brèche plutôt rectangulaire en fin d'essai.

4.6.3 Profondeur de la brèche

Afin de mieux comparer les essais Qm et Qf, il aurait été préférable de faire la moyenne entre les essais homologues afin d'obtenir deux tendances globales. Malheureusement, les balles colorées ont été placées à différentes hauteurs au fur et à mesure des campagnes expérimentales. Les graphiques des figures 4.65, 4.66 et 4.67 représentent donc l'évolution de la hauteur de brèche pour les cinq essais, avec les essais en sable moyen en bleu et les essais en sable fin en rouge.

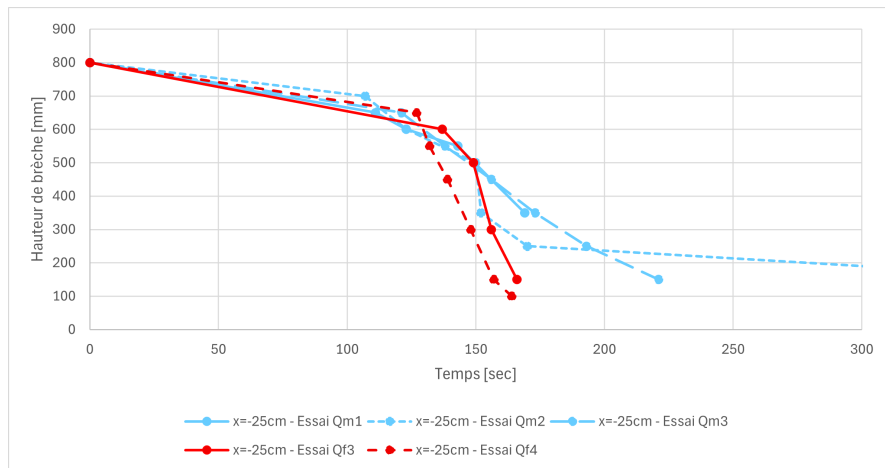


FIGURE 4.65 – Essais Qm et Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en amont de la crête

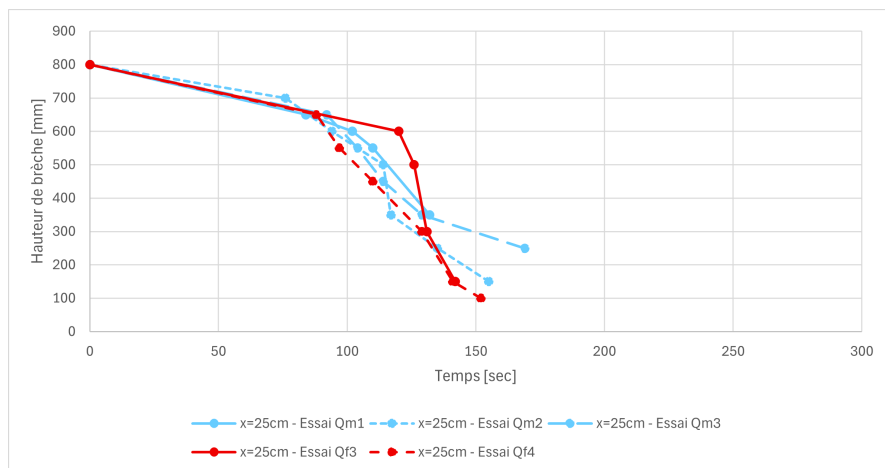


FIGURE 4.66 – Essais Qm et Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en aval de la crête

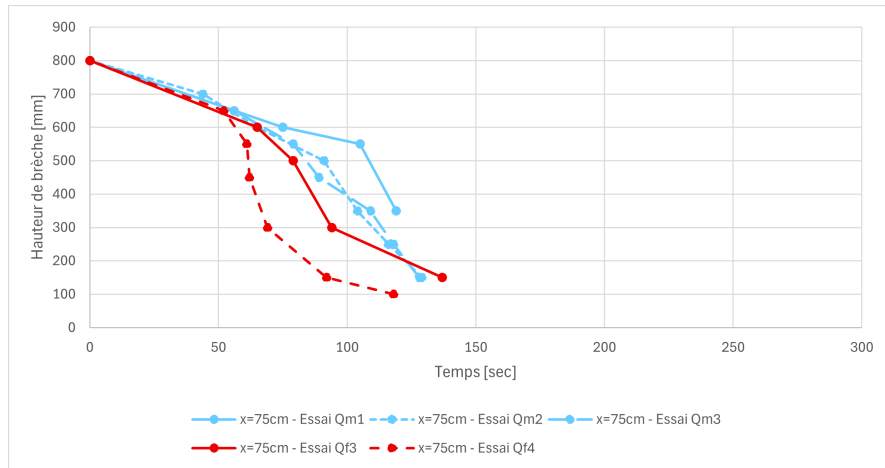


FIGURE 4.67 – Essais Qm et Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche sur la pente aval

On observe que les digues en sable fin présentent des pentes plus fortes en amont et en aval de la crête ($x=-25\text{cm}$ et $x=25\text{cm}$), l'érosion verticale démarre vers le même moment mais se poursuit plus longtemps pour le sable moyen. Les évolutions sont plutôt similaires sur la pente aval ($x=75\text{cm}$).

TABLE 4.10 – Récapitulatif des moyennes des vitesses d'érosion verticale des essais Qm et Qf

Position	Qm	Qf
$x=-25\text{cm}$	243 [mm/min]	911 [mm/min]
$x=25\text{cm}$	368 [mm/min]	871 [mm/min]
$x=75\text{cm}$	364 [mm/min]	438 [mm/min]

Concernant les moyennes des vitesses d'érosion verticale, elles confirment les précédentes observations. En effet, le sable moyen subit une érosion verticale plus lente en amont et en aval de la crête ($x=-25\text{cm}$ et $x=25\text{cm}$). La propagation de l'escalier pour le sable fin explique les vitesses élevées car ce phénomène peut creuser la digue localement très rapidement. L'escalier se forme à l'aval et remonte vers l'amont, ce qui explique qu'il a peu d'impact sur la pente aval ($x=75\text{cm}$) et donc les vitesses d'érosion verticale se rapprochent à cet endroit pour les deux sables.

4.6.4 Largeur de la brèche

Les graphiques des figures 4.68, 4.69 et 4.70 représentent les moyennes des largeurs supérieures des essais pour les deux sables. Cela permet de comparer plus facilement la tendance propre à chaque sable.

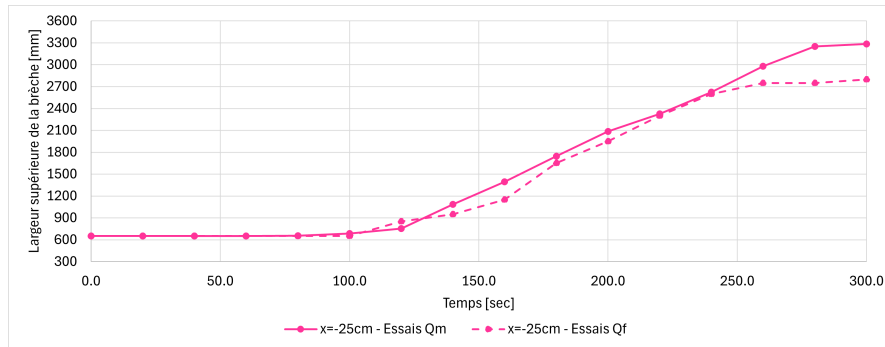


FIGURE 4.68 – Essais Qm et Qf : Evolution de la largeur supérieure moyenne de la brèche en amont de la crête

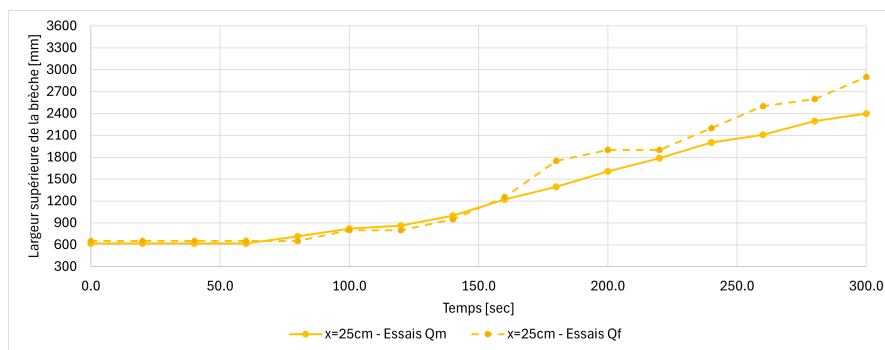


FIGURE 4.69 – Essais Qm et Qf : Evolution de la largeur supérieure moyenne de la brèche en aval de la crête

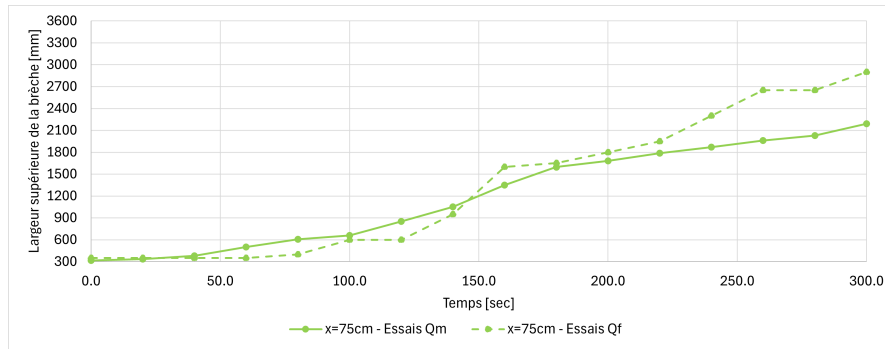


FIGURE 4.70 – Essais Qm et Qf : Evolution de la largeur supérieure moyenne de la brèche sur la pente aval

On observe que la largeur de la brèche augmente plus rapidement pour le sable moyen en amont de la crête ($x=-25\text{cm}$) tandis que la digue en sable fin s'élargit plus rapidement en aval de la crête ($x=25\text{cm}$) et sur la pente aval ($x=75\text{cm}$). La largeur supérieure de la brèche en fin d'essai est plus grande pour le sable fin en aval de la crête et sur la pente aval tandis qu'elle est plus grande pour le sable moyen en amont de la crête.

TABLE 4.11 – Récapitulatif des moyennes des vitesses d'érosion latérale des essais Qm et Qf

Position	Qm	Qf
$x=-25\text{cm}$	527 [mm/min]	430 [mm/min]
$x=25\text{cm}$	356 [mm/min]	450 [mm/min]
$x=75\text{cm}$	375 [mm/min]	510 [mm/min]

L'analyse des moyennes des vitesses d'érosion latérale confirme ces observations. En effet, le sable moyen s'érode plus rapidement en amont de la crête ($x=-25\text{cm}$) tandis que le sable fin s'érode plus rapidement en aval de la crête ($x=25\text{cm}$) et sur la pente aval ($x=75\text{cm}$). De manière générale, l'élargissement rapide de la brèche de la digue en sable fin s'explique par la chute de blocs plus larges que pour le sable moyen.

On remarque également que les disparités entre les vitesses pour le sable fin sont assez faibles, cela confirme la forme rectangulaire de la brèche en fin d'essai. Alors que pour le sable moyen, les fortes disparités témoignent de la forme en sablier de la brèche en fin d'essai. La forme rectangulaire correspond donc à un élargissement par rupture de parois tandis que le sablier est un élargissement différentiel, plus

marqué aux extrémités.

Après l'analyse de l'évolution de la largeur et de la profondeur de la brèche, on remarque que l'escalier joue le rôle de "déclencheur" : tant qu'il reste à l'aval, l'érosion peut rester contenue mais lorsqu'il atteint des zones critiques, la rupture latérale s'accélère.

4.6.5 Débit de brèche et évolution du niveau d'eau dans le bassin

Les moyennes des hauteurs d'eau dans le réservoir pour les essais Qm et Qf sont représentées à la figure 4.71. L'intégralité de ces essais ayant été réalisée avec un débit d'alimentation constant, les courbes sont identiques, constantes et égales à 224 [l/s].

Les courbes rouges représentent les débits de brèche des essais Qm tandis que les courbes jaunes montrent l'évolution des débits traversant la brèche lors des essais Qf.

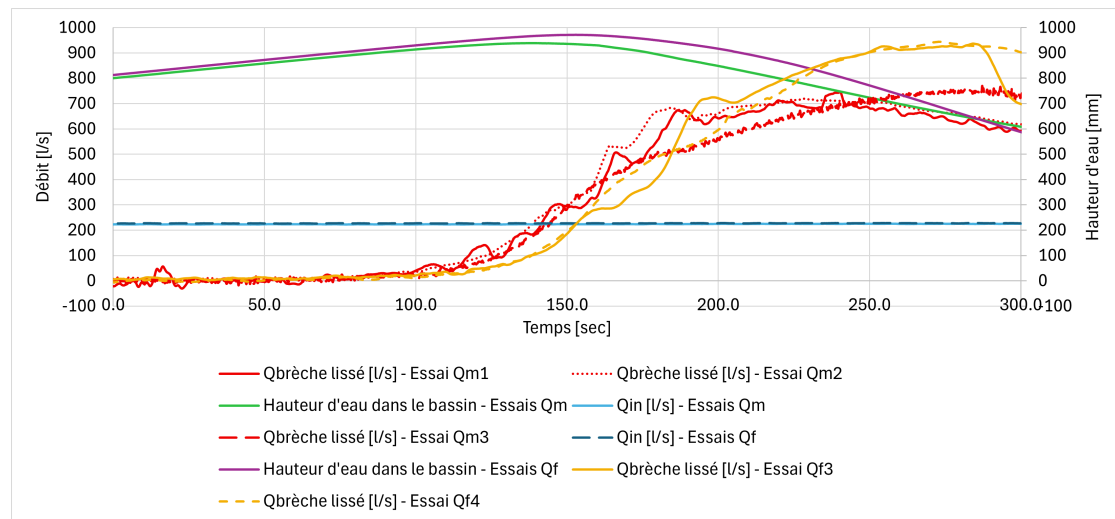


FIGURE 4.71 – Essais Qm et Qf : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin

La première différence concerne le niveau d'eau qui atteint une valeur plus élevée en $t = 160s$ pour le sable fin, il se rapproche des 990 mm. Tandis que la hauteur d'eau maximale atteinte en $t = 150s$ pour le sable moyen est de 950 mm. Ensuite, l'écart de niveau entre les essais avec les deux sables atteint son maximum

de 50 mm en $t = 225s$. Les niveaux se rejoignent en fin d'essais.

On observe avec les courbes jaunes et rouges que le débit traversant une digue en sable fin augmente plus rapidement de $t = 135s$ à $t = 220s$ par rapport à celui d'une digue en sable moyen qui augmente en $t = 125s$ mais avec une augmentation moins rapide.

Le débit maximal entre les deux essais est de 945 [l/s] en $t = 275s$ pour le sable fin tandis que celui du sable moyen est de 750 [l/s] atteint en $t = 290s$. Cependant, cette valeur correspond à l'essai Qm3 tandis que l'essai Qm2 a également un bref pic à 750 [l/s] en $t = 240s$. Une différence maximale de 195 [l/s] au niveau des débits de brèche est observée entre une digue en sable fin et en sable moyen soumise à la surverse.

Bien que les digues en sable moyen présentent une compaction plus élevée, ce qui devrait théoriquement accroître leur résistance à l'érosion, les essais montrent des différences marquées de géométrie de brèche et de débit maximal en faveur du sable fin. Ce résultat indique que l'effet granulométrique, via les mécanismes d'arrachement et de rupture des parois, domine l'effet du compactage.

4.7 Analyse de l'influence du mode d'alimentation : essai Hf et Qf

L'enjeu de cette seconde analyse est la comparaison des essais à moyenne échelle avec les cas réels de rupture de digue. En effet, lorsque la digue de notre essai est soumise à un débit constant dans le réservoir, cela se rapproche de la réalité des grands réservoirs dont le niveau ne varie quasiment pas au cours du temps. Il est donc intéressant de discerner les différences entre des essais à moyenne échelle avec des conditions réalistes, qui sont difficiles à mettre en place, et des essais avec un débit constant, dont la réalisation est plus simple et facilement reproductible.

Cette comparaison est possible grâce aux trois essais Hf et deux essais Qf dont les digues ont été construites en sable fin. Tandis que leur mode d'alimentation diffère, cela permet l'analyse de son influence sur les résultats.

4.7.1 Construction de la digue

Le graphique de la figure 4.72 représente la moyenne des masses volumiques sèches recueillies pour les essais Hf et Qf lors de la construction des digues.

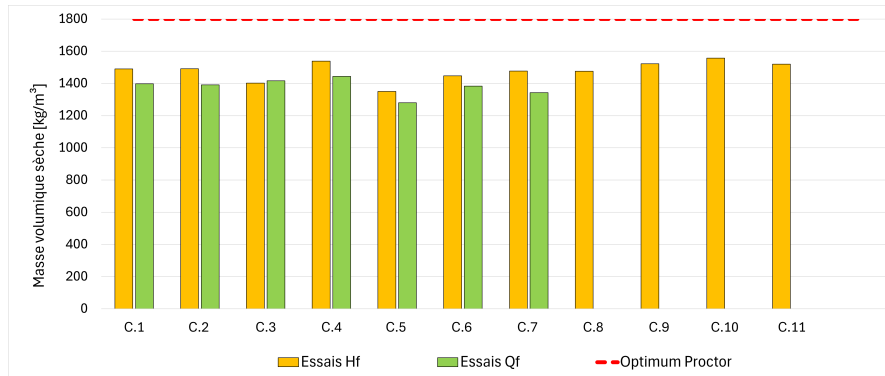
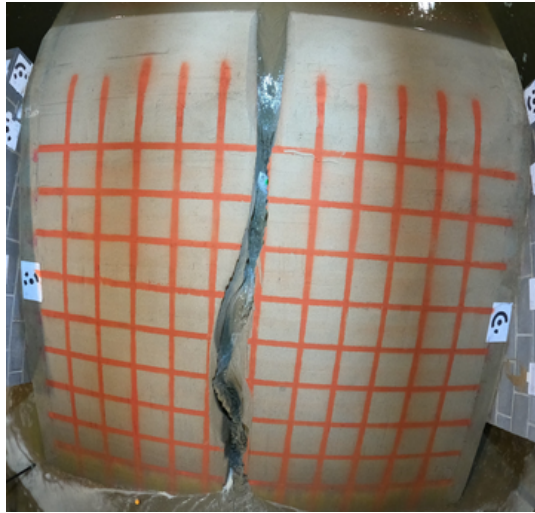


FIGURE 4.72 – Essais Hf et Qf : Evolution des masses volumiques sèches moyennes

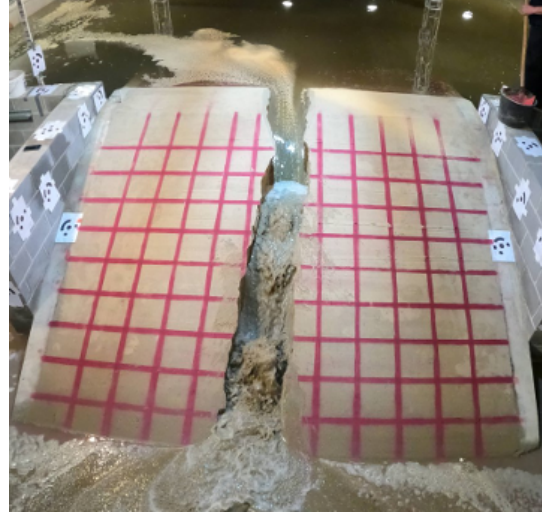
On observe rapidement que les essais Hf ont été mieux compactés sur l'ensemble des couches par rapport aux essais Qf bien que les valeurs des masses volumiques sèches soient assez faibles par rapport à l'optimum Proctor du sable fin ($1800[kg/m^3]$). La compaction n'est donc optimale pour aucun des deux types d'essai.

4.7.2 Evolution visuelle de la brèche

Le choix des essais représentés dans les photos suivantes est arbitraire pour les essais Qf car l'évolution visuelle de ces essais est semblable. Tandis que pour les essais Hf, le choix s'est porté vers Hf3 pour éviter le soucis de décalage de temps sur les captures de l'essai Hf2. Le temps $t = 0s$ de ces essais, Hf3 et Qf4, correspond à l'écoulement qui atteint la pente aval de la digue.



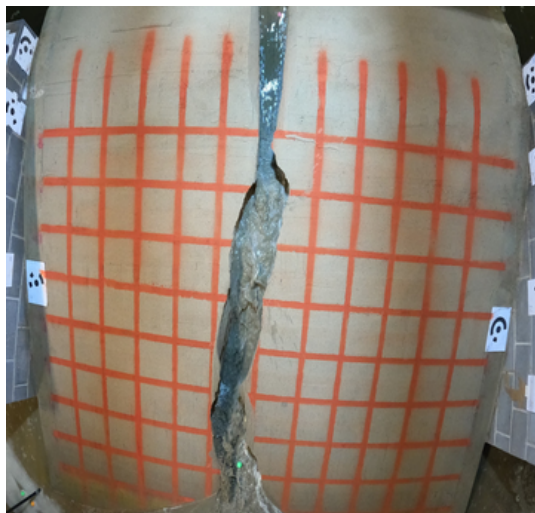
(a) Essai Hf3



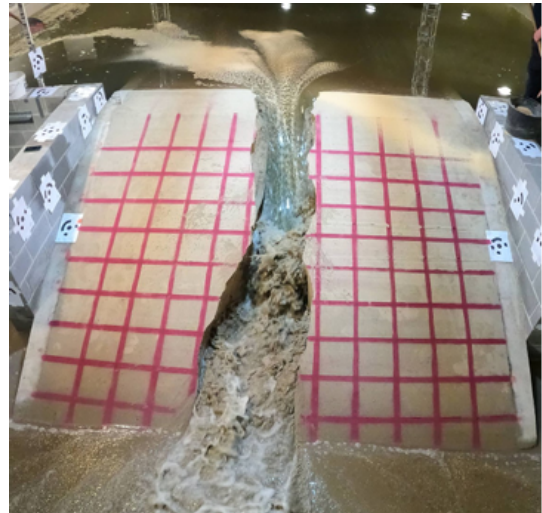
(b) Essai Qf4

FIGURE 4.73 – Photos prises en $t = 80s$

Après $t = 80s$, on remarque clairement que l'érosion est uniquement verticale pour l'essai Hf3 tandis que la brèche de l'essai Qf4 s'est déjà légèrement élargie. On observe seulement la formation de l'escalier en aval pour Hf3 tandis qu'il se dirige déjà vers l'amont pour l'essai Qf4. A ce moment, le ressaut hydraulique est plus fort et visible pour Qf4.



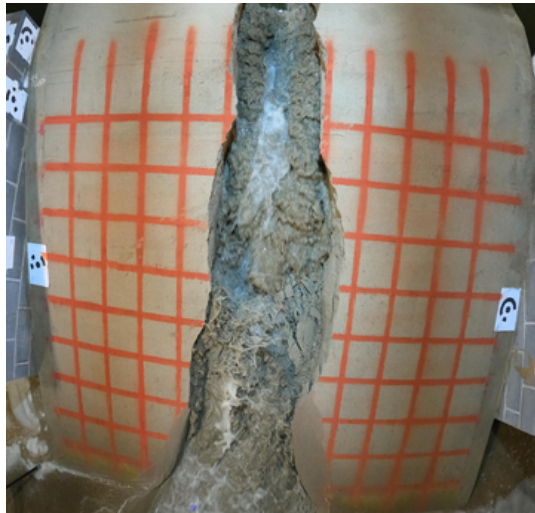
(a) Essai Hf3



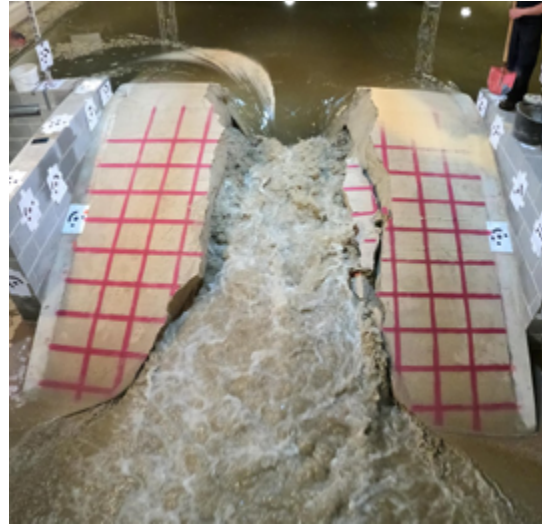
(b) Essai Qf4

FIGURE 4.74 – Photos prises en $t = 120s$

Ensuite, en $t = 120s$, l'essai Hf3 s'érode surtout verticalement tandis que l'essai Qf4 continue de s'éroder verticalement et latéralement. L'escalier continue de se diriger vers l'amont pour les deux essais bien qu'il soit plus visible pour l'essai Qf4. En effet, la brèche de Hf3 étant encore assez étroite, il est difficile de le distinguer mais la vidéo montre bien que des balles se coincent dans le ressaut et ses courants.



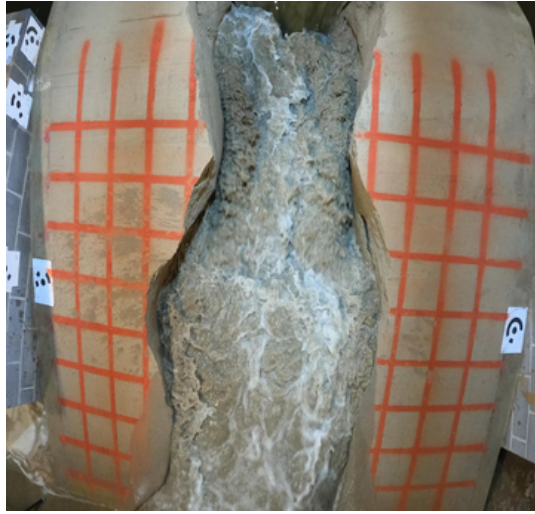
(a) Essai Hf3



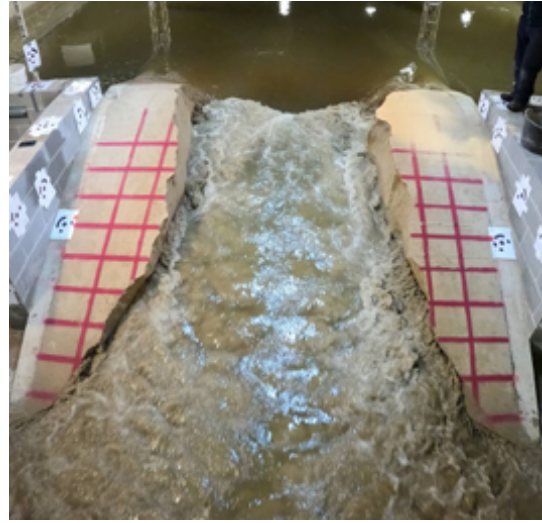
(b) Essai Qf4

FIGURE 4.75 – Photos prises en $t = 180s$

Sur les photos prises en $t = 180s$, l'élargissement de la brèche s'est accéléré pour les deux essais. En effet, la brèche de l'essai Qf4 est très large avec le ressaut hydraulique qui a atteint l'amont tandis que la brèche de l'essai Hf3 est moitié moins large. L'accélération de l'érosion latérale a été provoquée par la chute de blocs de sable fin d'environ 30cm de large, comme en témoigne la photo de l'essai Hf4.



(a) Essai Hf3



(b) Essai Qf4

FIGURE 4.76 – Photos prises en $t = 220s$

Finalement, en $t = 220s$, la brèche de l'essai Hf4 se rapproche de la forme rectangulaire finale tandis que la brèche de l'essai Hf3 va encore continuer de s'élargir mais en gardant également une forme rectangulaire.

4.7.3 Profondeur de la brèche

Les graphiques des figures 4.77, 4.78 et 4.79 représentent l'évolution de la hauteur de brèches pour les cinq essais avec les essais à débit constant (Qf) en rouge et les essais à niveau constant (Hf) en bleu. Malheureusement, en amont de la crête ($x=-25cm$) et sur la pente aval ($x=25cm$), seul l'essai Hf3 possède des données pour les essais à niveau constant.

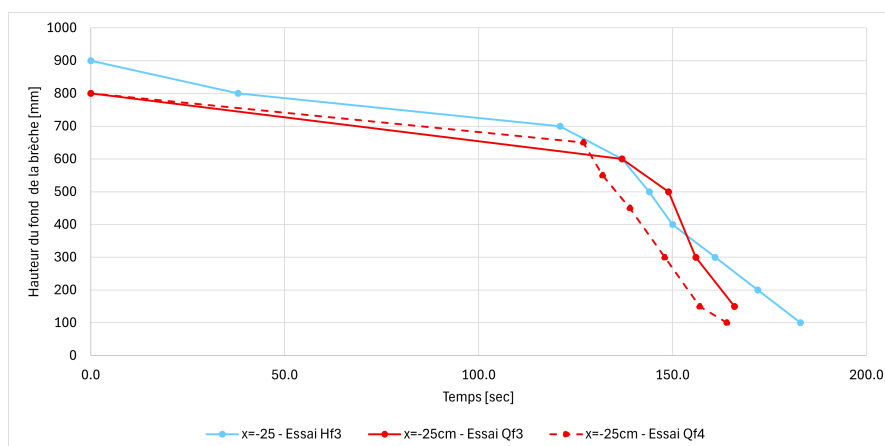


FIGURE 4.77 – Essais Hf et Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en amont de la crête

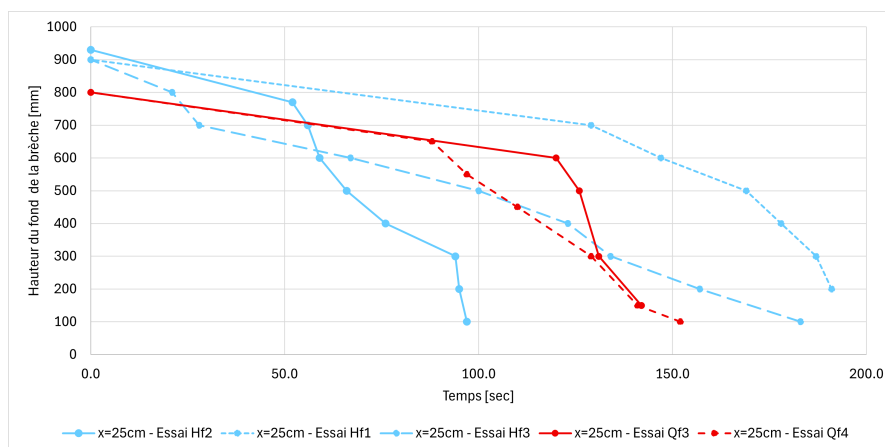


FIGURE 4.78 – Essais Hf et Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en aval de la crête

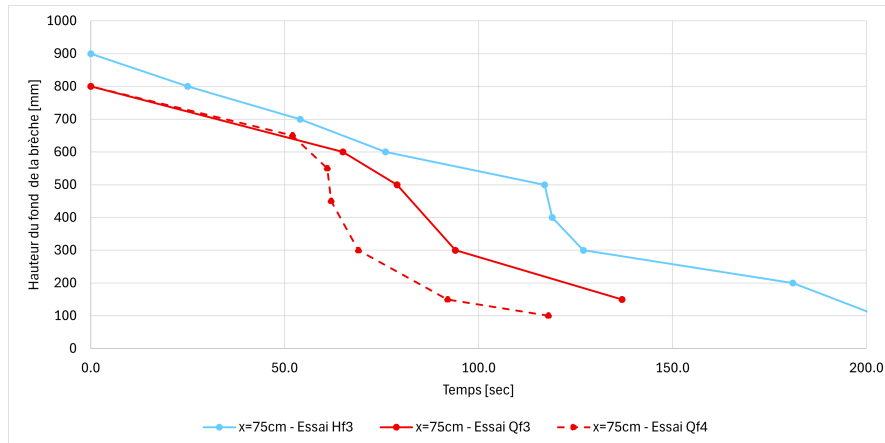


FIGURE 4.79 – Essais Hf et Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche sur la pente aval

On observe que l'évolution de la hauteur du fond semble proche en amont de la crête ($x=-25\text{cm}$) mais en réalité, l'érosion verticale est plus rapide pour les essais Qf mais démarre plus tard en $t = 130\text{s}$ par rapport à l'essai Hf3 dont la première balle est emportée après seulement 40 secondes.

En aval de la crête ($x=25\text{cm}$), on remarque de fortes disparités dans les résultats des essais Hf. En effet, l'érosion démarre à différents instants et se déroule à différentes vitesses. Cependant, on observe quand même que les essais Qf semblent s'éroder plus rapidement par rapport aux essais Hf selon les pentes des courbes.

Sur la pente aval ($x=75\text{cm}$), les essais Qf semblent à nouveau s'éroder très rapidement tandis que la courbe bleue de Hf3 témoigne d'une érosion plus étalée dans le temps.

TABLE 4.12 – Récapitulatif des moyennes des vitesses d'érosion verticale des essais Hf et Qf

Position	Hf	Qf
$x=-25\text{cm}$	290 [mm/min]	911 [mm/min]
$x=25\text{cm}$	545 [mm/min]	871 [mm/min]
$x=75\text{cm}$	236 [mm/min]	438 [mm/min]

De manière générale, le tableau confirme ces observations. En effet, pour chaque position, la vitesse d'érosion verticale est beaucoup plus élevée pour les essais Qf.

Il est clair que l'écoulement creuse plus rapidement la brèche lorsque le débit des pompes est constant plutôt que lorsque le niveau du réservoir est constant.

4.7.4 Largeur de la brèche

Les graphiques des figures 4.80, 4.81 et 4.82 représentent les moyennes des largeurs supérieures des essais pour les deux modes d'alimentation. Cela permet de comparer plus facilement la tendance de la brèche d'une digue soumise à un niveau constant par rapport à un débit constant.

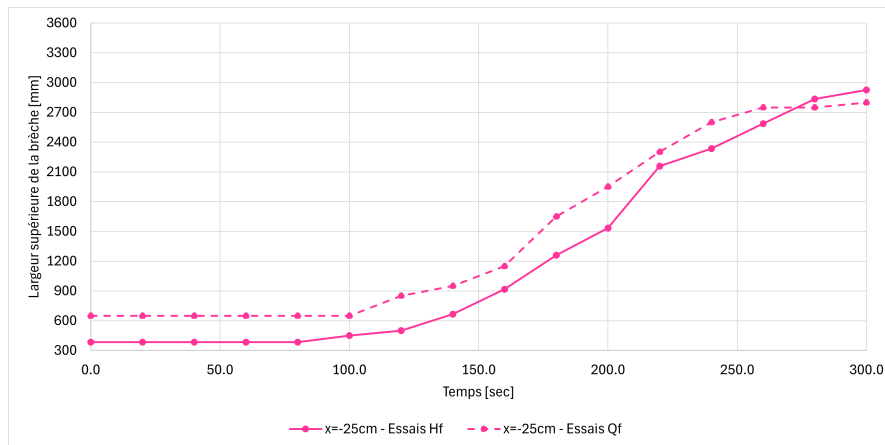


FIGURE 4.80 – Essais Hf et Qf : Evolution de la largeur supérieure moyenne de la brèche en amont de la crête

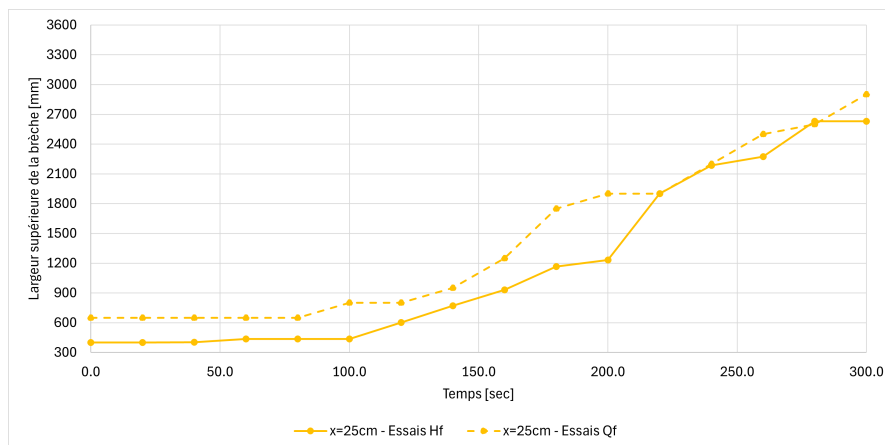


FIGURE 4.81 – Essais Hf et Qf : Evolution de la largeur supérieure moyenne de la brèche en aval de la crête

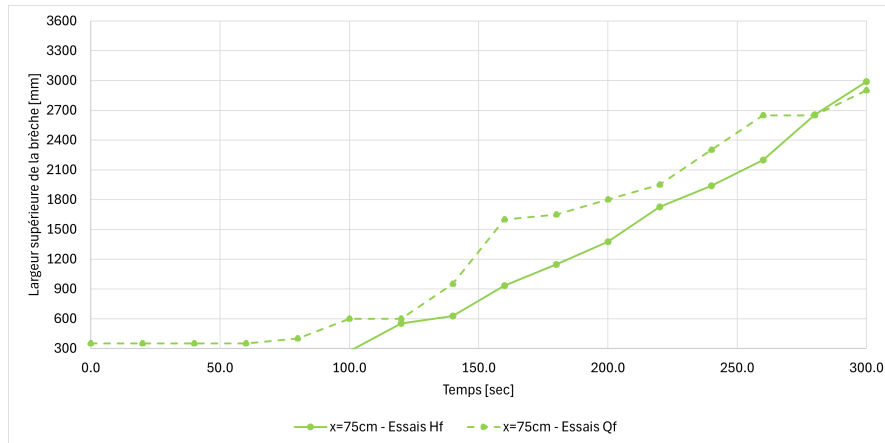


FIGURE 4.82 – Essais Hf et Qf : Evolution de la largeur supérieure moyenne de la brèche sur la pente aval

On observe clairement que l'érosion latérale se développe plus tôt pour les essais Qf, peu importe la position. Cela confirme les observations sur les photos prises durant les essais. Cependant, l'évolution des largeurs semble se dérouler à des vitesses assez proches.

Les fortes différences observées, notamment en $t = 160s$ sur la pente aval ou en $t = 180s$ en aval de la crête, sont liés à la chute des blocs de remblai qui sont aléatoires avec le sable fin.

TABLE 4.13 – Récapitulatif des moyennes des vitesses d'érosion latérale des essais Hf et Qf

Position	Hf	Qf
x=-25cm	508 [mm/min]	430 [mm/min]
x=25cm	446 [mm/min]	450 [mm/min]
x=75cm	548 [mm/min]	510 [mm/min]

Ce tableau confirme que les vitesses d'érosion latérales, pour les trois positions, sont similaires mais légèrement plus élevées pour les essais avec un niveau constant. En résumé, les essais Qf s'élargissent plus tôt mais moins rapidement par rapport aux essais Hf.

4.7.5 Débit de brèche et évolution du niveau d'eau dans le bassin

Les hauteurs d'eau dans le réservoir pour les essais Hf et Qf sont représentées sur le graphique de la figure 4.83. Les résultats de l'essai Hf1 ne sont pas présents car ils étaient trop éloignés de ceux de Hf2 et Hf3. Les débits alimentant le bassin sont en bleu et bleu foncé.

Les courbes rouges représentent les débits de brèche des essais Hf tandis que les courbes jaunes montrent l'évolution des débits traversant la brèche lors des essais Qf.

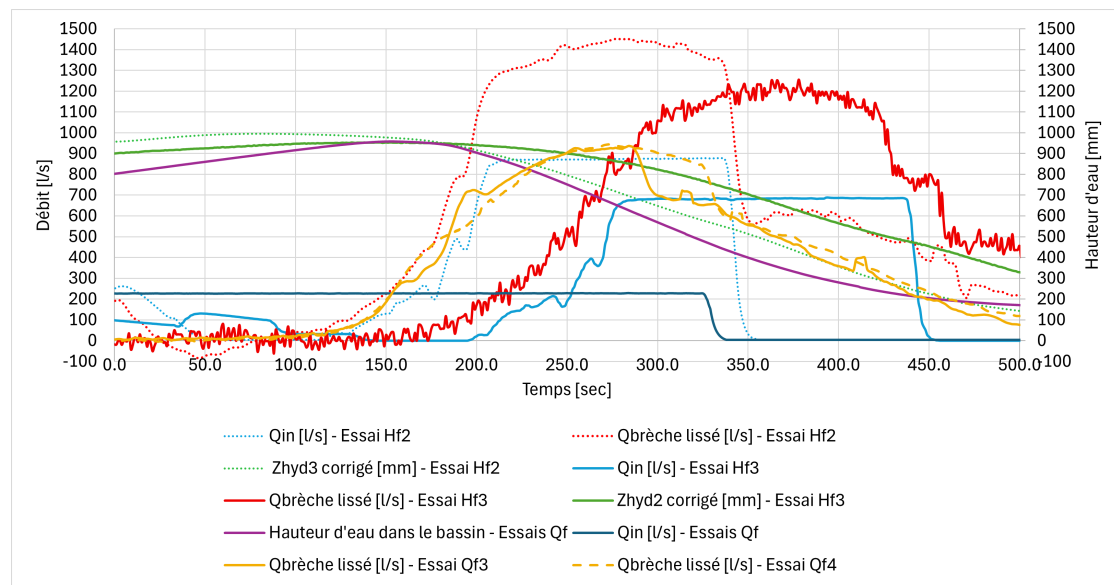


FIGURE 4.83 – Essais Hf et Qf : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin

On remarque que le niveau du réservoir lors des essais Qf atteint un maximum de 950 mm en $t = 170s$ avant de fortement diminuer. Tandis que le niveau de Hf2 est constant et égal à 1000 mm avec peu de variations de $t = 50s$ à $t = 140s$, le niveau diminue ensuite brusquement. Concernant l'essai Hf3, un phénomène semblable est observé, mais avec un décalage de 50 secondes. En effet, le niveau de Hf3 reste constant et égal à 950 mm de $t = 100s$ à $t = 200s$ puis diminue mais moins rapidement que lors de Hf2.

Le débit alimentant le bassin pour les Essais Qf est constant et égal à 224 [l/s]. On remarque cependant que ce débit chute en $t = 325s$, ce qui signifie que les essais

étaient terminés et les pompes éteintes. Tandis que le débit fourni par les pompes lors des essais Hf, afin de maintenir un niveau constant dans le réservoir, varie au fil du temps. Les fortes augmentations de ces débits correspondent au moment où le niveau constant du réservoir commence à diminuer, les pompes essayent alors de maintenir ce niveau. On observe donc à nouveau le décalage de 50 secondes entre les débits d'entrée de Hf2 et Hf3. La valeur du débit maximal fourni par les pompes est de 900 [l/s] pour Hf2 contre 700 [l/s] pour Hf3, du à la recalibration des débitmètres.

Finalement, en observant les débits passant par la brèche, on remarque une augmentation relativement similaire entre les essais Hf et Qf jusque 700 [l/s] puis la courbe s'aplatit pour atteindre son maximum de 945 [l/s] pour les essais à débit constant. Pour les essais Hf, le débit continue à augmenter très fortement et rapidement pour atteindre 1450 [l/s] pour Hf2 et 1250 [l/s] pour Hf3.

On note également que les essais Hf2 et Qf subissent l'augmentation du débit de brèche au même moment en $t = 125s$, tandis que l'essai Hf3 subit cette augmentation 50 secondes plus tard en $t = 175s$. Ce décalage augmente au fur et à mesure de l'essai pour atteindre un écart de 100 secondes entre les pics de débit de brèche de Hf2 et Hf3.

Les débits de brèche des essais Hf restent élevés pendant une période de 120 secondes puis chutent brusquement. Contrairement à celui des essais Qf, qui atteint son maximum puis diminue linéairement sur une période de 200 secondes.

Le mode d'alimentation avec un niveau constant soutient la charge hydraulique et contrôle l'hydrogramme (pics plus hauts, plateau, chute rapide), tandis que le débit constant favorise la cinétique d'incision (érosion rapide) mais impose un plafond hydraulique.

4.8 Conclusion

Concernant la reproductibilité des essais, il est clair que certaines conditions favorisent la reproduction contrairement à d'autres où de fortes disparités ont été observées dans les résultats.

Les essais réalisés avec un débit constant pour le sable fin et moyen, témoignent de fortes similarités dans les résultats. Autant au niveau de l'évolution visuelle et morphologique de la brèche qu'au niveau du débit traversant la brèche. En effet, l'ensemble de ces résultats présente des comportements proches pour les essais

homologues et cela facilite la comparaison entre le sable fin et moyen afin de définir son influence.

Cependant, pour les essais réalisés avec un niveau de consigne constant, la reproductibilité présente des difficultés. On peut notamment nommer la surverse par les cotés de la digue lors de l'essai Hf2 ou le problème de calibration des pompes lors de l'essai Hf3. Des disparités sont également observées dans l'évolution morphologique de la brèche. Au niveau du débit passant par la brèche, les différences sont les plus fortes avec l'essai Hf1 qui obtient des résultats très éloignés de ses homologues Hf2 et Hf3. Ces essais sont donc difficilement reproductibles mais il est important de les analyser car ils représentent au mieux les conditions réelles des grands réservoirs. Les différences de compaction et de mise en route expliquent les décalages temporels et certaines pentes de courbes mais les signatures physiques sont identiques : escalier, chutes de blocs, débits de pointe très élevés et chute brutale finale.

À débit d'alimentation identique, la comparaison entre sable moyen et sable fin montre que la granulométrie contrôle les mécanismes d'érosion et la géométrie de la brèche. Malgré une compaction plus élevée des digues en sable moyen, le sable fin développe des processus d'arrachement spécifiques (formation d'un escalier hydraulique, instabilité des parois et chute de blocs de grande largeur) conduisant à une brèche de géométrie rectangulaire et à des débits de brèche significativement plus élevés. Ces observations indiquent que l'effet granulométrique domine l'effet du compactage, il agit principalement sur la chronologie de l'érosion sans modifier le régime morphodynamique global.

La comparaison des essais en sable fin soumis à des modes d'alimentation différents montre que le mode d'alimentation contrôle principalement la forme de l'hydrogramme de brèche. Lorsque le débit est imposé, l'érosion est rapide, mais la baisse progressive du niveau dans le bassin limite la charge hydraulique et induit un plafonnement du débit de brèche. À l'inverse, le maintien du niveau permet de soutenir la charge hydraulique au cours de l'ouverture de la brèche, conduisant à des pics de débit nettement plus élevés, malgré des décalages temporels liés aux conditions de mise en œuvre.

Ainsi, les sections 4.6 et 4.7 montrent que la granulométrie gouverne la nature des mécanismes d'érosion et la géométrie de la brèche, tandis que le mode d'alimentation conditionne l'intensité et la dynamique du débit de brèche, ces deux facteurs agissant de manière complémentaire dans le processus de rupture de digue.

Chapitre 5

Détermination des débits à partir des vitesses

5.1 Analyse du débit de brèche avec la méthode PIV

La méthode de vélocimétrie par images de particules (PIV) permet d'estimer les champs de vitesse d'un écoulement à partir du déplacement de particules visibles sur des images successives capturées par vidéo. Ces particules sont supposées suivre fidèlement le mouvement du fluide et être suffisamment petites pour ne pas perturber l'écoulement. Il est ensuite possible d'obtenir le débit passant par la brèche en multipliant la vitesse à la surface de l'écoulement par sa section immergée.

5.1.1 Choix des essais

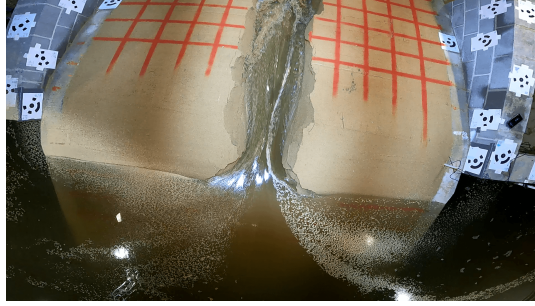
Une analyse PIV nécessite de choisir les essais selon plusieurs critères. En effet, les images des essais doivent être de grande qualité afin d'obtenir des résultats convenables. Il est donc également nécessaire que les particules soient nombreuses et distinguables à la surface de l'eau. Il faut aussi un bon système de capture vidéo avec une fréquence d'images par seconde assez élevée.

Malheureusement, les 2 essais réalisés cette année ne remplissent pas les critères :

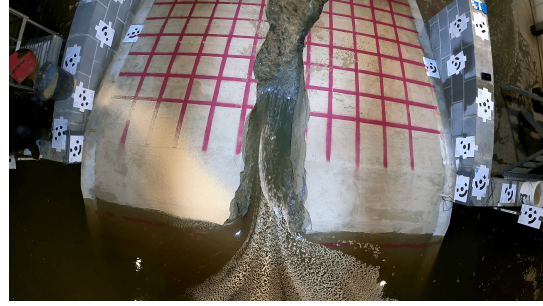
- Essai Qm3 : les nouvelles sondes empêchent une bonne vision de l'écoulement
- Essai Hf3 : les particules envoyées depuis les pompes ne circulent pas bien dans l'écoulement

Ce sont donc les essais Qm1 et Qf4 qui ont été choisis car ils remplissent les

critères. De plus, les sections de l'écoulement ont été calculées lors des précédents travaux [6] [7]. On remarque sur les photos de la figure 5.1 que le champ de vision est dégagé et que les particules (projetées depuis le bord de la digue en amont) suivent bien l'écoulement pour ces essais. Une caméra enregistre la brèche pour l'analyse de la vitesse de l'écoulement.



(a) Essai Qm1



(b) Essai Qf4

FIGURE 5.1 – Images de l'écoulement utilisées pour l'analyse PIV

Afin de définir le débit traversant la brèche, la vitesse à la surface de l'écoulement, obtenue par les méthodes PIV, est supposée uniforme sur la hauteur d'eau. Le débit de brèche à l'instant t est donc déterminé par la formule suivante :

$$Q_{brèche}^t = U^t * A^t$$

avec :

- U^t : la vitesse moyenne à la surface à l'instant t
- A^t : la section de l'écoulement à l'instant t

Les données fournissent les sections de l'écoulement en $t = 60s$, $t = 120s$ et $t = 180s$ pour les deux essais. Les sections correspondent à la position en amont de la crête ($x=-25cm$), l'endroit où les champs de vitesses sont calculés par les méthodes PIV.

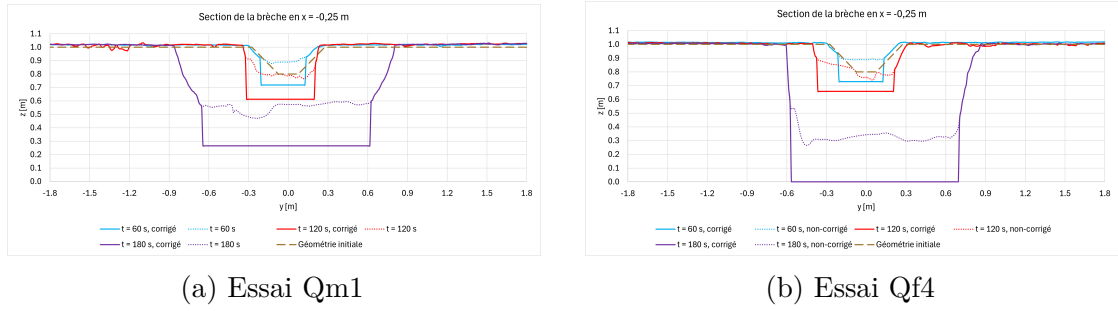


FIGURE 5.2 – Sections en $t = 60s$, $t = 120s$ et $t = 180s$

TABLE 5.1 – Récapitulatif des sections de l'écoulement pour PIV

Temps	Qm1	Qf4
$t = 60s$	$0,06798 [m^2]$	$0,06327 [m^2]$
$t = 120s$	$0,10659 [m^2]$	$0,10944 [m^2]$
$t = 180s$	$0,4158 [m^2]$	$0,504 [m^2]$

La section de l'écoulement correspond à l'aire entre la section corrigée avec la profondeur réelle et la section obtenue en premier lieu avec la surface de l'écoulement. Il y a donc trois moments pendant lesquels le débit pourra être calculé avec les deux méthodes PIV.

Pour ce travail, deux méthodes différentes utilisant le principe PIV vont être comparées. La première est OpenPIV, un logiciel open source tandis que Davis est un logiciel propriétaire commercial.

5.1.2 Logiciel open source OpenPIV

Fonctionnement

Dans le cadre de cette étude, l'analyse PIV avec OpenPIV est appliquée à des images extraites de vidéos de la brèche de la digue. L'analyse repose sur la comparaison de paires d'images consécutives séparées par un intervalle de temps connu. Chaque image est subdivisée en fenêtres d'interrogation au sein desquelles le déplacement moyen des particules est estimé par corrélation croisée.

Le déplacement obtenu pour chaque fenêtre est ensuite converti en vitesse à l'aide de l'intervalle de temps entre deux images et d'un facteur d'échelle spatial issu de la calibration. La calibration se fait en comparant la même distance en

pixels et en mètres sur l'image. L'ensemble des déplacements permet ainsi de reconstruire un champ de vitesse bidimensionnel représentatif de l'écoulement à l'instant considéré.[15]

Les champs de vitesse PIV fournissent donc, pour chaque point de la grille, les composantes de vitesse u et v dans le repère de l'image. Afin de caractériser l'écoulement à travers la brèche, une direction principale de l'écoulement a été définie à partir de deux points amont et aval identifiés sur l'image.

Dans un premier temps, les champs de vitesse obtenus pour chaque paire d'images successives ont été moyennés temporellement, cellule par cellule, afin de réduire le bruit de mesure et d'obtenir un champ de vitesse moyen représentatif de l'écoulement à l'instant considéré. Les composantes moyennes u_{mean} et v_{mean} ont ensuite été projetées dans la direction principale de l'écoulement, permettant d'obtenir une composante de vitesse scalaire u_{flow} .

Dans un second temps, une moyenne spatiale de cette composante de vitesse projetée a été réalisée sur une zone centrale de la brèche, considérée comme représentative de l'écoulement. Cette vitesse moyenne caractéristique a finalement été utilisée pour l'estimation du débit, en supposant une vitesse uniforme sur toute la section de la brèche.

Paramètres et structure du code

L'analyse PIV, basée sur le logiciel open source OpenPIV, a été réalisée à l'aide d'un code Python spécifiquement développé pour ce travail. Ce code est structuré de la manière suivante.

Les principaux paramètres définis dans le code sont les suivants :

- La fréquence d'acquisition des images
- Le facteur d'échelle spatial
- La région d'intérêt (ROI)
- La taille des fenêtres d'interrogation, le recouvrement entre fenêtres et la taille de la zone de recherche

La fréquence d'acquisition des images permet de déterminer l'intervalle de temps Δt entre deux images successives. Elle est égale à 23,98 fps. L'intervalle de temps Δt est donc égal à $\frac{1}{23,98} = 4170\mu s$.

Le facteur d'échelle spatial est exprimé en mètres par pixel et obtenu à partir

d'une longueur de référence connue dans l'image. La longueur choisie est la largeur de la digue qui fait 4 mètres en réalité et 1250 pixels sur l'image.

La région d'intérêt est définie par quatre coordonnées en pixels, permettant de restreindre l'analyse à la zone de la brèche en évitant les parois de la digue. Les coordonnées et longueurs en pixels sont obtenues à l'aide du logiciel ImageJ.

La taille des fenêtres d'interrogation (window size), le recouvrement entre fenêtres (overlap) et la taille de la zone de recherche (search area size) contrôlent la résolution spatiale et la robustesse de la corrélation PIV.[16]

La window size (32x32 px) correspond à la zone de l'image initiale contenant un ensemble de particules dont le déplacement est estimé par corrélation. Sa taille conditionne le compromis entre la robustesse du calcul et la résolution spatiale du champ de vitesse.

L'overlap (50% donc 16 px) désigne le chevauchement entre deux fenêtres d'interrogation adjacentes. Il permet d'augmenter la densité spatiale des vecteurs de vitesse, au prix d'un temps de calcul plus élevé et d'une dépendance accrue entre vecteurs voisins.

La search area size (64x64 px) est la zone définie dans la seconde image dans laquelle l'algorithme recherche la fenêtre correspondante. Elle doit être suffisamment grande pour contenir le déplacement maximal attendu des particules, tout en restant limitée afin d'éviter les corrélations ambiguës.[16]

Les derniers paramètres sont le seuil de filtrage (sig2noise threshold) et la taille de la zone centrale (half). En effet, il est possible de modifier le seuil afin d'être plus ou moins strict concernant la sélection des vecteurs lors de l'analyse PIV. Le paramètre half permet de déterminer la taille de la zone centrale sur laquelle la moyenne spatiale est effectuée.

Concernant la structure, le code réalise successivement la lecture des images puis leur recadrage selon la région d'intérêt (ROI) afin de réaliser l'analyse PIV paire par paire. Les champs de vitesse obtenus sont ensuite convertis en unités physiques (passage de px/s à m/s) et moyennés temporellement.

La projection de la vitesse dans la direction principale de l'écoulement est ensuite effectuée. Pour finir, le code effectue une moyenne spatiale de cette composante de vitesse sur une zone centrale de la brèche.

Cette approche permet un contrôle précis de l'ensemble des paramètres de l'analyse.

Choix du nombre d'images et résultats

Le choix du nombre d'images utilisées pour l'analyse PIV constitue un compromis entre la réduction du bruit et la préservation de la représentativité temporelle de l'écoulement. Dans cette étude, des séries de 6, 11 et 31 images consécutives ont été sélectionnées autour de l'instant d'intérêt.

Ce choix repose sur l'hypothèse que l'écoulement peut être considéré comme quasi-stationnaire sur la durée couverte par ces images. L'utilisation de plusieurs paires d'images successives permet de réaliser un moyennage temporel des champs de vitesse, ce qui réduit l'influence des erreurs de corrélation tout en conservant les caractéristiques principales de l'écoulement.

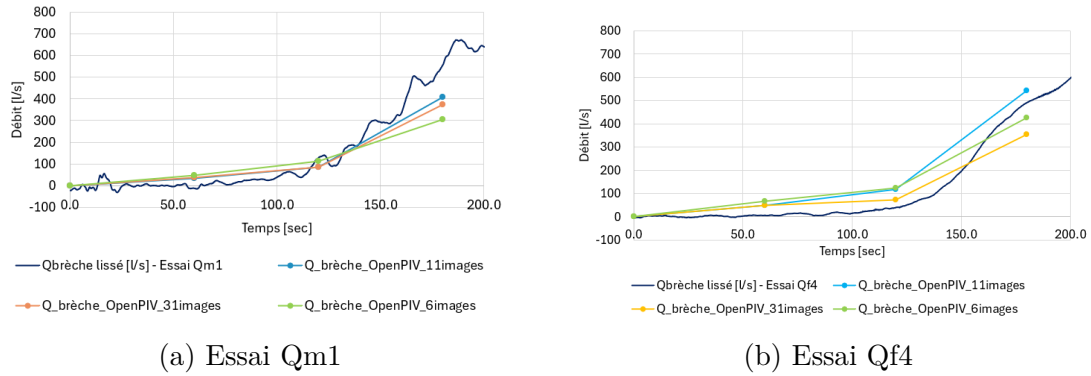


FIGURE 5.3 – Evolution du débit à travers la brèche en fonction du nombre d'images utilisées

Les différences observées à la figure 5.3, entre les débits calculés à partir de 6, 11 et 31 images, s'expliquent par la nature non stationnaire de l'écoulement à travers la brèche. On remarque qu'une fenêtre temporelle trop large peut lisser des variations physiques de la vitesse liées à l'évolution rapide de la géométrie de la brèche, tandis qu'une fenêtre trop courte reste plus sensible au bruit de mesure lié à la méthode PIV. En effet, la courbe représentant les 31 images sous-estime le débit par rapport à celui calculé avec la formule dans le chapitre 3.

Dans le cadre de cette étude, un moyennage temporel sur 11 images successives a été retenu comme compromis entre la réduction du bruit de mesure et la capacité à représenter fidèlement l'état instantané de l'écoulement à travers la brèche.

Les vitesses de la figure 5.4 sont obtenues avec OpenPIV sur 11 images successives pour les deux essais.

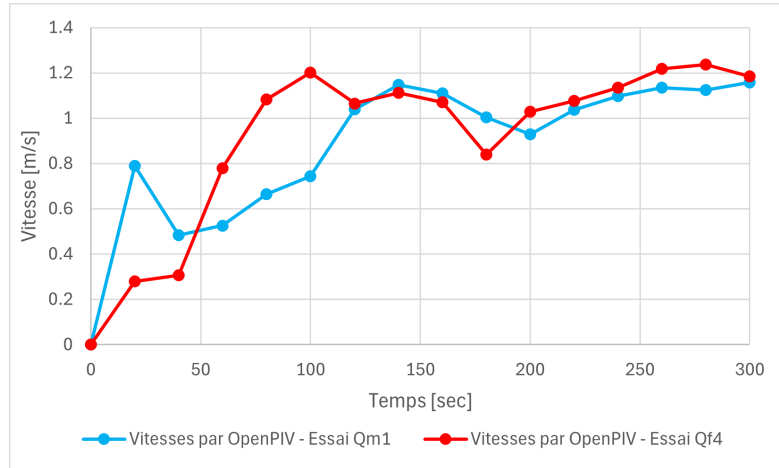


FIGURE 5.4 – Evolution de la vitesse de l'écoulement pour Qm1 et Qf4

On observe des similitudes entre les deux essais. En effet, la vitesse augmente fortement durant les 100 premières secondes puis dépasse 1 [m/s]. Ensuite, la vitesse pour les deux essais se maintient entre 1 et 1,2 [m/s] jusqu'à la fin des essais.

Cependant, on remarque deux irrégularités. Concernant Qm1, la vitesse en $t = 20s$ est de 0,8 [m/s], ce qui n'est pas réaliste et est sûrement dû à des reflets sur l'écoulement et les particules qui faussent la méthode PIV. Pour Qf4, il y a une chute de vitesse en $t = 180s$. On retrouve le même type de chute en $t = 200s$ pour l'essai Qm1. Il est probable que ce phénomène soit lié à un changement brusque de la géométrie de la brèche.

Les photos des figure 5.5 et 5.6 correspondent aux trois instants où le débit est calculé avec la représentation du ROI par un rectangle bleu tandis que le rectangle mauve représente la zone centrale du ROI sur laquelle la moyenne spatiale est effectuée.

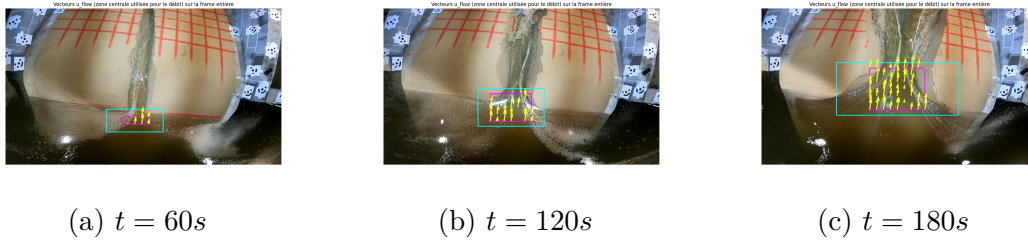


FIGURE 5.5 – Essai Qm1 : Champs de vecteurs de vitesse dans l'écoulement

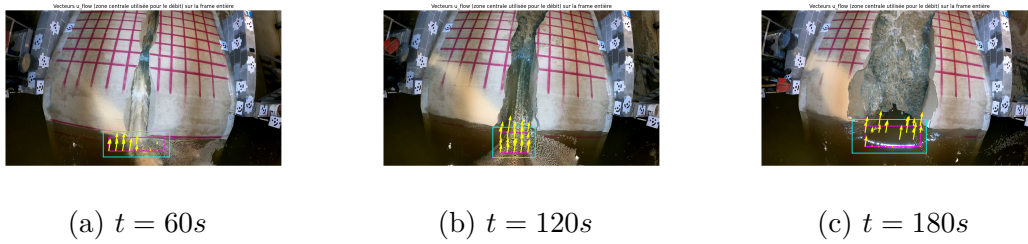


FIGURE 5.6 – Essai Qf4 : Champs de vecteurs de vitesse dans l'écoulement

On observe en $t = 60s$ pour Qm1 et $t = 180s$ pour Qf4 que beaucoup de vecteurs ont été rejetés. Tandis que en $t = 180s$ pour Qm1 et en $t = 120s$ pour Qf4, beaucoup de vecteurs ont été validés par le logiciel OpenPIV.

5.1.3 Programme DaVis de LaVision

Fonctionnement

Le logiciel DaVis 8.4, développé par LaVision, est un logiciel dédié à l'analyse PIV et à d'autres techniques de mesure optique des écoulements. Il repose sur le même principe fondamental que la PIV classique (OpenPIV) : l'estimation du déplacement des particules entre deux images successives séparées par un intervalle de temps connu.

Dans DaVis, les images sont analysées par corrélation croisée au sein de fenêtres d'interrogation réparties sur la région d'analyse. Le déplacement moyen des particules est déterminé pour chaque fenêtre, puis converti en vitesse à l'aide de l'intervalle de temps et de la calibration spatiale.

Une particularité de DaVis réside dans l'utilisation d'une stratégie multi-passes, au cours de laquelle plusieurs analyses successives sont réalisées avec des fenêtres

d'interrogation de taille décroissante. Cette approche permet d'améliorer progressivement la précision du champ de vitesse, en tenant compte des déplacements estimés lors des passes précédentes [17].

Ensuite, les champs de vecteurs de vitesse sont extraits depuis DaVis dans un format .txt afin d'être analysés par un code python. Ce code effectue la projection de ces vecteurs sur la direction de l'écoulement avant d'en faire la moyenne sur une zone centrale du ROI présent dans le fichier. Le code retourne ensuite la vitesse scalaire correspondant au temps t du fichier.

Paramètres et structure de l'analyse

Dans DaVis 8.4, l'analyse PIV est organisée avec une "OperationList" configurable via l'interface graphique. Cette structure permet à l'utilisateur de définir clairement les paramètres de l'analyse.

Les principaux paramètres définis dans DaVis 8.4 sont :

- La fréquence d'acquisition des images
- La calibration spatiale
- La région d'analyse
- La taille des fenêtres d'interrogation et leur recouvrement
- La stratégie multi-passes

La fréquence d'acquisition des images est utilisée pour déterminer l'intervalle de temps entre deux images successives. Les vidéos et images utilisées pour les deux méthodes sont identiques donc Δt vaut toujours $4170 \mu s$.

La calibration spatiale est obtenue à partir d'une longueur de référence visible dans les images. La référence est à nouveau la largeur de la digue qui est égale à 4 mètres en réalité et 1400 pixels sur DaVis.

La région d'analyse est définie par une zone rectangulaire que l'utilisateur doit tracer, elle permet de se concentrer sur la brèche.

L'analyse PIV réalisée avec le logiciel DaVis 8.4 repose sur une stratégie multi-passes avec réduction progressive de la taille des fenêtres d'interrogation (window size).

Une première passe est effectuée avec des fenêtres de 64×64 pixels afin d'obtenir une estimation robuste du champ de vitesse et de capturer les déplacements globaux

des particules. Cette estimation initiale est ensuite utilisée comme prédicteur pour une deuxième passe avec des fenêtres de 32×32 pixels, permettant d'améliorer la résolution spatiale du champ de vitesse. Chaque passe utilise un recouvrement (overlap) de 50 %, garantissant la continuité du champ de vitesse et la stabilité de la corrélation.

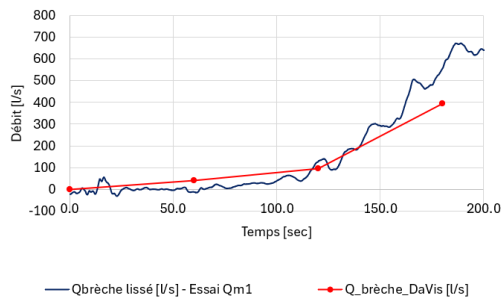
DaVis intègre également des algorithmes de validation et de filtrage automatiques, permettant d'identifier et de corriger les vecteurs aberrants. Ces traitements contribuent à améliorer la qualité globale des champs de vitesse.

Choix du nombre d'images et résultats

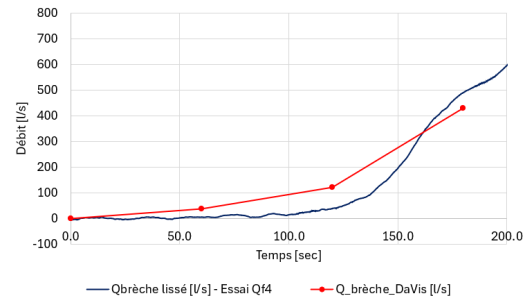
Le choix du nombre d'images utilisées pour l'analyse PIV dans DaVis repose sur les mêmes considérations que pour l'analyse OpenPIV. Une série de onze images consécutives a été utilisée afin de réaliser une analyse centrée autour d'un instant donné, en supposant un écoulement quasi-stationnaire sur la durée.

L'utilisation de dix paires d'images permet d'effectuer un moyennage temporel des champs de vitesse, ce qui contribue à réduire le bruit de corrélation et à améliorer la robustesse des résultats.

Le choix de onze images constitue donc un compromis efficace entre précision des champs de vitesse et représentativité de l'écoulement à travers la brèche. De plus, il est important d'utiliser la même séquence d'images pour les méthodes OpenPIV et DaVis afin de pouvoir les comparer.



(a) Essai Qm1



(b) Essai Qf4

FIGURE 5.7 – Evolution du débit à travers la brèche obtenu par DaVis

On remarque que les débits, traversant la brèche, obtenus par DaVis sont relativement proches de l'évolution du débit de brèche obtenue avec la formule dans

le chapitre 3. Les résultats de DaVis semblent légèrement surestimer le débit en début d'essai. Ensuite, les valeurs du logiciel DaVis se rapprochent de la courbe bleue en $t = 180s$ bien que ces valeurs sous-estiment légèrement le débit de brèche calculé par la formule pour les deux essais.

5.2 Comparaison des méthodes de calcul du débit

L'objectif de cette section est la comparaison entre ces deux méthodes. La première utilise le logiciel open source OpenPIV tandis que la seconde repose sur l'utilisation du logiciel propriétaire commercial DaVis de LaVision. Les raphiques des figures 5.8 et 5.9 représentent la comparaison entre les débits passant par la brèche obtenus grâce à OpenPIV, DaVis et la formule du chapitre 3.

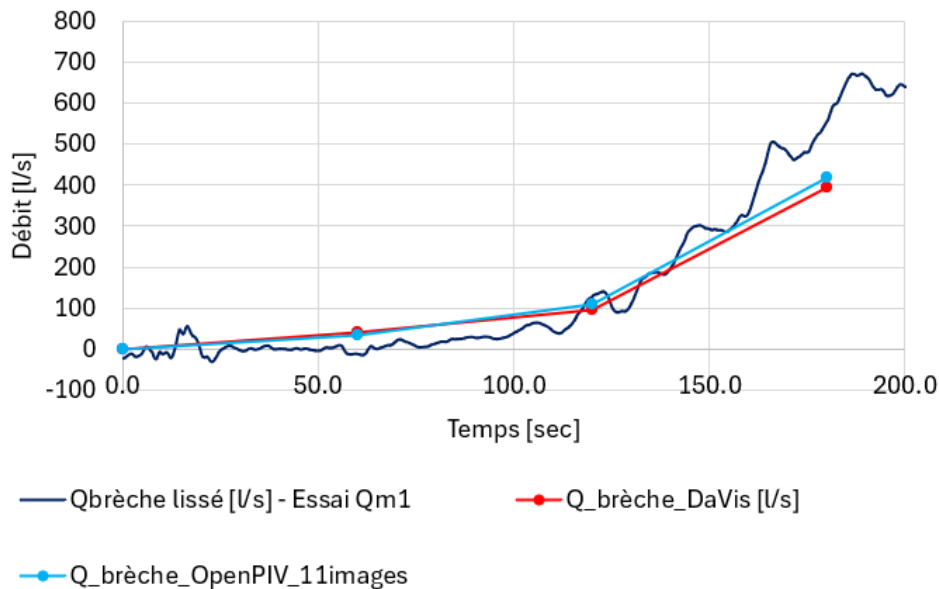


FIGURE 5.8 – Essai Qm1 : Comparaison des évolutions du débit à travers la brèche

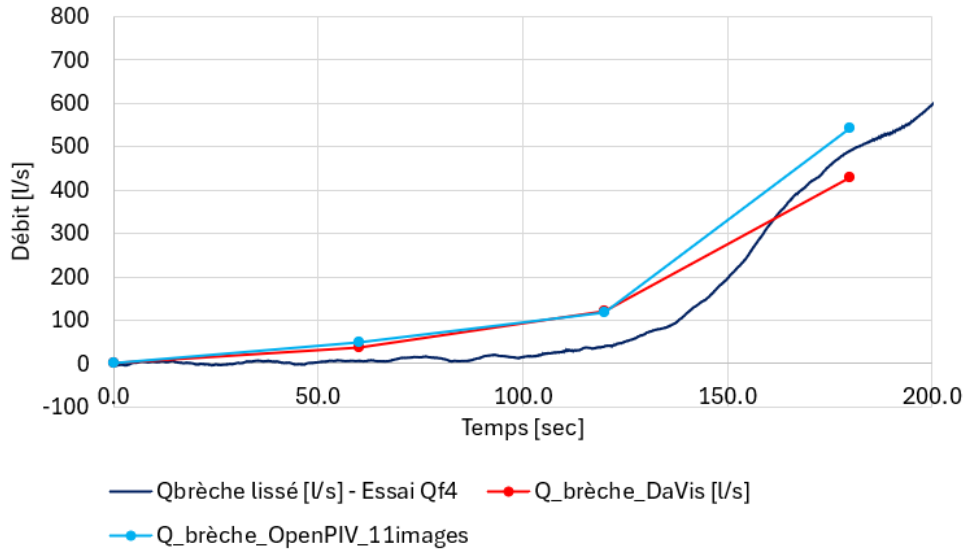


FIGURE 5.9 – Essai Qf4 : Comparaison des évolutions du débit à travers la brèche

On remarque très clairement, pour les deux essais, que les résultats de Davis et OpenPIV sont très proches. La plus grande différence réside en $t = 180s$ pour l'essai Qf4. En effet, le logiciel Davis sous-estime la vitesse de l'écoulement tandis qu'OpenPIV surestime la vitesse au même moment. Les différences en terme de débit avec la courbe bleue à ce moment $t = 180s$ sont de 50 [l/s] pour chaque méthode.

On a tendance à mieux se fier au logiciel commercial DaVis car il est plus fiable et la technique "muti-passes" permet plus de précision par rapport à OpenPIV. Cependant, avec ces résultats, on se rend compte que lorsque le logiciel OpenPIV est bien paramétré, on obtient des vitesses et donc des débits assez fiables par rapport à DaVis.

Ces deux méthodes représentent donc bien le débit passant par la brèche et donnent une idée de l'évolution de celui-ci. DaVis reste plus simple à mettre en œuvre, car le logiciel réalise une majorité des étapes par lui même, tandis qu'OpenPIV demande plus d'attention et de temps afin de tout paramétrer.

Il est donc correct d'utiliser OpenPIV pour caractériser la vitesse d'un écoulement tout en gardant à l'esprit que DaVis le fera surement plus rapidement et de manière plus robuste mais les résultats resteront semblables. L'avantage de l'accessibilité à OpenPIV reste l'argument le plus fort pour le choix entre les deux méthodes, étant donné la faible différence dans les résultats finaux.

Chapitre 6

Conclusion

Ce travail a poursuivi les expériences initiées par Gilles et Delforge (2023) et continuées par Jergeay et Zhang (2024). Le premier objectif était d'étendre les données en réalisant deux essais supplémentaires afin de comparer leurs résultats aux précédentes campagnes expérimentales. Cette comparaison avait pour but d'examiner l'influence du type de sable et du mode d'alimentation du réservoir sur l'évolution temporelle de la brèche.

Trois types d'essais à moyenne échelle ont été réalisés à travers les années :

- Essai Qm : Digue en sable moyen ($d_{50} = 0,632$ mm) et alimentation du bassin avec un débit constant
- Essai Qf : Digue en sable fin ($d_{50} = 0,314$ mm) et alimentation du bassin avec un débit constant
- Essai Hf : Digue en sable fin ($d_{50} = 0,314$ mm) et alimentation du bassin avec un niveau constant

En comparant l'ensemble de ces essais, les conclusions suivantes ont été tirées.

Reproductibilité des essais

Les essais réalisés à débit constant présentent une bonne reproductibilité et des résultats très similaires, tant sur l'évolution morphologique de la brèche que sur le débit la traversant. Cette cohérence facilite la comparaison entre le sable fin et le sable moyen et permet de mettre en évidence leur influence respective.

Malheureusement, les essais à niveau de consigne constant montrent une reproductibilité plus limitée, en raison de contraintes expérimentales et de conditions de mise en œuvre variables comme la surverse par les côtés de la digue ou encore le problème de calibration des pompes. Malgré ces écarts, les comportements physiques observés (débits de pointe très élevés et chute finale brutale) restent similaires et représentatifs des conditions réelles des grands réservoirs, ce qui justifie l'intérêt de leur analyse.

Influence du type de sable

La comparaison entre le sable fin et le sable moyen, à débit d'alimentation identique, met en évidence le rôle déterminant de la granulométrie dans le contrôle des mécanismes d'érosion et de la géométrie de la brèche. Malgré une compaction plus élevée des digues en sable moyen, le sable fin développe des processus d'arrachement spécifiques (formation d'un escalier hydraulique, instabilité des parois et chute de blocs de grande largeur) conduisant à des géométries de brèche plus rectangulaires et à des débits significativement plus élevés. La granulométrie apparaît donc comme le paramètre déterminant du régime morphodynamique, alors que le compactage conditionne principalement la temporalité de l'érosion.

Influence du mode d'alimentation

Par ailleurs, l'analyse des essais en sable fin soumis à différents modes d'alimentation souligne l'influence majeure de ces derniers sur la forme de l'hydrogramme de brèche. Le fait d'imposer un débit entraîne une érosion rapide, mais limitée par la diminution progressive de la charge hydraulique qui induit un plafonnement du débit. Tandis que le maintien du niveau permet de soutenir cette charge et de générer des pics de débit plus élevés. Malgré des décalages temporels liés aux conditions expérimentales, ces observations confirment le rôle clé du mode d'alimentation dans l'intensité et la dynamique de l'ouverture de la brèche.

Ces résultats indiquent que la granulométrie contrôle les mécanismes d'érosion et la forme de la brèche, tandis que le mode d'alimentation régit l'évolution et l'intensité du débit, ces deux paramètres intervenant conjointement dans le processus de rupture de digue.

Concernant les conclusions tirées de ces comparaisons, elles concordent avec les théories sur l'évolution des brèches et cela renforce la validité de ces observations.

Méthodes PIV

Le second objectif concernait l'obtention de la vitesse de l'écoulement avec la méthode de vélocimétrie par images de particules (PIV) afin d'en déduire le débit à travers la brèche.

Les résultats montrent que le choix du nombre d'images utilisées pour l'analyse PIV influence directement la qualité des champs de vitesse et des débits estimés. Un moyennage temporel sur onze images consécutives constitue un compromis satisfaisant, permettant de limiter le bruit de mesure tout en conservant une représentation fidèle de l'écoulement à travers la brèche.

La comparaison des méthodes OpenPIV et DaVis met en évidence une bonne concordance globale des débits obtenus pour les deux essais étudiés. Les écarts observés restent limités et apparaissent principalement lors de phases transitoires marquées par des évolutions rapides de la géométrie de la brèche. Bien que DaVis offre une mise en œuvre plus automatisée et une robustesse accrue, OpenPIV fournit des résultats comparables lorsqu'il est correctement paramétré.

Ces résultats confirment la pertinence des deux approches pour la caractérisation du débit à travers la brèche, le choix de la méthode pouvant être guidé par des considérations pratiques telles que l'accessibilité des outils et le temps de traitement disponible.

Les deux objectifs principaux ont été atteints mais ce travail pourrait être amélioré.

Plusieurs critiques et pistes d'améliorations sont envisageables :

- La photogrammétrie ne permet pas d'obtenir le fond réel de la brèche mais plutôt la surface de l'écoulement. Les balles permettent de palier à ce problème mais elles ont été placées à différentes profondeurs au cours des années ce qui rend l'analyse de l'évolution des profils assez compliquée. Ces positions étaient sûrement liées à l'épaisseur des couches de sable compactées. Il faudrait standardiser l'épaisseur des couches de sable, les positions et les hauteurs des balles pour les prochains essais afin de faciliter l'interprétation de ces résultats.

- L'épaisseur des couches de sable a également une influence sur la compaction des digues. En effet, on remarque clairement que la technique s'est améliorée depuis les travaux précédents et la compaction des derniers essais est bien meilleure. Il faut donc s'assurer que le procédé d'humidification et de compaction reste bien identique dans le futur afin de comparer des essais ayant des niveaux de compaction plus proches.
- Concernant le dernier essai avec un niveau de consigne constant, il y a eu des problèmes lors de l'acquisition de données à cause de la recalibration des débitmètres. Il serait donc intéressant de réaliser à nouveau un essai avec un niveau constant, avec la même calibration des pompes. Cela permettrait de comparer des résultats obtenus dans des conditions exactement identiques et d'approfondir concernant la reproductibilité de ces essais qui représentent au mieux les conditions réelles.
- Les méthodes de mesure PIV peuvent être améliorées en plaçant une deuxième caméra au dessus de la crête avec un angle de vue légèrement différent. L'utilisation de plusieurs caméras est possible avec DaVis et permet de renforcer la robustesse et la précision des résultats. Les particules pourraient également être remplacées car la sciure de bois se condense en paquets puis, en atteignant l'écoulement de la brèche, se divise en particules très fines, parfois trop pour l'analyse. Des billes de polystyrène pourraient être une bonne solution, à condition qu'elles soient biodégradables ou stoppées avant de rejoindre la Sambre.
- Dans cette étude, aucune simulation numérique n'a été réalisée. Néanmoins, les résultats obtenus constituent une base pertinente pour de futurs travaux intégrant des simulations d'érosion de digues. Ces outils permettraient de reproduire les essais de manière virtuelle, d'anticiper certaines difficultés expérimentales et d'optimiser le temps et les coûts associés aux essais en laboratoire.

Ces différentes propositions de solutions visent à prévenir des difficultés rencontrées pour la reproductibilité, mais également à approfondir les connaissances sur la rupture des digues par surverse.

Ce travail contribue à élargir les connaissances dans le domaine de la rupture de digues par surverse, en apportant une meilleure compréhension des mécanismes impliqués. Les résultats obtenus ouvrent la voie au développement de nouvelles

approches en matière de prévention et de gestion des ouvrages hydrauliques. Ces avancées visent à renforcer la résilience des infrastructures face aux processus d'érosion et de surverse, tout en participant à l'amélioration de la sécurité et de la durabilité environnementale.

Déclaration relative à l'utilisation de l'intelligence artificielle générative et des technologies d'assistance par l'IA dans le processus de rédaction

Lors de la préparation de ce travail, l'auteur a utilisé ChatGPT 5.2 d'OpenAI afin de vérifier la grammaire et l'orthographe, d'améliorer la structure des phrases, ainsi que de renforcer la clarté, la cohérence et la lisibilité de l'ensemble du manuscrit. Il est important de préciser que ChatGPT 5.2 n'a apporté aucune information, donnée ou contenu original à ce travail. Son rôle s'est strictement limité à l'amélioration et à l'affinement du texte et code existant. Après chaque utilisation de cet outil, l'auteur a soigneusement relu et modifié le contenu si nécessaire et assume l'entière responsabilité du contenu final de la publication.

Bibliographie

- [1] Cattiaux JULIEN et al. « Événements météorologiques extrêmes et changement climatique ». In : (2018). URL : <https://www.encyclopedie-environnement.org/climat/evenements-meteorologiques-extremes-changement-climatique/>.
- [2] Zugasti TOM, Merad MYRIAM et Verrhiest-Leblanc GHISLAINE. « Rendre compte du rôle de l’alerte et de son effectivité dans la réduction des risques de catastrophes. Le cas des inondations en Allemagne, Belgique, et France de juillet 2021 ». In : *Institut de Maîtrise des Risques* (2024). URL : <https://hal.science/hal-04878701/document>.
- [3] Courivaud JEAN-ROBERT, Deroo LUC et Bonelli STEPHANE. « EROSION EXTERNE DES BARRAGES ET DES DIGUES ». In : *Justification des barrages : Etat de l’art et Perspectives* (2019). URL : https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/colloque2019_e101_erosion_externe_des_barrages_et_des_digues.pdf.
- [4] Yadong ZHANG et al. « Impact of floods on the environment : A review of indicators, influencing factors, and evaluation methods ». In : *Science of the Total Environment* (2024). DOI : [10.1016/j.scitotenv.2024.175683](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175683). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896972405839X?via%3Dihub>.
- [5] Yves CHENAL. « Raz de marée meurtrier aux Pays-Bas ». In : (2023). URL : https://www.herodote.net/31_janvier_1953-evenement-19530131.php.
- [6] Arthur Gilles et CORENTIN ZGAJEWSKI DELFORGE. « Étude expérimentale de l’écoulement sur une digue et de l’érosion progressive de celle-ci ». In : *Mémoire UCL Master[120] : ingénieur civil des constructions* (2023). URL : <https://thesis.dial.uclouvain.be/entities/masterthesis/dd6a6e43-bd27-4b3c-b4bf-e445e512fd4f>.

- [7] Emy Jergeay et WEN-HUI ZHANG. « Étude expérimentale de la rupture progressive d'une digue par surverse ». In : *Mémoire UCL Master[120] : ingénieur civil des constructions* (2024). URL : <https://thesis.dial.uclouvain.be/entities/masterthesis/627c8649-13cb-47dc-bbbc-4fedd97810ba>.
- [8] Adam CHEMINET. « Development of tomographic PIV for the study of turbulent flows ». In : *Université Paris Saclay* (2017). URL : <https://hal.science/tel-01455219v1/document>.
- [9] R. TOURMENT et B. BELLAC. « Les ruptures des digues de protection : mécanismes et approche par scénarios ». In : (). DOI : [10.5281/zenodo.10617842](https://doi.org/10.5281/zenodo.10617842). URL : https://hal.inrae.fr/hal-04538735v1/file/A_4-1%20%281%29.pdf.
- [10] Paul J. VISSER. « Breach Growth in Sand-Dikes ». In : *Thèse de doct. Faculty of Civil Engineering Delft University of Technology* (1998). URL : https://www.researchgate.net/publication/35515412_Breach_growth_in_sand-dikes.
- [11] Darryl P. ANDREWS, M. Grant WEBBY et Stephen E. COLEMAN. « Overtopping Breaching of Noncohesive Homogeneous Embankments. » In : (2002). DOI : [10.1061/~ASCE!0733-9429~2002!128:9~829!](https://doi.org/10.1061/~ASCE!0733-9429~2002!128:9~829!). URL : <https://sci-hub.mk/10.1061/%28asce%290733-9429%282002%29128:9%28829%29#:~:text=Coleman%2C%20Stephen%20E.%3B%20Andrews%2C%20Darryl%20P.%3B%20Webby%2C%20M.,Engineering%2C%20128%20%289%29%2C%20829%2E%80%93838.%20doi%3A10.1061%2F%20%28asce%290733-9429%20%282002%29128%3A9%20%28829%29>.
- [12] M.A.A.M. HASSAN, M.W. MORRIS et K.A. VASKINN. « Breach formation : Field test and laboratory experiments ». In : *Journal of Hydraulic Research* (2007). URL : <https://sci-hub.ru/10.1080/00221686.2007.9521828>.
- [13] Walder J. S. et al. « Controls on the breach geometry and flood hydrograph during overtopping of noncohesive earthen dams ». In : (2015). DOI : [10.1080/00221686.2007.9521828](https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521828). URL : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014WR016620>.
- [14] Pierre H. FLAMANT. « Comprendre la science du lidar ». In : (). URL : <https://insu.hal.science/insu-02292412/document>.
- [15] Hadar BEN-GIDAA, Roi GURKAB et Alex LIBERZON. « OpenPIV-MATLAB — An open-source software for particle image velocimetry; test case : Birds' aerodynamics ». In : (2020). DOI : <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100585>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352711020302983>.

- [16] Ali SHIRINZAD et al. « An Enhanced Python-Based Open-Source Particle Image Velocimetry Software for Use with Central Processing Units ». In : (2023). DOI : <https://doi.org/10.3390/fluids8110285>. URL : <https://www.mdpi.com/2311-5521/8/11/285>.
- [17] LAVISION. « méthode PIV ». In : (). URL : <https://www.lavision.de/fr/applications/fluid-mechanics/2d-stereo-piv/index.php>.

Table des figures

1.1	Statistiques de rupture des barrages et des digues par mode de rupture[3]	11
1.2	Décès suite aux inondations de 2021 en Allemagne et en Belgique [2]	12
1.3	Vue aérienne de la catastrophe de 1953 aux Pays-Bas [5]	13
1.4	Plateforme d'essai	14
2.1	Schéma représentant la surverse	18
2.2	Schéma représentant l'érosion interne (renard hydraulique)	18
2.3	Schéma représentant l'érosion externe	19
2.4	Schéma représentant le glissement de terrain	19
2.5	Etapes de rupture d'une digue selon Visser[10]	21
2.6	Setup expérimental de Coleman (2002)[11]	22
2.7	Essais à grande échelle pour le projet Impact [12]	23
2.8	Essais à moyenne échelle pour le projet Impact[12]	24
2.9	Site des essais à grande échelle pour le projet Impact[12]	24
2.10	Différentes étapes de la rupture selon Walder [13]	26
3.1	Courbe granulométrique[7]	29
3.2	Dimensions de la plateforme d'essai	31
3.3	Schéma du fonctionnement du bassin	31
3.4	Pompes alimentant le bassin	32
3.5	Automate	33
3.6	Dimensions de la digue (cm)	34
3.7	Gabarit de la brèche	34
3.8	Dispositif permettant d'éviter la rupture par infiltration	35
3.9	Mise en place du sable	36
3.10	Essai Qm3 : Masse volumique sèche de chaque couche	37
3.11	Compaction à l'aide de la dameuse	38
3.12	Réalisation des pentes	39
3.13	Gabarit de la brèche	39
3.14	Débitmètres	42
3.15	Essai Qm3 : Evolution des débits d'entrée	43

3.16	Sondes ultrasoniques	44
3.17	Schéma du positionnement des sondes	44
3.18	Essai Qm3 : Evolution des hauteurs d'eau des sondes ultrasoniques et hydrostatiques dans l'axe de la brèche	45
3.19	Essai Qm3 : Evolution des hauteurs d'eau mesurées par les sondes Zhyd 2 (hydrostatique) et Z42 _{Ultra} (ultrasonique)	46
3.20	Dispositif permettant d'obtenir le débit dans le drain	47
3.21	Essai Qm3 : Evolution du débit dans le drain et de la hauteur d'eau dans le déversoir	48
3.22	Essai Qm3 : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin(Zhyd2 corrigé)	49
3.23	Positionnement des balles dans la digue	50
3.24	Essai Qm3 : Evolution de la profondeur de la brèche	51
3.25	Cage métallique permettant la capture photo	52
3.26	Modèle 3D obtenu à partir du nuage de points	53
3.27	Fichier DEM extrait avec Python	53
3.28	Essai Qm3 : Evolution de la largeur supérieur de la brèche	54
3.29	Essai Qm3 : Comparaison de 5 sections de la digue en t=200 secondes	55
3.30	Essai Qm3 : Sections corrigés en x=-25cm	55
3.31	Essai Qm3 : Evolution du profil longitudinal	56
3.32	GCP présent sur la platefome d'essai	57
3.33	Dispositif permettant de faciliter la photogrammétrie	58
3.34	Lidar placé lors de l'essai Qm3	59
3.35	Modèle 3D obtenu par le LiDAR	59
3.36	Modèle 3D obtenu par photogrammétrie	60
3.37	Superposition des Modèles 3D obtenu par photogrammétrie et avec le LiDAR	60
3.38	Rails avec les sondes de niveau ajoutées lors de l'essai Qm3	61
3.39	Essai Qm3 : Evolution des niveaux des sondes ajoutées	61
3.40	Dispositif permettant de calibrer les "BedProfiler"	62
3.41	Essai Qm3 : Couche de sciure de bois à la surface	63
4.1	Photos prises lors de l'essai Qm3	66
4.2	Photos prises lors de l'essai Qm3	66
4.3	Photos prises lors de l'essai Qm3	67
4.4	Essai Qm3 : Evolution des masses volumiques humides et sèches	67
4.5	Essai Qm3 : Evolution de la profondeur de la brèche	68
4.6	Essai Qm3 : Evolution de la largeur supérieure de la brèche	69
4.7	Essai Qm3 : Sections en $x = -25cm$	70
4.8	Essai Qm3 : Section en $x = 25cm$	70

4.9	Essai Qm3 : Sections en $x = 75cm$	71
4.10	Essai Qm3 : Evolution du profil longitudinal	71
4.11	Essai Qm3 : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin(Zhyd2 corrigé)	72
4.12	Essai Hf3 : Effet de la recalibration des débitmètres	73
4.13	Photos prises lors de l'essai Hf3	74
4.14	Photos prises lors de l'essai Hf3	74
4.15	Photos prises lors de l'essai Hf3	75
4.16	Essai Hf3 : Evolution des masses volumiques humide et sèche	75
4.17	Essai Hf3 : Evolution de la profondeur de la brèche	76
4.18	Essai Hf3 : Evolution de la largeur supérieure de la brèche	77
4.19	Essai Hf3 : Sections en $x = -25cm$	78
4.20	Essai Hf3 : Section en $x = 25cm$	78
4.21	Essai Hf3 : Sections en $x = 75cm$	79
4.22	Essai Hf3 : Evolution du profil longitudinal	79
4.23	Essai Hf3 : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin(Zhyd2 corrigé)	80
4.24	Essais Qm : Evolution des masses volumiques sèches	81
4.25	Photos prises en $t = 80s$	82
4.26	Photos prises en $t = 120s$	82
4.27	Photos prises en $t = 180s$	83
4.28	Photos prises en $t = 220s$	83
4.29	Essais Qm : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en amont de la crête	84
4.30	Essais Qm : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en aval de la crête	84
4.31	Essais Qm : Evolution de la hauteur du fond de la brèche sur la pente aval	85
4.32	Essais Qm : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête	86
4.33	Essais Qm : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en aval de la crête	86
4.34	Essais Qm : Evolution de la largeur supérieure de la brèche sur la pente aval	86
4.35	Essais Qm : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et du la hauteur d'eau dans le bassin	87
4.36	Essais Qf : Evolution des masses volumiques sèches	89
4.37	Photos prises en $t = 80s$	90

4.38	Photos prises en $t = 120s$	90
4.39	Photos prises en $t = 180s$	91
4.40	Photos prises en $t = 220s$	92
4.41	Essais Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en amont de la crête	93
4.42	Essais Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en aval de la crête	93
4.43	Essais Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche sur la pente aval	94
4.44	Essais Qf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête	95
4.45	Essais Qf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en aval de la crête	95
4.46	Essais Qf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche sur la pente aval	95
4.47	Essais Qf : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin . .	96
4.48	Essais Hf : Evolution des masses volumiques sèches	98
4.49	Photos prises en $t = 80s$	98
4.50	Photos prises en $t = 120s$	99
4.51	Photos prises en $t = 180s$	99
4.52	Photos prises en $t = 220s$	100
4.53	Essais Hf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en amont de la crête	100
4.54	Essais Hf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en aval de la crête	101
4.55	Essais Hf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche sur la pente aval	101
4.56	Essais Hf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête	102
4.57	Essais Hf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en aval de la crête	103
4.58	Essais Hf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche sur la pente aval	103
4.59	Essais Hf : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin . .	104
4.60	Essais Qm et Qf : Evolution des masses volumiques sèches moyennes	106
4.61	Photos prises en $t = 80s$	107
4.62	Photos prises en $t = 120s$	107
4.63	Photos prises en $t = 180s$	108

4.64	Photos prises en $t = 220s$	109
4.65	Essais Qm et Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en amont de la crête	110
4.66	Essais Qm et Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en aval de la crête	110
4.67	Essais Qm et Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche sur la pente aval	111
4.68	Essais Qm et Qf : Evolution de la largeur supérieure moyenne de la brèche en amont de la crête	112
4.69	Essais Qm et Qf : Evolution de la largeur supérieure moyenne de la brèche en aval de la crête	112
4.70	Essais Qm et Qf : Evolution de la largeur supérieure moyenne de la brèche sur la pente aval	113
4.71	Essais Qm et Qf : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin	114
4.72	Essais Hf et Qf : Evolution des masses volumiques sèches moyennes	116
4.73	Photos prises en $t = 80s$	117
4.74	Photos prises en $t = 120s$	117
4.75	Photos prises en $t = 180s$	118
4.76	Photos prises en $t = 220s$	119
4.77	Essais Hf et Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en amont de la crête	120
4.78	Essais Hf et Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en aval de la crête	120
4.79	Essais Hf et Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche sur la pente aval	121
4.80	Essais Hf et Qf : Evolution de la largeur supérieure moyenne de la brèche en amont de la crête	122
4.81	Essais Hf et Qf : Evolution de la largeur supérieure moyenne de la brèche en aval de la crête	122
4.82	Essais Hf et Qf : Evolution de la largeur supérieure moyenne de la brèche sur la pente aval	123
4.83	Essais Hf et Qf : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin	124
5.1	Images de l'écoulement utilisées pour l'analyse PIV	128
5.2	Sections en $t = 60s$, $t = 120s$ et $t = 180s$	129
5.3	Evolution du débit à travers la brèche en fonction du nombre d'images utilisées	132
5.4	Evolution de la vitesse de l'écoulement pour Qm1 et Qf4	133
5.5	Essai Qm1 : Champs de vecteurs de vitesse dans l'écoulement	134

5.6	Essai Qf4 : Champs de vecteurs de vitesse dans l'écoulement	134
5.7	Evolution du débit à travers la brèche obtenu par DaVis	136
5.8	Essai Qm1 : Comparaison des évolutions du débit à travers la brèche	137
5.9	Essai Qf4 : Comparaison des évolutions du débit à travers la brèche	138
7.1	Essai Qm3 : Evolution de la profondeur de la brèche	158
7.2	Essai Qm3 : Evolution de la largeur supérieure de la brèche	159
7.3	Essai Qm3 : Sections en $x = -25cm$	159
7.4	Essai Qm3 : Section en $x = 25cm$	160
7.5	Essai Qm3 : Sections en $x = 75cm$	160
7.6	Essai Qm3 : Evolution du profil longitudinal	161
7.7	Essai Qm3 : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin(Zhyd2 corrigé)	161
7.8	Essai Hf3 : Evolution de la profondeur de la brèche	162
7.9	Essai Hf3 : Evolution de la largeur supérieure de la brèche	163
7.10	Essai Hf3 : Sections en $x = -25cm$	163
7.11	Essai Hf3 : Section en $x = 25cm$	164
7.12	Essai Hf3 : Sections en $x = 75cm$	164
7.13	Essai Hf3 : Evolution du profil longitudinal	165
7.14	Essai Hf3 : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin(Zhyd2 corrigé)	165
7.15	Essais Qm : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en amont de la crête	166
7.16	Essais Qm : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en aval de la crête	166
7.17	Essais Qm : Evolution de la hauteur du fond de la brèche sur la pente aval	167
7.18	Essais Qm : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête	167
7.19	Essais Qm : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en aval de la crête	168
7.20	Essais Qm : Evolution de la largeur supérieure de la brèche sur la pente aval	168
7.21	Essais Qm : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin . .	169
7.22	Essais Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en amont de la crête	169
7.23	Essais Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en aval de la crête	170

7.24	Essais Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche sur la pente aval	170
7.25	Essais Qf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête	171
7.26	Essais Qf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en aval de la crête	171
7.27	Essais Qf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche sur la pente aval	172
7.28	Essais Qf : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin . .	172
7.29	Essais Hf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en amont de la crête	173
7.30	Essais Hf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en aval de la crête	173
7.31	Essais Hf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche sur la pente aval	174
7.32	Essais Hf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête	174
7.33	Essais Hf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en aval de la crête	175
7.34	Essais Hf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche sur la pente aval	175
7.35	Essais Hf : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin . .	176
7.36	Sections en $t = 60s$, $t = 120s$ et $t = 180s$	176
7.37	Evolution du débit à travers la brèche en fonction du nombre d'images utilisées	177
7.38	Evolution de la vitesse de l'écoulement pour Qm1 et Qf4	177
7.39	Evolution du débit à travers la brèche obtenu par DaVis	178
7.40	Essai Qm1 : Comparaison des évolutions du débit à travers la brèche	178
7.41	Essai Qf4 : Comparaison des évolutions du débit à travers la brèche	179

Liste des tableaux

1.1	Récapitulatif des essais valides	16
3.1	Récapitulatif des essais valides	40
4.1	Récapitulatif des essais Q_m	81
4.2	Récapitulatif des vitesses d'érosion verticale des essais Q_m	85
4.3	Récapitulatif des vitesses d'érosion latérale des essais Q_m	87
4.4	Récapitulatif des essais valides	88
4.5	Récapitulatif des vitesses d'érosion verticale des essais Q_f	94
4.6	Récapitulatif des vitesses d'érosion latérale des essais Q_f	96
4.7	Récapitulatif des essais H_f	97
4.8	Récapitulatif des vitesses d'érosion verticale des essais H_f	102
4.9	Récapitulatif des vitesses d'érosion latérale des essais H_f	104
4.10	Récapitulatif des moyennes des vitesses d'érosion verticale des essais Q_m et Q_f	111
4.11	Récapitulatif des moyennes des vitesses d'érosion latérale des essais Q_m et Q_f	113
4.12	Récapitulatif des moyennes des vitesses d'érosion verticale des essais H_f et Q_f	121
4.13	Récapitulatif des moyennes des vitesses d'érosion latérale des essais H_f et Q_f	123
5.1	Récapitulatif des sections de l'écoulement pour PIV	129

Chapitre 7

Annexes

7.1 Données de l'essai Qm3

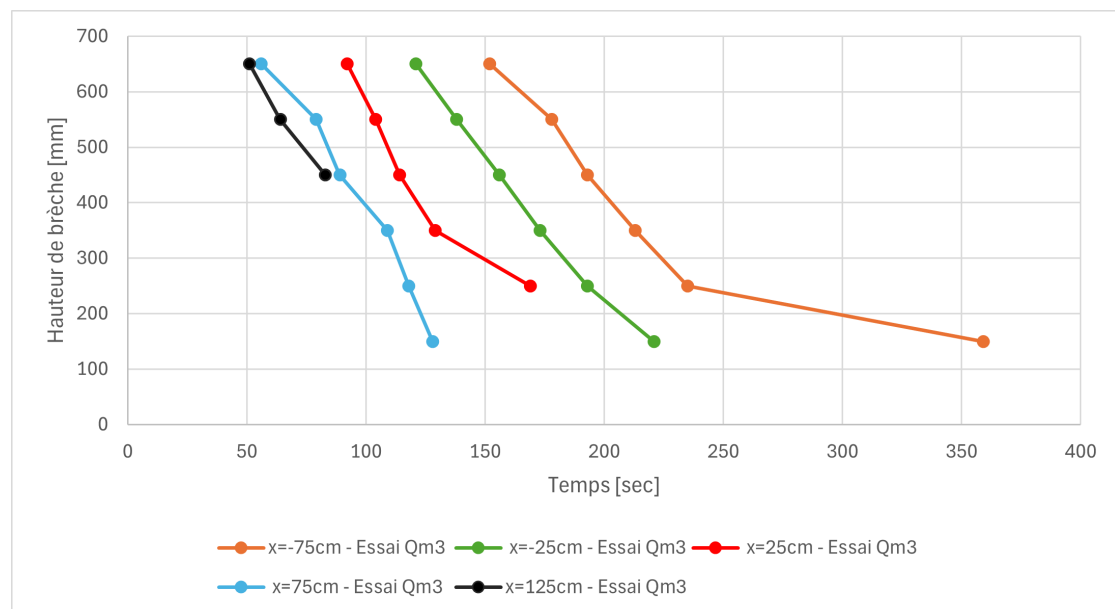


FIGURE 7.1 – Essai Qm3 : Evolution de la profondeur de la brèche

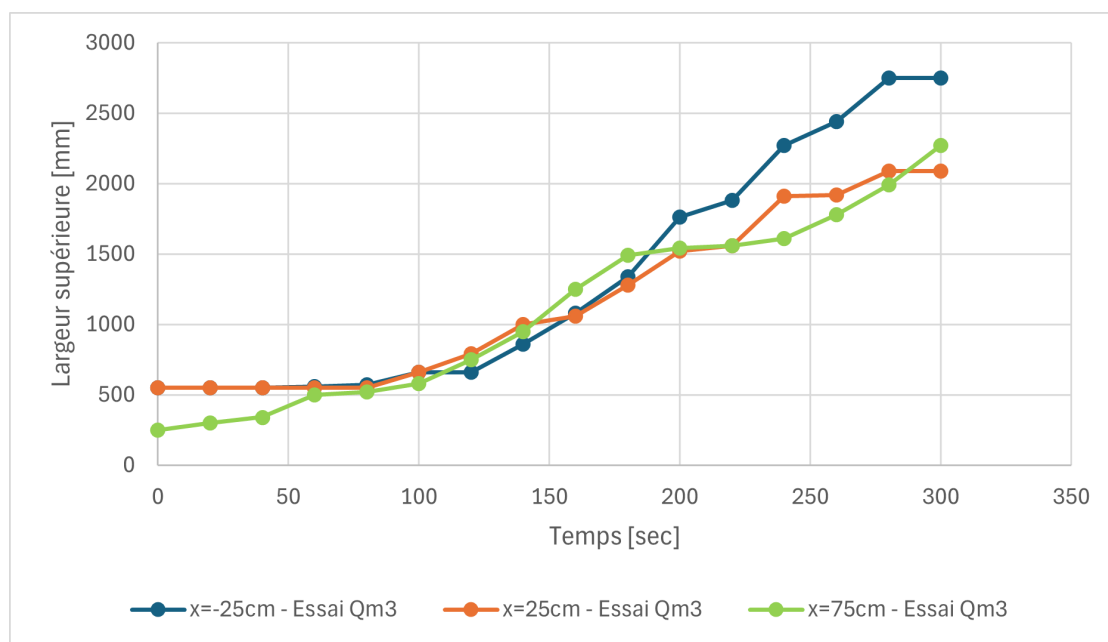


FIGURE 7.2 – Essai Qm3 : Evolution de la largeur supérieure de la brèche

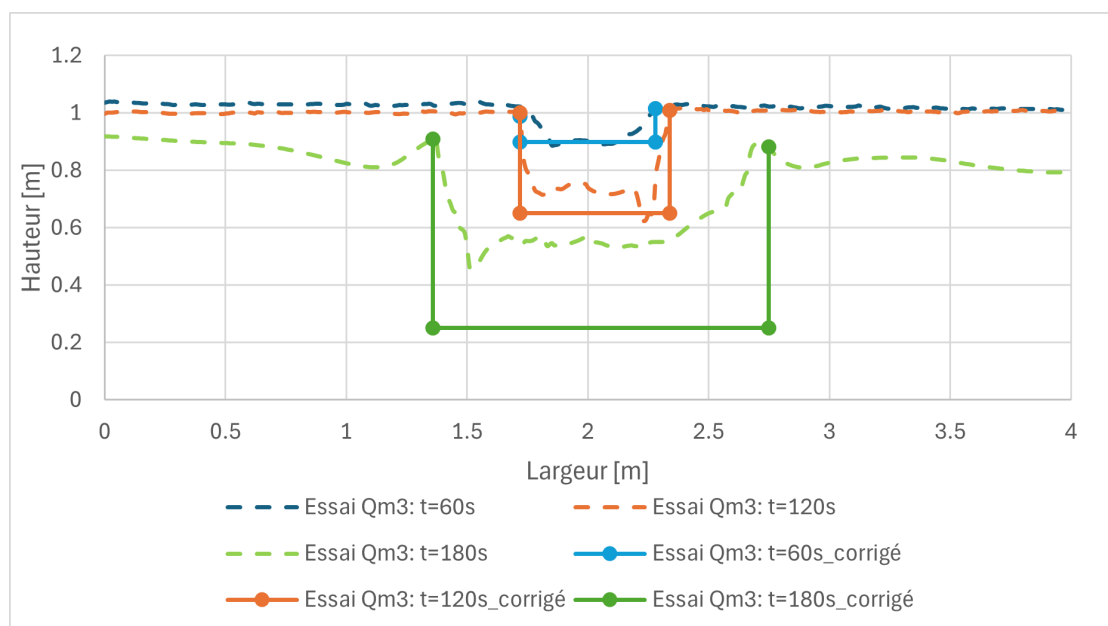


FIGURE 7.3 – Essai Qm3 : Sections en $x = -25\text{cm}$

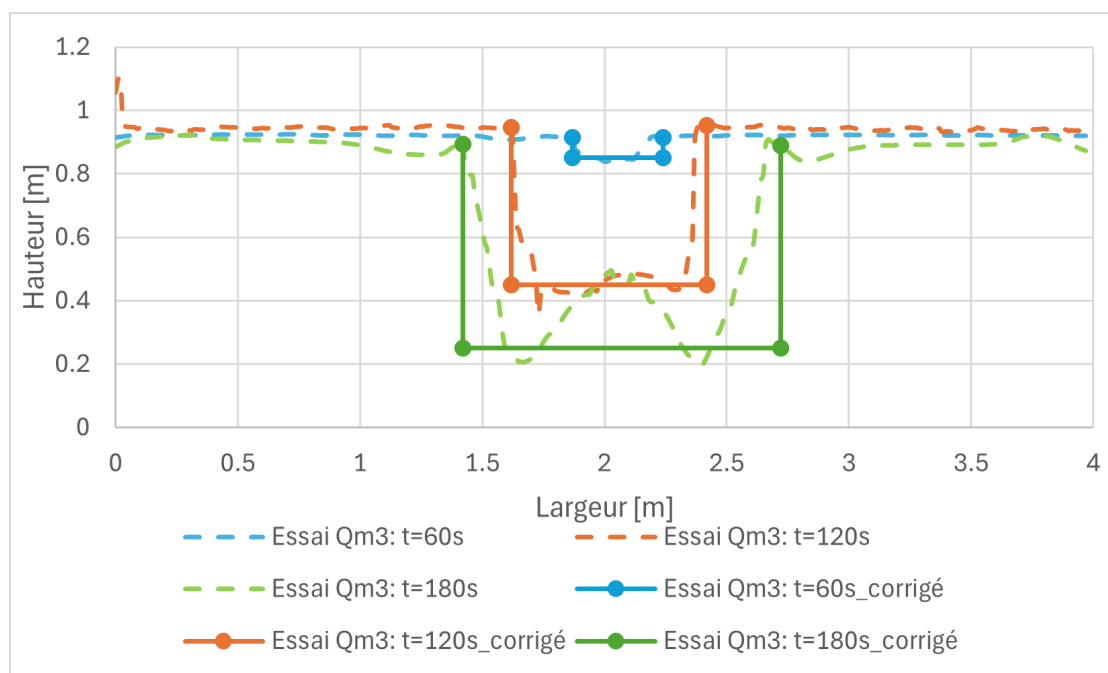


FIGURE 7.4 – Essai Qm3 : Section en $x = 25\text{ cm}$

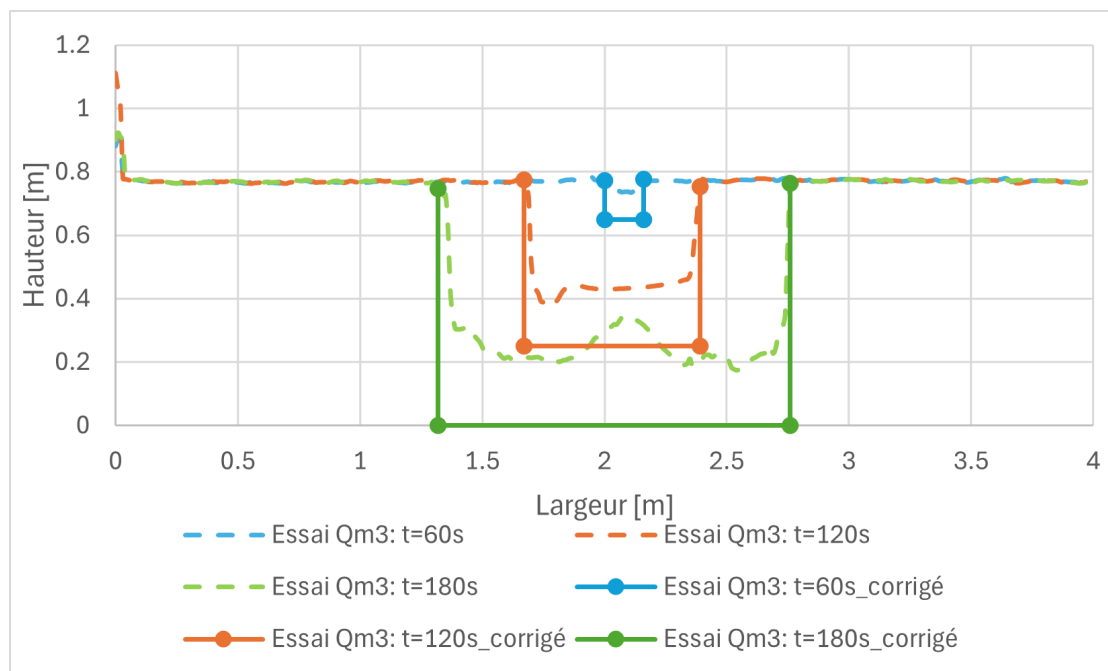


FIGURE 7.5 – Essai Qm3 : Sections en $x = 75\text{ cm}$

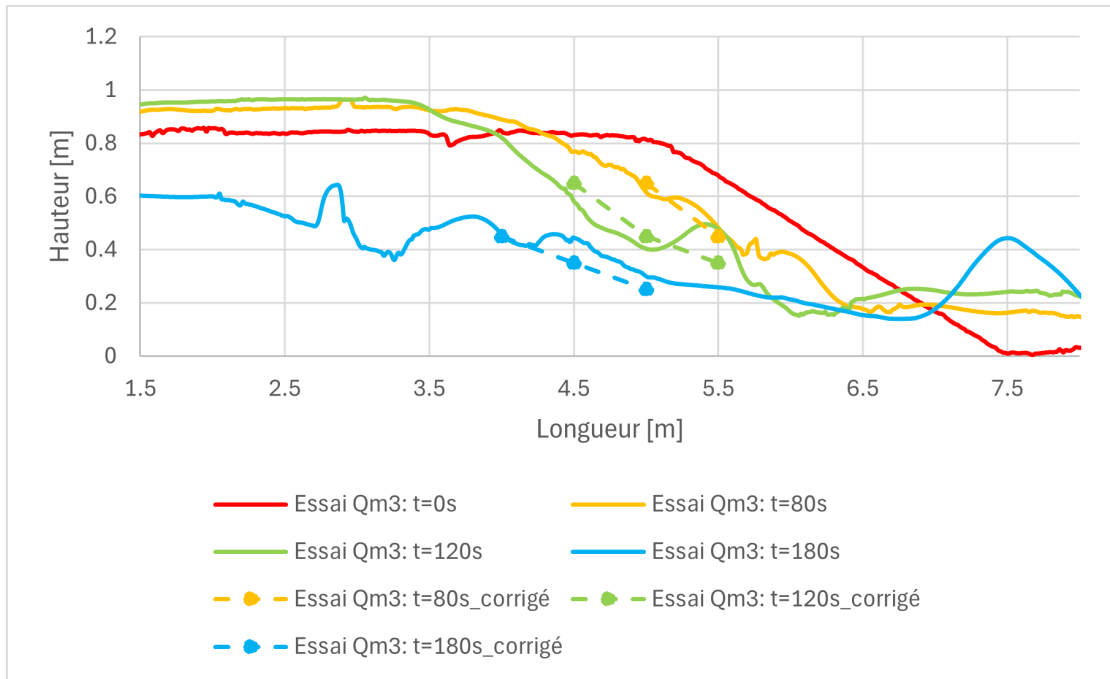


FIGURE 7.6 – Essai Qm3 : Evolution du profil longitudinal

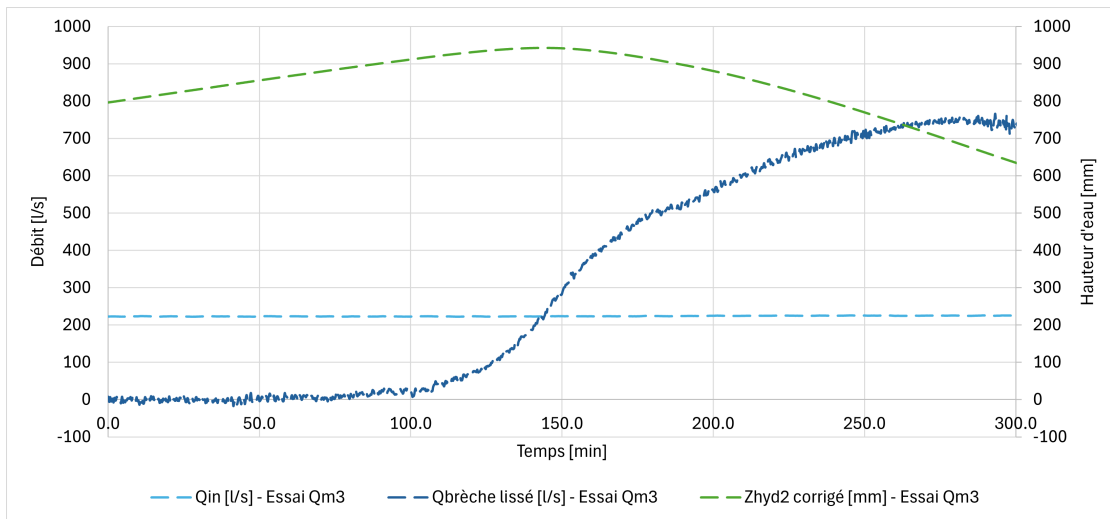


FIGURE 7.7 – Essai Qm3 : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd2} corrigé)

7.2 Données de l'essai Hf3

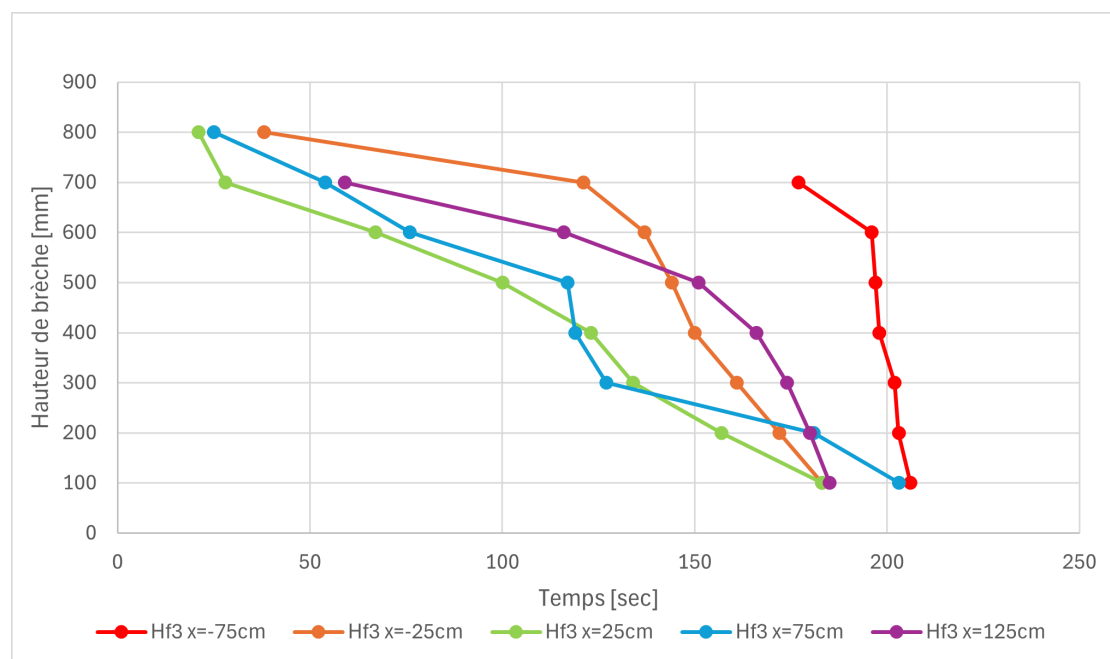


FIGURE 7.8 – Essai Hf3 : Evolution de la profondeur de la brèche

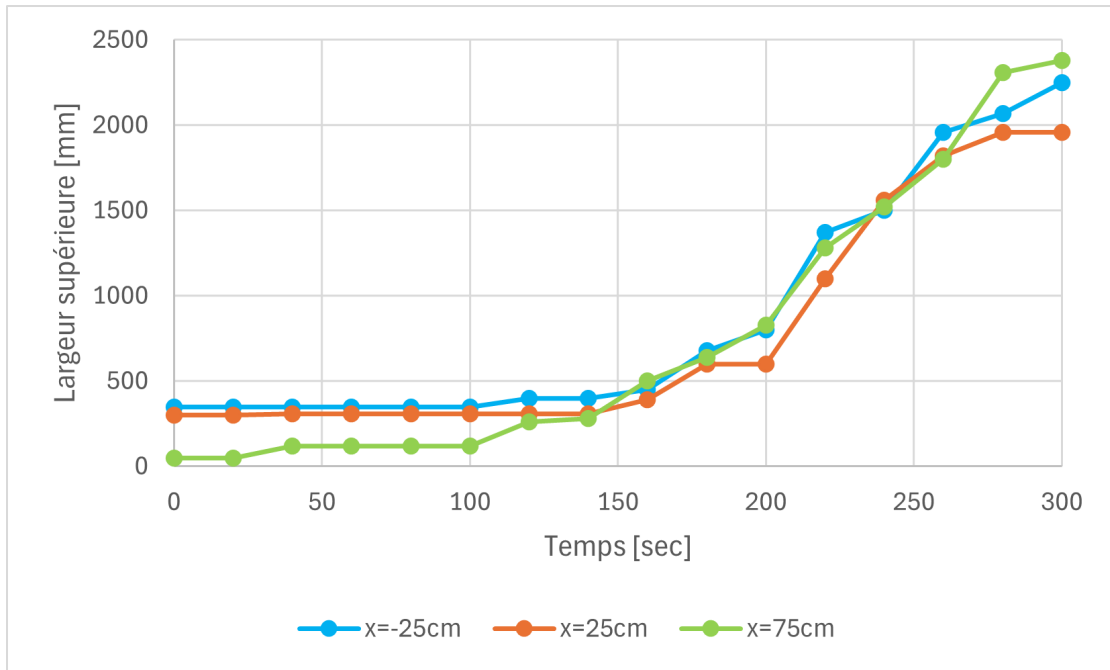


FIGURE 7.9 – Essai Hf3 : Evolution de la largeur supérieure de la brèche

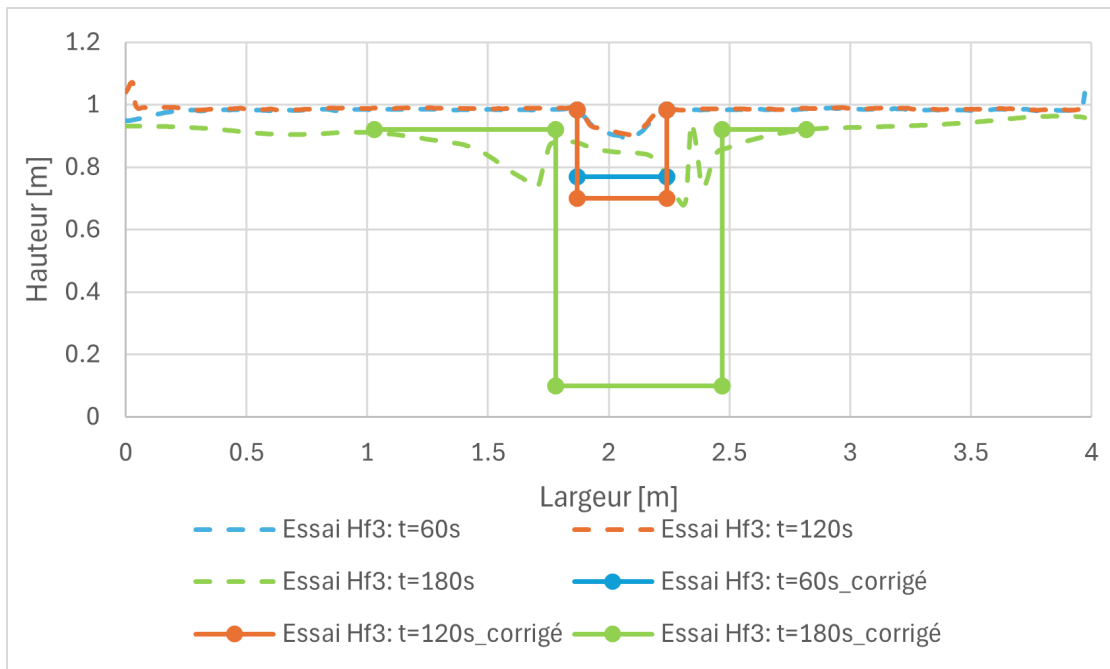


FIGURE 7.10 – Essai Hf3 : Sections en $x = -25\text{cm}$

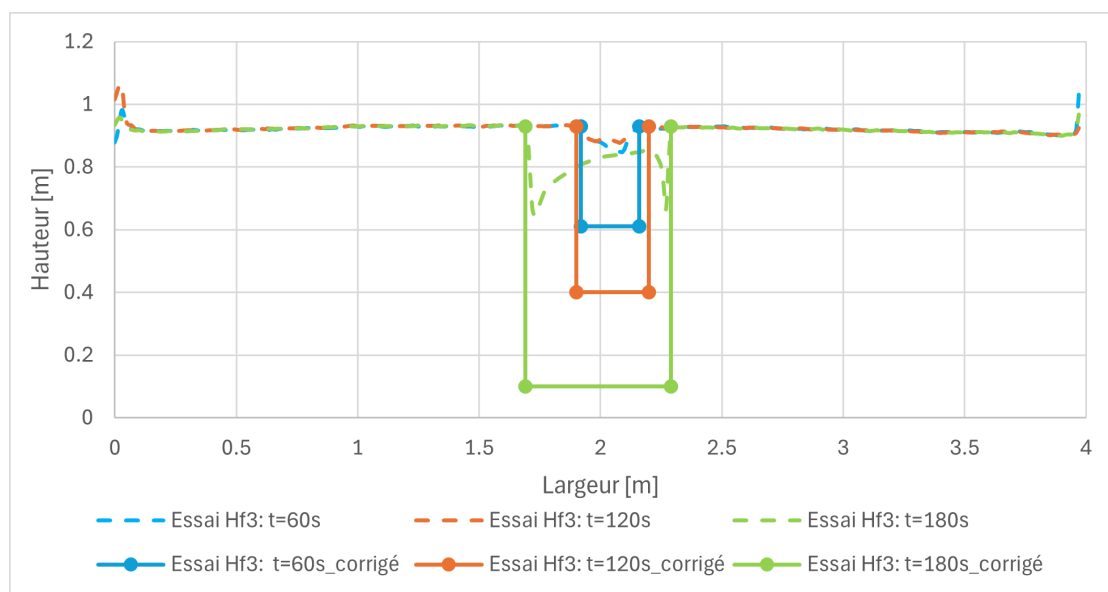


FIGURE 7.11 – Essai Hf3 : Section en $x = 25cm$

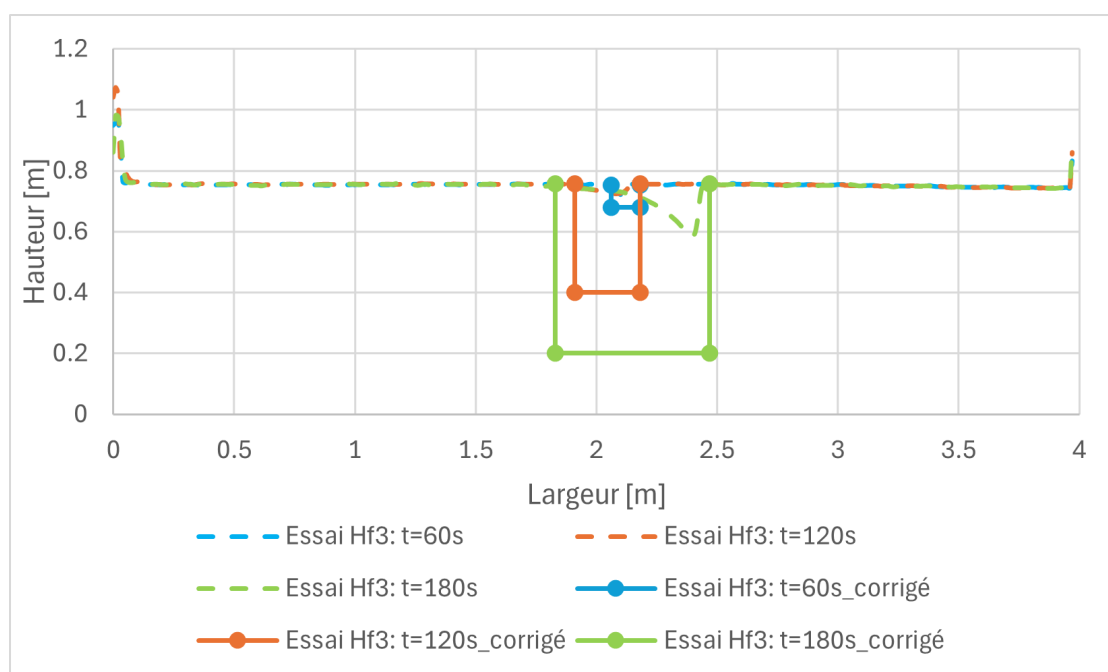


FIGURE 7.12 – Essai Hf3 : Sections en $x = 75cm$

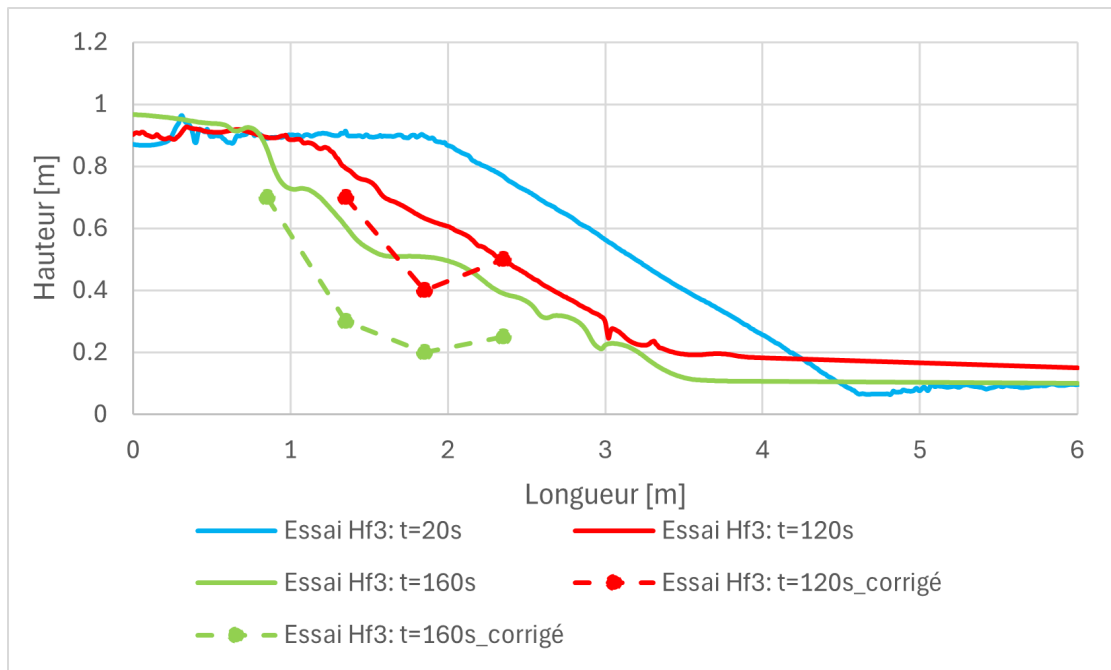


FIGURE 7.13 – Essai Hf3 : Evolution du profil longitudinal

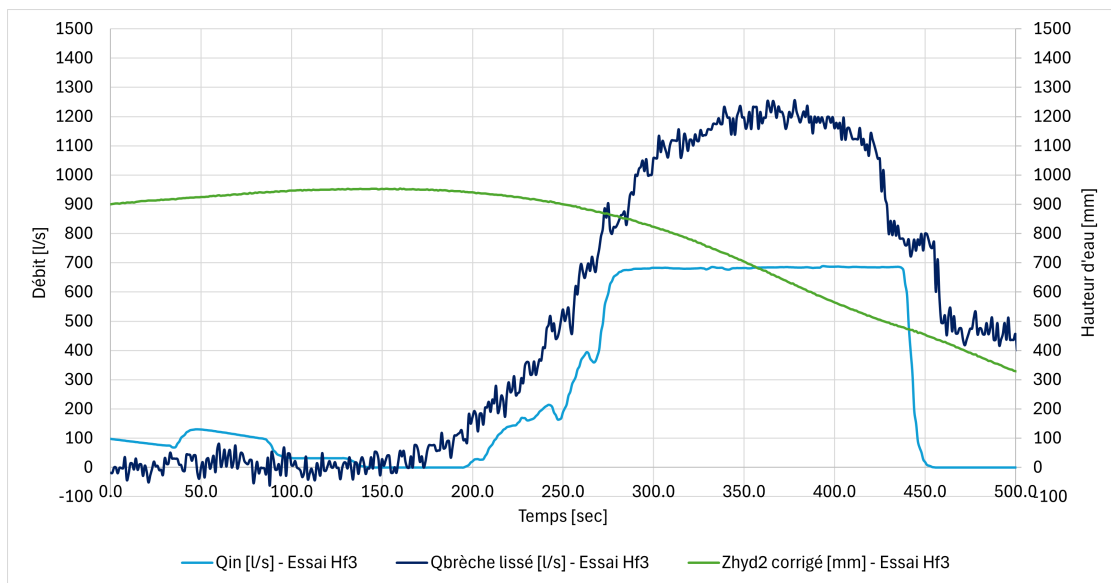


FIGURE 7.14 – Essai Hf3 : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd2} corrigé)

7.3 Comparaison des essais Qm

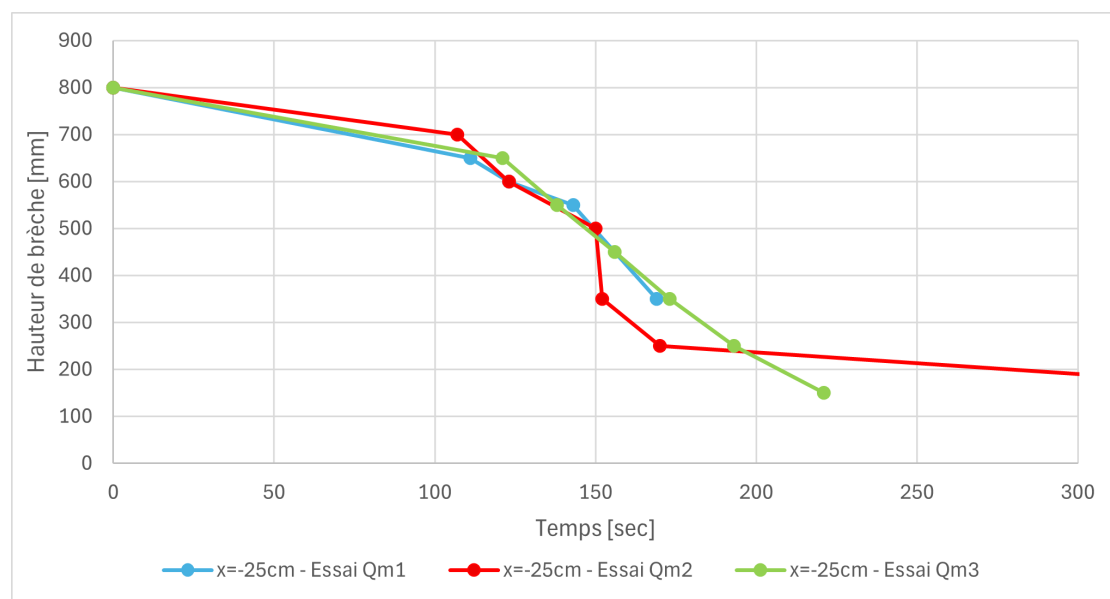


FIGURE 7.15 – Essais Qm : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en amont de la crête

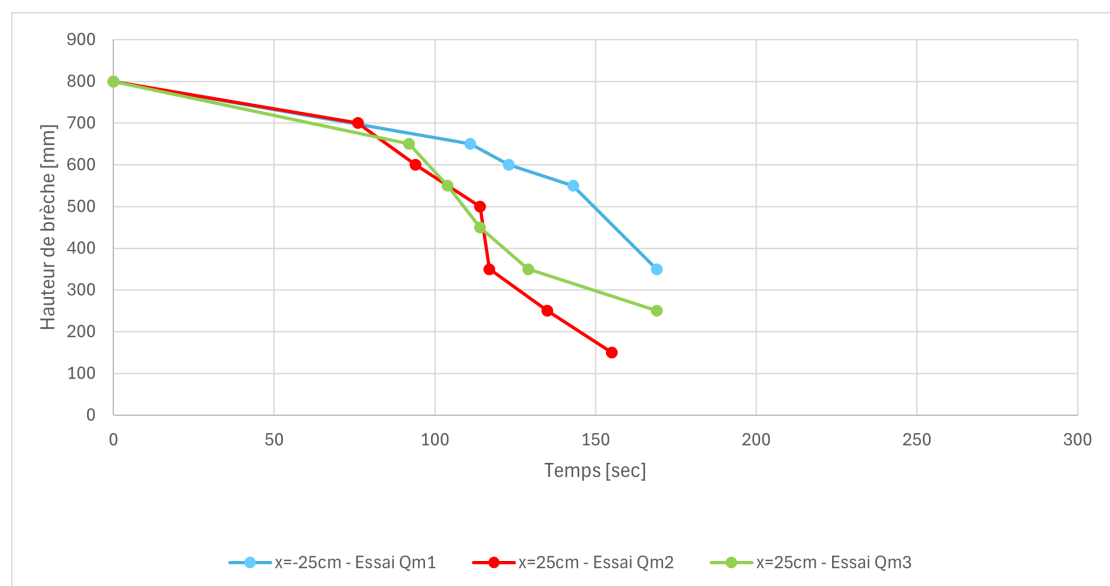


FIGURE 7.16 – Essais Qm : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en aval de la crête

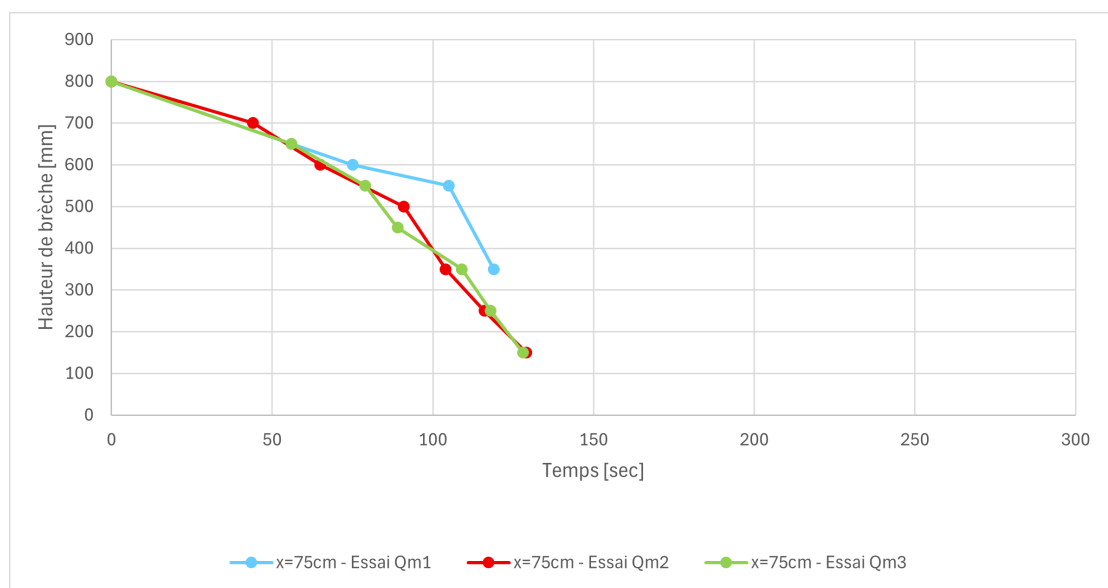


FIGURE 7.17 – Essais Qm : Evolution de la hauteur du fond de la brèche sur la pente aval

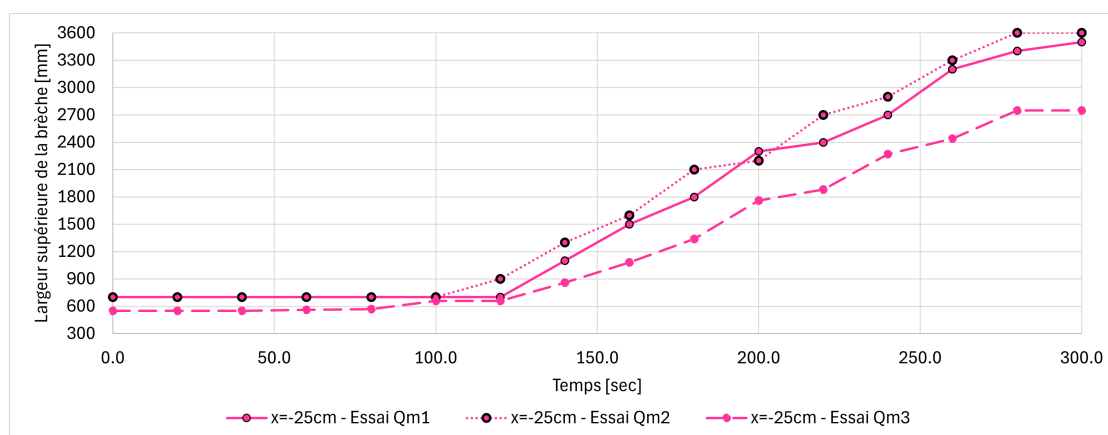


FIGURE 7.18 – Essais Qm : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête

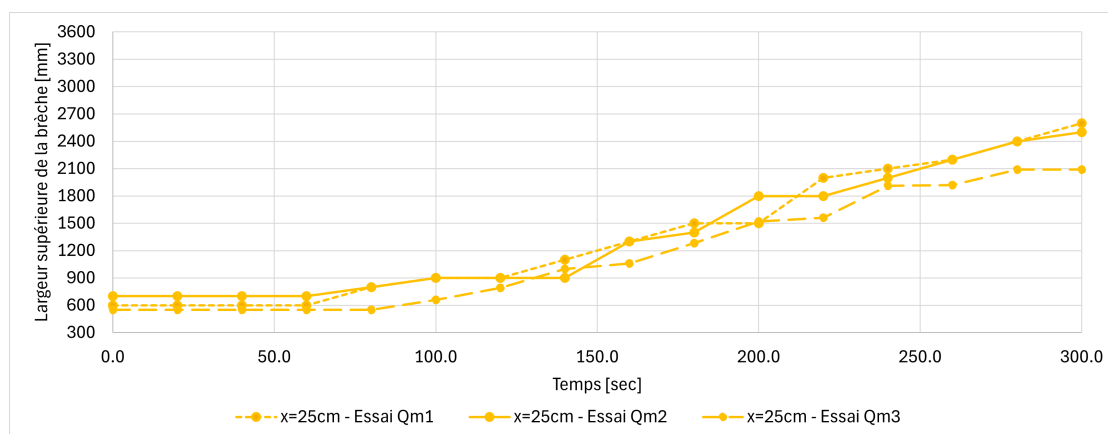


FIGURE 7.19 – Essais Qm : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en aval de la crête

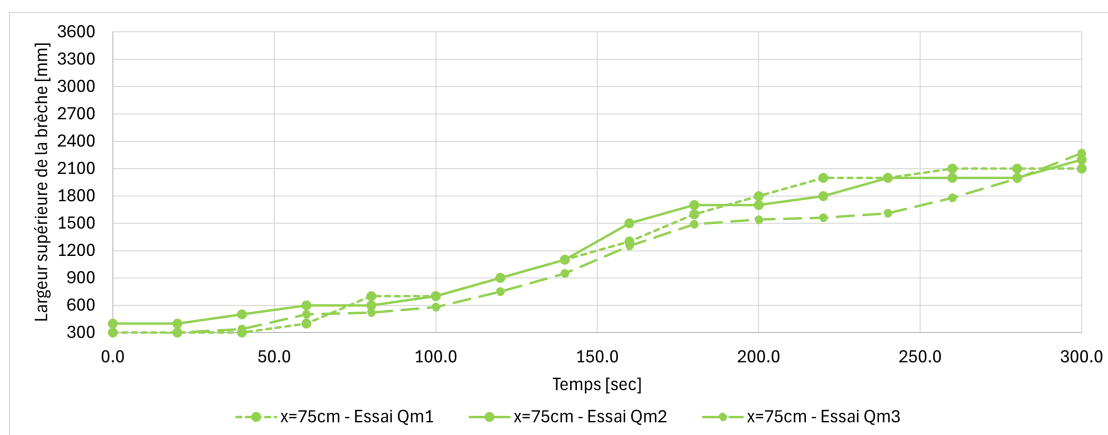


FIGURE 7.20 – Essais Qm : Evolution de la largeur supérieure de la brèche sur la pente aval

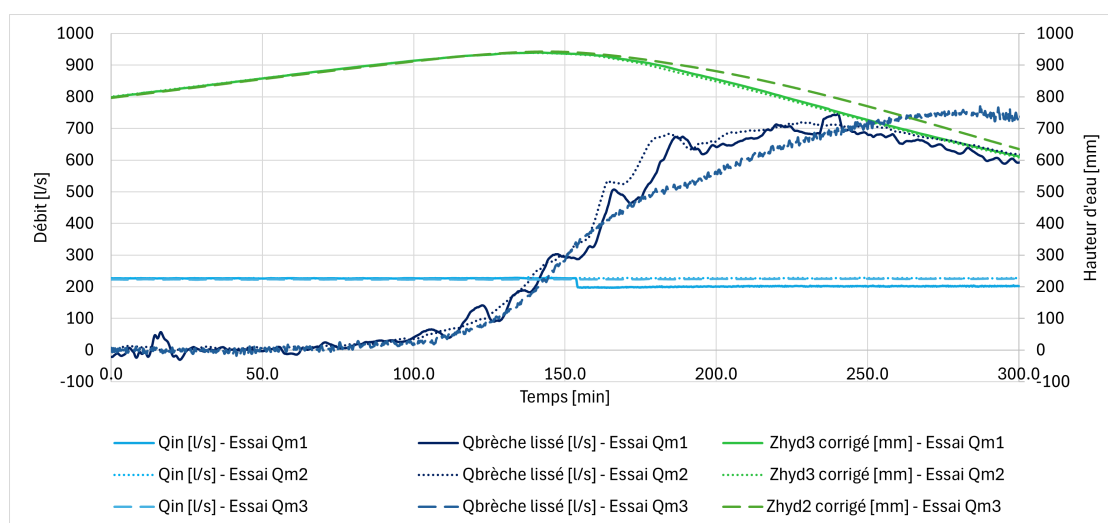


FIGURE 7.21 – Essais Qm : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin

7.4 Comparaison des essais Qf

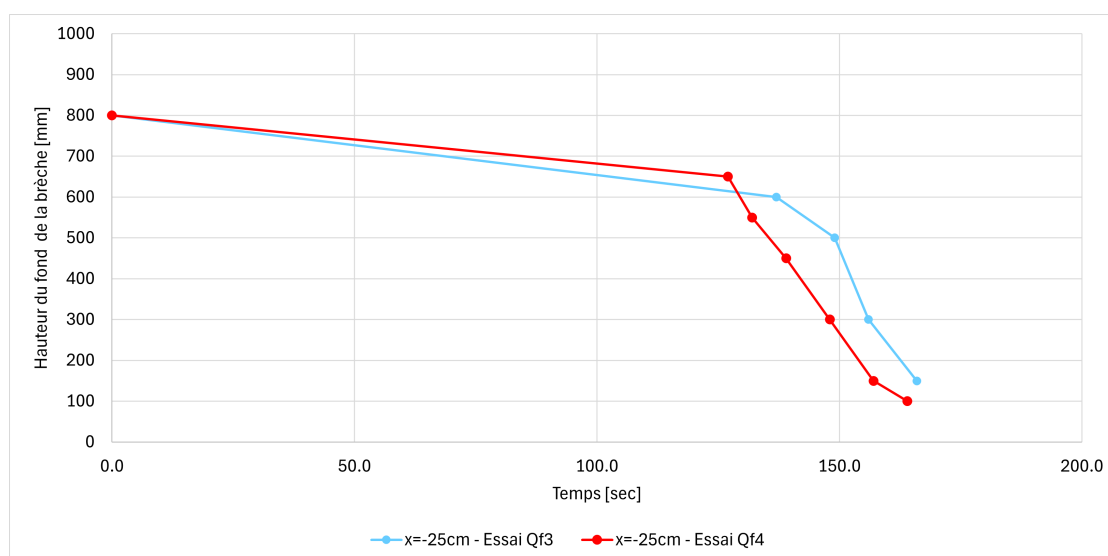


FIGURE 7.22 – Essais Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en amont de la crête

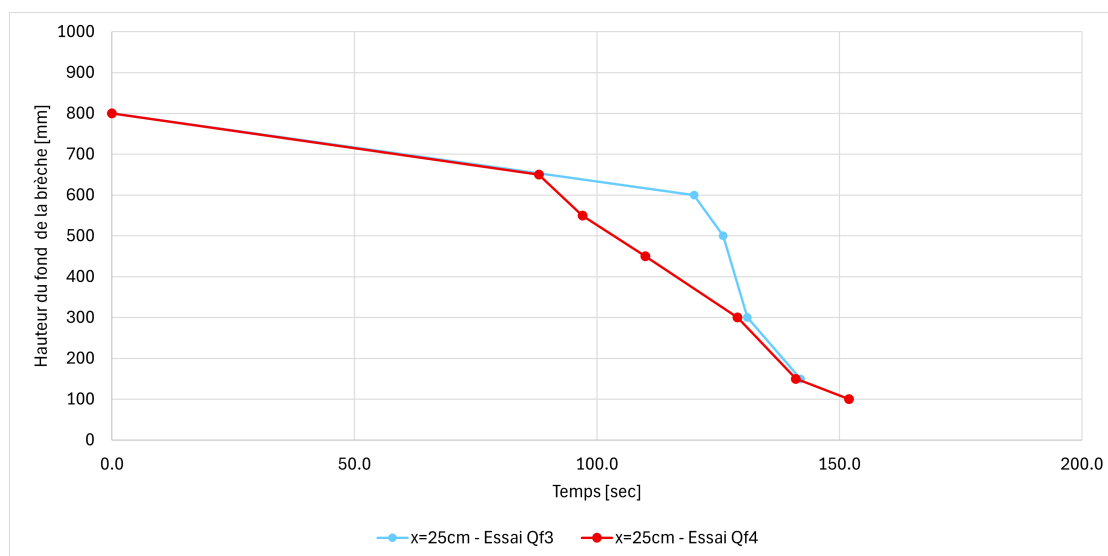


FIGURE 7.23 – Essais Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en aval de la crête

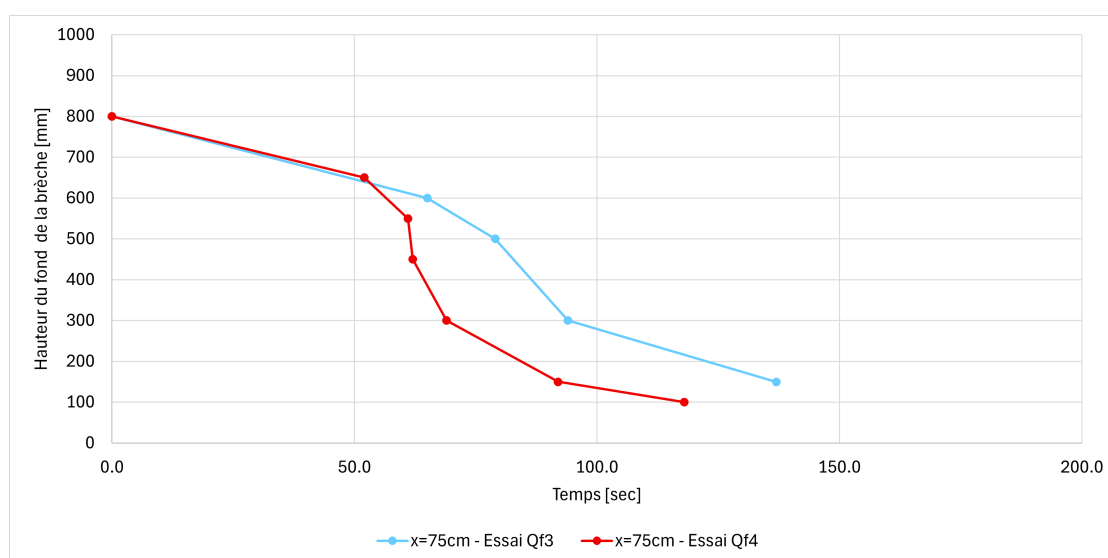


FIGURE 7.24 – Essais Qf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche sur la pente aval

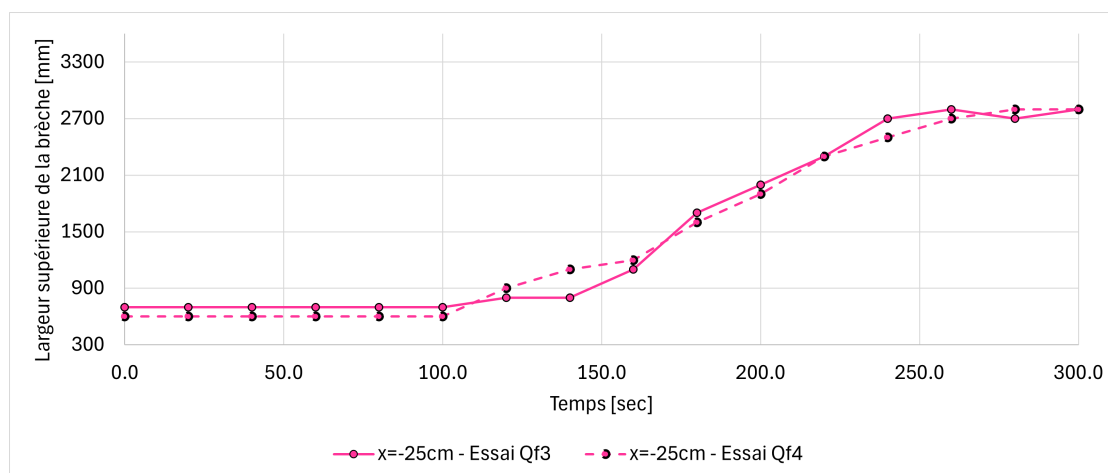


FIGURE 7.25 – Essais Qf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête

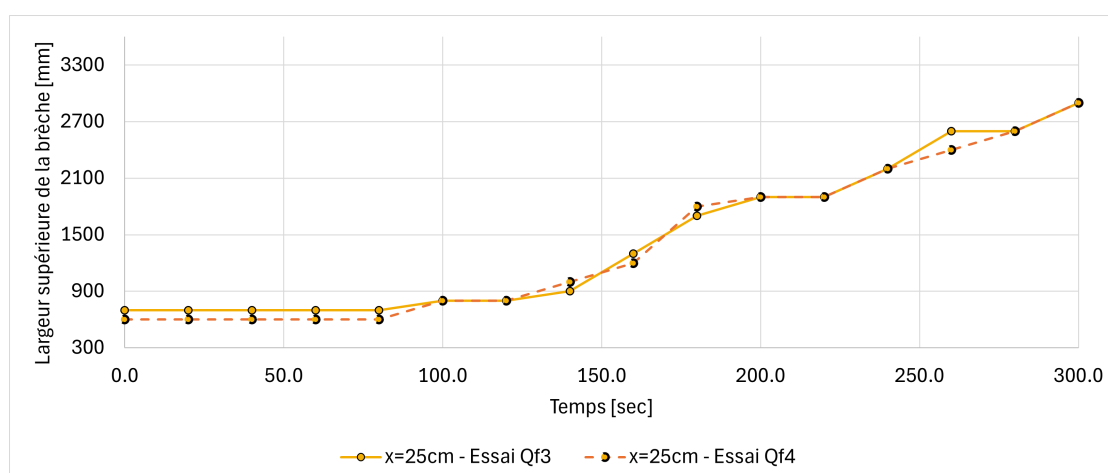


FIGURE 7.26 – Essais Qf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en aval de la crête

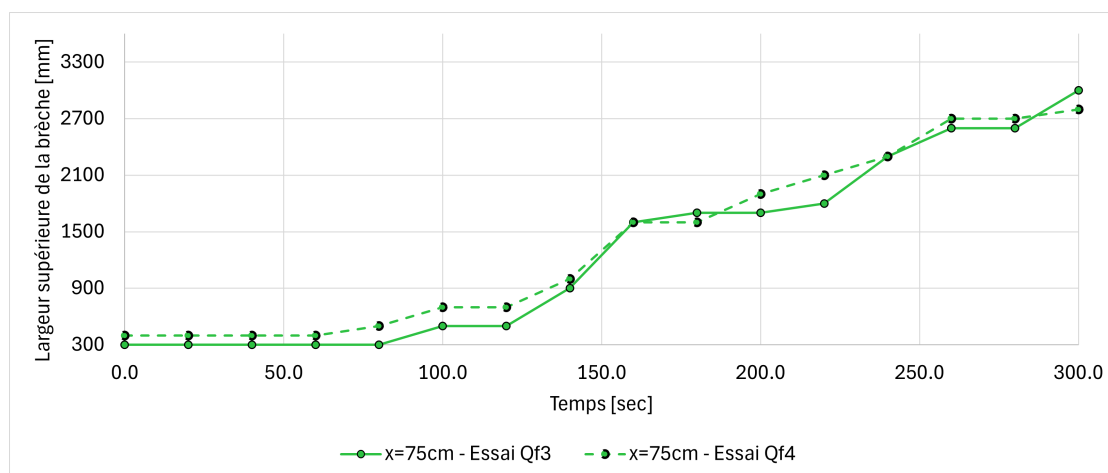


FIGURE 7.27 – Essais Qf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche sur la pente aval

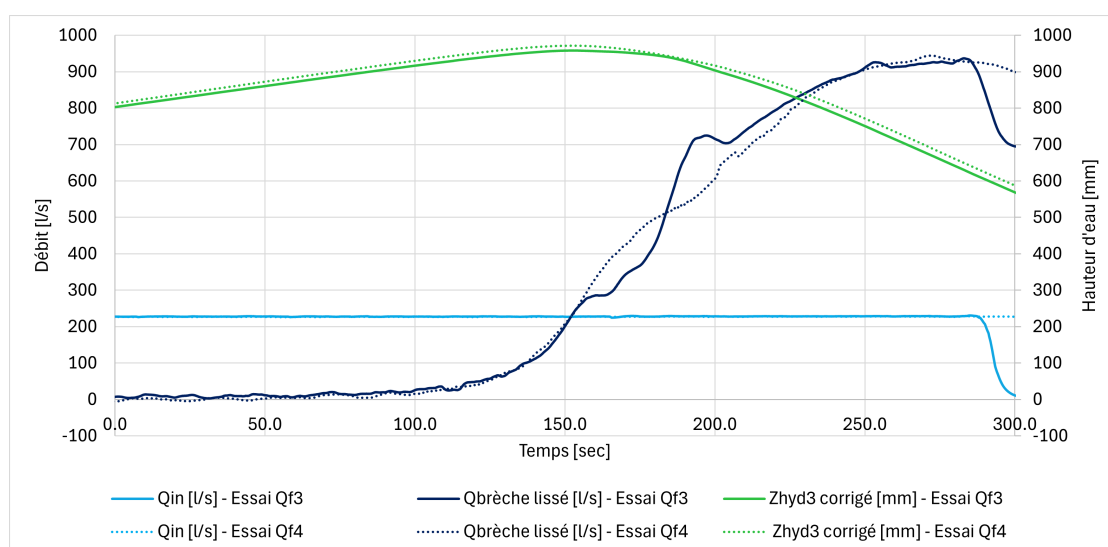


FIGURE 7.28 – Essais Qf : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin

7.5 Comparaison des essais Hf

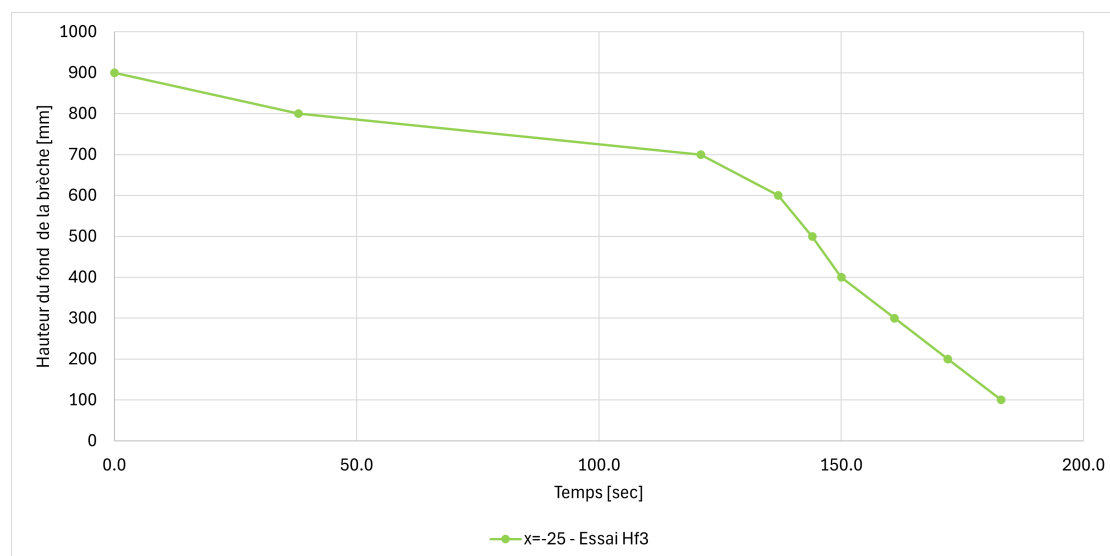


FIGURE 7.29 – Essais Hf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en amont de la crête

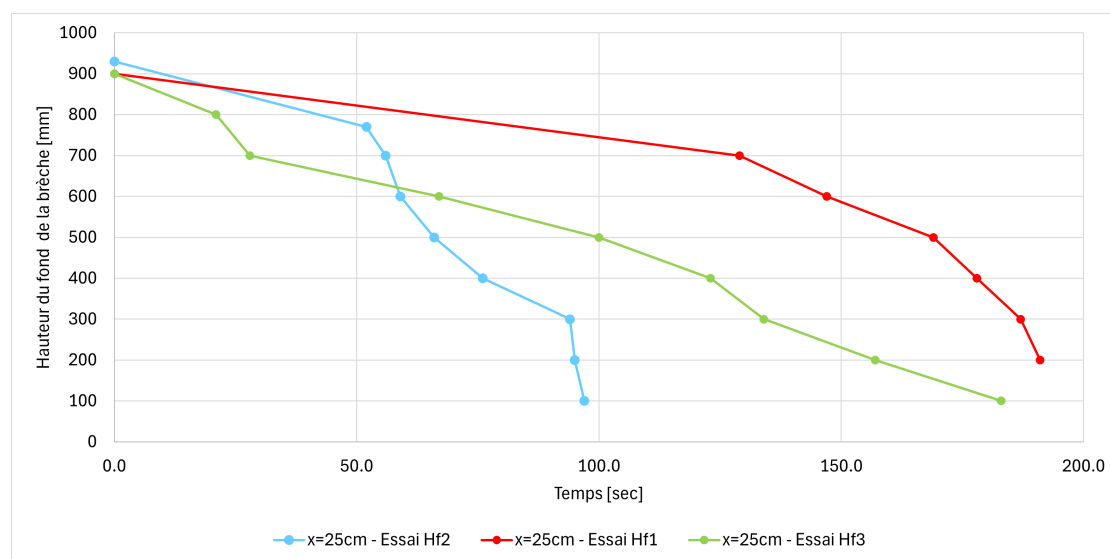


FIGURE 7.30 – Essais Hf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche en aval de la crête

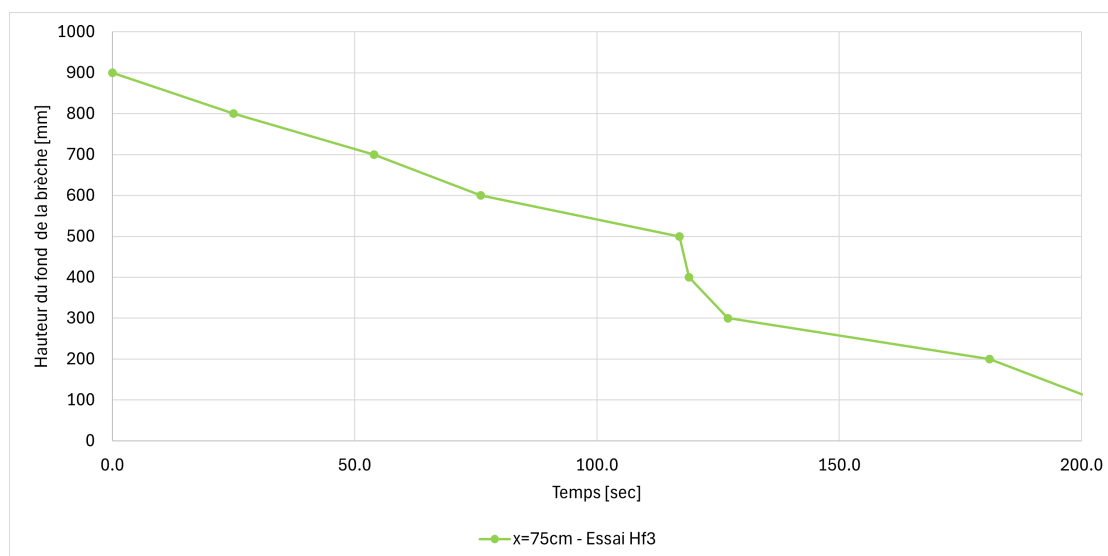


FIGURE 7.31 – Essais Hf : Evolution de la hauteur du fond de la brèche sur la pente aval

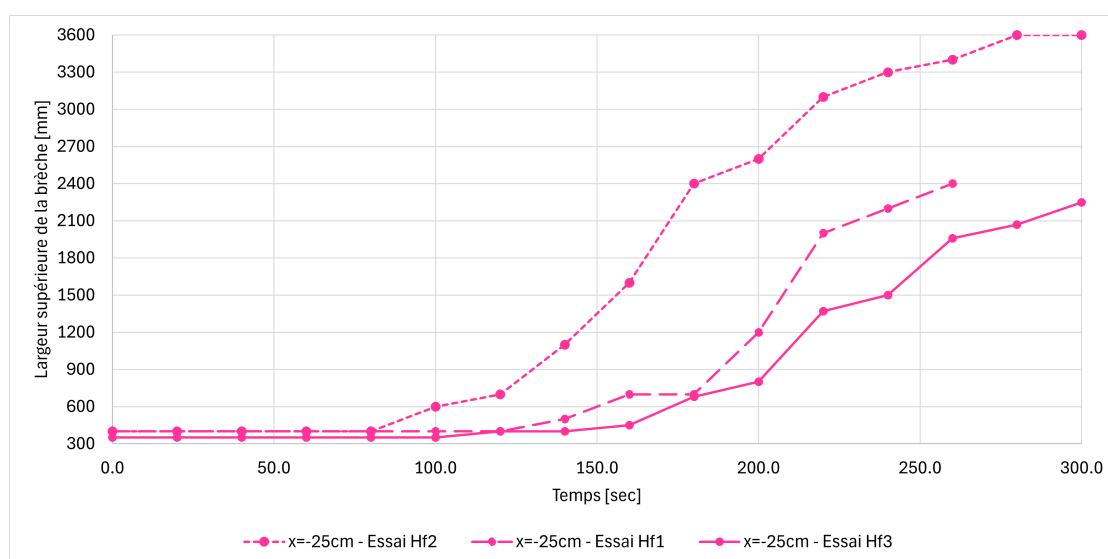


FIGURE 7.32 – Essais Hf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête

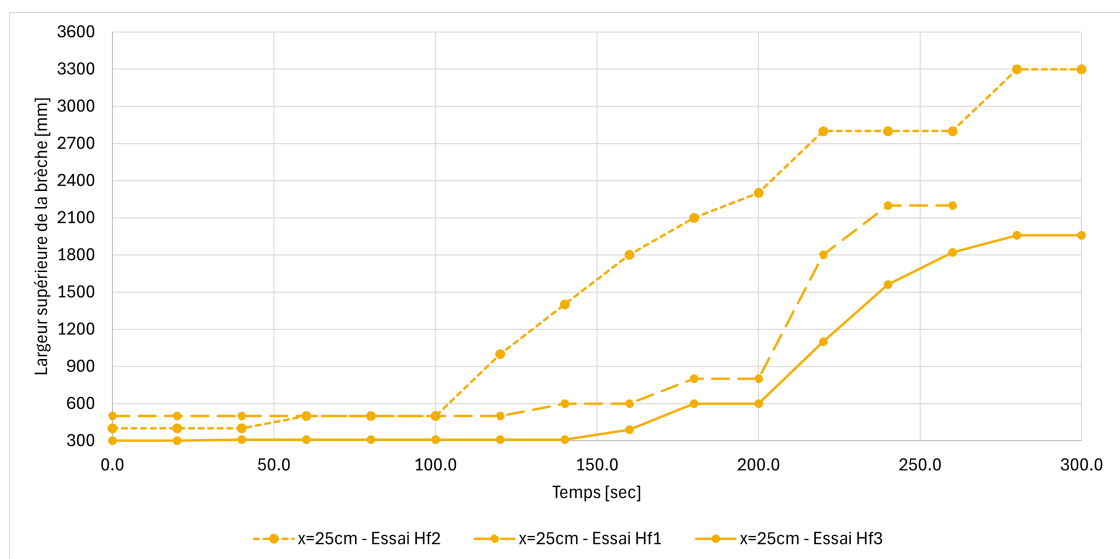


FIGURE 7.33 – Essais Hf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche en aval de la crête

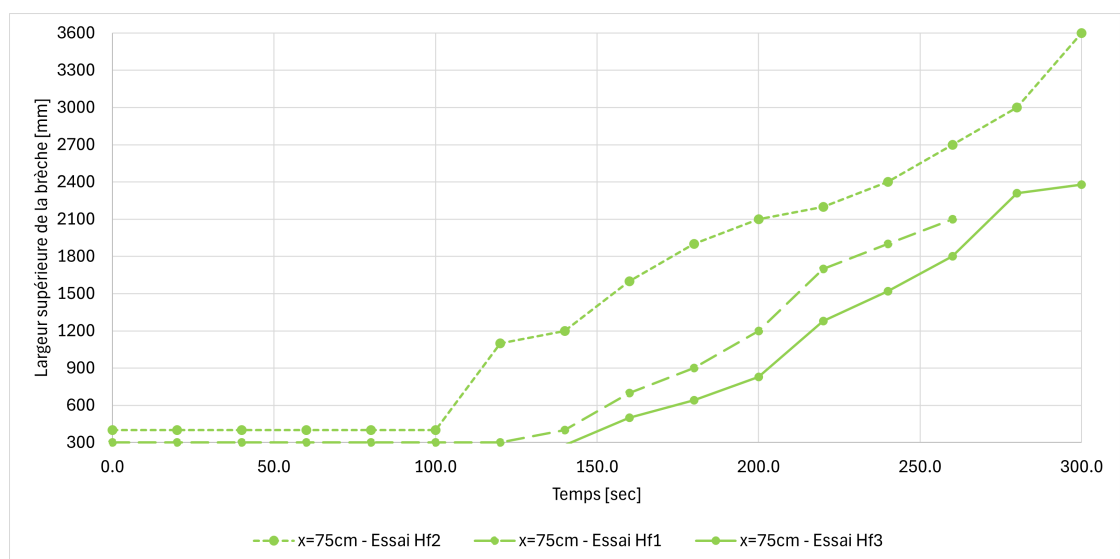


FIGURE 7.34 – Essais Hf : Evolution de la largeur supérieure de la brèche sur la pente aval

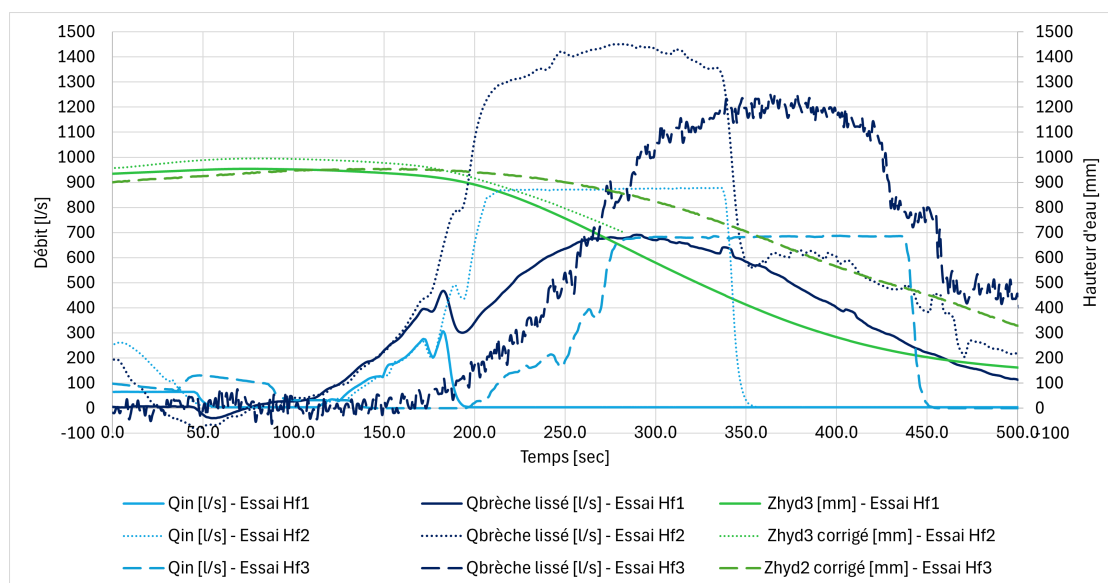
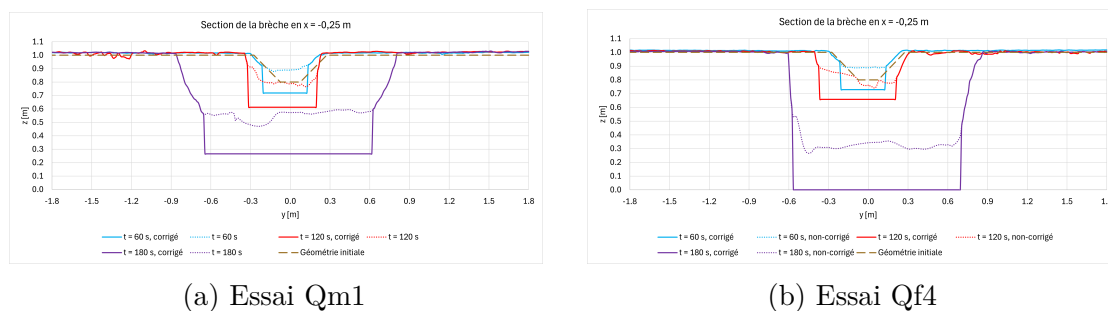


FIGURE 7.35 – Essais Hf : Evolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit à travers la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin

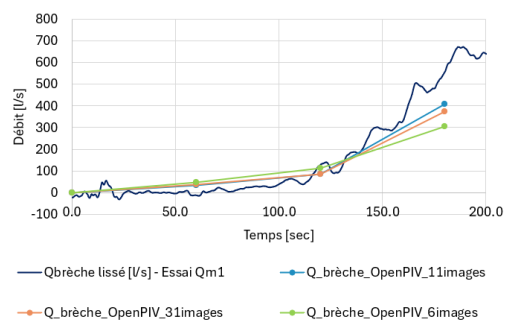
7.6 Données des méthodes PIV



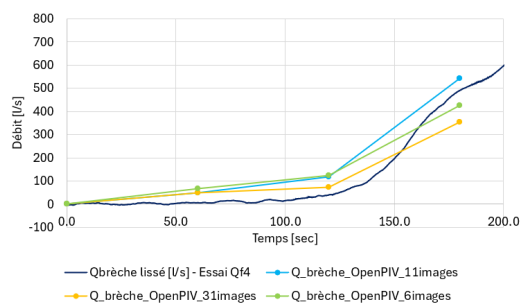
(a) Essai Qm1

(b) Essai Qf4

FIGURE 7.36 – Sections en $t = 60s$, $t = 120s$ et $t = 180s$



(a) Essai Qm1



(b) Essai Qf4

FIGURE 7.37 – Evolution du débit à travers la brèche en fonction du nombre d'images utilisées

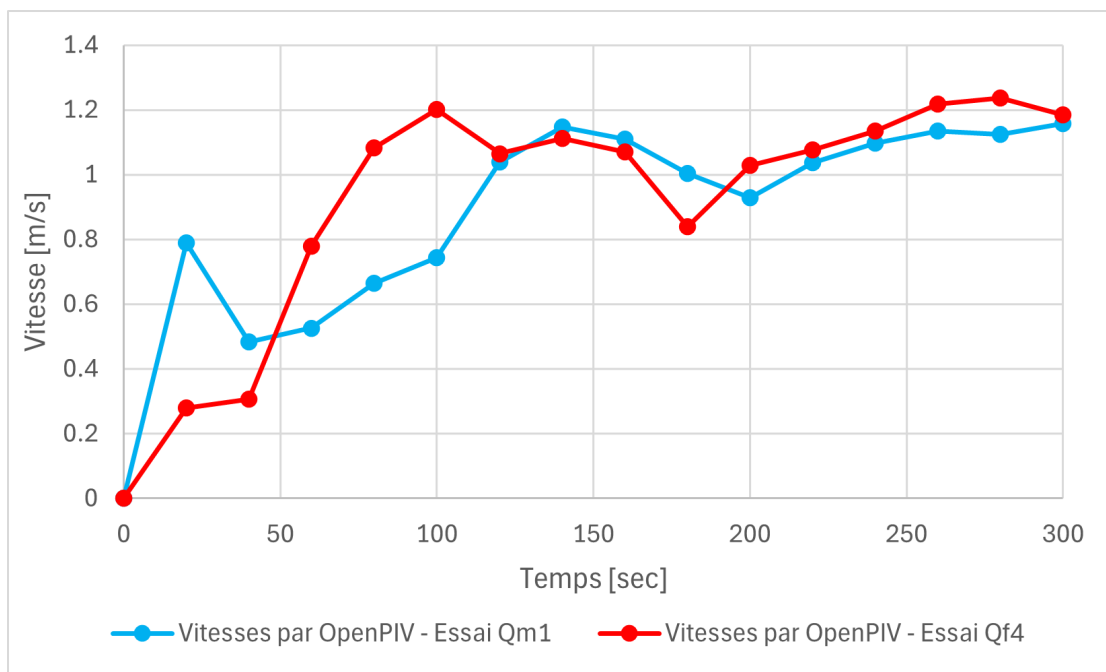
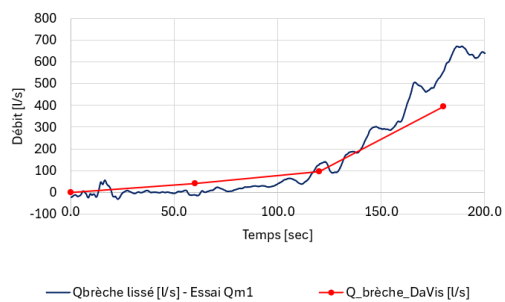
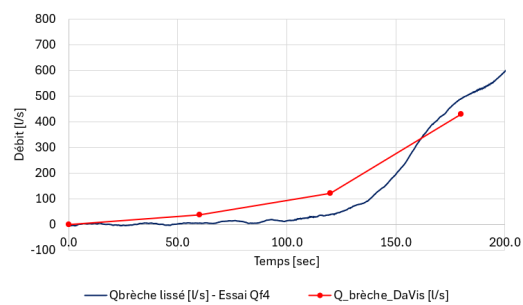


FIGURE 7.38 – Evolution de la vitesse de l'écoulement pour Qm1 et Qf4



(a) Essai Qm1



(b) Essais Qf4

FIGURE 7.39 – Evolution du débit à travers la brèche obtenu par DaVis

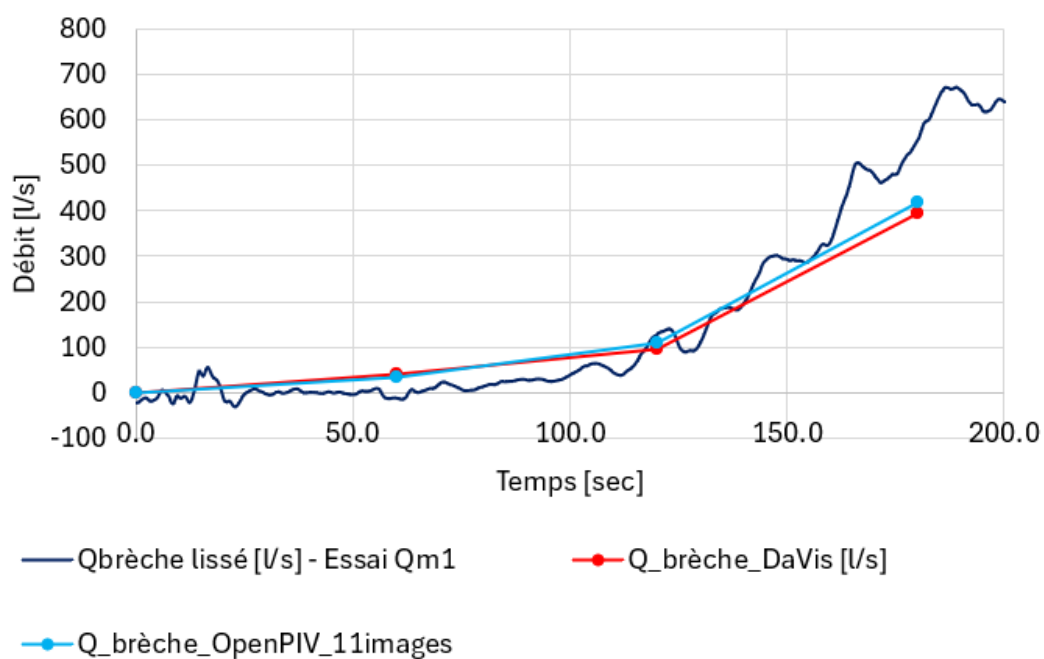


FIGURE 7.40 – Essai Qm1 : Comparaison des évolutions du débit à travers la brèche

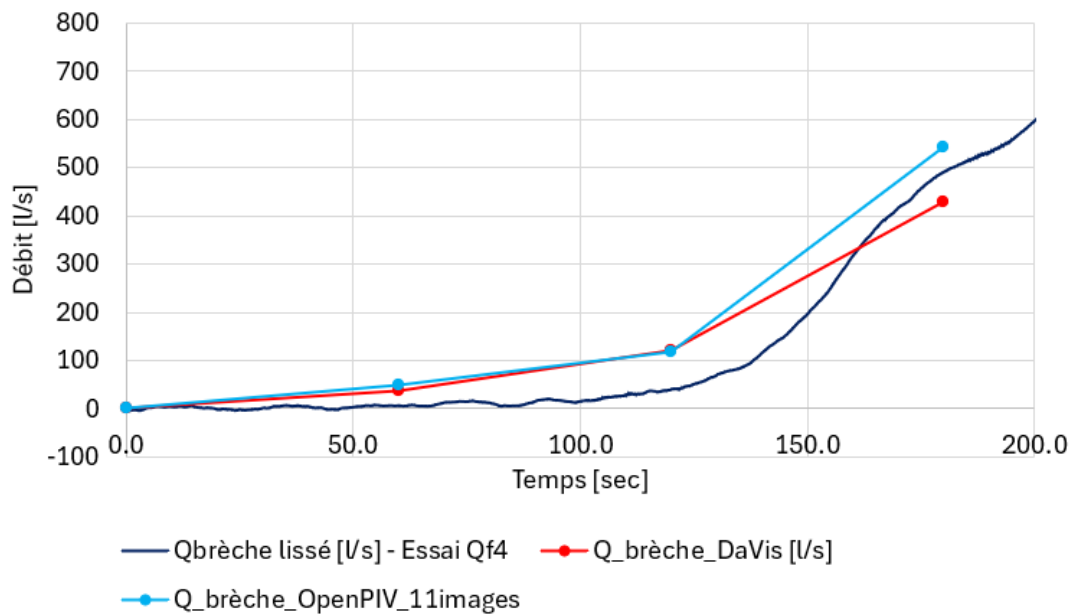


FIGURE 7.41 – Essai Qf4 : Comparaison des évolutions du débit à travers la brèche

7.7 Accès aux codes Python

L'ensemble des codes Python développés dans le cadre de ce travail est disponible publiquement sur un drive à l'adresse suivante :

<https://uclouvain.sharepoint.com/sites/0365G-TFEHydraulique-TFEDikeChatelet/Documents%20partages/Forms/AllItems.aspx?id=%2Fsites%2F0365G%2DTFEHydraulique%2DTFEDikeChatelet%2FDocuments%20partages%2FTFE%20Dike%20Chatelet%20%2D%20Lucien%2FCode%5FM%C3%A9moire%5FLucien%5FMaron&p=true&ga=1>

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl