

École polytechnique de Louvain

Étude expérimentale de la rupture progressive d'une digue par surverse

Auteurs: **Emy JERGEAY, Wen-hui ZHANG**
Promoteurs: **Sandra SOARES-FRAZAO, Didier BOUSMAR**
Lecteurs: **Masoumeh EBRAHIMI, Hadrien RATTEZ**
Année académique 2023–2024
Master [120] : ingénieur civil des constructions

Remerciements

Avant toute chose, nous tenons à remercier vivement les personnes suivantes, sans qui ce travail de fin d'études n'aurait pas pu être réalisé :

Nos promoteurs, les professeurs Sandra Soares-Frazao et Didier Bousmar, pour leur encadrement constant et leurs précieux conseils durant toute l'année. Leur guidance nous a permis d'aller toujours plus loin dans notre analyse.

L'assistante, Madame Masoumeh Ebrahimi, pour sa disponibilité à répondre à toutes nos questions, son suivi rigoureux de notre travail, son accompagnement constant lors de nos essais, son aide précieuse et ses encouragements tout au long de l'année.

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

Madame Catherine Swartenbroekx, Monsieur François Remy, et toute l'équipe du laboratoire des recherches hydrauliques du Service Public de Wallonie (SPW) de Châtelet, pour leur assistance technique dans la mise en œuvre de tous nos essais.

Sans oublier, nos amis et nos proches pour leur soutien, leurs encouragements continus et leur aide précieuse, notamment dans la relecture et correction de ce travail.

Abstract

Face à une augmentation de fréquence des inondations à l'échelle mondiale, les technologies de prévention, bien qu'en progression, peinent parfois à contrer la force destructrice de la nature. Parmi les solutions, les digues représentent une méthode rapide et économique pour retenir l'eau, prévenant ainsi les catastrophes. Cependant, elles restent vulnérables et peuvent notamment se rompre en cas d'inondations. Il est donc important de poursuivre les recherches sur leur comportement en situation de crise.

Ce travail s'inscrit dans la continuité des séries d'essais réalisées à l'UCLouvain, par Descantons et Dujardin (2014) sur une digue d'une vingtaine de centimètres de haut et par Gilles et Delforge (2023) sur une digue d'un mètre de haut. Nous reprenons la plateforme d'essais utilisée par ces derniers.

Dans le but d'analyser l'influence de différents paramètres sur l'évolution temporelle d'une brèche sur une digue en sable, trois campagnes d'essais ont été réalisées. Pour la première série d'essais, nous avons imposé une hauteur d'eau constante en amont de la digue. Pour la deuxième, nous avons imposé un débit constant alimentant le bassin en amont de la digue. La troisième série d'essais s'est également déroulée avec un débit constant, mais en utilisant un sable plus grossier.

Ces différentes séries d'essais ainsi que les expériences réalisées par Descantons et Dujardin (2014) sur une digue à plus petite échelle sont comparées afin d'évaluer l'impact de divers paramètres, tels que le mode d'alimentation en eau du bassin en amont de la digue, le type de sable utilisé pour construire la digue et les effets de l'échelle géométrique de la digue.

Par notre travail, nous contribuons à une meilleure compréhension des mécanismes de rupture de digues par surverse afin de développer des stratégies de prévention et de gestion face aux catastrophes générées par ces ruptures.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Mise en contexte	1
1.2	Objectifs du travail	3
2	État de l’art	7
2.1	Mécanismes de rupture	7
2.2	Théories sur les ruptures de digues par surverse et travaux déjà réalisés . .	8
2.2.1	Mécanisme de rupture de digues en sable et évolution de la brèche (Visser, 1998)	9
2.2.2	Rupture de digues à petite échelle pour des matériaux non cohésifs (Coleman, 2002)	11
2.2.3	Comparaison d’essais à grande échelle et moyenne échelle pour différents types de matériaux (Morris, Hassan et Vaskinn, 2007) . .	13
2.2.4	Rupture de digues pour différents types de sables à petite échelle (Pickert, 2011)	15
2.2.5	Rupture de digues à moyenne échelle pour des matériaux non cohésifs (Walder, 2015)	17
2.3	Travaux réalisés à l’UCLouvain	19
2.3.1	Essais à petite échelle de rupture de digues en matériau non cohésif par surverse (Descantons et Dujardin, 2014)	19
2.3.2	Essais à moyenne échelle de rupture de digues par surverse (Gilles et Delforge, 2023)	20
2.4	Conclusion	21
3	Caractéristiques du sable	22
3.1	Granulométrie	22
3.2	Essai Proctor	23
4	Effets d’échelle	27
4.1	Écoulement à travers la brèche	28
4.2	Changements morphologiques	29
4.3	Caractéristiques de l’écoulement	32
5	Setup expérimental	39
5.1	Description du bassin en amont de la digue	41
5.2	Dimensions de la digue	43
5.3	Étapes de construction de la digue	45
5.4	Instruments de mesure	53
5.4.1	Débitmètres	53

5.4.2	Sondes hydrostatiques et ultrasoniques	55
5.4.3	Déversoir	57
5.4.4	Calcul du débit de brèche	59
5.4.5	Mesure de l'évolution de la brèche à l'aide de la photogrammétrie	62
6	Résultats	77
6.1	Vérification de la reproductibilité	78
6.1.1	Hauteur constante d'eau dans le bassin et sable fin ($d_{50} = 0,314\text{ mm}$), Hf	78
6.1.2	Débit constant alimentant le bassin et sable fin ($d_{50} = 0,314\text{ mm}$), Qf	88
6.1.3	Débit constant alimentant le bassin et sable moyen ($d_{50} = 0,632\text{ mm}$), Qm	96
6.2	Comparaisons	102
6.2.1	Condition frontière (hauteur constante d'eau dans le bassin VS débit constant alimentant le bassin) pour le sable fin ($d_{50} = 0,314\text{ mm}$) .	102
6.2.2	Type de sable ($d_{50} = 0,314\text{ mm}$ VS $d_{50} = 0,632\text{ mm}$) pour un débit constant alimentant le bassin	111
6.2.3	Échelle (moyenne échelle VS petite échelle) pour le sable moyen ($d_{50} = 0,632\text{ mm}$) et un débit constant alimentant le bassin	120
7	Conclusion	132
	Table des figures	143
	Liste des tableaux	144
	Bibliographie	147
8	Annexes	148
8.1	Données de l'essai Hf2	148
8.2	Données de l'essai Qf1	151
8.3	Données de l'essai Qf2	151
8.4	Données de l'essai Qf3	155
8.5	Données de l'essai Qf4	158
8.6	Données de l'essai Qm1	162
8.7	Données de l'essai Qm2	165

Chapitre 1

Introduction

1.1 Mise en contexte

Notre planète est confrontée à des phénomènes météorologiques de plus en plus puissants, susceptibles de déclencher des inondations et des crues dévastatrices. Face à ces menaces, les digues sont souvent érigées en remparts préventifs, bien qu'elles puissent se rompre suite à des conditions météorologiques extrêmes, des défauts de conception ou un entretien insuffisant.

Parmi les mécanismes de rupture des digues, la surverse (*overtopping* en anglais), qui se produit lorsque le niveau d'eau dépasse la crête de la digue, demeure le scénario de rupture le plus courant. L'écoulement passant par-dessus la digue entraîne l'érosion de la surface, créant une brèche qui peut s'ouvrir et conduire rapidement à une rupture totale de la digue.

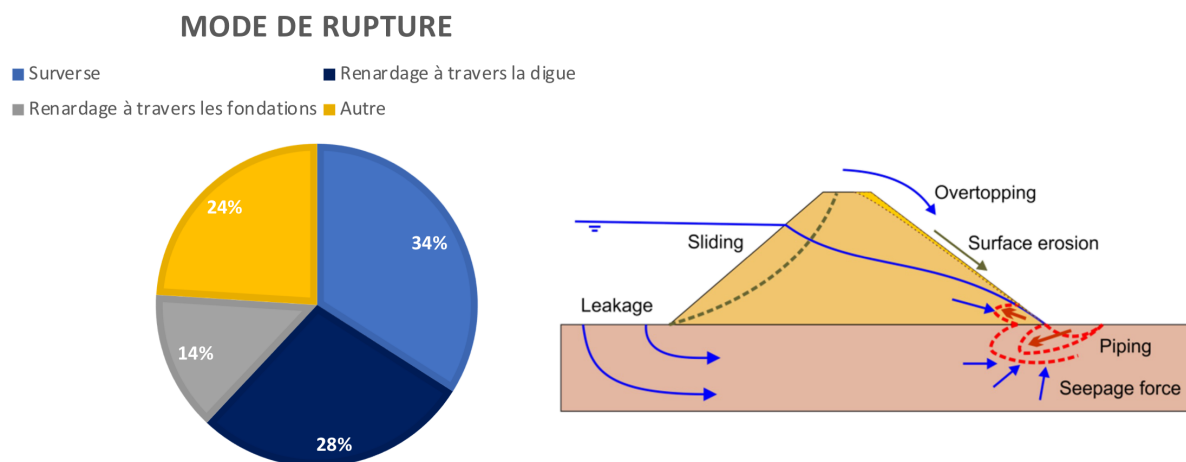


FIGURE 1.1 – Différents modes de rupture et leur fréquence d'occurrence [17]

Les conséquences d'une rupture de digue par surverse sont souvent dévastatrices, touchant trois aspects majeurs :

- **Impacts sur les êtres humains**

La rupture soudaine de la digue, un événement rapide et imprévisible, expose les

résidents aux abords d'un tel ouvrage à des risques de noyade, de blessures et d'isolement, laissant peu de temps pour l'évacuation.

- **Impacts économiques et dommages matériels**

Outre les coûts de réparation de la digue, les conséquences matérielles de sa rupture, telles que la destruction de logements et d'infrastructures, ainsi que les perturbations des télécommunications, entraînent des coûts économiques considérables.

- **Impacts environnementaux**

La rupture de la digue provoque une inondation dévastatrice, occasionnant d'énormes dommages à la flore et à la faune, notamment la dégradation de terres agricoles, des déversements de déchets et diverses formes de pollution.

La catastrophe du barrage de Brumadinho au Brésil en 2019 illustre de manière frappante les conséquences dévastatrices des défaillances de digues, avec plus de 250 personnes portées disparues et des retombées environnementales significatives [25].



FIGURE 1.2 – Rupture du barrage de Brumadinho

Ces événements ne sont pas de simples scénarios lointains. Ils peuvent être proches de chez nous. Par exemple, en 1953, une violente dépression a provoqué la rupture de plusieurs digues le long de la côte de la mer du Nord, touchant le Royaume-Uni, la Belgique et les Pays-Bas. Cet événement a entraîné la perte de nombreuses vies et des inondations massives.



(a) [24]



(b) [16]

FIGURE 1.3 – Raz-de-marée de 1953 en mer du Nord

Plus récemment, en juillet 2021, des intempéries ont conduit à la rupture d'une digue près de la frontière belge aux Pays-Bas, forçant des milliers de personnes à évacuer.



(a) [4]



(b) [15]

FIGURE 1.4 – Rupture de digue du canal Juliana, aux Pays-Bas

Ces événements soulignent la persistance des ruptures de digues et justifient la nécessité continue de mener des recherches approfondies sur ce phénomène. Notre mémoire s'inscrit dans cette perspective, visant à contribuer à l'avancement de ces recherches.

1.2 Objectifs du travail

De nombreuses études ont déjà exploré la rupture de digues en sable par surverse, avec une brèche initialement provoquée. Notre projet vise à poursuivre ces recherches en réalisant des expériences à échelle moyenne (sur une digue de 1 m de haut) afin de mieux comprendre les dynamiques de rupture par surverse.

Dans la littérature, la majorité des études utilise des digues en sable. Nous approfondissons donc notre compréhension des comportements de rupture des digues en étudiant également des digues en sable. Nos digues sont construites en sable avec une brèche déjà

formée au centre, au sein du laboratoire hydraulique du Service Public de Wallonie (SPW). La brèche préexistante est importante, car dans les cas réels de rupture par surverse, le processus commence généralement par la formation d'une brèche. Dans nos expériences, cette étape est simulée dès la construction des digues afin de contrôler l'endroit de la rupture.

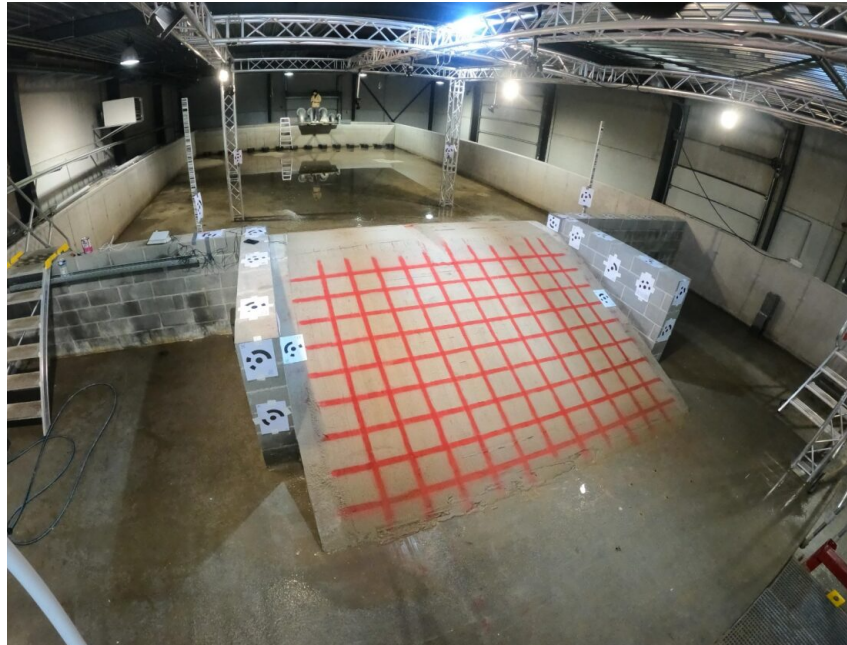
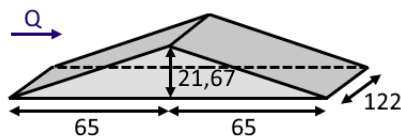


FIGURE 1.5 – Plateforme d'essais

Deux travaux de fin d'études ont déjà été menés à l'UCLouvain sur le thème de la rupture de digues en sable : le premier à petite échelle (sur une digue d'une vingtaine de centimètres de haut) réalisé par Descantons et Dujardin en 2014 avec un débit constant alimentant le bassin en amont de la digue tandis que le second était à échelle moyenne (sur une digue de 1 m de haut) réalisé par Gilles et Delforge (2023) avec une hauteur constante d'eau en amont de la digue.

Petite échelle



Moyenne échelle

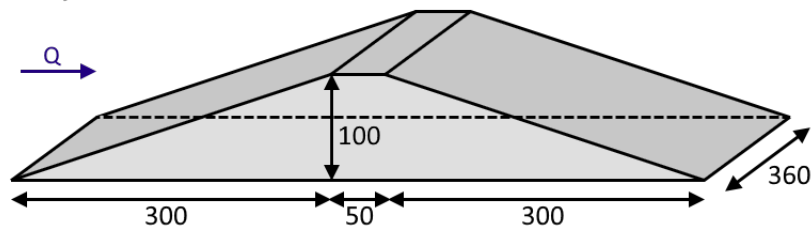


FIGURE 1.6 – Schéma représentant les digues à petite échelle (Descantons et Dujardin, 2014) et moyenne échelle (Gilles et Delforge, 2023) [cm]

Un des objectifs de nos recherches est d'évaluer l'influence de **la mise à l'échelle** sur l'évolution temporelle de la brèche en comparant nos résultats avec ceux de l'étude de Descantons et Dujardin (2014). Nous examinons les différences entre les résultats obtenus à petite échelle et ceux obtenus à moyenne échelle pour comprendre comment les phénomènes observés se transposent à des échelles différentes.

De plus, nous étudions également l'influence de divers paramètres sur l'évolution de la brèche :

- **Le type d'alimentation du bassin**

Nous avons analysé les impacts du type d'alimentation du bassin en amont de la digue. Le bassin est soit alimenté avec un débit variable dans le but de maintenir un niveau d'eau constant, soit alimenté avec un débit constant. Bien que les essais avec un niveau d'eau constant en amont de la digue soient plus proches des conditions réelles et offrent une meilleure simulation des phénomènes naturels, ils sont difficiles à mettre en œuvre en laboratoire. Nous réalisons donc des essais à débit constant, plus simples à contrôler, pour voir si les résultats sont comparables. Cela pourrait simplifier la mise en place de futurs essais en laboratoire tout en restant fidèle aux phénomènes réels.

- **Le type de sable utilisé**

Nous observons comment les caractéristiques du sable, qu'il soit plus fin ou plus grossier, avec une cohésion apparente ou non, influencent le comportement de rupture de la digue.

Notre but est de caractériser l'évolution de la brèche tant dans l'espace que dans le temps et de déterminer le délai avant cette rupture. Nos essais nous permettent de quantifier ces aspects. Nous pouvons alors voir l'influence qu'ont le type d'alimentation du bassin et le type de sable utilisé sur ces facteurs. Cette démarche nous permet d'affiner notre compréhension des processus de rupture et d'optimiser les protocoles expérimentaux pour les études futures.

Notre objectif comprend la réalisation d'expériences avec des digues à échelle moyenne, mesurant 1 mètre de hauteur. Cette hauteur est plus petite que celles des digues réelles comme l'Afsluitdijk aux Pays-Bas qui mesure environ 7 mètres, ou la gigantesque digue de terre du barrage de Nurek au Tadjikistan atteignant presque 300 mètres de haut. Par rapport aux essais à plus grande échelle, qui cherchent à reproduire les dimensions réelles des digues, nos expériences à échelle moyenne réduisent considérablement les coûts et les risques associés. De plus, elles permettent un contrôle plus précis des paramètres expérimentaux tels que la hauteur d'eau en amont de la digue, le débit alimentant le bassin et la composition du sol. Cela offre une occasion d'étudier l'impact de ces variables sur les mécanismes de rupture des digues.

Comparés aux essais à petite échelle, avec des digues d'une hauteur de l'ordre d'une dizaine de centimètres, les dimensions de nos essais à échelle moyenne offrent une perspective plus significative et adaptée. Les résultats sont plus fiables. L'approche à échelle moyenne semble être un bon compromis entre obtenir des résultats proches de la réalité et maintenir une configuration économique et facile à gérer.

Notre approche basée sur des essais à moyenne échelle vise donc à enrichir notre compréhension des ruptures de digues, fournissant des données reproductibles et fiables

utiles pour une gestion préventive et une intervention plus efficace face aux risques de rupture de digues et d'inondations. La comparaison avec des essais antérieurs à petite échelle de l'étude de Descantons et Dujardin (2014) ainsi qu'avec ceux de Gilles et Delforge (2023) contribuera à une évaluation approfondie de notre méthodologie et de ses implications.

Chapitre 2

État de l'art

Notre objectif est de comprendre comment une digue peut se rompre. Dans cette section, nous définissons d'abord les différents mécanismes de rupture possibles pour une digue, en mettant un accent particulier sur la rupture par surverse, qui est la plus courante et celle que nous étudions dans ce travail. Ensuite, nous examinons les études pertinentes déjà effectuées qui peuvent enrichir notre recherche actuelle. Finalement, nous présentons deux travaux de fin d'études menés précédemment à l'UCLouvain, sur lesquels notre travail se base. En plus de comparer les résultats de nos essais entre eux, on les compare aussi à certains de leurs résultats, dans la section 6, afin d'évaluer l'influence de divers paramètres sur le mécanisme de rupture de digues par surverse.

2.1 Mécanismes de rupture

Avant de se pencher sur la rupture de digues par surverse, commençons par définir les quatre principaux mécanismes qui entraînent la détérioration ou la rupture partielle ou totale d'une digue [7], [20] :

- **La surverse**, mécanisme étudié ici, apparaît lorsque le niveau d'eau s'élève au-dessus de celui de la digue et provoque la formation d'une brèche dans la digue par érosion. Ce type de rupture est généralement lié à des précipitations intenses, des crues de rivières ou des marées hautes.

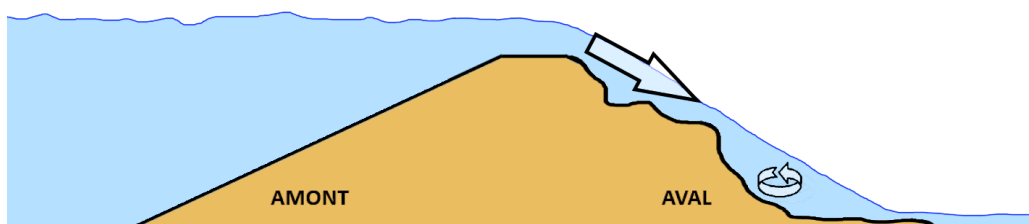


FIGURE 2.1 – Schéma représentant la surverse

- **L'érosion interne** (*renard hydraulique*) se produit lorsque l'eau s'écoule à travers la digue jusqu'à former un tunnel et souvent une brèche. Ce genre de phénomène peut être causé par un sable mal compacté favorisant l'infiltration de l'eau, aggravant l'érosion interne et créant une instabilité locale. Les courbes prononcées dans l'axe de la digue peuvent également perturber le flux d'eau, entraînant des variations de pression et des zones d'affouillement.

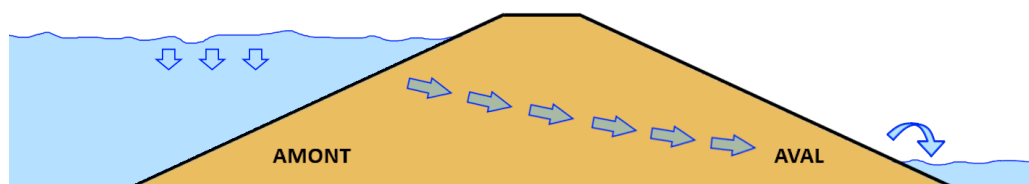


FIGURE 2.2 – Schéma représentant l'érosion interne

- **L'érosion externe** est l'érosion du parement en amont par le courant de la rivière. Pendant les crues, un affouillement à la base des digues peut se produire, augmentant la pente locale et la saturation en eau des matériaux. Il peut mener à une érosion interne et à la formation de brèches dans la digue, ce qui affaiblit sa stabilité mécanique.



FIGURE 2.3 – Schéma représentant l'érosion externe

- **Le glissement de terrain** est une rupture liée à l'instabilité globale du terrain provoquée par des instabilités de pentes ou des tassements différentiels. L'eau en amont de la digue peut s'infiltrer dans la digue. Suite à une inclinaison trop importante de la pente amont de la digue, un compactage inadéquat ou des problèmes de consolidation, le taux d'infiltration croît, ce qui favorise l'érosion interne et qui menace la stabilité de la digue.

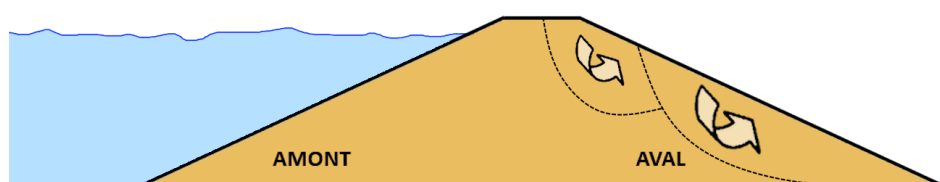


FIGURE 2.4 – Schéma représentant le glissement de terrain

2.2 Théories sur les ruptures de digues par surverse et travaux déjà réalisés

Différentes recherches ont déjà été menées auparavant sur la rupture de digues par surverse et l'évolution de brèche, avec des paramètres et des échelles différents. Ces expériences précédentes nous permettent d'avoir une première idée des mécanismes de rupture de digues et de vérifier nos observations. Nous avons pu distinguer deux catégories de rupture de digues à différentes échelles qui peuvent être pertinentes pour notre étude :

les ruptures de digues pour des matériaux présentant un comportement *cohésif* et *non cohésif*. La distinction entre ces deux matériaux sera intéressante lors des comparaisons pour nos essais avec différents types de sable dans la section 6.2.2.

2.2.1 Mécanisme de rupture de digues en sable et évolution de la brèche (Visser, 1998)

Les recherches de Visser en 1998 [22] explorent le processus d'érosion et de rupture dans les digues en sable. Des essais en laboratoire et sur le terrain en conditions réelles sont mis en œuvre dans cette étude afin de comprendre les mécanismes de rupture des digues en sable à différentes échelles.

L'érosion de la digue avec la formation de la brèche est décrite en cinq étapes par Visser (illustrées à la figure 2.5) :

1. **Augmentation de l'angle de la pente :**

Cette première étape concerne l'augmentation de l'angle de la pente de fond de la brèche initiée par l'écoulement dans la digue. De l'état initial en t_0 jusqu'à atteindre un angle critique en t_1 , la structure commence à devenir instable, menant à des risques d'effondrement ou d'érosion accélérée.

2. **Érosion de la pente aval :**

Durant cette phase entre t_1 et t_2 , la pente de fond de la brèche se déplace vers l'amont avec un angle constant, ce qui réduit la largeur de la crête de la digue au niveau de la brèche (la brèche s'élargit). En t_2 , la crête est entièrement érodée. À partir de cet instant, le débit d'eau passant par la brèche commence à augmenter.

3. **Abaissement du sommet de la digue et érosion verticale :**

Entre t_2 et t_3 , le sommet de la digue s'abaisse. L'angle d'inclinaison des parois de la brèche reste toujours constant durant cette phase. En t_3 , la digue est progressivement emportée jusqu'à la base, ce qui intensifie l'élargissement continu de la brèche.

4. **Écoulement critique et érosion latérale :**

Entre t_3 et t_4 , l'écoulement à travers la brèche devient critique. L'érosion se fait principalement latéralement. La résistance des matériaux à la base de la digue influence l'érosion latérale pendant cette phase.

5. **Écoulement subcritique :**

Après t_4 , l'écoulement devient subcritique (régime fluvial) et la brèche continue de s'élargir. En t_5 , la vitesse de l'écoulement diminue et devient insuffisante pour entraîner des matériaux, ce qui ralentit et finalement arrête l'érosion de la brèche. L'écoulement à travers la brèche continue jusqu'à ce que le niveau d'eau en amont égalise le niveau d'eau en aval.

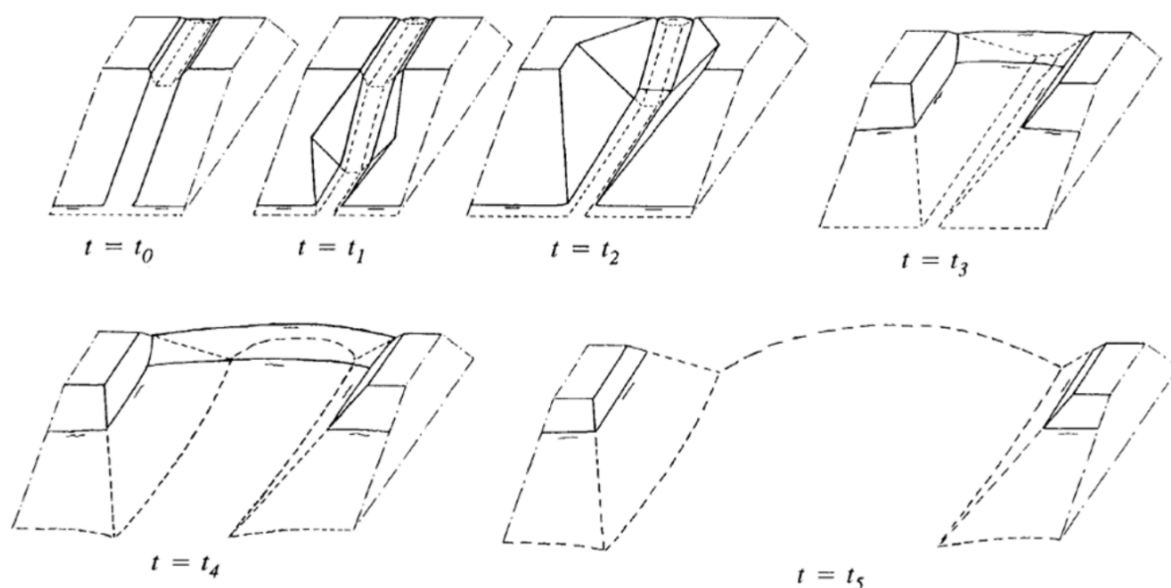


FIGURE 2.5 – Étapes de la rupture de digues par Visser (1998)

Dans les trois premières étapes, la brèche commence à se former en creusant progressivement dans le sens vertical de la digue. Le débit de l'écoulement à travers la brèche reste relativement faible.

Aux étapes 4 et 5, la situation évolue en une érosion plus latérale, la brèche commence à s'élargir rapidement jusqu'à se stabiliser progressivement. Cet élargissement va entraîner un relâchement important de débit d'eau à travers la brèche.

Des essais sur terrain en grandeur réelle ont été effectués par Visser dans le chenal du Zwin en 1994 en y érigeant une digue en sable de 3,3 m de haut. La digue a été construite à partir de deux types de sables fins dont les diamètres médians étaient $d_{50} = 0,185 \text{ mm}$ et $d_{50} = 0,315 \text{ mm}$. La digue a été préalablement bréchée pour permettre à la marée montante de déclencher le processus de rupture par surverse.

Enfin, neuf expériences en laboratoire ont été réalisées pour une digue à petite échelle de 15 cm de haut en sable fin ($d_{50} = 0,088 \text{ mm}$). Étant donné que les brèches évoluent symétriquement, des demi-digues ont été testées. La brèche se situait donc sur une extrémité de la digue. Le canal utilisé pour les essais avait des parois transparentes, ce qui permettait de pouvoir observer l'évolution verticale de la brèche. Le niveau d'eau du bassin en amont de la digue était maintenu aussi constant que possible à partir de deux pompes de capacité maximale de $0,66 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ces expériences à grande échelle sur terrain et à petite échelle en laboratoire ont reproduit et confirmé le processus d'érosion de la brèche en cinq étapes tel que décrit ci-avant.

Cette analyse détaillée des différentes étapes de la formation de brèche fournit une base solide pour comprendre les processus d'érosion et de rupture des digues par surverse.

2.2.2 Rupture de digues à petite échelle pour des matériaux non cohésifs (Coleman, 2002)

Dans cette étude, Coleman et ses collègues [19] se sont penchés sur l'érosion des digues non cohésives à petite échelle (digues de 0,3 m et 0,6 m de haut) avec la formation de brèche sous l'effet de la surverse. Ils ont réalisé des expériences en laboratoire en construisant des digues homogènes à partir de matériaux uniformes et non cohésifs. Le remplissage du réservoir devait être effectué en maintenant le niveau d'eau constant. Quatre types de digue ont été testés avec différents sables dont le diamètre médian était de 0,5 mm, 0,9 mm, 1,6 mm et 2,4 mm.

Les expériences se sont déroulées dans un canal de 2,4 m de large et 12 m de long. Une brèche triangulaire était formée sur la crête de la digue pour initier la brèche, simulant ainsi la rupture de digues par surverse.

L'eau s'écoulant par cette brèche se déversait dans un premier bassin dit de *stabilisation* (*stilling basin* en anglais) avant de se diriger vers un deuxième bassin dit de *mesure* (*measuring weir basin* en anglais) qui est un déversoir rectangulaire à crête aiguë. Le débit de l'écoulement à travers la brèche est mesuré grâce à des sondes capacitatives placées à différents endroits stratégiques du canal pour mesurer le niveau d'eau après son passage dans un bassin puis dans le déversoir de mesure à crête aiguë.

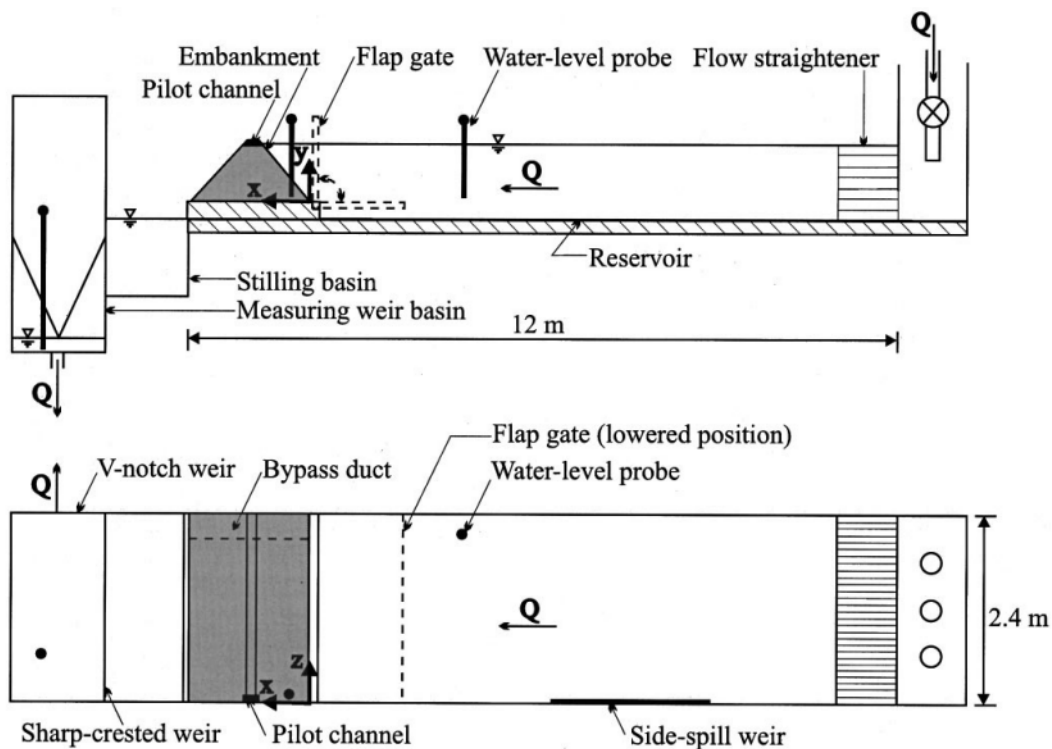


FIGURE 2.6 – Setup expérimental de Coleman (2002)

Les données étaient recueillies pour une configuration où seulement la moitié de la largeur de la digue était exposée et mesurée pour observer l'approfondissement de la brèche. Les profils issus directement des essais permettent d'obtenir des informations sur la morphologie de la digue et l'évolution de la brèche à chaque étape de l'érosion.

Le processus d'érosion au niveau de la brèche se fait d'abord de manière verticale, puis aboutit à une érosion majoritairement latérale lorsque la pente du fond de la brèche atteint le pied de la digue, comme observé dans les études de Visser. L'érosion latérale le long des berges se fait par des mécanismes de cisaillement tractif et de turbulence, ce qui provoque l'effondrement de gros blocs de sables qui sont transportés par l'écoulement vers l'aval.

Sur le plan longitudinal de la digue, l'érosion commence par la formation d'un canal à partir de la brèche dont la pente est parallèle à la face aval de la digue. Ce canal creuse en profondeur jusqu'à atteindre le fond au niveau de son extrémité aval. L'érosion se fait en direction de l'amont jusqu'à atteindre le point de pivot de la digue. C'est le point autour duquel la pente de la brèche commence à tourner. L'érosion se poursuit jusqu'à ce que l'inclinaison de la pente du fond de la brèche devienne moins prononcée, comme si le fond de la brèche commençait à s'aplatir à partir de ce point de pivot. Une fois la pente minimale atteinte, la brèche commence à s'élargir. Pour des digues en matériaux non cohésifs, cette pente minimale est assez douce, environ 1,5%.

Cette évolution du profil longitudinal de la digue au niveau de la brèche est illustrée ci-dessous.

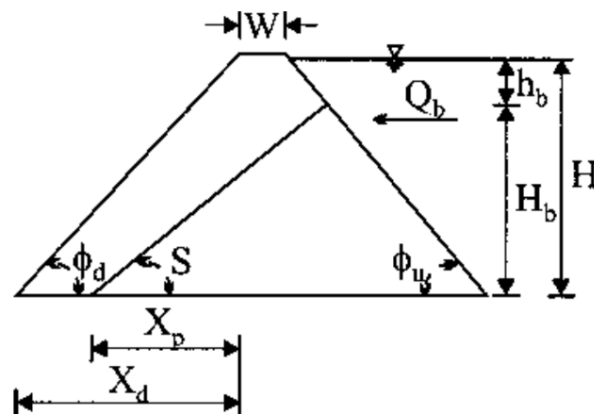


FIGURE 2.7 – Profil longitudinal des essais de Coleman (2002)

Sur la figure 2.8, la brèche vue en plan prend une forme incurvée comme un sablier. Cette forme s'accroît avec le temps jusqu'à ce que l'érosion verticale atteigne le fond de la digue. L'écoulement est amené à modifier la morphologie de la brèche sous cette forme incurvée afin de diminuer le taux de perte d'énergie.

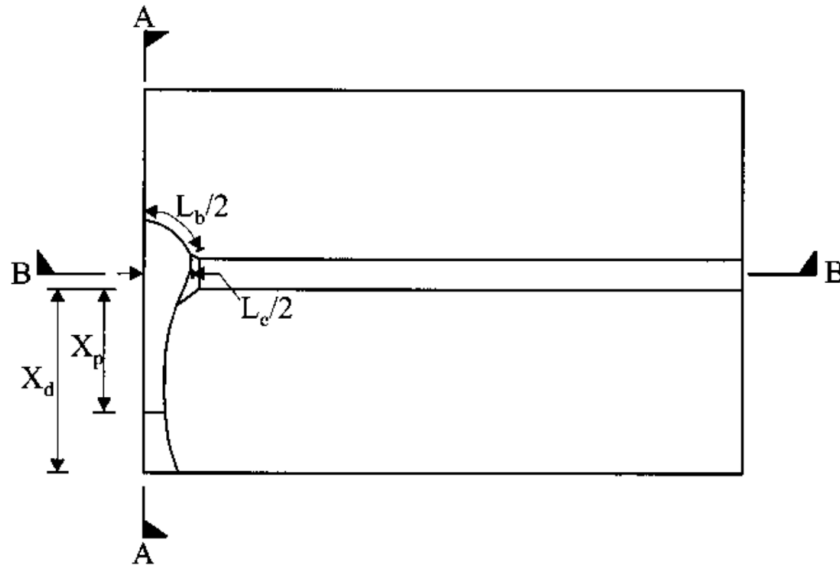


FIGURE 2.8 – Vue en plan des essais de Coleman (2002)

Les auteurs nous fournissent différentes formules mathématiques pour estimer et prédire l'évolution temporelle de la section transversale de la brèche, du profil longitudinal de la brèche, des volumes érodés et du débit de brèche. Cependant, ils nous recommandent d'être prudent si on applique ces formules à d'autres échelles. En effet, à une plus grande échelle que celle utilisée pour leurs expériences, il faut être attentif et prendre en compte les caractéristiques des matériaux de la digue ainsi que les effets de la tension de surface de l'eau.

2.2.3 Comparaison d'essais à grande échelle et moyenne échelle pour différents types de matériaux (Morris, Hassan et Vaskinn, 2007)

Le projet IMPACT mené par Morris, Hassan et Vaskinn (2007) [12] cherche à améliorer les outils existants pour étudier la formation de brèches dans les digues lors des surverses. Il comprend une série de cinq essais à grande échelle avec des digues de 4 à 6 m de hauteur, ainsi qu'un programme de 22 expériences en laboratoire à moyenne échelle avec des digues de 0,6 m de haut.

Les essais à grande échelle se sont déroulés sur un site d'essais établi en aval du barrage de Røssvass dans le nord de la Norvège (figure 2.9). Avec un grand réservoir en amont, ce site permet de stocker et de libérer de grands volumes d'eau pour garder un niveau d'eau constant en amont de la digue. Différents types de matériaux ont été utilisés pour observer les mécanismes de rupture.



FIGURE 2.9 – Essai sur terrain réalisé pour le projet Impact

En parallèle, les expériences en laboratoire reproduisent les conditions des essais sur terrain en utilisant une échelle géométrique de 1 :10 et les mêmes matériaux (figure 2.10).



FIGURE 2.10 – Essais en laboratoire réalisés pour le projet Impact

Pour mesurer le taux de croissance de la brèche, des marqueurs sont placés sur la crête et la face aval de la digue et leur mouvement est enregistré à partir de photos et vidéos. Il y a également des capteurs de mouvement enfouis dans la digue. Le débit d'eau à travers la brèche est mesuré à partir de différentes hauteurs d'eau.

Les observations tirées des essais sur le terrain et des expériences en laboratoire sont les suivantes :

- L'évolution de la brèche se fait d'abord de manière verticale puis de manière latérale.
- L'érosion initiale de la pente aval de la digue se produit lentement et progressivement. Cependant, lorsque l'érosion atteint le bord amont de la crête de la digue, la rupture s'accélère.
- Les parois latérales de la brèche sont généralement verticales pendant l'érosion de la brèche.
- Bien qu'une érosion continue soit possible, l'érosion latérale est généralement causée par la rupture de sections discrètes de la digue, de taille variable. Ces morceaux sont ensuite emportés rapidement hors de la zone de la brèche par l'écoulement.

- Les matériaux cohésifs montrent une érosion initiale en formant un escalier, plutôt qu'une érosion uniforme. Cela influence la rapidité de la vitesse d'érosion de la crête ou de la face amont.
- L'évolution des brèches semble dépendre des propriétés du sol et de l'état de la digue (de la cohésion, du compactage et de la teneur en eau). Ces facteurs peuvent affecter le taux d'érosion des matériaux et donc la croissance de la brèche par des facteurs supérieurs à 10.
- L'état des matériaux et les méthodes de construction ont un impact sur la formation des brèches et peuvent mener à des résultats imprécis.
- L'emplacement de la brèche peut être important. Cela a été démontré par une expérience réalisée avec la brèche décentrée où le débit de pointe a diminué de 13% par rapport à un emplacement au centre de la digue.

2.2.4 Rupture de digues pour différents types de sables à petite échelle (Pickert, 2011)

Des expériences à petite échelle ont été réalisées par Pickert (2011) [6] pour recueillir des données expérimentales sur la rupture de digues en matériaux homogènes cohésifs et non cohésifs. Un modèle de digue est placé sur un lit fixe. Le déclenchement du processus de brèche est provoqué par le débordement de l'eau sur la crête de la digue.

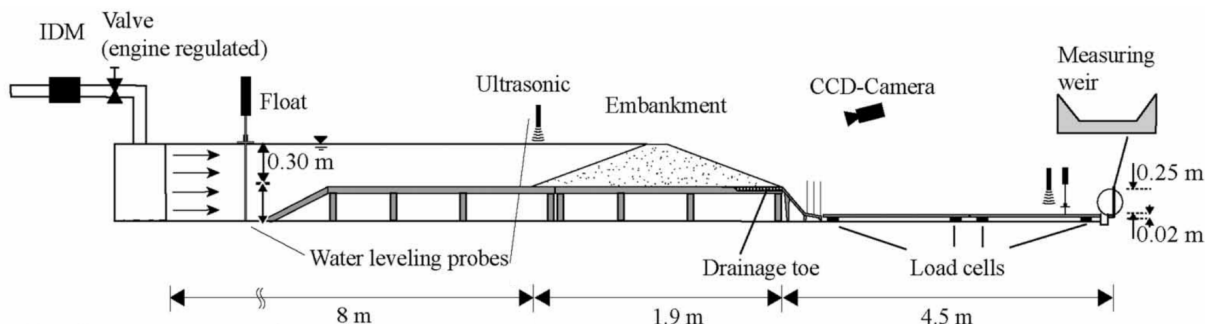


FIGURE 2.11 – Setup expérimental de Pickert (2011)

Pour chaque essai, le niveau d'eau en amont est maintenu constant. Trois modèles de digue sont construits avec trois sables différents : un sable fin ($d_{50} = 0,185 \text{ mm}$), un sable moyen ($d_{50} = 0,365 \text{ mm}$) et un sable grossier ($d_{50} = 0,640 \text{ mm}$).

La technique de mesure qui a été utilisée pour observer l'évolution de la brèche est la "*projection par franges*". Elle consiste à projeter des franges de différentes couleurs sur la digue et d'enregistrer leur position sous un angle distinct. En comparant les images sous différents angles, on peut reconstruire en 3D l'évolution de la brèche au cours du temps. Cette méthode permet d'observer précisément comment la brèche se développe et évolue.

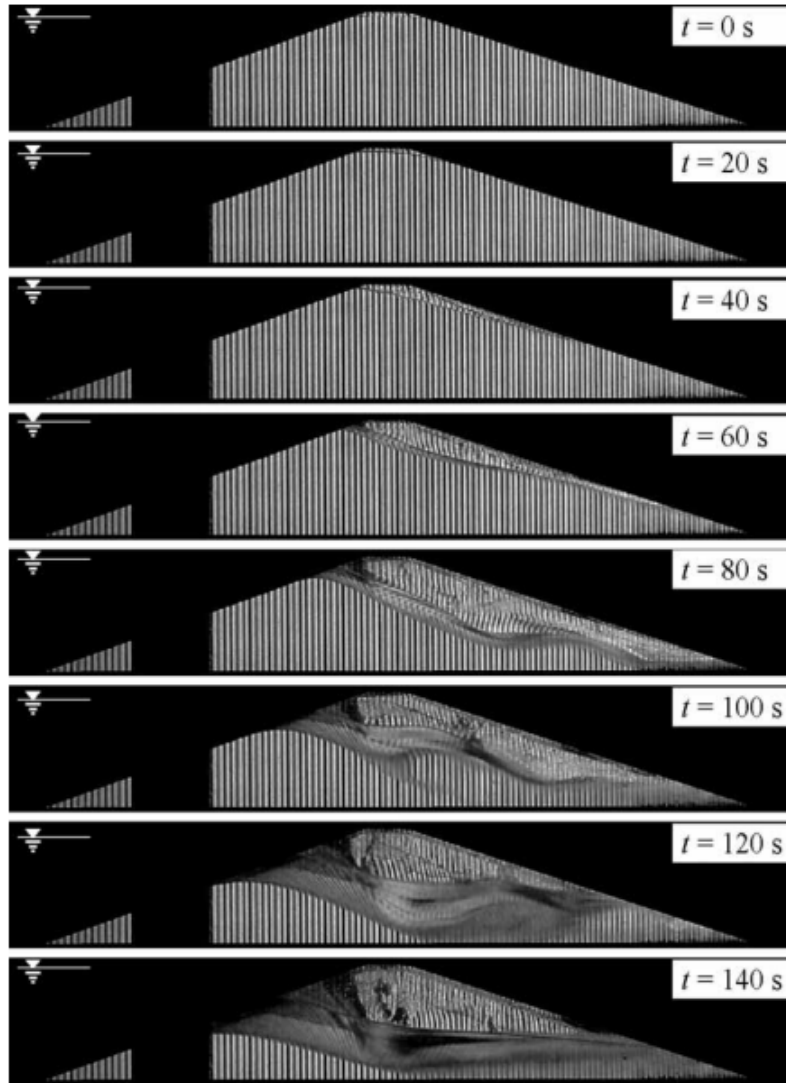


FIGURE 2.12 – Méthode de mesure : projection de "franges"

L'érosion de la brèche est décrite en deux phases principales :

- La première phase est caractérisée par une érosion verticale au niveau de la brèche, de l'aval vers l'amont avec un faible débit et un faible taux d'érosion.
- La deuxième phase est dominée par l'augmentation rapide du débit à travers la brèche et du taux d'érosion, en raison d'un élargissement de la brèche avec une érosion tant verticale que latérale.

Les résultats montrent que le taux d'érosion dépend de la distribution granulométrique du sable. Pour le sable grossier, le taux d'érosion est progressif et devient quasi constant vers la fin. Pour le sable fin, le taux d'érosion est instable en raison de l'effondrement par bloc des parois latérales de la brèche. Les plus petits blocs sont immédiatement emportés par l'écoulement tandis que les plus gros blocs peuvent bloquer le canal de la brèche pendant un certain temps pour ensuite être érodés progressivement.

Deux types de rupture des parois de la brèche sont identifiés : un par entraînement des grains par cisaillement et l'autre par traction. Pour le sable grossier, la rupture de ces parois est due au cisaillement tandis que pour le sable fin, elle est due à la traction en

raison de la cohésion apparente. Pour le sable moyen, les deux types de rupture ont été observés.

Pour les trois types de sable, les parois latérales de la brèche restent presque verticales sur toute la longueur de la digue.

2.2.5 Rupture de digues à moyenne échelle pour des matériaux non cohésifs (Walder, 2015)

L'étude de Walder en 2015 [23] visait à explorer la rupture de digues avec du sable fin ($d_{50} = 0,21 \text{ mm}$) à travers 13 expériences à moyenne échelle avec une hauteur de digue variant de 0,55 m à 0,98 m. Les objectifs étaient : l'analyse de l'évolution temporelle de la section transversale de la brèche, la reproduction d'un hydrogramme de crue (évolution dans le temps du débit d'eau arrivant dans le bassin en amont de la digue en période de précipitations) dans des conditions expérimentales et l'évaluation de l'impact de la hauteur initiale de la digue et du niveau d'eau en amont de la digue sur l'évolution de la brèche.

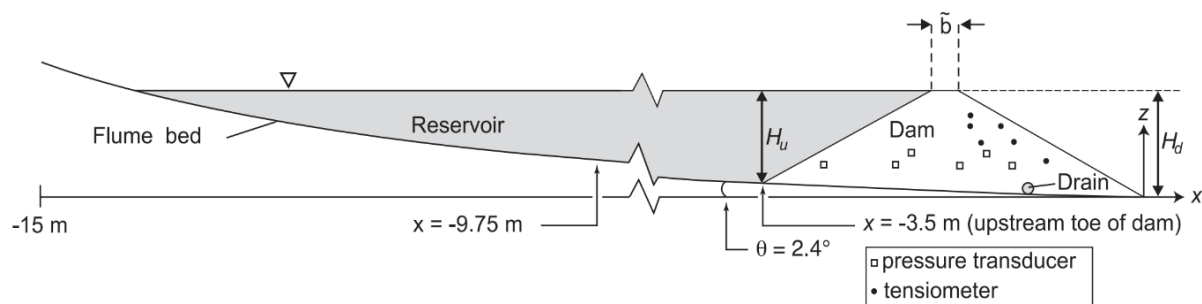


FIGURE 2.13 – Setup expérimental de Walder (2015)

Pour mesurer directement et précisément l'évolution temporelle de la brèche, des méthodes photogrammétriques et de vidéographie sous-marine ont été employées.

Les résultats montrent que les hydrogrammes peuvent être reproduits de la même manière lorsque le temps initial est fixé au moment où l'écoulement arrive en amont de la crête de la brèche. Cela a été maintenu pour des digues de différentes hauteurs initiales.

Il est également observé qu'au fil du temps, le canal de la brèche creusé par l'écoulement est d'abord uniforme puis change en zones de pentes alternées, hautes et basses, formant un escalier qui s'intensifie et migre vers l'amont. L'inclinaison de ces zones à forte pente est contrainte par l'angle de frottement statique du sable. Ces zones finissent par converger pour former une tranchée proéminente en amont, suivie d'un canal à pente douce, séparés par un ressaut hydraulique.

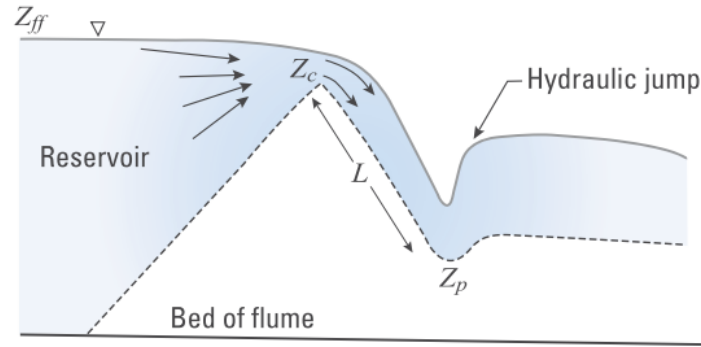


FIGURE 2.14 – Ressaut hydraulique (*hydraulic jump* en anglais) dû à la formation d'un escalier

L'écoulement de l'eau dans la partie aval du canal de brèche est très instable et turbulent. Les effondrements des berges dans cette zone entraînent une augmentation de la quantité de sédiments transportés. Les petits blocs effondrés sont emportés presque entiers, tandis que les plus gros blocs restent coincés dans le canal, où ils sont progressivement érodés.

Voici les différentes étapes de la rupture d'une digue observées par Walder (2015) et illustrées sur la figure 2.15 :

- (a) : Au début, un cône alluvial se forme lorsque le débit de l'écoulement s'infiltre dans la face en aval de la digue et dépose sa charge sédimentaire.
- (b) : L'écoulement creuse au niveau du cône fluvial et s'étend jusqu'au pied de la digue. Des flèches blanches sur la figure 2.15(b) montrent la transition d'un écoulement supercritique à forte pente à un écoulement sous-critique à faible pente.
- (c) : La forme en escalier se développe et migre vers l'amont. Une flèche blanche sur la figure 2.15(c) indique la base de la formation de l'escalier et l'emplacement probable d'un bassin profond.
- (d) : Des blocs de sédiments délimités par des fissures sont sur le point de glisser dans le canal de la brèche. Une flèche blanche sur la figure 2.15(d) marque la base de la formation de l'escalier et la position du bassin profond. L'écoulement en aval de ce bassin est très turbulent.

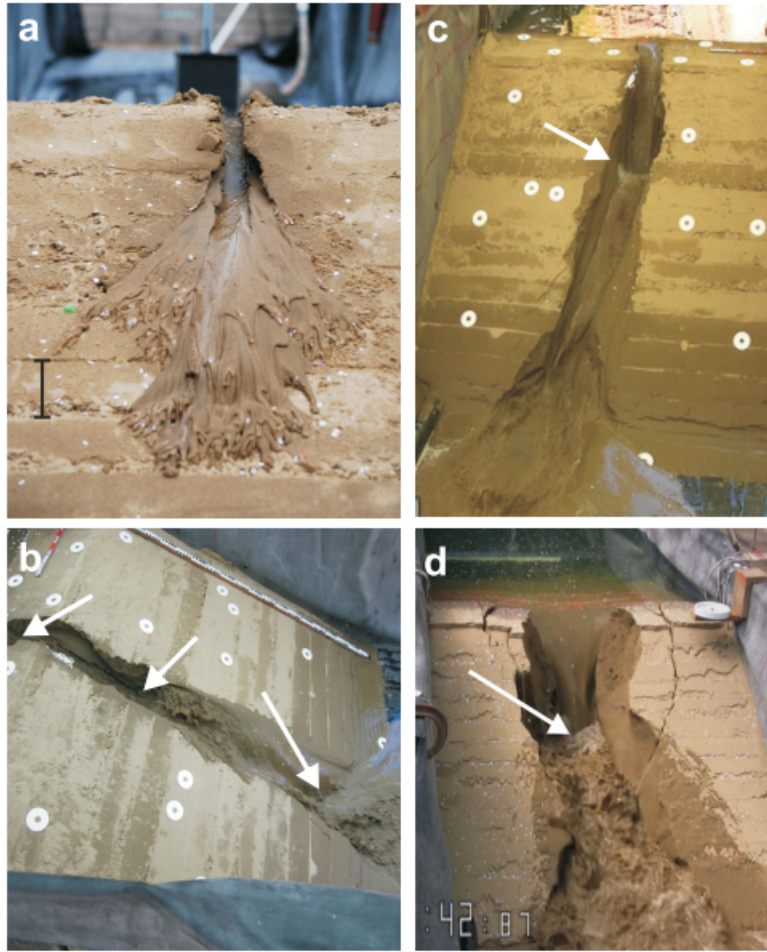


FIGURE 2.15 – Différentes étapes du développement de la brèche pour une digue de 0,98 m de haut observées par Walder (2015)

2.3 Travaux réalisés à l’UCLouvain

2.3.1 Essais à petite échelle de rupture de digues en matériau non cohésif par surverse (Descantons et Dujardin, 2014)

Ce travail de fin d’études réalisé à l’UCLouvain par Descantons et Dujardin (2014) [18] se concentre sur des expériences avec des digues homogènes en matériau non cohésif à petite échelle. L’objectif était de mener plusieurs essais pour examiner de près le mécanisme de rupture des digues par surverse. La mise en place d’une procédure d’essais rigoureuse et reproductible a permis la réalisation de 16 essais valides sur 21 tentatives. Cette approche méthodique a facilité la collecte de données incluant les hauteurs de fond, les largeurs de brèche, ainsi que le débit et la hauteur d’eau, pour deux variétés de sable : fin ($d_{50} = 0,71 \text{ mm}$) et grossier ($d_{50} = 1,70 \text{ mm}$).

Leurs expériences se sont déroulées sur un canal de 10 m de long, 0,32 m de haut et 1,22 m de large. La digue en sable fin ($d_{50} = 0,71 \text{ mm}$) avait une hauteur de 21,67 cm, une largeur à la base de 130 cm et une largeur à la crête de 0 cm. La digue en sable grossier ($d_{50} = 1,70 \text{ mm}$) avait une hauteur de 20 cm, une largeur à la base de 130 cm et une largeur à la crête 10 cm. Les pentes à l’amont et à l’aval des deux digues étaient de 1/3.

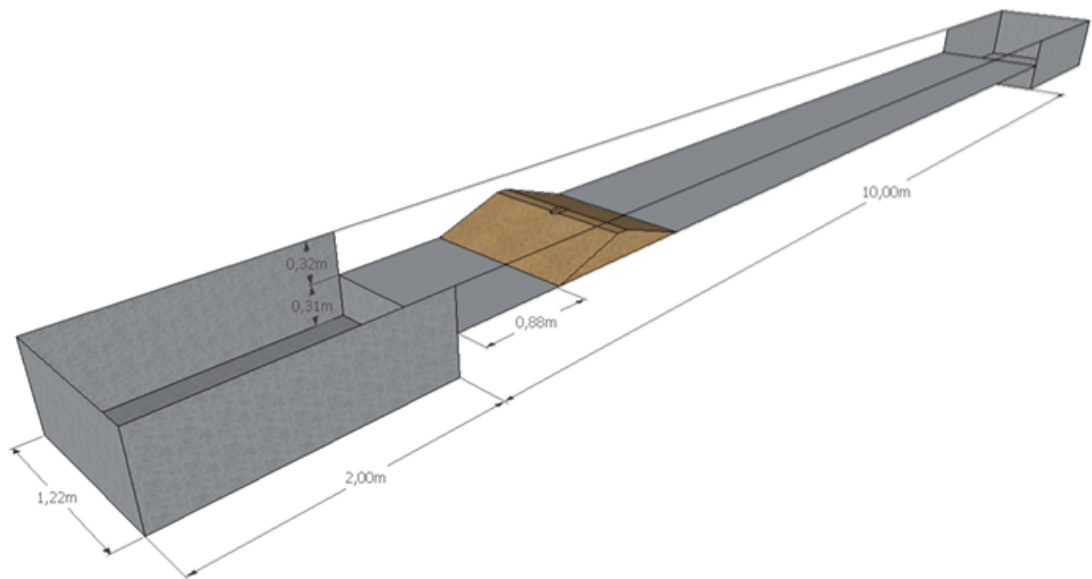


FIGURE 2.16 – Setup expérimental de Descantons et Dujardin (2014)

L'utilisation de divers moyens de mesure, tels que des enregistrements vidéo, des lasers, des sondes à ultrasons, a permis une collecte de données comme le débit de pointe et le débit de la brèche, ainsi que les dimensions et les taux d'érosion de la brèche.

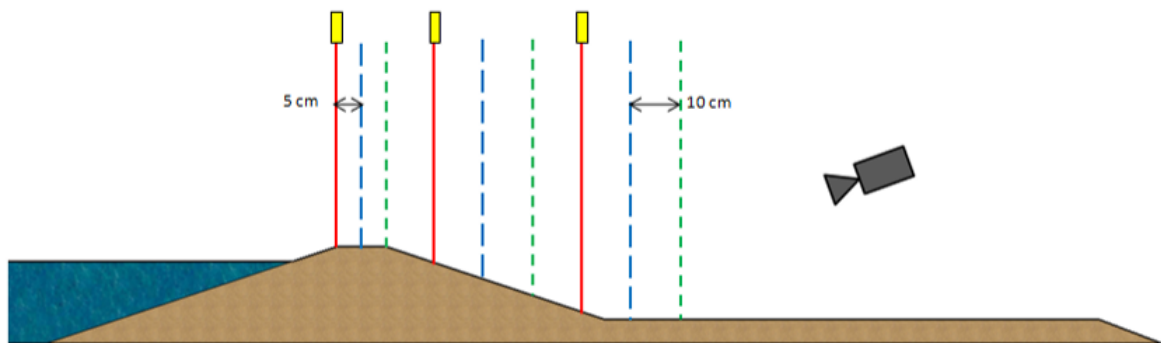


FIGURE 2.17 – Positions des lasers et caméras

La comparaison entre nos résultats à moyenne échelle et ceux obtenus à petite échelle dans cette étude sera importante pour examiner l'influence des différentes échelles sur les comportements de rupture. Pour comparer ces essais à différentes échelles, nous approfondissons les effets de la mise à l'échelle dans la section 4.

2.3.2 Essais à moyenne échelle de rupture de digues par surverse (Gilles et Delforge, 2023)

Ce travail de fin d'études réalisé par Gilles et Delforge (2023) [3] se concentre sur des essais de rupture de digues par surverse à moyenne échelle. Ces expériences visent à reproduire les conditions réelles de rupture de digues pour caractériser l'évolution temporelle de la brèche, tout en assurant la reproductibilité des essais. Pour analyser le comportement d'érosion, un type d'essai spécifique a été mené avec une hauteur constante d'eau en amont

de la digue et l'emploi d'un sable fin ($d_{50} = 0,314 \text{ mm}$).

La digue, construite à une échelle moyenne, mesure 1,0 mètre de hauteur, 6,5 mètres de longueur à la base, et 0,5 mètre à la crête, avec une largeur de 3,6 mètres.

Le dispositif expérimental comprend divers instruments de mesure : des humidimètres pour mesurer le taux d'humidité, des caméras et cibles GCP pour réaliser une analyse de l'évolution de la brèche par photogrammétrie, des pit-tags pour suivre le déplacement du sable à l'intérieur de la digue et la mise en place de balles colorées à l'intérieur de la digue pour connaître l'évolution de l'érosion à partir des enregistrements par photos et vidéos.

Le système d'alimentation du bassin, contrôlant le débit et la hauteur d'eau, permet de simuler différentes conditions frontières.

Afin d'approfondir la compréhension des mécanismes de rupture de digues par surverse, nous avons poursuivi l'étude initiée par Gilles et Delforge (2023) en reprenant la même plateforme d'essais et en faisant varier d'autres paramètres tels que le type de sable utilisé et les conditions de débit en amont.

2.4 Conclusion

À partir des différentes études et expériences recensées dans la littérature, nous comprenons mieux comment la rupture de digues par surverse se produit, quelles sont les différentes étapes d'érosion de la digue et quels paramètres peuvent influencer ce mécanisme de rupture. Les observations et les résultats d'essais réalisés à grande, moyenne et petite échelles pour différents types de sable nous permettent de comprendre l'impact de l'effet d'échelle et du comportement cohésif et non cohésif des matériaux sur l'érosion des digues.

Les résultats des expériences menées précédemment à l'UCLouvain par Descantons et Dujardin (2014) et par Gilles et Delforge (2023) présentées ci-dessus, seront utiles dans la section 6 de notre étude. Nous mettrons en parallèle leurs résultats avec les nôtres pour permettre d'évaluer comment divers paramètres influencent les comportements de rupture de digues par surverse.

Chapitre 3

Caractéristiques du sable

Afin d'étudier l'influence du type de sable utilisé pour construire la digue sur l'évolution temporelle de la brèche, nous allons réaliser des essais en utilisant deux types de sable différents (un sable fin et un sable moyen).

Pour le sable fin, nous choisissons le sable qui a été utilisé pour les essais à moyenne échelle réalisés par Gilles et Delforge (2023). Nous pourrions par conséquent tester la reproductibilité de leur dernier essai.

Pour le sable moyen, nous avons décidé de reprendre un type de sable qui a été utilisé pour les essais à petite échelle réalisés par Descantons et Dujardin (2014). Nous pourrions par conséquent comparer nos résultats à ceux obtenus avec une échelle géométrique différente mais avec le même sable. Descantons et Dujardin (2014) ont utilisé un sable avec un diamètre médian de $0,71\text{ mm}$ et un autre avec un diamètre médian de $1,71\text{ mm}$. Ce dernier a un diamètre assez élevé. Il a donc une perméabilité plus élevée et est, par conséquent, plus instable (dû à l'infiltration). En utilisant le sable le plus grossier à plus grande échelle, la probabilité de rupture par infiltration augmente. Or, nous étudions la surverse des digues. Donc, afin d'observer ce mode de rupture et non une rupture par infiltration, nous avons utilisé leur sable le plus fin comme notre sable moyen.

Afin de connaître les dimensions des grains de ces sables, nous avons étudié leur granulométrie. Nous avons ensuite réalisé un essai Proctor pour déterminer la teneur en eau permettant un meilleur compactage de ces sables.

3.1 Granulométrie

La granulométrie consiste à étudier la répartition des différentes tailles de particules présentes dans un sol. Elle représente l'un des principaux paramètres lorsqu'on étudie un sol, car cela permet de comprendre comment les forces se transmettent de grain à grain, ainsi que le comportement mécanique et hydraulique du sol, notamment en termes de perméabilité.

Pour des diamètres de grains de sol supérieurs à $0,061\text{ mm}$, comme c'est le cas pour les sables que nous utilisons dans nos essais, nous avons choisi d'utiliser 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 internationales ISO sont utilisées en Belgique et en Europe

en général. Il est cependant important de garder à l'esprit que ces normes n'ont aucun pouvoir coercitif ; elles sont simplement indicatives.

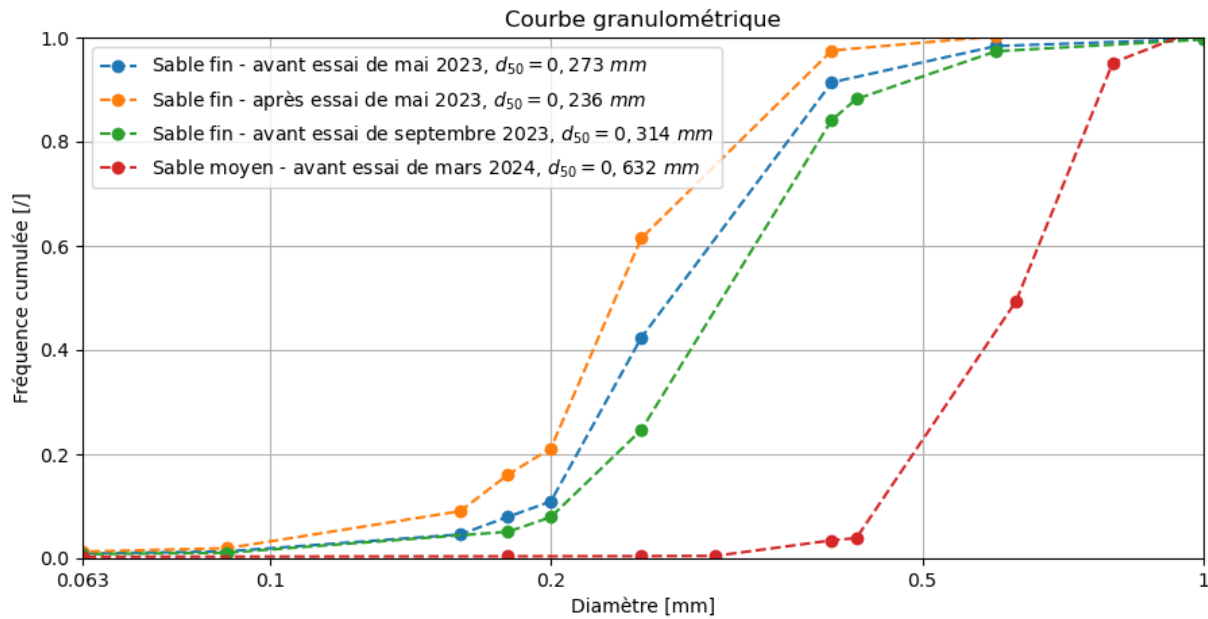


FIGURE 3.1 – Courbe granulométrique

Sable fin ($d_{50} = 0,314 \text{ mm}$)

Le sable que nous avons utilisé comme sable fin est celui qui a été utilisé pour le travail de Gilles et Delforge (2023). Le sable qu'ils avaient sélectionné pour réaliser leurs essais était du sable 0-2 mm en vrac, car c'est celui dont le diamètre médian d_{50} (50% des grains ont un diamètre inférieur à d_{50}) se rapprochait le plus du diamètre qu'ils avaient choisi et qui était de 0,32 mm. En effet, nous avons recommandé ce sable et réalisé sa granulométrie et nous avons obtenu un diamètre médian égal à $d_{50} = 0,314 \text{ mm}$.

Nous avons testé deux échantillons du sable qui avaient été prélevés pour le travail de Gilles et Delforge (2023). Un, avant essai et un autre, après essai. Il n'y a pas de différence significative entre la courbe granulométrique du sable avant et après essai. Ceci signifie que nous pouvons réutiliser le sable d'un essai à l'autre.

Sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$)

Pour le sable moyen, nous avons commandé le sable qui avait été considéré comme fin pour les essais à petite échelle par Descantons et Dujardin (2014). Ce sable est du "silica 0.4-0.8". En le testant, nous obtenons $d_{50} = 0,632 \text{ mm}$.

3.2 Essai Proctor

L'essai Proctor est une technique qui permet de déterminer la teneur en eau pour un compactage optimal du sable, appelé l'optimum Proctor. À l'optimum, la densité sèche du sol est maximale. Il est important de compacter le sable avec une teneur en eau la plus proche possible de la valeur à l'optimum Proctor pour maximiser sa résistance par rapport

à l'érosion et pour éviter l'infiltration d'eau au sein de la digue.

L'essai Proctor est réalisé conformément à la norme NBN EN 13286-2 [14]. Les instruments pour réaliser cet essai sont :

- Un moule cylindrique en acier, avec une rehausse amovible. Les parois intérieures du moule doivent être lisses. Nous avons utilisé un moule de 100 mm de diamètre. Sa partie non amovible est de 120 mm de haut et sa partie amovible est de 60 mm de haut.



FIGURE 3.2 – Moule cylindrique de l'essai Proctor [13]

- Une dame de compactage, constituée d'un poids qu'on laisse tomber en chute libre sur le sable placé dans le moule. La hauteur de chute, 305 mm, est identique pour tous les coups.



FIGURE 3.3 – Dame de compactage de l'essai Proctor [27]

- Une balance pour peser les échantillons (précise à 0,01 g près).

Les étapes de l'essai Proctor sont :

1. Préparation de l'échantillon

Un échantillon de sable est prélevé. On y ajoute initialement 2% d'eau.

2. Compactation

Cet échantillon de sable est placé dans le moule en trois couches distinctes. Chaque couche est compactée en appliquant 25 coups avec la dame de compactage.

3. Mesure de la masse volumique humide

Une fois les trois couches compactées, le sable est retiré du moule et pesé. La masse volumique humide ρ_h est déterminée selon la formule :

$$\rho_h [kg/m^3] = \frac{m_{humide} [kg]}{V [m^3]} \quad (3.1)$$

avec m_{humide} la masse du sable qui vient d'être compacté et V le volume du moule dans lequel a été compacté ce sable.

4. **Détermination de la masse volumique sèche ρ_d et de la teneur en eau w**
Cet échantillon est chauffé pour éliminer toute l'humidité afin de connaître sa masse sèche $m_{sèche}$. La teneur en eau est définie telle que :

$$w [\%] = \frac{m_{humide} [kg] - m_{sèche} [kg]}{m_{sèche} [kg]} \cdot 100 \quad (3.2)$$

La masse volumique sèche est calculée comme :

$$\rho_d [kg/m^3] = \frac{\rho_h [kg/m^3]}{1 + \frac{w}{100}} \quad (3.3)$$

5. Répétition des étapes 1 à 4 pour tracer la courbe Proctor

L'opération est répétée pour différentes teneurs en eau du sable. Chaque ensemble de résultats est repris dans un graphique représentant la masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau pour pouvoir tracer la courbe Proctor dans le but de déterminer l'optimum Proctor.

Pour le sable fin ($d_{50} = 0,314 \text{ mm}$), Gilles et Delforge (2023) ont déterminé une teneur en eau optimale aux alentours de 14% pour laquelle la masse volumique sèche du sol est maximale et égale à environ 1800 kg/m^3 , comme nous pouvons le voir sur la courbe Proctor obtenue :

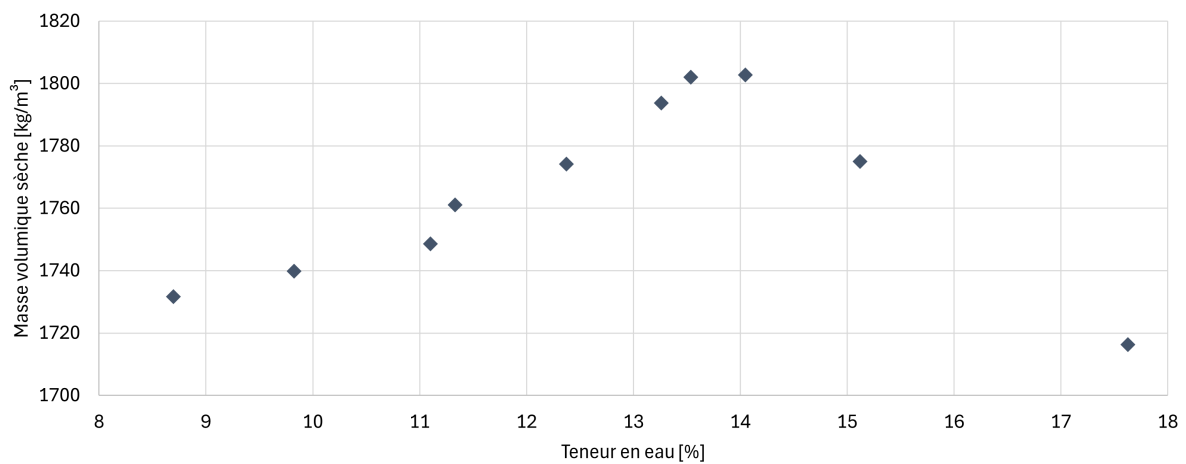


FIGURE 3.4 – Courbe Proctor du sable fin ($d_{50} = 0,314 \text{ mm}$) [3]

Pour le sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$), nous avons déterminé une teneur en eau optimale aux alentours de 10% pour laquelle la masse volumique sèche du sol est maximale et égale à environ 1700 kg/m^3 :

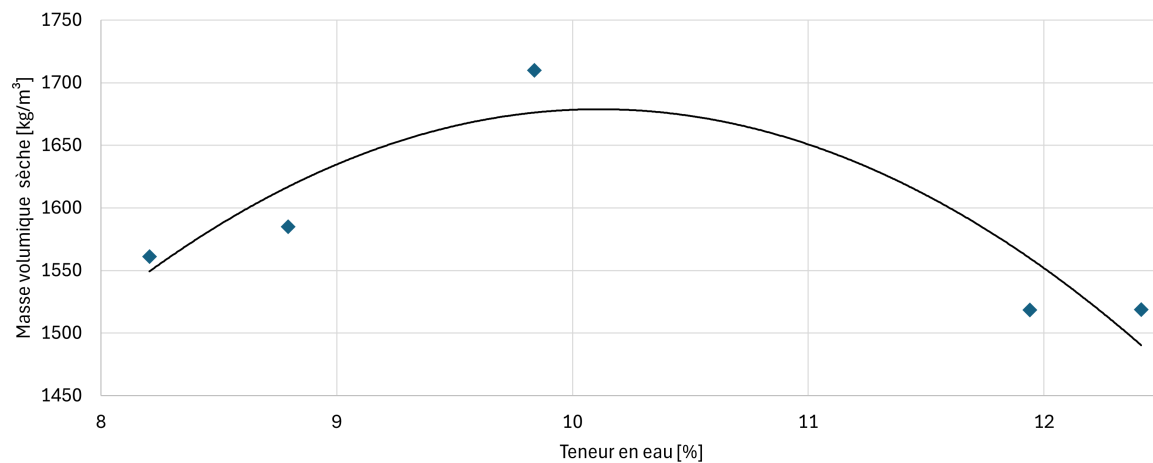


FIGURE 3.5 – Courbe Proctor du sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$)

Les caractéristiques des sables à l'optimum Proctor sont reprises dans le tableau ci-dessous.

	Sable fin ($d_{50} = 0,314 \text{ mm}$)	Sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$)
Teneur en eau optimale [%]	14	10
Masse volumique sèche maximale [kg/m^3]	1800	1700

TABLE 3.1 – Tableau récapitulatif des caractéristiques des sables à l'optimum Proctor

Chapitre 4

Effets d'échelle

Nous avons comparé les résultats que nous avons obtenus à moyenne échelle avec ceux obtenus à petite échelle par Descantons et Dujardin (2014). Pour ce faire, il faut poser un facteur d'échelle sur plusieurs grandeurs telles que la vitesse d'écoulement ou encore le diamètre des grains formant la digue. Les effets d'échelle sont repris dans cette section.

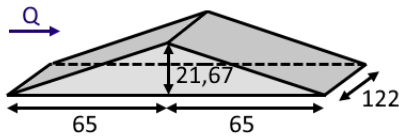
Notons :

$$x = \lambda_x \cdot x' \quad (4.1)$$

avec :

- x la grandeur du modèle réduit réalisé pour ce travail
- λ_x le facteur d'échelle
- x' la grandeur du modèle avec lequel nous allons comparer notre modèle réduit

Petite échelle



Moyenne échelle

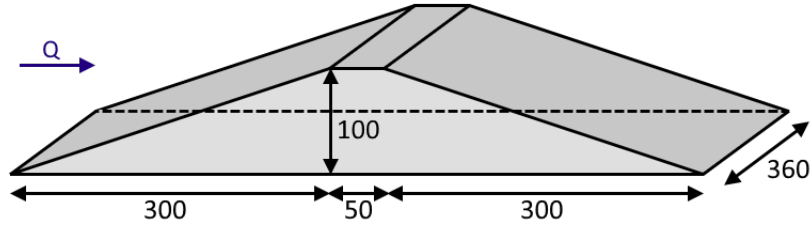


FIGURE 4.1 – Schéma représentant les digues à petite (Descantons et Dujardin (2014)) et moyenne échelle (Gilles et Delforge (2023) et ce travail) [cm]

La relation d'échelle de la pression diffère des relations des autres grandeurs, car la pression à la surface reste égale à la pression atmosphérique.

$$p = \lambda_p \cdot p' + (1 - \lambda_p) \cdot p_{atm} \quad (4.2)$$

4.1 Écoulement à travers la brèche

L'écoulement dans la direction x (direction de l'écoulement) doit respecter l'équation d'écoulement en eaux peu profondes, quel que soit le modèle :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(h \cdot v)}{\partial y} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda_U = \frac{\lambda_x}{\lambda_t} \quad (4.3)$$

avec :

- h la hauteur d'eau
- u la vitesse de l'écoulement dans la direction x
- v la vitesse de l'écoulement dans la direction y

Nous supposons ici qu'il n'y a aucune distorsion : $\lambda_x = \lambda_y$.

L'équation d'Euler doit aussi être valable pour tous les modèles :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = X - \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (4.4)$$

$$\Rightarrow \quad \lambda_p = \lambda_x \quad \text{à condition que : } \lambda_U = \lambda_t \quad \text{et} \quad \lambda_U^2 = \lambda_x$$

Les facteurs d'échelle de la masse volumique de l'eau (λ_ρ) et de la force de gravité (λ_X) sont égaux à l'unité étant donné que l'eau est utilisée dans tous les modèles et la gravité ne varie pas en changeant l'échelle du modèle.

Le facteur d'échelle du débit d'eau peut s'exprimer comme :

$$Q = UA \Rightarrow \lambda_Q = \lambda_U \lambda_x^2 \quad (4.5)$$

En plus de ces équations qu'il faut respecter quel que soit le modèle, nous pouvons imposer différentes conditions.

Condition de Froude

La condition de Froude impose que le nombre de Froude ne dépende pas de l'échelle. Ce nombre est un nombre adimensionnel qui permet de distinguer les écoulements fluviaux ($Fr < 1$) des écoulements torrentiels ($Fr > 1$). Cette condition impose :

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad \Rightarrow \quad \lambda_{Fr} = \frac{\lambda_U}{\sqrt{\lambda_x}} = 1 \quad (4.6)$$

En respectant la loi de l'équation (4.3), si cette condition est vérifiée, les deux conditions de la loi de l'équation (4.4) sont vérifiées. Nous avons donc les facteurs d'échelle repris dans le tableau ci-dessous.

Grandeur	Facteur d'échelle	Valeur du facteur d'échelle pour $\lambda_x = 5$
Pression p	$\lambda_p = \lambda_x$	5,000
Vitesse U	$\lambda_U = \sqrt{\lambda_x}$	2,236
Temps t	$\lambda_t = \sqrt{\lambda_x}$	2,236
Nombre de Reynolds Re	$\lambda_{Re} = \lambda_x^{3/2}$	11,180
Débit Q	$\lambda_Q = \lambda_x^{5/2}$	55,902

TABLE 4.1 – Facteurs d'échelle des grandeurs liées à l'écoulement de l'eau en fonction de l'échelle géométrique λ_x

Condition de Reynolds

La condition de Reynolds impose que le nombre de Reynolds ne dépende pas de l'échelle. Ce nombre est un nombre adimensionnel qui permet de distinguer les écoulements laminaires (Re faible) des écoulements turbulents (Re élevé). Cette condition impose :

$$Re = \frac{Uh}{\nu} \quad \Rightarrow \quad \lambda_{Re} = \lambda_U \lambda_x = 1 \quad (4.7)$$

$\lambda_\nu = 1$ étant donné que la viscosité cinématique de l'eau ν ne varie pas d'un modèle à un autre.

La condition de Reynolds ne peut être vérifiée si la condition de Froude est imposée. Ces conditions sont incompatibles.

Dans l'écoulement sur une digue, la viscosité cinématique ν ne joue pas un rôle important contrairement au nombre de Froude. Nous imposons par conséquent la condition de Froude ($\lambda_{Fr} = 1$) et non la condition de Reynolds ($\lambda_{Re} = 1$).

4.2 Changements morphologiques

Diagramme de Shields

Le diagramme de Shields, représenté ci-dessous, décrit les conditions hydrauliques le long de l'interface grains-eau.

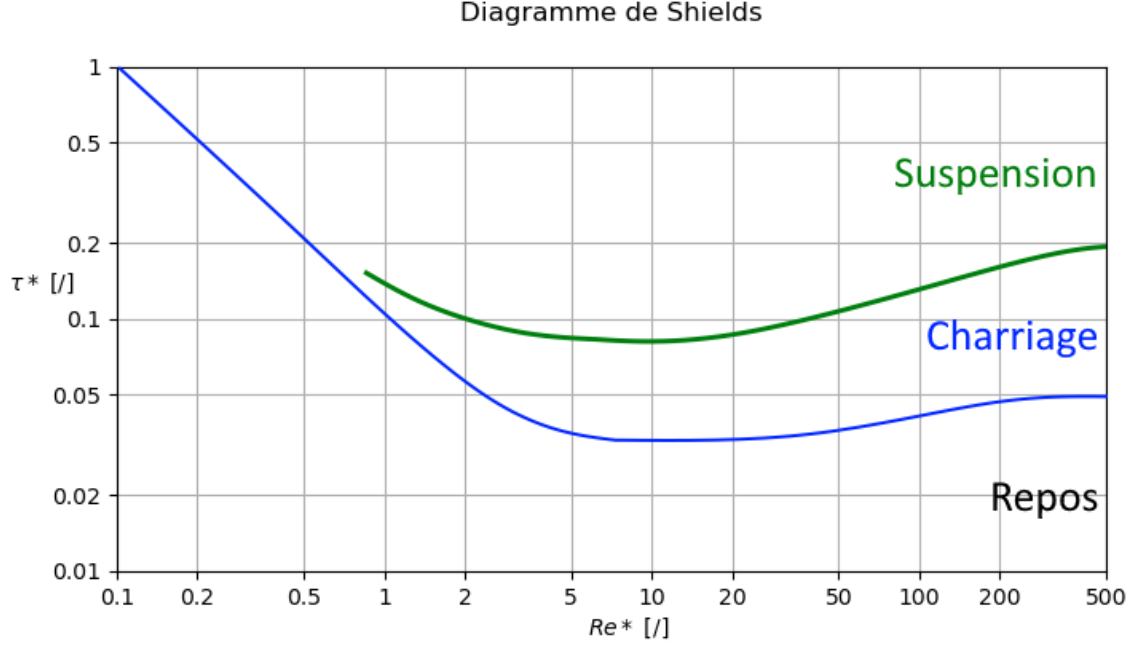


FIGURE 4.2 – Diagramme de Shields

En ordonnée, il y a la contrainte de cisaillement adimensionnelle le long du périmètre mouillé :

$$\tau^* = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)d} = \frac{\gamma RS_f}{(\gamma_s - \gamma)d} = \frac{RS_f}{(s - 1)d} \quad \Rightarrow \quad \lambda_{\tau^*} = \frac{\lambda_x \lambda_{S_f}}{\lambda_{s-1} \lambda_d} \quad (4.8)$$

avec :

- S_f la pente d'énergie, calculée comme :

$$S_f = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R^{4/3}} \quad \Rightarrow \quad \lambda_{S_f} = \lambda_x^{-1/3} \lambda_n^2 \quad (4.9)$$

n est le coefficient de Manning des grains :

$$n = \frac{d^{1/6}}{21,1} \quad \Rightarrow \quad \lambda_n = \lambda_d^{1/6} \quad (4.10)$$

- $\lambda_{s-1} = 1$ étant donné qu'on utilise un sol de même masse volumique quelle que soit l'échelle du modèle

τ^* permet de mesurer la friction entre le sable constituant la digue et l'eau.

En abscisse, nous avons le nombre de Reynolds sédimentologique :

$$Re^* = \frac{u_* d}{\nu} = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \frac{d}{\nu} = \sqrt{g RS_f} \frac{d}{\nu} \quad \Rightarrow \quad \lambda_{Re^*} = \sqrt{\lambda_x \lambda_{S_f}} \lambda_d \quad (4.11)$$

Re^* permet de caractériser le régime d'écoulement. Il est lisse pour Re^* inférieur à environ 2, rugueux pour Re^* supérieur à environ 200 et de transition pour Re^* entre ces valeurs.

Si τ^* est plus grand que la valeur critique indiquée sur le diagramme (on se situe au-dessus de la courbe bleue), les grains à l'interface sont en mouvement. Au contraire, si τ^* est plus petit que la valeur critique indiquée sur le diagramme (on se situe en dessous de la courbe bleue), les grains à l'interface ne sont pas en mouvement.

On peut observer sur le diagramme de Shields que pour Re^* supérieur à une certaine valeur critique (située entre 70 et 150 [26]), le mouvement des grains n'est que faiblement impacté par Re^* . Au-delà de cette limite, nous pouvons donc considérer que τ^* est la seule variable qui influence la mise en mouvement des grains.

Pour représenter au mieux le transport des sédiments, il faut conserver le diagramme de Shields. Dans l'idéal, il faudrait donc que les facteurs d'échelle de τ^* et de Re^* soient égaux à l'unité. Or, nous ne pouvons pas poser ces deux facteurs égaux. En effet,

$$\lambda_{\tau^*} = \lambda_x^{2/3} \lambda_d^{-2/3} = 1 \quad \Rightarrow \quad \lambda_d = \lambda_x \quad (4.12)$$

$$\lambda_{Re^*} = \lambda_x^{1/3} \lambda_d^{7/6} = 1 \quad \Rightarrow \quad \lambda_d = \lambda_x^{-2/7} \quad (4.13)$$

Si nous voulons mettre à l'échelle le sable utilisé à petite échelle, nous ne pouvons donc pas choisir un diamètre de grains tel que le diagramme de Shields soit conservé.

Nombre de Rouse

Le nombre de Rouse est un nombre adimensionnel qui permet de classer le mode de déplacement des particules de sable. Il est défini comme :

$$z^* = \frac{\omega_s}{\kappa u_*} = \frac{\omega_s}{\kappa} \sqrt{\frac{\rho}{\tau}} = \frac{\omega_s}{\kappa} \frac{1}{\sqrt{g R S_f}} \quad \Rightarrow \quad \lambda_{z^*} = \frac{\lambda_{\omega_s}}{\sqrt{\lambda_x \lambda_{S_f}}} \quad (4.14)$$

avec :

- ω_s la vitesse de chute des grains. Elle peut être calculée comme suit :

$$\omega_s = \frac{(\gamma_s - \gamma) d^2}{18 \rho \nu} \quad \Rightarrow \quad \lambda_{\omega_s} = \lambda_d^2 \quad (4.15)$$

- $\kappa = 0,4$ la constante de von Karman.

Pour conserver le même nombre de Rouse quelle que soit l'échelle de modèle, nous posons :

$$\lambda_{z^*} = \lambda_x^{-1/3} \lambda_d^{11/6} = 1 \quad \Rightarrow \quad \lambda_d = \lambda_x^{2/11} \quad (4.16)$$

Étant donné que notre étude porte sur l'érosion des digues, il est plus intéressant de conserver Re^* ou τ^* que z^* car les deux premières grandeurs caractérisent la mise en mouvement du sable alors que la troisième caractérise le mode de déplacement des particules.

Récapitulatif des facteurs d'échelle

Pour le sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$), nous avons décidé d'utiliser le même sable qui avait été utilisé pour les essais à petite échelle réalisés par Descantons et Dujardin (2014) afin d'étudier les effets d'échelle. Par conséquent, le facteur d'échelle du diamètre des grains est : $\lambda_d = 1$. Les facteurs d'échelle des grandeurs caractérisant les changements morphologiques de la digue présentés ci-dessus sont repris dans le tableau suivant :

Grandeur	Facteur d'échelle pour $\lambda_x = 5$
τ^*	$\lambda_{\tau^*} = \lambda_x^{2/3} \lambda_d^{-2/3} = 2,924$
Re^*	$\lambda_{Re^*} = \lambda_x^{1/3} \lambda_d^{7/6} = 1,710$
z^*	$\lambda_{z^*} = \lambda_x^{-1/3} \lambda_d^{11/6} = 0,585$

TABLE 4.2 – Facteurs d'échelle de τ^* , de Re^* et de z^*

4.3 Caractéristiques de l'écoulement

Une brèche est formée sur le centre de la crête de la digue afin de contrôler l'endroit de la rupture. La surverse de la digue est autorisée uniquement au niveau de cette brèche.

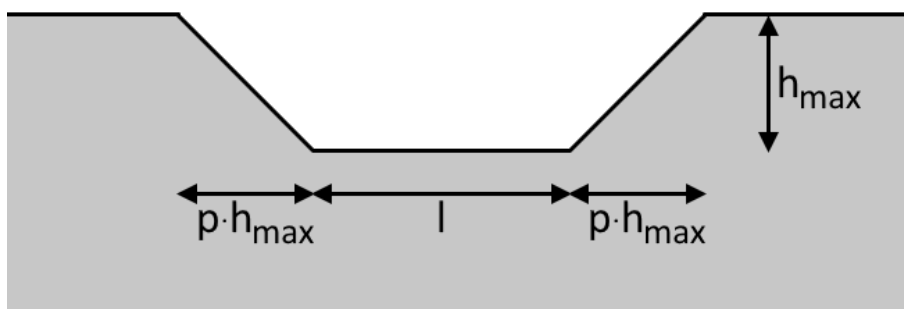


FIGURE 4.3 – Schéma de la brèche

L'écoulement d'eau aura le profil représenté ci-dessous :

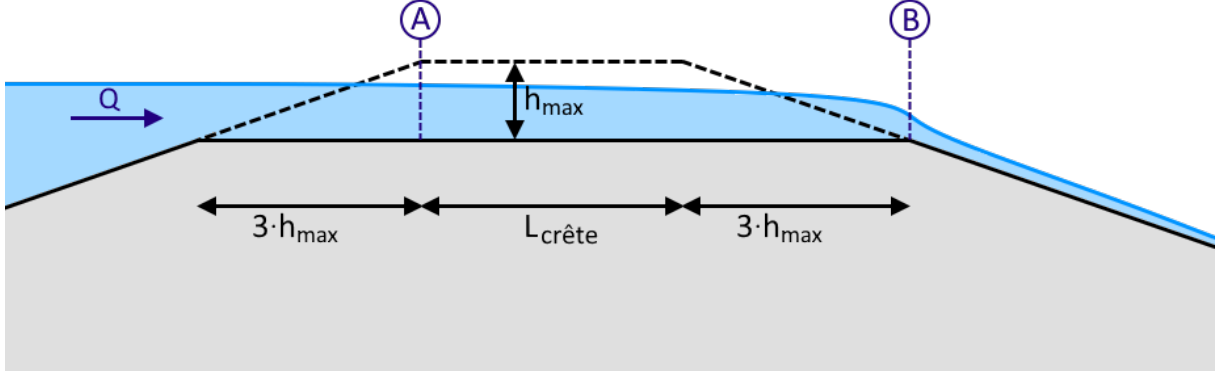


FIGURE 4.4 – Schéma représentant l'écoulement de l'eau sur la brèche

Pour les essais à petite échelle réalisés par Descantons et Dujardin (2014), la largeur de la crête ($L_{\text{crête}}$) est de 0 cm. Pour ceux que nous avons réalisés (à moyenne échelle), cette largeur est de 50 cm (nous utilisons la même plateforme d'essais utilisée par Gilles et Delforge (2023)).

En $\textcircled{\text{B}}$, la hauteur d'eau sur la brèche est la hauteur critique. Cette hauteur est calculée itérativement à partir de cette formule :

$$\frac{Q^2 L_c}{g A_c^3} = \sqrt{1 - S_0^2} \quad (4.17)$$

avec :

- $L_c = l + 2 \cdot p \cdot h_c$ la largeur supérieure de l'écoulement quand la hauteur d'eau est la hauteur d'eau critique.
- $A_c = h_c \cdot (l + p \cdot h_c)$ l'aire de la section de l'écoulement quand la hauteur d'eau est la hauteur d'eau critique.
- $S_0 = 0$ la pente de la brèche.

Entre $\textcircled{\text{A}}$ et $\textcircled{\text{B}}$, le profil est de type H2. Pour connaître la hauteur d'eau en $\textcircled{\text{A}}$, nous allons partir du point $\textcircled{\text{B}}$ et itérer par incrément Δh .

Sachant que :

$$\frac{dh}{ds} = \frac{S_0 - S_f}{\sqrt{1 - S_0^2} - \frac{Q^2 L}{g A^3}} = \frac{N(h)}{D(h)} \quad (4.18)$$

Nous calculons Δs comme :

$$\Delta s = \Delta h \cdot \frac{D(h + \frac{\Delta h}{2})}{N(h + \frac{\Delta h}{2})} \quad (4.19)$$

Sur la pente aval, le profil est de type S2. La hauteur d'eau en bas de cette pente tend vers la hauteur d'eau uniforme. Cette hauteur est calculée itérativement à partir de la formule de Manning :

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S_0^{1/2} \quad (4.20)$$

avec :

- $n = \frac{d^{1/6}}{21,1}$ le coefficient de Manning des grains.
- $A = h \cdot (l + p \cdot h)$ l'aire de la section de l'écoulement. Nous posons comme hypothèse que cette section est identique sur la pente aval.
- $R = \frac{A}{P}$ le rayon hydraulique avec $P = l + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + p^2}$ le périmètre mouillé.
- $S_0 = \frac{1}{3}$ la pente de la pente aval de la digue.

Petite échelle

La brèche utilisée pour les essais à petite échelle réalisés par Descantons et Dujardin (2014) avait les dimensions suivantes pour le sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$) : une largeur inférieure (l) de 3 cm, une hauteur (h_{max}) de 4,67 cm et une inclinaison des berges de 45° (une pente de rive (p) unitaire).

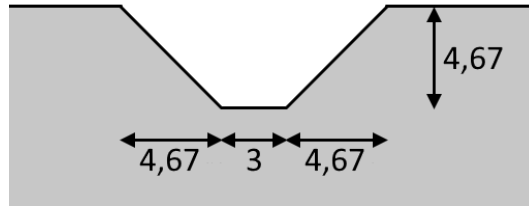


FIGURE 4.5 – Dimensions de la brèche à petite échelle pour le sable moyen [cm] - coupe transversale

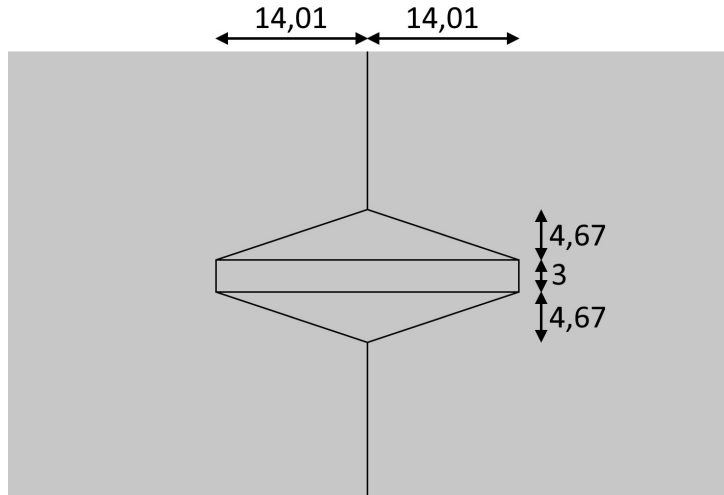


FIGURE 4.6 – Dimensions de la brèche à petite échelle pour le sable moyen [cm] - vue de haut

À petite échelle, la hauteur d'eau sur la brèche en amont (h_A) ne peut dépasser la hauteur de la brèche (h_{max}) car l'eau ne peut passer sur la digue qu'à l'endroit de la brèche

afin de contrôler le lieu de la rupture. Le débit maximum d'eau qui passe par la brèche est alors de $0,65 \text{ l/s}$.

En utilisant les calculs ci-dessus, nous obtenons les diagrammes de Shields à petite échelle en **(B)** :

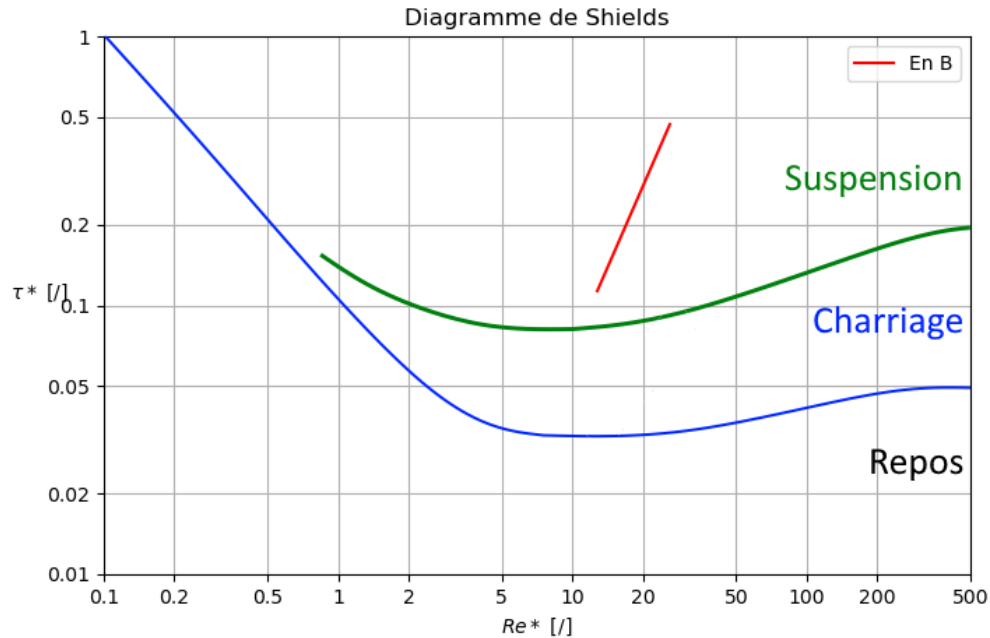


FIGURE 4.7 – Diagramme de Shields en B à petite échelle pour des débits allant de 0,01 l/s jusqu'à 0,65 l/s (valeur maximale pour limiter la surverse au niveau de la brèche) pour le sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$)

Sur la brèche, c'est en **(B)** que les valeurs de Re^* et τ^* sont les plus élevées. Sur la pente aval, c'est en bas de cette pente que Re^* et τ^* sont les plus importants.

Les valeurs de Re^* et τ^* sont plus élevées en bas de la pente aval qu'en **(B)**. Cela signifie que l'érosion devrait démarrer en bas de la pente aval. Or, en analysant quelques expériences, nous pouvons affirmer que l'érosion démarrera en haut de la pente aval.

C'est l'hypothèse que nous avons posée sur la section de l'écoulement sur la pente aval qui implique des valeurs de Re^* et τ^* si élevées en bas de la pente.

Moyenne échelle

Nos essais avec lesquels nous avons comparé les résultats à petites échelles ont une brèche avec les dimensions suivantes : une largeur inférieure (l) de 15 cm, une hauteur (h_{max}) de 20 cm et une pente de rive (p) unitaire.

Les calculs exposés en début de section 4.3 nous permettent aussi d'exprimer le débit d'eau qui passe par la brèche en fonction de la hauteur d'eau sur la brèche.

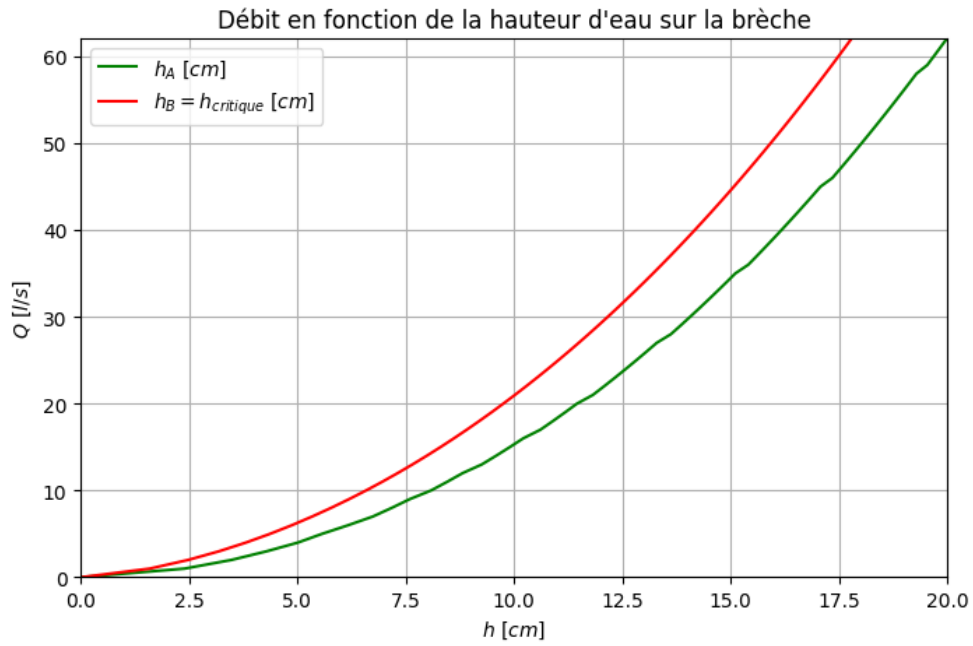


FIGURE 4.8 – Débit passant par la brèche avant érosion en fonction de la hauteur d'eau en amont de la brèche (h_A) et de la hauteur d'eau en aval de la brèche (h_c) pour le sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$)

La hauteur d'eau sur la brèche en amont (h_A) ne doit pas dépasser afin que l'eau ne puisse passer sur la digue qu'à l'endroit de la brèche est de 20 cm (h_{max}). Le débit maximum d'eau qui passera par la brèche est alors de 62 l/s .

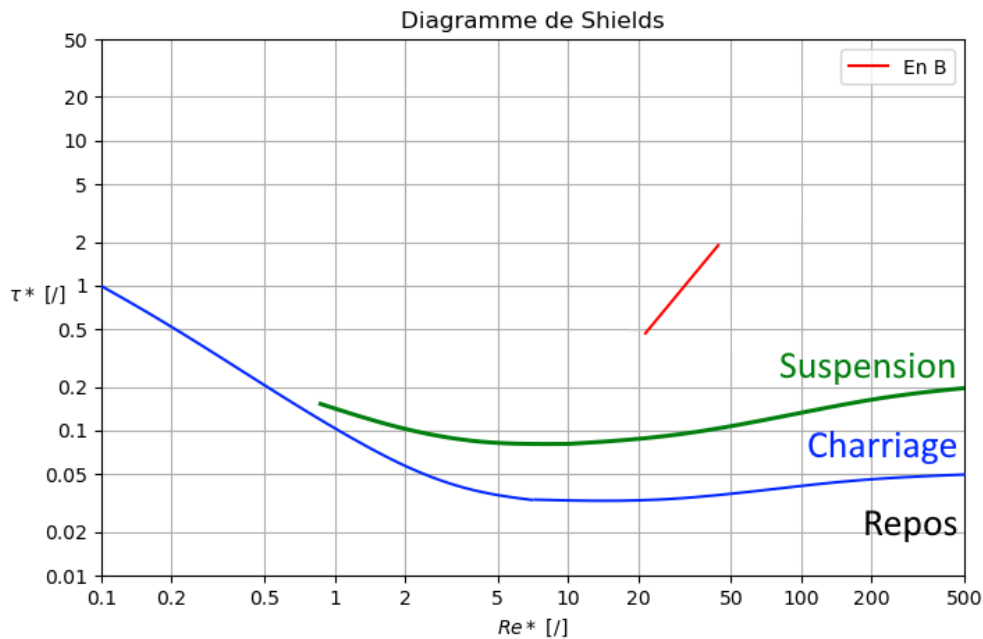


FIGURE 4.9 – Diagramme de Shields en B pour des débits allant de 1 l/s jusqu'à 62 l/s pour le sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$)

Sur le diagramme de Shields ci-dessus, nous pouvons observer que la courbe représentant l'écoulement sur la brèche (en rouge) est au-dessus de la courbe critique (en bleue) pour

une hauteur d'eau sur la brèche en amont (h_A) inférieure à la limite de 20 cm. L'érosion de la digue se produira donc bien avant que le niveau d'eau en amont de la digue atteigne sa crête.

Comparaison petite échelle et moyenne échelle

Les valeurs de Re^* et τ^* obtenues pour les différentes échelles sont reprises sur un même diagramme de Shields ci-dessous :

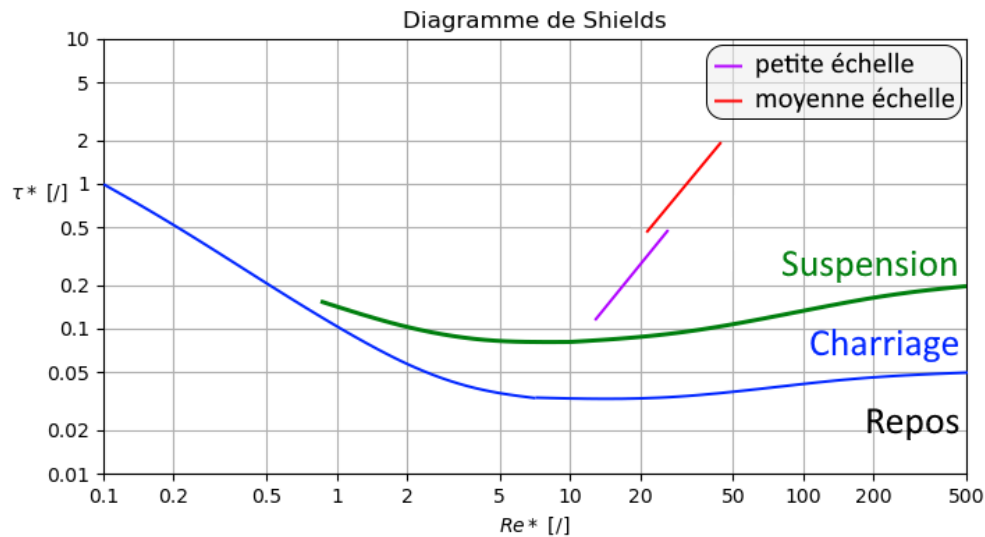


FIGURE 4.10 – Diagramme de Shields en B pour le sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$) à petite échelle (pour des débits allant de 0,01 l/s jusqu'à 0,65 l/s) et à moyenne échelle (pour des débits allant de 1 l/s jusqu'à 62 l/s)

Pour rappel, le sable utilisé est le même que ce soit à petite échelle ou à moyenne échelle. Par conséquent, le facteur d'échelle du diamètre des grains est : $\lambda_d = 1$. Comme mentionné à la section 4.2, les facteurs d'échelle des grandeurs caractérisant les changements morphologiques de la digue sont alors :

Grandeur	Facteur d'échelle pour $\lambda_x = 5$
τ^*	$\lambda_{\tau^*} = \lambda_x^{2/3} \lambda_d^{-2/3} = 2,924$
Re^*	$\lambda_{Re^*} = \lambda_x^{1/3} \lambda_d^{7/6} = 1,710$
z^*	$\lambda_{z^*} = \lambda_x^{-1/3} \lambda_d^{11/6} = 0,585$

TABLE 4.3 – Facteurs d'échelle de τ^* , de Re^* et de z^*

λ_{τ^*} et λ_{Re^*} sont supérieurs à 1. Cela signifie que, pour une brèche et un débit d'eau qui passe par la brèche mis à l'échelle, ces valeurs à moyenne échelle sont supérieures à celles à petite échelle.

Nous pouvons en effet observer sur la figure 4.10 que les points qui représentent l'écoulement sur la brèche à moyenne échelle se situent plus haut et plus à droite sur le diagramme de Shields par rapport aux points qui représentent l'écoulement sur la brèche à petite échelle.

En termes de changement morphologique, cela signifie que l'initiation de l'érosion du sable se produit plus tôt à moyenne échelle qu'à petite échelle (pour un débit de brèche plus faible mis à l'échelle).

Chapitre 5

Setup expérimental

Nous avons mené nos essais dans le laboratoire des recherches hydrauliques du Service Public de Wallonie (SPW), situé à Châtelet. Nous avons exploité la plateforme d'essais spécifiquement équipée qui a été utilisée par Gilles et Delforge (2023).

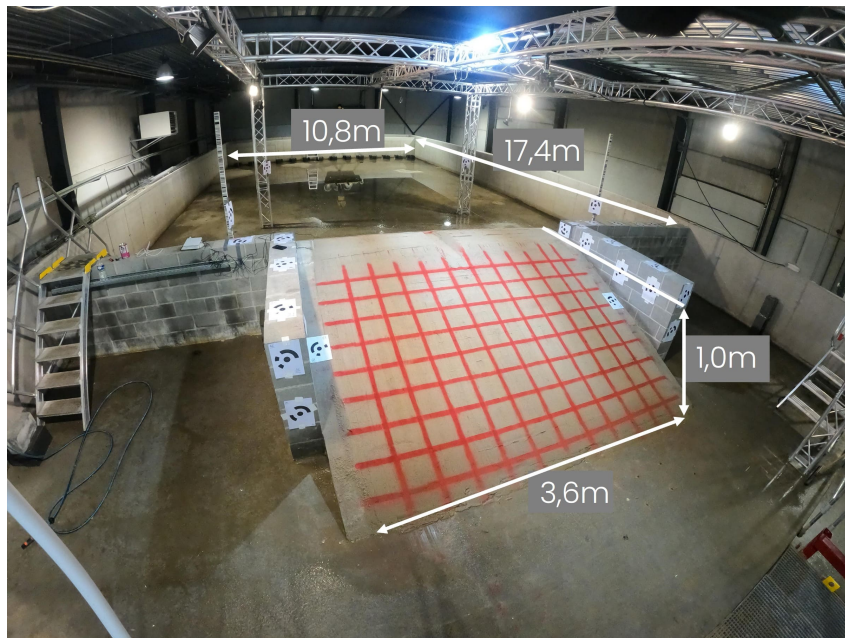


FIGURE 5.1 – Plateforme d'essais et dimensions générales

Trois types d'essais ont été réalisés :

1. **H**auteur constante d'eau dans le bassin et digue constituée de sable **f**in (diamètre médian des grains : $d_{50} = 0,314$ mm), noté **Hf**
2. Débit (**Q**) constant alimentant le bassin et digue constituée de sable **f**in (diamètre médian des grains : $d_{50} = 0,314$ mm), noté **Qf**
3. Débit (**Q**) constant alimentant le bassin et digue constituée de sable **m**oyen (diamètre médian des grains : $d_{50} = 0,632$ mm), noté **Qm**

Pour le travail réalisé par Gilles et Delforge (2023), le premier type d'essai (**Hf**) a déjà été réalisé une première fois. Afin de s'assurer de la reproductibilité de cet essai, nous l'avons répété.

Une hauteur constante d'eau dans le bassin est ce qui se rapproche le plus de la situation réelle. En effet, la hauteur en amont des digues qui stockent une grande quantité d'eau reste plus ou moins constante.

Le but des essais à débit constant est d'étudier l'influence du type de sol sur l'érosion de la digue, en réalisant des essais d'abord avec un sable fin et ensuite avec un sable moyen. Le choix du débit constant a pour objectif de comparer nos résultats à ceux des essais à petite échelle réalisés par Descantons et Dujardin (2014). Pour pouvoir les comparer, il faut la même condition frontière, c'est-à-dire le même débit alimentant le bassin. Pour les essais à petite échelle, ce débit était constant et égal à 4 l/s. En le multipliant par le facteur d'échelle du débit ($\lambda_Q = 55,902$, voir tableau 4.1), nous obtenons 224 l/s. C'est donc la valeur du débit qui doit alimenter le bassin pour les essais à débit constant.

Les essais réalisés sont repris dans le tableau ci-dessous :

N°	Date	Condition frontière	d_{50} [mm]	H_{digue} [m]	$H_{brèche}$ [m]	Catégorie
Hf1	25/05/2023	Hauteur constante d'eau dans le bassin égale à 0,95 m	0,314	1	0,90	valide
Hf2	14/09/2023	Hauteur constante d'eau dans le bassin égale à 0,98 m	0,314	1	0,93	valide
Qf1	22/02/2024	Débit constant alimentant le bassin égal à 224 l/s	0,314	1	0,90	non valide
Qf2	07/03/2024	Débit constant alimentant le bassin égal à 224 l/s	0,314	1	0,90	non valide
Qf3	14/03/2024	Débit constant alimentant le bassin égal à 224 l/s	0,314	1	0,80	valide
Qf4	10/04/2024	Débit constant alimentant le bassin égal à 224 l/s	0,314	1	0,80	valide
Qm1	28/03/2024	Débit constant alimentant le bassin égal à 224 l/s	0,632	1	0,80	valide
Qm2	24/04/2024	Débit constant alimentant le bassin égal à 224 l/s	0,632	1	0,80	valide

TABLE 5.1 – Résumé des essais réalisés avec d_{50} = le diamètre médian des grains de sable, H_{digue} = la hauteur initiale de la digue et $H_{brèche}$ = la hauteur initiale du fond de la brèche

Les essais "valides" sont ceux durant lesquels la condition frontière est conforme à celle attendue. Pour tester la reproductibilité des essais, il faut en réaliser 2 "valides".

Les essais **Qf1** et **Qf2** sont "non valides". Ils ont amené respectivement à une surverse de la digue et à un débit d'entrée différent de celui désiré. Ils nous ont permis d'adapter la méthode d'exécution des essais pour un débit constant alimentant le bassin en changeant le mode de remplissage du bassin et en approfondissant la brèche initiale. En effet, nous avons fait ces essais en suivant la méthode d'exécution utilisée par Gilles et Delforge (2023) qui avait été conçue pour une hauteur constante d'eau dans le bassin. Pour les essais à hauteur constante, nous imposons d'atteindre puis de maintenir un certain niveau d'eau dans le bassin, donc en le choisissant inférieur au niveau de la crête de la digue, le risque de surverse est proche de zéro. Pour les essais à débit constant, il faut s'assurer que la

brèche initiale soit suffisamment grande pour permettre à l'eau de s'évacuer du bassin par la brèche avant la surverse complète de la digue.

Nous exposons dans ce chapitre les dimensions du bassin et de la digue et les étapes de la construction de la digue. Nous présentons également les instruments de mesure que nous avons utilisés et la manière dont nous avons traité les données de tous les essais. L'essai Qf4 est pris comme exemple pour illustrer le traitement des données.

5.1 Description du bassin en amont de la digue

Toutes nos expériences ont été conduites dans un laboratoire spécifiquement équipé comprenant un bassin d'eau alimenté par cinq pompes. L'eau pompée provient de la Sambre et y est rejetée après l'essai.

Le bassin en amont de la digue est de 17,4 mètres de long sur 10,8 mètres de large.

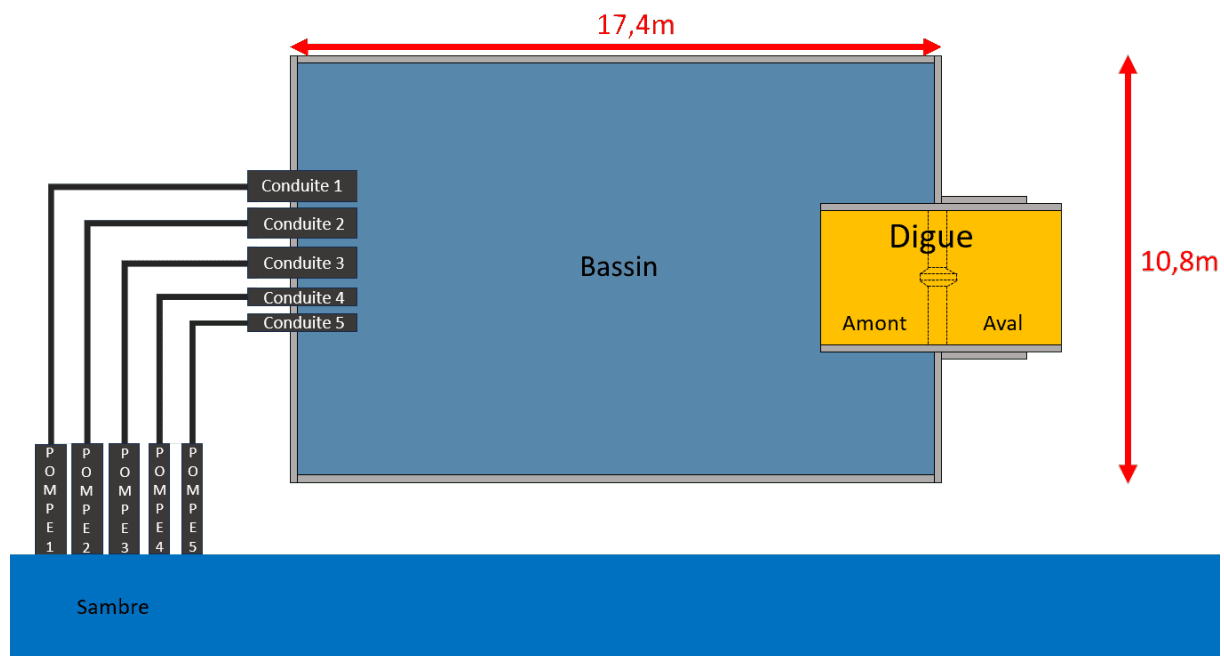


FIGURE 5.2 – Schéma du setup expérimental et dimensions du bassin

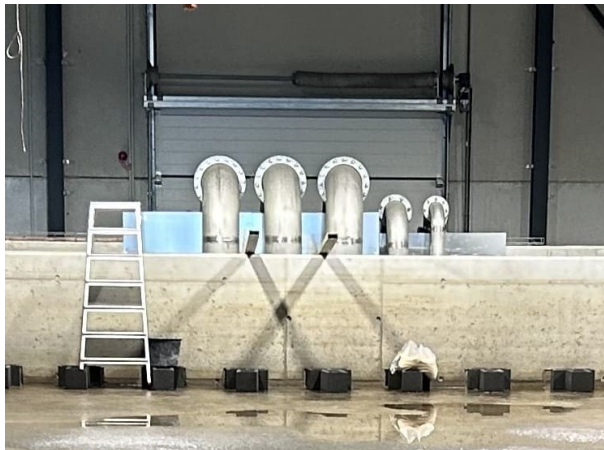
Les cinq pompes positionnées à l'arrière du bassin peuvent générer un débit allant jusqu'à environ 900 l/s. Un automate contrôle ces pompes. Il y a deux modes de fonctionnement : "maintenir une hauteur constante d'eau" ou "fournir un débit constant". Pour le premier mode, il faut entrer une hauteur d'eau de consigne. Le débit d'entrée dans le bassin est relativement constant jusqu'à ce que ce niveau d'eau dans le bassin soit atteint (il est calculé par l'automate comme la moyenne des hauteurs d'eau mesurées par les sondes de niveau présentes dans le bassin) puis les pompes s'arrêtent. Ensuite, les pompes se rallument lorsque le niveau d'eau dans le bassin diminue afin de le maintenir constant. Pour le deuxième mode, il faut entrer un débit de consigne. Le débit d'entrée dans le bassin est alors égal à cette valeur.



(a) Pompes d'alimentation



(b) Conduites vues de l'arrière du bassin



(c) Conduites vues du bassin

FIGURE 5.3 – Pompes d'alimentation et conduites

Pour les essais **Hf1** et **Hf2**, le mode de fonctionnement des pompes était "maintenir une hauteur constante d'eau". Pour les essais **Qf1** et **Qf2**, nous avons gardé ce mode de fonctionnement pour remplir le bassin avec une hauteur de consigne inférieure à la hauteur initiale du fond de la brèche. Une fois ce niveau atteint, nous sommes passés au mode de fonctionnement "fournir un débit constant".

L'essai **Qf1** n'a pas été concluant. Suite au passage de l'option de remplissage "maintenir une hauteur constante d'eau" à "fournir un débit constant", un débit erroné de 1000 l/s a été injecté dans le bassin (erreur de paramétrage de l'automate). Bien que le débit ait été réajusté à 224 l/s, cela n'a pas été effectué suffisamment rapidement. En conséquence, face à ce débit élevé, le niveau d'eau dans le bassin est monté au-dessus de la crête de la digue. La surverse ne s'est donc pas limitée à la brèche, mais s'est étendue à l'ensemble de la digue, entraînant l'échec de l'essai.

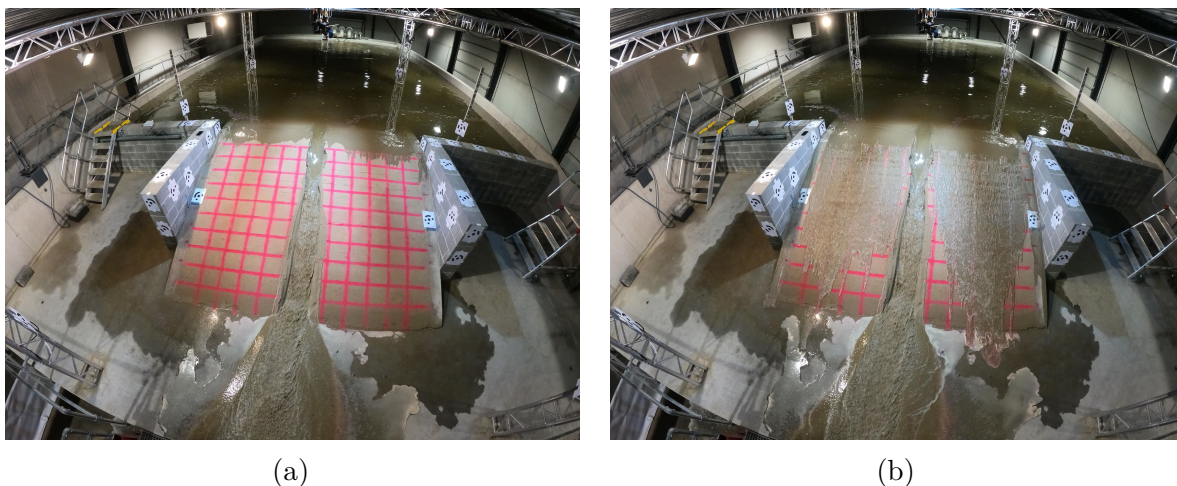


FIGURE 5.4 – Photos prises pendant l'essai **Qf1**

Durant les premières minutes de l'essai **Qf2**, une des pompes était défaillante. En effet, elle fonctionnait à sa capacité maximale. Alors que le niveau d'eau dans le bassin s'approchait de la crête de la digue, nous avons arrêté les pompes pour éviter tout débordement. Ensuite, les pompes ont été rallumées avec un débit de consigne égal à 150 l/s, inférieur au débit souhaité de 224 l/s.

Après les essais **Qf1** et **Qf2**, nous avons décidé de changer le mode de remplissage du bassin en faisant fonctionner les pompes en mode "fournir un débit constant" dès le début afin d'éviter tout problème lié au changement du mode de fonctionnement des pompes.

5.2 Dimensions de la digue

La digue a les dimensions suivantes :

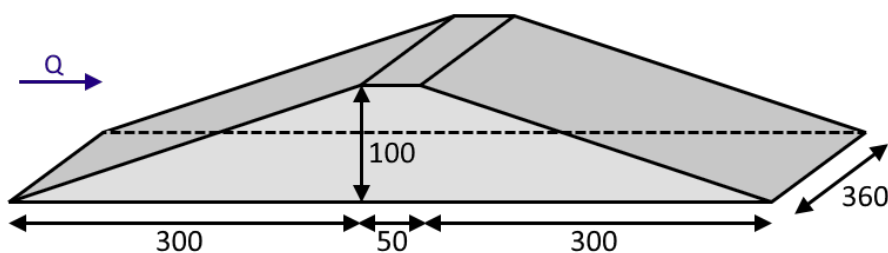


FIGURE 5.5 – Schéma représentant la digue [cm]

Ces dimensions sont les mêmes que celles de la digue de l'essai **Hf1** réalisé par Gilles et Delforge (2023).

Afin de reproduire ces dimensions et de faciliter la construction de la digue, des murets modèles construits avec des blocs de béton sont installés de chaque côté de celle-ci.



FIGURE 5.6 – Murets modèles

Une brèche est creusée au milieu de la crête de la digue afin de contrôler l'endroit de la rupture. Comme pour les dimensions de la digue, les dimensions de la brèche ont d'abord été conservées. Pour les essais **Hf1**, **Qf1** et **Qf2**, la brèche avait donc les dimensions suivantes : une largeur inférieure l de 15 cm, une profondeur h_{max} de 10 cm et une inclinaison des berges de 45° (une pente de rive p unitaire).

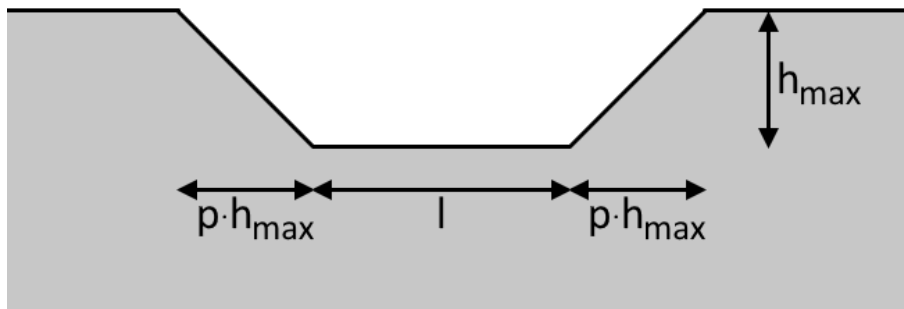


FIGURE 5.7 – Schéma représentant la brèche

Par rapport à l'essai **Hf1**, la brèche de l'essai **Hf2** était moins profonde de 3 cm. Le niveau d'eau de consigne a donc été augmenté de 3 cm.

Suite à la surverse complète de la digue lors de l'essai **Qf1** et le risque de surverse lors de l'essai **Qf2**, nous avons décidé d'approfondir la brèche pour les essais suivants. La largeur inférieure initiale de la brèche a été maintenue à 15 cm et les berges de celle-ci sont restées inclinées à 45° mais la profondeur h_{max} est passée de 10 cm à 20 cm.

5.3 Étapes de construction de la digue

Étape 1 - Pose du drain

La première étape de construction de la digue est la pose du drain enveloppé dans un géotextile. Ce dispositif permet d'évacuer l'eau s'infiltrant au sein de la digue pour éviter une rupture par infiltration. L'eau passant à travers le drain est acheminée directement sous le bassin et dirigée vers un déversoir qui est positionné à l'extérieur du bassin et qui permet de déterminer le débit de drainage. Le calcul de ce débit est exprimé à la section 5.4.3.



(a)



(b)

FIGURE 5.8 – Photos du drain placé avant de poser le sable

Étape 2 - Pose du sable

Ensuite, nous procédons à la pose de la première couche de sable pour construire notre digue. Le sable est pris dans un silo et amené à l'aide d'un chargeur sur pneus au niveau de l'emplacement de la digue, entre les murets modèles (voir les photos de la figure 5.9). Une fois le tas de sable déposé, il est reparti uniformément sur la surface avec des pelles.

Cette opération se fait en plusieurs couches successives d'épaisseurs de 15 à 20 centimètres. Les blocs de béton des murets modèles, avec leur hauteur standard de 20 cm, servaient de repère visuel.



(a)



(b)



(c)

FIGURE 5.9 – Photos prises lors de la pose du sable

Étape 3 - Humidification du sable

Avant de compacter chaque couche de sable, il est nécessaire de l'humidifier afin d'obtenir une compaction optimale.



FIGURE 5.10 – Photos prises lors de l’humidification du sable

Sur chaque couche de sable, après arrosage, nous prélevons un échantillon de sable. Ensuite, nous calculons sa teneur en eau. Pour une compaction optimale, elle doit être la plus proche possible de l’optimum Proctor (14% pour le sable fin et 10% pour le sable moyen) déterminé grâce à l’essai Proctor (à la section 3.2).

Pour calculer la teneur en eau de l’échantillon de sable, nous commençons par mesurer sa masse humide m_{humide} , c’est-à-dire sa masse juste après l’avoir prélevé. Puis, nous chauffons le sable à plusieurs reprises jusqu’à ce que sa masse ne diminue plus, indiquant que toute l’eau a été évaporée. L’échantillon est donc sec et nous pouvons mesurer sa masse m_{sec} . La teneur en eau est alors calculée en utilisant la formule suivante :

$$\text{teneur en eau } [\%] = \frac{m_{humide} [g] - m_{sec} [g]}{m_{sec} [g]} \cdot 100 \quad (5.1)$$

Pour l’essai **Qf4**, nous obtenons les valeurs suivantes :

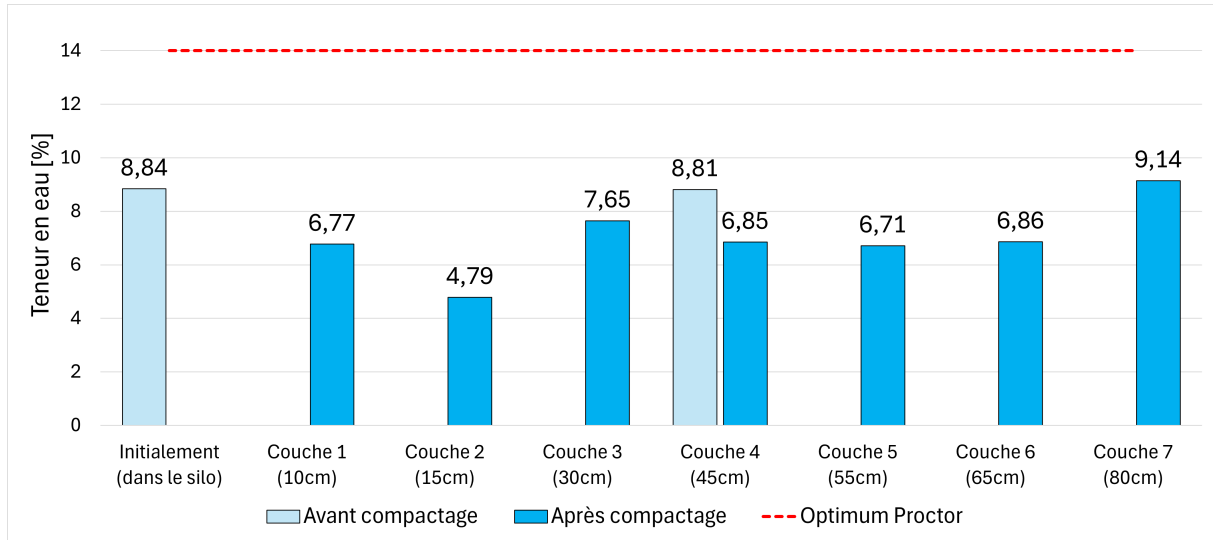


FIGURE 5.11 – Essai **Qf4** : Teneur en eau des différentes couches de sable

Pour les essais de type **Hf**, des échantillons de sable ont été prélevés avant le compactage de chaque couche de sable (étape 4 de la construction de la digue). Pour les essais des types **Qf** et **Qm**, ils ont été en majorité prélevés après le compactage.

Dans ce cas, leur teneur en eau ne reflète pas fidèlement l'humidification de la couche de sable pendant la compaction, car en compactant le sable, l'eau descend dans les couches inférieures et l'échantillon est prélevé à la surface de la couche de sable. Ils nous permettent néanmoins d'avoir une borne inférieure de la teneur en eau de la couche de sable pendant sa compaction.

Après le compactage du sable, l'échantillon est prélevé dans un cylindre creux de volume intérieur : $V = 90 \text{ cm}^3$. Nous pouvons donc calculer sa masse volumique humide ρ_{humide} (la masse volumique de l'échantillon juste après l'avoir prélevé) et sa masse volumique sèche $\rho_{sèche}$ (la masse volumique de l'échantillon après que toute l'eau se soit évaporée) :

$$\rho_{humide} = \frac{m_{humide}}{V} \quad \text{et} \quad \rho_{sèche} = \frac{m_{sec}}{V} \quad (5.2)$$

Pour l'essai **Qf4**, nous obtenons les valeurs suivantes :

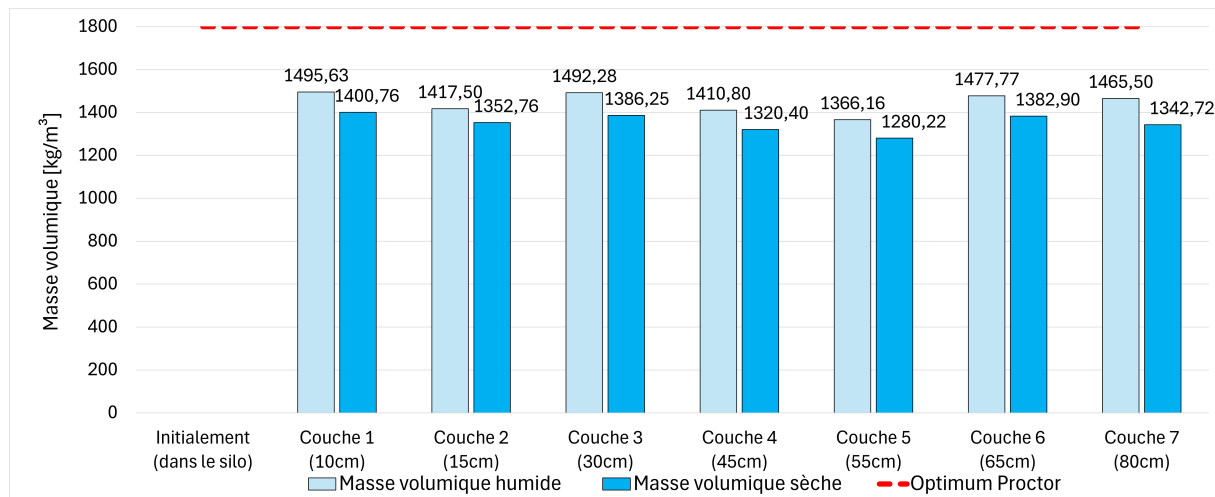


FIGURE 5.12 – Essai Qf4 : Masses volumiques humide et sèche des différentes couches de sable

Pour une compaction optimale, la masse volumique sèche doit tendre vers l'optimum Proctor. Comparer la masse volumique sèche du sable à la valeur de l'optimum Proctor nous permet donc de déterminer si le sable est correctement compacté. De plus, en les comparant à celles d'autres essais (comme nous le faisons à la section 6), nous pouvons déterminer si une digue a été plus ou moins bien compactée qu'une autre.

Étape 4 - Compactage du sable

Une fois le sable humidifié, le compactage est effectué en utilisant une dameuse¹ de masse égale à 70 kg. Cette machine est utilisée pour compacter la couche de sable en passant 3 à 4 fois sur toute la surface de la couche de sable. Cette dameuse applique une pression de surface de $8,1 \text{ N/cm}^2$.

1. Détails de la machine : [1].



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 5.13 – Photos prises lors du compactage du sable

Étape 5 - Répétition des étapes 2 à 4

Les étapes 2 (pose du sable), 3 (humidification du sable) et 4 (compactage du sable) sont répétées pour les différentes couches de sable de 15 à 20 cm d'épaisseur jusqu'à atteindre la hauteur souhaitée de 1 mètre (hauteur de la digue).



(a)



(b)



(c)

FIGURE 5.14 – Photos prises après avoir compacté une (a), deux (b) et cinq (c) couches de sable

Étape 6 - Formation des pentes

Une fois que la hauteur des différentes couches de sable atteint 1 m (la hauteur de la digue), on passe à l'étape de formation des pentes. Cette opération consiste à tirer sur le sable à l'aide d'une longue barre métallique. Les extrémités de cette barre sont posées sur les murets modèles au niveau de la crête de la digue. La barre est ensuite tirée vers le bas de la pente amont afin d'obtenir une surface lisse et régulière le long de cette pente de la digue.

Ce qui vient d'être fait sur la pente amont est ensuite réitéré sur la pente aval.



(a)



(b)



(c)

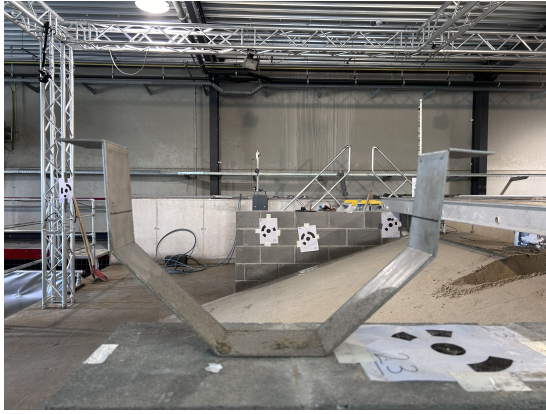


(d)

FIGURE 5.15 – Photos prises lors de la formation de la pente aval

Étape 7 - Formation de la brèche

Une fois les pentes formées, nous procédons à la formation de la brèche. Pour ce faire, nous utilisons une pièce métallique de la forme de la brèche souhaitée (voir figure 5.16a). Nous creusons petit à petit le centre de la crête, dans l'axe longitudinal de la digue, grâce à ce gabarit. Au fur et à mesure, nous enlevons délicatement le surplus de sable. La brèche est ainsi formée selon notre forme prédéfinie.



(a)



(b)



(c)

FIGURE 5.16 – Photos prises lors de la formation de la brèche

5.4 Instruments de mesure

5.4.1 Débitmètres

Sur chaque pompe alimentant le bassin en eau se trouve un débitmètre. Cet instrument de mesure est indispensable pour mesurer avec précision le volume d'eau fourni par chaque pompe pendant un temps donné.

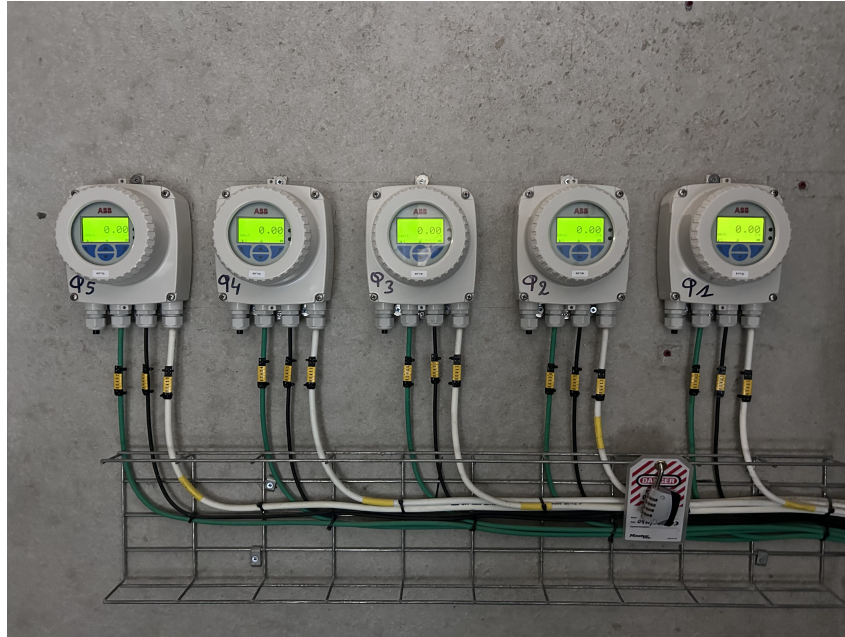


FIGURE 5.17 – Cinq débitmètres connectés chacun à une pompe

Pour connaître le débit alimentant le bassin, nous additionnons les débits fournis par les cinq pompes.

Pour fournir un débit constant de 224 l/s pour l'essai **Qf4**, nous n'avons pas eu besoin de toutes les pompes. Nous pouvons voir sur le graphique ci-dessous les débits fournis par les deux pompes qui ont été nécessaires.

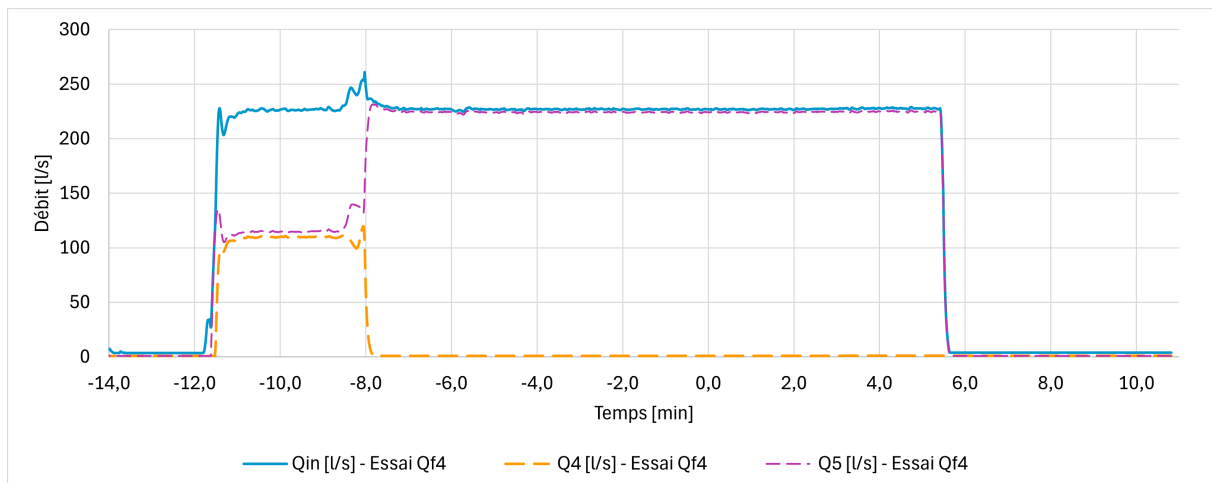


FIGURE 5.18 – Essai **Qf4** : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}) et des débits fournis par les pompes 4 et 5 (Q_4 et Q_5) en fonction du temps

Le temps $t = 0$ s (pour tous les graphiques de ce rapport) correspond au moment où l'écoulement débute sur la pente aval. Grâce aux caméras, nous pouvons identifier la photo qui correspond à ce temps initial. Nous pouvons aussi identifier la photo sur laquelle le niveau d'eau dans le bassin atteint sa valeur maximale. Nous savons à quelle fréquence les photos ont été prises. Nous pouvons donc connaître le temps qui s'est écoulé entre ces deux photos. Nous allons nous servir de la courbe du niveau d'eau dans le bassin (obtenue grâce aux sondes comme expliqué ci-dessous) pour la mise à zéro des données. En effet,

nous savons alors à quel temps le niveau d'eau dans le bassin a atteint sa valeur maximale.

Identifier la photo sur laquelle le niveau d'eau dans le bassin atteint sa valeur maximale n'est pas si simple en pratique. Cette méthode de mise à zéro des essais n'est donc pas parfaitement précise.

5.4.2 Sondes hydrostatiques et ultrasoniques

Des sondes de deux types sont utilisées pour mesurer le niveau d'eau dans le bassin :

- **Des sondes ultrasoniques**

Elles ont une précision allant jusqu'au millimètre près, mais leur plage de mesure est limitée, s'étendant entre 85 cm et 1 mètre de hauteur d'eau.

- **Des sondes hydrostatiques**

Elles offrent une couverture étendue du niveau d'eau, mais avec une précision moindre.



FIGURE 5.19 – Sondes ultrasoniques

Voici un plan montrant la position des différentes sondes dans le bassin. Les sondes hydrostatiques sont représentées en vert, tandis que les sondes ultrasoniques sont en bleu. Ces sondes nous permettent de fournir l'évolution des hauteurs d'eau dans le bassin pendant la durée de l'essai.

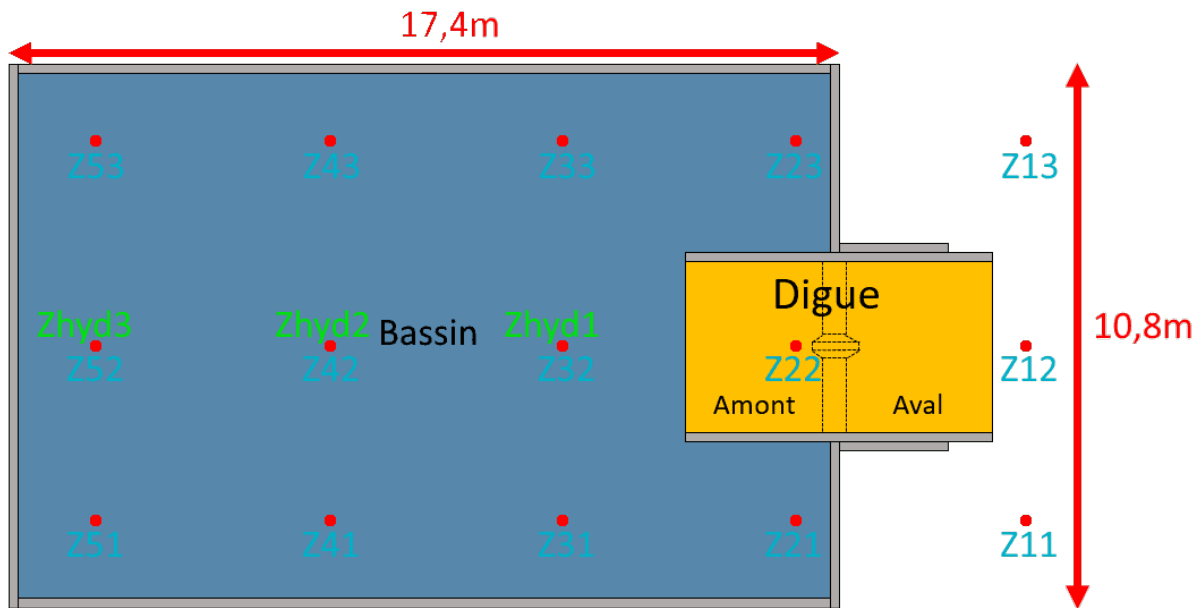


FIGURE 5.20 – Plan de l'emplacement des sondes hydrostatiques (en vert) et ultrasoniques (en bleu)

Les sondes à ultrasons Z11, Z12 et Z13 ne sont pas dans le bassin et la sonde Z22 est sous la digue. Nous ne nous y intéressons donc pas.

Les autres sondes nous permettent d'obtenir l'évolution de la hauteur d'eau à différents endroits du bassin durant l'essai :

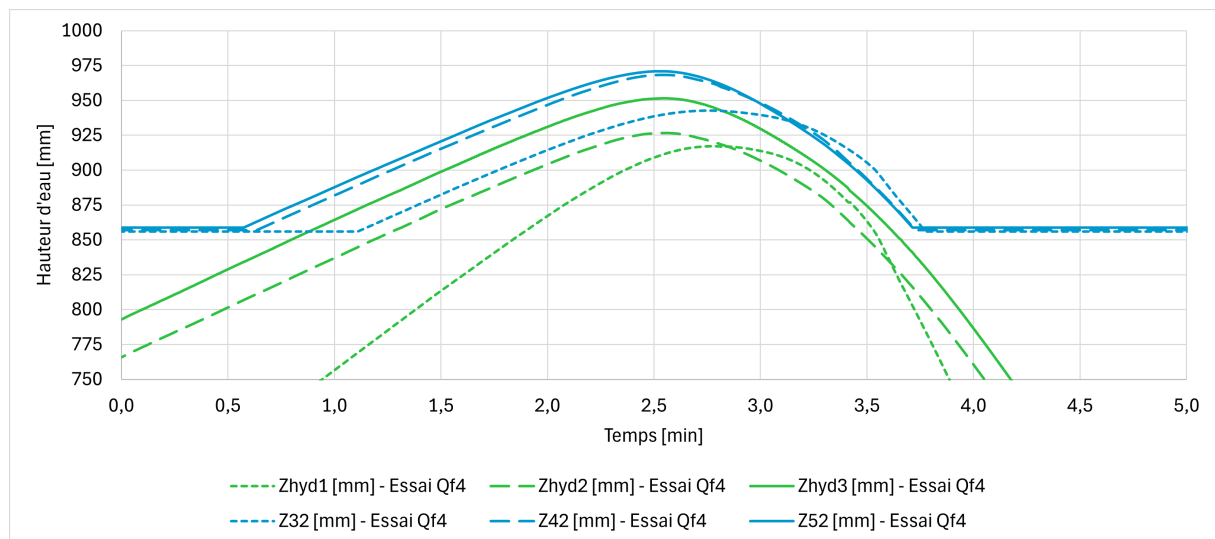


FIGURE 5.21 – Essai **Qf4** : Évolution de la hauteur d'eau à différents endroits du bassin en fonction du temps

Nous remarquons qu'il y a une différence de 20 mm à 40 mm entre la hauteur d'eau donnée par les sondes hydrostatiques et celle donnée par les sondes à ultrasons placées aux mêmes endroits. Étant donné que les sondes à ultrasons sont plus précises que les sondes hydrostatiques, nous corrigeons les hauteurs des sondes hydrostatiques afin qu'elles correspondent à celles mesurées par les sondes à ultrasons.

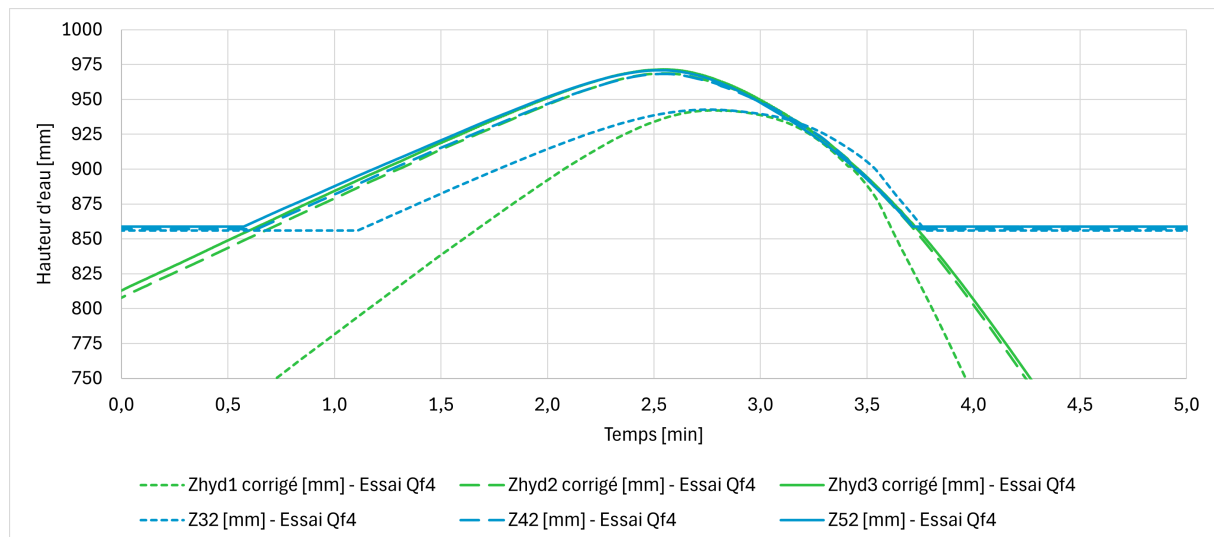


FIGURE 5.22 – Essai **Qf4** : Évolution de la hauteur d'eau à différents endroits du bassin en fonction du temps

Nous observons que parmi les sondes hydrostatiques, c'est la Zhyd3 qui nous donne une hauteur d'eau dans le bassin après correction la plus proche de celle obtenue par la sonde à ultrasons située au même endroit (Z52). Les sondes à ultrasons sont plus précises, mais leur gamme de mesure est limitée à minimum 0,85 m. Pour afficher l'évolution de la hauteur d'eau dans le bassin lors des différents essais, nous allons donc utiliser les données (corrigées si nécessaire) obtenues par la sonde Zhyd3.

5.4.3 Déversoir

Pour les essais avec un débit constant alimentant le bassin, un déversoir a été positionné à l'extérieur du bassin et a été relié au drain situé sous la digue. Il nous permet de mesurer le débit d'eau qui passe par le drain lors de nos expériences.

Sur la figure ci-dessous, la flèche rouge représente la conduite qui amène l'eau du drain jusqu'au déversoir.



FIGURE 5.23 – Drain (à gauche) et déversoir (à droite)

Une sonde notée ZDev2, placée au-dessus du déversoir, nous permet de connaître la hauteur d'eau qu'il y a dans le déversoir à partir du point bas de l'échancrure triangulaire.

Le débit d'eau qui arrive dans le déversoir est calculé sur base de cette formule d'un déversoir à 90° ($\theta = 90^\circ$, l'angle d'ouverture de l'échancrure triangulaire) :

$$Q_{\text{drain}} = C_e \frac{8}{15} \tan\left(\theta \frac{\pi}{180 \cdot 2}\right) (Z_{\text{Dev2}} + 0,85 \cdot 10^{-3})^2 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (Z_{\text{Dev2}} + 0,85 \cdot 10^{-3})} \quad [m^3/s] \quad (5.3)$$

avec :

$$C_e = -0,00554 \left(\frac{Z_{\text{Dev2}}}{p}\right)^4 + 0,02128 \left(\frac{Z_{\text{Dev2}}}{p}\right)^3 - 0,0141 \left(\frac{Z_{\text{Dev2}}}{p}\right)^2 + 0,0025 \left(\frac{Z_{\text{Dev2}}}{p}\right) + 0,57798 \quad (5.4)$$

$p = 0,4 \text{ m}$ est la hauteur du point bas de l'échancrure triangulaire par rapport au fond du déversoir.

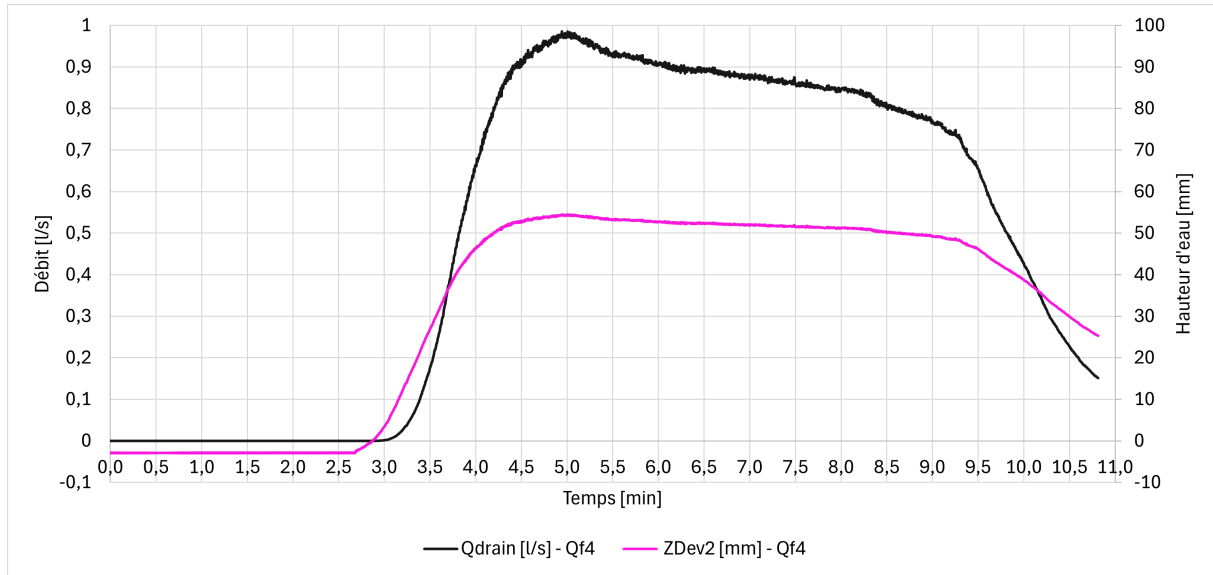


FIGURE 5.24 – Essai **Qf4** : Evolution du débit passant par le drain (Q_{drain}) et de la hauteur d'eau à partir du point bas de l'échancrure triangulaire dans le déversoir (Z_{Dev2}) en fonction du temps

En analysant l'évolution temporelle du fond de la brèche (données exposées à la section 5.4.5), nous pouvons affirmer qu'il n'y a plus de sable au-dessus du drain après trois minutes. Le débit de drain que nous observons à la figure 5.24 après trois minutes ne représente par conséquent pas l'eau qui s'infiltre dans la digue, mais simplement l'eau qui est en contact direct avec le drain.

Avant ces trois minutes, aucune infiltration n'est détectée par le drain.

Nos essais se sont déroulés assez rapidement. En moyenne, il se passe environ 15 minutes entre l'allumage des pompes et le moment où le drain est en contact direct avec l'écoulement dans la brèche. L'eau n'a donc pas eu le temps de s'infiltre dans la digue et d'aller jusqu'au drain avant que le fond de la brèche atteigne le drain.

En situation réelle, l'eau en amont des digues a le temps de s'infiltre. En arrêtant les pompes avant que l'eau n'atteigne la brèche, puis en laissant le temps à l'eau de s'infiltre avant de poursuivre l'essai, nous aurions pu nous rapprocher d'une situation réelle et ainsi observer possiblement un débit de drain dû à l'infiltration d'eau dans la digue.

5.4.4 Calcul du débit de brèche

Grâce aux débitmètres et aux sondes, nous avons le débit qui alimente le bassin Q_{in} et les hauteurs d'eau à différents endroits du bassin durant l'essai Z . Pour calculer le débit qui passe par la brèche $Q_{\text{brèche}}$, nous équilibrons le débit qui entre dans le bassin avec le débit sortant :

$$Q_{\text{in}} = A_{\text{res}} \cdot \frac{dZ}{dt} + Q_{\text{brèche}} + Q_{\text{drain}} \quad \Rightarrow \quad Q_{\text{brèche}} = Q_{\text{in}} - A_{\text{res}} \cdot \frac{dZ}{dt} - Q_{\text{drain}} \quad (5.5)$$

avec :

- $A_{res} = 189,864 \text{ m}^2$ l'aire du bassin.
- $\frac{dZ}{dt}$ la variation de hauteur d'eau dans le bassin dans le temps que nous approximations par :

$$\frac{dZ}{dt} \approx \frac{\Delta Z_{hyd3}}{\Delta t} \quad (5.6)$$

avec $\Delta Z_{hyd3}(t_i) = Z_{hyd3}(t = t_i) - Z_{hyd3}(t = t_i - 1,2s)$ et $\Delta t = 1,2s$. Comme expliqué à la section 5.4.2, nous prenons les données corrigées obtenues par la sonde Zhyd3 comme repère pour l'évolution de la hauteur d'eau dans le bassin.

Grâce aux instruments de mesure et aux calculs présentés ci-dessus, nous pouvons avoir l'évolution du débit entrant dans le bassin, du débit de brèche et de la hauteur d'eau dans le bassin au cours du temps :

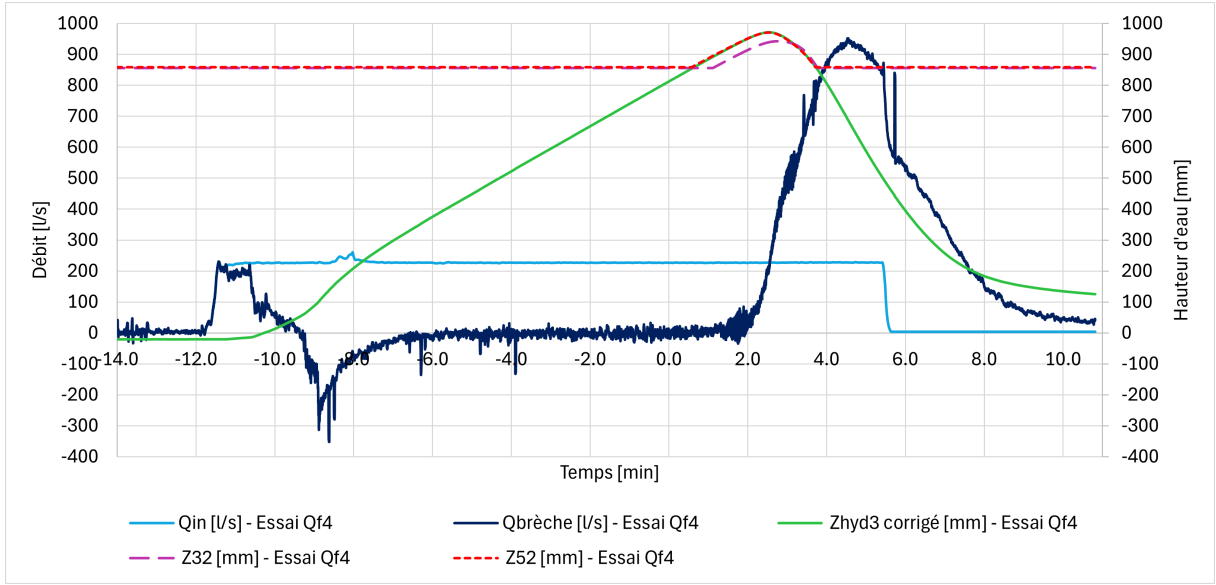


FIGURE 5.25 – Essai **Qf4** : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3} , Z_{32} et Z_{52}) en fonction du temps

L'écoulement sur la pente aval commence en $t = 0 \text{ min}$ donc le débit de brèche devrait être nul avant cet instant. De plus, l'eau ne peut que sortir du bassin via la brèche et non y entrer. $Q_{brèche}$ ne devrait alors être que positif. Or, le débit de brèche calculé est positif entre environ $t = -11,5 \text{ min}$ et $t = -9,0 \text{ min}$ et négatif entre environ $t = -9,0 \text{ min}$ et $t = -5,5 \text{ min}$. Ceci n'a physiquement pas de sens. Mathématiquement, ceci est dû au fait qu'au lieu de détecter une augmentation linéaire du niveau d'eau ($\frac{dZ}{dt} = \frac{Q_{in}}{A_{res}}$) dès le démarrage des pompes en $t = -11,5 \text{ min}$, la sonde hydrostatique 3 n'a pas détecté que l'eau dans le bassin augmentait entre $t = -11,5 \text{ min}$ et $t = -9,0 \text{ min}$ puis a détecté une brusque augmentation entre $t = -9,0 \text{ min}$ et $t = -5,5 \text{ min}$.

Afin d'atténuer les fluctuations de la courbe du débit de brèche, nous effectuons une moyenne mobile. La valeur du débit de brèche lissé à l'instant t est la moyenne des valeurs du débit de brèche calculé précédemment entre les temps $t - 3 \text{ s}$ et $t + 3 \text{ s}$. La courbe lissée obtenue est illustrée à la figure 5.26.

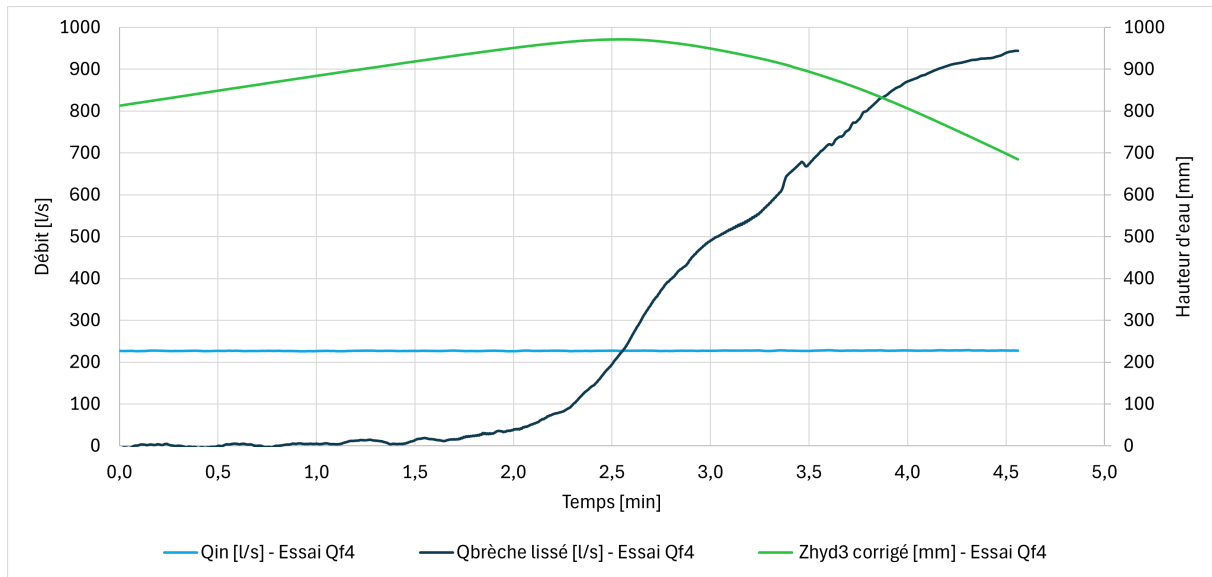


FIGURE 5.26 – Essai **Qf4** : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche lissé par moyenne mobile ($Q_{brèche\ lissé}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3} , Z_{32} et Z_{52}) en fonction du temps

Sur ce graphique, nous affichons les données uniquement dans l'intervalle de temps : $[t = 0,0\ min; t = 4,56\ min]$. C'est durant cet intervalle que l'évolution temporelle de la brèche nous intéresse. $t = 0,0\ min$ représente le début de l'écoulement sur la pente aval (figure 5.27a) et $t = 4,56\ min$ correspond au temps final de l'essai **Qf4** (figure 5.27d). Ce temps final a été imposé comme le temps auquel le débit de brèche atteint sa valeur maximale. En effet, après cet instant, la digue est presque totalement érodée. L'évolution de la brèche est limitée par les murets guides en béton. Nous ne nous intéressons donc pas à ce qui se passe après ce temps final que nous posons pour tous les essais égal au temps auquel le débit de brèche atteint sa valeur maximale.

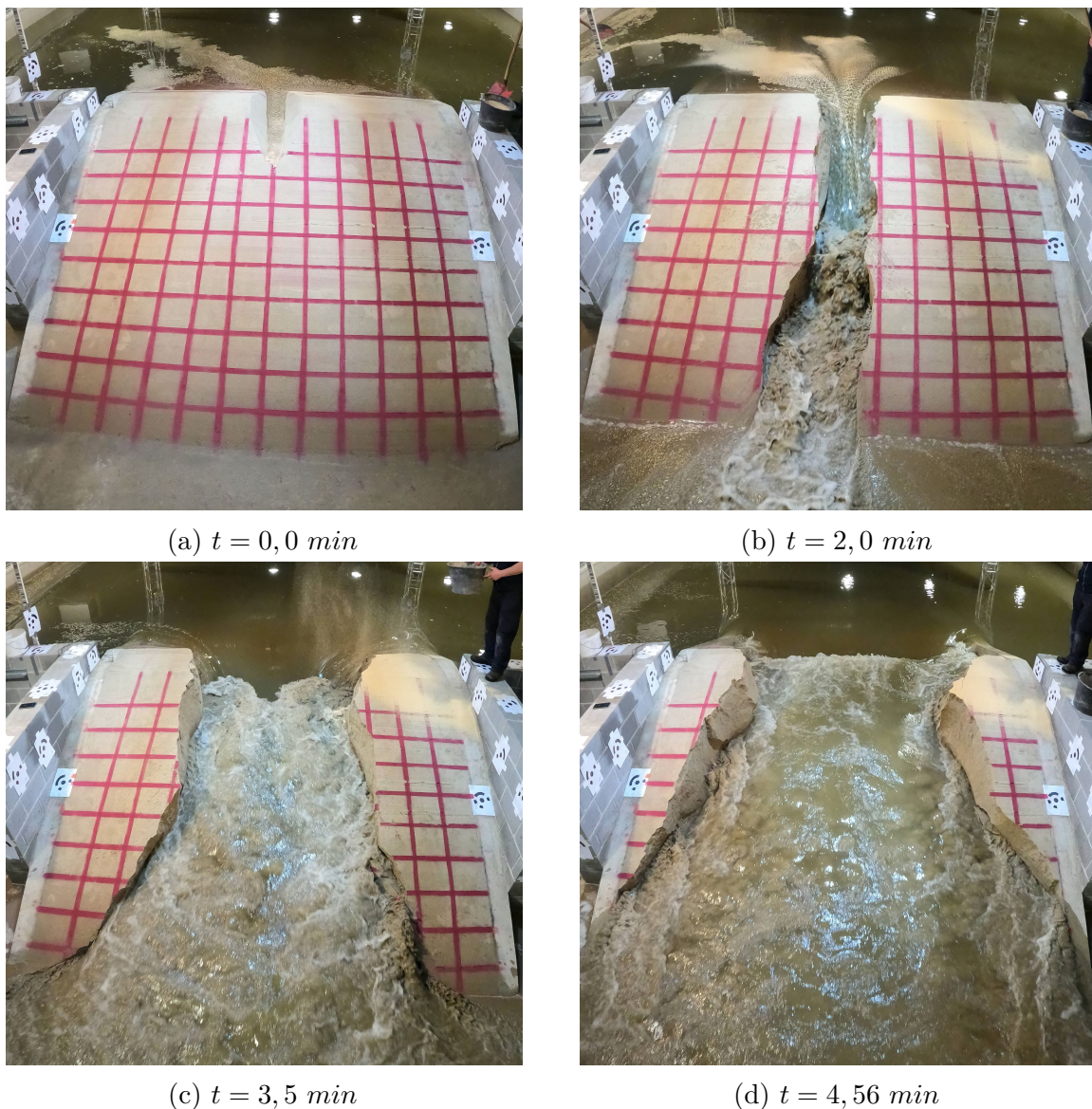


FIGURE 5.27 – Photos prises à différents instants lors de l'essai **Qf4**

Notons qu'à ce temps final, le niveau d'eau dans le bassin est de $0,68 \text{ m}$ en $t = 4,56 \text{ min}$ (graphique 5.26) et nous observons sur la figure 5.27d qu'à cet instant, ce niveau est plus élevé que le niveau d'eau en aval. Par conséquent, bien que la digue soit presque totalement érodée au temps final de l'essai, le débit de brèche à cet instant n'est pas égal au débit d'entrée. Il faut attendre que le niveau d'eau en amont s'équilibre avec le niveau d'eau en aval (on atteint un état stationnaire $\Rightarrow \frac{dZ}{dt} = 0$) pour que le débit de brèche soit égal au débit d'entrée.

5.4.5 Mesure de l'évolution de la brèche à l'aide de la photogrammétrie

Après avoir réalisé les essais, un traitement des images nous donne la possibilité d'analyser plus précisément l'érosion de la digue. En utilisant la photogrammétrie, le logiciel *Agisoft Metashape* nous a permis de visualiser l'évolution temporelle de la brèche à

partir d'images prises par des caméras placées autour de la digue. Cela nous a permis de reconstruire la digue en trois dimensions :

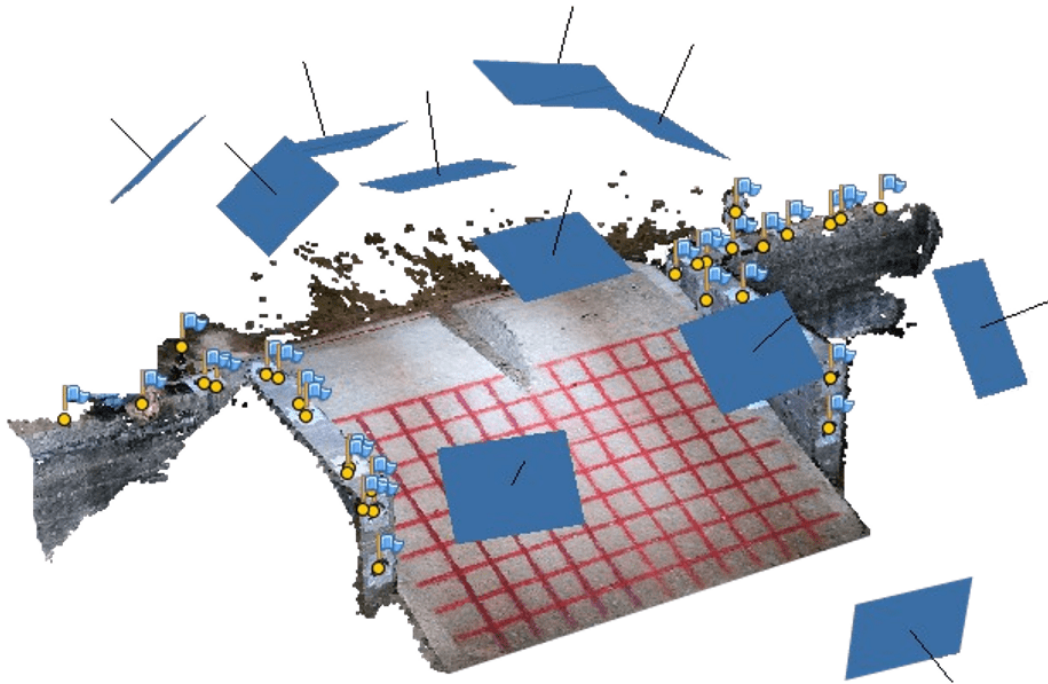


FIGURE 5.28 – Modèle 3D de la digue obtenu grâce à la photogrammétrie à partir de photos prises par 11 caméras (représentées par les rectangles bleus)

GCPs et caméras

Pour réaliser la photogrammétrie, nous avons installé 9 à 11 caméras GoPro (nombre variant selon les essais) autour de la digue pour prendre des photos. Ces caméras sont programmées en mode time-lapse pour prendre des photos toutes les secondes pour les essais **Hf1** et **Hf2** et toutes les demi-secondes pour les autres essais.

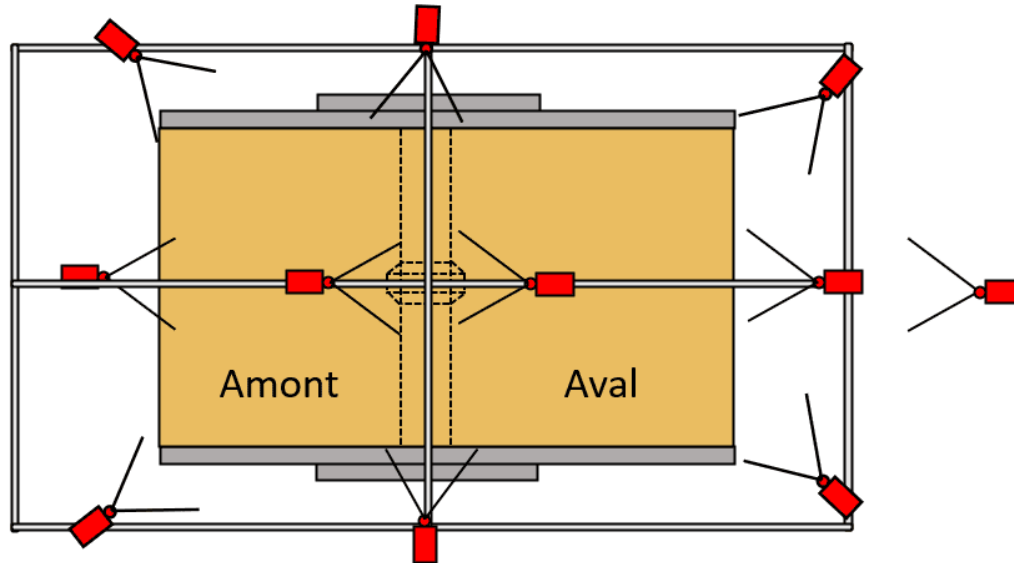


FIGURE 5.29 – Disposition des 11 caméras en mode time-lapse

Deux autres caméras GoPro sont positionnées, une au-dessus de la digue au niveau de la crête et l'autre faisant face à la digue en aval. Elles filment pendant toute la durée de l'essai.

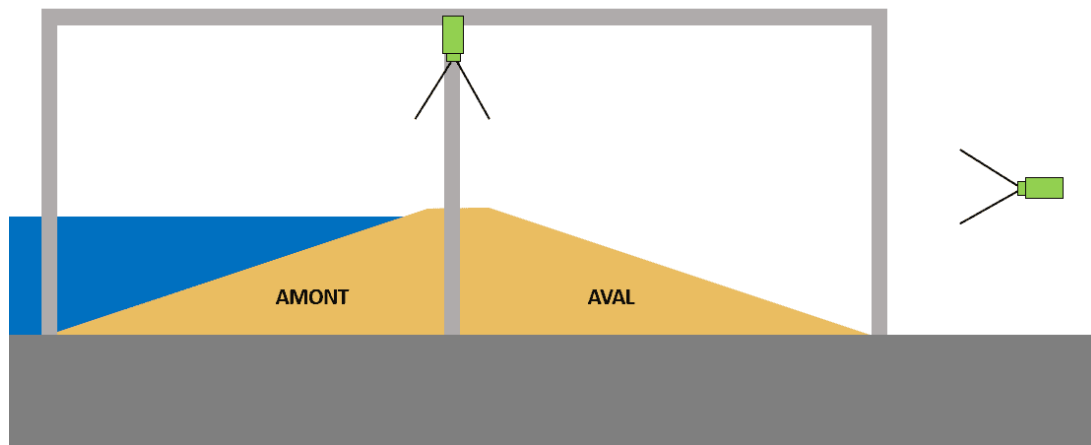
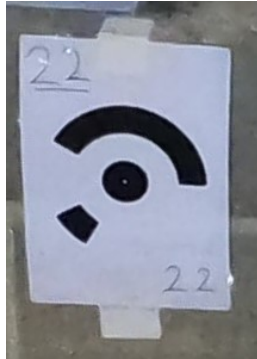


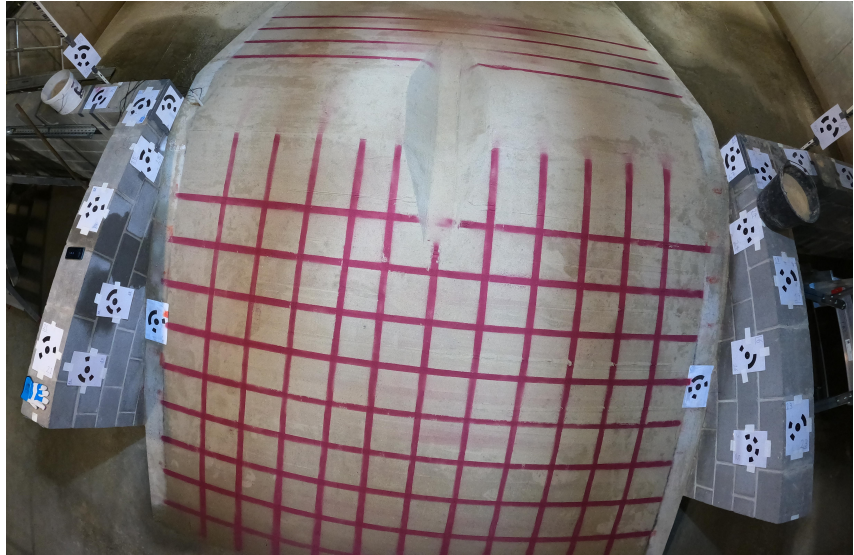
FIGURE 5.30 – Disposition des caméras en mode vidéo

Les caméras sont attachées à une structure métallique représentée en gris clair sur les figures 5.29 et 5.30.

En complément, des GCP (Ground Control Points) sont positionnés autour de la digue. Ce sont des cibles imprimées sur des feuilles blanches. Ils sont illustrés par des drapeaux bleu et jaune sur la figure 5.28. Ces cibles servent de points de référence pour les caméras sous différents angles. En connaissant les coordonnées des GCP, le logiciel *MetaShape* permet, à partir des photos, de reconstituer la digue en trois dimensions grâce à la photogrammétrie.



(a)



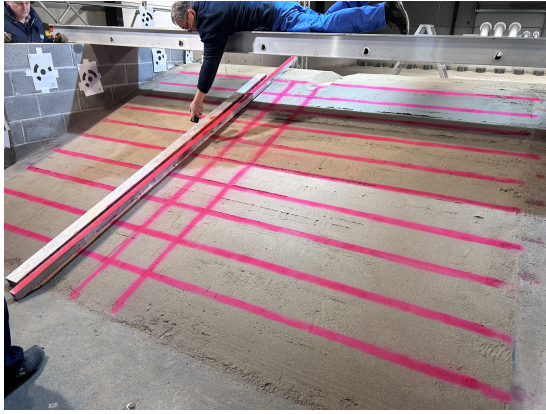
(b)

FIGURE 5.31 – Cibles GCP

Quadrillage

Sur la pente aval de la digue, nous réalisons un quadrillage avec des lignes espacées de 30 cm. Ce quadrillage est réalisé en utilisant des bombes de peinture. En plus de nous permettre d'obtenir des points de repère pour l'érosion de la digue, il permet d'obtenir des résultats plus précis pour la photogrammétrie, car le logiciel peut plus facilement détecter la digue avec ce quadrillage qui met en évidence la pente aval.

En plus de cela, nous installons trois lignes horizontales à l'amont de la digue, également espacées de 30 cm chacune. Ces lignes servent de repère pour le niveau d'eau en amont de la digue sur les photos.



(a)



(b)

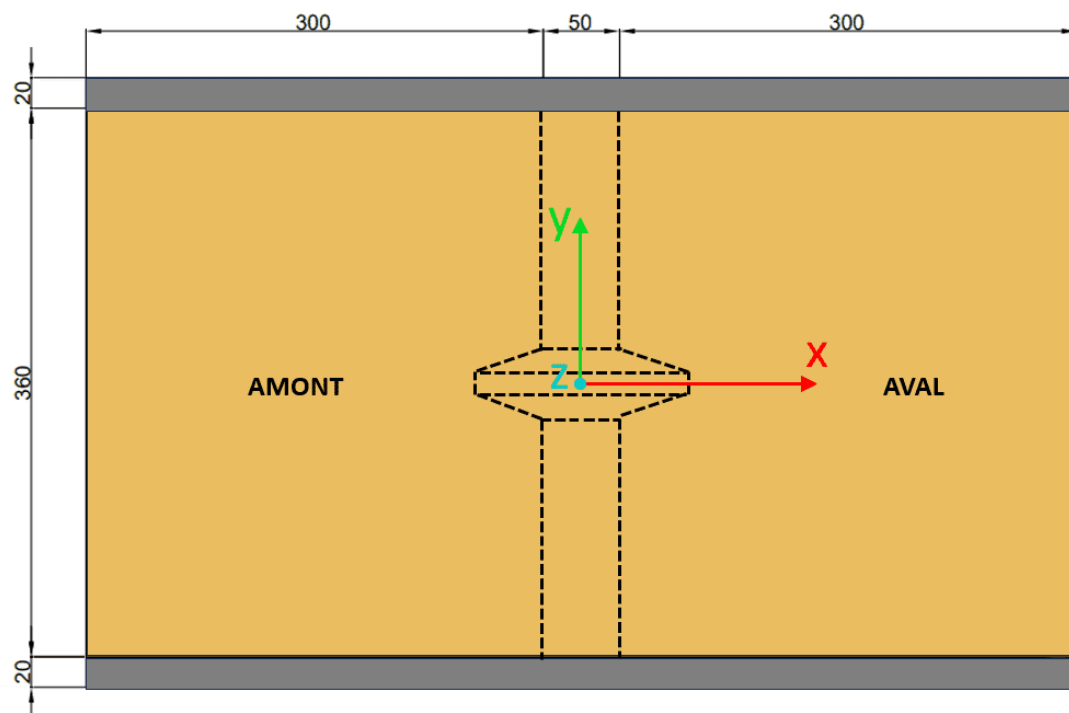


(c)

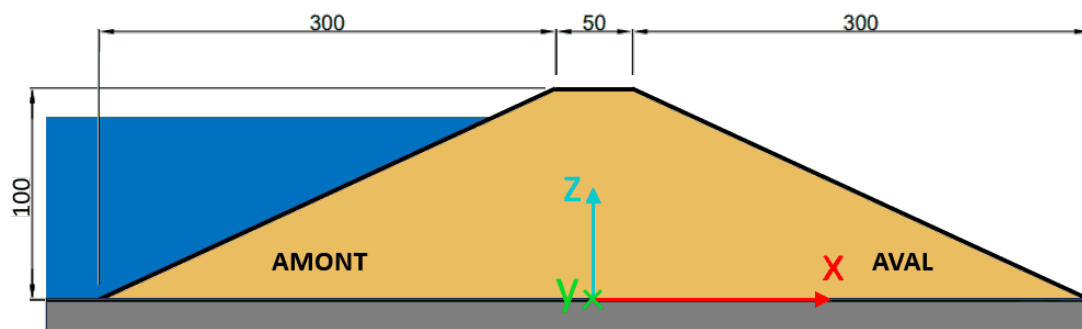
FIGURE 5.32 – Quadrillage de la digue

Données obtenues par photogrammétrie

Le repère que nous utilisons pour afficher les résultats de la photogrammétrie est le suivant :



(a) Vue de haut



(b) Vue de côté

FIGURE 5.33 – Repère [cm]

Grâce à la photogrammétrie, nous pouvons obtenir la hauteur des sédiments en plusieurs endroits. Nous pouvons notamment avoir l'évolution de la section de la brèche (figure 5.34) et du profil longitudinal de la digue (figure 5.35) au cours du temps.

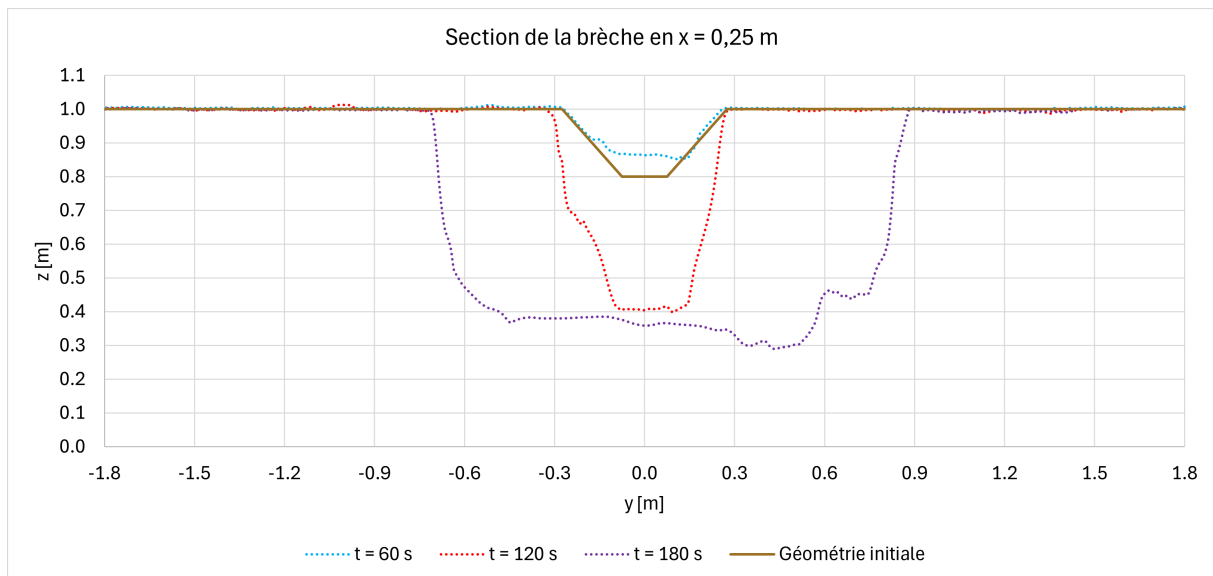


FIGURE 5.34 – Essai **Qf4** : Évolution de la section de la digue en aval de la crête (en $x = 0,25$ m)

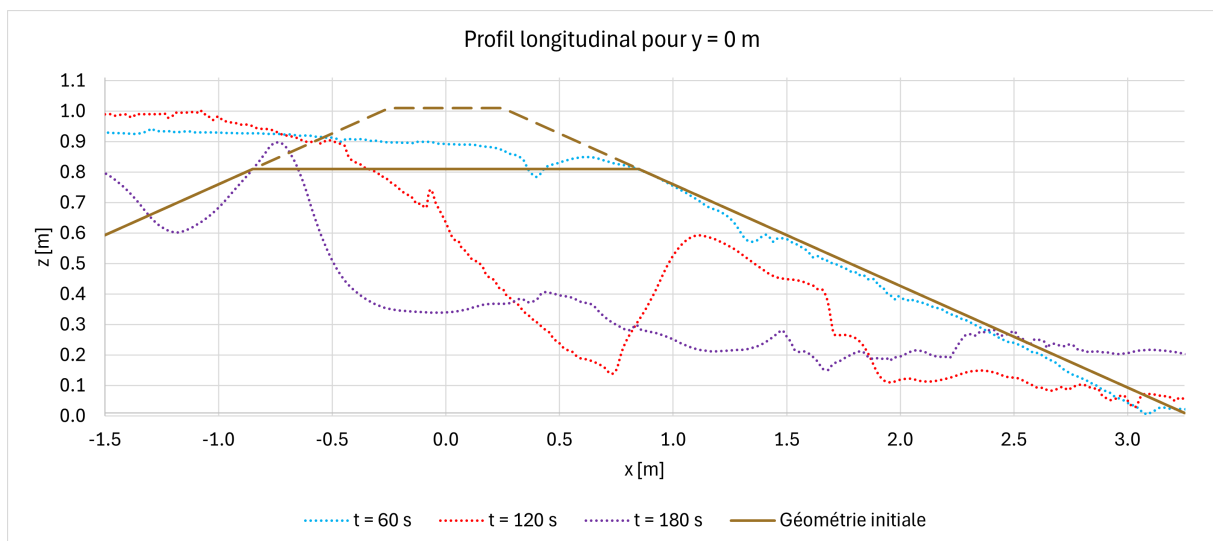


FIGURE 5.35 – Essai **Qf4** : Évolution du profil longitudinal au centre de la digue (en $y = 0$ m)

La géométrie initiale de la digue est ici représentée en brun. L'évolution de la section de la brèche obtenue grâce à la photogrammétrie est représentée pour $t = 60$ s en bleu, $t = 120$ s en rouge et $t = 180$ s en mauve.

Nous pouvons voir sur les figures ci-dessus que le niveau obtenu par photogrammétrie est plus élevé que le niveau de la géométrie initiale de la digue. Ceci est dû au fait que sous l'eau, la photogrammétrie ne nous permet pas de connaître la hauteur des sédiments. En effet, nous pouvons voir sur la figure 5.36a qu'au droit de l'écoulement et en amont, la photogrammétrie n'a pas détecté beaucoup de points. Sur la figure 5.36b, les zones floues sont les endroits où la photogrammétrie n'a pas détecté de point et a donc dû interpoler pour obtenir des résultats.

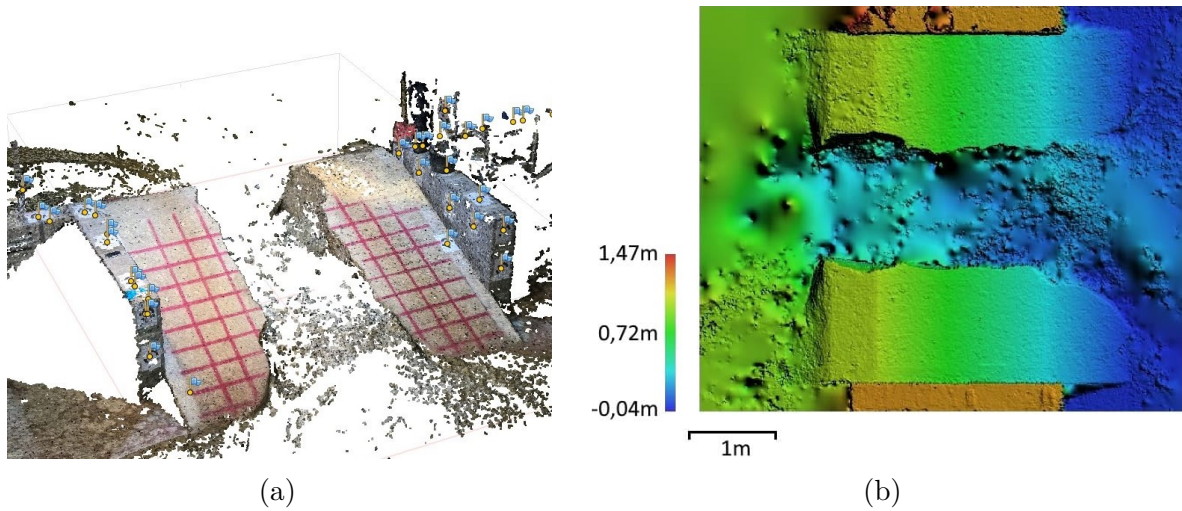


FIGURE 5.36 – Modèle 3D et niveaux obtenus par photogrammétrie en $t = 180$ s

Sur base de la section de la brèche obtenue par photogrammétrie, nous pouvons donc tirer des conclusions sur la largeur supérieure de la brèche, car elle est au-dessus du niveau d'eau, mais pas sur la profondeur de la brèche. Grâce aux sections obtenues avec la photogrammétrie, nous pouvons alors tracer l'évolution de la largeur supérieure de la brèche dans le temps :

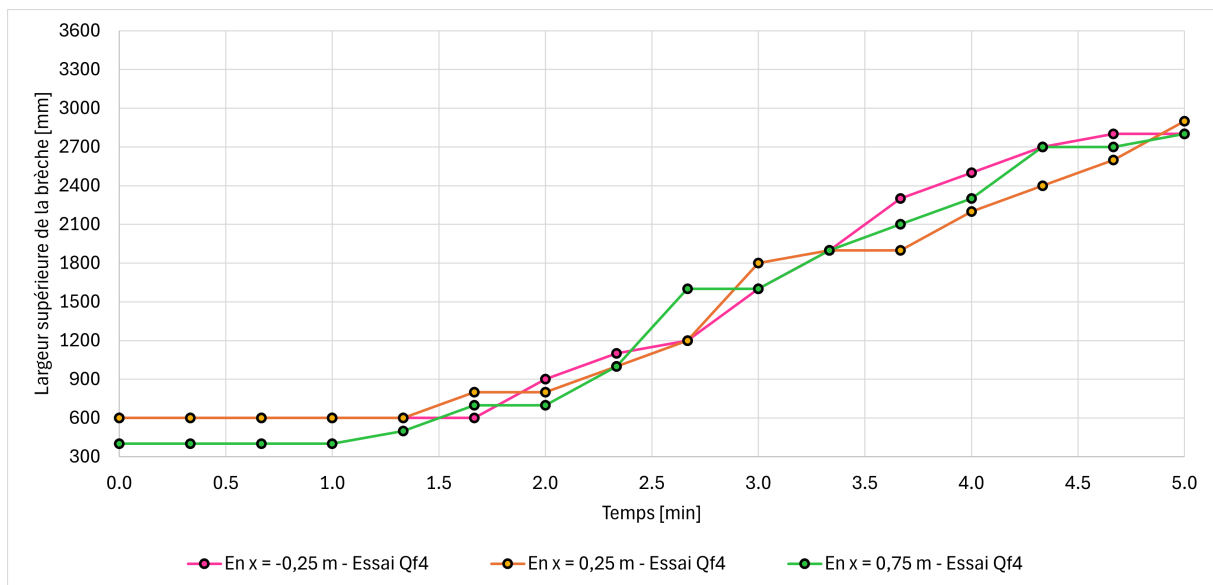


FIGURE 5.37 – Essai **Qf4** : Évolution de la largeur supérieure de la brèche

Sur ce graphique (pour l'essai **Qf4**), nous remarquons par exemple que la largeur supérieure de la brèche au temps $t = 0$ s est de :

- 0,40 m en $x = 0,75$ m
- 0,60 m en $x = -0,25$ m et en $x = 0,25$ m

Or, sur base des données de la géométrie initiale de la brèche (largeur initiale inférieure = 0,15 m, profondeur de la brèche en crête de digue = 0,20 m et inclinaison des pentes de la brèche = 45°) nous pouvons calculer la valeur théorique de la largeur supérieure de la brèche au temps $t = 0$ s. Celle-ci est de :

- 0,22 m en $x = 0,75$ m
- 0,55 m pour $-0,25 \text{ m} \leq x \leq 0,25 \text{ m}$

On pourrait expliquer ces imprécisions par une analyse imparfaite des images par photogrammétrie. Cependant, comme nous pouvons l'observer sur la figure 5.34, le niveau de la crête de digue a été détecté avec une assez bonne précision. Les résultats obtenus par photogrammétrie sur les parties non immergées de la digue sont donc assez précis. Il semble plus probable que la construction en elle-même de la brèche puisse expliquer ses imprécisions en $x = -0,25$ m et $x = 0,25$ m. En effet, le fond de la brèche pourrait ne pas être parfaitement horizontal, elle pourrait également être plus ou moins large, plus ou moins profonde à certains endroits même si l'utilisation du gabarit pour creuser la brèche minimise les erreurs de ce type.

La différence entre la valeur obtenue et la valeur théorique en $x = 0,75$ m peut être expliquée par la faible profondeur initiale de la brèche ($= 3$ cm). Dans ce cas, sur la section fournie par la photogrammétrie, il est plus difficile de distinguer la différence entre le haut de la crête et le fond de la brèche. C'est donc plus compliqué de repérer la largeur supérieure de la brèche.

Balles colorées (pour la profondeur de la brèche)

Afin d'avoir plus d'informations sur l'évolution de la profondeur de la brèche, des balles de couleur sont placées après avoir compacté chaque couche de sable. La hauteur des balles varie donc d'un essai à l'autre en fonction de l'épaisseur des couches de sable compactées.

Ces balles sont disposées le long de l'axe x au centre de la digue (en $y = 0$ m).

Pour les essais à débit constant alimentant le bassin (des types **Qf** et **Qm**), des balles roses sont placées en amont de la brèche (en $x = -0,25$ m), des orange sont placées en aval de la brèche (en $x = 0,25$ m) et des vertes sur la pente aval (en $x = 0,75$ m) comme schématisé ci-dessous :

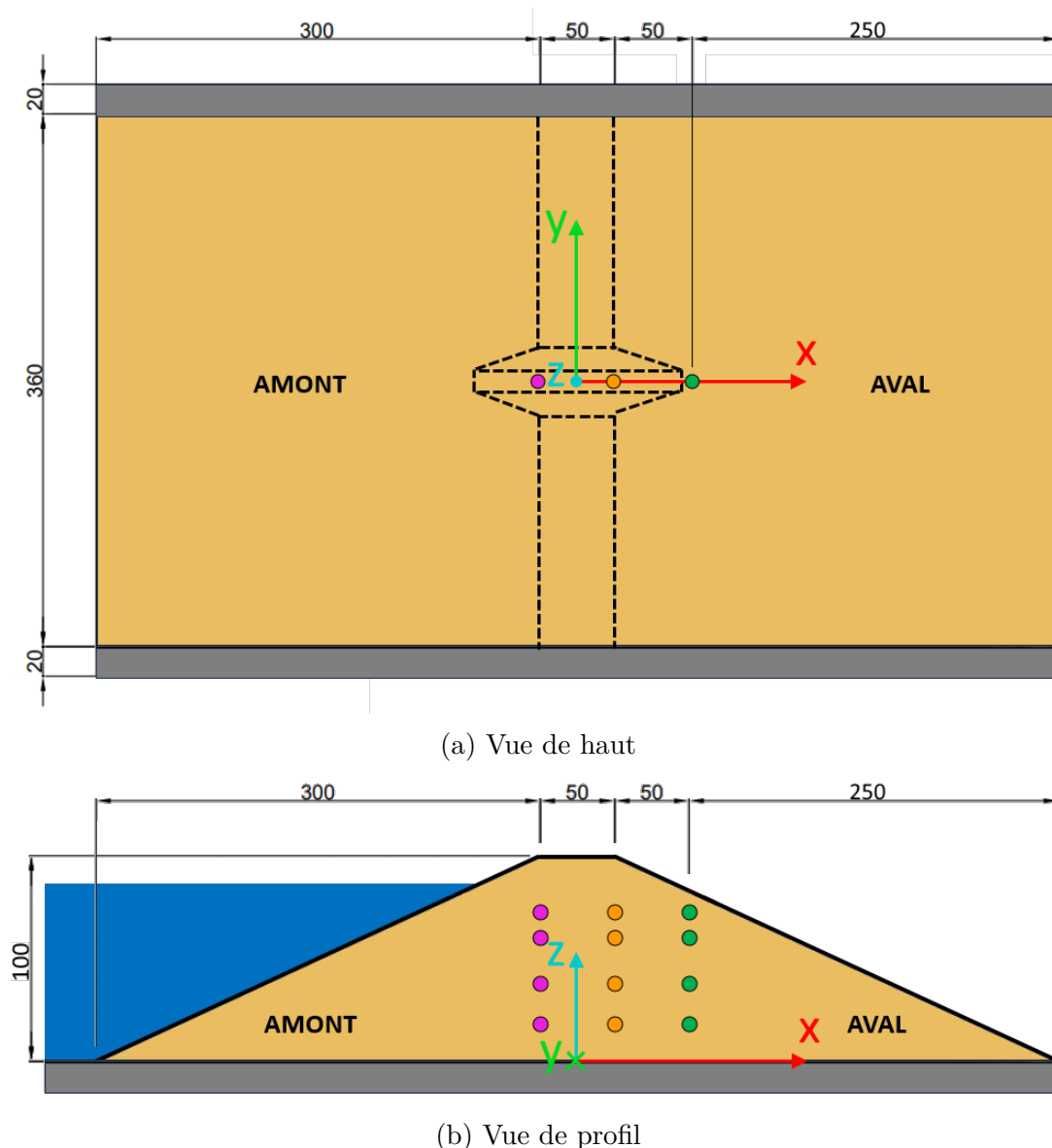


FIGURE 5.38 – Schéma du placement des balles [cm]

Pour l'essai **Hf2**, seules les balles orange ont été placées.

Pour l'essai **Hf1**, des balles ont été placées seulement au milieu de la brèche (en $x = 0$ m).

Lorsqu'une balle se fait emporter par l'écoulement, cela signifie que le sable à l'emplacement initial de la balle est érodé. Nous avons visionné les vidéos de l'essai afin de savoir précisément à quel instant chaque balle s'est fait emporter.

Les balles nous permettent d'avoir plus d'informations sur l'évolution verticale de la brèche, mais les résultats peuvent être imprécis dû à diverses sources d'erreur. Après la compaction de chaque couche, nous creusons où nous voulons mettre la balle avant de la placer et notons la hauteur à laquelle nous la plaçons. Pour connaître cette hauteur, nous avons fait des marques sur les murs guides sur les côtés de la digue tous les 10 cm. Nous estimons donc l'élévation des balles grâce au niveau de sable sur les côtés. Cependant, les couches ne sont pas parfaitement planes. La hauteur de sable sur les côtés n'est donc pas

parfaitement égale à celle au centre de la digue.



FIGURE 5.39 – Pose des balles

Le temps auquel chaque balle se fait emporter ajoute aussi de l'incertitude à la mesure de l'évolution du fond de la brèche. En effet, entre le moment où nous commençons à voir sur les vidéos la balle qui se dévoile et le moment où elle est complètement délogée du sable, quelques secondes s'écoulent.

De plus, lorsqu'une balle se fait emporter au même moment qu'un bloc de sable tombe, nous ne voyons pas la balle qui sort du sable, mais nous la voyons ensuite partir avec l'écoulement. En analysant le parcours d'une balle dès qu'elle sort du sable (voir les figures ci-dessous), nous savons qu'elle parcourt environ 1 mètre en 1 seconde.



FIGURE 5.40 – Vue de haut d’une balle qui se fait emporter, images tirées d’une vidéo à 1 seconde d’écart

Données obtenues par photogrammétrie corrigées

Grâce aux balles colorées, nous connaissons l’évolution de la hauteur du fond de la brèche en $x = -0,25$ m, $x = 0,25$ m et $x = 0,75$ m (où nous avons placé les balles pour l’essai **Qf4**) :

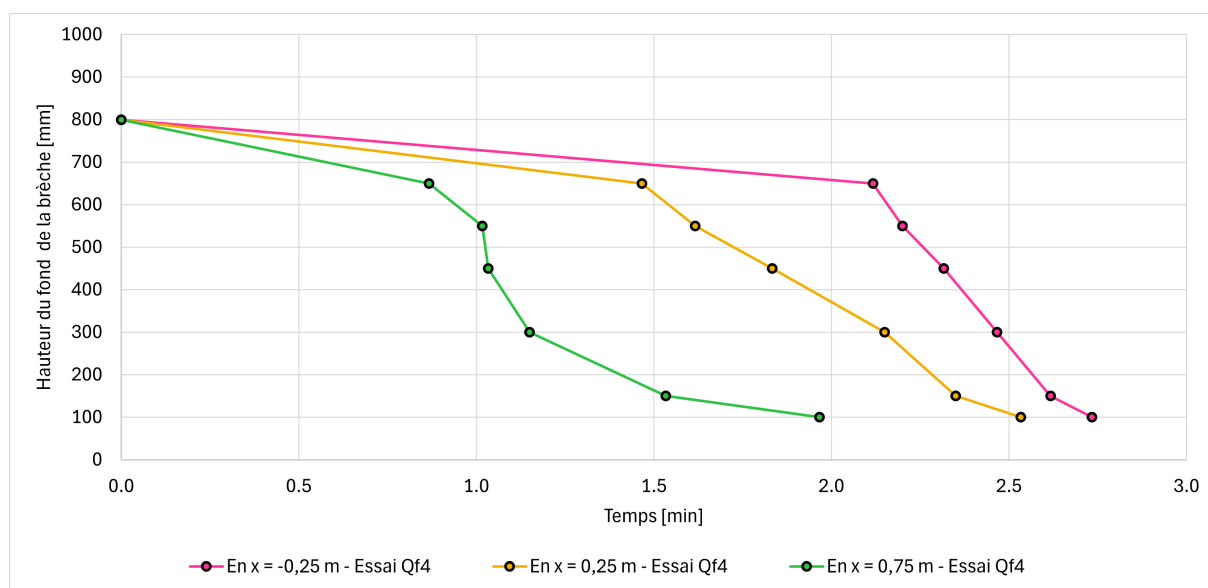


FIGURE 5.41 – Essai **Qf4** : Évolution de la hauteur du fond de la brèche

Afin de mieux visualiser l’évolution du fond de la brèche, nous avons relié les points correspondant aux balles. Cependant, ces lignes ne correspondent pas exactement à l’évolution du fond de la brèche. Nous allons plus en détail analyser ce qui se passe entre ces points à la section 6.2.

En nous basant sur les données de la figure ci-dessus, nous pouvons corriger la section obtenue par la photogrammétrie à la figure 5.34. Par interpolation, nous pouvons en effet

calculer la hauteur du fond de la brèche en $t = 60 \text{ s}$, $t = 120 \text{ s}$ et $t = 180 \text{ s}$. Nous obtenons alors :

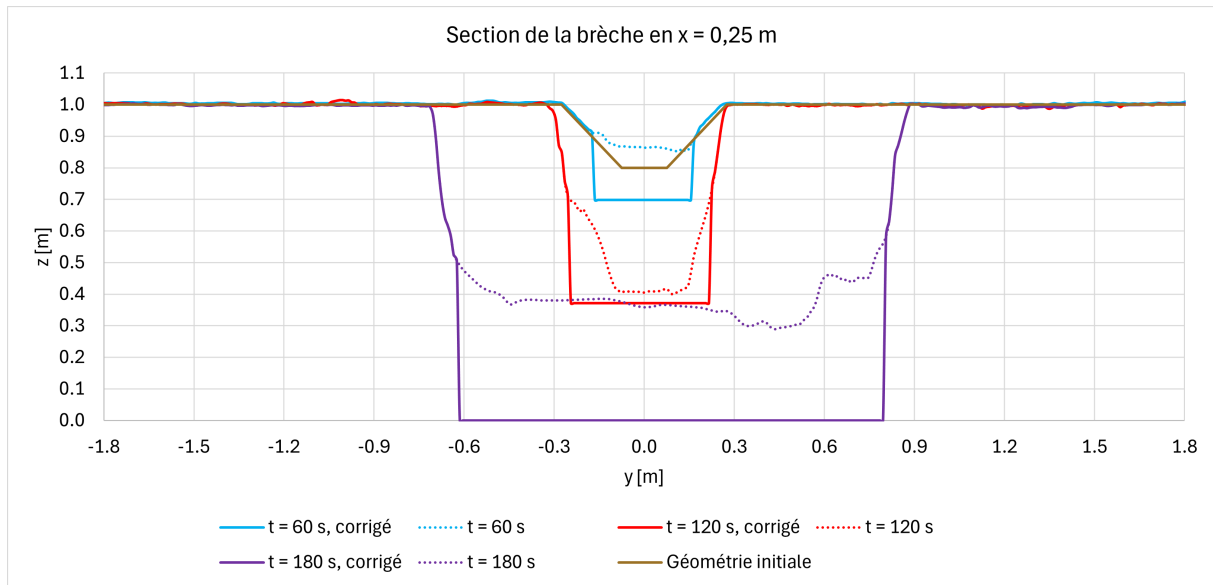


FIGURE 5.42 – Essai **Qf4** : Évolution de la section de la digue en aval de la crête (en $x = 0,25 \text{ m}$)

En trait plein, la section a été corrigée en imposant la hauteur du fond de la brèche obtenue par interpolation sur une certaine largeur. La largeur sur laquelle cette hauteur a été imposée a été choisie pour correspondre à la partie supérieure de la section obtenue par photogrammétrie, la partie qui n'est pas sous l'eau.

En $x = -0,25 \text{ m}$, $x = 0,25 \text{ m}$ et $x = 0,75 \text{ m}$ (où nous avons placé les balles pour l'essai **Qf4**), nous connaissons donc les hauteurs du fond de la brèche à différents instants. Pour un même instant, si on relie la hauteur du fond de la brèche calculée en $x = -0,25 \text{ m}$ avec celle calculée en $x = 0,25 \text{ m}$ et ensuite à celle calculée en $x = 0,75 \text{ m}$, nous pouvons corriger le profil longitudinal :

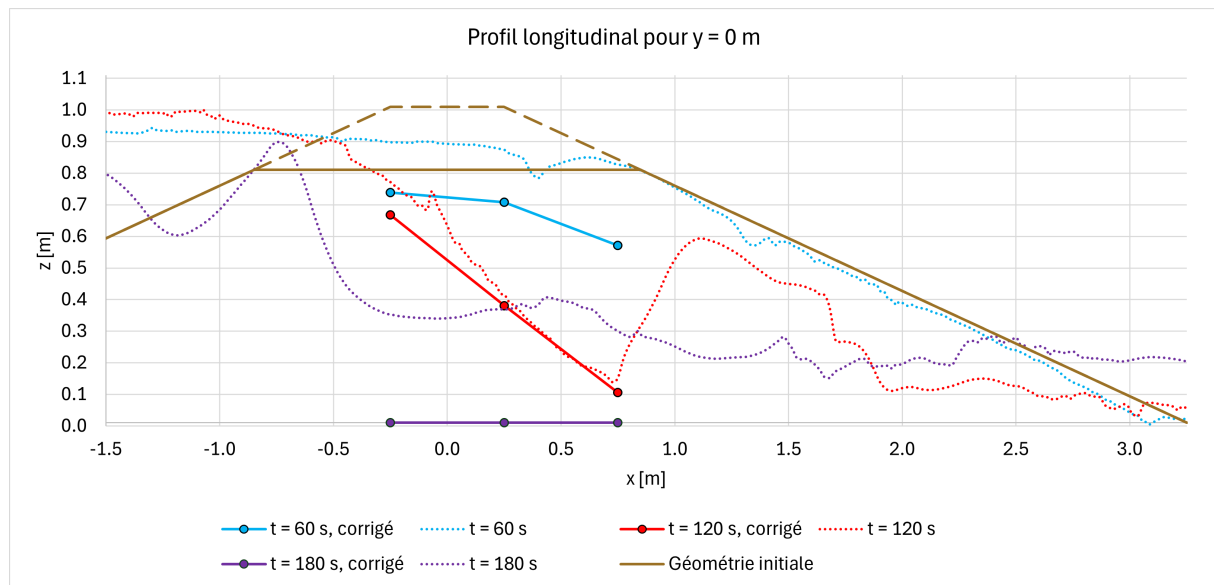


FIGURE 5.43 – Essai **Qf4** : Évolution du profil longitudinal au centre de la digue (en $y = 0$ m)

À nouveau, afin de mieux visualiser l'évolution du fond de la brèche, nous avons relié les points obtenus par interpolation. Nous allons plus en détail analyser ce qui se passe entre ces points à la section 6.2.

Sciures (pour le niveau d'eau)

Comme expliqué précédemment, la photogrammétrie ne détecte pas les sédiments qui sont sous l'eau. Elle ne détecte pas non plus le niveau d'eau. Le niveau obtenu par photogrammétrie au droit de l'écoulement dans la brèche et en amont de la digue ne correspond donc pas à la hauteur des sédiments ni au niveau d'eau, mais à une interpolation entre les hauteurs des points détectés.

Les balles nous ont permis d'avoir plus d'informations sur la hauteur des sédiments. Afin de détecter le niveau d'eau et ainsi d'avoir plus d'informations sur la profondeur de l'écoulement sur la brèche, nous avons éparpillé des sciures sur la surface de l'eau. Grâce à cela, la photogrammétrie détecte un peu plus de points et reconstruit donc mieux la surface de l'eau.



FIGURE 5.44 – Lancé de sciures dans le bassin avec une pelle

En utilisant des sciures de diamètre plus important, la détection par photogrammétrie du niveau d'eau aurait pu être améliorée. De plus, ces particules de plus grande taille permettraient de mesurer la vitesse de l'écoulement grâce à la *Particle Image Velocimetry* (PIV), une méthode de mesure de la vitesse d'un écoulement sur base de photos en suivant des particules.

Grâce à ces mesures (vitesse d'écoulement et niveau d'eau), nous pourrions vérifier la formule de la conservation de la masse que nous utilisons pour calculer le débit de brèche (formule 5.5). En effet, les balles colorées nous donnent déjà une bonne estimation de la profondeur de la brèche. En connaissant le niveau d'eau, nous aurions une estimation de la section de l'écoulement. Les valeurs de cette section et de la vitesse d'écoulement nous permettraient alors de calculer le débit d'eau qui passe par la brèche.

Chapitre 6

Résultats

Comme exposé au chapitre 5, les essais "valides" (ceux durant lesquels la condition frontière est conforme à celle attendue) réalisés sont repris dans le tableau ci-dessous :

N°	Date	Condition frontière	d_{50} [mm]	H_{digue} [m]	$H_{brèche}$ [m]
Hf1	25/05/2023	Hauteur constante d'eau dans le bassin égale à 0,95 m	0,314	1	0,90
Hf2	14/09/2023	Hauteur constante d'eau dans le bassin égale à 0,98 m	0,314	1	0,93
Qf3	14/03/2024	Débit constant alimentant le bassin égal à 224 l/s	0,314	1	0,80
Qf4	10/04/2024	Débit constant alimentant le bassin égal à 224 l/s	0,314	1	0,80
Qm1	28/03/2024	Débit constant alimentant le bassin égal à 224 l/s	0,632	1	0,80
Qm2	24/04/2024	Débit constant alimentant le bassin égal à 224 l/s	0,632	1	0,80

TABLE 6.1 – Résumé des essais "valides" réalisés avec d_{50} = le diamètre médian des grains de sable, H_{digue} = la hauteur initiale de la digue et $H_{brèche}$ = la hauteur initiale du fond de la brèche

Les lettres dans le numéro de l'essai correspondent au type de cet essai :

1. **Hf** : **H**auteur d'eau constante dans le bassin et digue constituée de sable **f**in (diamètre médian des grains : $d_{50} = 0,314$ mm)
2. **Qf** : Débit (**Q**) constant alimentant le bassin et digue constituée de sable **f**in (diamètre médian des grains : $d_{50} = 0,314$ mm)
3. **Qm** : Débit (**Q**) constant alimentant le bassin et digue constituée de sable **m**oyen (diamètre médian des grains : $d_{50} = 0,632$ mm)

Dans cette section, nous commençons par vérifier la reproductibilité de ces essais en comparant les résultats des essais du même type.

Ensuite, nous comparons des essais réalisés avec un même sable, mais une condition frontière différente, afin de voir l'impact de la condition frontière (soit **Hf** : hauteur

constante d'eau dans le bassin, soit **Qf** : débit constant alimentant le bassin) sur l'évolution temporelle de la brèche.

Nous comparons aussi des essais réalisés avec une même condition frontière, mais un sable différent afin de voir l'impact du type de sable (soit **Qf** : sable de diamètre médian $d_{50} = 0,314 \text{ mm}$, soit **Qm** : sable de diamètre médian $d_{50} = 0,632 \text{ mm}$) sur l'évolution temporelle de la brèche.

Nous terminons par comparer des essais réalisés à une échelle différente afin de voir l'impact de l'échelle des essais sur l'évolution temporelle de la brèche. Pour cela, nous comparons un essai **Qm** avec un essai réalisé par Descantons et Dujardin (2014). Ces essais ont été réalisés avec un même sable et une condition frontière mise à l'échelle.

6.1 Vérification de la reproductibilité

6.1.1 Hauteur constante d'eau dans le bassin et sable fin ($d_{50} = 0,314 \text{ mm}$), **Hf**

Notre essai **Hf2** s'est déroulé le 14 septembre 2023 entre 11h40 et 12h36. Il a été réalisé en imposant un niveau de consigne de 0,98 m et en utilisant le sable fin (diamètre médian des grains de sable : $d_{50} = 0,314 \text{ mm}$) pour construire la digue avec une brèche de 7 cm de profondeur.

Cet essai s'est déroulé dans les mêmes conditions que l'essai **Hf1** réalisé par Gilles et Delforge (2023) à la différence que la hauteur du fond de la brèche et le niveau de consigne ont tous deux été augmentés de 3 cm pour l'essai **Hf2**. Il a été réitéré afin de tester la reproductibilité d'un tel essai.

Données récoltées pendant la construction des digues

Les mesures de teneurs en eau avant compaction et de masses volumiques sèches après compaction de chaque couche de sable pendant la construction de la digue pour les essais **Hf1** et **Hf2** sont reprises ci-dessous :

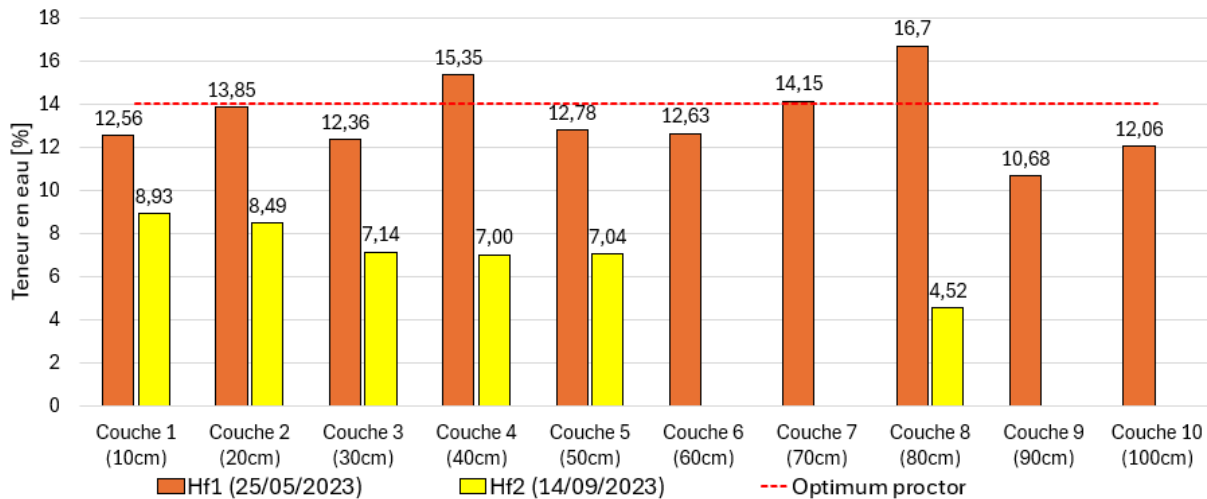


FIGURE 6.1 – Essais **Hf1** et **Hf2** : Teneurs en eau des couches de sable avant compaction

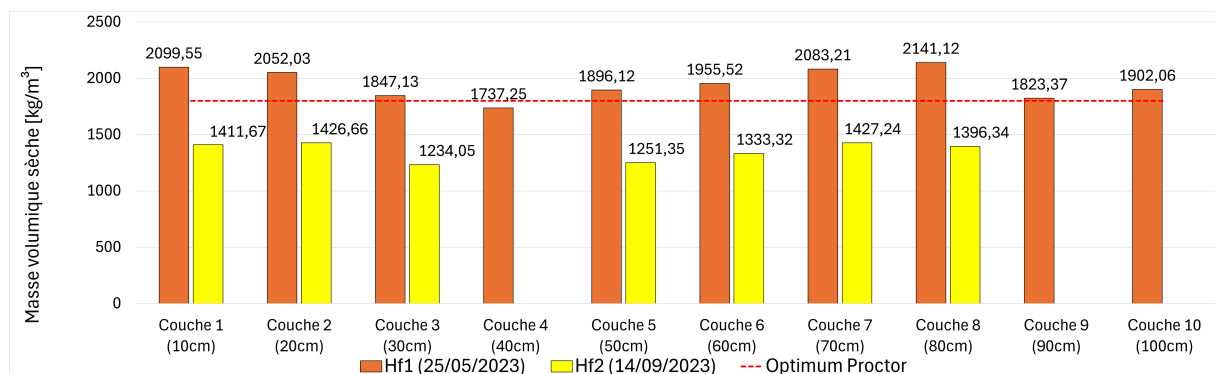


FIGURE 6.2 – Essais **Hf1** et **Hf2** : Masses volumiques sèches des couches de sable après compaction

Une différence de compaction entre les deux essais est observée à partir des masses volumiques sèches affichées à la figure 6.2. Les masses volumiques sèches de l'essai **Hf1** sont plus élevées que celles de l'essai **Hf2**. Le sable de l'essai **Hf1** a donc été mieux compacté et ceci pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, nous pouvons observer sur la figure 6.1 que les teneurs en eau de l'essai **Hf1** sont plus élevées et se rapprochent plus de l'optimum Proctor que l'essai **Hf2**.

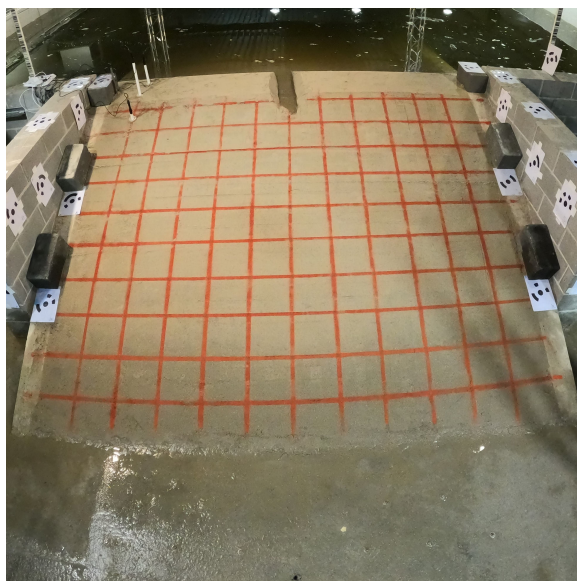
De plus, le sable de l'essai **Hf1** a été posé avec deux couches en plus que l'essai **Hf2**. Le sable de l'essai **Hf1** a donc été humidifié et compacté de manière plus uniforme sur toute la hauteur des couches qui étaient par conséquent moins épaisses.

Ensuite, pour l'essai **Hf1** de Gilles et Delforge (2023), ils ont environ sept passages par couche avec la dameuse contre 4 passages par couche pour notre essai **Hf2**.

Les digues des deux essais n'ont pas été humidifiées et compactées de la même manière, ce qui peut avoir un impact sur l'évolution de la brèche.

Déroulement des essais

Comme mentionné à la section 5.4.1, le temps $t = 0 \text{ min}$ (pour tous les graphiques de ce rapport) correspond au moment où l'écoulement débute sur la pente aval.



(a) Essai **Hf1**



(b) Essai **Hf2**

FIGURE 6.3 – Photos prises en $t = 0,0 \text{ min}$

Nous pouvons voir sur les photos ci-dessus que l'écoulement sur la pente aval pour l'essai **Hf2** n'a pas commencé tout en haut de la pente aval, mais plus en aval. Avant $t = 0 \text{ min}$, de l'eau est passée sur la brèche, mais l'écoulement n'avait pas encore commencé. Ceci est dû au niveau d'eau dans le bassin qui était insuffisant par rapport au niveau du fond de la brèche.

En effet, pour l'essai **Hf1**, le niveau d'eau de consigne était de 0,95 m et la profondeur de brèche de 10 cm. Pour l'essai **Hf2**, nous avons gardé initialement ce niveau d'eau de consigne, mais la profondeur de brèche n'était que de 7 cm.

Pour l'essai **Hf2**, une fois le niveau de consigne de 0,95 m atteint, l'eau ne s'écoulait pas sur la pente aval, même si la hauteur initiale du fond de la brèche était de 0,93 m donc 2 cm plus bas que le niveau d'eau. Cette différence de niveau n'était pas suffisante. Afin que l'eau s'écoule sur la pente aval, nous avons creusé la brèche comme nous pouvons le voir sur l'image ci-dessous :

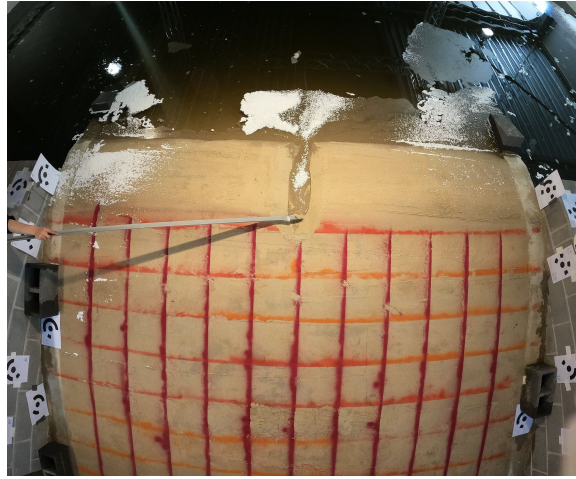
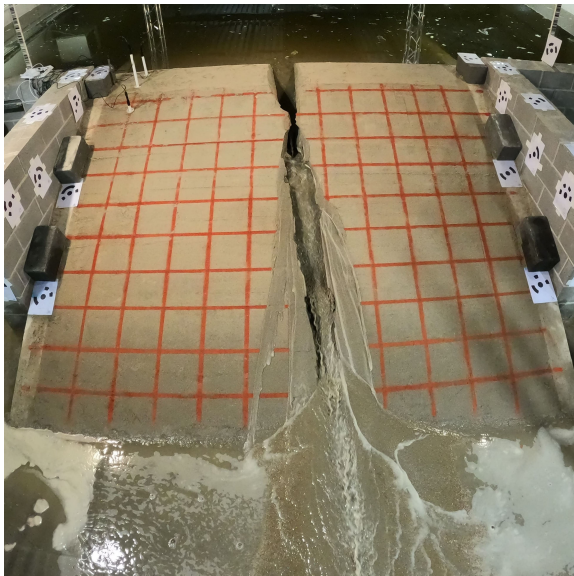


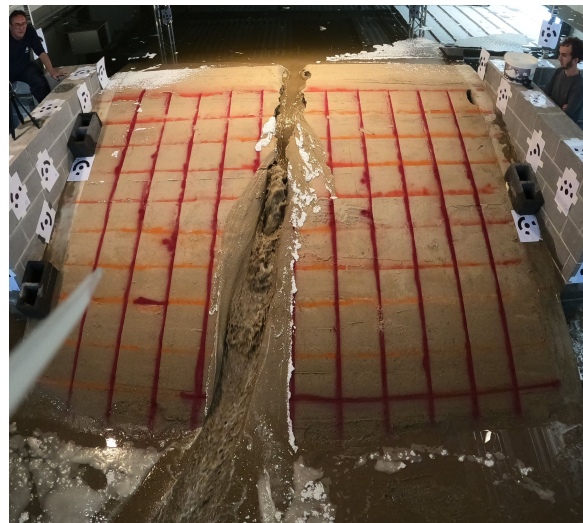
FIGURE 6.4 – Essai **Hf2** : $t = -5,4 \text{ min}$

Le niveau n'était pas suffisant pour permettre à l'eau de s'écouler même après avoir creusé la brèche. Par conséquent, le niveau de consigne a été augmenté à 0,98 m. Ces modifications peuvent avoir un impact sur l'évolution de la brèche.

Après 0,5 minute pour l'essai **Hf2** et 1,6 minute pour l'essai **Hf1**, nous avons observé qu'un escalier commençait à se former dans le fond de la brèche.



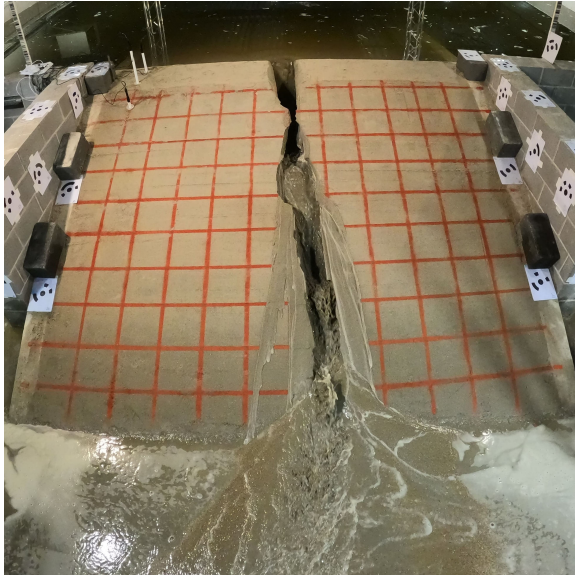
(a) Essai **Hf1** : $t = 1,6 \text{ min}$



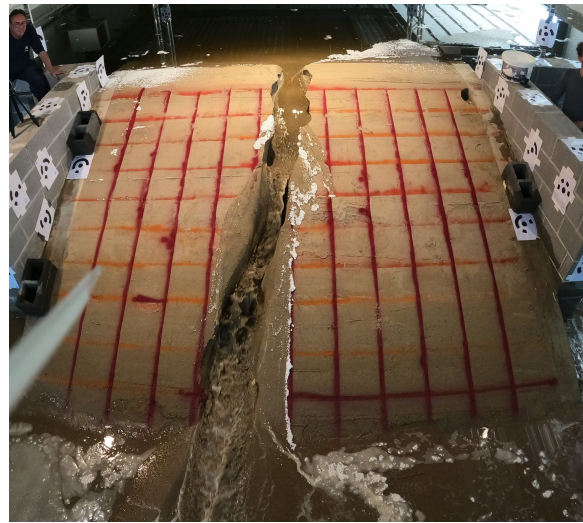
(b) Essai **Hf2** : $t = 0,5 \text{ min}$

FIGURE 6.5 – Photos prises durant les essais

Cet escalier s'est ensuite déplacé vers l'amont.



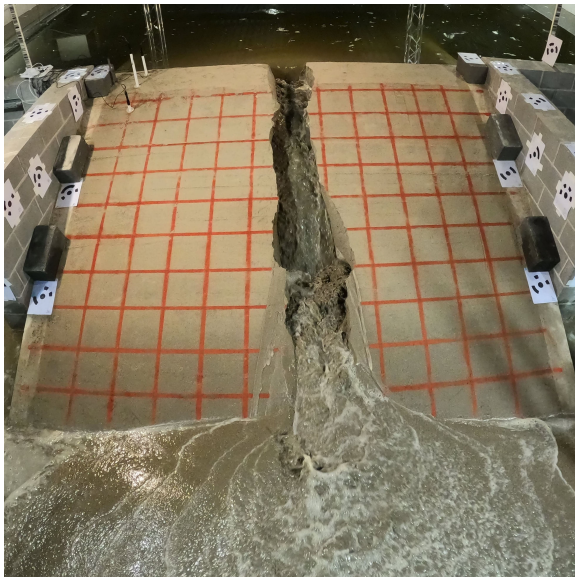
(a) Essai **Hf1** : $t = 1,9 \text{ min}$



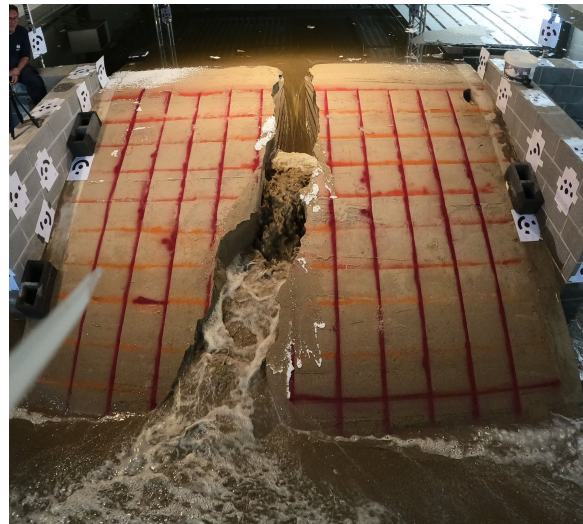
(b) Essai **Hf2** : $t = 0,8 \text{ min}$

FIGURE 6.6 – Photos prises durant les essais

Sur les photos ci-dessous, nous pouvons observer que la brèche s'est plus érodée verticalement que latéralement pendant les 1,4 premières minutes pour l'essai **Hf2** et pendant les 2,5 premières minutes pour l'essai **Hf1**.



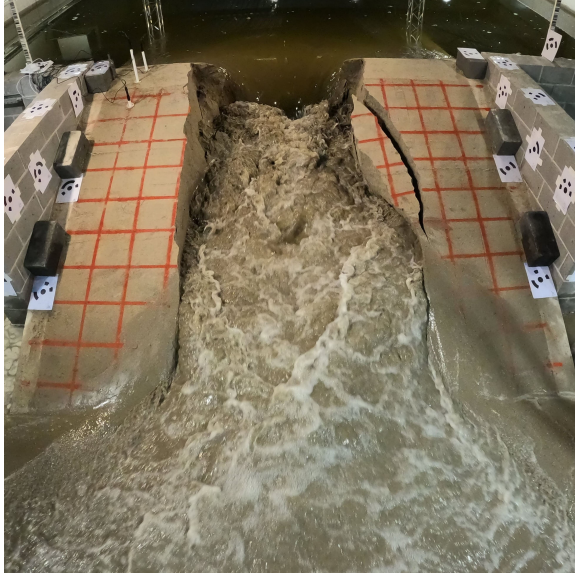
(a) Essai **Hf1** : $t = 2,5 \text{ min}$



(b) Essai **Hf2** : $t = 1,4 \text{ min}$

FIGURE 6.7 – Photos prises durant les essais

Après ces instants, nous observons que l'élargissement de la brèche s'accélère. Cet élargissement se fait par blocs. Nous pouvons en effet observer sur les photos ci-dessous des blocs d'environ 30 cm de large qui se décrochent.



(a) Essai **Hf1** : $t = 4,0 \text{ min}$



(b) Essai **Hf2** : $t = 3,1 \text{ min}$

FIGURE 6.8 – Photos prises durant les essais



(a) Essai **Hf1** : $t = 4,9 \text{ min}$



(b) Essai **Hf2** : $t = 3,8 \text{ min}$

FIGURE 6.9 – Photos prises durant les essais

Sur ces photos, nous observons que l'évolution de la brèche est semblable pour les 2 essais réalisés mais décalée dans le temps. En effet, il y a un décalage d'environ une minute entre les photos des deux essais.

Pour l'essai **Hf1** réalisé par Gilles et Delforge (2023), les pompes ont été arrêtées en $t = 3,1 \text{ min}$. C'est plus tôt que ce que nous considérons comme le temps final des essais. Nous ne pouvons donc comparer les résultats des essais **Hf1** et **Hf2** qu'avant $t = 3,1 \text{ min}$, lorsque la condition frontière est semblable.

Approfondissement de la brèche

En étudiant le moment de l'apparition des balles colorées situées à différentes hauteurs et à différents endroits (en $x = 0$ m pour l'essai **Hf1** et en $x = 0,25$ m pour l'essai **Hf2**), nous obtenons l'évolution de la hauteur du fond de la brèche suivante pour les essais **Hf1** (trait plein) et **Hf2** (traits pointillés) :

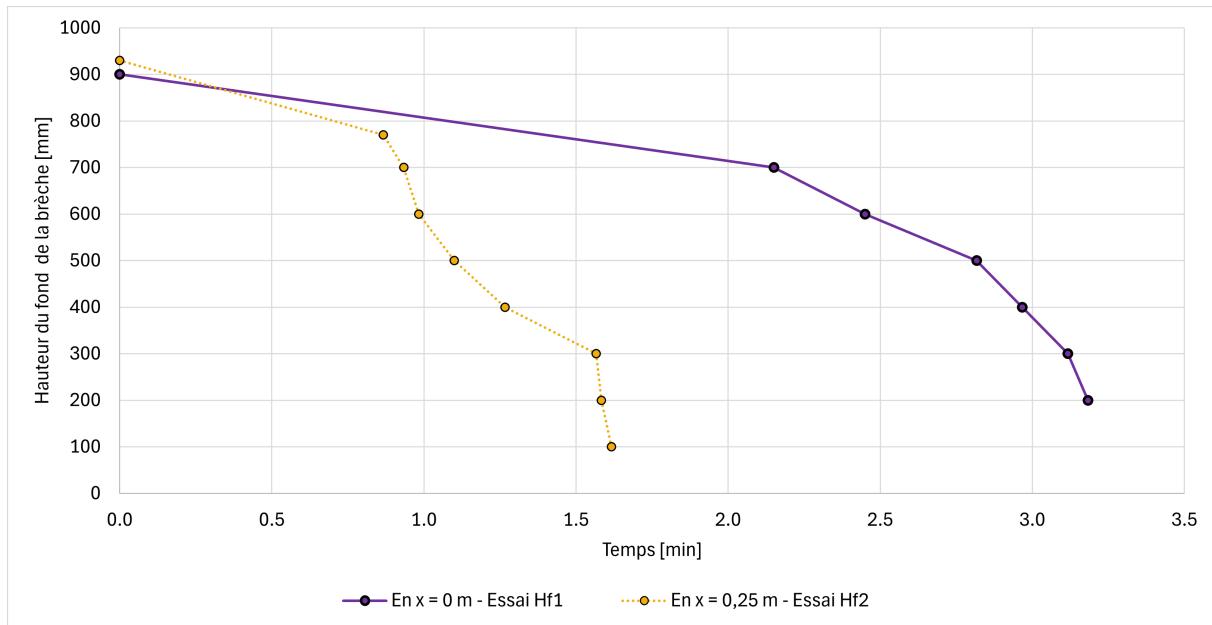


FIGURE 6.10 – Essais **Hf1** et **Hf2** : Évolution de la hauteur du fond de la brèche

Comme nous pouvons l'observer sur le graphique ci-dessus, il y a un décalage entre l'évolution de la profondeur de la brèche pour l'essai **Hf1** et celle pour l'essai **Hf2**. En $x = 0,25$ m, les 16 premiers centimètres s'érodent en 0,87 minute pour l'essai **Hf2**. Pour l'essai **Hf1**, en $x = 0$ m, il faut 2,15 minutes pour éroder les 20 premiers centimètres.

L'initiation de l'érosion verticale se fait plus rapidement en $x = 0,25$ m pour l'essai **Hf2** qu'en $x = 0$ m pour l'essai **Hf1**. Conformément à la théorie exposée à la section 4.3 et à ce que nous observons sur les vidéos des deux essais, l'érosion verticale se produit d'abord en aval avant de se propager vers l'amont. Il est donc logique que la hauteur du fond de la brèche diminue d'abord en $x = 0,25$ m avant de diminuer en $x = 0$ m.

L'importance du décalage observé ne peut néanmoins pas être expliqué uniquement par la différence d'endroit de prise de mesure (en $x = 0,25$ m pour l'essai **Hf2** et en $x = 0$ m pour l'essai **Hf1**). Nous analysons plus en détail d'autres facteurs qui pourraient avoir causé ce décalage dans la sous-section "*Débits et hauteur d'eau*".

Ensuite, après ces quelques premiers centimètres, la vitesse d'érosion verticale moyenne est de 893 mm/min pour l'essai **Hf2** ce qui est environ 1,85 fois plus rapide que les 484 mm/min calculés pour l'essai **Hf1**.

Élargissement de la brèche

Comme pour l'érosion verticale, il y a un décalage entre l'initiation de l'érosion latérale pour l'essai **Hf1** et celle pour l'essai **Hf2**. Ce décalage est d'environ une minute comme nous pouvons l'observer sur le graphique ci-dessous :

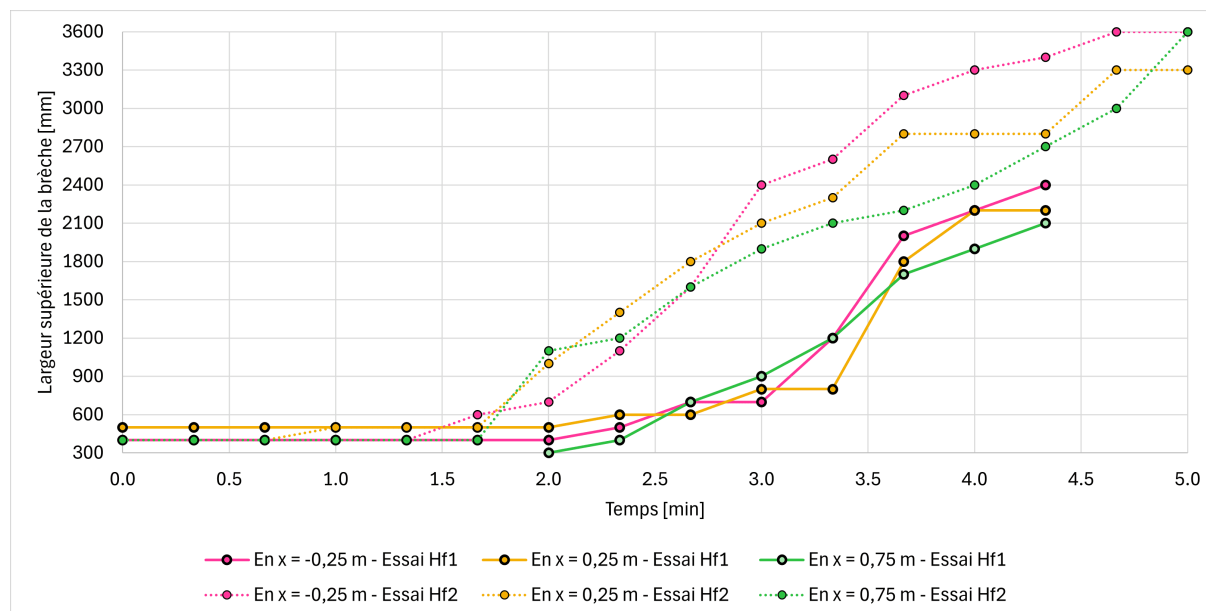


FIGURE 6.11 – Essais **Hf1** et **Hf2** : Évolution de la largeur supérieure de la brèche

Sans ce décalage, la vitesse d'érosion latérale observée lors de l'essai **Hf1** est légèrement plus lente que celle observée lors de l'essai **Hf2**. En effet, la vitesse d'élargissement de la largeur supérieure de la brèche moyenne est de 1225 mm/min entre $t = 1,7 \text{ min}$ et $t = 3,0 \text{ min}$ pour l'essai **Hf2** ce qui est environ 1,15 fois plus rapide que les 1075 mm/min entre $t = 2,7 \text{ min}$ et $t = 4,0 \text{ min}$ calculés pour l'essai **Hf1**.

La largeur de la brèche atteint la largeur de la digue après environ cinq minutes pour l'essai **Hf2**. Pour l'essai **Hf1**, la brèche ne s'est pas étendue à toute la largeur de la digue étant donné que les pompes ont été arrêtées plus tôt, en $t = 3,1 \text{ min}$. Le mécanisme d'élargissement s'est donc arrêté plus tôt.

Débits et hauteur d'eau

Le débit alimentant le bassin, le débit passant par la brèche et la hauteur d'eau dans le bassin mesurés lors de l'essai **Hf1** sont tracés en trait plein sur le graphique ci-dessous et ceux mesurés lors de l'essai **Hf2** sont tracés en traits pointillés.

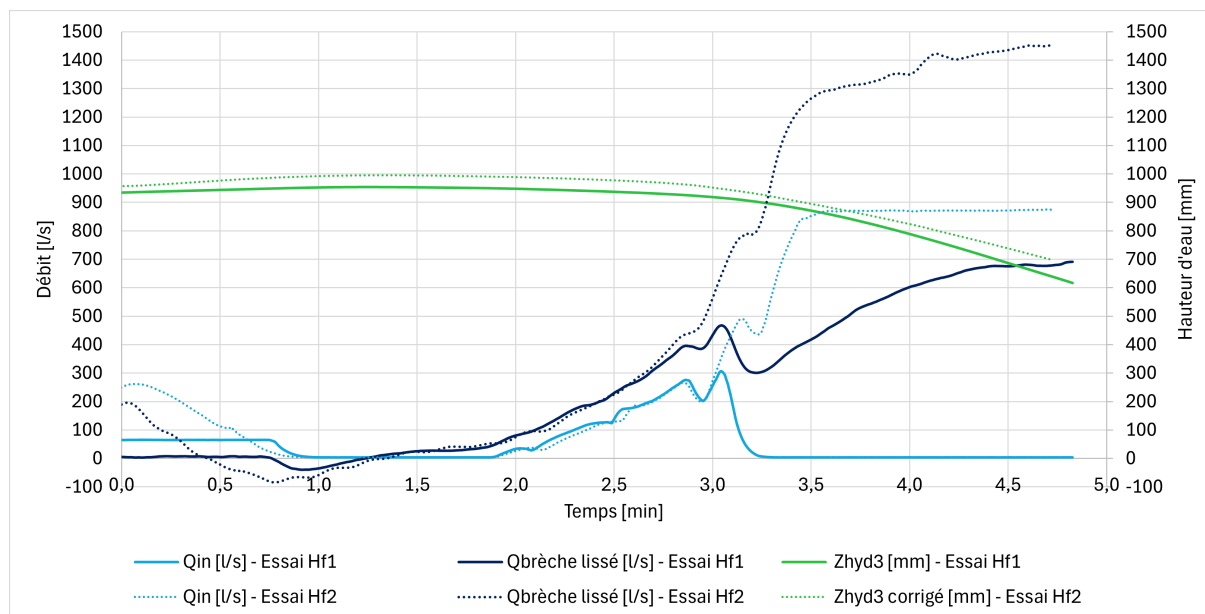


FIGURE 6.12 – Essais **Hf1** et **Hf2** : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche lissé ($Q_{brèche\ lissé}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3}) en fonction du temps

Une première différence entre les deux essais pendant les 3 premières minutes est le niveau d'eau qui reste plus ou moins constant et égal à 0,95 m pour l'essai **Hf1** alors qu'il est plus élevé pour l'essai **Hf2**. Ceci est dû au fait que pour l'essai **Hf2**, le niveau d'eau de consigne initial était égal à 0,95 m comme pour l'essai **Hf1**, mais il a été augmenté à 0,98 m, car l'eau ne s'écoulait pas sur la pente aval comme mentionné dans la sous-section "Déroulement des essais".

Pour l'essai **Hf2**, le niveau de consigne imposé dans un second temps a été légèrement dépassé. En effet, il était de 0,98 m, mais nous observons que la hauteur d'eau dans le bassin a frôlé 1,00 m.

Pour l'essai **Hf2**, 0,3 minute avant le début de l'écoulement sur la pente aval, lorsque le niveau de consigne a été augmenté à 0,98 m, les pompes se sont remises en route afin d'augmenter le niveau d'eau dans le bassin. Nous pouvons en effet voir sur la figure 6.12 qu'avant $t = 1\ min$ le débit d'entrée a été augmenté jusqu'à ce que le niveau dans le bassin atteigne le nouveau niveau de consigne. Cette augmentation du débit d'entrée est une des raisons pour laquelle l'érosion s'est initiée plus tôt pour l'essai **Hf2** que pour l'essai **Hf1**.

Le fait que l'érosion (verticale aussi bien que latérale) commence plus tôt et est plus rapide pour l'essai **Hf2**, pourrait être dû à d'autres causes :

- Comme mentionné dans la sous-section "Données récoltées pendant la construction des digues", le sable a été mieux compacté pour l'essai **Hf1** que pour l'essai **Hf2**.
- La brèche était moins profonde pour l'essai **Hf2**. La brèche initiale était par conséquent plus courte.
- Comme expliqué précédemment, l'eau a stagné un moment au niveau de la brèche, avant que l'écoulement commence réellement sur la pente aval pour l'essai **Hf2**.

L'eau a fait quelques va-et-vient au niveau de la brèche avant de s'écouler sur la pente aval.

Pendant les 3 premières minutes, le débit d'entrée (en bleu clair sur la figure 6.12), le débit de brèche (en bleu foncé sur la figure 6.12) et la hauteur d'eau dans le bassin (en vert sur la figure 6.12) de l'essai **Hf2** suivent la même tendance que ceux de l'essai **Hf1**. Ces résultats ne sont pas cohérents avec ceux exposés ci-dessus. En effet, il y a un décalage d'environ une minute entre ces deux essais par rapport à l'évolution de la brèche. À un même moment, la brèche de l'essai **Hf1** est moins profonde et plus étroite que celle de l'essai **Hf2**. Nous devrions donc observer un débit de brèche plus élevé pour l'essai **Hf2**. Or, nous n'observons pas de décalage sur l'évolution du débit de brèche ni sur le débit fournis par les pompes lorsqu'elles se remettent en route lorsque le niveau d'eau dans le bassin commence à diminuer. Nous apportons les éléments de réponse susceptibles d'expliquer cela :

- Un abaissement du niveau d'eau plus localisé près de la brèche pour l'essai **Hf2** pourrait expliquer le fait que les pompes se relancent plus tard. Car dans ce cas, les capteurs de niveau d'eau mettent plus de temps à détecter que le niveau d'eau diminue. Néanmoins, les capteurs sont relativement éloignés de la brèche. Cette hypothèse nous semble donc peu probable.
- Les imprécisions dues à la mise à zéro de la hauteur d'eau dans le bassin et des débits d'entrée et de brèche pourraient impliquer un décalage temporel de ces données.

Ces facteurs pourraient expliquer un léger décalage temporel des courbes de la figure 6.12 qui resterait néanmoins inférieur au décalage d'environ une minute auquel on s'attend après avoir analysé l'évolution de la brèche.

Nous pouvons observer que la hauteur d'eau dans le bassin est restée relativement constante durant les trois premières minutes qui ont suivi le début de l'écoulement sur la pente aval. Au cours du temps, la brèche s'élargit et s'approfondit, permettant à une plus grande quantité d'eau de passer par la brèche, ce qui implique une diminution du niveau d'eau dans le bassin. En $t = 1,9 \text{ min}$, nous pouvons voir que les pompes se sont remises en route afin de maintenir le niveau constant d'eau dans le bassin, mais après trois minutes, le débit d'entrée n'augmente pas assez vite et la hauteur d'eau dans le bassin diminue alors.

Après $t = 3,6 \text{ min}$, les pompes atteignent leur capacité maximale pour l'essai **Hf2**. Le débit d'entrée ne peut donc plus augmenter pour compenser la diminution du niveau d'eau dans le bassin. C'est donc à partir de cet instant que la hauteur d'eau dans le bassin diminue plus rapidement.

En prenant en compte la limitation des pompes, il est donc impossible de maintenir un niveau d'eau constant dans le bassin jusqu'à la fin de l'essai.

Pour l'essai **Hf1**, les pompes ont été arrêtées 3,1 minutes après le début de l'écoulement sur la pente aval. C'est pour cette raison que nous observons une grande différence entre les valeurs maximales du débit de brèche des 2 essais : environ 1450 l/s pour l'essai **Hf2** contre 690 l/s pour l'essai **Hf1**.

Conclusion

Le mécanisme d'évolution de la brèche observé a bien été reproduit (formation d'un escalier qui se déplace de l'aval vers l'amont puis élargissement par blocs). Par contre, il se déclare plus vite et évolue plus rapidement pour l'essai **Hf2** que pour à l'essai **Hf1**.

L'évolution du débit de brèche a quant à elle été reproduite hormis le décalage observé pour l'évolution de la brèche. Une étude plus approfondie serait nécessaire pour analyser les causes de cette incohérence.

Pour les essais de type **Hf**, nous prenons les résultats de l'essai **Hf2** comme référence pour les comparaisons dans la section 6.2, car les pompes ont été arrêtées avant ce qu'on considère comme la fin de l'essai pour l'essai **Hf1**. De plus, l'essai **Hf1** a été réalisé dans le cadre du travail de Gilles et Delforge (2023) contrairement à l'essai **Hf2** qui a été réalisé avec les mêmes personnes et en suivant les mêmes étapes de construction de la digue que les autres essais des types **Qf** et **Qm**.

6.1.2 Débit constant alimentant le bassin et sable fin ($d_{50} = 0,314 \text{ mm}$), **Qf**

L'essai **Qf3** s'est déroulé le 14 mars 2024 entre 15h13 et 15h41. Il a été réalisé en fournissant au bassin un débit constant égal à 224 l/s et en utilisant le sable fin (diamètre médian des grains de sable : $d_{50} = 0,314 \text{ mm}$) pour construire la digue. Afin de tester la reproductibilité d'un tel essai, nous avons effectué l'essai **Qf4** le 10 avril 2024 entre 12h12 et 12h37 dans les mêmes conditions.

Données récoltées pendant la construction des digues

Durant la construction des digues des essais de type **Qf**, les échantillons de sable ont été presque exclusivement prélevés après compaction. Or, comme expliqué dans la section 5.3, les teneurs en eau mesurées après compaction ne reflètent pas fidèlement l'humidification de la couche de sable pendant la compaction. Il n'est donc pas opportun d'interpréter l'efficacité de la compaction sur base de ces mesures.

Les mesures de masses volumiques sèches après compaction de chaque couche de sable pendant la construction de la digue pour les essais **Qf3** et **Qf4** sont reprises ci-dessous :

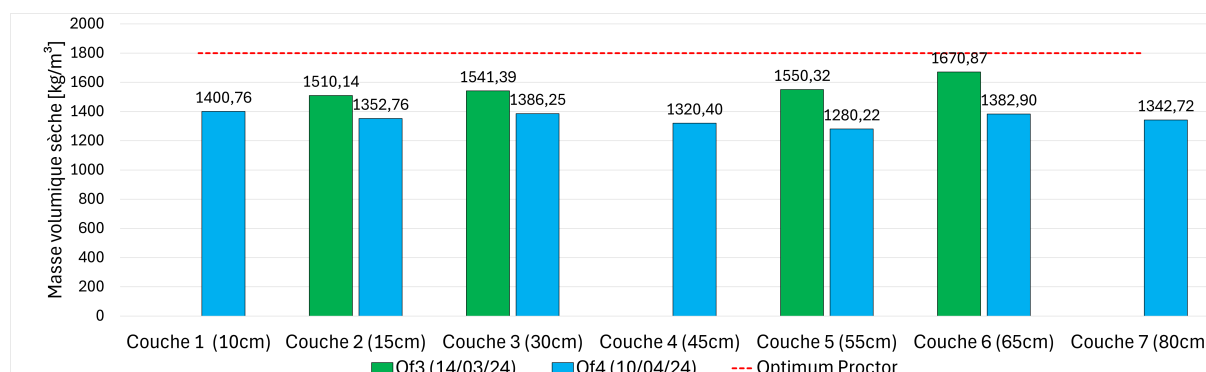


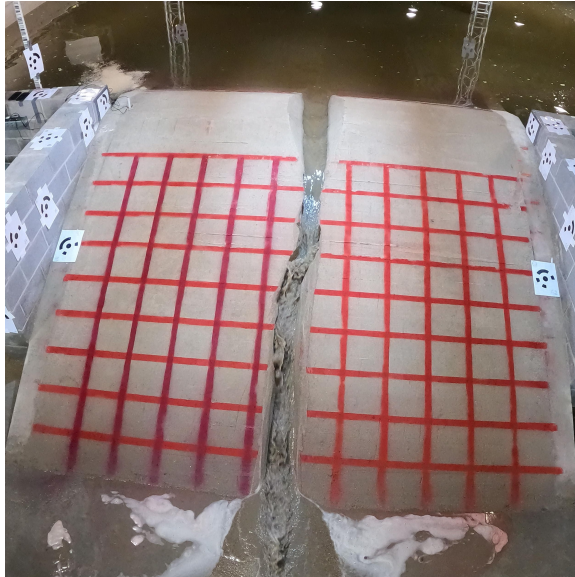
FIGURE 6.13 – Essais **Qf3** et **Qf4** : Masses volumiques sèches des couches de sable après compaction

Nous observons que, pour les mêmes couches de sable, les masses volumiques sèches de l'essai **Qf3** sont légèrement plus élevées que celles de l'essai **Qf4**. La digue a donc été légèrement mieux compactée pour l'essai **Qf3**.

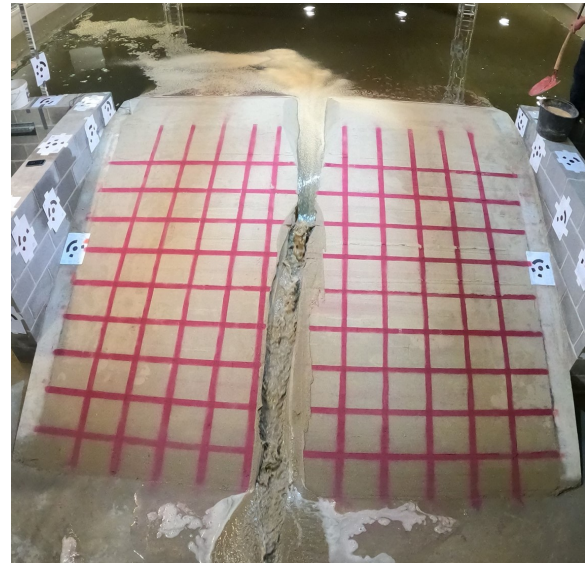
Déroulement des essais

Comme mentionné à la section 5.4.1, le temps $t = 0 \text{ min}$ (pour tous les graphiques de ce rapport) correspond au moment où l'écoulement débute sur la pente aval.

Après 0,6 minute, nous avons observé qu'un escalier commençait à se former dans le fond de la brèche.



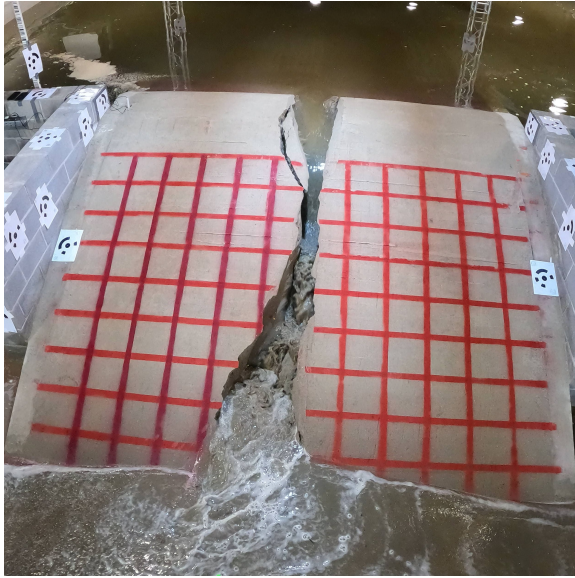
(a) Essai **Qf3**



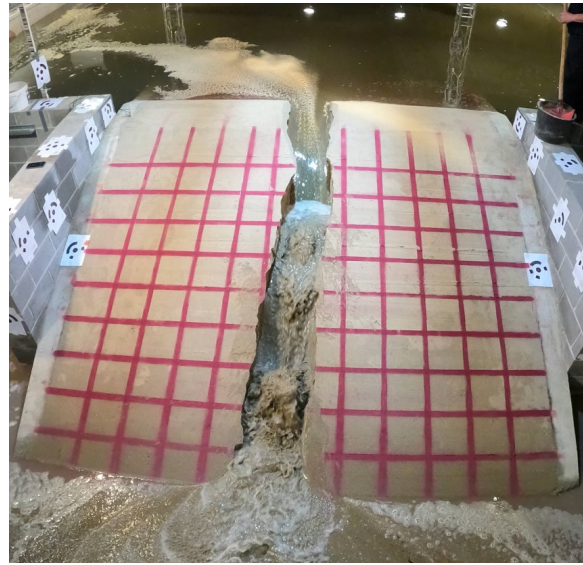
(b) Essai **Qf4**

FIGURE 6.14 – Photos prises en $t = 0,6 \text{ min}$

Cet escalier s'est ensuite déplacé vers l'amont.



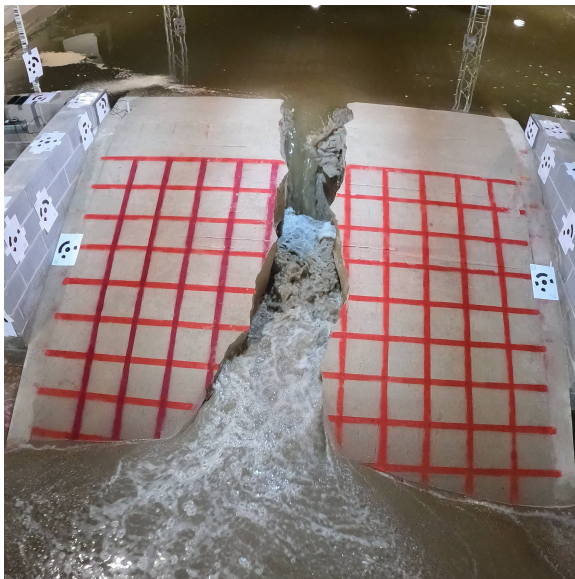
(a) Essai **Qf3**



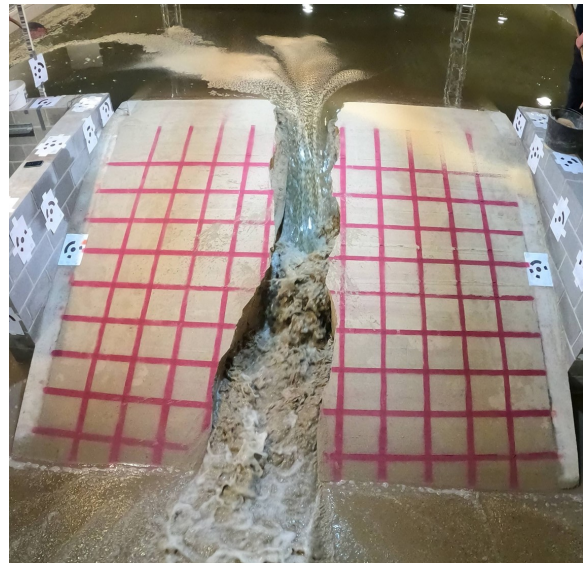
(b) Essai **Qf4**

FIGURE 6.15 – Photos prises en $t = 1,4 \text{ min}$

Sur les photos ci-dessous, nous pouvons observer que la brèche s'est plus érodée verticalement que latéralement pendant les 2 premières minutes de ces deux essais.



(a) Essai **Qf3**



(b) Essai **Qf4**

FIGURE 6.16 – Photos prises en $t = 2,0 \text{ min}$

Après $t = 2,0 \text{ min}$, nous observons que l'élargissement de la brèche s'accélère. Cet élargissement se fait par blocs. Nous pouvons en effet observer sur les photos ci-dessous des blocs d'environ 30 cm de large qui se décrochent.

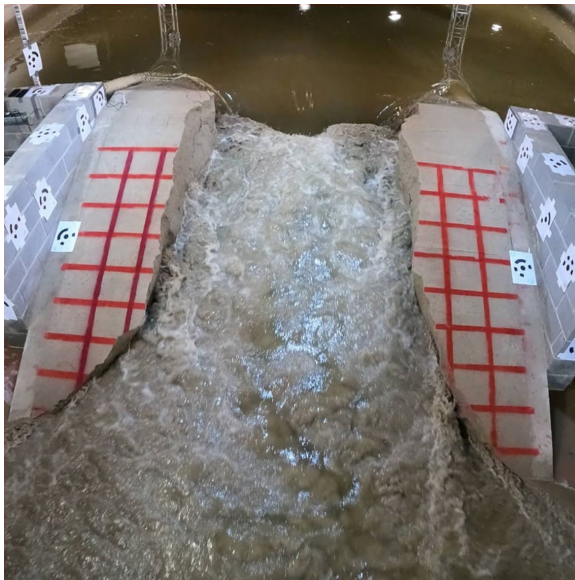


(a) Essai **Qf3**

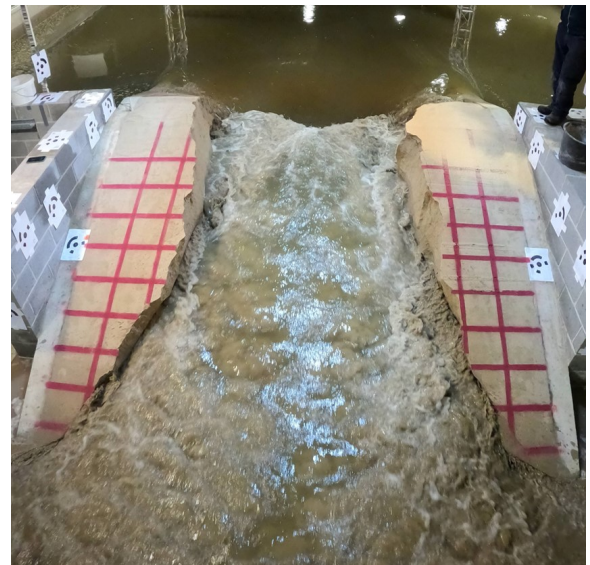


(b) Essai **Qf4**

FIGURE 6.17 – Photos prises en $t = 3,1 \text{ min}$



(a) Essai **Qf3**



(b) Essai **Qf4**

FIGURE 6.18 – Photos prises en $t = 3,8 \text{ min}$

Sur ces photos, nous observons que l'évolution de la brèche est semblable pour les essais **Qf3** et **Qf4**.

Approfondissement de la brèche

En étudiant le moment de l'apparition des balles colorées situées à différentes hauteurs et à différents endroits (en $x = -0,25 \text{ m}$, $x = 0,25 \text{ m}$ et $x = 0,75 \text{ m}$) pour les essais **Qf3** (trait plein) et **Qf4** (traits pointillés), nous obtenons l'évolution de la hauteur du fond de la brèche suivante :

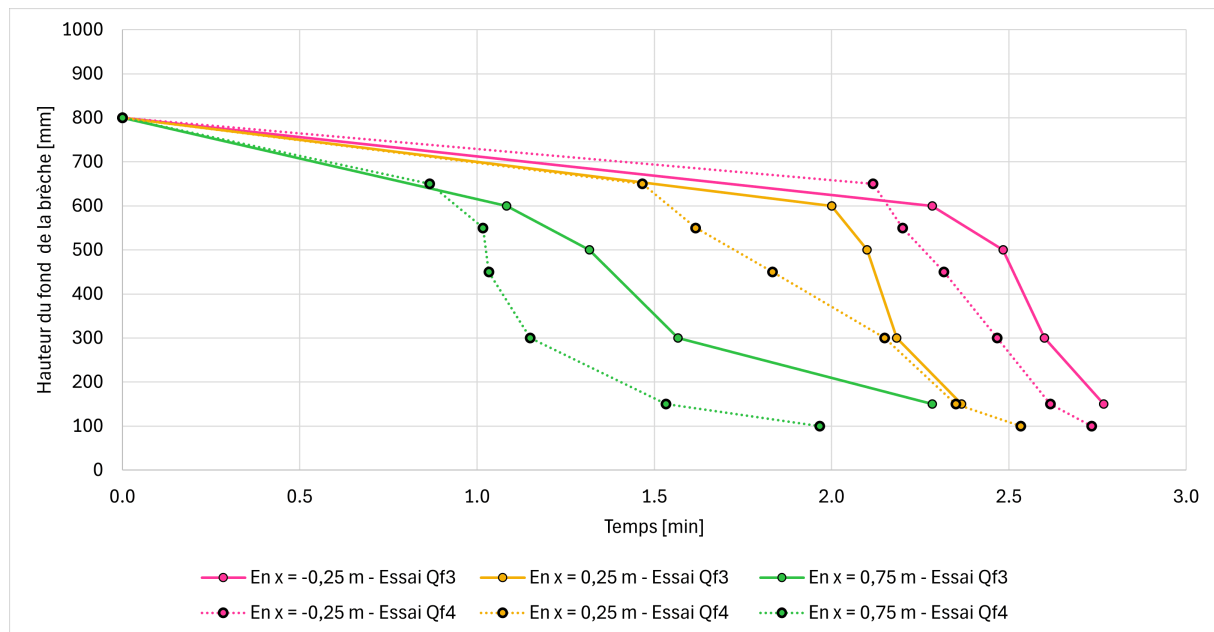


FIGURE 6.19 – Essais **Qf3** et **Qf4** : Évolution de la hauteur du fond de la brèche

Sur la figure ci-dessus, nous observons que l'érosion verticale s'est produite plus tard pour l'essai **Qf3** que pour l'essai **Qf4**. Le décalage temporel entre l'évolution de la profondeur de la brèche pour les deux essais est d'environ 15 secondes.

Comme mentionné dans la sous-section "*Données récoltées pendant la construction des digues*", la digue de l'essai **Qf3** a été légèrement mieux compactée que celle de l'essai **Qf4**. Ceci peut expliquer le fait que l'érosion verticale s'initie légèrement plus tard pour l'essai **Qf3**.

Entre la balle la plus haute et la balle la plus basse, les vitesses d'érosion verticale sont les suivantes :

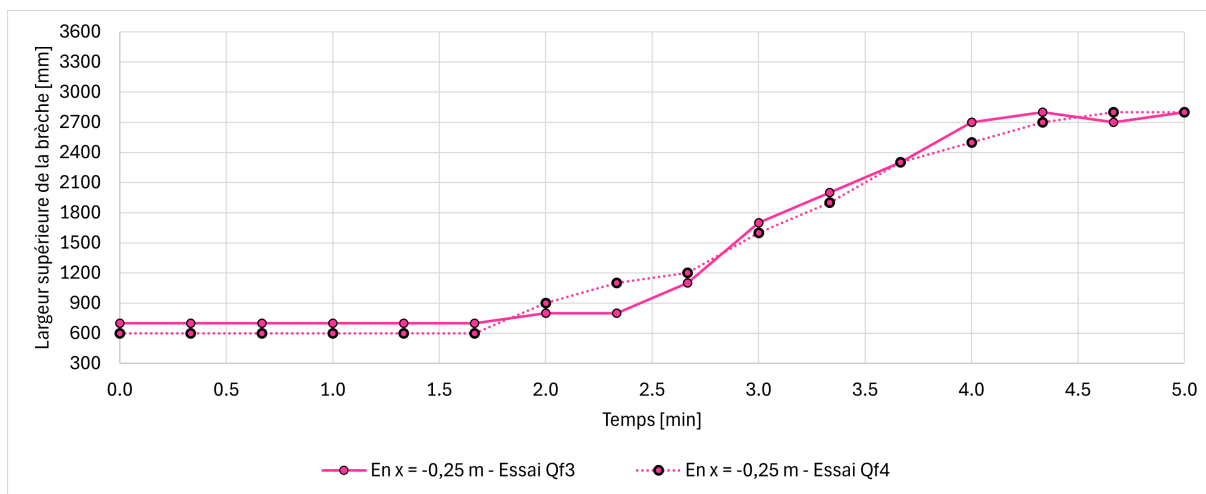
- pour l'essai **Qf3**
 - 375 mm/min en $x = -0,25$ m
 - 1227 mm/min en $x = 0,25$ m
 - 931 mm/min en $x = 0,75$ m
- pour l'essai **Qf4**
 - 500 mm/min en $x = -0,25$ m
 - 516 mm/min en $x = 0,25$ m
 - 892 mm/min en $x = 0,75$ m

La vitesse d'érosion verticale est relativement semblable en $x = -0,25$ m et en $x = 0,75$ m, mais est plus de 2 fois plus élevée en $x = 0,25$ m pour l'essai **Qf3**. Ces différences peuvent être expliquées par l'imprécision de la position initiale des balles et par le côté aléatoire de la rupture par blocs qui est observée. La tendance générale de l'approfondissement de la brèche a néanmoins été relativement bien reproduite.

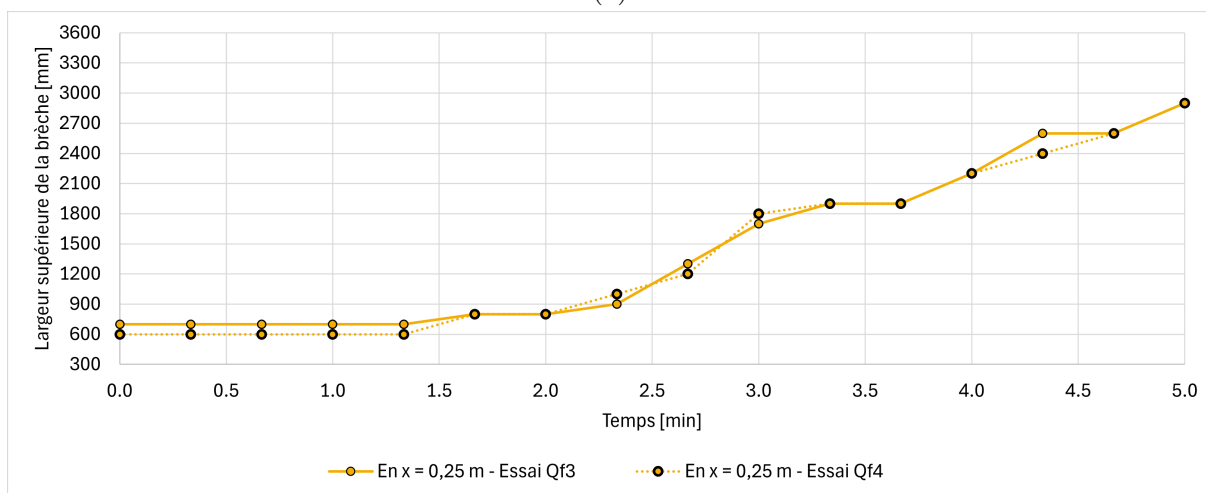
Élargissement de la brèche

Sur la figure ci-dessous, nous observons que la largeur supérieure de la brèche a évolué sensiblement de la même manière lors des essais **Qf3** et **Qf4**, que ce soit en amont de la

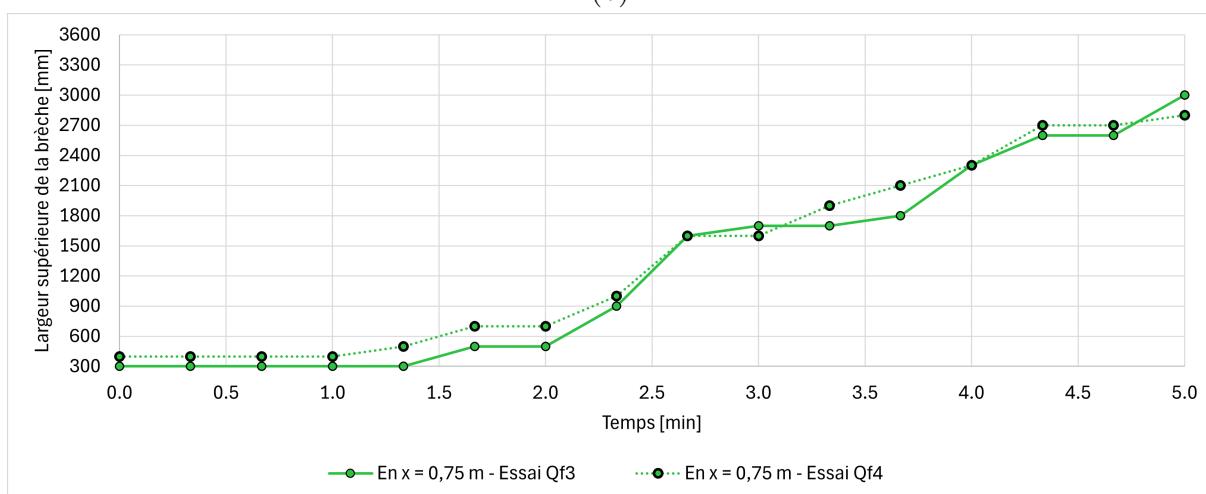
crête (en $x = -0,25$ m), en aval de la crête (en $x = 0,25$ m) et sur la pente aval (en $x = 0,75$ m).



(a)



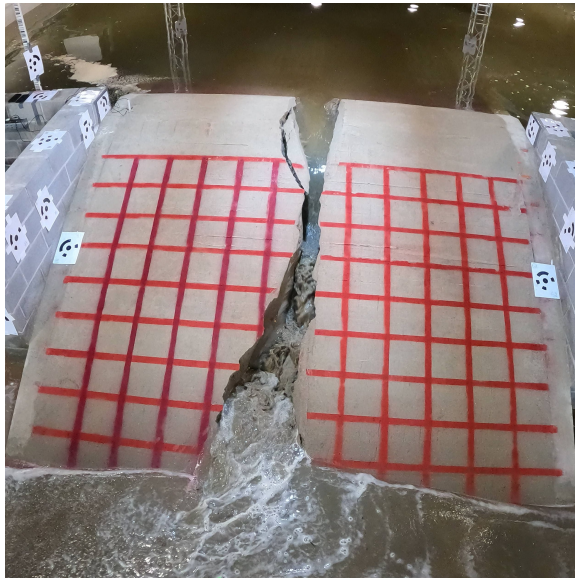
(b)



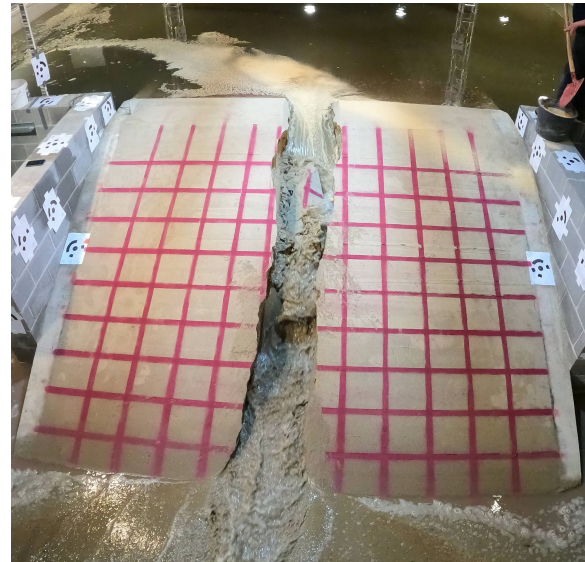
(c)

FIGURE 6.20 – Essais **Qf3** et **Qf4** : Évolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête (a), en aval de la crête (b) et sur la pente aval (c)

Les légères différences entre les deux essais peuvent s'expliquer par le fait que l'érosion latérale se fait par blocs. La rupture par blocs a, en effet, un côté aléatoire. Ces blocs sont de 10 à 30 cm de large. Nous pouvons voir sur la figure 6.21 le premier bloc de sable au niveau de la crête de la digue qui se détache.



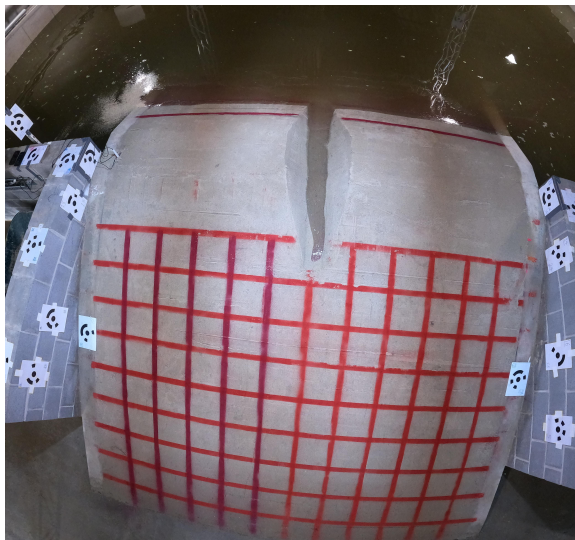
(a) Essai **Qf3** : $t = 1,4 \text{ min}$



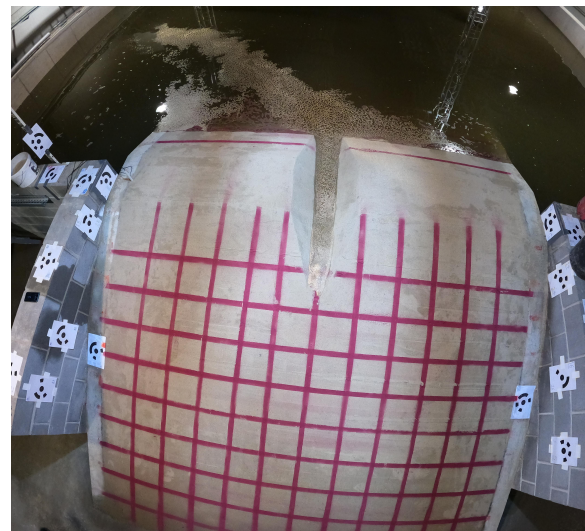
(b) Essai **Qf4** : $t = 1,6 \text{ min}$

FIGURE 6.21 – Photos prises durant les essais

Nous observons sur ces photos que la brèche évolue symétriquement pour l'essai **Qf4** mais pas pour l'essai **Qf3**. Ceci est dû au fait qu'initialement, à cause d'imprécisions lors de la construction de la brèche pour l'essai **Qf3**, celle-ci était déjà asymétrique comme nous pouvons le voir sur les photos ci-dessous.



(a) Essai **Qf3**



(b) Essai **Qf4**

FIGURE 6.22 – Photos prises en $t = 0,0 \text{ min}$

Le fait que la brèche initiale ne soit pas parfaitement dans le plan longitudinal de la

digue pour l'essai **Qf3** peut expliquer un léger retard de l'érosion au début de l'écoulement, lorsque l'érosion verticale est prédominante.

Débits et hauteur d'eau

Le débit alimentant le bassin, le débit passant par la brèche et la hauteur d'eau dans le bassin mesurés lors de l'essai **Qf3** sont tracés en trait plein sur le graphique ci-dessous et ceux mesurés lors de l'essai **Qf4** sont tracés en traits pointillés.

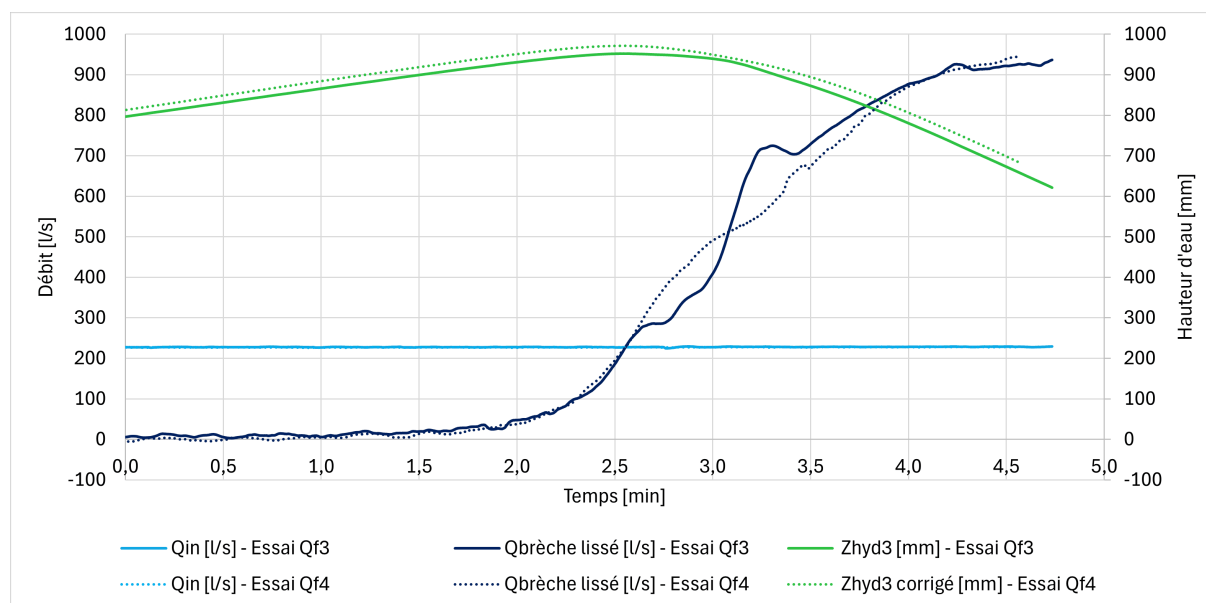


FIGURE 6.23 – Essais **Qf3** et **Qf4** : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche lissé par moyenne mobile ($Q_{brèche\ lissé}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3}) en fonction du temps

Pour l'essai **Qf3**, le niveau d'eau obtenu par la sonde hydrostatique numéro 3 (Z_{hyd3}) correspond à celui mesuré par la sonde à ultrasons placée au même endroit. Il ne faut donc pas corriger le niveau d'eau que nous fournit la sonde hydrostatique Z_{hyd3} .

Pour l'essai **Qf4**, le niveau d'eau obtenu par cette même sonde était 20 mm sous celui mesuré par la sonde à ultrasons placée au même endroit. Étant donné que les sondes à ultrasons sont plus précises que les sondes hydrostatiques, nous corrigeons la courbe Z_{hyd3} pour l'essai **Qf4** en augmentant son niveau d'eau mesuré de 20 mm.

Pour ces deux essais, le débit d'entrée fourni par les pompes (Q_{in} , en bleu clair sur la figure 6.23) est bien constant et égal à 224 l/s.

Sur base de la figure 6.23, nous pouvons observer que la hauteur d'eau dans le bassin a été relativement bien reproduite. La différence de hauteur d'eau est de maximum 2 cm. Une imprécision lors de la construction de la brèche peut être la cause d'une telle différence.

Pour les deux essais, la hauteur d'eau dans le bassin augmente jusqu'à atteindre sa valeur maximale d'environ 0,95 m en $t = 2,5\ min$, puis diminue. La diminution du niveau d'eau se fait plus rapidement que l'augmentation.

En ce qui concerne le débit de brèche, il a été moins bien reproduit. Il y a une différence entre les débits de brèche calculés pour les deux essais entre $t = 2,6 \text{ min}$ et $t = 4,0 \text{ min}$. Cette différence vaut jusqu'à 160 l/s. Cependant, la tendance générale de l'évolution du débit de brèche est similaire pour les deux essais.

Entre $t = 0,0 \text{ min}$ et $t = 4,6 \text{ min}$ (le temps considéré comme le temps final de l'essai **Qf4** qui est plus court que le temps final de l'essai **Qf3**), la différence moyenne entre les débits de brèche des deux essais est de 7,1 l/s et son écart-type est de 41,4 l/s. Comparé à la valeur maximale de ces débits de brèche qui est d'environ 940 l/s pour les deux essais, ces valeurs sont relativement faibles. Nous pouvons donc considérer que le débit de brèche a été assez bien reproduit.

Conclusion

Les essais de type **Qf** ont été bien reproduits à part une érosion verticale qui s'est déclenchée légèrement plus tard pour l'essai **Qf3** que pour l'essai **Qf4**. Pour l'essai **Qf3**, l'augmentation du débit de brèche ralentit fortement juste après $t = 2,5 \text{ min}$, puis augmente fortement en $t = 3,0 \text{ min}$ avant poursuivre avec la même tendance que l'essai **Qf4**. L'augmentation du débit de brèche est plus progressive pour l'essai **Qf4** et correspond donc plus à ce que nous avons pu observer dans la littérature.

Pour cette raison, pour les essais de type **Qf**, nous prenons les résultats de l'essai **Qf4** pour les comparaisons dans la section 6.2.

6.1.3 Débit constant alimentant le bassin et sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$), **Qm**

L'essai **Qm1** s'est déroulé le 28 mars 2024 entre 13h25 et 13h59. Il a été réalisé en fournissant au bassin un débit constant égal à 224 l/s et en utilisant le sable moyen (diamètre médian des grains de sable : $d_{50} = 0,632 \text{ mm}$) pour construire la digue. Afin de tester la reproductibilité d'un tel essai, il a été réitéré le 24 avril 2024 entre 13h25 et 14h02. Cet essai réalisé dans les mêmes conditions que le **Qm1** est l'essai **Qm2**.

Données récoltées pendant la construction des digues

Durant la construction des digues des essais de type **Qm**, les échantillons de sable ont été presque exclusivement prélevés après compaction. Or, comme expliqué dans la section 5.3, les teneurs en eau mesurées après compaction ne reflètent pas fidèlement l'humidification de la couche de sable pendant la compaction. Il n'est donc pas opportun d'interpréter l'efficacité de la compaction sur base de ces mesures.

Les mesures de masses volumiques sèches après compaction de chaque couche de sable pendant la construction de la digue pour les essais **Qm1** et **Qm2** sont reprises ci-dessous :

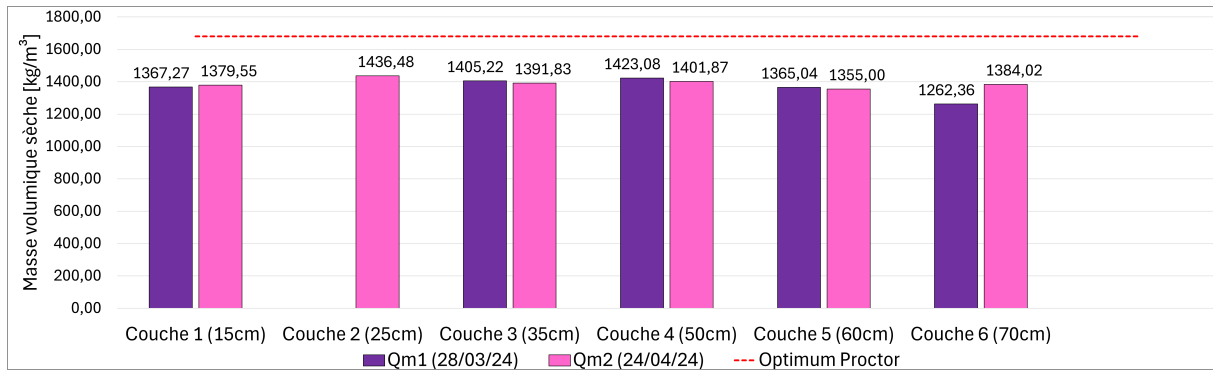


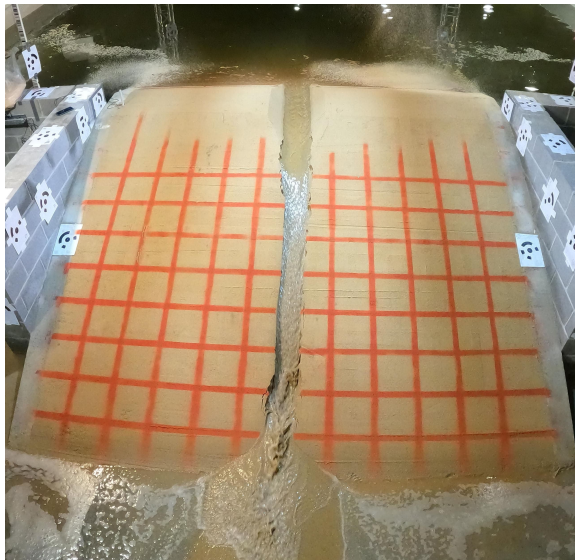
FIGURE 6.24 – Essais **Qm1** et **Qm2** : Masses volumiques sèches des couches de sable après compaction

Nous observons que, pour les mêmes couches de sables, les masses volumiques sèches des deux essais sont relativement proches. Nous pouvons donc considérer que les digues de ces deux essais ont été compactées de la même manière.

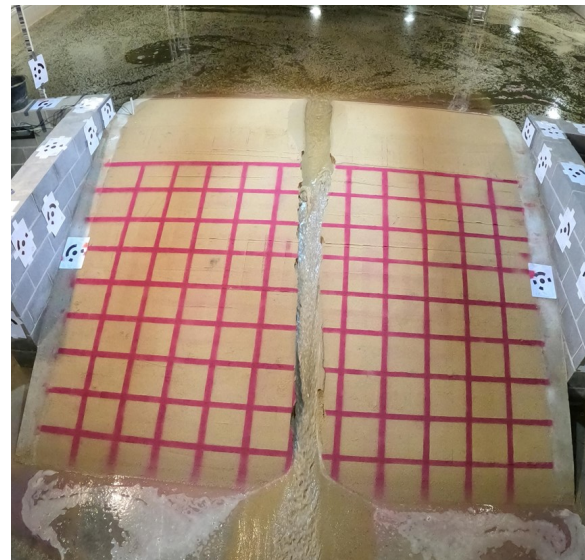
Déroulement des essais

Comme mentionné à la section 5.4.1, le temps $t = 0 \text{ min}$ (pour tous les graphiques de ce rapport) correspond au moment où l'écoulement débute sur la pente aval.

Durant le début des essais, le fond de la brèche est une pente parallèle à la pente aval de la digue.



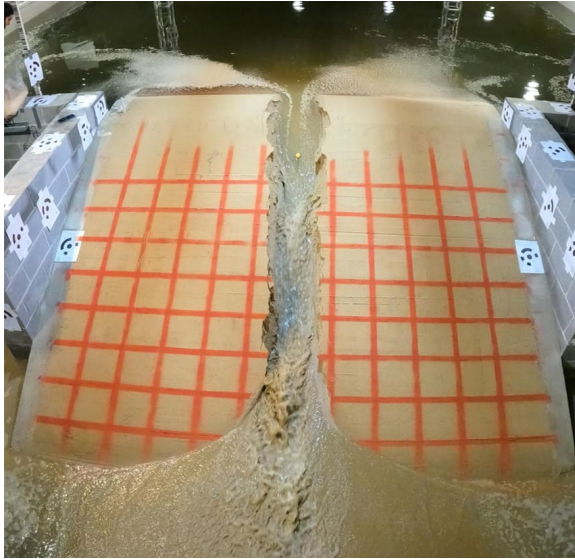
(a) Essai **Qm1**



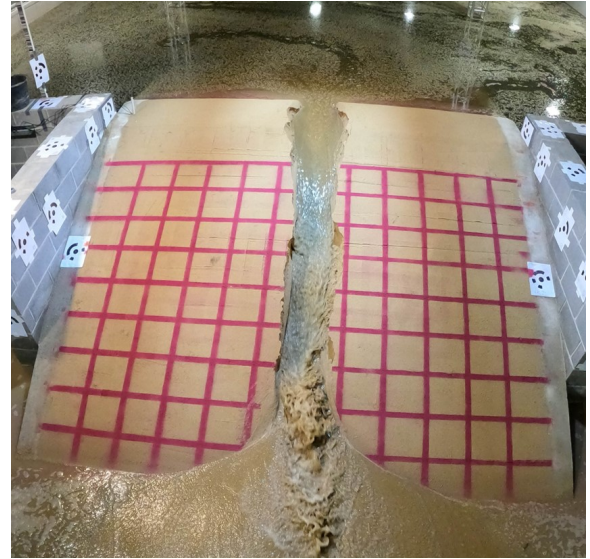
(b) Essai **Qm2**

FIGURE 6.25 – Photos prises en $t = 0,6 \text{ min}$

Le fond de la brèche s'approfondit ensuite en restant parallèle à la géométrie initiale de la digue.



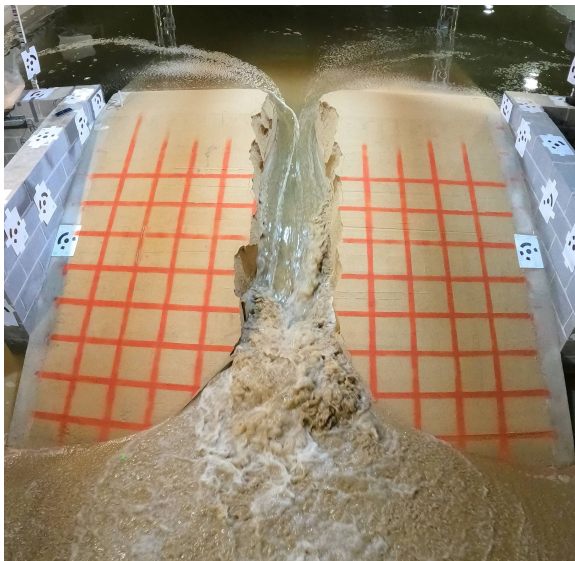
(a) Essai **Qm1**



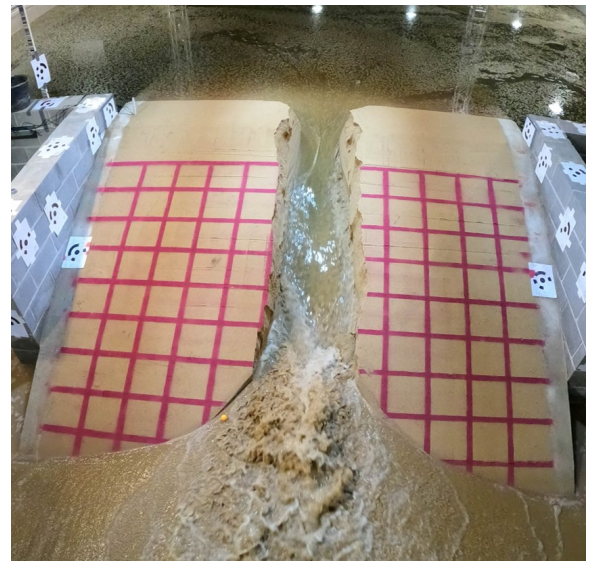
(b) Essai **Qm2**

FIGURE 6.26 – Photos prises en $t = 1,4 \text{ min}$

Sur les photos ci-dessous, nous pouvons observer que la brèche s'est plus érodée verticalement que latéralement pendant les deux premières minutes de ces deux essais.



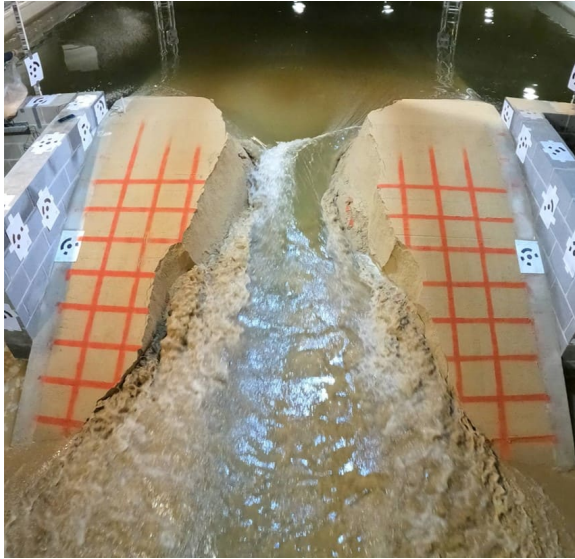
(a) Essai **Qm1**



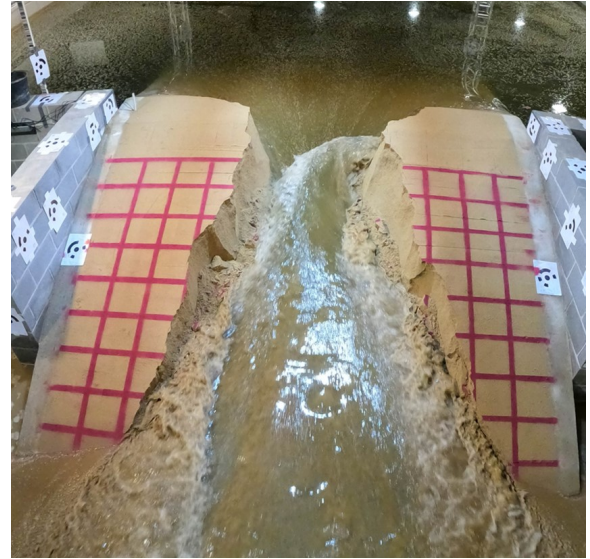
(b) Essai **Qm2**

FIGURE 6.27 – Photos prises en $t = 2,0 \text{ min}$

Après $t = 2,0 \text{ min}$, nous observons que l'élargissement de la brèche s'accélère de manière progressive pour les deux essais.

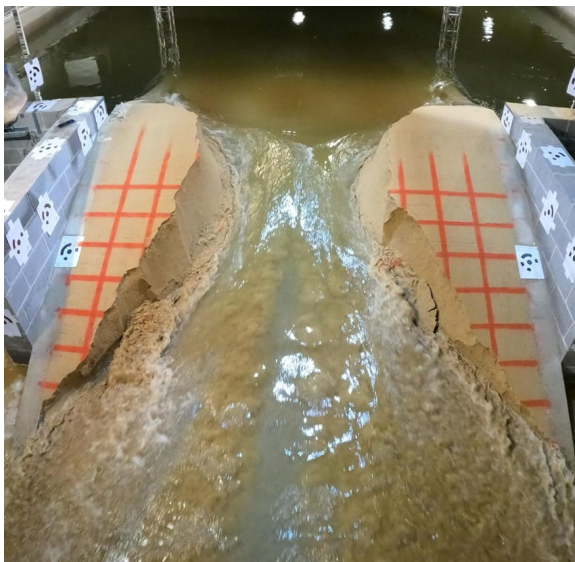


(a) Essai **Qm1**

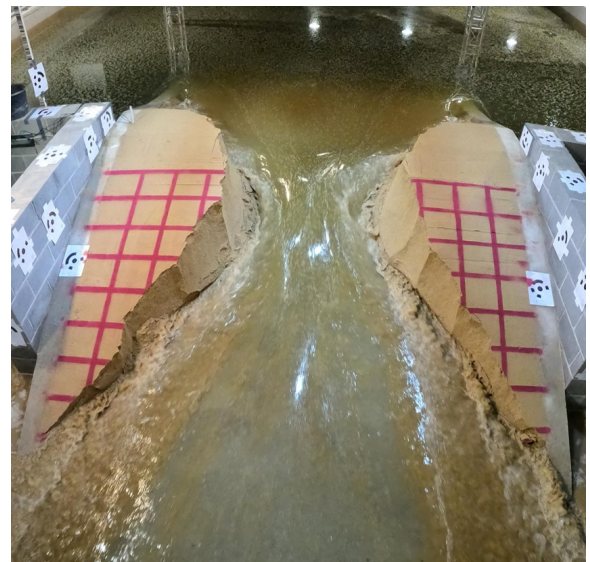


(b) Essai **Qm2**

FIGURE 6.28 – Photos prises en $t = 3,1 \text{ min}$



(a) Essai **Qm1**



(b) Essai **Qm2**

FIGURE 6.29 – Photos prises en $t = 3,8 \text{ min}$

Sur ces photos, nous observons que l'évolution de la brèche est semblable pour les essais **Qm1** et **Qm2**.

Approfondissement de la brèche

En étudiant le moment de l'apparition des balles colorées situées à différentes hauteurs et à différents endroits (en $x = -0,25 \text{ m}$, $x = 0,25 \text{ m}$ et $x = 0,75 \text{ m}$) pour les essais **Qm1** (trait plein) et **Qm2** (traits pointillés), nous obtenons l'évolution de la hauteur du fond de la brèche suivante :

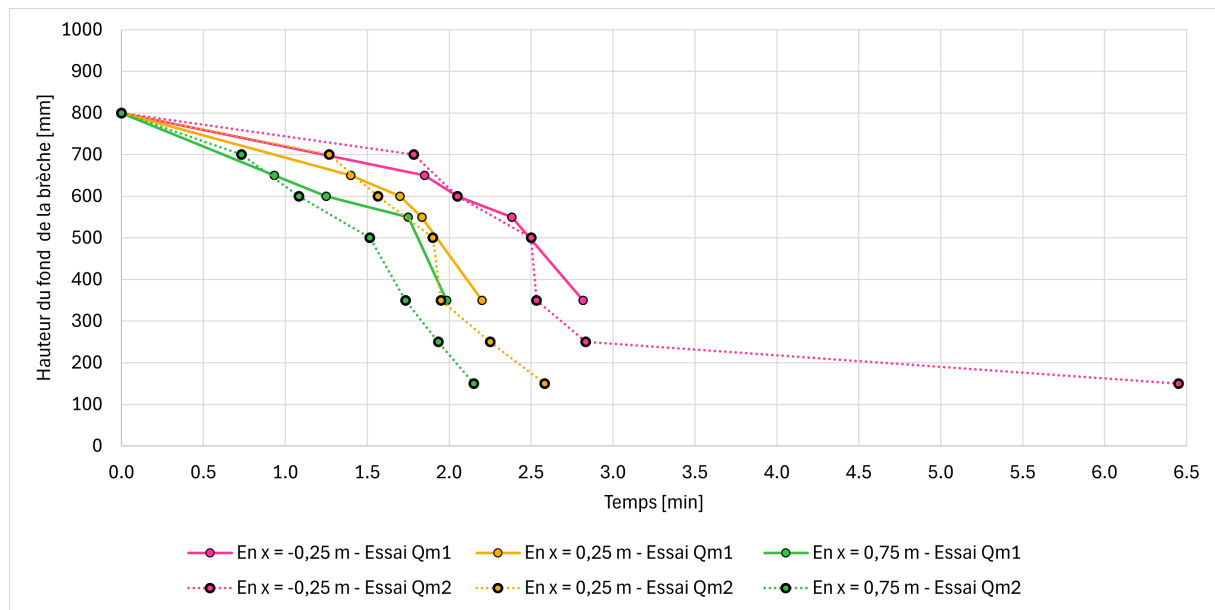
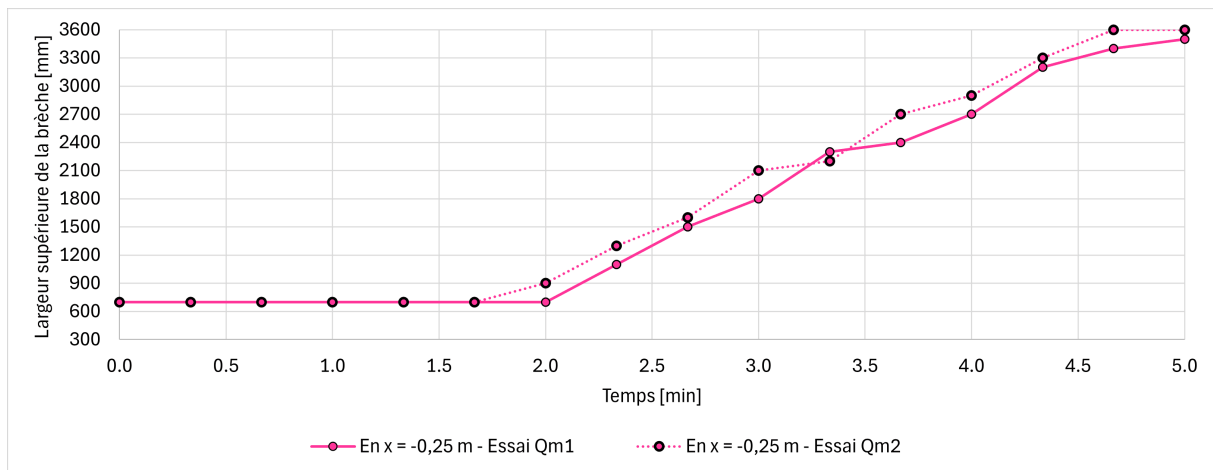


FIGURE 6.30 – Essais **Qm1** et **Qm2** : Évolution de la hauteur du fond de la brèche

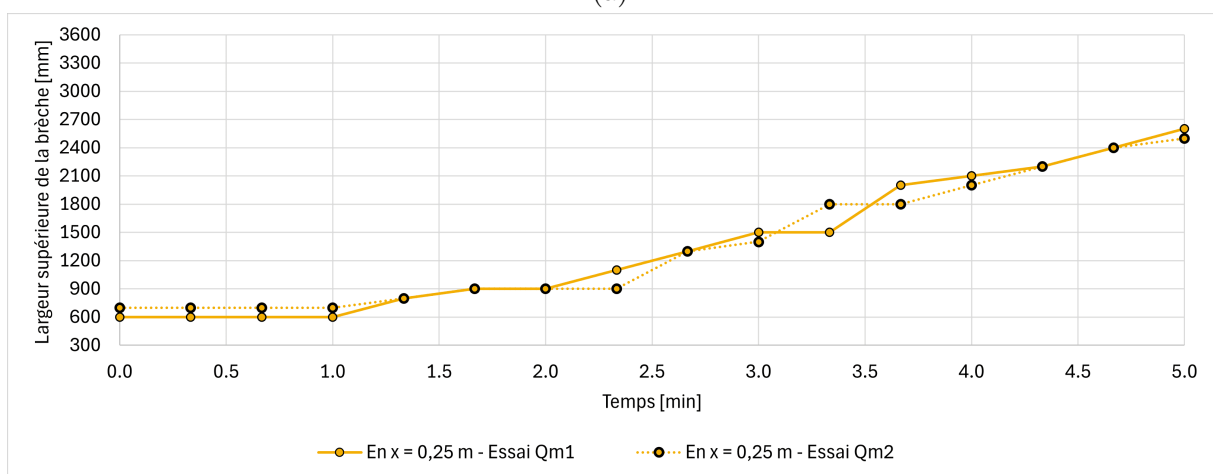
Sur la figure ci-dessus, nous observons que la hauteur du fond de la brèche a évolué sensiblement de la même manière lors des essais **Qm1** et **Qm2**.

Élargissement de la brèche

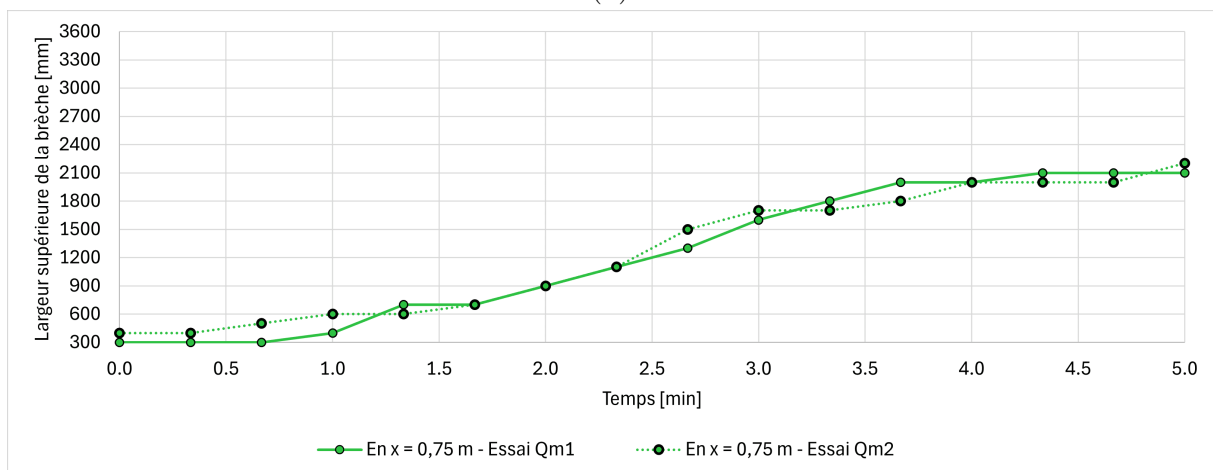
La largeur supérieure de la brèche a évolué sensiblement de la même manière lors des essais **Qm1** et **Qm2**, que ce soit en amont de la crête (en $x = -0,25$ m), en aval de la crête (en $x = 0,25$ m) et sur la pente aval (en $x = 0,75$ m) comme nous pouvons l'observer sur les graphiques ci-dessous :



(a)



(b)



(c)

FIGURE 6.31 – Essais **Qm1** et **Qm2** : Évolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête (a), en aval de la crête (b) et sur la pente aval (c)

Débits et hauteur d'eau

Le débit alimentant le bassin, le débit passant par la brèche et la hauteur d'eau dans le bassin mesurés lors de l'essai **Qm1** sont tracés en trait plein sur le graphique ci-dessous

et ceux mesurés lors de l'essai **Qm2** sont tracés en traits pointillés.

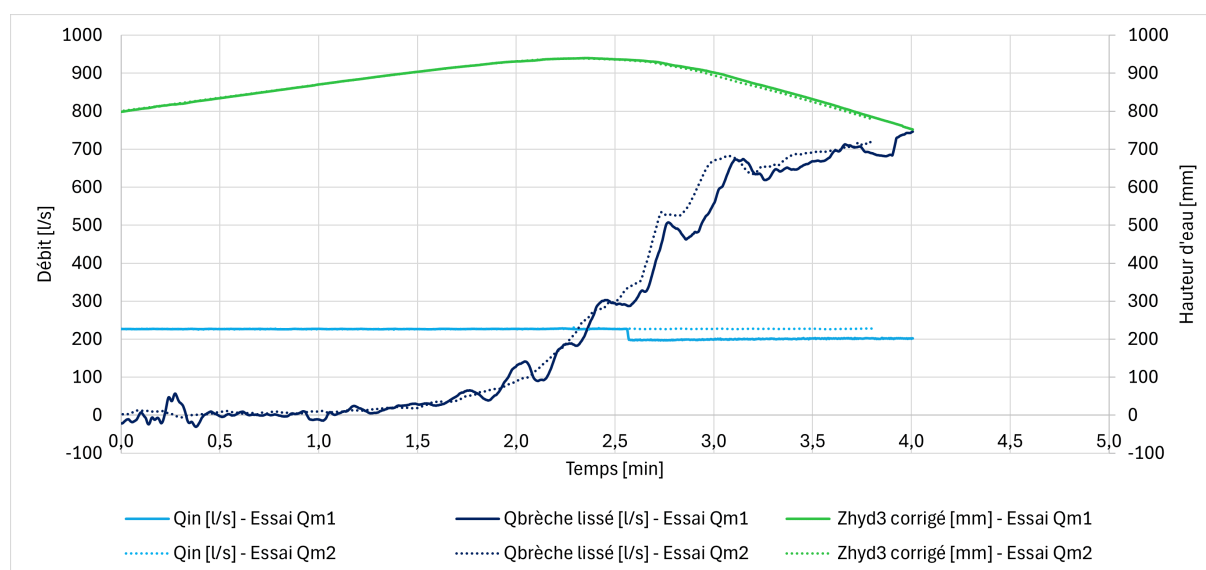


FIGURE 6.32 – Essais **Qm1** et **Qm2** : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche lissé par moyenne mobile ($Q_{brèche\ lissé}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3}) en fonction du temps

Pour ces deux essais, le débit d'entrée fourni par les pompes (Q_{in} , en bleu clair sur la figure 6.32) est bien constant et égal à 224 l/s, à l'exception d'une légère chute du débit en $t = 2,6\ min$ pour l'essai **Qm1**. Le débit d'entrée est passé de 224 l/s à 200 l/s pour une raison inconnue. Cette diminution n'a qu'un très faible impact sur l'évolution du débit de brèche calculé.

Sur base de la figure 6.32, nous pouvons observer que la hauteur d'eau dans le bassin a bien été reproduite. Pour les deux essais, la hauteur d'eau dans le bassin augmente jusqu'à atteindre sa valeur maximale de 0,94 m en $t = 2,3\ min$ puis diminue. La diminution du niveau d'eau se fait plus rapidement que l'augmentation.

En ce qui concerne le débit de brèche, il a aussi été bien reproduit.

Conclusion

Les essais de type **Qm** ont été bien reproduits. Néanmoins, durant l'essai **Qm1**, le débit d'entrée a chuté légèrement en $t = 2,6\ min$. Pour cette raison, nous allons prendre comme référence des essais **Qm**, l'essai **Qm2** pour les comparaisons dans la section 6.2.

6.2 Comparaisons

6.2.1 Condition frontière (hauteur constante d'eau dans le bassin VS débit constant alimentant le bassin) pour le sable fin ($d_{50} = 0,314\ mm$)

Comme expliqué aux sections 6.1.1 et 6.1.2, nous utilisons les résultats des essais **Hf2** et **Qf4** pour les comparer.

Cette comparaison a pour but de voir l'impact de la condition frontière (soit **Hf** : hauteur constante d'eau dans le bassin, soit **Qf** : débit constant alimentant le bassin) sur l'évolution temporelle de la brèche.

Notons que la géométrie initiale de la brèche est différente pour ces deux essais. En effet, pour l'essai **Hf2**, la profondeur de la brèche est initialement de 20 cm contre 10 cm pour l'essai **Qf4**.

Données récoltées pendant la construction des digues

Les mesures de masses volumiques sèches après compaction de chaque couche de sable pendant la construction de la digue pour les essais **Hf2** et **Qf4** sont reprises ci-dessous :

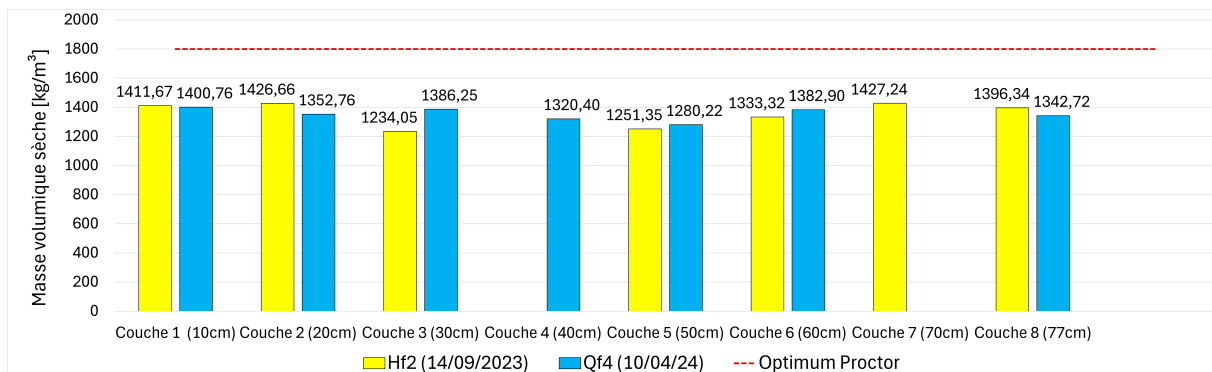


FIGURE 6.33 – Essais **Hf2** et **Qf4** : Masses volumiques sèches des couches de sable après compaction

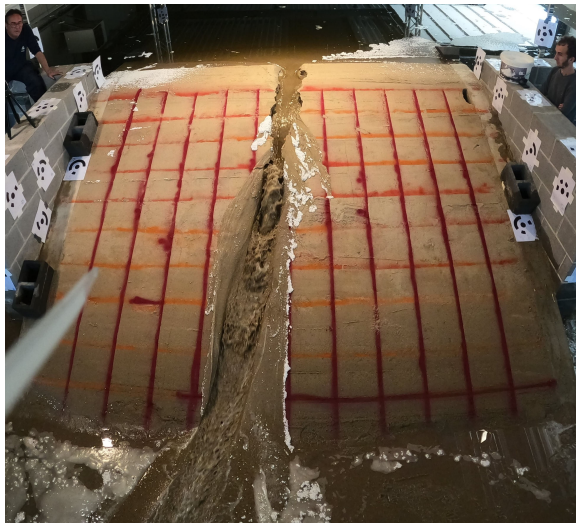
Nous observons que, pour les mêmes couches de sables, les masses volumiques sèches des deux essais sont relativement proches. Nous pouvons donc considérer que les digues de ces deux essais ont été compactées de la même manière.

Déroulement des essais

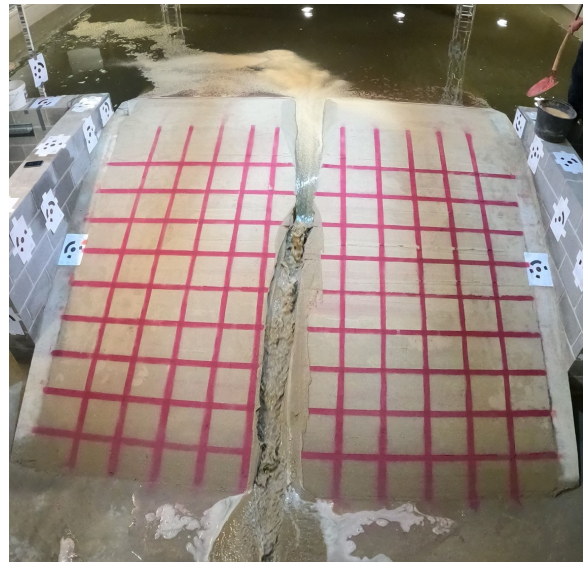
Comme mentionné à la section 5.4.1, le temps $t = 0 \text{ min}$ (pour tous les graphiques de ce rapport) correspond au moment où l'écoulement débute sur la pente aval.

L'érosion dans le sable suit un processus similaire pour chacun des deux essais.

Après 0,6 minute, nous commençons à observer la formation d'un escalier dans le fond de la brèche pour l'essai **Qf4**. Cette caractéristique s'est manifestée plus tôt (après 0,5 minute) pour l'essai **Hf2**.



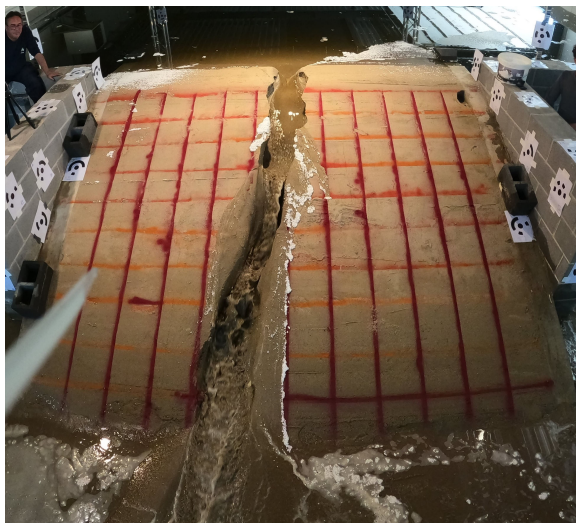
(a) Essai **Hf2** : $t = 0,5 \text{ min}$



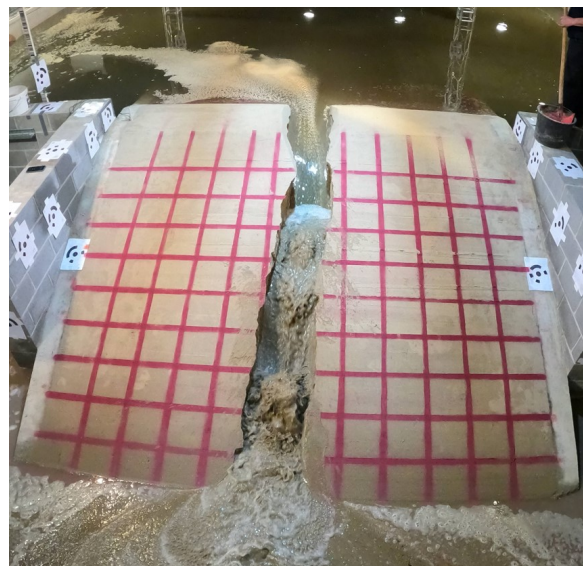
(b) Essai **Qf4** : $t = 0,6 \text{ min}$

FIGURE 6.34 – Photos prises durant les essais

L'escalier s'est ensuite déplacé vers l'amont.



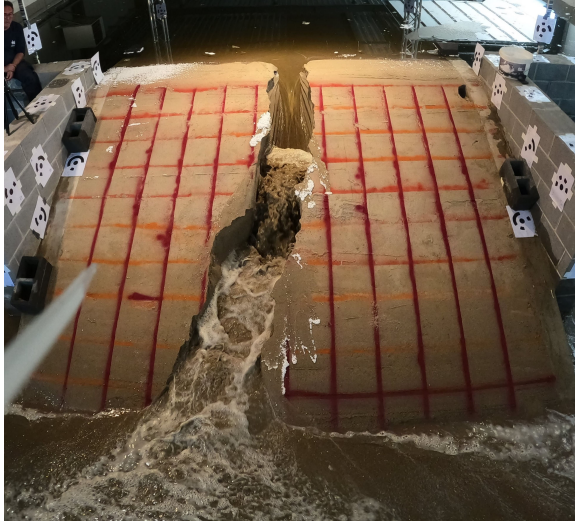
(a) Essai **Hf2** : $t = 0,8 \text{ min}$



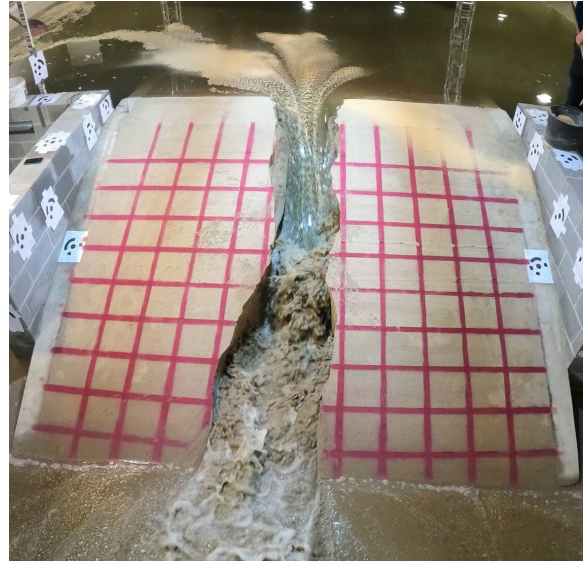
(b) Essai **Qf4** : $t = 1,4 \text{ min}$

FIGURE 6.35 – Photos prises durant les essais

La brèche s'est plus érodée verticalement que latéralement pendant les deux premières minutes de ces deux essais.



(a) Essai **Hf2** : $t = 1,4 \text{ min}$



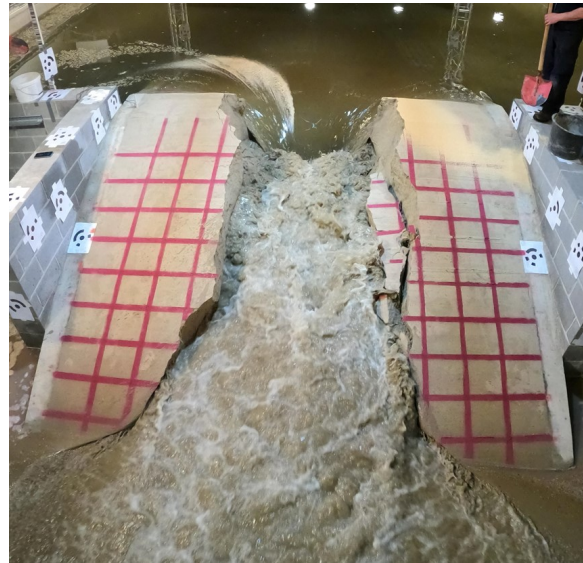
(b) Essai **Qf4** : $t = 2,0 \text{ min}$

FIGURE 6.36 – Photos prises durant les essais

Après $t = 2,0 \text{ min}$, nous observons que l'élargissement de la brèche s'accélère pour les deux essais. Cet élargissement se fait par blocs. Nous pouvons observer sur les photos ci-dessous des blocs d'environ 30 cm de large qui se décrochent.



(a) Essai **Hf2** : $t = 3,1 \text{ min}$



(b) Essai **Qf4** : $t = 3,1 \text{ min}$

FIGURE 6.37 – Photos prises durant les essais



(a) Essai **Hf2** : $t = 3,8 \text{ min}$



(b) Essai **Qf4** : $t = 3,8 \text{ min}$

FIGURE 6.38 – Photos prises durant les essais

Approfondissement de la brèche

En étudiant le moment de l'apparition des balles colorées situées à différentes hauteurs et à différents endroits (en $x = -0,25 \text{ m}$, $x = 0,25 \text{ m}$ et $x = 0,75 \text{ m}$ pour l'essai **Qf4** et en $x = 0,25 \text{ m}$ pour l'essai **Hf2**) pour les essais **Qf4** (trait plein) et **Hf2** (traits pointillés), nous obtenons l'évolution de la hauteur du fond de la brèche suivante :

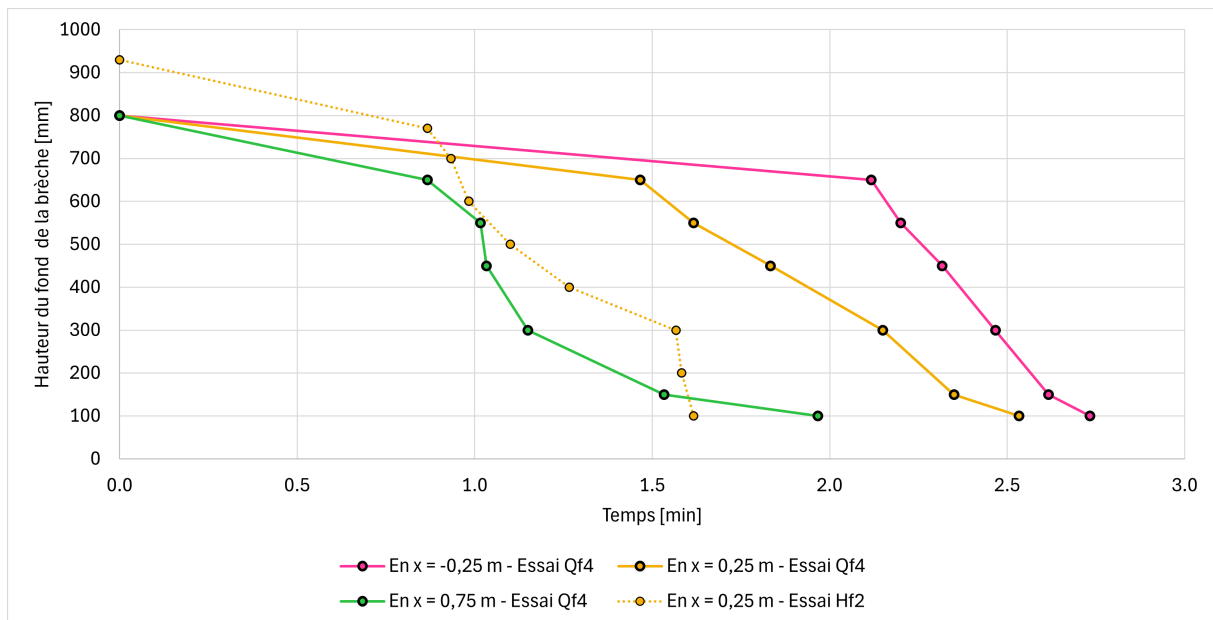


FIGURE 6.39 – Essais **Hf2** et **Qf4** : Évolution de la hauteur du fond de la brèche

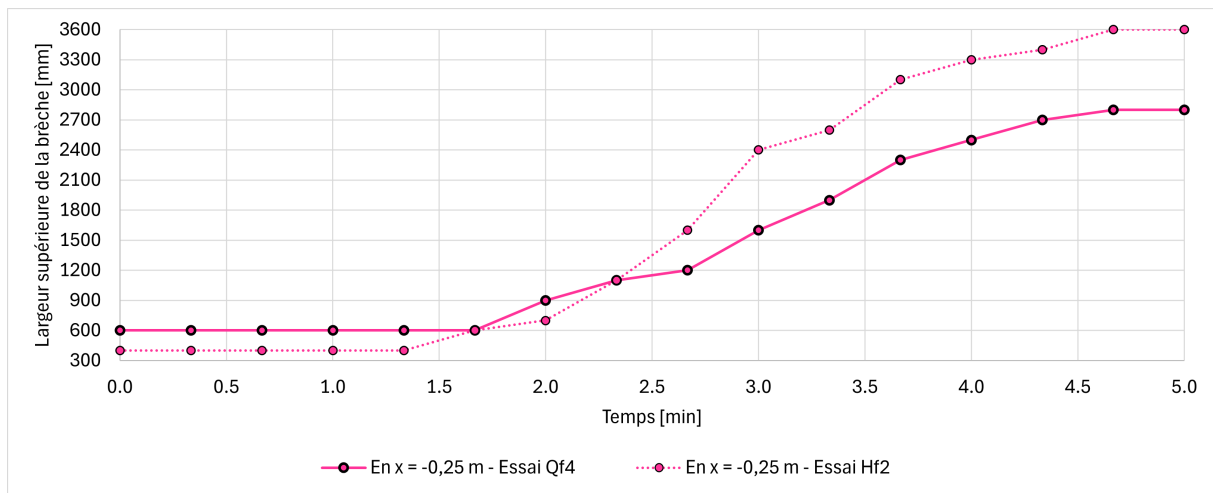
L'initiation de l'érosion verticale se fait plus rapidement pour l'essai **Hf2**. En $x = 0,25 \text{ m}$, les 15 premiers centimètres s'érodent en 1,47 minute pour l'essai **Qf4** alors que pour l'essai **Hf2**, il ne faut que 0,87 minute pour éroder les 16 premiers centimètres.

Il y a donc un décalage d'environ 0,6 minute entre l'initiation de l'érosion verticale des deux essais.

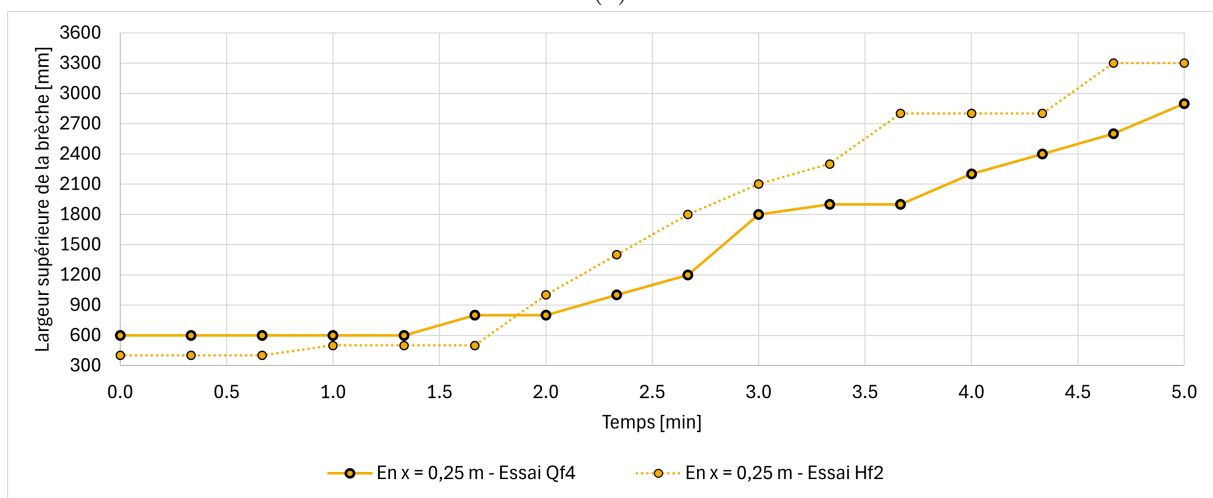
Ensuite, après ces quelques premiers centimètres, la vitesse moyenne d'érosion verticale est de 893 mm/min pour l'essai **Hf2** ce qui est plus rapide que les 516 mm/min pour l'essai **Qf4**.

Élargissement de la brèche

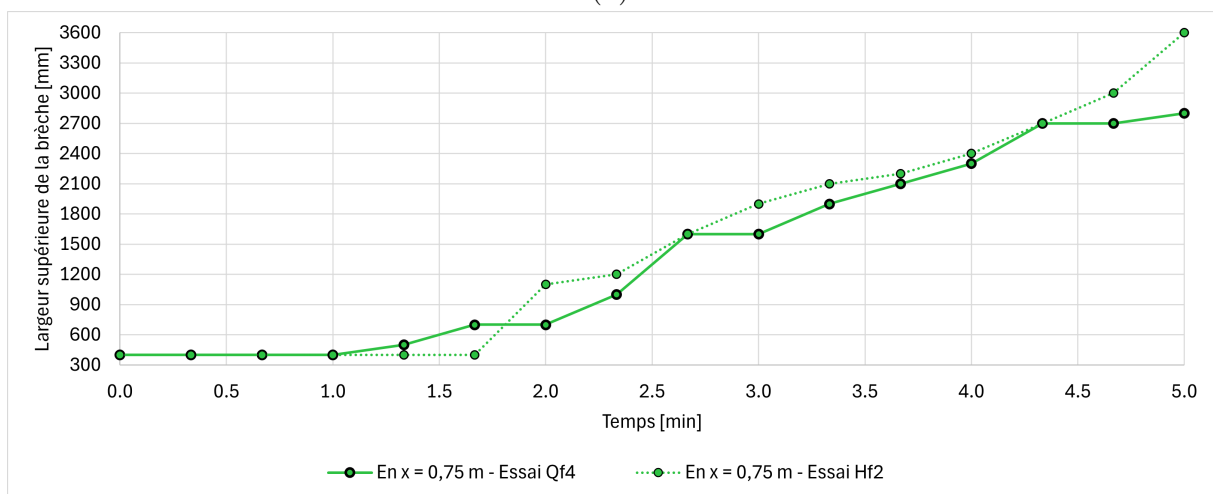
Pour les essais **Hf2** (traits pointillés) et **Qf4** (trait plein), nous obtenons l'évolution de la largeur supérieure de la brèche suivante :



(a)



(b)



(c)

FIGURE 6.40 – Essais **Hf2** et **Qf4** : Évolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête (a), en aval de la crête (b) et sur la pente aval (c)

Comme nous l'avons observé sur les photos prises durant les essais, l'élargissement de la brèche est plus faible pendant les deux premières minutes qu'après ces deux premières

minutes.

Les vitesses moyennes d'élargissement entre $t = 2,0 \text{ min}$ et $t = 4,0 \text{ min}$ sont les suivantes :

Essai	Vitesse moyenne d'élargissement en $x = -0,25 \text{ m}$ [mm/min]	Vitesse moyenne d'élargissement en $x = 0,25 \text{ m}$ [mm/min]	Vitesse moyenne d'élargissement en $x = 0,75 \text{ m}$ [mm/min]
Hf2	1300	900	650
Qf4	800	700	800

TABLE 6.2 – Essais **Hf2** et **Qf4** : Vitesses moyennes d'élargissement entre $t = 2,0 \text{ min}$ et $t = 4,0 \text{ min}$

Durant l'essai **Qf4**, l'élargissement de la brèche se produit uniformément sur la longueur de la brèche. Pour l'essai **Hf2**, l'élargissement est plus rapide en amont. Il est plus rapide en $x = -0,25 \text{ m}$ qu'en $x = 0,25 \text{ m}$ et encore plus rapide qu'en $x = 0,75 \text{ m}$. Entre $x = 0,25 \text{ m}$ et $x = 0,75 \text{ m}$, l'élargissement est similaire pour les 2 essais.

Débits et hauteur d'eau

Le débit alimentant le bassin, le débit passant par la brèche et la hauteur d'eau dans le bassin mesurés lors de l'essai **Qf4** sont tracés en trait plein sur le graphique ci-dessous et ceux mesurés lors de l'essai **Hf2** sont tracés en traits pointillés.

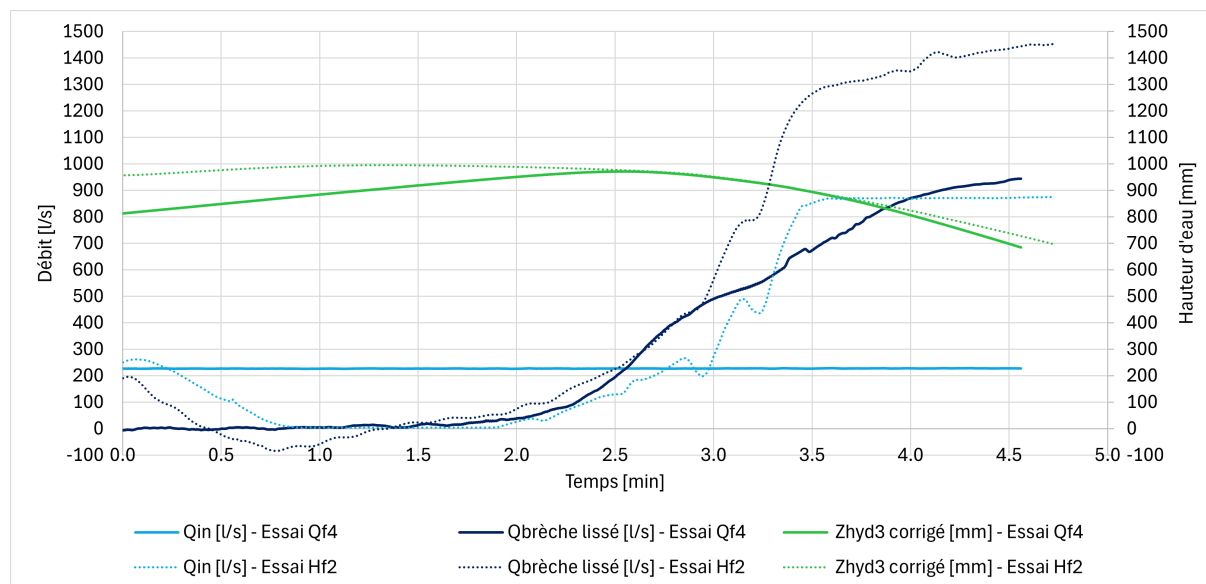


FIGURE 6.41 – Essais **Hf2** et **Qf4** : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche lissé ($Q_{brèche \text{ lissé}}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3}) en fonction du temps

Tout d'abord, nous analysons ce qui se passe durant les deux premières minutes de l'écoulement de l'eau sur la pente aval. Sur base des photos, nous savons que durant cette période, l'érosion verticale prédomine sur l'érosion latérale. Cette érosion verticale s'initie

environ 0,6 minute plus tôt et est plus rapide pour l'essai **Hf2** que pour l'essai **Qf4** (figure 6.39).

Le débit de brèche commence à augmenter en $t = 1,3 \text{ min}$ pour l'essai **Hf2**, soit 0,1 minute plus tôt que pour l'essai **Qf4**. Cette avance peut être notamment causée par le décalage de l'initiation de l'érosion verticale. Malgré ce léger écart, les débits de brèche de ces deux essais sont assez proches durant les deux premières minutes, même si la hauteur d'eau dans le bassin n'est pas similaire dans les deux cas.

Après $t = 2,0 \text{ min}$, l'érosion latérale est prédominante. C'est à ce moment que le débit qui passe par la brèche commence à augmenter plus rapidement. Par conséquent, la hauteur d'eau dans le bassin diminue pour l'essai **Hf2**. Étant donné que le but de cet essai est de maintenir cette hauteur constante, les pompes redémarrent alors.

Après trois minutes, la largeur de la brèche a environ doublé par rapport à sa géométrie initiale, laissant s'échapper un plus gros volume d'eau du bassin. Le débit Q_{in} augmente donc plus rapidement pour l'essai **Hf2**. En effet, les pompes augmentent leur débit pour tenter de maintenir un niveau constant dans le bassin, mais après 3,6 minutes, elles atteignent leur capacité maximale et le niveau d'eau dans le bassin ne peut alors plus être maintenu constant jusqu'à la fin de l'essai.

Dû à cette augmentation rapide du débit Q_{in} pour l'essai **Hf2** durant les dernières minutes de l'essai, le débit de brèche est devenu plus élevé pour l'essai **Hf2** que pour l'essai **Qf4**. L'érosion latérale (qui est prédominante à ce moment) est alors plus rapide, surtout en amont, lors de l'essai **Hf2** que lors de l'essai **Qf4** durant lequel le débit Q_{in} est resté constant.

Conclusion

Les essais avec une hauteur constante d'eau en amont de la digue illustrent mieux la réalité, mais comme mentionné à la section 6.1.1, en prenant en compte la limitation des pompes, il est difficile de maintenir un niveau d'eau constant dans le bassin à la fin de ces essais. Avant d'atteindre cette limite, le mécanisme d'évolution de la brèche est semblable pour les deux essais, mais il est déclenché plus tôt et est plus rapide pour l'essai **Hf2** que pour l'essai **Qf4**.

Nous concluons que nous pouvons réaliser des essais à débit constant alimentant le bassin au lieu d'essais à hauteur constante d'eau dans le bassin pour représenter le mécanisme d'évolution d'une brèche dans un cas réel, en gardant à l'esprit que dans ce cas, il y a un léger retard des phénomènes observés.

Il est plus intéressant de réaliser des essais à débit constant alimentant le bassin, car dans ce cas, les pompes ne s'arrêtent pas et ne démarrent pas durant l'évolution de la brèche. Comparé aux essais à hauteur constante d'eau dans le bassin, il y a donc moins de vagues dans le bassin et moins de ralentissements ou d'accélération brusques de l'écoulement dans la brèche. Ces vagues peuvent impacter l'évolution de la brèche. De plus, à hauteur constante d'eau dans le bassin, l'évolution du débit de brèche dépend directement de l'évolution du débit d'entrée. Or, celui-ci est influencé par le temps de réaction des pompes et leur puissance.

6.2.2 Type de sable ($d_{50} = 0,314 \text{ mm}$ VS $d_{50} = 0,632 \text{ mm}$) pour un débit constant alimentant le bassin

Comme expliqué aux sections 6.1.2 et 6.1.3, nous utilisons les résultats des essais **Qf4** et **Qm2** pour les comparer. Cette comparaison a pour but de voir l'impact du type de sable (soit **Qf** : sable de diamètre médian $d_{50} = 0,314 \text{ mm}$, soit **Qm** : sable de diamètre médian $d_{50} = 0,632 \text{ mm}$) sur l'évolution temporelle de la brèche.

Données récoltées pendant la construction des digues

Les mesures de masses volumiques sèches après compaction de chaque couche de sable pendant la construction de la digue pour les essais **Qf4** et **Qm2** sont reprises ci-dessous :

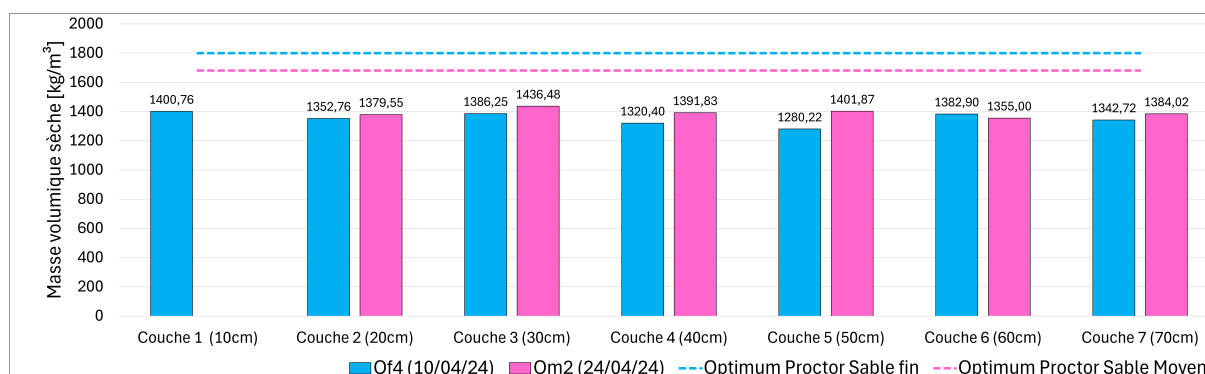


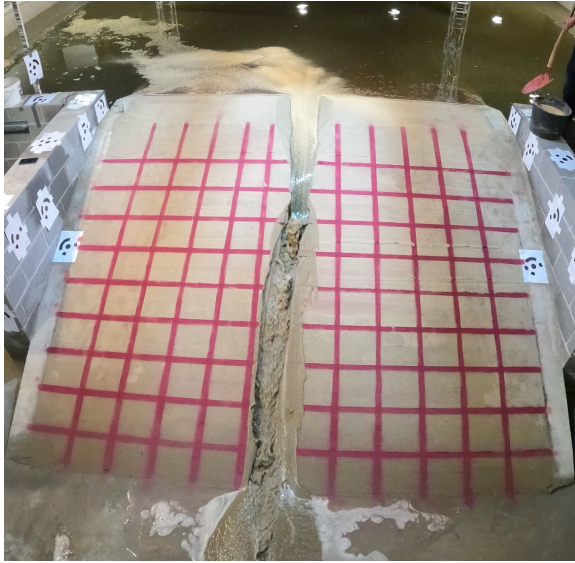
FIGURE 6.42 – Essais **Qf4** et **Qm2** : Masses volumiques sèches des couches de sable après compaction

Nous observons que, pour les mêmes couches de sables, les masses volumiques sèches des deux essais sont relativement proches. Comme le sable utilisé est différent, l'optimum Proctor est également différent. Il est à environ 1800 kg/m^3 pour le sable fin et à environ 1700 kg/m^3 pour le sable moyen. La digue de l'essai **Qm2** a une masse volumique sèche plus proche de son optimum Proctor que celle de l'essai **Qf4**.

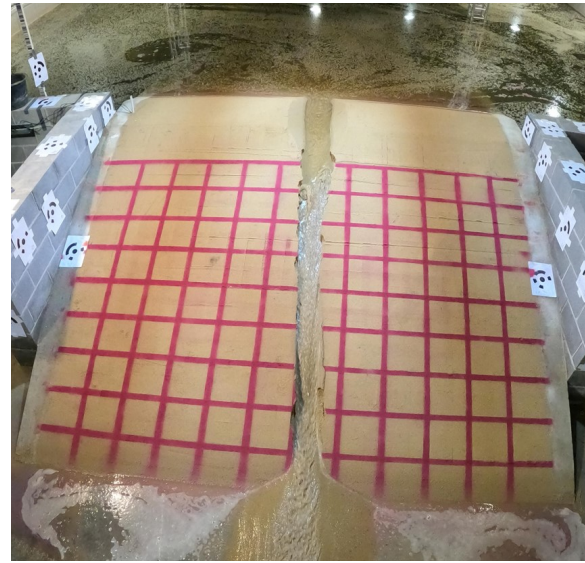
Déroulement des essais

Comme mentionné à la section 5.4.1, le temps $t = 0 \text{ min}$ (pour tous les graphiques de ce rapport) correspond au moment où l'écoulement débute sur la pente aval.

Après 0,6 minute, nous avons observé une différence entre les essais avec des sables différents. En effet, un escalier commence à se former dans le fond de la brèche pour le sable fin tandis que le fond de la brèche pour le sable moyen est une pente parallèle à la pente aval de la digue.



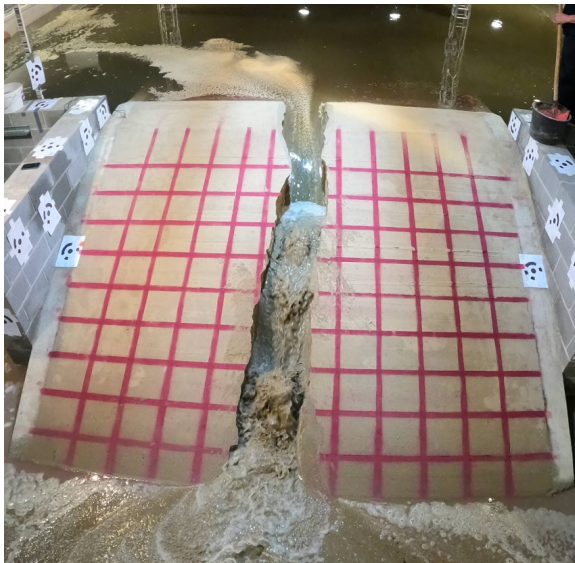
(a) Essai **Qf4**



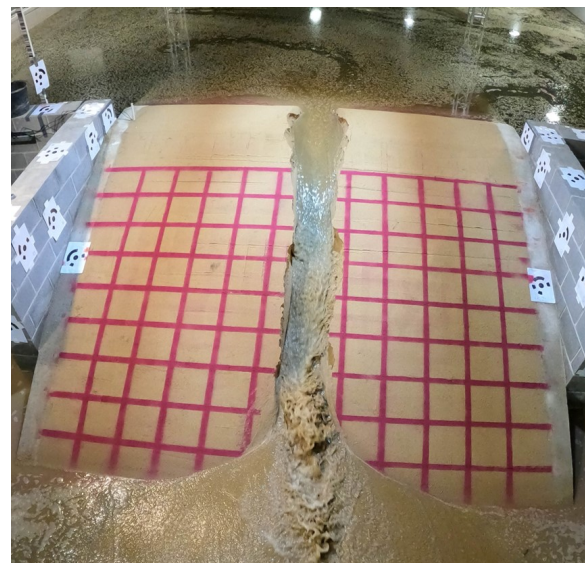
(b) Essai **Qm2**

FIGURE 6.43 – Photos prises en $t = 0,6 \text{ min}$

Pour le sable fin, l'escalier s'est ensuite déplacé vers l'amont. Pour le sable moyen, le fond de la brèche est resté en pente.



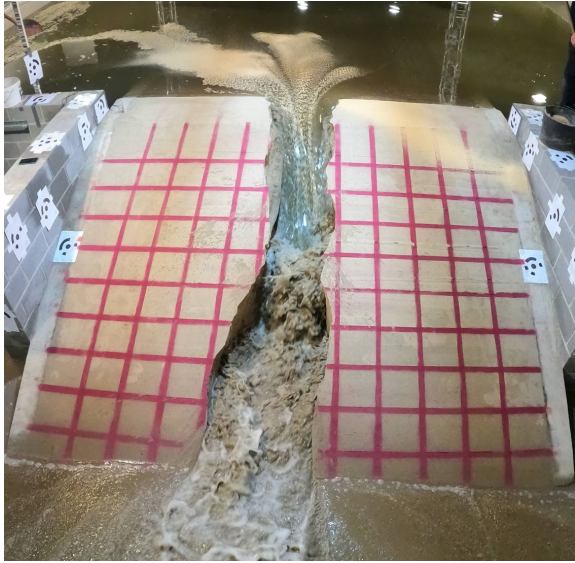
(a) Essai **Qf4**



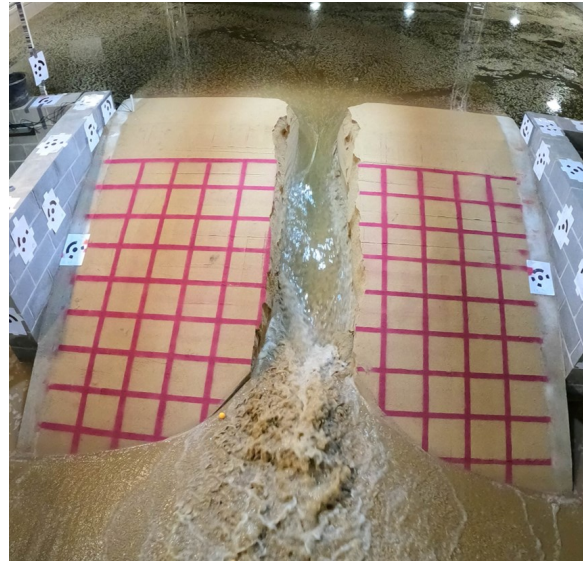
(b) Essai **Qm2**

FIGURE 6.44 – Photos prises en $t = 1,4 \text{ min}$

Sur les photos ci-dessous, nous pouvons observer que la brèche s'est plus érodée verticalement que latéralement pendant les deux premières minutes quel que soit le sable utilisé.



(a) Essai **Qf4**



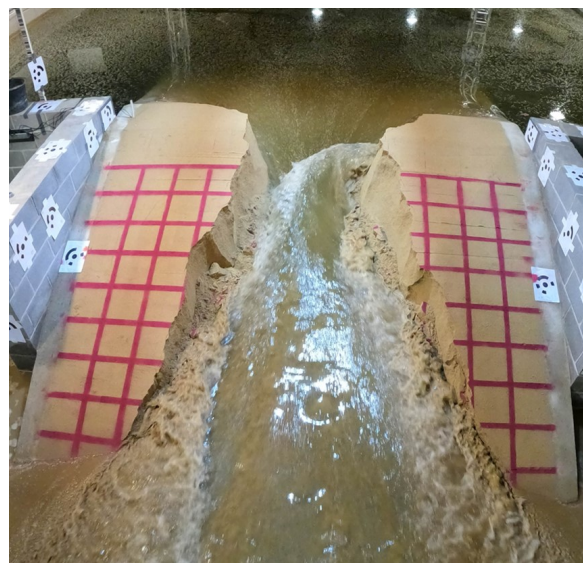
(b) Essai **Qm2**

FIGURE 6.45 – Photos prises en $t = 2,0 \text{ min}$

Après $t = 2,0 \text{ min}$, nous observons que l'élargissement de la brèche s'accélère pour les deux essais. Pour le sable fin, cet élargissement se fait par blocs. Nous pouvons observer sur les photos ci-dessous un bloc d'environ 30 cm de large qui se décroche. Pour le sable moyen, nous n'observons pas de blocs de sable aussi larges qui se détachent de la digue.

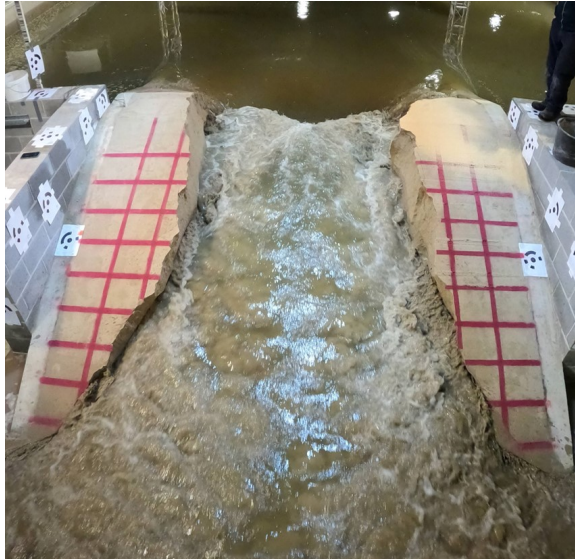


(a) Essai **Qf4**

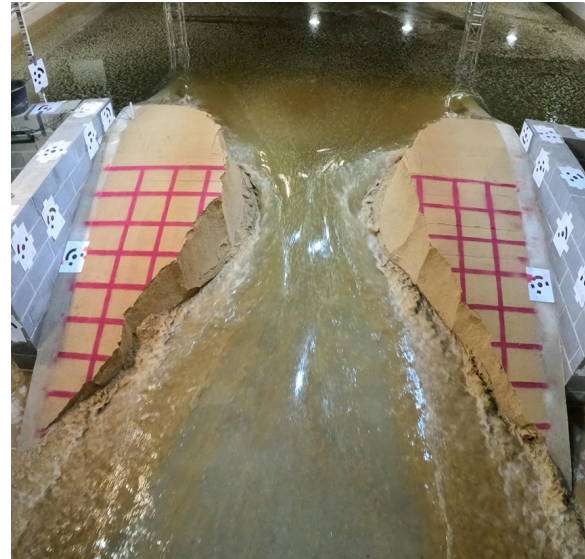


(b) Essai **Qm2**

FIGURE 6.46 – Photos prises en $t = 3,1 \text{ min}$



(a) Essai **Qf4**



(b) Essai **Qm2**

FIGURE 6.47 – Photos prises en $t = 3,8 \text{ min}$

Approfondissement de la brèche

En étudiant le moment de l'apparition des balles colorées situées à différentes hauteurs et à différents endroits (en $x = -0,25 \text{ m}$, $x = 0,25 \text{ m}$ et $x = 0,75 \text{ m}$) pour les essais **Qf4** (traits pointillés) et **Qm2** (trait plein), nous obtenons l'évolution de la hauteur du fond de la brèche suivante :

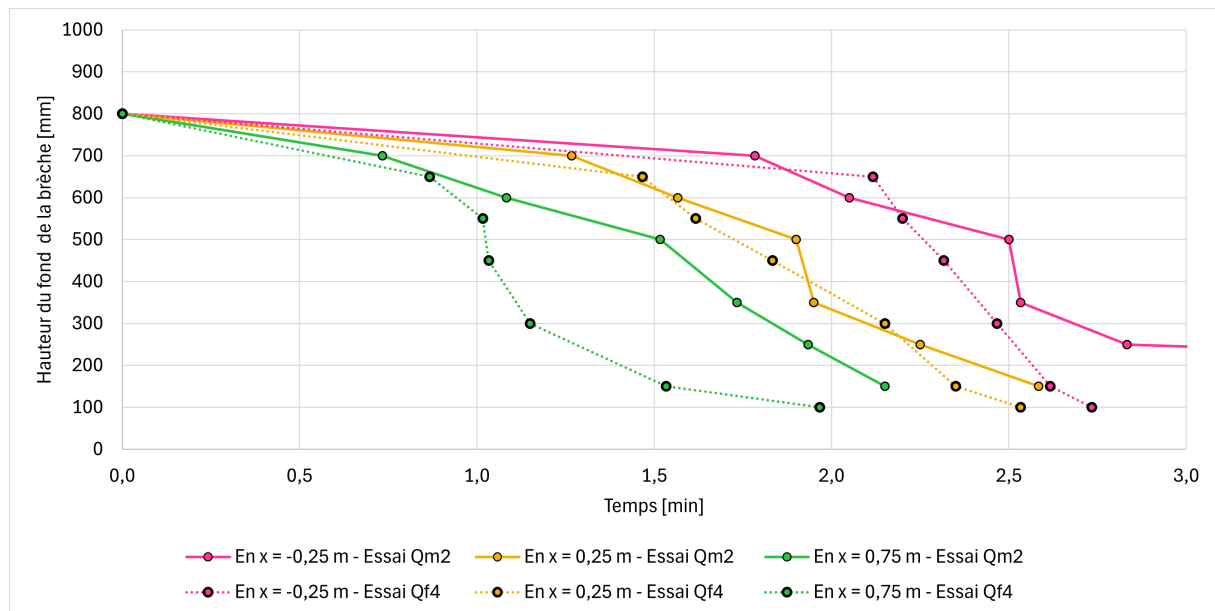


FIGURE 6.48 – Essais **Qf4** et **Qm2** : Évolution de la hauteur du fond de la brèche

Sur base de la figure ci-dessus, nous pouvons reconstruire le profil de la digue à différents instants comme expliqué à la section 5.4.5.

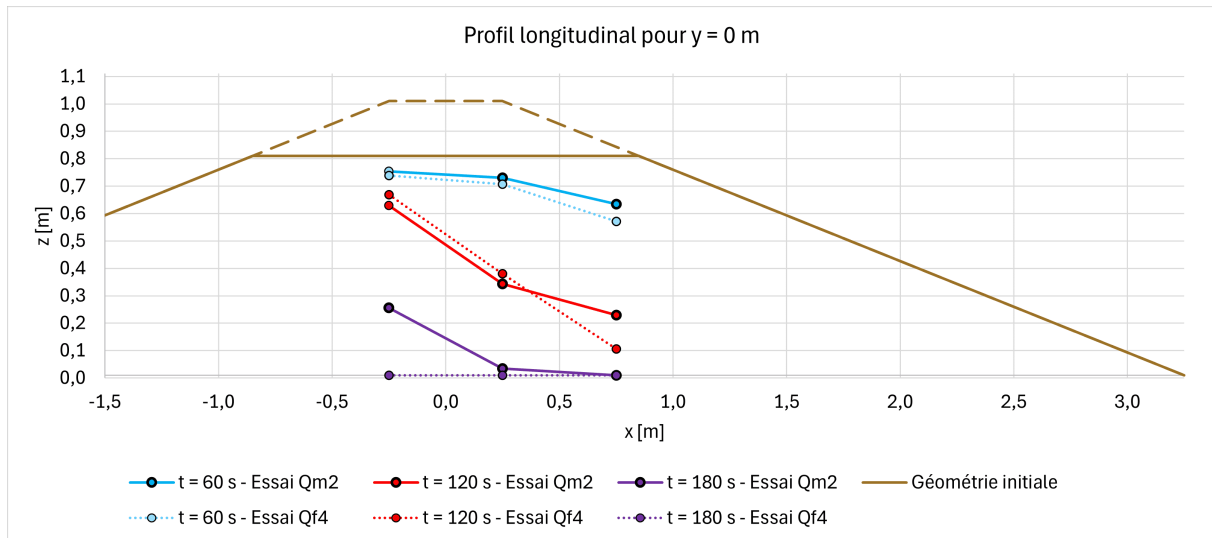


FIGURE 6.49 – Essais **Qf4** et **Qm2** : Évolution du profil longitudinal au centre de la digue (en $y = 0$ m)

Pour l'essai avec le sable moyen, nous observons sur les photos que l'érosion verticale est plus progressive. Les lignes qui relient les points sur les deux graphiques ci-dessus représentent donc bien le mécanisme observé. En revanche, pour le sable fin, nous avons observé sur les photos la formation d'un escalier dans le fond de la brèche. Ce mécanisme n'est pas correctement décrit par les lignes qui relient les points sur les deux graphiques ci-dessus.

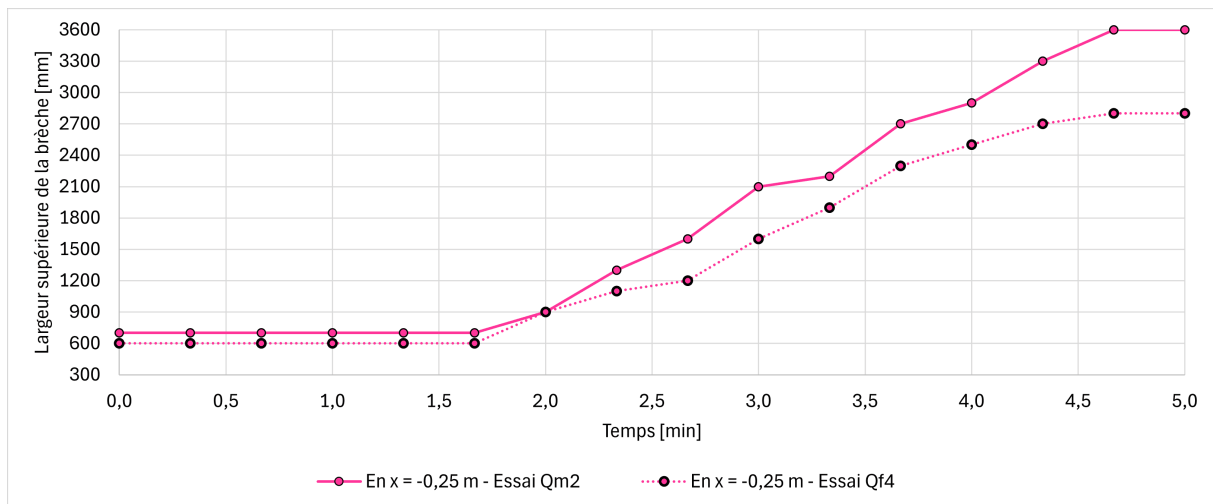
Sur la figure 6.48, nous pouvons observer que pour l'essai **Qf4**, lorsque la première balle rose (située à 65 cm de haut en amont de la crête, en $x = -0,25$ m) se fait emporter, la dernière balle verte (située à 10 cm de haut sur la pente aval, en $x = 0,75$ m) s'est déjà faite emporter. Ce qui montre bien que l'érosion verticale forme un escalier en aval en atteignant presque le fond de la digue avant de se propager vers l'amont.

Pour l'essai **Qm2**, lorsque la première balle rose (située à 70 cm de haut en amont de la crête, en $x = -0,25$ m) se fait emporter, la balle verte située à 25 cm de haut (sur la pente aval, en $x = 0,75$ m) ne s'est pas encore faite emporter. L'érosion verticale commence à l'aval comme pour le sable fin, mais elle est plus uniforme sur la longueur de la brèche.

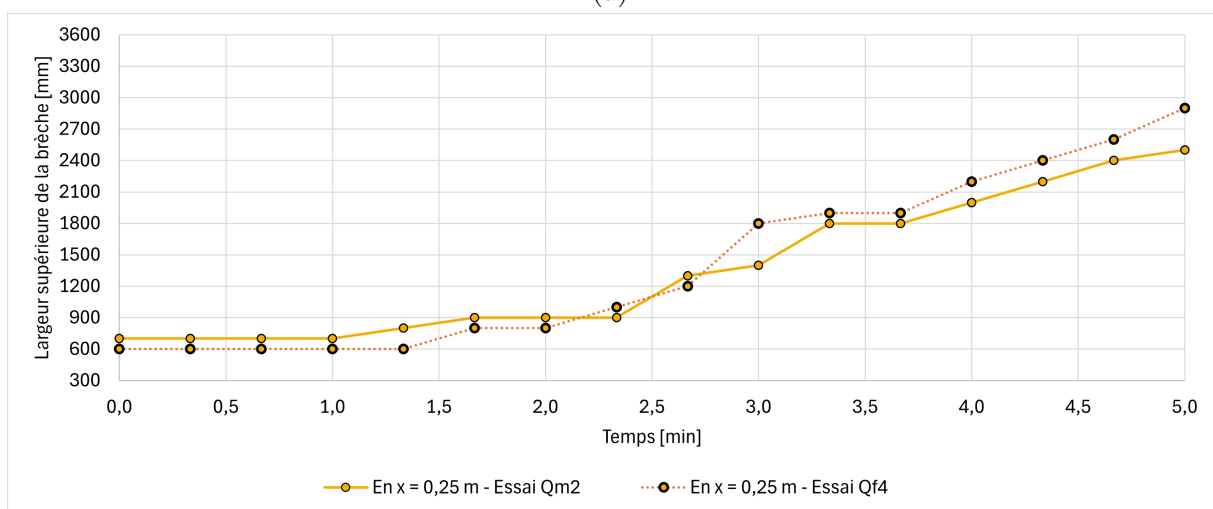
Sur la figure 6.49, nous observons qu'après 3 minutes (180 s), le fond de la brèche entre $x = -0,25$ m et $x = 0,75$ m atteint le fond de la digue pour le sable fin. Pour le sable moyen, l'érosion verticale n'est à ce moment pas encore terminée, elle est donc légèrement plus lente.

Élargissement de la brèche

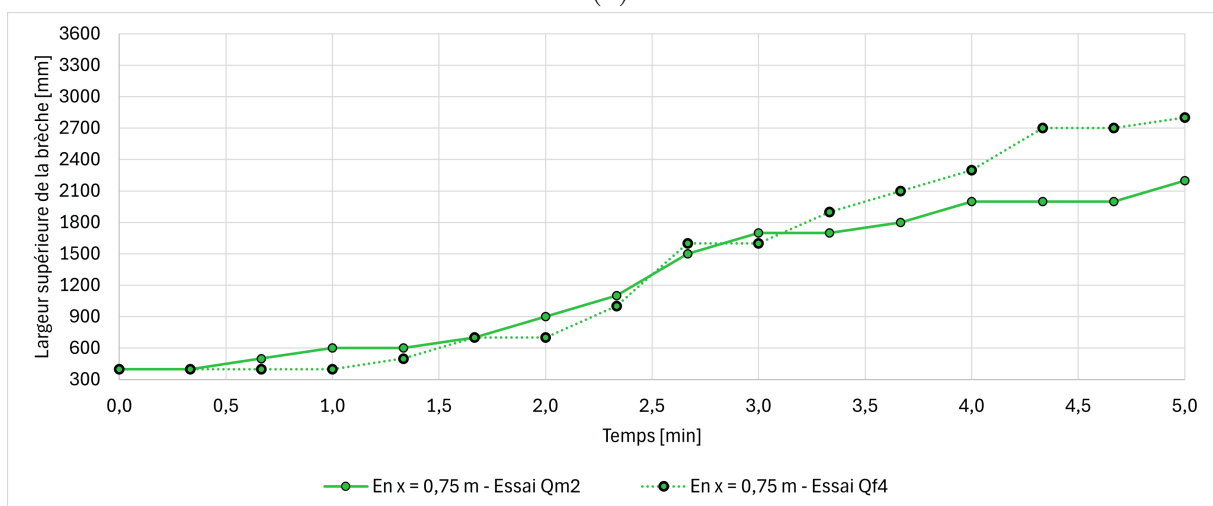
Pour les essais **Qf4** (traits pointillés) et **Qm2** (trait plein), nous obtenons l'évolution de la largeur supérieure de la brèche suivante :



(a)



(b)



(c)

FIGURE 6.50 – Essais **Qf4** et **Qm2** : Évolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête (a), en aval de la crête (b) et sur la pente aval (c)

Nous observons sur la figure ci-dessus que pendant les deux premières minutes, la

largeur supérieure de la brèche est sensiblement la même pour les deux essais. Elle n'évolue pas beaucoup par rapport à son augmentation après $t = 2,0 \text{ min}$. De plus, elle est la même en amont de la crête (en $x = -0,25 \text{ m}$), en aval de la crête (en $x = 0,25 \text{ m}$) et sur le haut de la pente aval (en $x = 0,75 \text{ m}$).

Après $t = 2 \text{ min}$, l'élargissement se fait plus rapidement en amont qu'en aval pour l'essai **Qm2** alors que l'érosion latérale continue à être uniforme le long de l'écoulement pour l'essai **Qf4**.

En aval de la crête (en $x = 0,25 \text{ m}$), l'érosion horizontale se produit de manière similaire pour l'essai **Qf4** et celui **Qm2**.

Plus en amont (en $x = -0,25 \text{ m}$), l'érosion horizontale se produit plus rapidement pour l'essai avec le sable moyen que pour l'essai avec le sable fin.

Plus en aval (en $x = 0,75 \text{ m}$), l'érosion horizontale se produit en moyenne plus lentement pour l'essai avec le sable moyen que pour l'essai avec le sable fin.

Nous pouvons en effet voir sur les photos ci-dessous qu'en $t = 2,0 \text{ min}$ la brèche a une largeur plus ou moins uniforme pour les deux essais.

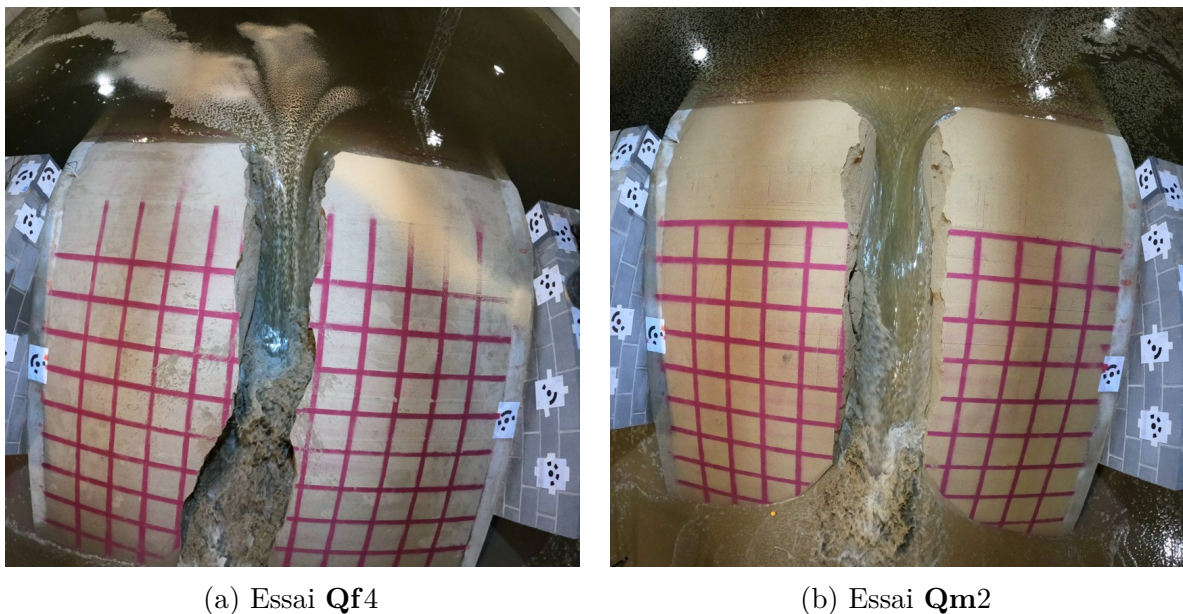
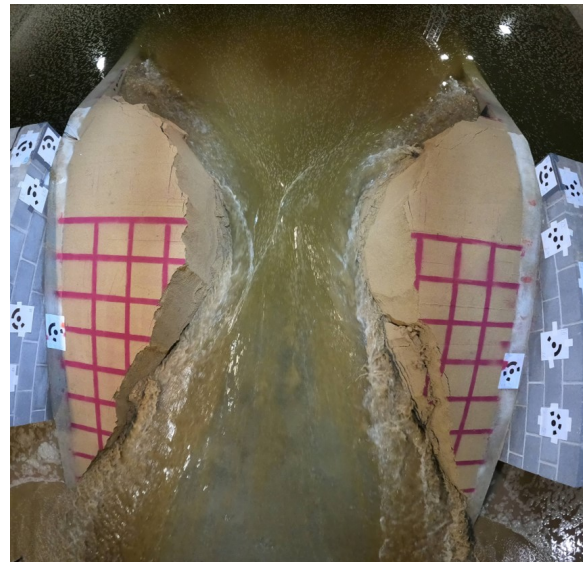


FIGURE 6.51 – Photos prises en $t = 2,0 \text{ min}$

En $t = 3,8 \text{ min}$, la brèche est plus large en amont de la crête et en aval de la crête qu'au niveau de la crête pour l'essai **Qm2** (forme de sablier) alors que pour l'essai **Qf4**, la brèche est encore de largeur plus ou moins uniforme le long de l'écoulement.



(a) Essai **Qf4**



(b) Essai **Qm2**

FIGURE 6.52 – Photos prises en $t = 3,8 \text{ min}$

L'érosion latérale se fait progressivement lors de l'essai **Qm2** contrairement à l'essai **Qf4** où l'érosion latérale se fait par blocs de l'ordre de 10 cm de large en raison de la cohésion apparente produite par les forces capillaires. Il est important de noter que le sable fin n'est pas cohésif (ses grains ne restent pas ensemble lorsque des forces sont appliquées sur ce sable) mais il peut présenter une certaine cohésion apparente dans certaines conditions que nous retrouvons dans nos essais en humidifiant le sable et en le compactant.

En effet, plus l'adhésion entre l'eau et les grains est élevée, plus la hauteur de remontée capillaire (hauteur à laquelle l'eau est capable de monter dans les pores du sable en s'opposant à la gravité) est élevée. Cette hauteur de remontée capillaire est inversement proportionnelle à la taille des pores qui est proportionnelle au diamètre des grains. Par conséquent, le sable fin a une hauteur de remontée capillaire plus élevée que celle du sable moyen. Pour le sable fin, les grains sont moins séparés, il a donc une cohésion apparente plus élevée que celle du sable moyen, ce qui implique que le sable fin s'érode par blocs. [6]

La brèche s'érode au droit de l'écoulement dû au débit de brèche. Plus le sable est érodé aux pieds des berges, plus l'inclinaison de ces berges se rapproche de la verticale jusqu'à ce que la stabilité des pentes ne soit plus assurée. Pour le sable fin, sa cohésion apparente plus élevée que celle du sable moyen permet d'assurer la stabilité des berges jusqu'à une inclinaison proche de la verticale. Nous pouvons en effet observer sur les photos prises pendant l'essai **Qf4** que les parois de la brèche sont presque verticales. Le sable moyen a une cohésion apparente plus faible que le sable fin. Dans ce cas, la stabilité de la berge n'est assurée que pour une inclinaison plus faible. Nous pouvons en effet observer sur les photos prises pendant l'essai **Qf4** que les parois de la brèche sont plus proches de la verticale que celles de l'essai **Qm2**. Par conséquent, en amont, le sable moyen ne résiste pas aussi bien que le sable fin. Le sable fin résiste avec une paroi presque verticale alors que pour le sable moyen, les parois de la brèche doivent être moins inclinées pour être stables. Ceci explique la forme de sablier que nous observons pour le sable moyen sur la figure 6.52b.

Débits et hauteur d'eau

Le débit alimentant le bassin, le débit passant par la brèche et la hauteur d'eau dans le bassin mesurés lors de l'essai **Qm2** sont tracés en trait plein sur le graphique ci-dessous et ceux mesurés lors de l'essai **Qf4** sont tracés en traits pointillés.

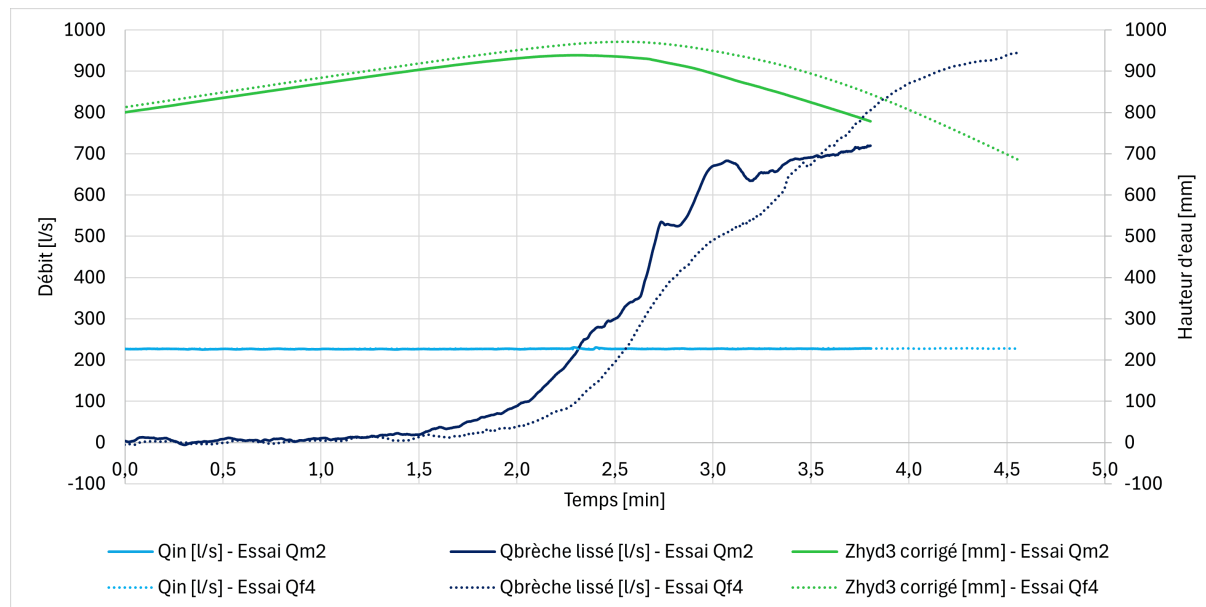


FIGURE 6.53 – Essais **Qf4** et **Qm2** : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche lissé ($Q_{brèche\ lissé}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3}) en fonction du temps

Pour ces deux essais, le débit d'entrée fourni par les pompes (Q_{in} , en bleu clair sur la figure 6.53) est constant et égal à 224 l/s.

Comme observé sur les photos et en analysant l'évolution de la hauteur du fond de la brèche et l'élargissement de la brèche, durant les deux premières minutes, l'érosion verticale prédomine sur l'érosion latérale.

Même si l'érosion verticale est légèrement plus rapide pour le sable fin que pour le sable moyen, le débit passant par la brèche n'augmente pas plus rapidement pour le sable fin. En effet, dû à l'escalier formé dans le sable fin, nous observons un ressaut hydraulique dans la brèche, ce qui ralentit l'écoulement. Le débit de brèche augmente donc plus lentement pour le sable fin que pour le sable moyen au début de l'essai.

En raison de ce ralentissement de l'écoulement pour le sable fin, la hauteur d'eau dans le bassin atteint une valeur maximale plus élevée et plus tard que pour le sable moyen. En effet, le débit de brèche augmente plus lentement pour le sable fin, il atteint donc la valeur du débit délivré par les pompes (224 l/s) plus tard. Par conséquent, le bassin commence à se vider ($Q_{in} > Q_{brèche} \Rightarrow Z_{hyd3}$ diminue) plus tard.

Pour la seconde partie des essais, l'érosion latérale est prédominante. Lors de l'essai avec le sable moyen (**Qm2**), nous avons observé que la section de passage (section la plus étroite de la brèche par laquelle passe l'écoulement) s'élargit plus lentement que pour

l'essai avec le sable fin (**Qf4**). De plus, nous venons d'expliquer que le niveau d'eau dans le bassin est plus faible avec le sable moyen. Dans ce cas, la différence de hauteur d'eau entre l'amont et l'aval est donc plus faible, ce qui implique une vitesse d'écoulement plus faible qui diminue au fur et à mesure que le bassin se vide. L'augmentation du débit de brèche pour le sable moyen ralentit alors avant celui du sable fin. Sur la figure 6.53, nous observons en effet qu'à la fin des essais, le débit de brèche pour le sable moyen est inférieur à celui pour le sable fin.

Pour rappel, à la section 5.4.4, nous avons posé le temps final d'un essai comme le temps auquel le débit de brèche atteint sa valeur maximale parce qu'à partir de cet instant, la digue est presque totalement érodée et donc l'évolution temporelle de la brèche ne nous intéresse plus. En effet, la vitesse d'écoulement diminue alors jusqu'à devenir insuffisante pour entraîner des grains de sable.

Conclusion

L'évolution du débit de brèche suit la même tendance pour les deux types de sable utilisés, mais atteint une valeur maximale plus élevée pour le sable fin. Cette différence est principalement due au fait que le niveau d'eau dans le bassin n'est pas constant.

La principale différence entre le mécanisme de rupture des sables est l'érosion par blocs pour le sable fin causée par sa cohésion apparente plus importante et l'érosion plus progressive pour le sable moyen. L'évolution de la brèche se fait à une vitesse relativement semblable, mais de manière différente.

Le mécanisme de rupture observé pour le sable fin avec la formation d'un escalier qui se déplace vers l'amont puis l'élargissement par blocs est décrit dans la littérature pour des matériaux cohésifs. Le mécanisme de rupture plus progressif et terminant par une forme de sablier observé pour le sable moyen est quant à lui décrit dans la littérature pour des matériaux non cohésifs.

6.2.3 Échelle (moyenne échelle VS petite échelle) pour le sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$) et un débit constant alimentant le bassin

Dans le but d'étudier l'impact de l'échelle à laquelle sont réalisés les essais sur l'évolution temporelle de la brèche, nous comparons les essais de type **Qm** que nous avons réalisés à moyenne échelle à l'essai réalisé par Descantons et Dujardin (2014) à petite échelle pour lequel ils avaient utilisé le sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$).

Comme indiqué à la section 6.1.3, nous utilisons l'essai **Qm2** comme référence pour les essais de type **Qm**.

Afin de comparer ces deux essais réalisés à des échelles différentes, nous multiplions toutes les données de l'essai réalisé à petite échelle par Descantons et Dujardin (2014) par des facteurs d'échelle comme nous l'avons vu dans la section 4, afin de pouvoir les comparer aux données à moyenne échelle.

Les différents facteurs de mise à l'échelle utiles pour amener les valeurs de la petite échelle à la moyenne échelle sont les suivants :

Grandeur	Facteur d'échelle	Valeur du facteur d'échelle pour $\lambda_x = 5$
Hauteur d'eau h	$\lambda_h = \lambda_x$	5,000
Temps t	$\lambda_t = \sqrt{\lambda_x}$	2,236
Débit Q	$\lambda_Q = \lambda_x^{5/2}$	55,902

TABLE 6.3 – Facteurs d'échelle des grandeurs liées à l'écoulement de l'eau en fonction de l'échelle géométrique $\lambda_x = 5$

Pour rappel, pour mettre à moyenne échelle une grandeur à petite échelle (x') il faut la multiplier par le facteur d'échelle correspondant ($x = \lambda_x \cdot x'$).

Pour notre essai à moyenne échelle, la digue utilisée est cinq fois plus grande que celle à petite échelle. Nous utilisons donc pour les grandeurs géométriques un facteur d'échelle $\lambda_x = 5$.

Le bassin en amont de la digue n'a lui pas été mis à l'échelle. En effet, sa surface est de $4,26 \text{ m}^2$ à petite échelle. Mis à l'échelle moyenne, le bassin devrait avoir une surface de $106,50 \text{ m}^2 (= 4,26 \text{ m}^2 \cdot \lambda_x^2)$. Or, nous avons utilisé un bassin de $189,86 \text{ m}^2$ à moyenne échelle.

La brèche n'a pas non plus été parfaitement mise à l'échelle. En effet, sa profondeur initiale est de $4,67 \text{ cm}$ à petite échelle. Elle devrait donc avoir une profondeur de $23,35 \text{ cm} (= 4,67 \text{ cm} \cdot \lambda_x)$ à l'échelle moyenne. Or, pour notre essai à échelle moyenne, elle a une profondeur de 20 cm .

Les essais comparés ont tous deux été réalisés :

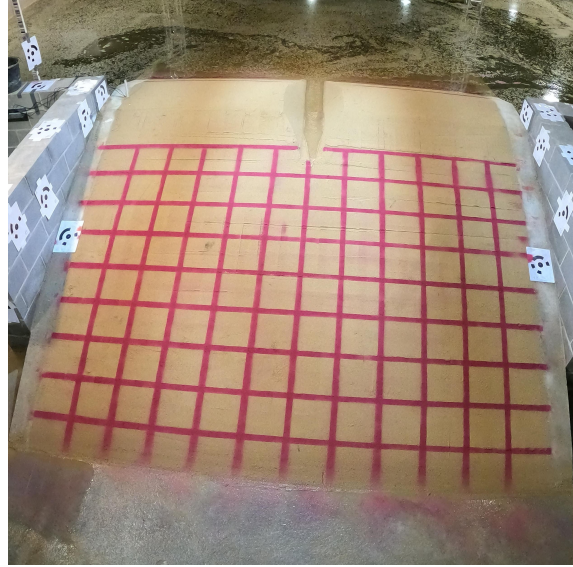
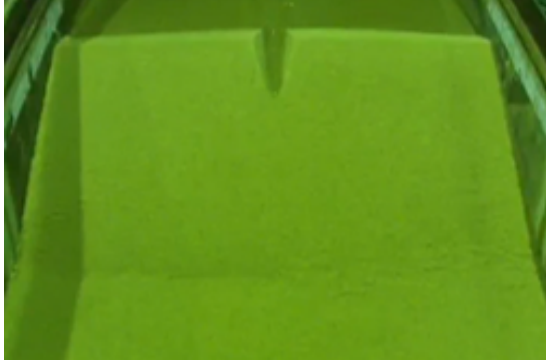
- En fournissant au bassin un débit constant.
À petite échelle, ce débit était de 4 l/s , ce qui donne, à moyenne échelle, les $224 \text{ l/s} (= 4 \text{ l/s} \cdot \lambda_Q)$ que nous avons utilisés.
- En utilisant le sable moyen pour construire la digue.
Nous avons choisi de comparer les essais à petite et à moyenne échelle sur base d'un même sable (diamètre médian des grains de sable : $d_{50} = 0,632 \text{ mm}$). Le facteur d'échelle pour le sable est donc $\lambda_d = 1$. Comme expliqué à la section 4.2, le fait de ne pas mettre à l'échelle le diamètre des grains de sable peut impacter l'évolution de la brèche, le diagramme de Shields n'étant notamment pas conservé.

Données récoltées pendant la construction des digues

Concernant l'essai à petite échelle, nous n'avons pas de données récoltées pour la teneur en eau et la masse volumique sèche pour les différentes couches. Il est dès lors difficile de pouvoir comparer la compaction et l'humidification des couches de sable en fonction des différentes échelles.

Déroulement des essais

Comme mentionné à la section 5.4.1, le temps $t = 0 \text{ min}$ (pour tous les graphiques de ce rapport) correspond au moment où l'écoulement débute sur la pente aval.

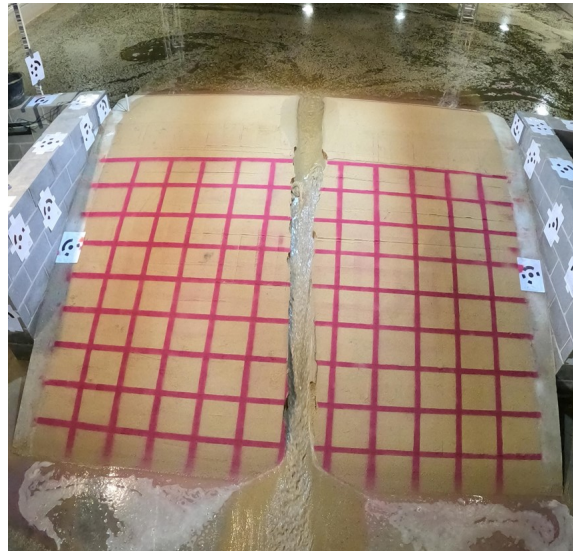
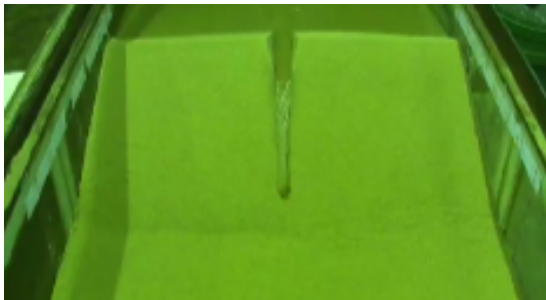


(a) Essai à petite échelle en $t' = 0 \text{ min}$ (b) Essai à moyenne échelle (Q_{m2}) en $t = 0 \text{ min}$

FIGURE 6.54 – Photos prises durant les essais

Notons que t' correspond au temps dans l'échelle de temps de la petite échelle et t correspond au temps dans l'échelle de temps de la moyenne échelle.

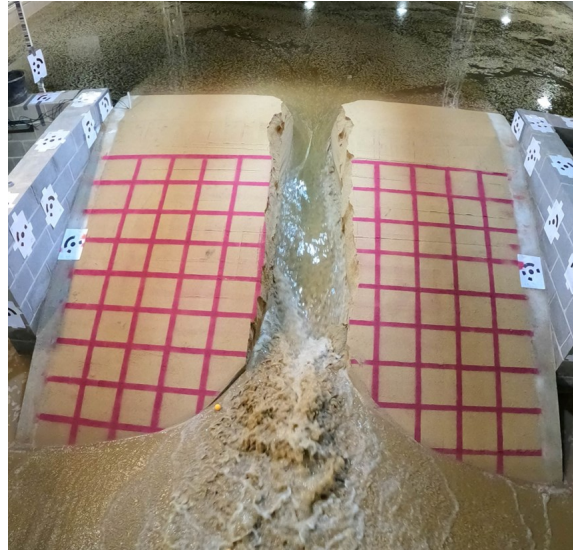
Après 0,13 minute d'écoulement pour l'essai à petite échelle et 0,6 minute pour l'essai à moyenne échelle, nous observons que la largeur de la brèche ne s'agrandit pas beaucoup et que l'érosion de la brèche se fait plutôt de manière verticale selon une pente parallèle pour les deux essais.



(a) Essai à petite échelle en $t' = 0,13 \text{ min}$ (b) Essai à moyenne échelle (Q_{m2}) en $t = 0,6 \text{ min}$

FIGURE 6.55 – Photos prises durant les essais

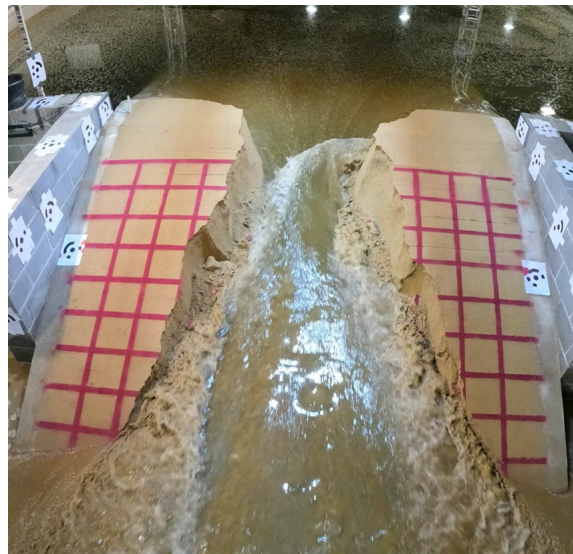
À partir de $t' = 0,47 \text{ min}$ pour l'essai à petite échelle et $t = 2,0 \text{ min}$ pour l'essai à moyenne échelle, nous pouvons observer que dans les deux essais, la brèche commence à s'élargir.



(a) Essai à petite échelle en $t' = 0,47 \text{ min}$ (b) Essai à moyenne échelle (**Qm2**) en $t = 2,0 \text{ min}$

FIGURE 6.56 – Photos prises durant les essais

Ensuite, la brèche poursuit son élargissement jusqu'à la fin de l'essai.



(a) Essai à petite échelle en $t' = 0,73 \text{ min}$ (b) Essai à moyenne échelle (**Qm2**) en $t = 3,0 \text{ min}$

FIGURE 6.57 – Photos prises durant les essais



(a) Essai à petite échelle en $t' = 0,95 \text{ min}$ (b) Essai à moyenne échelle (Q_{m2}) en $t = 4,0 \text{ min}$

FIGURE 6.58 – Photos prises durant les essais

Sur base des photos prises durant les essais, nous observons que le mécanisme de rupture semble être similaire pour ces deux essais avec néanmoins une forme en sablier plus prononcée, plus évasée à moyenne échelle. L'angle de vue ne permet toutefois pas d'affirmer cette différence. Il aurait fallu une vue du dessus pour voir la largeur de la brèche sur toute sa longueur. Cependant, les photos que nous possédons de l'essai à petite échelle réalisé par Descantons et Dujardin (2014) sont limitées à un point de vue.

En mettant à l'échelle (en multipliant par le facteur de temps λ_t) les temps auxquels les instants clés de l'essai à petite échelle ont été pris en photo t' , nous remarquons qu'ils ne correspondent pas aux temps des instants clés de l'essai à moyenne échelle. Il faut encore les multiplier par un facteur égal à 1,87 pour qu'ils correspondent aux temps auxquels les instants clés de l'essai à moyenne échelle ont été pris en photo.

λ_t correspond au facteur d'échelle de temps de Froude pour les processus d'écoulement d'eau. Mais, il existe une autre échelle de temps, *l'échelle temporelle morphologique* pour l'évolution de l'érosion dans le temps [11]. Elle permet d'évaluer et d'adapter le temps dans les modèles qui simulent comment les sédiments se déplacent à une échelle réduite, ce qui nous intéresse ici. Cette échelle temporelle sédimentologique permet de corriger et d'ajuster le temps dans l'échelle de Froude pour prendre en compte le fait que certains comportements des sédiments ne peuvent pas être mis à l'échelle. En effet, comme mentionné à la section 4.2, le diagramme de Shields ne peut pas être conservé. Nous ne pouvons pas à la fois conserver Re^* et τ^* .

C'est donc *l'échelle temporelle morphologique* que nous utilisons. Sur la base des photos, nous constatons que le facteur d'échelle de cette échelle temporelle est pour nous :

$$\lambda_{t*} = \lambda_t \cdot 1,87 = 4,181 \quad (6.1)$$

Le temps à petite échelle ne doit par conséquent pas être multiplié par λ_t pour être amené à moyenne échelle, mais par λ_{t*} .

Le facteur de correction entre λ_{t*} et λ_t est déterminé expérimentalement. Nous l'avons estimé en mettant en parallèle les photos aux instants clés, puis nous l'avons affiné en imposant que la hauteur d'eau dans le bassin à petite échelle amenée à moyenne échelle et celle à moyenne échelle atteignent leur valeur maximale au même instant.

Pour une analyse plus détaillée, nous comparons certaines valeurs mesurées durant l'essai à petite échelle multipliées par les facteurs d'échelle du tableau 6.3 (sauf pour le temps pour lequel nous utilisons le facteur λ_{t*}) à celles mesurées durant l'essai à moyenne échelle. Cette comparaison a pour but d'observer l'impact de la mise à l'échelle sur l'évolution temporelle de la brèche.

Approfondissement de la brèche

À moyenne échelle, nous mesurons l'approfondissement de la brèche grâce à des balles placées dans la digue comme mentionné à la section 5.4.5. À petite échelle, il a été mesuré avec des lasers.

L'érosion de la brèche au niveau de la crête est mesurée aux sections rose et orange (voir sur figure 6.59) pour la moyenne échelle, en $x = -0,25$ m et $x = 0,25$ m. À petite échelle, la digue ne possède pas de plateau au niveau de la crête comme à moyenne échelle. Nous mesurons alors l'érosion de la brèche au niveau de la crête en une seule section, la section mauve (voir sur figure 6.59), en $x = 0$ m.

À moyenne échelle, nous avons placé des balles en $x = 0,75$ m, soit $0,50$ m en aval de la section orange. La section correspondante à petite échelle est la section à $0,10$ m ($= x' = x/\lambda_x = 0,50$ m/5) en aval de la section mauve. Aucun laser n'était placé sur cette section à petite échelle. Nous prenons donc la moyenne entre la valeur du laser placé juste avant (en $x' = 0,05$ m) et la valeur du laser placé juste après (en $x' = 0,15$ m).

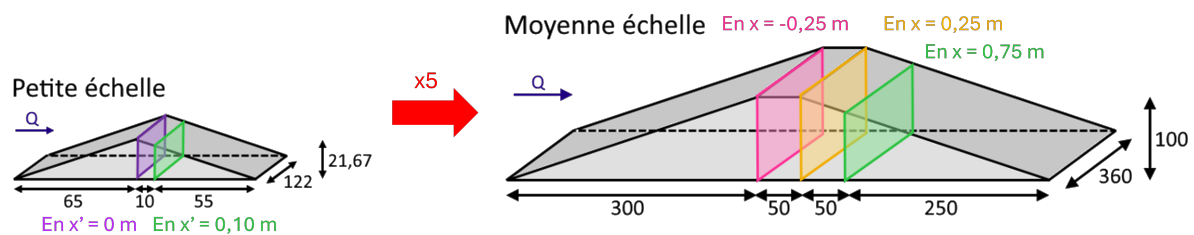
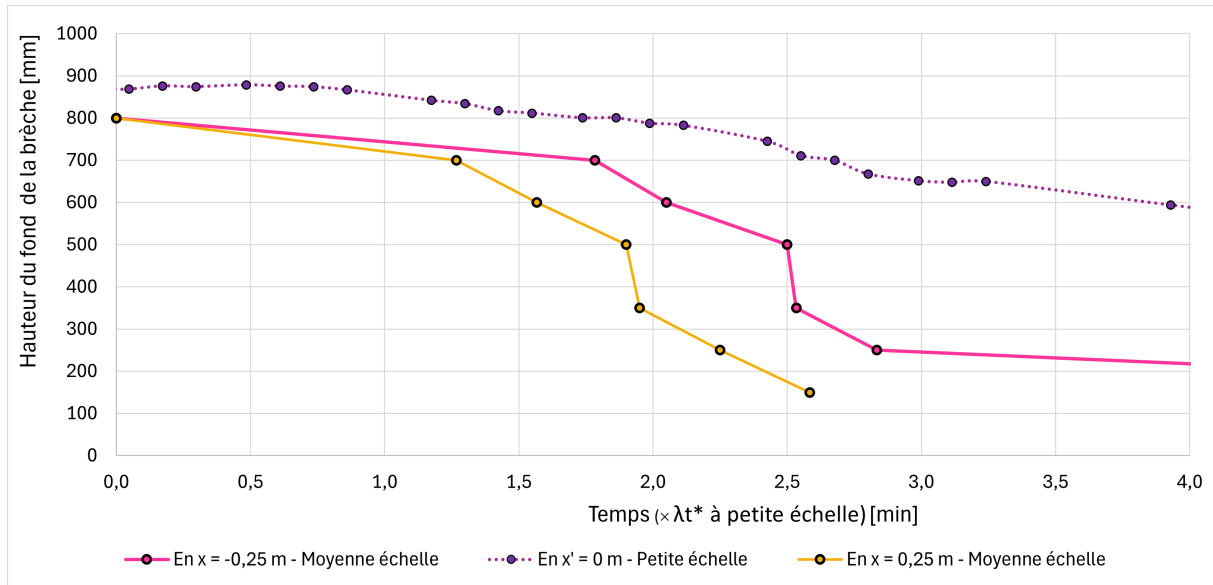


FIGURE 6.59 – Position des sections de mesure (dimensions des digues en centimètres)

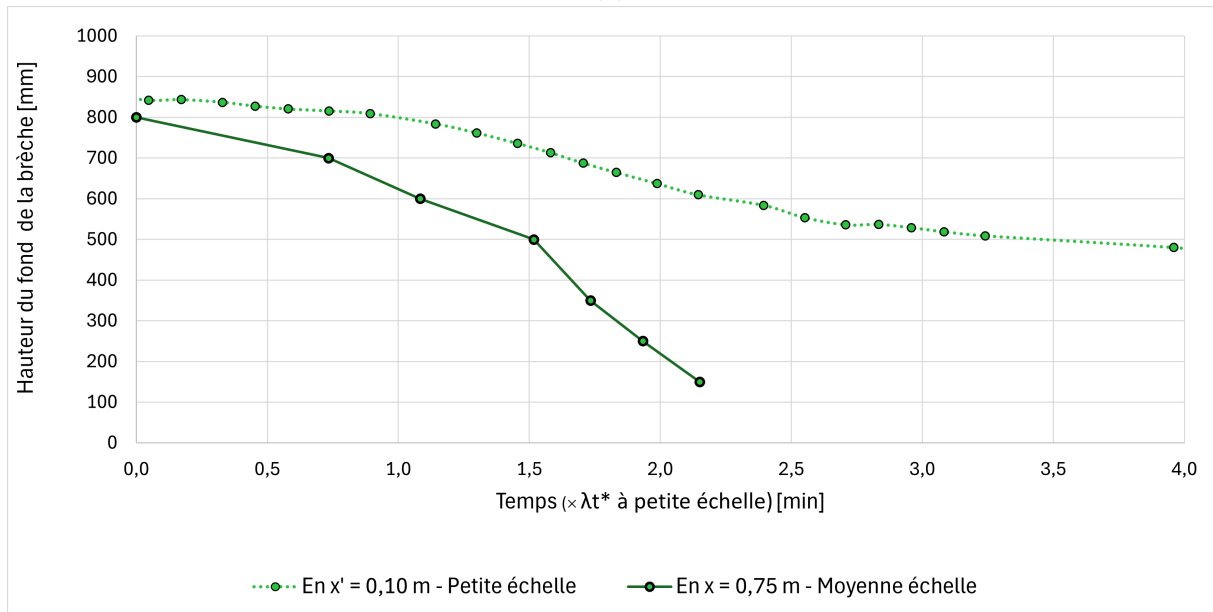
Sur les graphiques suivants, nous comparons alors l'approfondissement de la brèche à ces divers emplacements :

- Au niveau de la crête :
 - À moyenne échelle : en $x = -0,25$ m (en amont de la crête) et en $x = 0,25$ m (en aval de la crête)
 - À petite échelle : en $x' = 0$ m (sur la crête)
- Sur la pente aval :
 - À moyenne échelle : en $x = 0,75$ m
 - À petite échelle : en $x' = 0,10$ m

À ces endroits, le fond de la brèche évolue comme suit :



(a)



(b)

FIGURE 6.60 – Essais à petite échelle et moyenne échelle : Évolution de la hauteur du fond de la brèche au niveau de la crête (a) et sur la pente aval (b)

À petite échelle, la hauteur initiale du fond de la brèche est de 17 *cm* (= hauteur de la digue - profondeur de la brèche = 21,67 *cm* – 4,67 *cm*). Mise à l'échelle moyenne, cette valeur est donc de 85 *cm* (= 17 *cm* · λ_x).

À moyenne échelle, la hauteur initiale du fond de la brèche est de 80 *cm* (= hauteur de la digue - profondeur de la brèche = 100 *cm* – 20 *cm*).

La digue et la brèche n'ont pas été exactement mises à l'échelle. En effet, la hauteur initiale du fond de la brèche pour la petite échelle amenée à moyenne échelle n'est pas

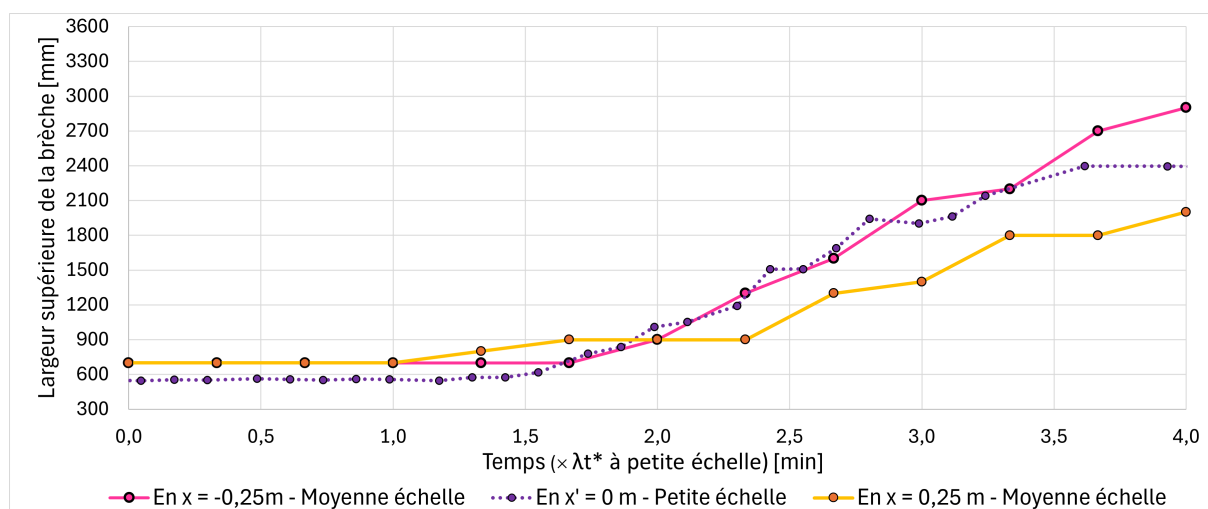
identique à celle pour la moyenne échelle.

Comme expliqué à la section 4.3, le diagramme de Shields ne peut pas être parfaitement conservé en changeant d'échelle. En imposant $\lambda_d = 1$ (même sable pour les deux échelles), l'initiation de l'érosion du sable se produit plus tôt à moyenne échelle qu'à petite échelle (pour un débit de brèche plus faible mis à l'échelle). Nous pouvons en effet observer sur la figure 6.60 que l'érosion verticale s'initie plus tôt et progresse plus rapidement à moyenne échelle qu'à petite échelle.

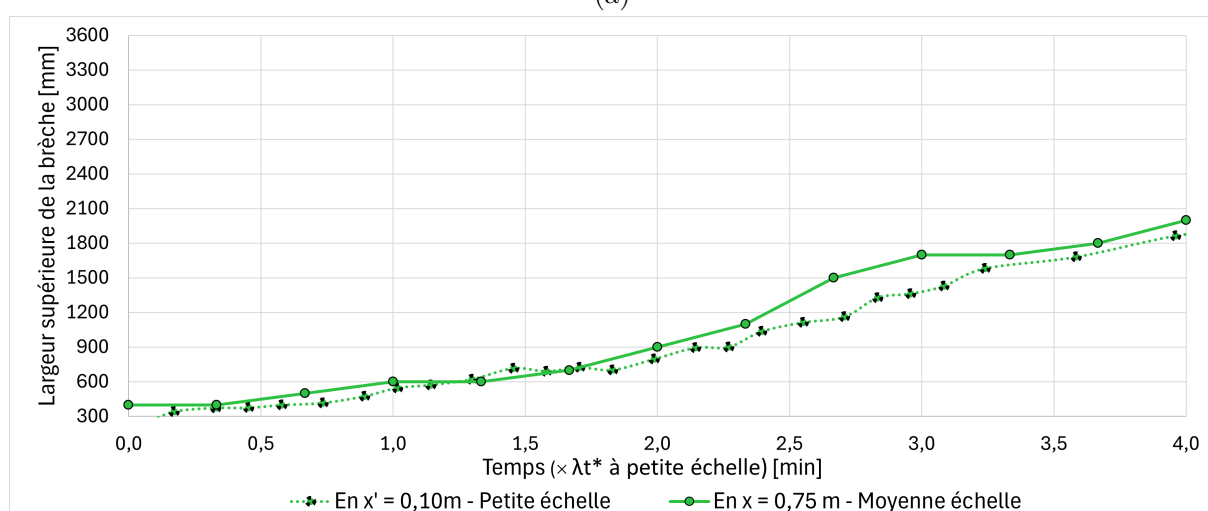
Élargissement de la brèche

À moyenne échelle, nous mesurons l'élargissement de la brèche grâce à la photogrammétrie comme mentionné à la section 5.4.5. À petite échelle, il a été mesuré avec des lasers.

Sur les figures suivantes, nous comparons l'élargissement de la brèche à petite échelle amené à moyenne échelle à celui à moyenne échelle aux mêmes emplacements définis plus haut :



(a)



(b)

FIGURE 6.61 – Essais à petite échelle et moyenne échelle : Évolution de la largeur supérieure de la brèche au niveau de la crête (a) et sur la pente aval (b)

L'évolution de la largeur de la brèche montre des tendances similaires entre les différentes échelles, que ce soit au niveau de la crête ou sur la pente aval.

Débits et hauteur d'eau

Dans cette section, les valeurs de débit passant par la brèche et de hauteur d'eau dans le bassin pour l'essai à petite échelle sont chaque fois mises à l'échelle pour pouvoir être comparées avec les résultats de l'essai à moyenne échelle. Sur le graphique ci-dessous, les données relatives à l'essai à moyenne échelle sont tracées en trait plein et celles de l'essai à petite échelle amenées à moyenne échelle sont tracées en traits pointillés.

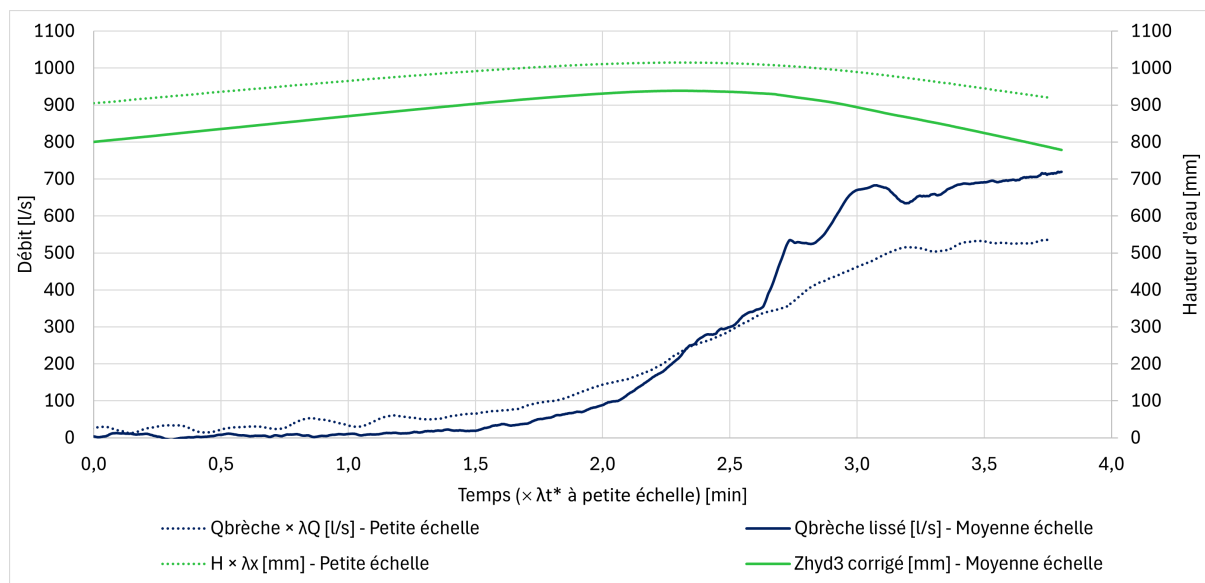


FIGURE 6.62 – Essais à petite échelle et moyenne échelle : Évolution du débit passant par la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (H pour la petite échelle et Z_{hyd3} pour la moyenne échelle) en fonction du temps

Comme déjà mentionné plus haut, la digue et la brèche n'ont pas été construites exactement à l'échelle. C'est pour cela que la hauteur d'eau dans le bassin en $t = 0,0 \text{ min}$ n'est pas identique pour la petite échelle amenée à moyenne échelle et pour la moyenne échelle.

À moyenne échelle, la hauteur initiale du fond de la brèche est de 80 cm (= hauteur de la digue - profondeur de la brèche = $100 \text{ cm} - 20 \text{ cm}$). Nous retrouvons cette valeur sur le graphique ci-dessus au temps $t = 0,0 \text{ min}$.

La hauteur initiale du fond de la brèche est de 17 cm (= hauteur de la digue - profondeur de la brèche = $21,67 \text{ cm} - 4,67 \text{ cm}$) à petite échelle. Mise à l'échelle moyenne, cette valeur est donc de 85 cm ($= 17 \text{ cm} \cdot \lambda_x$). Cependant, sur le graphique ci-dessus, nous observons que la hauteur d'eau dans le bassin au début de l'écoulement sur la pente aval est de 90 cm . Ce décalage de 5 cm peut être expliqué par une légère erreur lors de la mise à zéro des données obtenues à petite échelle.

Durant les deux premières minutes, lorsque l'érosion verticale est prédominante pour les deux essais, nous pouvons voir que le débit à travers la brèche à petite échelle augmente légèrement plus rapidement qu'à moyenne échelle. Or, nous avons observé que l'érosion verticale évolue plus rapidement à moyenne échelle. En se basant sur cette observation, le débit passant par la brèche devrait alors également augmenter plus rapidement à moyenne échelle.

L'écart maximal entre les débits de brèche est de l'ordre de 50 l/s durant les deux premières minutes. Cette valeur est négligeable face aux valeurs maximales des débits de brèche (540 l/s à petite échelle et 720 l/s à moyenne échelle).

Durant les deux premières minutes, nous observons aussi que la hauteur d'eau dans le bassin évolue de la même manière quelle que soit l'échelle.

Après $t = 2,0 \text{ min}$, le débit de brèche augmente plus rapidement dû à l'élargissement qui s'accélère. À partir de cet instant, nous sommes dans la seconde phase de l'essai où l'érosion latérale est prédominante.

L'augmentation du débit de brèche est plus élevée à moyenne échelle qu'à petite échelle. Ceci peut s'expliquer comme suit :

- La largeur de la brèche évolue de manière similaire pour les deux essais. Cependant, la différence entre le niveau d'eau dans le bassin et la hauteur du fond de la brèche est plus élevée à moyenne échelle. La section de passage de l'écoulement est donc plus grande à moyenne échelle. Un plus gros volume d'eau peut donc s'échapper du bassin par unité de temps.
- Comme mentionné plus haut, à moyenne échelle, le bassin est plus grand que le bassin à petite échelle amené à moyenne échelle. Il y a donc un plus grand volume d'eau en amont de la digue à moyenne échelle.

Il en résulte que le débit de brèche est plus faible à petite échelle en fin d'essai. Ce qui peut expliquer pourquoi nous n'observons pas sur les photos à petite échelle la forme de sablier que nous observons à moyenne échelle.

C'est en effet après environ 2,7 minutes que la largeur de la brèche commence à ne plus être uniforme sur toute sa longueur à moyenne échelle (début de la forme en sablier). C'est le moment à partir duquel le débit de brèche à moyenne échelle devient supérieur à celui à petite échelle amené à moyenne échelle.

Conclusion

La digue et la brèche n'ont pas été exactement mises à l'échelle. De plus, nous avons utilisé le même sable pour les essais à petite et à moyenne échelle (il n'a pas été mis à l'échelle). Par conséquent, on ne peut expliquer avec certitude la cause de différents comportements observés dans l'évolution de la brèche. Ce peut être dû à un effet d'échelle et/ou à un problème de mise à l'échelle de la digue.

Nous avons observé que pour mettre à l'échelle moyenne le temps de l'essai réalisé à petite échelle, il ne suffit pas de le multiplier par le facteur d'échelle λ_t , il faut en plus appliquer un facteur de correction déterminé expérimentalement qui, dans notre cas, vaut 1,87 car les sédiments ont leur propre échelle temporelle que nous appelons *l'échelle temporelle morphologique*.

Il serait intéressant de réaliser un essai en utilisant un sable mis à l'échelle afin de savoir si *l'échelle temporelle morphologique* correspondrait davantage à l'échelle de Froude (facteur de correction plus proche de 1).

Notons cependant qu'il serait impossible d'estimer par cette méthode un temps de rupture pour une digue réelle en nous basant sur un modèle réduit car, le facteur de correction devant être déterminé expérimentalement, il faudrait détruire la digue réelle pour le connaître.

Malgré ces complexités, il est possible d'apercevoir certaines similitudes entre les deux essais. La comparaison basée sur les photos montre que les mécanismes de rupture sont

conservés à différentes échelles. Nous observons initialement une phase d'érosion verticale (érosion progressive du fond de la brèche, parallèlement à la géométrie initiale) suivie d'une phase d'érosion latérale de la brèche, menant à la rupture totale de la digue.

Chapitre 7

Conclusion

Nous avons poursuivi les expériences initiées par Gilles et Delforge (2023) concernant les ruptures de digues en sable d'1 m de haut par surverse. Notre objectif était d'examiner l'influence du mode d'alimentation du bassin en amont de la digue, du type de sable utilisé et des dimensions du modèle réduit sur l'évolution temporelle d'une brèche causée par surverse sur une digue.

Pour répondre à cet objectif, 3 types d'essais ont été réalisés :

- En faisant varier l'alimentation du bassin en amont de la digue en sable fin ($d_{50} = 0,314 \text{ mm}$) afin de maintenir un niveau d'eau constant dans ce bassin.
- En alimentant par débit constant le bassin en amont de la digue en sable fin ($d_{50} = 0,314 \text{ mm}$).
- En alimentant encore par débit constant le bassin, mais cette fois avec une digue en sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$).

Pour valider la reproductibilité des résultats, chaque série d'essais a été répétée au moins deux fois.

En comparant ces essais à ceux réalisés par Descantons et Dujardin (2014) sur une digue d'une vingtaine de centimètres de haut, nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

- **Mode d'alimentation du bassin en amont de la digue : niveau d'eau constant VS débit constant**

Maintenir une hauteur constante d'eau dans le bassin en amont de la digue lors de sa rupture représente mieux les conditions réelles. En laboratoire, cela exige un apport du débit d'alimentation du bassin relativement important pour compenser la diminution du niveau d'eau due à l'agrandissement de la brèche en fin d'essai. Dû à une capacité limitée des pompes, il nous a été impossible de maintenir une hauteur constante d'eau jusqu'à la fin de nos essais.

Nos observations indiquent que les deux modes d'alimentation du bassin n'ont pas influencé le mécanisme de rupture. Cependant, l'érosion s'est initiée plus tard et a été plus lente pour l'essai avec un débit constant que celui avec une hauteur constante d'eau. Par conséquent, même si alimenter le bassin avec un débit constant n'est pas le mode d'alimentation du bassin qui représente le mieux la réalité, cette méthode

est plus facile à mettre en œuvre et donne des résultats, à un facteur de temps près, semblables à ceux réalisés avec une hauteur constante d'eau.

- **Type de sable utilisé pour la construction de la digue : sable fin ($d_{50} = 0,314 \text{ mm}$) VS sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$)**

Conformément aux observations des études mentionnées dans l'état de l'art à la section 2.2, nos essais ont montré des différences dans le comportement de rupture de digues selon la granulométrie du sable utilisé, mais pas dans la vitesse d'érosion. Le sable fin ($d_{50} = 0,314 \text{ mm}$) a un comportement similaire à celui d'un matériau cohésif (la formation d'un escalier au niveau du fond de la brèche qui se déplace vers l'amont suivi d'un élargissement par effondrement de blocs) dû à sa cohésion apparente plus élevée. Dans le cas du sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$), les essais montrent une érosion plus progressive, où le fond de la brèche reste une pente parallèle à la géométrie initiale de la digue et adopte une forme incurvée en sablier en fin d'essai qui s'accroît au fur et à mesure de l'essai.

- **Échelle géométrique : petite échelle (digue d'une vingtaine de centimètres de haut) VS moyenne échelle (digue d'1 m de haut)**

Nos résultats ont été comparés à ceux de Descantons et Dujardin (2014), qui avaient mené des essais de digues à petite échelle (hauteur de $21,67 \text{ cm}$) en alimentant le bassin avec un débit constant. Nous avons repris le même sable ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$) et nous avons mis à l'échelle le débit alimentant le bassin.

La comparaison basée sur les photos montre que les mécanismes de rupture sont conservés à différentes échelles.

Cependant, nous avons observé que le temps des essais à petite échelle amené à moyenne échelle (échelle de Froude) ne correspondait pas au temps de l'essai à moyenne échelle. Cet écart implique l'utilisation d'un facteur de correction pour passer de l'échelle de Froude à l'*échelle temporelle morphologique* qui correspond à une échelle propre aux sédiments.

Cette comparaison présente d'autres différences (notamment l'évolution du débit de brèche). Nous ne pouvons pas savoir avec certitude si elles sont dues à des problèmes de mise à l'échelle (les dimensions de la digue et de la brèche n'ayant pas été exactement mises à l'échelle et utilisant le même sable, sans le mettre à l'échelle) et/ou si ce sont des effets d'échelle.

Les conclusions tirées de ces comparaisons concordent avec les résultats issus de la littérature, renforçant ainsi la validité de nos observations.

Notre objectif initial a été atteint. Cependant, notre travail aurait pu être amélioré et nos analyses approfondies.

Nous reprenons ci-dessous les critiques que nous pouvons faire sur ce travail et les propositions d'amélioration.

- La photogrammétrie ne nous permet pas de détecter le fond de la brèche à cause de l'écoulement passant par-dessus. Nous avons donc placé des balles dans la digue pour mesurer l'évolution du fond de la brèche.

La photogrammétrie aurait pu être utilisée pour détecter le niveau d'eau en éparpillant des sciures plus grandes sur la surface de l'eau. De plus, suivre la trajectoire de ces sciures nous permettrait de mesurer la vitesse de l'écoulement de l'eau.

Avec plus d'informations sur la section de l'écoulement et sa vitesse, nous aurions pu calculer le débit de brèche. Ce calcul permettrait de confirmer ou non celui que nous avons obtenu en nous basant sur la conservation de la masse dans le bassin.

- Durant la construction des digues, les épaisseurs des couches de sable variaient d'un essai à l'autre. Les hauteurs auxquelles étaient positionnées les balles variaient donc également d'un essai à l'autre. Afin de simplifier l'analyse des résultats, il serait plus intéressant que la hauteur des balles soit identique pour tous les essais.

Des couches de sable plus planes permettraient déjà une meilleure précision quant à l'altitude des balles.

- Une autre raison pour laquelle il serait intéressant que les épaisseurs des couches de sable soient identiques pour tous les essais est de standardiser la compaction du sable. En effet, l'épaisseur des couches de sable joue un rôle dans la compaction.

De plus, une attention particulière devrait être accordée à la mesure de la teneur en eau du sable durant la construction de la digue. Dans ce travail, la teneur en eau avant compaction a été négligée. Les digues des différents essais ont été humidifiées différemment avant compaction. Or, il a été montré que la compaction affecte l'évolution de la brèche suite aux vérifications de reproductibilité.

Il faudrait se rapprocher de l'optimum Proctor avant de compacter chaque couche afin de réaliser une compaction similaire pour tous les essais.

En effet, dans les mêmes conditions, une digue mieux compactée (teneur en eau avant compaction plus proche de l'optimum Proctor) se rompt plus lentement.

Standardiser la compaction nous permettrait de maximiser les paramètres communs entre tous les essais et ainsi de les rendre plus comparables.

- Pour la comparaison à différentes échelles, nous n'avons pas mis exactement à l'échelle certains paramètres (les dimensions de la digue et de la brèche et le diamètre du sable), ce qui complique l'interprétation des résultats. Pour des études futures, nous proposons de réaliser des expériences avec une digue parfaitement mise à l'échelle et un sable mis à l'échelle. Cela permettrait d'étudier les effets d'échelle et de savoir si *l'échelle temporelle morphologique* se rapprocherait davantage de l'échelle de Froude.

- Dans le cadre de notre étude, nous n'avons pas utilisé de simulation numérique. Cependant, nos résultats peuvent servir d'une base solide pour des travaux futurs qui pourraient intégrer des simulations d'érosion de digues afin de les valider.

L'utilisation de simulations permettrait de reproduire virtuellement les scénarios d'essais, offrant la possibilité d'identifier et de prévenir certaines complications avant leur manifestation en laboratoire. Cela permettrait de gagner du temps et de l'argent en détectant les problèmes potentiels à l'avance. En effet, dans notre cas, la construction d'une digue durait deux jours et l'analyse des photos et vidéos (photogrammétrie pour l'évolution de la largeur de la brèche et détermination des temps auxquels les balles sont délogées pour l'évolution du fond de la brèche) prenait entre un et deux jours.

De plus, des simulations numériques nous offriraient la possibilité de modifier des paramètres plus facilement qu'en réalisant un modèle réduit.

Ces pistes d'amélioration visent non seulement à surmonter les problèmes rencontrés pour la reproductibilité des essais, mais également à améliorer les connaissances sur l'expérimentation des ruptures de digues.

Notre travail renforce la recherche dans le domaine de la rupture de digues par surverse afin de mieux appréhender ce mécanisme de rupture et d'élaborer de nouvelles stratégies de prévention et de gestion. Ces stratégies permettront d'améliorer la résilience des infrastructures hydrauliques face aux phénomènes d'érosion et de surverse, contribuant ainsi à la sécurité et à la durabilité environnementale.

Table des figures

1.1	Différents modes de rupture et leur fréquence d'occurrence [17]	1
1.2	Rupture du barrage de Brumadinho	2
1.3	Raz-de-marée de 1953 en mer du Nord	3
1.4	Rupture de digue du canal Juliana, aux Pays-Bas	3
1.5	Plateforme d'essais	4
1.6	Schéma représentant les digues à petite échelle (Descantons et Dujardin, 2014) et moyenne échelle (Gilles et Delforge, 2023) [cm]	4
2.1	Schéma représentant la surverse	7
2.2	Schéma représentant l'érosion interne	8
2.3	Schéma représentant l'érosion externe	8
2.4	Schéma représentant le glissement de terrain	8
2.5	Étapes de la rupture de digues par Visser (1998)	10
2.6	Setup expérimental de Coleman (2002)	11
2.7	Profil longitudinal des essais de Coleman (2002)	12
2.8	Vue en plan des essais de Coleman (2002)	13
2.9	Essai sur terrain réalisé pour le projet Impact	14
2.10	Essais en laboratoire réalisés pour le projet Impact	14
2.11	Setup expérimental de Pickert (2011)	15
2.12	Méthode de mesure : projection de "franges"	16
2.13	Setup expérimental de Walder (2015)	17
2.14	Ressaut hydraulique (<i>hydraulic jump</i> en anglais) dû à la formation d'un escalier	18
2.15	Différentes étapes du développement de la brèche pour une digue de 0,98 m de haut observées par Walder (2015)	19
2.16	Setup expérimental de Descantons et Dujardin (2014)	20
2.17	Positions des lasers et caméras	20
3.1	Courbe granulométrique	23
3.2	Moule cylindrique de l'essai Proctor [13]	24
3.3	Dame de compactage de l'essai Proctor [27]	24
3.4	Courbe Proctor du sable fin ($d_{50} = 0,314\text{ mm}$) [3]	25
3.5	Courbe Proctor du sable moyen ($d_{50} = 0,632\text{ mm}$)	26
4.1	Schéma représentant les digues à petite (Descantons et Dujardin (2014)) et moyenne échelle (Gilles et Delforge (2023) et ce travail) [cm]	27
4.2	Diagramme de Shields	30
4.3	Schéma de la brèche	32
4.4	Schéma représentant l'écoulement de l'eau sur la brèche	33

4.5	Dimensions de la brèche à petite échelle pour le sable moyen [cm] - coupe transversale	34
4.6	Dimensions de la brèche à petite échelle pour le sable moyen [cm] - vue de haut	34
4.7	Diagramme de Shields en B à petite échelle pour des débits allant de 0,01 l/s jusqu'à 0,65 l/s (valeur maximale pour limiter la surverse au niveau de la brèche) pour le sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$)	35
4.8	Débit passant par la brèche avant érosion en fonction de la hauteur d'eau en amont de la brèche (h_A) et de la hauteur d'eau en aval de la brèche (h_c) pour le sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$)	36
4.9	Diagramme de Shields en B pour des débits allant de 1 l/s jusqu'à 62 l/s pour le sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$)	36
4.10	Diagramme de Shields en B pour le sable moyen ($d_{50} = 0,632 \text{ mm}$) à petite échelle (pour des débits allant de 0,01 l/s jusqu'à 0,65 l/s) et à moyenne échelle (pour des débits allant de 1 l/s jusqu'à 62 l/s)	37
5.1	Plateforme d'essais et dimensions générales	39
5.2	Schéma du setup expérimental et dimensions du bassin	41
5.3	Pompes d'alimentation et conduites	42
5.4	Photos prises pendant l'essai Qf1	43
5.5	Schéma représentant la digue [cm]	43
5.6	Murets modèles	44
5.7	Schéma représentant la brèche	44
5.8	Photos du drain placé avant de poser le sable	45
5.9	Photos prises lors de la pose du sable	46
5.10	Photos prises lors de l'humidification du sable	47
5.11	Essai Qf4 : Teneur en eau des différentes couches de sable	48
5.12	Essai Qf4 : Masses volumiques humide et sèche des différentes couches de sable	49
5.13	Photos prises lors du compactage du sable	50
5.14	Photos prises après avoir compacté une (a), deux (b) et cinq (c) couches de sable	51
5.15	Photos prises lors de la formation de la pente aval	52
5.16	Photos prises lors de la formation de la brèche	53
5.17	Cinq débitmètres connectés chacun à une pompe	54
5.18	Essai Qf4 : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}) et des débits fournis par les pompes 4 et 5 (Q_4 et Q_5) en fonction du temps	54
5.19	Sondes ultrasoniques	55
5.20	Plan de l'emplacement des sondes hydrostatiques (en vert) et ultrasoniques (en bleu)	56
5.21	Essai Qf4 : Évolution de la hauteur d'eau à différents endroits du bassin en fonction du temps	56
5.22	Essai Qf4 : Évolution de la hauteur d'eau à différents endroits du bassin en fonction du temps	57
5.23	Drain (à gauche) et déversoir (à droite)	58
5.24	Essai Qf4 : Evolution du débit passant par le drain (Q_{drain}) et de la hauteur d'eau à partir du point bas de l'échancrure triangulaire dans le déversoir (ZDev2) en fonction du temps	59

5.25	Essai Qf4 : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3} , Z_{32} et Z_{52}) en fonction du temps	60
5.26	Essai Qf4 : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche lissé par moyenne mobile ($Q_{brèche}$ lissé) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3} , Z_{32} et Z_{52}) en fonction du temps	61
5.27	Photos prises à différents instants lors de l'essai Qf4	62
5.28	Modèle 3D de la digue obtenu grâce à la photogrammétrie à partir de photos prises par 11 caméras (représentées par les rectangles bleus)	63
5.29	Disposition des 11 caméras en mode time-lapse	64
5.30	Disposition des caméras en mode vidéo	64
5.31	Cibles GCP	65
5.32	Quadrillage de la digue	66
5.33	Repère [cm]	67
5.34	Essai Qf4 : Évolution de la section de la digue en aval de la crête (en $x = 0,25$ m)	68
5.35	Essai Qf4 : Évolution du profil longitudinal au centre de la digue (en $y = 0$ m)	68
5.36	Modèle 3D et niveaux obtenus par photogrammétrie en $t = 180$ s	69
5.37	Essai Qf4 : Évolution de la largeur supérieure de la brèche	69
5.38	Schéma du placement des balles [cm]	71
5.39	Pose des balles	72
5.40	Vue de haut d'une balle qui se fait emporter, images tirées d'une vidéo à 1 seconde d'écart	73
5.41	Essai Qf4 : Évolution de la hauteur du fond de la brèche	73
5.42	Essai Qf4 : Évolution de la section de la digue en aval de la crête (en $x = 0,25$ m)	74
5.43	Essai Qf4 : Évolution du profil longitudinal au centre de la digue (en $y = 0$ m)	75
5.44	Lancé de sciures dans le bassin avec une pelle	76
6.1	Essais Hf1 et Hf2 : Teneurs en eau des couches de sable avant compaction	79
6.2	Essais Hf1 et Hf2 : Masses volumiques sèches des couches de sable après compaction	79
6.3	Photos prises en $t = 0,0$ min	80
6.4	Essai Hf2 : $t = -5,4$ min	81
6.5	Photos prises durant les essais	81
6.6	Photos prises durant les essais	82
6.7	Photos prises durant les essais	82
6.8	Photos prises durant les essais	83
6.9	Photos prises durant les essais	83
6.10	Essais Hf1 et Hf2 : Évolution de la hauteur du fond de la brèche	84
6.11	Essais Hf1 et Hf2 : Évolution de la largeur supérieure de la brèche	85
6.12	Essais Hf1 et Hf2 : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche lissé ($Q_{brèche}$ lissé) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3}) en fonction du temps	86
6.13	Essais Qf3 et Qf4 : Masses volumiques sèches des couches de sable après compaction	88

6.14	Photos prises en $t = 0,6 \text{ min}$	89
6.15	Photos prises en $t = 1,4 \text{ min}$	90
6.16	Photos prises en $t = 2,0 \text{ min}$	90
6.17	Photos prises en $t = 3,1 \text{ min}$	91
6.18	Photos prises en $t = 3,8 \text{ min}$	91
6.19	Essais Qf3 et Qf4 : Évolution de la hauteur du fond de la brèche	92
6.20	Essais Qf3 et Qf4 : Évolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête (a), en aval de la crête (b) et sur la pente aval (c)	93
6.21	Photos prises durant les essais	94
6.22	Photos prises en $t = 0,0 \text{ min}$	94
6.23	Essais Qf3 et Qf4 : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche lissé par moyenne mobile ($Q_{brèche \text{ lissé}}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3}) en fonction du temps	95
6.24	Essais Qm1 et Qm2 : Masses volumiques sèches des couches de sable après compaction	97
6.25	Photos prises en $t = 0,6 \text{ min}$	97
6.26	Photos prises en $t = 1,4 \text{ min}$	98
6.27	Photos prises en $t = 2,0 \text{ min}$	98
6.28	Photos prises en $t = 3,1 \text{ min}$	99
6.29	Photos prises en $t = 3,8 \text{ min}$	99
6.30	Essais Qm1 et Qm2 : Évolution de la hauteur du fond de la brèche	100
6.31	Essais Qm1 et Qm2 : Évolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête (a), en aval de la crête (b) et sur la pente aval (c)	101
6.32	Essais Qm1 et Qm2 : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche lissé par moyenne mobile ($Q_{brèche \text{ lissé}}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3}) en fonction du temps	102
6.33	Essais Hf2 et Qf4 : Masses volumiques sèches des couches de sable après compaction	103
6.34	Photos prises durant les essais	104
6.35	Photos prises durant les essais	104
6.36	Photos prises durant les essais	105
6.37	Photos prises durant les essais	105
6.38	Photos prises durant les essais	106
6.39	Essais Hf2 et Qf4 : Évolution de la hauteur du fond de la brèche	106
6.40	Essais Hf2 et Qf4 : Évolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête (a), en aval de la crête (b) et sur la pente aval (c)	108
6.41	Essais Hf2 et Qf4 : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche lissé ($Q_{brèche \text{ lissé}}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3}) en fonction du temps	109
6.42	Essais Qf4 et Qm2 : Masses volumiques sèches des couches de sable après compaction	111
6.43	Photos prises en $t = 0,6 \text{ min}$	112
6.44	Photos prises en $t = 1,4 \text{ min}$	112
6.45	Photos prises en $t = 2,0 \text{ min}$	113
6.46	Photos prises en $t = 3,1 \text{ min}$	113
6.47	Photos prises en $t = 3,8 \text{ min}$	114
6.48	Essais Qf4 et Qm2 : Évolution de la hauteur du fond de la brèche	114

6.49	Essais Qf4 et Qm2 : Évolution du profil longitudinal au centre de la digue (en $y = 0$ m)	115
6.50	Essais Qf4 et Qm2 : Évolution de la largeur supérieure de la brèche en amont de la crête (a), en aval de la crête (b) et sur la pente aval (c)	116
6.51	Photos prises en $t = 2,0$ min	117
6.52	Photos prises en $t = 3,8$ min	118
6.53	Essais Qf4 et Qm2 : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche lissé ($Q_{brèche}$ lissé) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3}) en fonction du temps	119
6.54	Photos prises durant les essais	122
6.55	Photos prises durant les essais	122
6.56	Photos prises durant les essais	123
6.57	Photos prises durant les essais	123
6.58	Photos prises durant les essais	124
6.59	Position des sections de mesure (dimensions des digues en centimètres) . .	125
6.60	Essais à petite échelle et moyenne échelle : Évolution de la hauteur du fond de la brèche au niveau de la crête (a) et sur la pente aval (b)	126
6.61	Essais à petite échelle et moyenne échelle : Évolution de la largeur supérieure de la brèche au niveau de la crête (a) et sur la pente aval (b)	128
6.62	Essais à petite échelle et moyenne échelle : Évolution du débit passant par la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (H pour la petite échelle et Z_{hyd3} pour la moyenne échelle) en fonction du temps	129
8.1	Essai Hf2 : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3} , $Z32$ et $Z52$) en fonction du temps	148
8.2	Essai Hf2 : Évolution de la largeur supérieure de la brèche	149
8.3	Essai Hf2 : Évolution de la hauteur du fond de la brèche	149
8.4	Essai Hf2 : Évolution de la section de la digue en aval de la crête (en $x = 0,25$ m)	150
8.5	Essai Hf2 : Évolution du profil longitudinal au centre de la digue (en $y = 0$ m)	150
8.6	Essai Qf1 : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3} , $Z32$ et $Z52$) en fonction du temps	151
8.7	Essai Qf2 : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3} , $Z32$ et $Z52$) en fonction du temps	151
8.8	Essai Qf2 : Évolution de la largeur supérieure de la brèche	152
8.9	Essai Qf2 : Évolution de la hauteur du fond de la brèche	152
8.10	Essai Qf2 : Évolution de la section de la digue en amont de la crête (en $x = -0,25$ m)	153
8.11	Essai Qf2 : Évolution de la section de la digue en aval de la crête (en $x = 0,25$ m)	153
8.12	Essai Qf2 : Évolution de la section de la digue sur la pente aval (en $x = 0,75$ m)	154
8.13	Essai Qf2 : Évolution du profil longitudinal au centre de la digue (en $y = 0$ m)	154

8.14	Essai Qf3 : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3} , Z_{32} et Z_{52}) en fonction du temps	155
8.15	Essai Qf3 : Évolution de la largeur supérieure de la brèche	155
8.16	Essai Qf3 : Évolution de la hauteur du fond de la brèche	156
8.17	Essai Qf3 : Évolution de la section de la digue en amont de la crête (en $x = -0,25$ m)	156
8.18	Essai Qf3 : Évolution de la section de la digue en aval de la crête (en $x = 0,25$ m)	157
8.19	Essai Qf3 : Évolution de la section de la digue sur la pente aval (en $x = 0,75$ m)	157
8.20	Essai Qf3 : Évolution du profil longitudinal au centre de la digue (en $y = 0$ m)	158
8.21	Essai Qf4 : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3} , Z_{32} et Z_{52}) en fonction du temps	158
8.22	Essai Qf4 : Évolution de la largeur supérieure de la brèche	159
8.23	Essai Qf4 : Évolution de la hauteur du fond de la brèche	159
8.24	Essai Qf4 : Évolution de la section de la digue en amont de la crête (en $x = -0,25$ m)	160
8.25	Essai Qf4 : Évolution de la section de la digue en aval de la crête (en $x = 0,25$ m)	160
8.26	Essai Qf4 : Évolution de la section de la digue sur la pente aval (en $x = 0,75$ m)	161
8.27	Essai Qf4 : Évolution du profil longitudinal au centre de la digue (en $y = 0$ m)	161
8.28	Essai Qm1 : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3} , Z_{32} et Z_{52}) en fonction du temps	162
8.29	Essai Qm1 : Évolution de la largeur supérieure de la brèche	162
8.30	Essai Qm1 : Évolution de la hauteur du fond de la brèche	163
8.31	Essai Qm1 : Évolution de la section de la digue en amont de la crête (en $x = -0,25$ m)	163
8.32	Essai Qm1 : Évolution de la section de la digue en aval de la crête (en $x = 0,25$ m)	164
8.33	Essai Qm1 : Évolution de la section de la digue sur la pente aval (en $x = 0,75$ m)	164
8.34	Essai Qm1 : Évolution du profil longitudinal au centre de la digue (en $y = 0$ m)	165
8.35	Essai Qm2 : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3} , Z_{32} et Z_{52}) en fonction du temps	165
8.36	Essai Qm2 : Évolution de la largeur supérieure de la brèche	166
8.37	Essai Qm2 : Évolution de la hauteur du fond de la brèche	166
8.38	Essai Qm2 : Évolution de la section de la digue en amont de la crête (en $x = -0,25$ m)	167
8.39	Essai Qm2 : Évolution de la section de la digue en aval de la crête (en $x = 0,25$ m)	167

8.40	Essai Qm2 : Évolution de la section de la digue sur la pente aval (en $x = 0,75$ m)	168
8.41	Essai Qm2 : Évolution du profil longitudinal au centre de la digue (en $y = 0$ m)	168

Liste des tableaux

3.1	Tableau récapitulatif des caractéristiques des sables à l'optimum Proctor	26
4.1	Facteurs d'échelle des grandeurs liées à l'écoulement de l'eau en fonction de l'échelle géométrique λ_x	29
4.2	Facteurs d'échelle de τ^* , de Re^* et de z^*	32
4.3	Facteurs d'échelle de τ^* , de Re^* et de z^*	37
5.1	Résumé des essais réalisés avec d_{50} = le diamètre médian des grains de sable, H_{digue} = la hauteur initiale de la digue et $H_{brèche}$ = la hauteur initiale du fond de la brèche	40
6.1	Résumé des essais "valides" réalisés avec d_{50} = le diamètre médian des grains de sable, H_{digue} = la hauteur initiale de la digue et $H_{brèche}$ = la hauteur initiale du fond de la brèche	77
6.2	Essais Hf2 et Qf4 : Vitesses moyennes d'élargissement entre $t = 2,0 \text{ min}$ et $t = 4,0 \text{ min}$	109
6.3	Facteurs d'échelle des grandeurs liées à l'écoulement de l'eau en fonction de l'échelle géométrique $\lambda_x = 5$	121

Bibliographie

- [1] “Ammann Group. PLAQUES VIBRANTES | APF 12/40 | Ammann. Ammann Group”. In : (2023, March 17). URL : <https://www.ammann.com/fr-fr/machines/light-equipment/vibratory-plates/apf-12-40>.
- [2] Froehlich David C. “Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties”. In : *Journal of Hydraulic Engineering* 134.12 (déc. 2008), p. 1708-1721. ISSN : 0733-9429, 1943-7900. DOI : 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1708). URL : [https://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:12\(1708\)](https://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1708)).
- [3] Arthur Gilles et CORENTIN ZGAJEWSKI DELFORGE. “Étude expérimentale de l’écoulement sur une digue et de l’érosion progressive de celle-ci”. In : (2022-2023). [Mémoire UCL Master[120] : ingénieur civil des constructions].
- [4] Evg. EVG. “Gat in dijk in Nederland gedicht, ziekenhuis in Venlo ontruimd. De Standaard.” In : (2021, July 16). URL : https://www.standaard.be/cnt/dmf20210716_94562779.
- [5] Sandra Soares FRAZAO. “slide LGCIV2053 - Fluvial hydraulics”. In : (2023). URL : <https://moodle.uclouvain.be/course/view.php?id=2036>.
- [6] Volker Weitbrecht GERD PICKERT et Andreas BIEBERSTEIN. “Breaching of overtopped river embankments controlled by apparent cohesion”. In : *Journal of Hydraulic Research* 49.2 (2011), p. 143-156. DOI : 10.1080/00221686.2011.552468. eprint : <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.552468>. URL : <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.552468>.
- [7] Charrier GREGORY et al. *Étude expérimentale des ruptures de digues par surverse*. 2013.
- [8] I.N. McCABE. *SEDIMENTARY PROCESSES / Deposition from Suspension*. Mars 2005. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0123693969004901>.
- [9] L van Bendegom JANSEN. “Principles of River Engineering”. en. In : 3 Scale models (1994).
- [10] JENS NICLAES. *Granulométrie*. Avr. 2022. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=PY9ge8dDF3Y> (visité le 01/06/2023).
- [11] Helmut E. KOBUS, G. (Gerrit) ABRAHAM et J. GRIMM-STRELE. *Hydraulic modelling / edited by Helmut Kobus ; with contributions by G. Abraham ; translated by J. Grimm-Strele*. eng. Bulletin / German Association for Water Resources and Land Improvement ; 7. Hamburg : Parey, 1980. ISBN : 0273085190.
- [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* 45.sup1 (2007), p. 9-17. DOI : 10.1080/00221686.2007.9521828.

- [13] “Moule à proctor modifié 6 po | Essais sur matériaux | Geneq. (n.d.).” In : (). URL : <https://geneq.com/materials-testing/fr/produit/humboldt/moule-a-proctor-modifie-6-po-514>.
- [14] *NBN EN 13286-2 : Mélanges non liés et hydrauliquement liés – Partie 2 : Méthodes d’essai pour la densité de référence en laboratoire et la teneur en eau – Compactage Proctor*. Norme belge. 2010.
- [15] NOS. “olop evacuatievoorbereidingen in Noord-Limburg, gat Meerssen gedicht.” In : (2021, July 16). URL : <https://nos.nl/collectie/13869/artikel/2389593-volop-evacuatievoorbereidingen-in-noord-limburg-gat-meerssen-gedicht>.
- [16] A. POSTS. *When the dikes broke. Environmental History Now*. 2023, February 1. URL : <https://envhistnow.com/2023/02/01/when-the-dikes-broke/>.
- [17] Hadrien RATTEZ. “slide LGCIV2071 - Geotechnics - Earth dams”. In : (2023). URL : <https://moodle.uclouvain.be/course/view.php?id=2607>.
- [18] Charles Descantons et RÉMI DUJARDIN. “Formation, par débordement, d’une brèche dans une digue en matériau non cohésif”. In : (2013-2014). [Mémoire UCL Ingénieur civil des constructions].
- [19] Darryl P. Andrews et M. Grant Webby. STEPHEN E. COLEMAN. *Overtopping Breaching of Noncohesive Homogeneous Embankments*. (sept. 2002). DOI : 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:9(829). URL : <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%5C%28ASCE%5C%290733-9429%205C%282002%5C%29128%5C%3A9%5C%28829%5C%29>.
- [20] Rémy TOURMENT et al. *Mécanismes de dégradation des digues de protection maritimes*. 2013.
- [21] Lionel VANCAUTEREN. “Construction d’une plateforme d’essais pour l’étude des ruptures de digues-fiche technique”. 5-05-2022.
- [22] Paul J. VISSER. “Breach Growth in Sand-Dikes”. Thèse de doct. Faculty of Civil Engineering Delft University of Technology, 1998. URL : https://www.researchgate.net/publication/35515412_Breach_growth_in_sand-dikes.
- [23] WALDER, J. S., IVERSON, R. M., GODT, J. W., LOGAN, M., SOLOVITZ, S. A. *Controls on the breach geometry and flood hydrograph during overtopping of noncohesive earthen dams*. 2015. URL : <https://doi.org/10.1002/2014wr016620>.
- [24] WIKIPÉDIA. *Raz-de-marée de 1953 en mer du Nord — Wikipédia, l’encyclopédie libre*. [En ligne; Page disponible le 1-février-2024]. 2024. URL : http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Raz-de-mar%C3%A9_de_1953_en_mer_du_Nord&oldid=212065631.
- [25] WIKIPÉDIA. *Rupture du barrage de Brumadinho — Wikipédia, l’encyclopédie libre*. [En ligne; Page disponible le 4-avril-2023]. 2023. URL : http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Rupture_du_barrage_de_Brumadinho&oldid=202947709.
- [26] M. S. YALIN. “Theory of Hydraulic Models”. en. In : 6 Similarity in sediment transport (1971).

- [27] “Zsaid. (2024, April 8). Dame en acier cadmié pour essai Proctor normal/CBR - STDE. Smart Testing Drilling Equipments.” In : (). URL : <https://www.stde.fr/sols-mecanique-des-sols/mecanique-des-sols-cisaillement/moules-et-dames-proctor/moules-proctor-et-dames-astm-aashto/dame-de-compactage-proctor-standard-astm/>.

Chapitre 8

Annexes

8.1 Données de l'essai Hf2

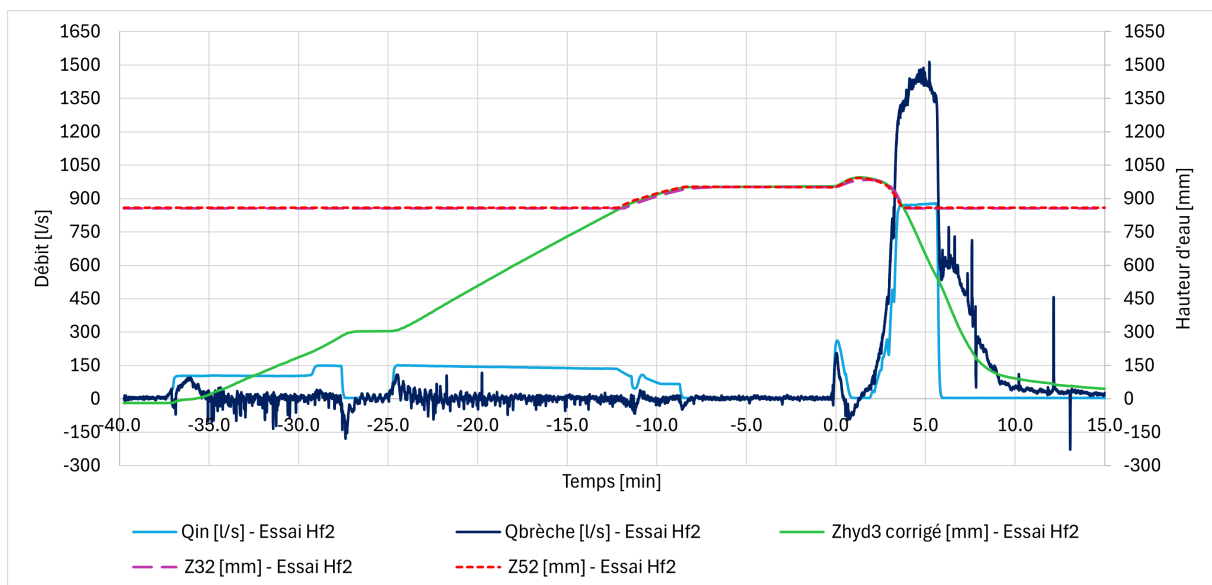


FIGURE 8.1 – Essai **Hf2** : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3} , Z_{32} et Z_{52}) en fonction du temps

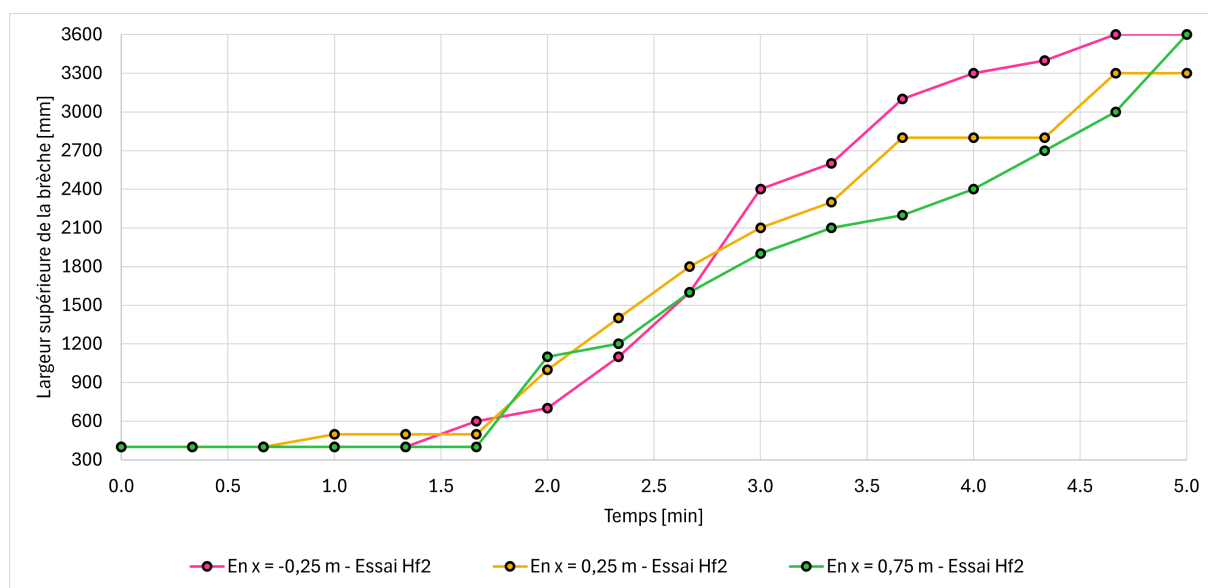


FIGURE 8.2 – Essai **Hf2** : Évolution de la largeur supérieure de la brèche

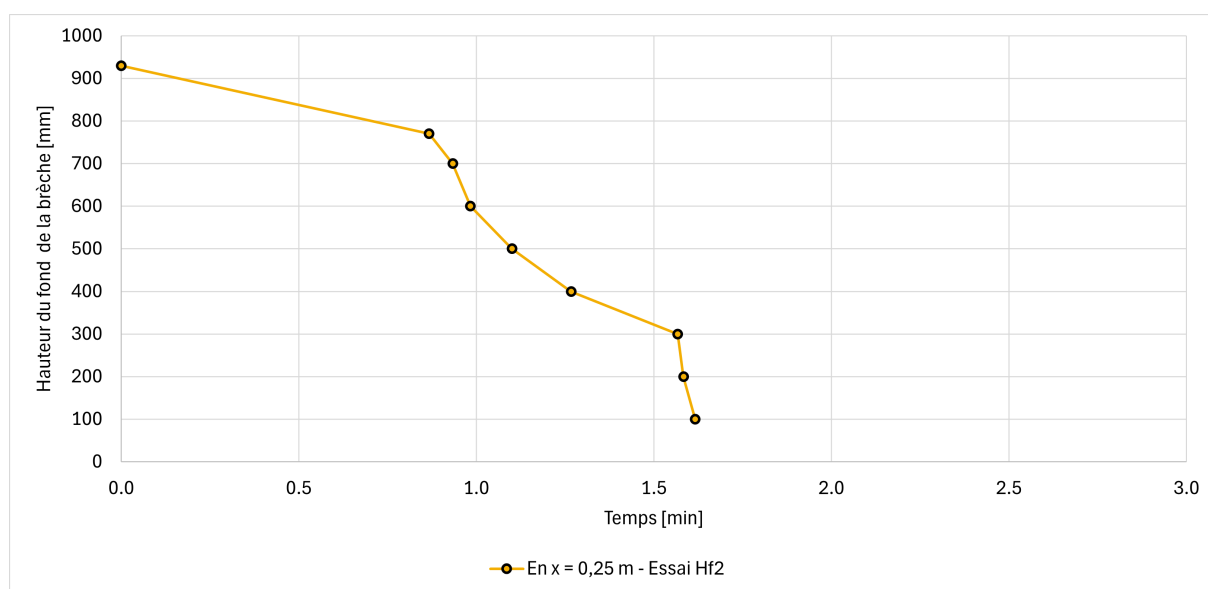


FIGURE 8.3 – Essai **Hf2** : Évolution de la hauteur du fond de la brèche

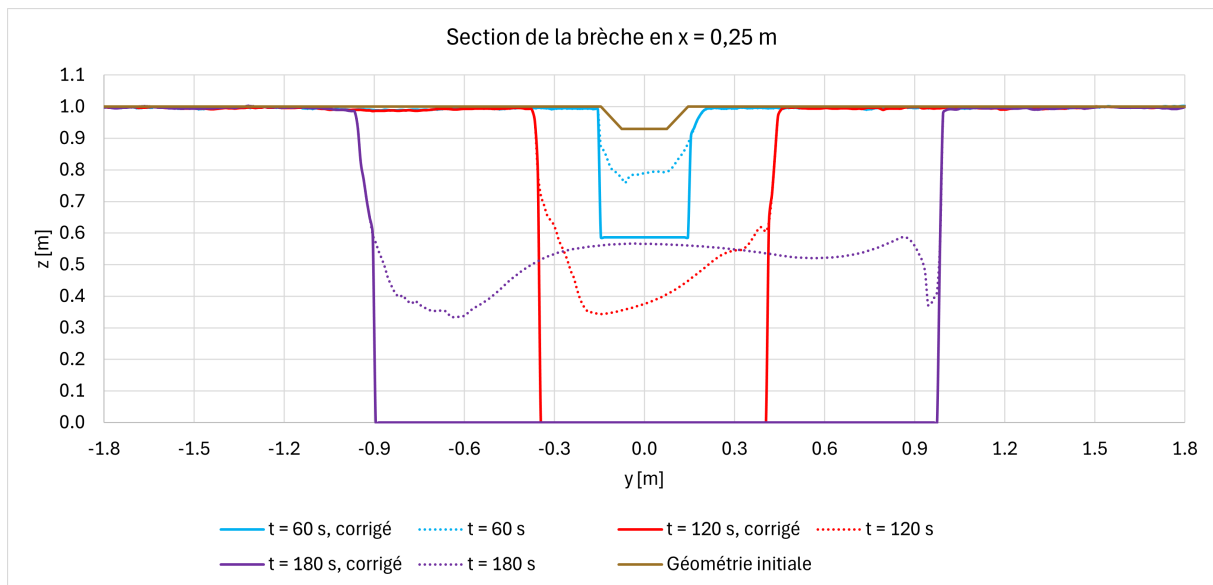


FIGURE 8.4 – Essai **Hf2** : Évolution de la section de la digue en aval de la crête (en $x = 0,25$ m)

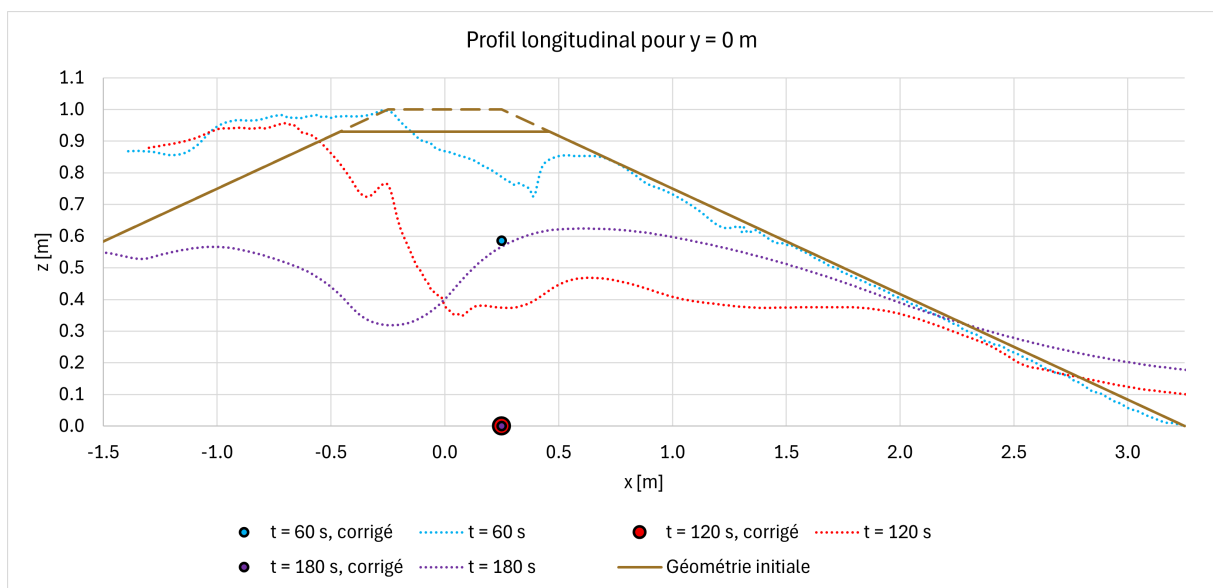


FIGURE 8.5 – Essai **Hf2** : Évolution du profil longitudinal au centre de la digue (en $y = 0$ m)

8.2 Données de l'essai Qf1

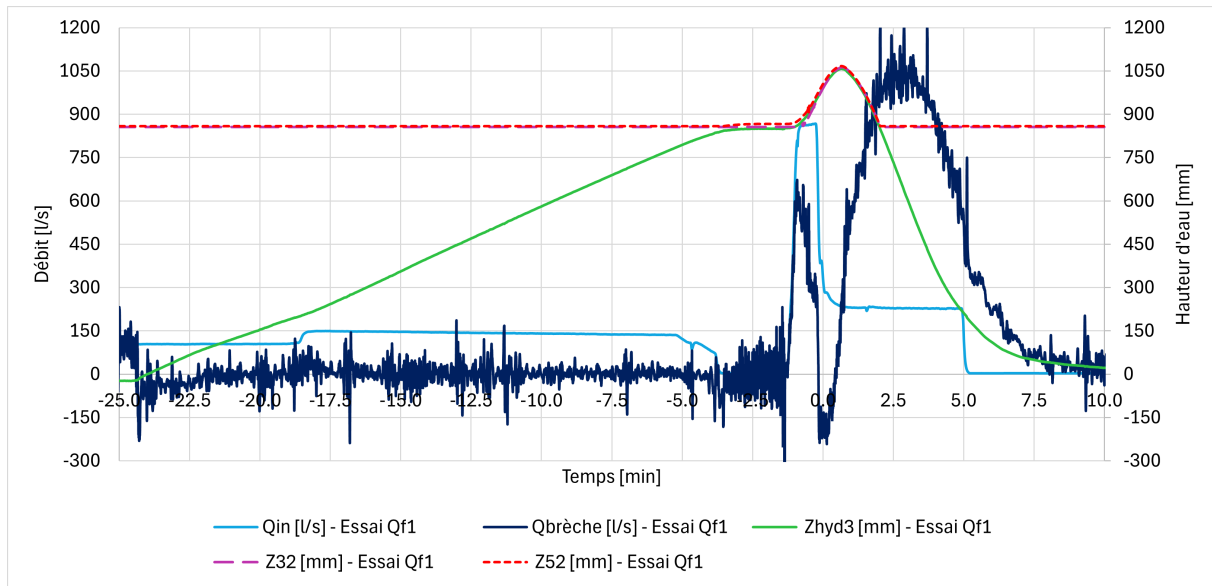


FIGURE 8.6 – Essai **Qf1** : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3} , Z_{32} et Z_{52}) en fonction du temps

8.3 Données de l'essai Qf2

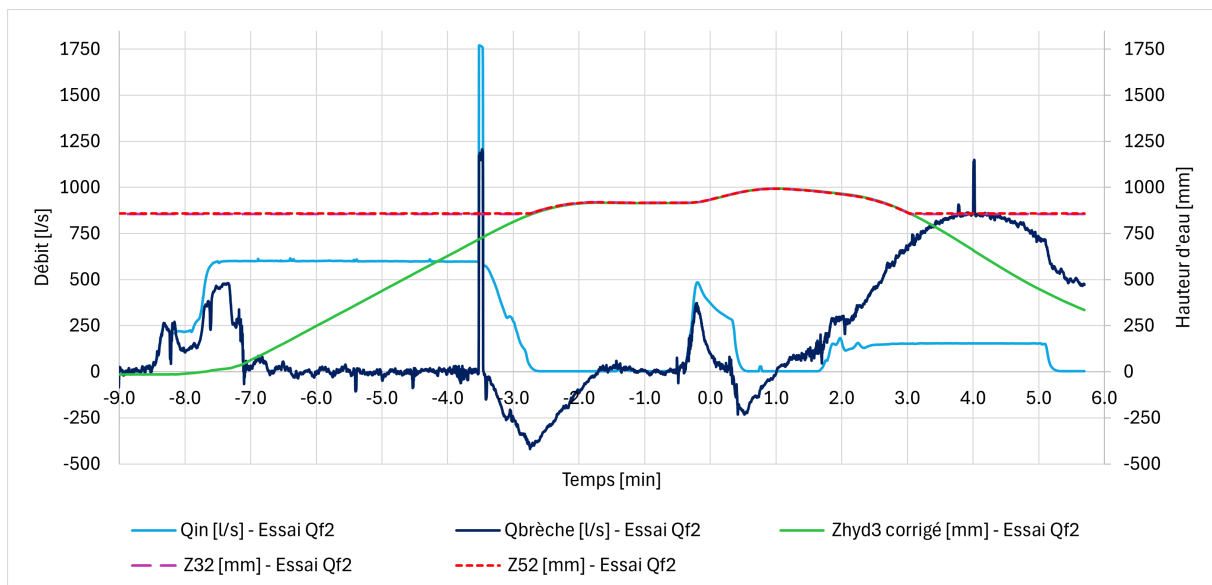


FIGURE 8.7 – Essai **Qf2** : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3} , Z_{32} et Z_{52}) en fonction du temps

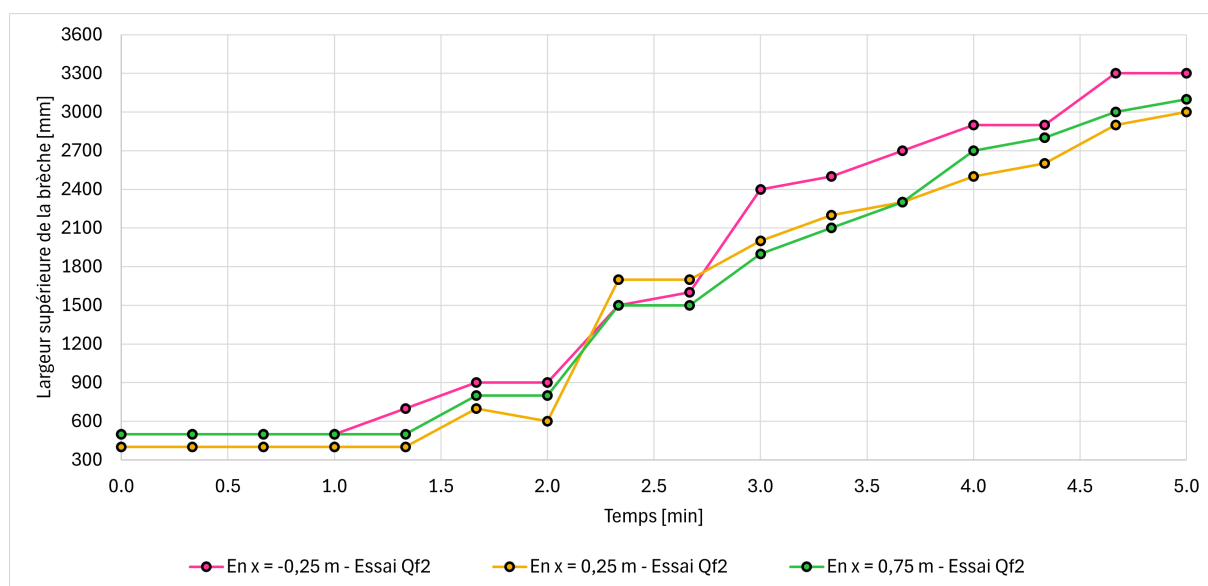


FIGURE 8.8 – Essai Qf2 : Évolution de la largeur supérieure de la brèche

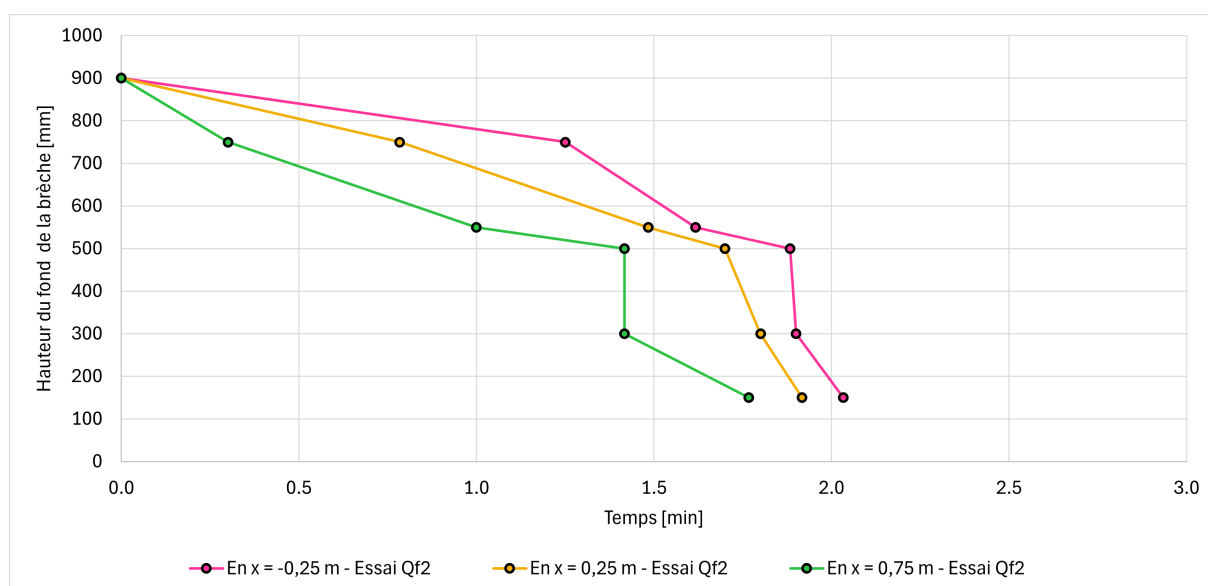


FIGURE 8.9 – Essai Qf2 : Évolution de la hauteur du fond de la brèche

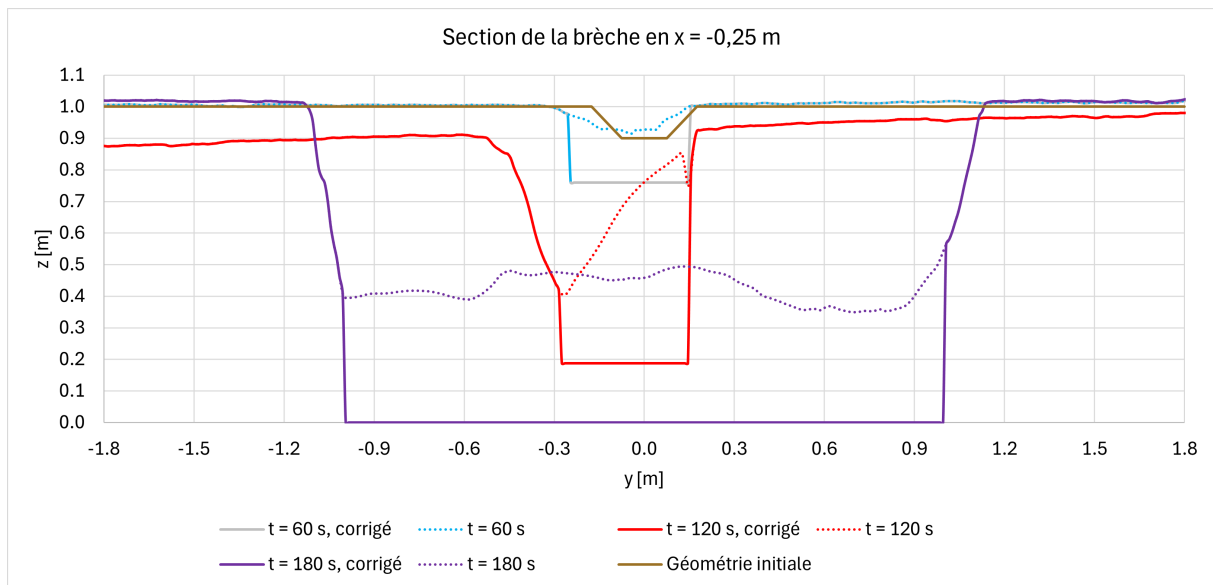


FIGURE 8.10 – Essai **Qf2** : Évolution de la section de la digue en amont de la crête (en $x = -0,25$ m)

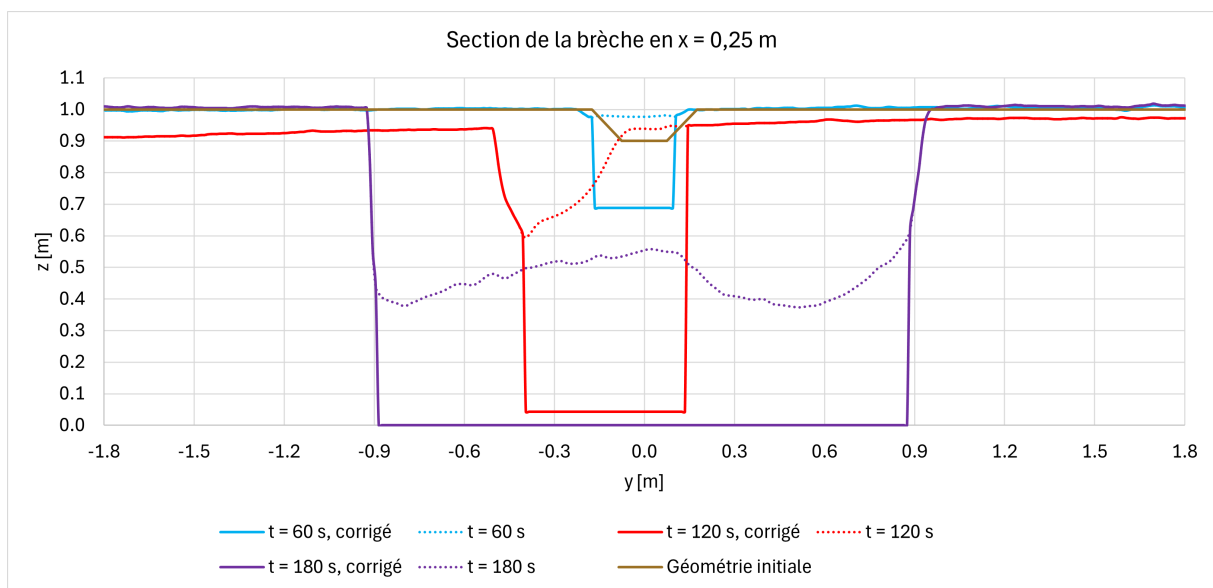


FIGURE 8.11 – Essai **Qf2** : Évolution de la section de la digue en aval de la crête (en $x = 0,25$ m)

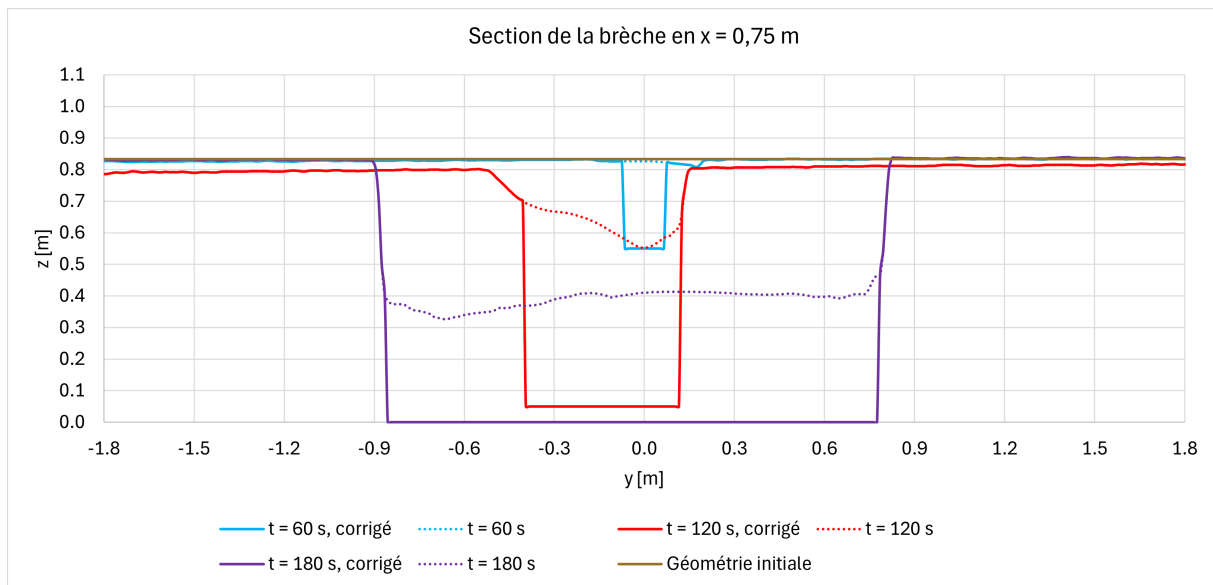


FIGURE 8.12 – Essai **Qf2** : Évolution de la section de la digue sur la pente aval (en $x = 0,75$ m)

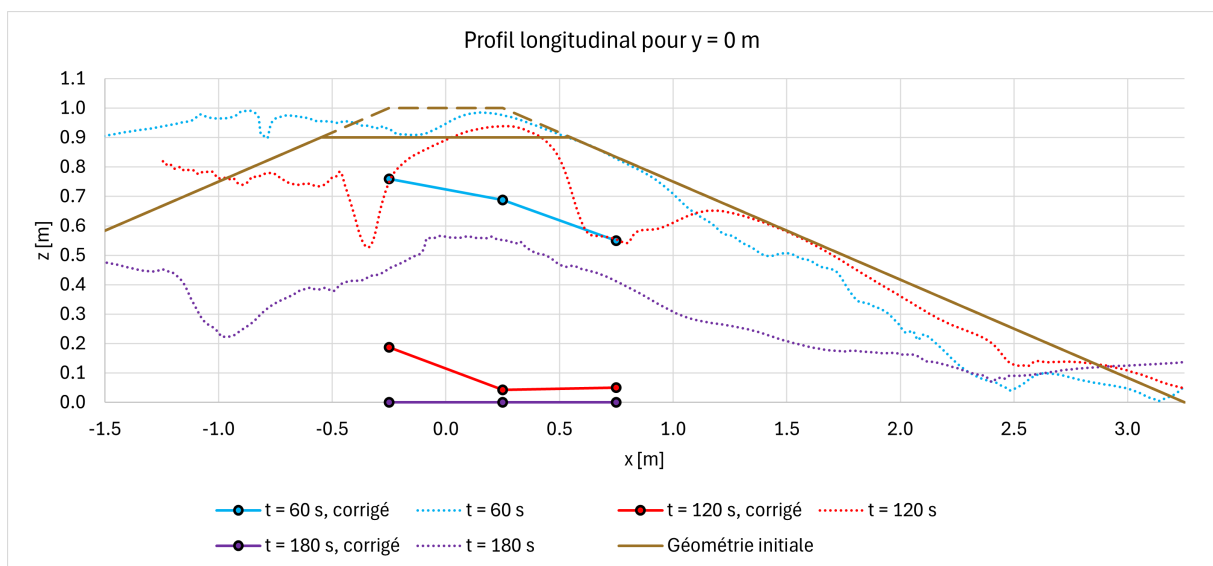


FIGURE 8.13 – Essai **Qf2** : Évolution du profil longitudinal au centre de la digue (en $y = 0$ m)

8.4 Données de l'essai Qf3

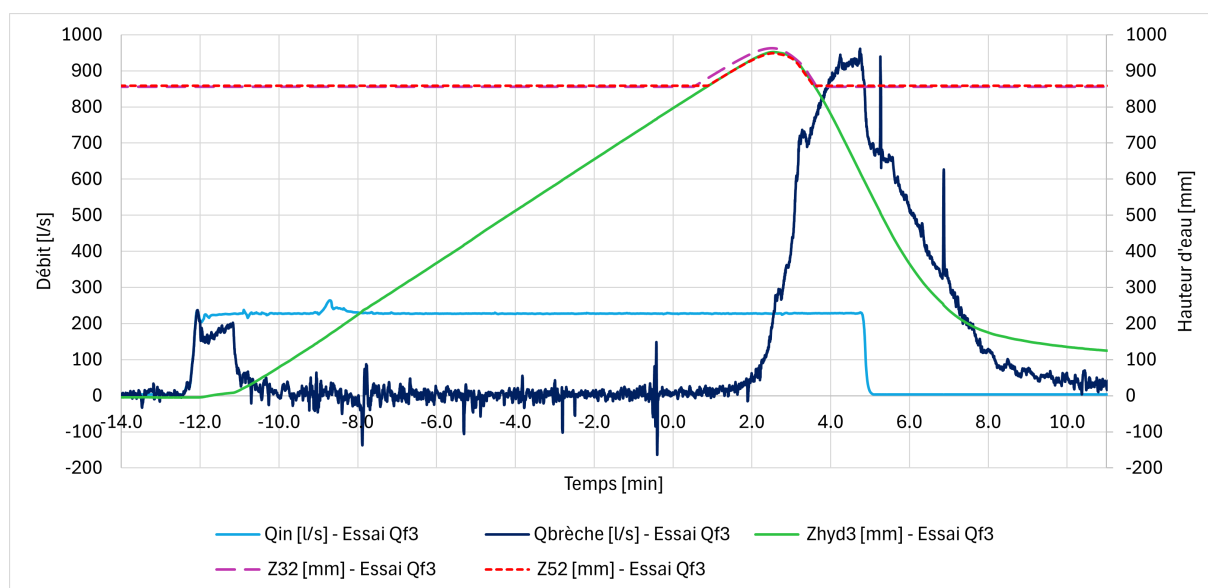


FIGURE 8.14 – Essai **Qf3** : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3} , Z_{32} et Z_{52}) en fonction du temps

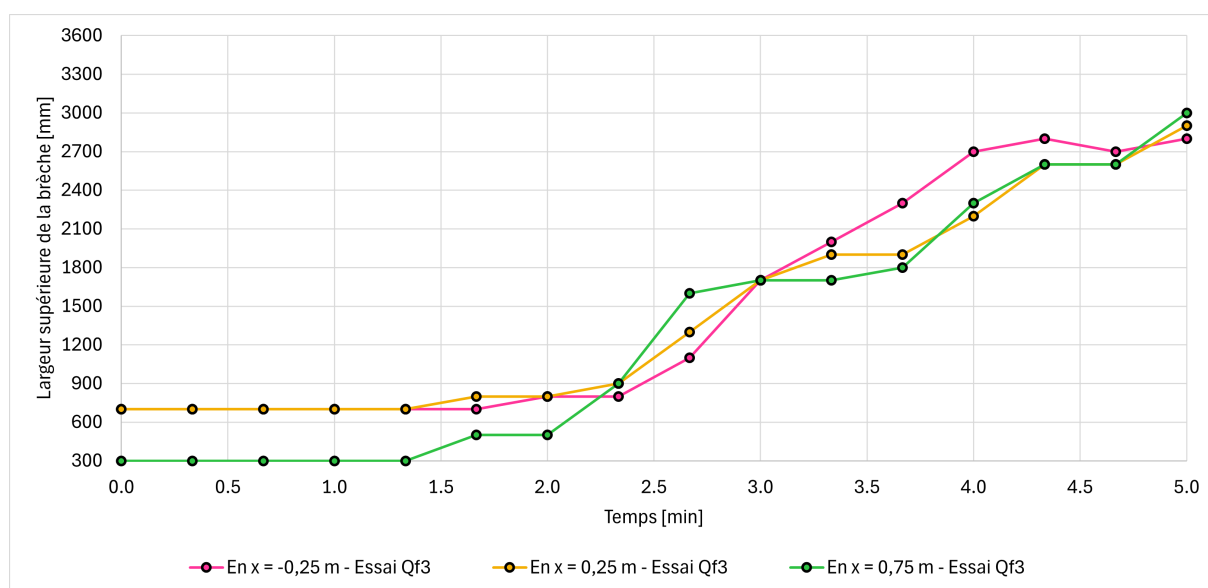


FIGURE 8.15 – Essai **Qf3** : Évolution de la largeur supérieure de la brèche

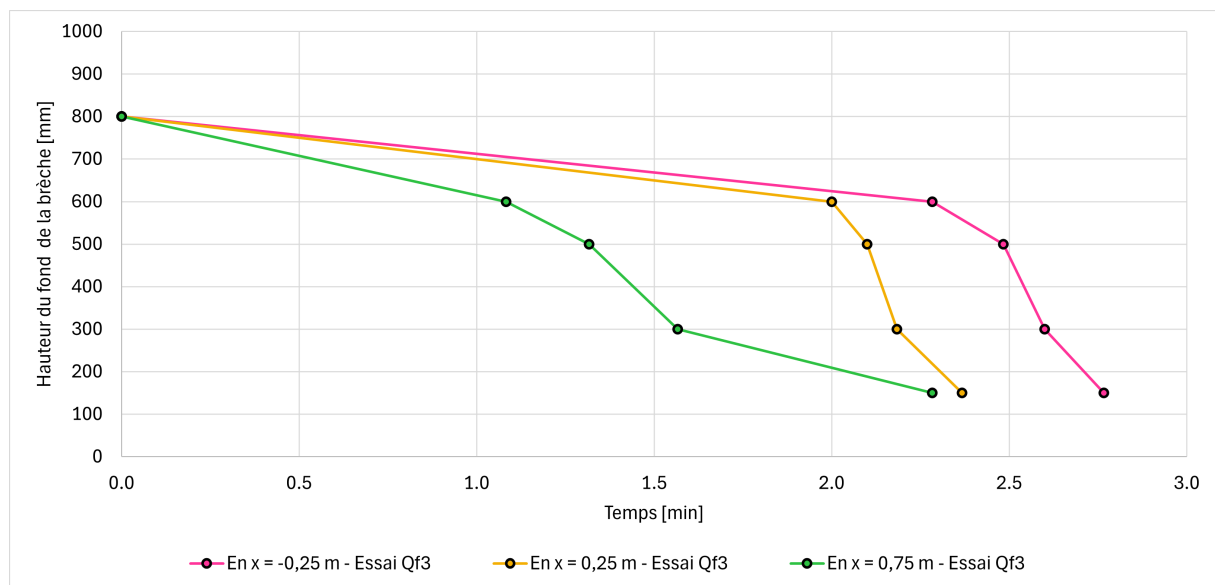


FIGURE 8.16 – Essai **Qf3** : Évolution de la hauteur du fond de la brèche

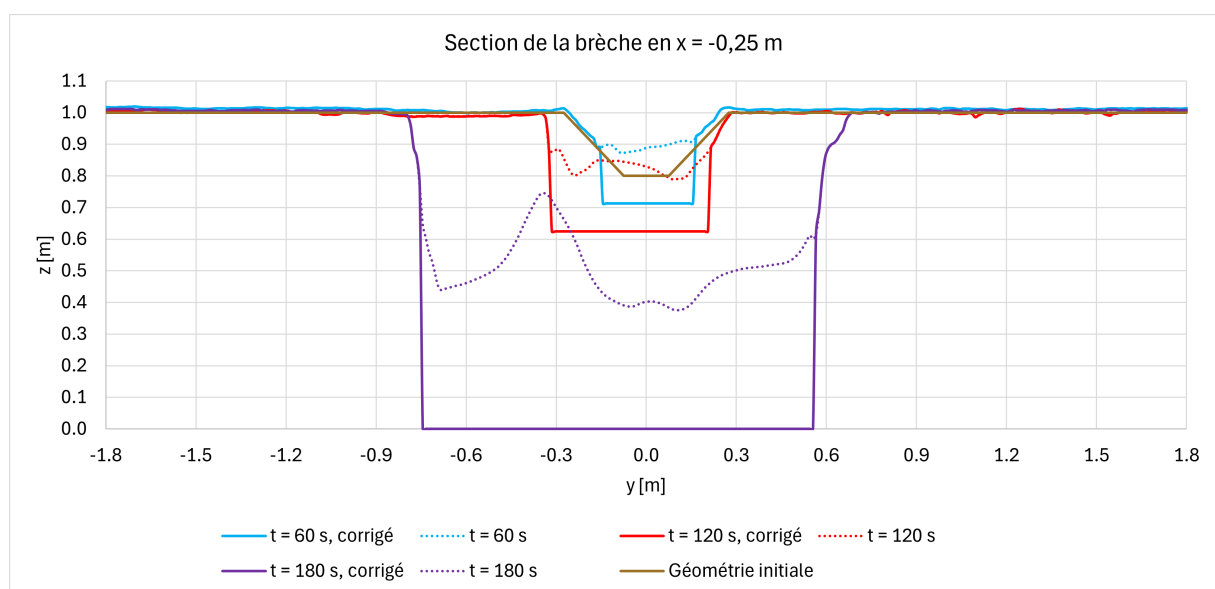


FIGURE 8.17 – Essai **Qf3** : Évolution de la section de la digue en amont de la crête (en $x = -0,25$ m)

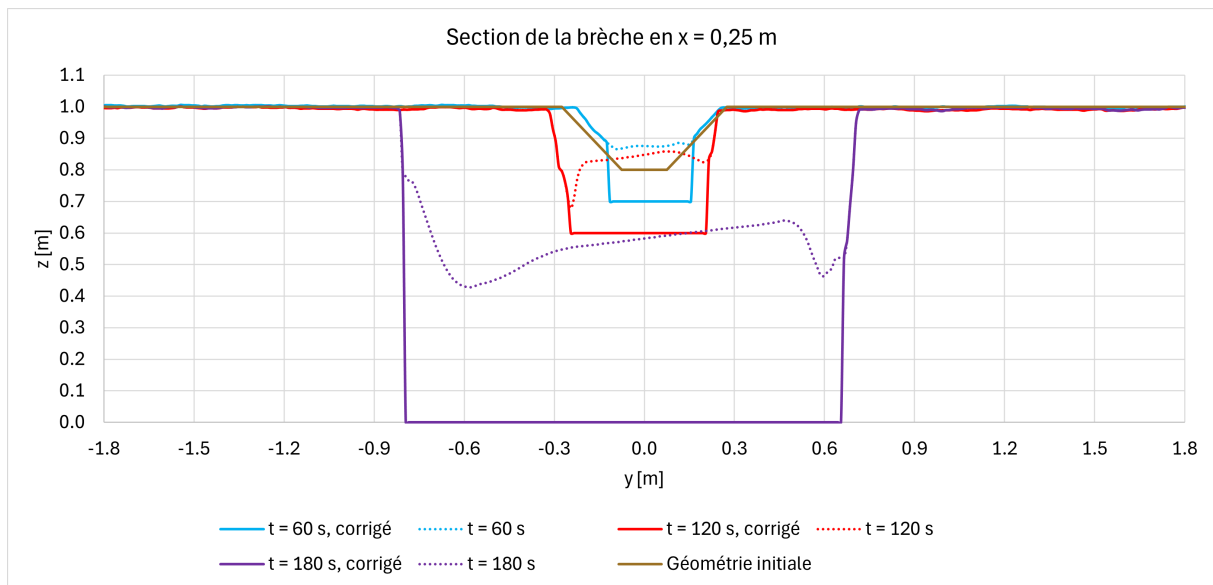


FIGURE 8.18 – Essai **Qf3** : Évolution de la section de la digue en aval de la crête (en $x = 0,25$ m)

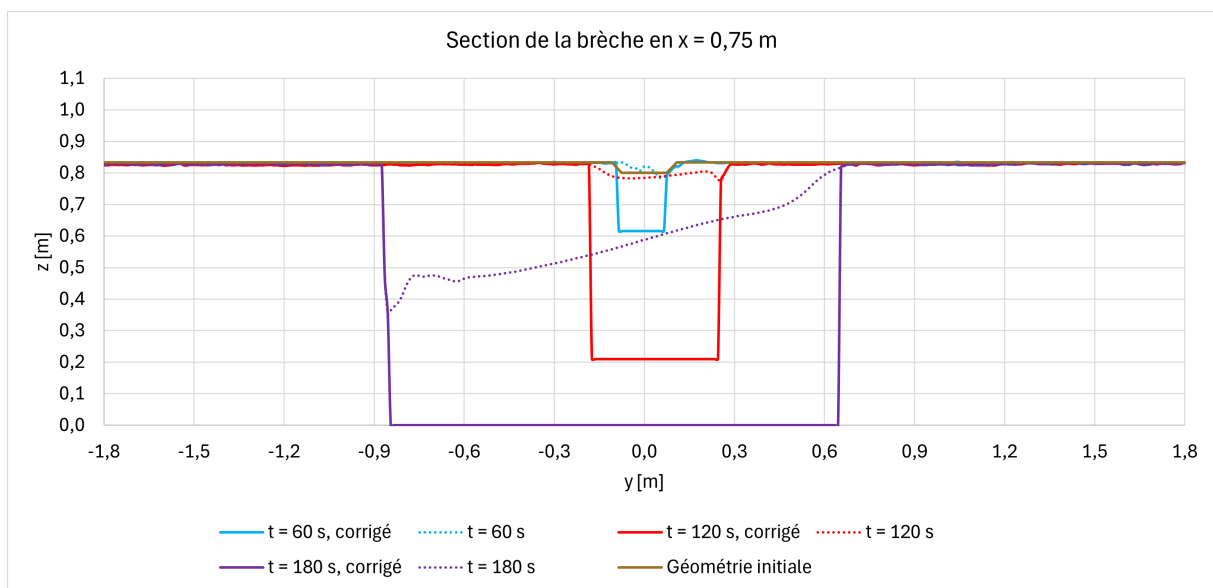


FIGURE 8.19 – Essai **Qf3** : Évolution de la section de la digue sur la pente aval (en $x = 0,75$ m)

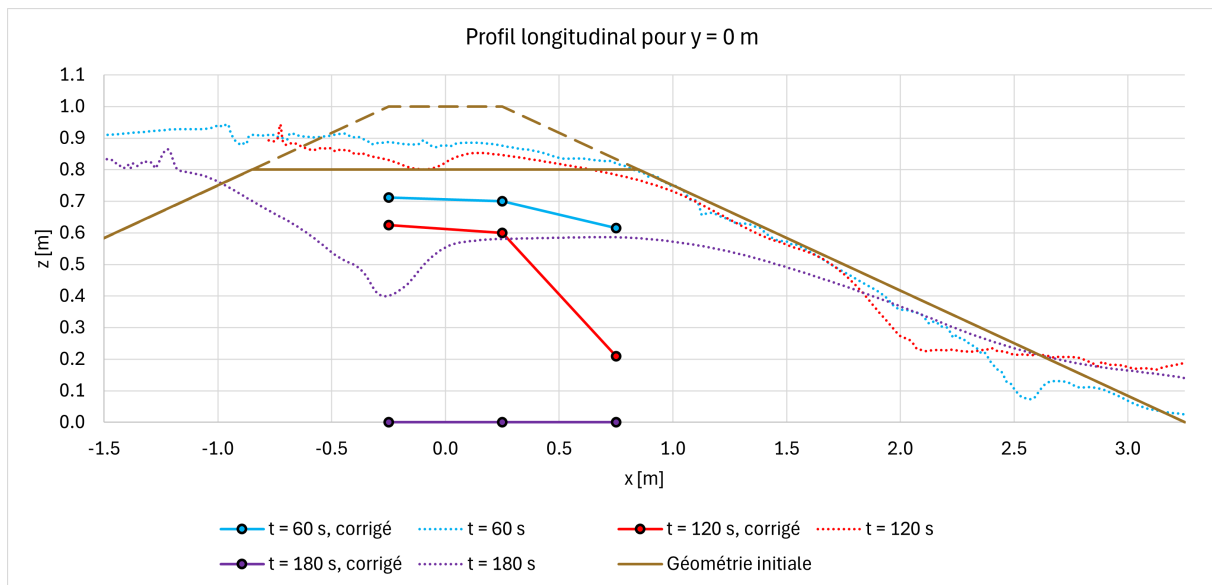


FIGURE 8.20 – Essai **Qf3** : Évolution du profil longitudinal au centre de la digue (en $y = 0$ m)

8.5 Données de l'essai Qf4

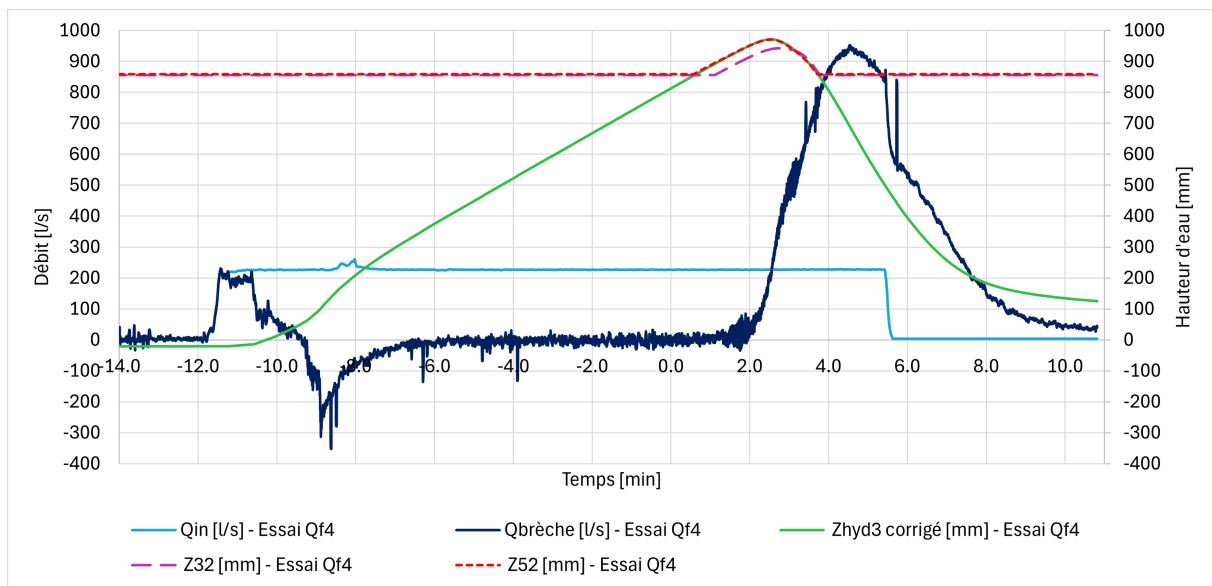


FIGURE 8.21 – Essai **Qf4** : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3} , Z_{32} et Z_{52}) en fonction du temps

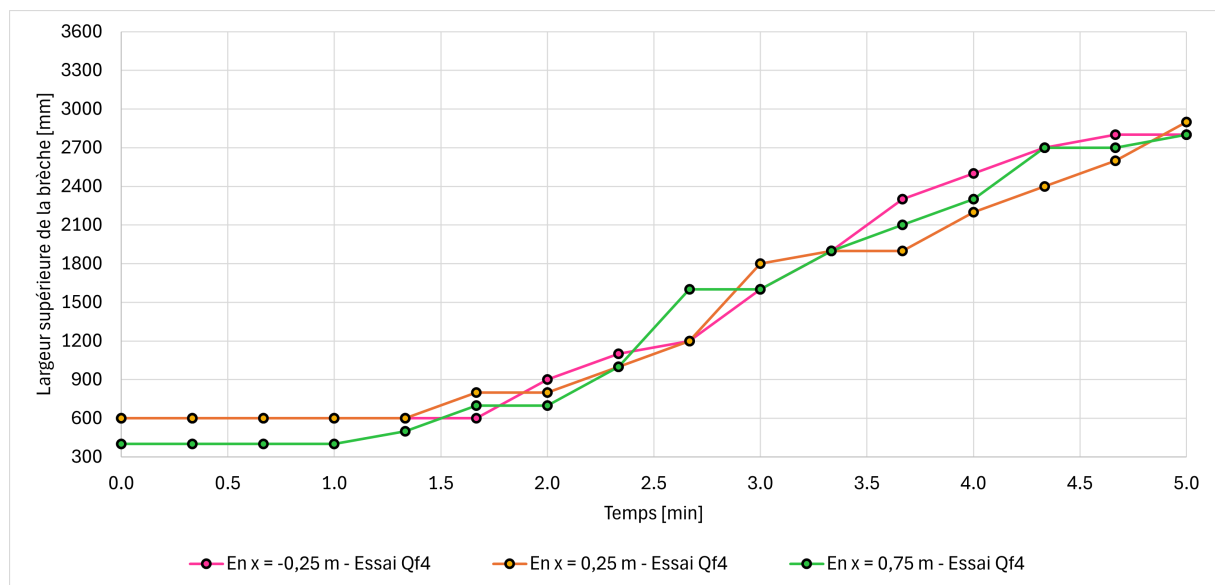


FIGURE 8.22 – Essai Qf4 : Évolution de la largeur supérieure de la brèche

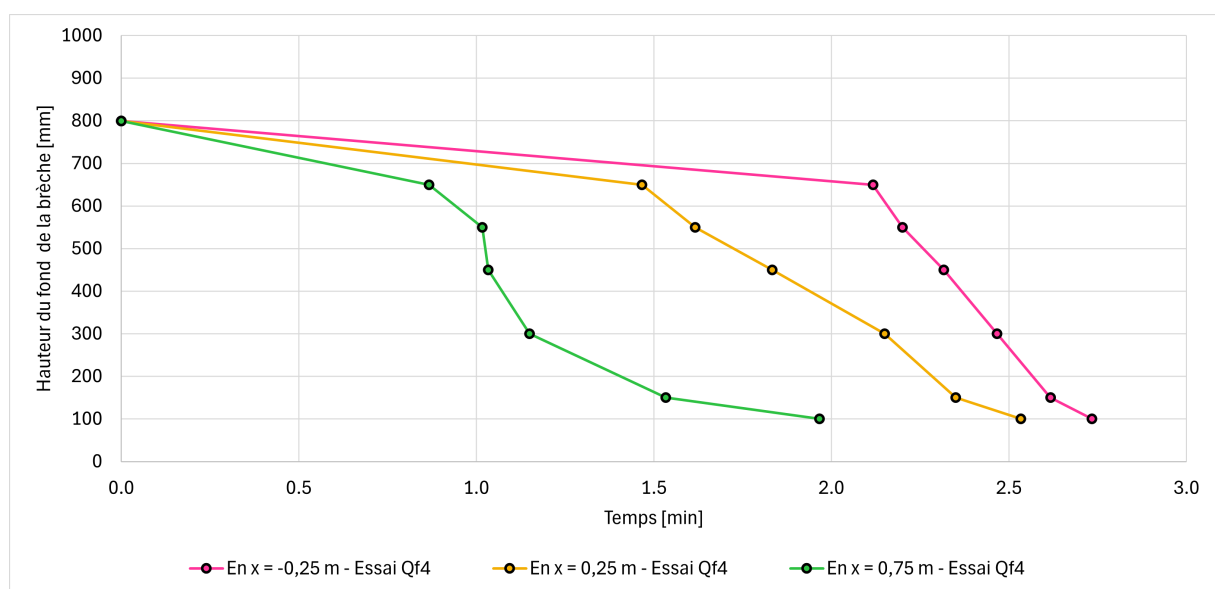


FIGURE 8.23 – Essai Qf4 : Évolution de la hauteur du fond de la brèche

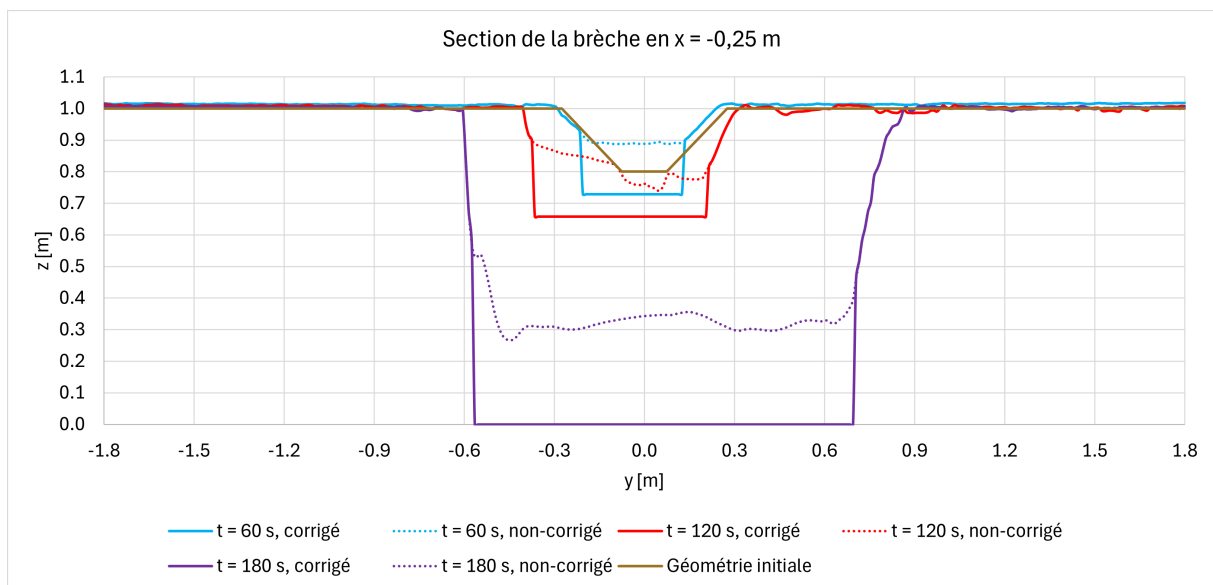


FIGURE 8.24 – Essai **Qf4** : Évolution de la section de la digue en amont de la crête (en $x = -0,25$ m)

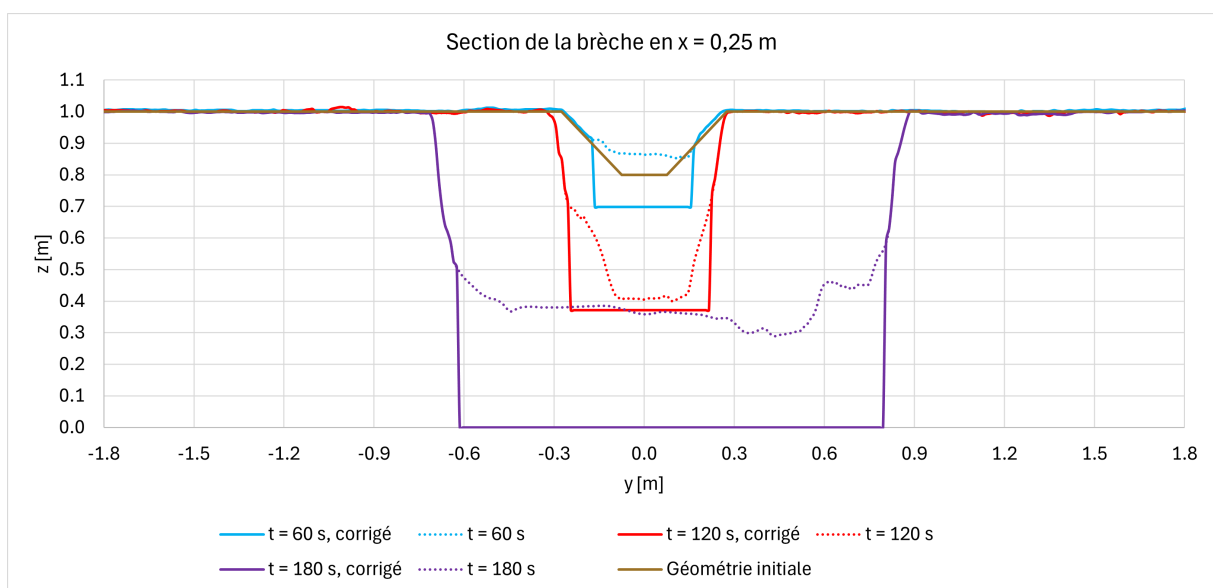


FIGURE 8.25 – Essai **Qf4** : Évolution de la section de la digue en aval de la crête (en $x = 0,25$ m)

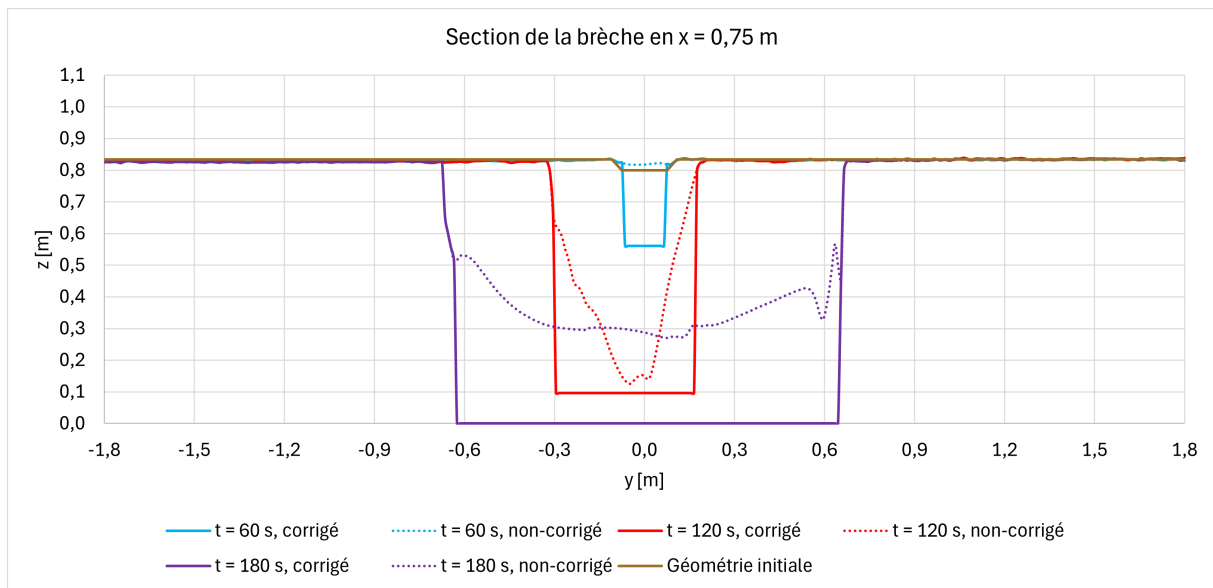


FIGURE 8.26 – Essai **Qf4** : Évolution de la section de la digue sur la pente aval (en $x = 0,75$ m)

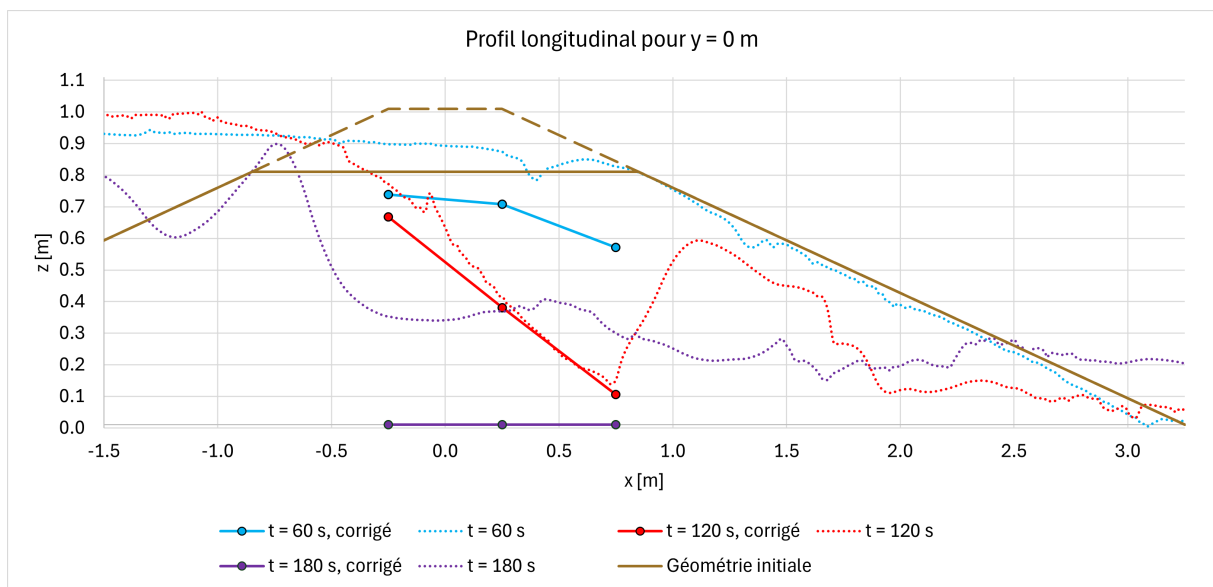


FIGURE 8.27 – Essai **Qf4** : Évolution du profil longitudinal au centre de la digue (en $y = 0$ m)

8.6 Données de l'essai Qm1

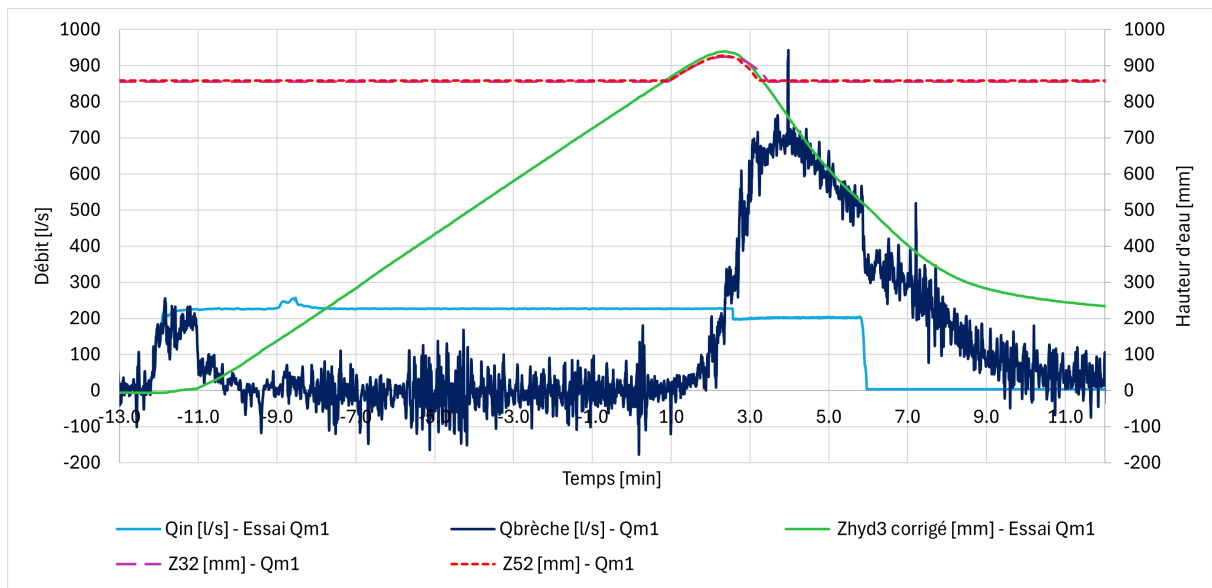


FIGURE 8.28 – Essai **Qm1** : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3} , Z_{32} et Z_{52}) en fonction du temps

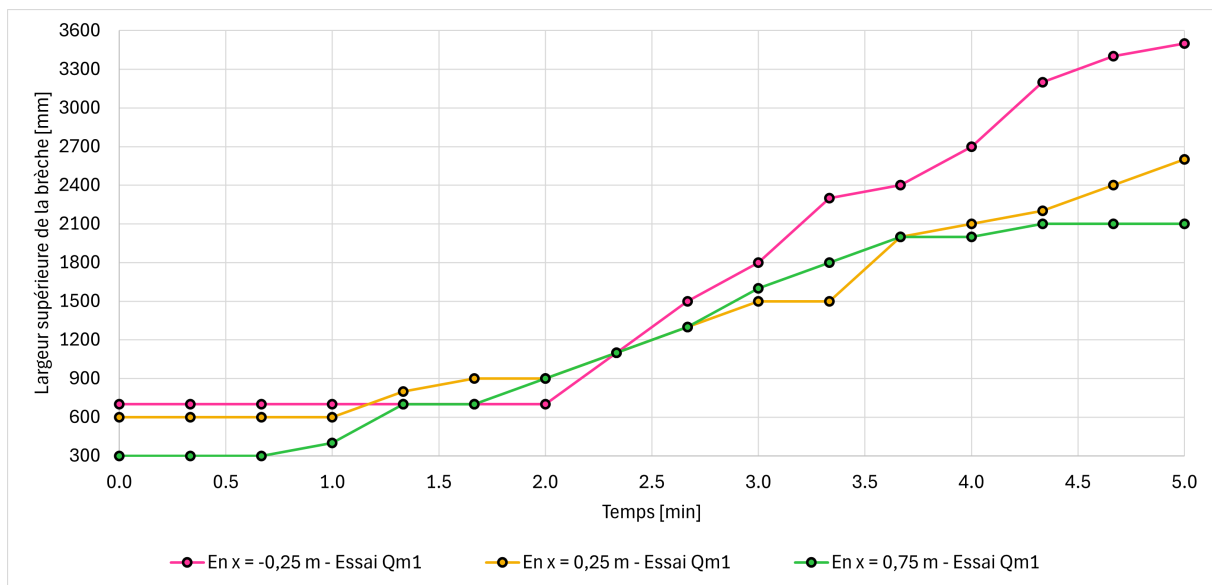


FIGURE 8.29 – Essai **Qm1** : Évolution de la largeur supérieure de la brèche

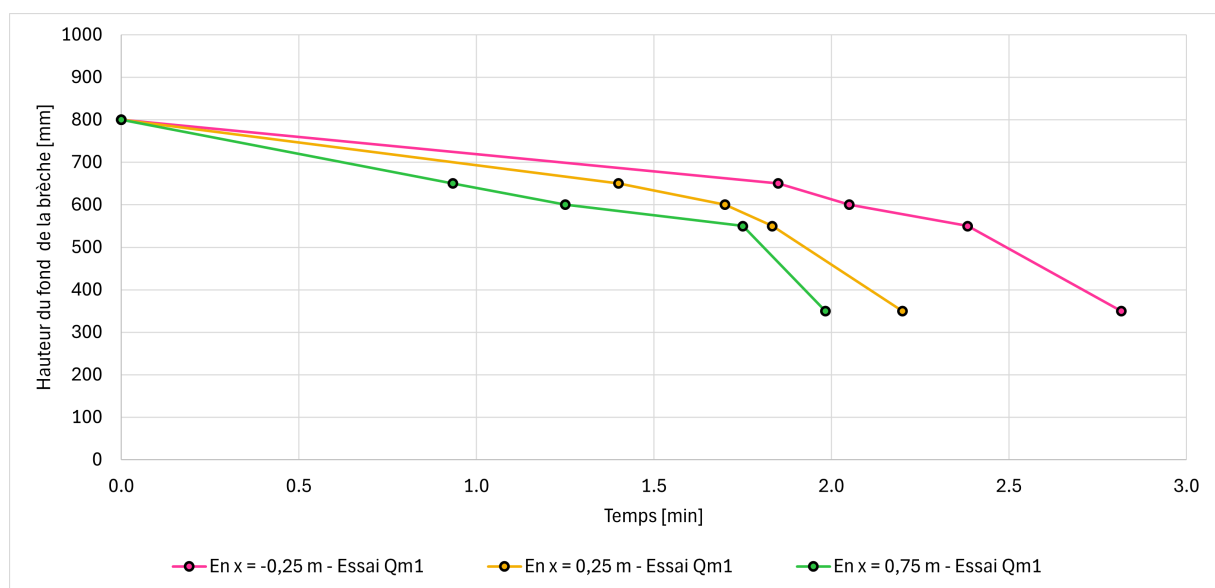


FIGURE 8.30 – Essai **Qm1** : Évolution de la hauteur du fond de la brèche

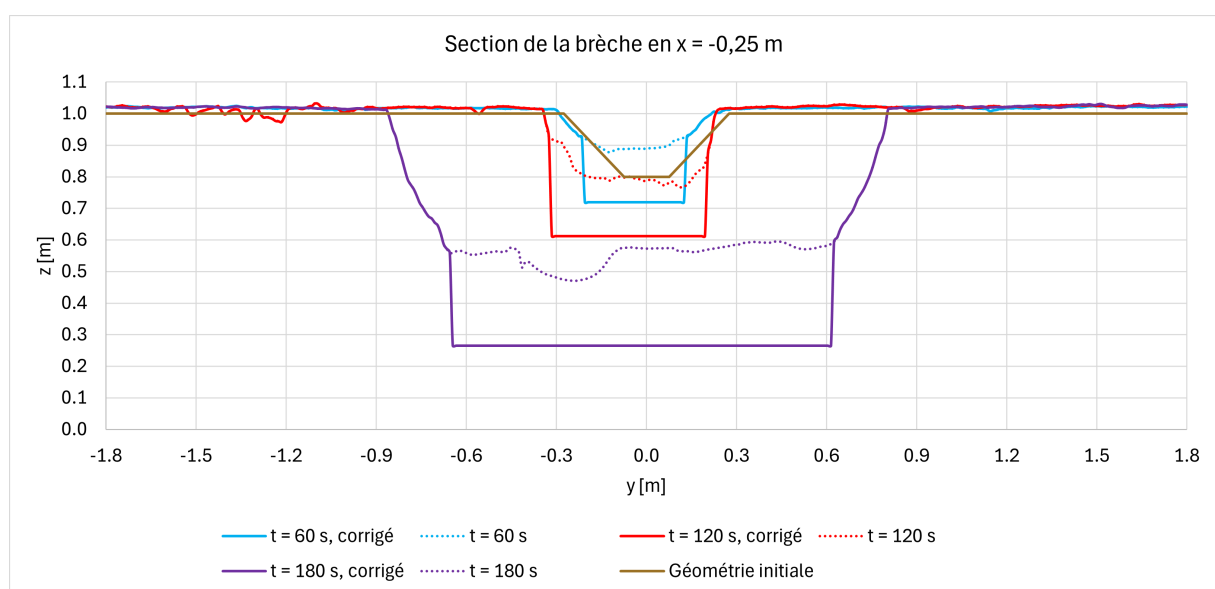


FIGURE 8.31 – Essai **Qm1** : Évolution de la section de la digue en amont de la crête (en $x = -0,25$ m)

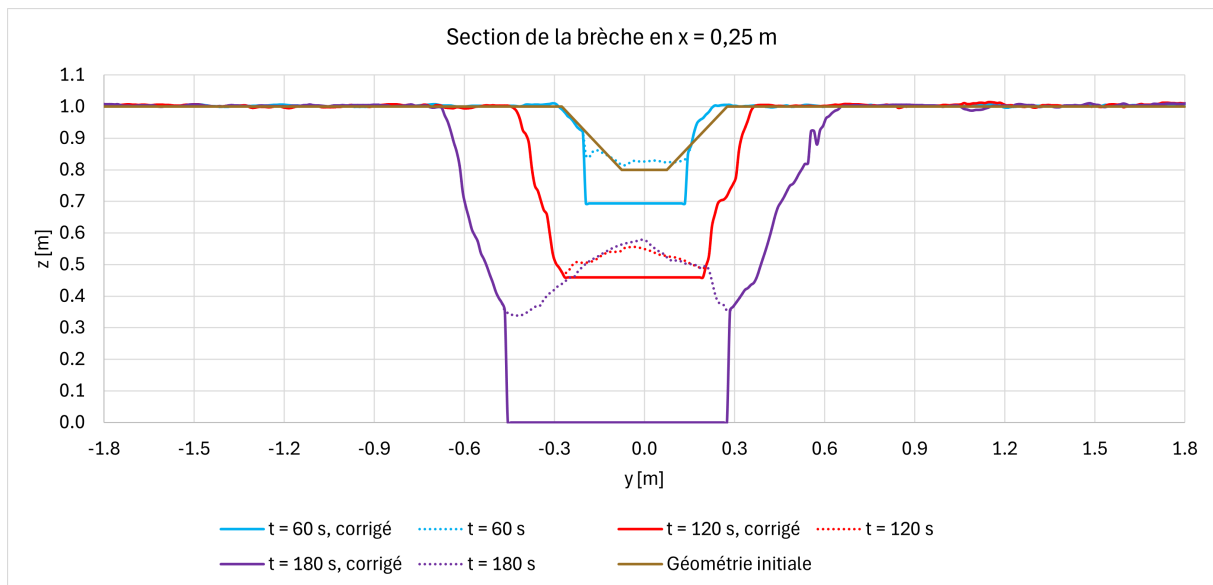


FIGURE 8.32 – Essai **Qm1** : Évolution de la section de la digue en aval de la crête (en $x = 0,25$ m)

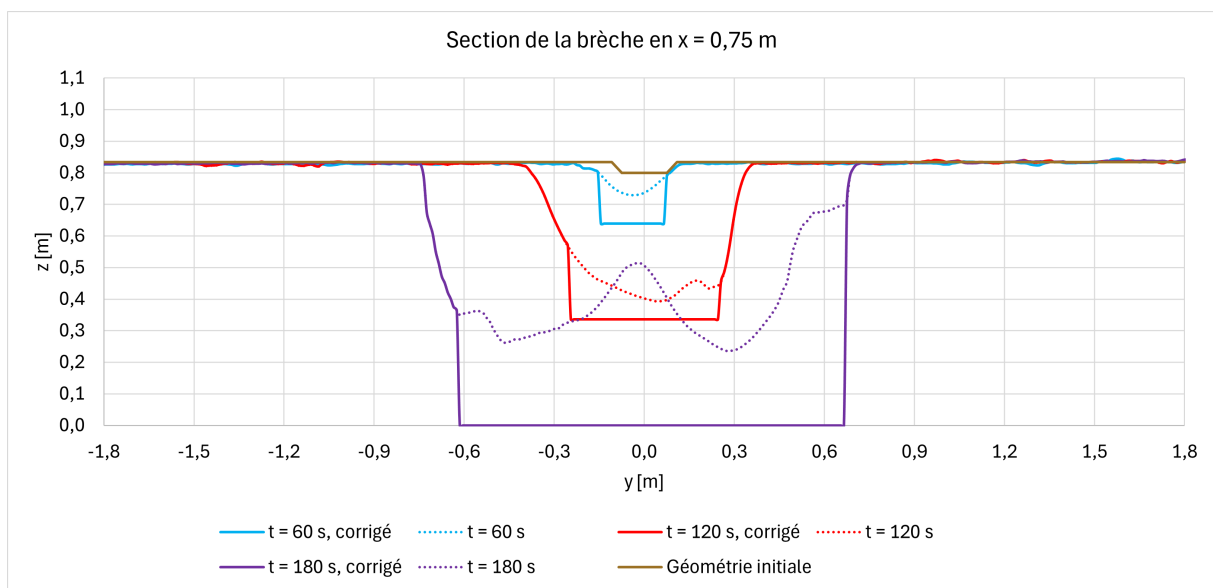


FIGURE 8.33 – Essai **Qm1** : Évolution de la section de la digue sur la pente aval (en $x = 0,75$ m)

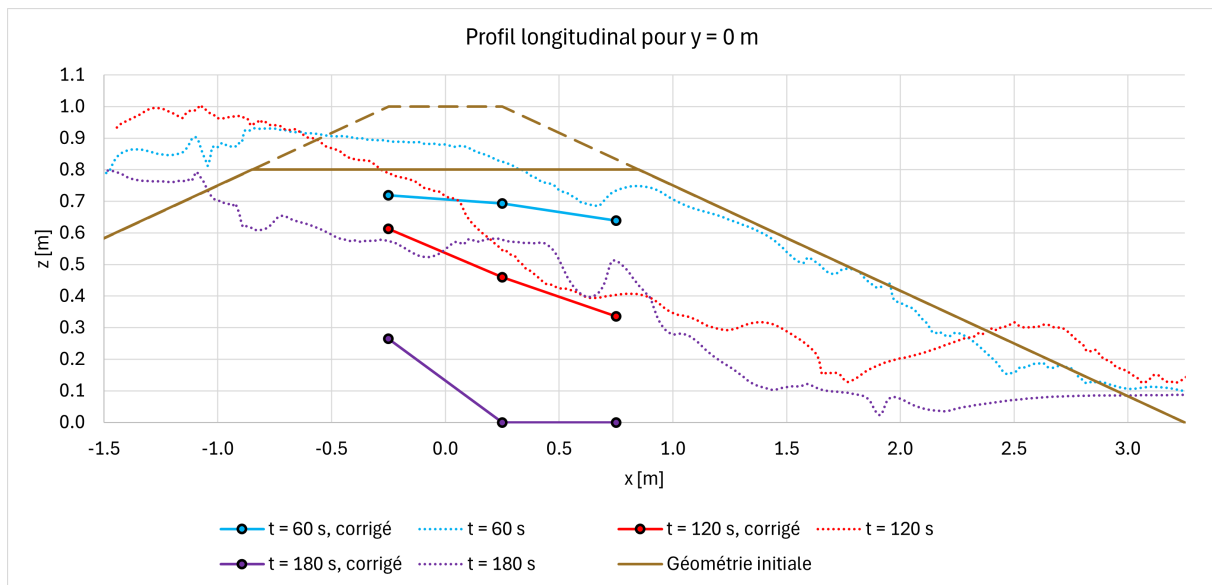


FIGURE 8.34 – Essai **Qm1** : Évolution du profil longitudinal au centre de la digue (en $y = 0$ m)

8.7 Données de l'essai Qm2

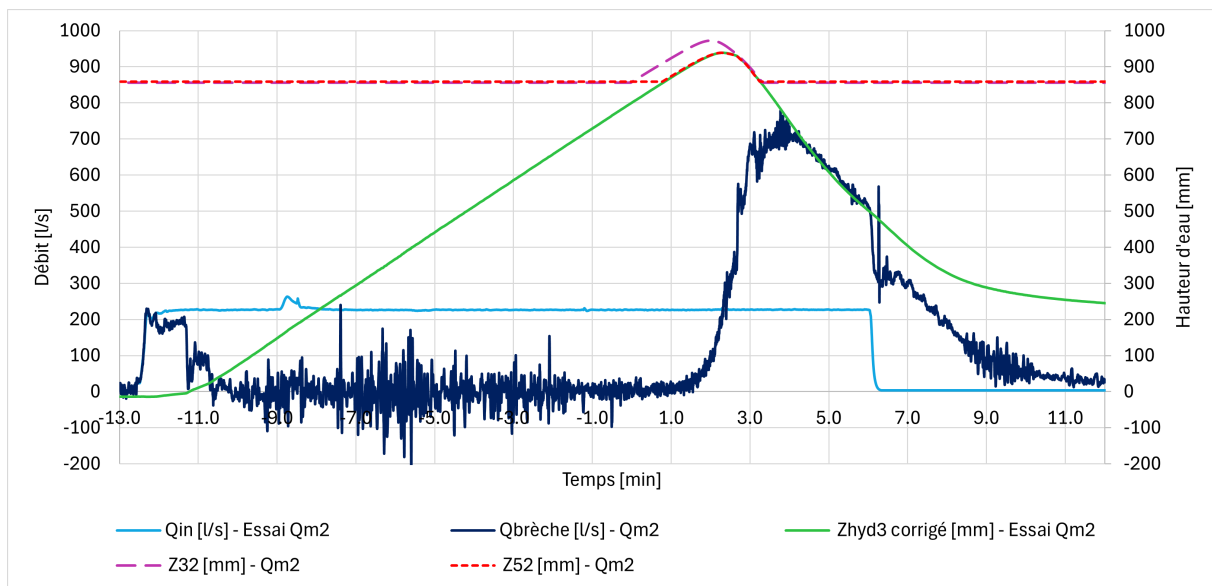


FIGURE 8.35 – Essai **Qm2** : Évolution du débit alimentant le bassin (Q_{in}), du débit passant par la brèche ($Q_{brèche}$) et de la hauteur d'eau dans le bassin (Z_{hyd3} , Z_{32} et Z_{52}) en fonction du temps

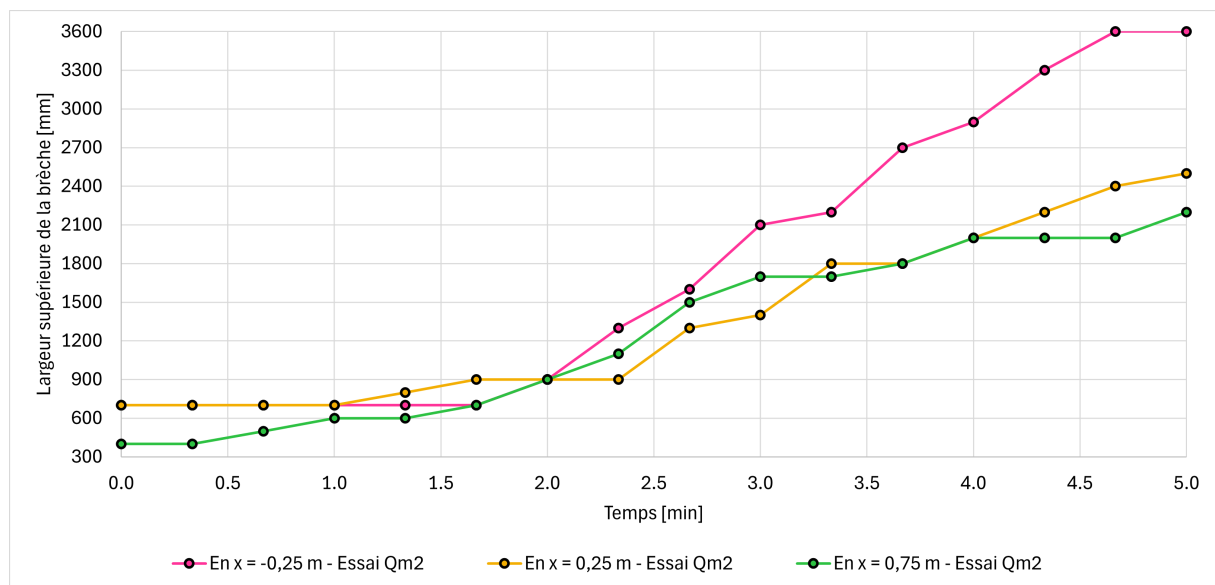


FIGURE 8.36 – Essai **Qm2** : Évolution de la largeur supérieure de la brèche

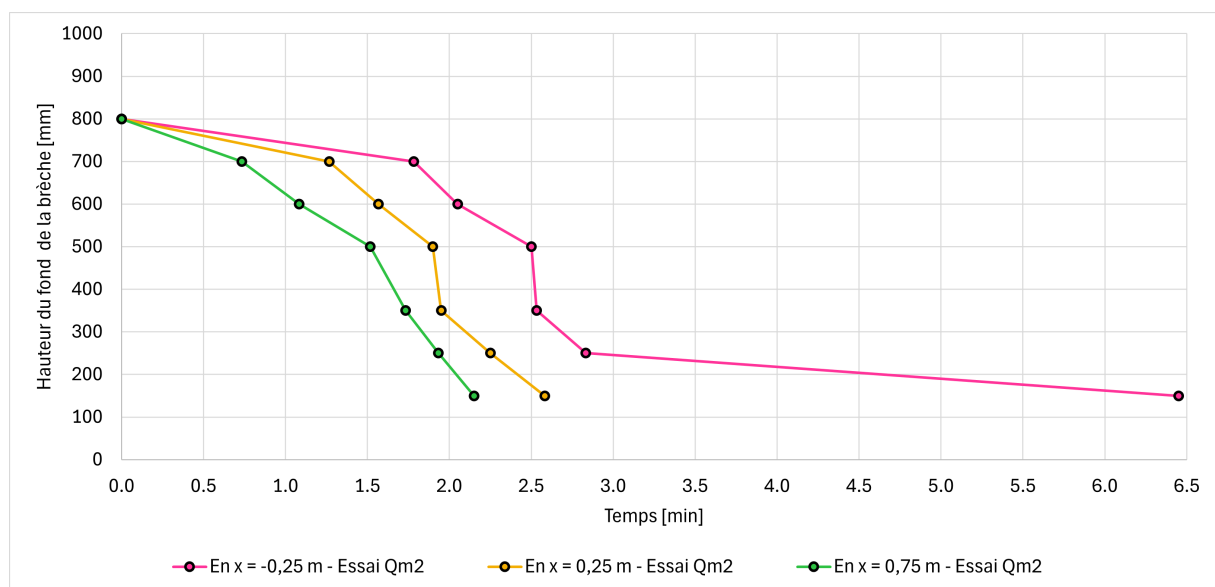


FIGURE 8.37 – Essai **Qm2** : Évolution de la hauteur du fond de la brèche

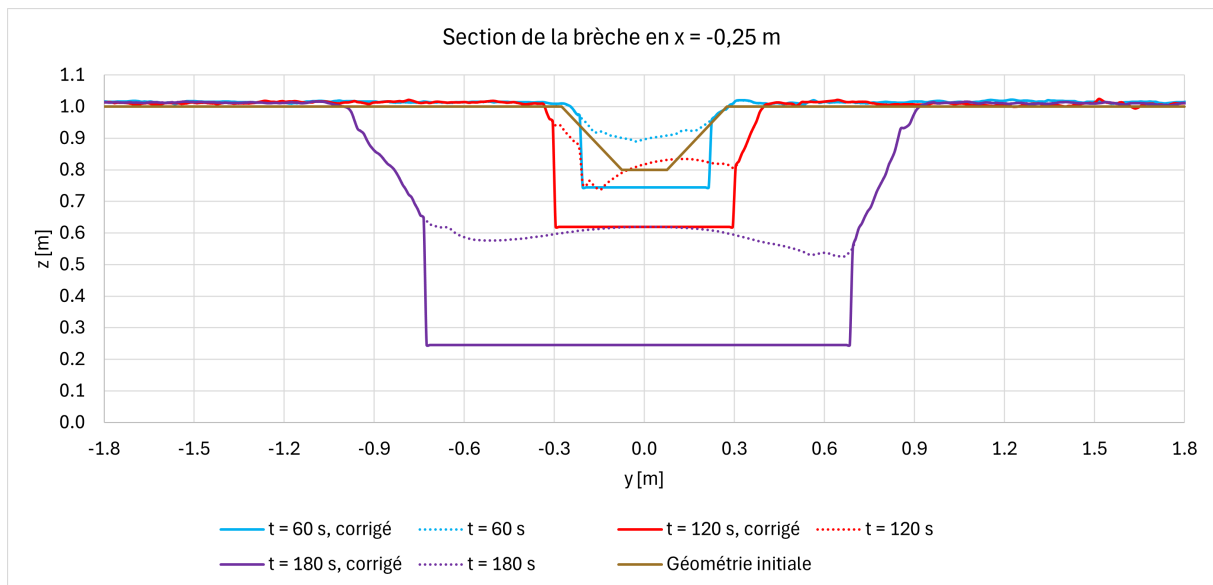


FIGURE 8.38 – Essai **Qm2** : Évolution de la section de la digue en amont de la crête (en $x = -0,25$ m)

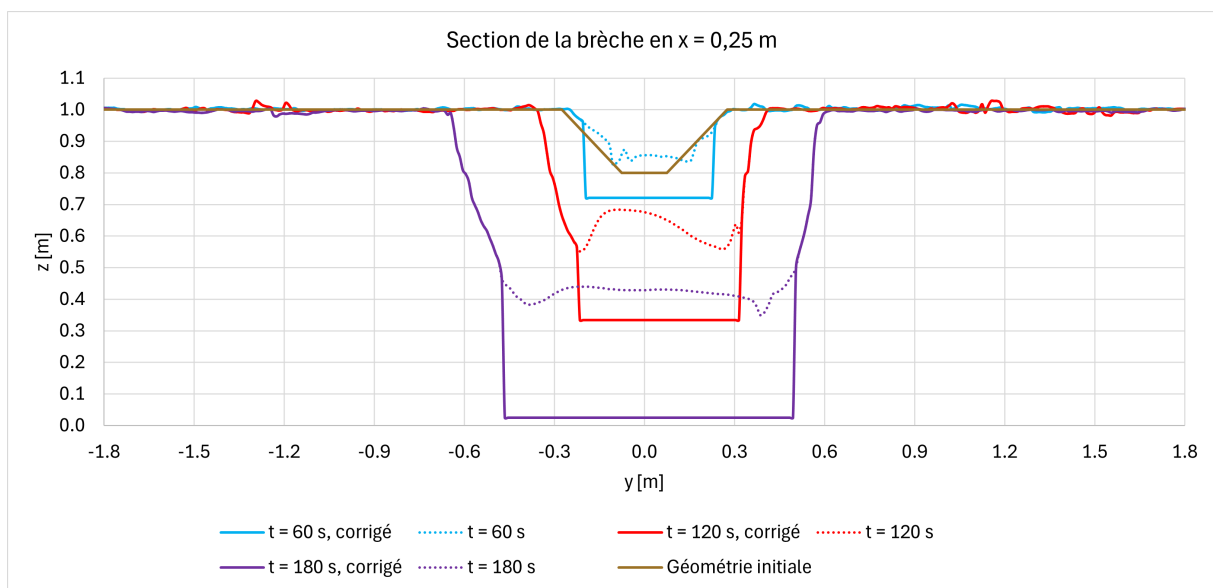


FIGURE 8.39 – Essai **Qm2** : Évolution de la section de la digue en aval de la crête (en $x = 0,25$ m)

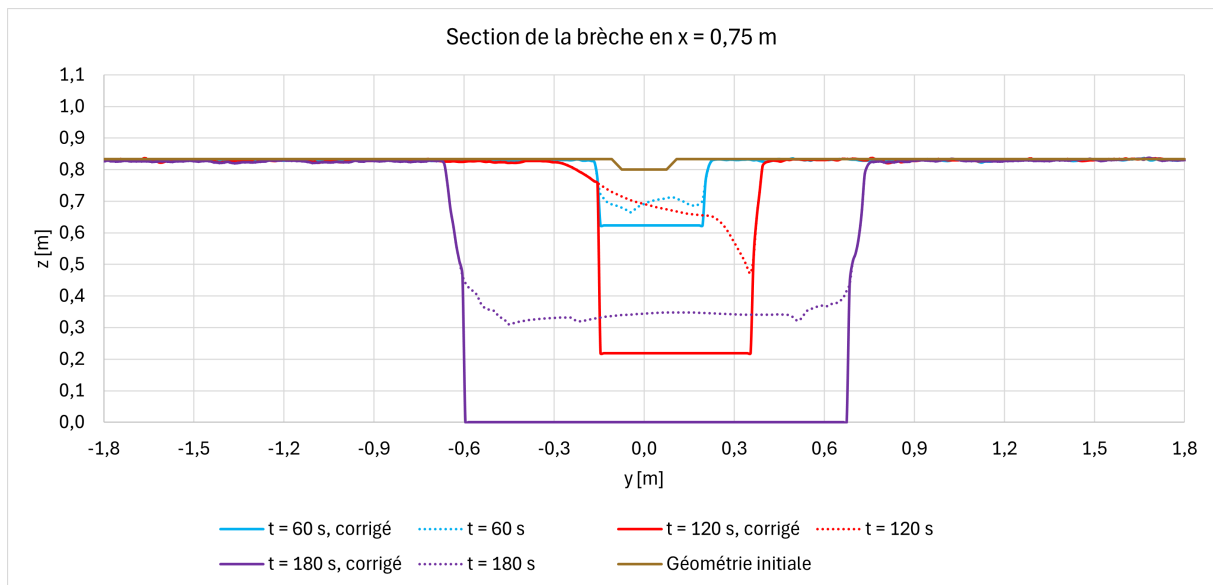


FIGURE 8.40 – Essai **Qm2** : Évolution de la section de la digue sur la pente aval (en $x = 0,75$ m)

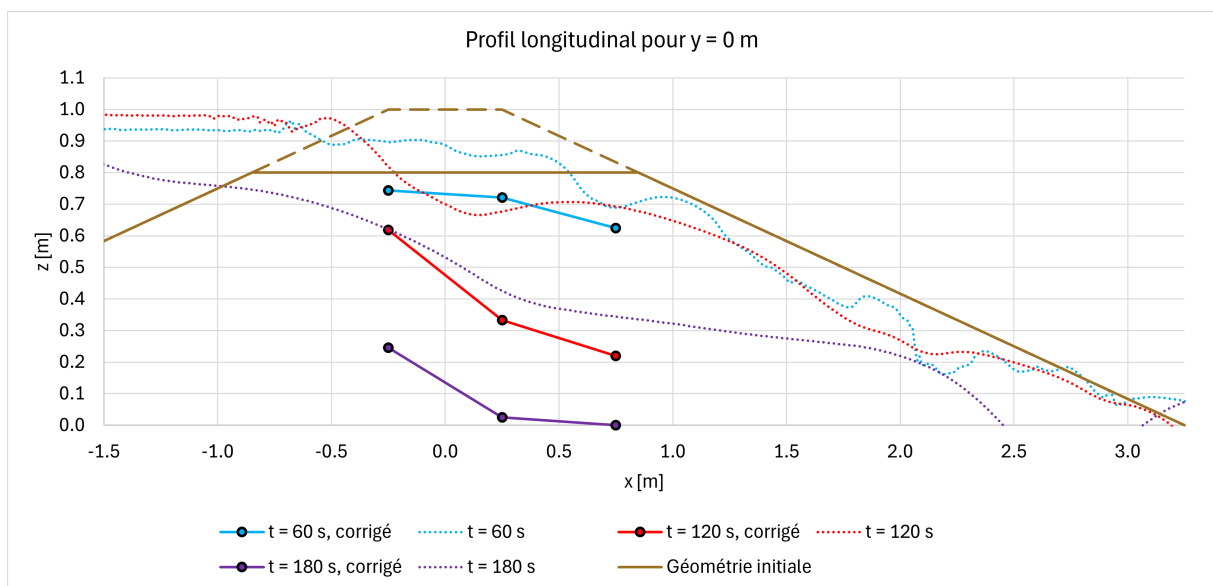


FIGURE 8.41 – Essai **Qm2** : Évolution du profil longitudinal au centre de la digue (en $y = 0$ m)

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

École polytechnique de Louvain

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