

École polytechnique de Louvain

Influence d'une barrière de protection sur la force induite par un écoulement transitoire contre un bâtiment

Auteur: **Mathieu FAUVARQUE**

Promoteur: **Sandra SOARES-FRAZÃO**

Lecteurs: **Didier BOUSMAR, Benjamin DARDENNE, Charles RYCK-MANS**

Année académique 2024–2025

Master [120] : ingénieur civil des constructions

Résumé

En raison du changement climatique, les précipitations deviennent de plus en plus fréquentes et instables. Les risques de crues augmentent ainsi dans de nombreuses régions du monde. Il devient donc primordial de bien comprendre ces phénomènes, ainsi que leurs impacts sur les bâtiments.

Dans ce contexte, ce mémoire étudie l'influence d'une barrière sur un écoulement transitoire, en particulier son impact sur les forces exercées sur un bâtiment situé en aval. L'objectif est de fournir des pistes concrètes pour concevoir des structures capables de mieux résister aux crues, en minimisant les efforts qu'elles subissent afin d'en garantir la stabilité. Dans ce cadre, des essais expérimentaux ont été menés durant l'année académique 2023–2024. Leur analyse statistique met en évidence l'impact de certains paramètres, par exemple la quantité d'eau relâchée et la longueur de la barrière.

Un second objectif de ce travail est d'évaluer la fiabilité de différentes méthodes de calcul des forces exercées par l'écoulement sur un bâtiment, en se basant sur des paramètres hydrauliques issus de simulations numériques. Ces paramètres ont été obtenus à l'aide du code de calcul *Watlab*, qui modélise l'écoulement en deux dimensions. Pour ce faire, une comparaison a été réalisée entre les forces mesurées lors des essais expérimentaux en canal et celles estimées à partir de ces méthodes. Les écarts observés étant faibles, cela suggère que la méthode de calcul employée, combinée aux résultats fournis par le code de calcul *Watlab*, permettent une estimation réaliste des efforts dans le cas d'écoulements transitoires avec obstacles. Cette approche pourrait ainsi être envisagée dans un contexte de prévision des crues.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, je souhaite remercier chaleureusement ma promotrice, Madame Sandra Soares-Frazão, pour son encadrement, ses conseils avisés et son soutien tout au long de ce travail. Sa disponibilité et ses conseils ont été des atouts précieux pour la réussite de ce projet.

Je tiens également à remercier chaleureusement Charles Ryckmans, pour son aide précieuse et ses suggestions pertinentes qui ont grandement contribué à l'avancement de mes recherches.

Je souhaite également remercier l'équipe hydraulique pour leurs précieux échanges qui ont enrichi mes recherches et m'ont permis d'approfondir mes analyses.

Un grand merci à Catherine Rasse pour son assistance dans le domaine des statistiques. Ses conseils et son expertise ont été d'une grande aide pour l'analyse des données faites dans le canal d'essai.

Enfin, je souhaite remercier ma famille et mes amis pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements et leur patience tout au long de ce parcours. Leur présence a été une source de motivation.

Une utilisation responsable d'outils d'intelligence artificielle a été intégrée dans le processus de relecture et d'amélioration rédactionnelle de ce mémoire.

Table des matières

I	Introduction	1
II	État de l’art	7
1	Types d’inondations	7
1.1	Inondations par ruissellement	7
1.2	Inondations par débordement	8
2	Normes actuelles	9
2.1	Recommandation européenne	9
2.2	Wallonie	10
2.3	Ailleurs dans le monde	10
2.3.1	Japon	11
2.3.2	États-Unis	11
2.3.3	Pays-Bas	11
2.4	Normes sur la conception de structures	12
3	Analyse des recherches dans la littérature	12
3.1	Étude expérimentale de Fang et al. (2022)	12
3.1.1	Outils expérimentaux et mesures	13
3.1.2	Résultats principaux	13
3.2	Étude numérique et expérimentale SHIGE-EDA et AKIYAMA [30]	15
3.2.1	Outils et méthodes utilisés	15
3.2.2	Résultats obtenus	16
3.3	Simulation de tsunami dans un parc industriel côtié KIHARA et al. [16]. . .	16
3.3.1	Matériel utilisé	16
3.3.2	Résultats	17
III	Modélisation écoulement et calculs des forces	19
4	Équations de l’écoulement	19
4.1	Hypothèses des équations de Saint-Venants	19
4.2	Équations de Saint-Venant	19
5	Types d’écoulement	20
5.1	Écoulement subcritique	20
5.2	Écoulement supercritique	21
5.3	Profil de l’écoulement	21
6	Forces	24
6.1	Forces hydrostatique	24
6.2	Forces hydrodynamique	25

7	Application à un écoulement transitoire	27
7.1	Phase 1 : Impact	27
7.2	Phase 2 : Force maximale locale	27
7.3	Phase 3 : Phase transitoire	28
7.4	Phase 3b : Déviation du flux	28
7.5	Phase 4 : État quasi-permanent	28
7.6	Phase Permanente	28
IV	Essais en laboratoire	29
8	Représentation du laboratoire	29
8.1	Paramètres de l'expérimentation	31
8.1.1	Différence de hauteur initiale	31
8.1.2	Distance entre la boîte et la barrière	32
8.1.3	Porosité de la barrière	32
8.1.4	Longueur de la barrière	32
9	Matériel utilisé	32
9.1	Mesures hauteurs	32
9.2	Mesures pressions	33
9.2.1	Grande face	34
9.2.2	Petite face	35
10	Résultats	36
10.1	Vérifications des résultats	36
10.2	Les 3 essais analysés	37
10.2.1	Hauteurs mesurées	38
10.2.2	Forces calculées	40
10.3	Influence des différents paramètres	43
10.3.1	Validation du modèle statistique <i>JMP</i>	44
10.4	Analyse du modèle statistique <i>JMP</i>	46
10.5	Comparaison des résultats avec une autre étude	51
10.6	Comparaison avec un écoulement permanent	52
V	Simulations numériques	53
11	Watlab	53
12	Maillage	53
12.1	Conditions frontières et conditions initiales	53
12.2	Taille caractéristique du maillage	54
13	Analyse des hauteurs d'eau aux jauges	56
14	Déterminer les forces	58
14.1	Méthode 1 : Avec le bâtiment dans le maillage	58

14.2	Méthode 2 : Sans le bâtiment dans le maillage	59
14.2.1	Coefficient de résistance C_r	59
14.2.2	Vérifier l'équilibre de l'écoulement	60
14.2.3	Avantages et inconvénients	63
14.3	Comparaison des méthodes numériques pour obtenir la force totale	63
14.4	Force d'impact	66
14.4.1	Coefficient d'inertie C_m	66
15	Influence de la barrière	66
16	Influence de la différence de hauteur initiale	68
17	Analyse du nombre de Froude	69
17.1	Influence des barrières sur le nombre de Froude	70
17.1.1	Analyse de la vitesse	74
17.2	Lien entre le nombre de Froude et la force	75
VI	Conclusion	81

Table des figures

0.1	Évolution du nombre de jours d'été avec des fortes précipitations à Uccle IRM [13]	1
0.2	Évolution des quantités de précipitations mensuelles depuis 1961 à Uccle [12]	2
0.3	Évolution de l'augmentation de l'artificialisation des sols en Wallonie (Bel- gique) LORQUET et al. [22]	3
0.4	Impact des crues sur les bâtiments <u>Le Soir</u> [20] <u>L'avenir</u> [17]	4
1.1	Inondations par ruissellement PPRI-YON [24]	7
1.2	Exemples d'inondations par ruissellement	8
1.3	Inondations par débordement PPRI-YON [24]	8
1.4	Inondation par débordement (Meuse) [21]	9
2.1	Maisons flottantes IDEAT [11]	11
3.1	Représentation du canal d'essai [5]	13
3.2	Force et moment mesuré sur la boîte avec différentes hauteurs d'eau lâchée (les cercles marquent la fin de la phase d'impulsion et le début de la phase de montée) FANG et al. [5]	14
3.3	Représentation du canal utilisé pour les essais [30]	15
3.4	Coupe du canal d'essais	17
3.5	Visualisation des boîtes mises comme obstacle à l'écoulement	17
5.1	Évolution des hauteurs caractéristiques en fonction de la pente [31]	23
5.2	Différents profils de hauteur d'eau [31]	23
5.3	Ressaut hydraulique [31]	24
6.1	Représentation des forces hydrostatiques [19]	25
6.2	Représentation des forces hydrodynamiques [7]	26
7.1	Photo prise lors d'un essai	29
8.1	Vue en plan du laboratoire d'essai	30
8.2	Différentes coupes du laboratoire d'essai (les cotes sont en mètres)	30
8.3	Représentation du canal d'expérimentation avec la boîte et une barrière (les côtes sont en mètres)	31
8.4	Illustration de la différence de hauteur initiale	31
9.1	Positions Baumers dans le canal	33
9.2	Placement des capteurs de pressions sur la boîte (les côtes sont en mètres)	34
9.3	Exemple de pressions prises en compte en fonction des 3 pressions mesurées	35
10.1	Zoom du plan du canal avec la configuration des barrières pour les 3 essais (les côtes sont en mètres)	38
10.2	Hauteurs mesurées aux jauges en laboratoire	39
10.3	Photos de l'évolution du ressaut hydraulique dans l'essai : $\Delta H = 400mm$.	40
10.4	Forces expérimentales des 3 essais analysés	41
10.5	Comparaison des hauteurs d'eau sur la face avant de la boîte à 2 moments clés	43
10.6	Comparaison forces mesurées et prévues	44
10.7	Résidus du modèle <i>JMP</i>	44
10.8	Avec un ΔH de 200 mm	48
10.9	Avec un ΔH de 400 mm	49
10.10	Comparaison forces mesurées et prévues avec la nouvelle variable L_{eff} . . .	50

12.1 Conditions frontières et initiales dans le maillage	54
12.2 Force numérique sur les faces avant en fonction de la taille du maillage autour de la boîte	55
12.3 Impact du raffinement du maillage autour de la barrière	56
12.4 Exemple de maillage final utilisé	56
13.1 Comparaison des hauteurs mesurées dans le canal avec celles obtenues nu- mériquement	57
14.1 Droite 1 sur laquelle l'analyse d'équilibre est faite	60
14.2 Évolution dans le temps du débit et du nombre de Foster sur la droite 1 . .	61
14.3 Évolution temporelle du débit à la porte pour un ΔH de 300 mm	62
14.4 Comparaison des méthodes pour obtenir la force totale sur la boîte	65
15.1 Influences des barrières lors des différents tests réalisés	67
16.1 Configuration de la barrière pour l'analyse de l'influence du ΔH	68
16.2 Influence du ΔH sur les essais avec ou sans barrière	69
17.1 Exemple de maillage utilisé pour obtenir le nombre de Froude	70
17.2 Influence de la barrière sur le nombre de Froude	71
17.3 Droite sur laquelle le nombre de Froude est calculé	72
17.4 Analyse du nombre de Froude sur la droite [17.3] à différents moments . .	73
17.5 Données de la simulation numérique après 13.6 secondes	74
17.6 Carte de vitesse à différents moments de l'écoulement	74
17.7 Comparaison de l'évolution de la force et du nombre de Froude	76
17.8 Visualisation des phases pour le cas de l'essai avec $\Delta H=300\text{mm}$	77
17.9 Lien entre le nombre de Froude et la force	78
17.10 Avec une longueur de barrière faible	85
17.11 Avec une longueur de barrière élevée	86
17.12 Analyse du nombre de Froude sur la droite [17.3] à différents moments pour l'essai avec un ΔH de 200 mm [10.1a]	87
17.13 Analyse du nombre de Froude sur la droite [17.3] à différents moments pour l'essai avec un ΔH de 300 mm [10.1b]	88

Liste des tableaux

0.1	Chiffres sur les crues de Lièges 2021 et Valences 2024 RTBF [27]WIKIPÉDIA [33]	3
9.1	Positions des sondes Baumer	33
10.1	Paramètres du test de répétabilité	36
10.2	Données des tests de répétabilités	37
10.3	Indicateurs statistiques des tests de répétabilités	37
10.4	Données des 3 essais analysés	37
10.5	Configuration des essais dont la force maximale n'est pas atteinte lors de l'impact	42
10.6	Paramètres des essais de validation du modèle	45
10.7	Comparaisons des valeurs mesurées et prédites	45
10.8	Plages de valeurs des essais en laboratoire	45
10.9	p-values des différents paramètres	47
10.10	p-values des différents paramètres du deuxième modèle avec L_{eff}	51
12.1	Comparaison du nombre d'éléments et du temps de calcul en fonction de la taille du maillage autour de la boîte	55
14.1	Périodes d'équilibre et coefficients de résistance mesurés pour chaque essai	63
15.1	Comparaison des forces maximales avec et sans barrière pour les 3 essais analysés en laboratoire	67
16.1	Comparaison des forces maximales avec et sans barrière pour 3 tests numériques avec des ΔH différents	68

Première partie

Introduction

En Belgique et partout dans le monde, le changement climatique est un problème majeur de ces dernières années. Un des nombreux effets du changement climatique est l'augmentation des précipitations, ainsi que des pics de précipitations beaucoup plus importants auxquels les villes ne sont pas adaptées (constructions faites en bords de cours d'eau, ruissellement important, réseaux d'égout trop petit, forces de l'eau pas prises en compte lors de la construction, etc.). La Figure [0.1] illustre l'évolution du nombre de jours avec des fortes pluies à Uccle (un jour est considéré comme un jour avec des fortes précipitations si celles-ci sont supérieures à 20mm). A titre d'illustration, il y a en moyenne 837 mm de précipitation par an à Uccle. Une augmentation nette du nombre de jour de précipitations est visible à partir des années 1990 et les scientifiques tendent à prédire que ce nombre de jours va encore augmenter dans les années à venir. En plus du nombre de jours avec des fortes précipitations qui augmente, l'intensité moyenne de ces fortes précipitations augmente également d'après les données de l'IRM [12].

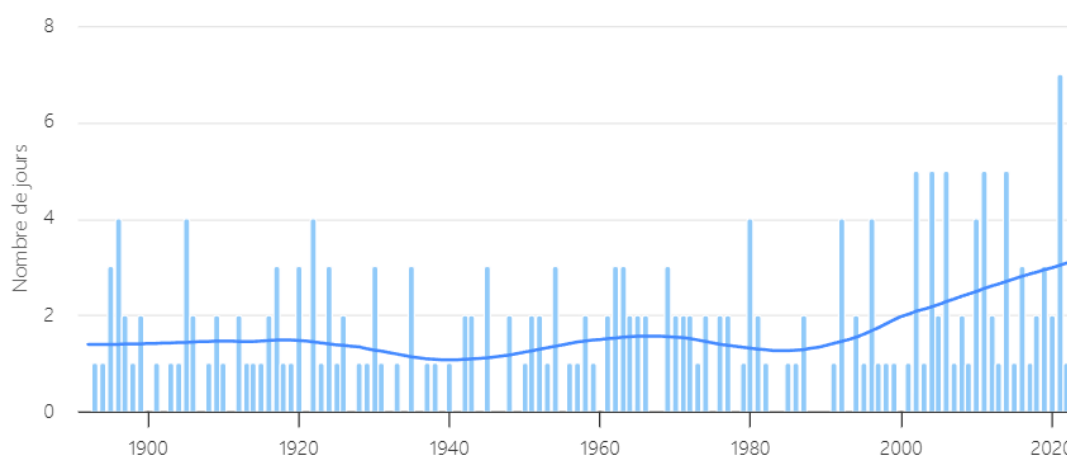


FIGURE 0.1 – Évolution du nombre de jours d'été avec des fortes précipitations à Uccle IRM [13]

Des périodes de fortes pluies sont donc de plus en plus présentes, mais ce changement climatique crée également des périodes de sécheresse. Voici à la Figure [0.2], l'évolution des quantités de précipitation par mois, ainsi que ces variations depuis 1961.

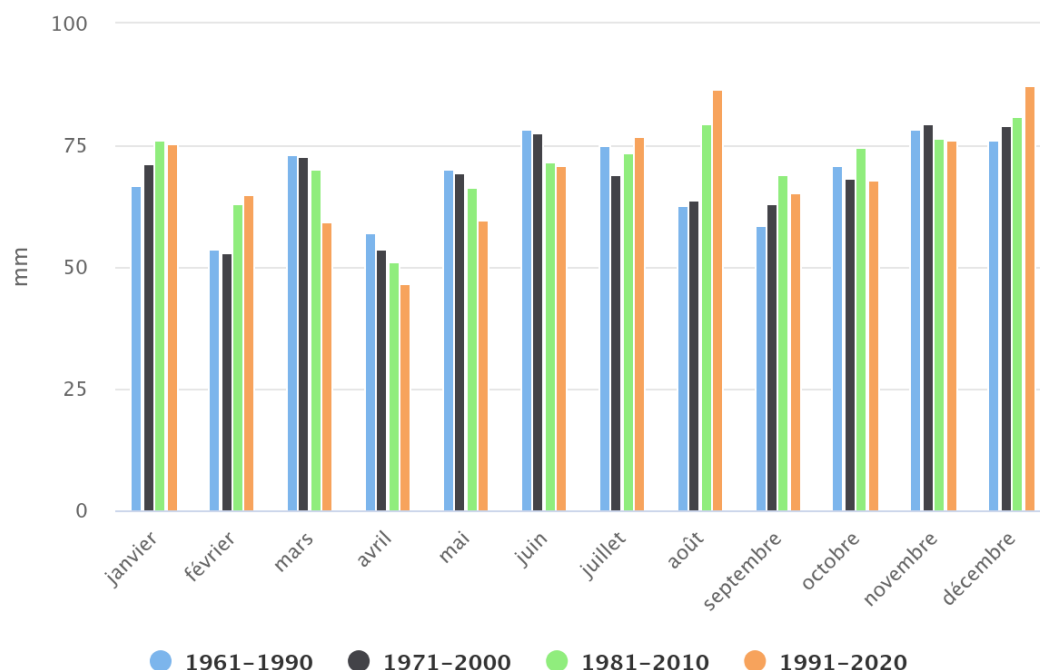


FIGURE 0.2 – Évolution des quantités de précipitations mensuelles depuis 1961 à Uccle [12]

Ce graphique montre que lors de certains mois, les précipitations sont de plus en plus élevées comme en janvier, août et décembre. D'autres mois quant à eux subissent de moins en moins de précipitations comme les mois de mars à juin par exemple. Cette période avec moins de précipitations crée certaines années des sécheresses assez importantes.

Outre les précipitations qui deviennent de moins en moins stables, la proportion de sol artificiel augmente et empêche l'eau de s'infiltrer dans le sol, cette eau ruisselle donc directement vers les cours d'eau sans être stockée dans les nappes souterraines, causant ainsi des crues de plus en plus importantes et dévastatrices. Empêcher l'infiltration crée également un autre problème qui est l'assèchement de certaines nappes souterraines.

Il est tout de même important de noter que pour limiter les inondations et l'assèchement des nappes, l'Europe a tendance à contrer ce phénomène, l'augmentation de l'artificialisation des sols a donc tendance à diminuer. La commission européenne s'est donné comme objectif de stopper toute augmentation nette d'artificialisation des sols d'ici 2050 [26].

La Figure suivante [0.3] montre bien l'évolution du nombre de km^2 artificialisé chaque année en Wallonie (Belgique) qui est dans la bonne voie pour respecter l'objectif européen de $0 km^2/an$ en 2050. Ces résultats sont obtenus en Wallonie en réduisant les nouvelles terres artificialisées mais également en désartificialisant des terres artificialisées.

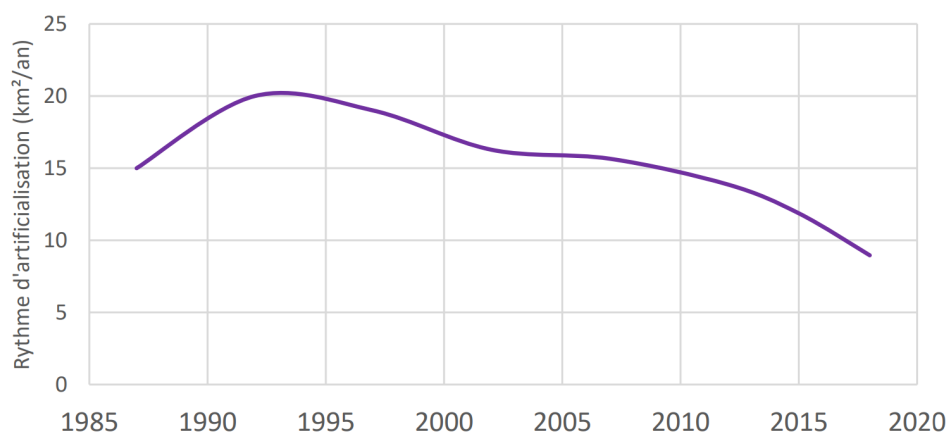


FIGURE 0.3 – Évolution de l’augmentation de l’artificialisation des sols en Wallonie (Belgique) LORQUET et al. [22]

L’augmentation du nombre de fortes précipitations et les sols de plus en plus artificialisés sont les deux principaux facteurs qui causent des crues. L’Europe n’est pas épargnée avec par exemple les crues de Valence 2024 et Liège 2021 qui ont fait de nombreuses victimes et de nombreux dégâts matériels.

	Nombres de décès	Pertes économiques [10^9 €]
Liège 2021	39	2,5
Valence 2024	239	9,4

TABLE 0.1 – Chiffres sur les crues de Lièges 2021 et Valences 2024 RTBF [27]WIKIPÉDIA [33]

Comme le montre le tableau ci-dessus [0.1], les pertes économiques liées aux crues sont généralement très élevées, celles-ci détruisant un grand nombre de bâtiments sur leur passage. Cela engendre un nombre important de personnes affectées, souvent privées de logement.

Les dégâts sur les constructions lors de crues sont dus à différentes causes. En effet, les forces hydrauliques créent évidemment des dégâts, mais des dégâts peuvent également être dus à d’autres actions physiques comme l’érosion et l’impact de débris. De plus, des actions non physiques dues au contact avec l’eau comme l’érosion ou le développement de champignon endommagent les constructions. Ces principales causes, ne sont pas prises en compte en Belgique lors de la conception de nouveaux bâtiments ou lors de rénovations, ceci crée donc des dégâts importants lors de crues.

Les 2 photos suivantes ont été prises afin de montrer les dégâts que les crues peuvent faire sur des bâtiments, ces photos ont été prises à Pépinster après la crue de juillet 2021.



FIGURE 0.4 – Impact des crues sur les bâtiments Le Soir [20] L'avenir [17]

Les villes doivent donc être mieux préparées à ces crues. Sans réaction, les pertes humaines et financières seront probablement de plus en plus importantes. Les constructions de demain doivent mieux prendre en compte ces risques de crues, toutes les conséquences d'une crue qui pourraient endommager les bâtiments doivent être prises en compte lors de la conception ou la rénovation de bâtiments notamment les forces hydrauliques qui sont particulièrement analysées dans ce mémoire.

Ce mémoire se focalise donc sur les forces hydrauliques qui agissent sur un bâtiment présent dans un écoulement, afin de pouvoir les prédire de façon simple et précise. Une étude statistique est également réalisée afin de déterminer quels paramètres influencent les forces sur les bâtiments. Tout cela a comme objectif d'aider la conception de nouvelles constructions afin de prendre en compte ses risques de crues.

Des simulations numériques peuvent aider à évaluer ces forces, c'est pourquoi ce mémoire utilise le code de calcul *Watlab* développé par l'équipe hydraulique de l'École polytechnique de Louvain. Ce code résout les équations de Saint-Venants 2D avec la méthode des volumes finis sur un maillage non structuré. L'objectif est donc de trouver des relations entre la hauteur et la vitesse de l'eau qui sont fournies par le code de calcul, afin obtenir les forces sur un bâtiment. Ces relations pourront ensuite être appliquées à des cas d'inondation réelles.

Dans ce contexte, plusieurs travaux ont déjà été réalisés à l'École Polytechnique de Louvain afin de faire avancer les connaissances scientifiques dans le domaine des crues. Plusieurs articles et mémoires ont déjà été publiés. Les premiers travaux portaient sur l'évaluation de la force sur un bâtiment idéalisé représenté par une boîte rectangulaire, ces forces ont donc été mesurées et comparées aux forces calculées avec différentes méthodes à partir des données obtenues par le code de calculs. Des mémoires ont déjà été réalisés pour des cas d'écoulement permanent sans barrière, ADYNS et ADRIAENS [1], et avec barrière BONSEMBIANTE [2].

Ce mémoire se focalise quant à lui sur l'analyse de l'influence d'une barrière sur un bâtiment en aval dans un écoulement transitoire. Ces tests vont faire varier les paramètres

de la barrière afin de trouver ceux qui influent le plus sur la force maximale et comment ceux-ci influencent la force. Les essais expérimentaux ont été réalisés il y a un an dans le cadre du mémoire BONSEMBIANTE [2] mais ceux-ci n'ont pas été traités et donc analysés.

Au delà de l'analyse des essais et des conséquences de différents paramètres de la barrière, ce mémoire va aussi comparer les résultats numériques réalisés sur *Watlab* aux essais réalisés en laboratoire. Cette étude va permettre de tester la fiabilité d'un tel code de calcul hydrodynamique et des méthodes de calculs de forces hydrodynamiques appliquées à un cas plus complexe d'un bâtiment protégé par une barrière située en amont dans l'écoulement. Cette barrière en amont, pourrait être dans un cas réel, un autre bâtiment, une haie ou toute autre chose faisant obstacle à l'écoulement.

L'objectif de ce travail est double. Le premier consiste à analyser l'influence d'une barrière sur les forces exercées par l'écoulement transitoire sur une construction située en aval. Cette barrière peut représenter, dans un cas réel, soit un dispositif installé pour protéger des constructions, soit un obstacle déjà présent en amont de l'écoulement, comme une haie, une habitation, etc. Cette analyse est faite sur base de mesures faites expérimentalement. Le second objectif est d'évaluer la fiabilité de plusieurs méthodes de calculs à partir des résultats du code de calcul numérique *Watlab*. Si ces dernières s'avèrent suffisamment précises, elles pourraient être utilisées dans des zones exposées aux risques de crues afin de simuler les conséquences d'événements extrêmes comportant plusieurs obstacles dans l'écoulement.

Ce mémoire est structuré comme suit :

- La première partie présente les types d'inondations ainsi que les normes actuelles, elle présente également un bref résumé de certaines études déjà réalisées sur le sujet pour pouvoir valider certains résultats et comprendre les recherches qui restent encore à réaliser.
- Ensuite, la deuxième partie présente la partie modélisation de l'écoulement avec les équations à utiliser pour représenter cet écoulement ainsi qu'une analyse théorique des différents types de forces qui agissent sur la boîte.
- La troisième partie concerne une analyse des tests réalisés en laboratoire durant l'année 2024 par Charles Ryckmans et Lorenzo Bonsembiante avec une analyse statistique.
- La dernière partie concerne des tests numériques en comparant les données du laboratoire avec celles obtenues numériquement ainsi que l'analyse de tests numériques supplémentaires non réalisés en laboratoire. L'influence que peuvent avoir certains paramètres sur les forces est également analysée, notamment l'influence du nombre de Froude.

Deuxième partie

État de l'art

1 Types d'inondations

En Belgique, il existe 2 types d'inondations urbaines. Nous verrons dans cette section ces 2 raisons courantes qui nous intéressent le plus dans ce mémoire. Ces types d'inondations sont des phénomènes bien distincts, les conditions d'écoulements sont donc bien différentes, ce qui implique des vitesses et des hauteurs d'eau différentes qui conditionnent fortement les efforts exercés par l'écoulement sur les structures.

1.1 Inondations par ruissellement

Lorsqu'il pleut, une partie de l'eau est absorbée par la végétation, une autre est absorbée dans le sol, une autre s'évapore et le reste ruisselle.

Dans certains cas le ruissellement peut être important du à des fortes pluies et/ou un sol déjà saturé qui ne sait plus absorber d'eau. Ce phénomène est encore amplifié avec l'artificialisation des sols.

Du ruissellement assez important se dirige donc dans le sens de la pente et peut impacter des constructions et les inonder et/ou les endommager.

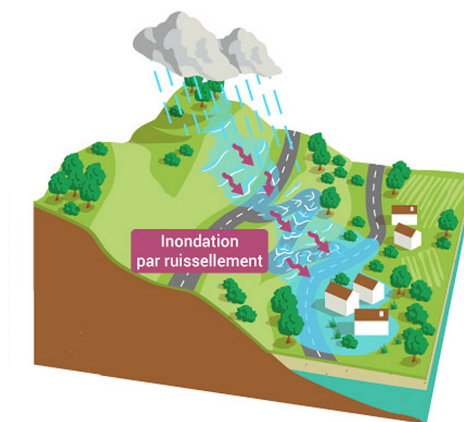


FIGURE 1.1 – Inondations par ruissellement PPRI-YON [24]

Avec un fort dénivelé et/ou des fortes précipitations, la vitesse peut rapidement augmenter. Ces inondations impliquent donc bien souvent des vitesses élevées et assez variables, elles s'apparentent donc à des écoulements transitoires. Les inondations du 9 novembre 2024 à Valence ou du 24 juillet 2021 à Dinant sont un bon exemple d'inondations par ruissellement.



(a) 24 juillet 2021 (Dinant) [18]



(b) 9 novembre 2024 (Valences) [32]

FIGURE 1.2 – Exemples d'inondations par ruissellement

Pour limiter le risque d'inondation par ruissellement, il faut minimiser l'artificialisation des sols en limitant les grandes zones principalement urbaines avec uniquement des matériaux empêchant l'infiltration. Dans les zones plus rurales, lorsque un champ n'est pas cultivé, le ruissellement augmente. C'est pourquoi, il est souvent demandé aux agriculteurs de labourer leurs champs perpendiculairement à la pente, pour ne pas créer une 'rigole' qui faciliterait le ruissellement de l'eau lors de fortes précipitations.

1.2 Inondations par débordement

Les inondations par débordement se situent sur les bords de cours d'eau. Après de fortes précipitations, l'eau qui ruisselle arrive dans les cours d'eau, cette eau fait donc augmenter le débits et donc indirectement la hauteur de l'eau. Avec une hauteur qui augmente, les cours d'eau peuvent sortir de leur lit et occuper les plaines d'inondations. Si des maisons se trouvent sur ces plaines, elles sont donc inondées.

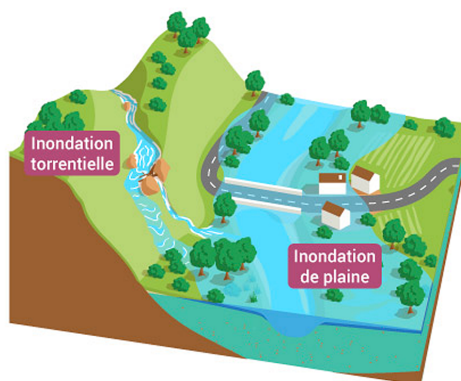


FIGURE 1.3 – Inondations par débordement PPRI-YON [24]

Ces inondations peuvent impliquer des hauteurs d'eau importantes, mais la vitesse sera

souvent moins élevée que lors d'une inondation par ruissellement car cette eau arrive par débordement. Les changements de conditions d'écoulement sont assez lents. Cet écoulement peut être assimilé à un écoulement permanent.



FIGURE 1.4 – Inondation par débordement (Meuse) [21]

Pour atténuer les effets de ces inondations, plusieurs mesures peuvent être mises en place :

Barrages Une des solutions les plus connues mais également une des solutions les plus chère est de créer un barrage avec un réservoir, cela permet de gérer le débit d'eau présent dans les cours d'eau en aval et donc diminuer les pics en cas de crues. Il existe d'autres avantages comme la possibilité de production d'électricité, une réserve en eau douce. Mais il existe également des côtés négatifs, c'est pourquoi leurs constructions sont souvent sujettes à des débats. En effet, un barrage déséquilibre la biodiversité et il peut également avoir un impact social très négatif en inondant des zones habitées et/ou cultivées. Enfin, en cas de rupture, les conséquences peuvent être catastrophiques.

Création de zones d'immersion temporaire Cette solution vise à prévoir des zones adjacentes à des cours d'eau qui peuvent être consciemment inondées en cas de crues, elles seraient donc utilisées comme réservoir. Ces zones sont principalement des champs et des prairies qui sont en amont de zones à risques lors de crues.

2 Normes actuelles

Pour éviter les dégâts importants dus aux crues, les pays mettent en place certaines normes pour protéger leur population, ces normes peuvent être mises sur la résistance des constructions lors d'inondations mais également sur des mesures à mettre en place pour éviter l'apparition de nouvelles zones inondables.

2.1 Recommandation européenne

L'article MARTINI [23] résume les mesures que la Communauté Européenne conseille à ses pays membre de prendre pour une meilleure gestion de ce risque de crue.

Évaluation du risque La première chose à réaliser est de connaître le risque d'inondation sur son territoire, aussi bien les inondations par ruissellement que celle par débordement. Pour connaître ce risque, il faut connaître la probabilité d'avoir une inondation ainsi que la hauteur à laquelle l'eau peut arriver. L'Union Européenne recommande donc à ses pays membre de créer des bases de données avec les événements précédents ainsi que des cartes explicatives pour les zones à risque, de sorte à pouvoir connaître les antécédents de chaque zone à risque de façon simplifiée. Cette base de données devra être mise à jour au maximum tous les 6 ans. Il faut également essayer d'évaluer au mieux possible les changements hydrologiques à long terme en particulier dus au changement climatique.

Plan pour les zones à haut risque Une fois ces données collectées, il faut réaliser des plans de gestion des risques d'inondation dans les zones à haut risque. Dans ces plans, doivent se trouver les données concernant le risque actuel, les objectifs fixés, les moyens d'y arriver ainsi que l'intervention prévue en cas d'urgence.

2.2 Wallonie

En Wallonie, les constructions dans les zones à risque d'inondation sont encadrées par des réglementations de plus en plus strictes, dans un souci de protection des personnes et des biens. La législation wallonne interdit ou limite les nouvelles constructions dans les zones identifiées comme fortement exposées aux inondations. Ces mesures visent à éviter non seulement les dommages directs aux bâtiments, mais aussi les effets aggravants qu'une construction peut induire sur l'écoulement de l'eau, comme des effets de blocages ou de ralentissements locaux.

Les cartes d'aléas d'inondation réalisées par la Région Wallonne et disponibles en ligne via le portail WallonMap [25], classent le territoire en zones selon le niveau de risque (faible, moyen, élevé), en se basant sur des événements de crues historiques ou modélisées. Ces cartes tiennent compte à la fois des débordements de cours d'eau et du ruissellement pluvial. Elles sont des outils de référence dans les procédures d'octroi de permis d'urbanisme. Les administrations communales et régionales évaluent les projets en fonction de leur implantation par rapport à ces zones.

En parallèle, le Code de développement territorial (CoDT) prévoit des mesures spécifiques pour les constructions dans ces zones : rehaussement du niveau du rez-de-chaussée, interdiction de caves habitables, compensation hydraulique, etc. Ces mesures visent à augmenter la résilience du bâti existant et à éviter toute aggravation du risque.

À l'échelle européenne, une tendance claire émerge : celle de redonner de l'espace aux cours d'eau. Des politiques de désurbanisation partielle ou de zones d'expansion de crue sont mises en place, notamment en Allemagne ou aux Pays-Bas. L'idée est d'accepter la présence de l'eau plutôt que de chercher à l'exclure à tout prix.

2.3 Ailleurs dans le monde

À l'échelle mondiale, la prise en compte du risque d'inondation dans la construction varie fortement selon les pays, les moyens financiers et les catastrophes passées. De manière générale, beaucoup d'efforts sont concentrés sur la prévention des crues via des ouvrages

hydrauliques (digues, canaux de dérivation, bassins de rétention), plutôt que sur la résistance des bâtiments eux-mêmes. Cependant, dans certaines régions particulièrement exposées, des normes spécifiques ont été mises en place pour renforcer les constructions. Voici quelques exemples de mesures prises dans certains pays.

2.3.1 Japon

Le Japon est un exemple particulièrement instructif. Soumis à de nombreux risques naturels (séismes, typhons, inondations), le pays a développé un cadre réglementaire très exigeant. En matière d'inondation, les bâtiments dans les zones à risque doivent respecter plusieurs critères : élévation obligatoire du niveau habitable, matériaux résistants à l'eau, fondations renforcées. De plus, des dispositifs de fermeture automatique (volets étanches, clapets anti-retour) sont parfois imposés. Le pays mise également sur une culture du risque bien ancrée dans la population, avec des plans d'évacuation clairement définis et des tests d'évacuation régulier. [JapanGov](#) [14]

2.3.2 États-Unis

Aux États-Unis, la FEMA (Federal Emergency Management Agency) [FEMA](#) [6] publie les *Flood Insurance Rate Maps* (FIRMs), qui classent les territoires selon leur exposition aux crues. Les constructions situées dans les *Special Flood Hazard Areas* doivent respecter les normes du *National Flood Insurance Program* (NFIP), notamment l'élévation minimale du premier niveau habité et l'utilisation de matériaux résistants à l'eau. Le non-respect de ces normes peut empêcher l'accès à une assurance publique contre les inondations.

2.3.3 Pays-Bas

Enfin, les Pays-Bas, en grande partie situés sous le niveau de la mer, adoptent une approche très technique et planifiée avec des gigantesques infrastructures de protection (digues, barrages mobiles, plan Delta). Une autre pratique développée aux Pays-Bas mais désormais présente également ailleurs dans le monde, est le concept de constructions flottantes, celles-ci montent donc avec le niveau d'eau pour éviter de se faire inonder. [11].



FIGURE 2.1 – Maisons flottantes [IDEAT](#) [11]

2.4 Normes sur la conception de structures

Dans toutes ces préventions peu de mesure concernent réellement la structure afin de faire en sorte que celle-ci résiste à des crues, la tendance mondiale est plutôt de limiter le risque d'inondation mais si une crue arrive sur une construction, peu de normes sont mises en place pour que celle-ci résiste. Il faut donc continuer de diminuer le risque d'inondations liés aux crues, mais il faut également adapter nos bâtiments dans les zones les plus à risque. Cependant beaucoup de travaux étudient la prévision des forces hydrodynamiques qui agissent sur les constructions. RYCKAMANS et SOARES-FRAZAO [28] explique les différentes études réalisées. Le cas d'un écoulement transitoire commence à être bien étudié avec notamment des études de tsunami, les tsunamis et les crues sont des phénomènes naturels bien différents mais le type d'écoulement qui en résulte peut être similaire, c'est pourquoi prendre en compte les études sur les tsunamis peut enrichir nos connaissances sur les crues. Les tsunamis, sont également des écoulements transitoires, avec une vitesse élevée qui peut arriver dans des villes. Pour connaître les forces qui agissent sur une construction présente dans un écoulement, les études actuelles tendent à valider certaines méthodes. Ces méthodes utilisent bien souvent des paramètres comme la vitesse et la hauteur d'eau. On peut l'obtenir grâce à un code de calcul comme *Watlab*. Certaines méthodes demandent un maillage spécifique d'autres une présence ou non de la construction dans le maillage.

3 Analyse des recherches dans la littérature

Dans cette partie, plusieurs études expérimentales sont analysées afin de pouvoir comprendre ce qui a déjà été fait et la manière dont cela a été fait. Ce mémoire aura aussi pour objectif de compléter ces recherches.

La première étude concerne une étude uniquement expérimentale, il sera donc intéressant de rechercher les outils expérimentaux utilisés, ainsi que les résultats et formules déduites. La deuxième étude valide un modèle numérique, ce qui est enrichissant pour, dans notre cas, valider le modèle *Watlab*.

Enfin la troisième et dernière études concerne une étude qui se focalise sur le nombre de Froude, celle-ci sera donc utile pour comparer nos recherches sur le nombre de Froude.

3.1 Étude expérimentale de Fang et al. (2022)

L'étude *Experimental Investigation of Extreme Flood Loading on Buildings Considering the Shadowing Effect of the Front Building* réalisée par FANG et al. [5] analyse les efforts exercés par des crues sur des bâtiments, en particulier en analysant l'effet d'un bâtiment situé en amont sur un bâtiment en aval. Pour cela, ils simulent une rupture de barrage à l'aide d'un système de porte battante dans un canal en laboratoire. Des hauteurs d'eau initiales différentes sont mises de chaque côté de cette porte de sorte à ce que lorsqu'elle s'ouvre rapidement, cela crée une vague qui vient impacter les boîtes placées en aval dans le canal. Le canal d'essai est représenté à la Figure [3.1].

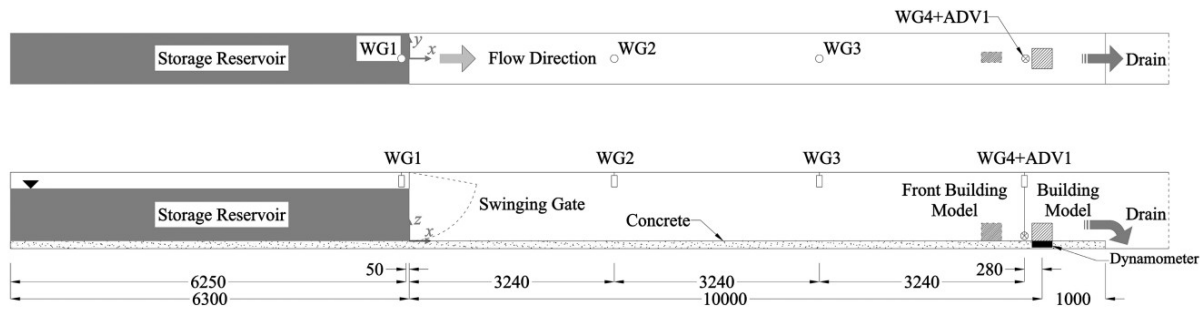


FIGURE 3.1 – Représentation du canal d'essai [5]

3.1.1 Outils expérimentaux et mesures

Le dispositif est composé de plusieurs éléments :

- Un canal de 11 mètres de longueur
- Des boîtes en aluminium pour représenter les bâtiments
- Des capteurs à ultrasons pour mesurer les hauteurs d'eau.
- Un vélocimètre Doppler acoustique pour mesurer la vitesse de l'eau.
- Un dynamomètre multiaxial à haute fréquence pour mesurer les forces et les moments totaux sur la boîte.
- Des capteurs de forces uniaxiaux installés sur la face avant du bâtiment pour connaître la répartition des forces sur cette face.
- Des caméras haute vitesse pour l'enregistrement visuel.

Les tests ont été réalisés et 3 paramètres ont été modifiés pour connaître leur impact.

- La hauteur d'eau initiale à l'amont de la porte
- La distance entre les boîtes amont et aval
- La longueur de la boîte en amont
- L'orientation du bâtiment amont

3.1.2 Résultats principaux

4 phases différentes ont été observées lors de ces tests en laboratoire.

1. Phase d'impulsion
2. Phase de montée
3. Phase de diminution
4. Phase quasi-stationnaire

Ces phases sont basées sur la force et le moment qui agissent au niveau de la boîte et sont visibles à la Figure [3.2]. La première phase d'impulsion représente la phase dans laquelle la première vague atteint la boîte avec un premier pic, ensuite la deuxième phase représente toujours une augmentation de la force jusqu'à un deuxième pic, celui-ci sera dans la majorité des cas le moment où la force sera maximale. En troisième phase, après ce pic la force diminue, ce qui est la phase de diminution. Enfin la dernière phase est

lorsque la force est presque stable il s'agit alors de la phase quasi-stationnaire.

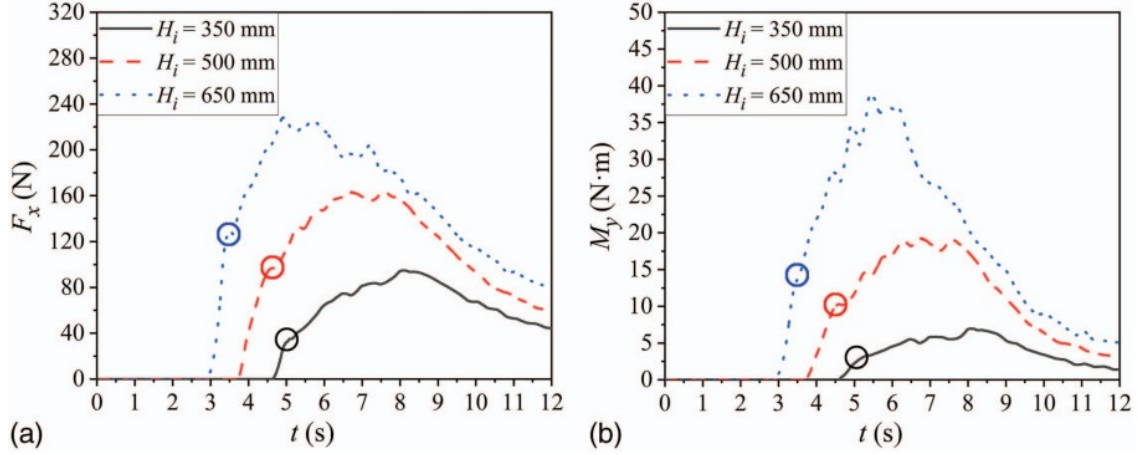


FIGURE 3.2 – Force et moment mesuré sur la boîte avec différentes hauteurs d'eau lâchée (les cercles marquent la fin de la phase d'impulsion et le début de la phase de montée) FANG et al. [5]

La force sur la boîte peut d'après cette étude se calculer comme ceci :

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_R D h v^2 \quad (3.1)$$

où ρ est la masse volumique de l'eau (1000 kg/m^3), C_R le coefficient de résistance, D la longueur sur laquelle cette force s'applique, h la hauteur d'eau, et v est la composante perpendiculaire à la face de la vitesse de l'eau.

L'ajout d'une boîte en amont modifie fortement le régime d'écoulement au niveau de la boîte testée, induisant un effet protecteur appelé effet d'ombrage. Cet effet dépend :

- Positivement de la hauteur d'eau initiale en amont (plus le niveau d'eau est important $\Rightarrow$ plus la force sera importante).
- Négativement de la longueur de la boîte en amont (plus la barrière est large $\Rightarrow$ moins la force sera importante).
- Positivement de distance entre les boîtes amont et aval (plus la distance est importante $\Rightarrow$ plus la force sera importante).
- De l'orientation de la boîte en amont. L'angle optimal dépend des autres paramètres.

Un indice d'ombrage η_F a été défini comme :

$$\eta_F = \frac{F_{x,0} - F_x}{F_{x,0}} \quad (3.2)$$

et permet de corriger la formule de force maximale en tenant compte de l'ombrage :

$$F_{x,\text{avec effet}} = \frac{1}{2} (1 - \eta_F) \rho C_R D h v^2 \quad (3.3)$$

Enfin, l'analyse du bras de levier (distance entre le point d'application de la force et la base) montre une réduction moyenne de 10% en présence du bâtiment en amont.

Cette étude apporte donc un éclairage important sur l'impact d'un bâtiment en amont sur un bâtiment en aval. Elle propose également des pistes pour évaluer cet impact avec un indice d'ombrage.

3.2 Étude numérique et expérimentale SHIGE-EDA et AKIYAMA [30]

Cette étude a pour objectif d'analyser le comportement d'écoulements de crues, avec et sans barrière, et d'évaluer les forces hydrauliques exercées sur des structures. Cette étude compare des expérimentations en laboratoire et des modélisations numériques bidimensionnelles fondées sur les équations de Saint-Venant.

3.2.1 Outils et méthodes utilisés

Des essais ont été réalisés numériquement, pour cela, le modèle numérique utilisé est *FUF-2DF*. Il permet de résoudre les équations de Saint-Venants, sur un maillage donné comme entrée. Le maillage utilisé pour cette étude est un maillage triangulaire.

Des tests ont également été réalisés en laboratoire, voici les outils utilisés pour ces tests :

- Canal composé d'un réservoir (1,93 m $\times$ 3,0 m) et d'une zone inondable (2,79 m $\times$ 2,6 m) séparés par une porte simulant une rupture de barrage (Le schéma de ce canal est représenté à la Figure [3.3]).
- Caméras vidéo numériques.
- Laser et vidéo pour les hauteurs d'eau.
- Vélocimétrie par suivi de particules (PTV) pour connaître la vitesse de l'eau à la surface.
- Capteurs de force bi-composants pour les forces sur la structure.

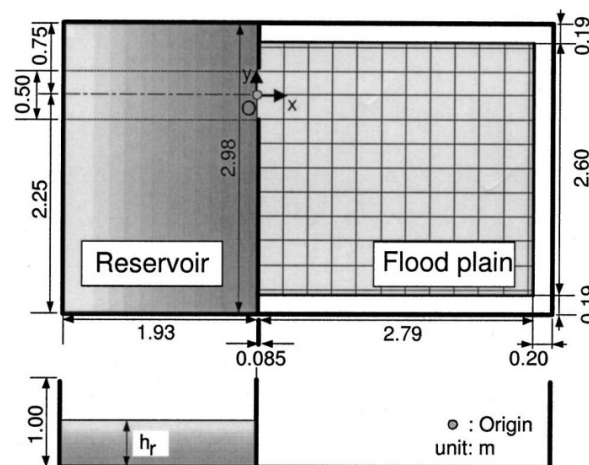


FIGURE 3.3 – Représentation du canal utilisé pour les essais [30]

3.2.2 Résultats obtenus

Prédiction numérique de l'écoulement :

- Le modèle numérique reproduit de façon assez précise les positions du front, les hauteurs d'eau et les vitesses de surface.
- Au niveau de la hauteur, quelques approximations sont présentes mais celles-ci sont du à des effets transitoires violents qui ne sont pas pris en compte dans les équations de Saint-Venants tel que des ressauts hydrauliques.
- Les barrières compliquent le front, mais le modèle capture bien ces effets.

Forces hydrodynamiques sur les structures :

- Les forces maximales apparaissent lors de l'impact.
- Les valeurs simulées sont globalement cohérentes avec les mesures.
- Pour la simulation numérique, les formules suivantes fournissent des résultats satisfaisants :

$$F_x = -\rho \oint_{\partial\Omega'} \frac{1}{2} gh^2 v_x dL$$

$$F_y = -\rho \oint_{\partial\Omega'} \frac{1}{2} gh^2 v_y dL$$

Où ρ est la masse volumique de l'eau, Ω est le contour de la boîte, g est l'accélération de pesanteur, h est la hauteur d'eau, v_i est la composante i de la vitesse et L est la longueur le long de la boîte.

Cette étude est pertinente car elle valide un modèle numérique 2D (*FUF-2DF*) sur des cas réalistes de crue avec obstacles, ceci est également être réalisé avec *Watlab* dans notre cas.

3.3 Simulation de tsunami dans un parc industriel côtier KIHARA et al. [16].

Cette étude va simuler numériquement et expérimentalement un tsunami dans une zone côtière avec plusieurs obstacles dans l'écoulement. Ceci est intéressant pour notre cas car le tsunami peut facilement être comparé à une rupture de barrage, il s'agit dans les 2 cas d'un écoulement transitoire CHANSON [3]. Une analyse du nombre de Froude est faite dans cet article, des comparaisons sont donc possibles avec les données obtenues dans ce mémoire à propos du nombre de Froude. Analysons donc plus en détails les méthodes et moyens utilisés lors de cette recherche.

3.3.1 Matériel utilisé

- La vague est créée dans le canal d'essai grâce à un piston hydraulique
- Les hauteurs d'eau sont mesurées à l'aide de jauges à résistance de fil.
- Des capteurs de pressions sont installés sur les bâtiments sur lesquels la force veut être calculée.

- Des vélocimètres électromagnétiques mesurent la vitesse de l'écoulement en des points stratégiques.

Voici des schémas du canal dans lequel les essais ont été réalisés.

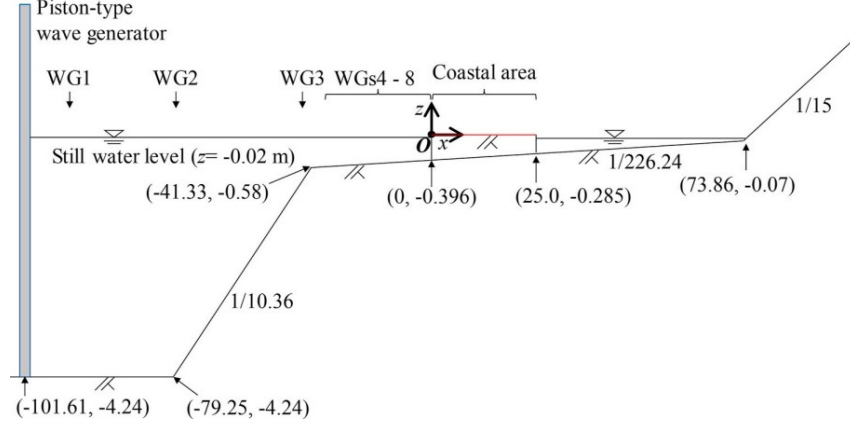


FIGURE 3.4 – Coupe du canal d'essais

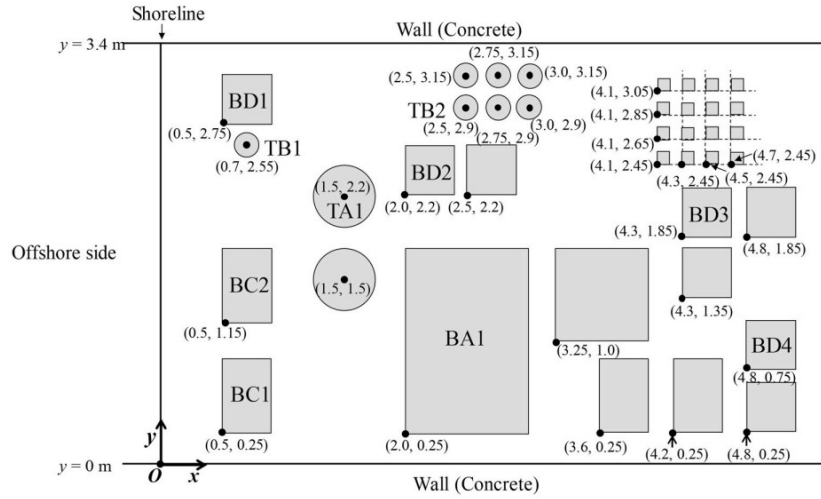


FIGURE 3.5 – Visualisation des boîtes mises comme obstacle à l'écoulement

3.3.2 Résultats

Les résultats à propos du nombre de Froude vont particulièrement nous intéresser afin de pouvoir en connaître plus sur un éventuel lien entre le nombre de Froude et la force. Pour rappel, le nombre de Froude est calculé avec la vitesse de l'eau v ainsi que la hauteur d'eau h et la pesanteur g . Un écoulement rapide avec peu de hauteur aura donc un nombre de Froude élevé, des explications plus détaillées sur le nombre de Froude seront faites à la section [5].

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (3.4)$$

Voici les résultats obtenus sur le nombre de Froude :

- Un nombre de Froude élevé va favoriser l'augmentation de la hauteur d'eau devant un obstacle à l'écoulement.
- L'étude montre qu'il existe un lien entre le nombre de Froude et la distance du rivage pour le cas avec le tsunami.
- Dans cette simulation de tsunami, le nombre de Froude augmente lorsque l'écoulement arrive sur la rive du au fait que la hauteur d'eau diminue. Mais les obstacles à l'écoulement diminuent cette croissance du nombre de Froude.

Enfin, la comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux est assez bonne, cela montre bien l'utilité de pouvoir développer des programmes de simulations d'écoulement d'eau dans le cas de prévisions d'inondations dues à des tsunamis ou des crues.

Troisième partie

Modélisation écoulement et calculs des forces

Cette section va permettre d'expliquer la modélisation de l'écoulement de l'eau à surface libre. Connaître les équations qui sont utilisées dans des programmes est primordial pour en connaître les hypothèses et donc les points faibles. Les différentes phases de l'écoulement ainsi que les forces exercées sur un bâtiment faisant obstacle à celui-ci seront ensuite analysées.

4 Équations de l'écoulement

Les équations de Saint-Venants sont souvent utilisées pour modéliser un écoulement transitoire ou permanent. Issues des équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, ces relations sont applicables aux modèles à volumes finis, ce qui sera utile dans la suite de ce mémoire.

4.1 Hypothèses des équations de Saint-Venants

Ces équations font certaines hypothèses qu'il est utile de prendre en compte, car lorsque le système s'éloigne de ses hypothèses, les résultats seront moins fiables.

Voici les hypothèses :

- Écoulement à surface libre
- Fluide incompressible
- Pente faible
- Vitesse verticale nulle
- Vitesse constante sur la hauteur
- Fond du canal imperméable
- Frottements sur le lit considérés avec l'équation de Manning (écoulement uniforme)
- Pas de discontinuité dans l'écoulement

4.2 Équations de Saint-Venant

Avec ces hypothèses, il est possible d'obtenir les équations de Saint-Venant. Pour cela, il faut partir de l'équation de conservation de la masse [4.1] et l'équation de conservation de quantité de mouvement [4.2].

$$\frac{\partial(\rho A ds)}{\partial t} = \rho AV - (\rho AV + \frac{\partial(\rho AV)}{\partial s} ds) \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial(m\vec{V})}{\partial t} = \sum \vec{F} \quad (4.2)$$

Après quelques manipulations, il est possible d'obtenir l'équation matricielle suivante SAINT-VENANT [29] :

$$\frac{\delta \mathbf{U}}{\delta t} + \frac{\delta \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\delta x} = \mathbf{S}(\mathbf{U}) \quad (4.3)$$

Avec,

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= \begin{pmatrix} A \\ U \end{pmatrix} \\ \mathbf{F}(\mathbf{U}) &= \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI_1 \end{pmatrix} \\ \mathbf{S}(\mathbf{U}) &= \begin{pmatrix} 0 \\ gA(S_0 - S_f) + gI_2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

A étant l'aire de la section, U la vitesse, Q le débit, I_1 le moment statique et I_2 la variation spatiale due au changement de section.

5 Types d'écoulement

L'objectif est également de connaître les éventuels liens entre le nombre de Froude et la force lors d'une crue et également connaître l'influence qu'aura une barrière de protection sur ce nombre de Froude. Voici donc premièrement la formule du nombre de Froude :

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (5.1)$$

Où v est la vitesse, g la gravité et h la hauteur d'eau.

Le nombre de Froude correspond au rapport entre la vitesse du fluide et la célérité, cette dernière représentant la vitesse de propagation des informations dans l'écoulement. Ce nombre de Froude est couramment utilisé pour caractériser le régime de l'écoulement.

Une autre donnée intéressante dans les écoulements est la hauteur critique h_c , cette hauteur est la hauteur qui minimise l'énergie spécifique, elle sera définie plus précisément dans la suite de ce mémoire.

Le nombre de Froude a un lien avec cette hauteur critique, lorsque la hauteur d'eau sera supérieur à h_c le nombre de Froude sera inférieur à 1 et inversement lorsque la hauteur d'eau sera inférieur à h_c .

5.1 Ecoulement subcritique

Lorsque le nombre de Froude est inférieur à 1. C'est à dire que la vitesse du fluide est inférieur à la célérité. Nous sommes dans le cas d'un régime fluvial, c'est à dire qu'il y a une hauteur assez importante et des vitesses faible, l'écoulement est plus calme.

Il est important de noter que, dans le cas d'un écoulement subcritique, l'information se

propage à la fois depuis l'amont et depuis l'aval. Cela implique que, dans les essais réalisés dans le canal d'essai et qui seront analysés dans la suite du rapport, la hauteur d'eau en fin de canal peut influencer l'écoulement au niveau de la boîte.

L'influence de la condition en aval ne se manifeste qu'une fois que l'eau atteint l'extrémité du canal et que l'information remonte sous forme d'onde à la surface. Dans notre configuration expérimentale, cette influence apparaît toujours au minimum 30 secondes après l'ouverture de la porte, en raison de la longueur du canal. Par conséquent, seuls les 30 premières secondes de chaque essai sont prises en compte dans l'analyse, afin d'exclure l'effet de la condition aval.

5.2 Écoulement supercritique

L'écoulement est supercritique lorsque le nombre de Froude est supérieur à 1. C'est à dire que la vitesse du fluide est supérieur à la célérité. Dans ce cas, nous sommes dans un régime torrentiel, la hauteur d'eau n'est pas très élevée mais la vitesse est importante, les forces hydrodynamiques prennent alors le dessus par rapport aux forces hydrostatiques. Dans les écoulements supercritiques, l'information provient uniquement de l'amont, cela signifie que la condition en aval n'influe aucunement l'écoulement.

5.3 Profil de l'écoulement

Il peut être intéressant de connaître l'allure du profil de l'écoulement à l'équilibre dans le canal. Nous allons donc analyser le profil de l'écoulement en fonction de différents paramètres. Ce raisonnement fera l'hypothèse d'une section de canal constant, c'est pourquoi, elle n'est pas applicable au niveau des sections du canal contenant la boîte ou la barrière, mais ce raisonnement sera applicable avant et après ces obstacles. Ce profil va dépendre de plusieurs paramètres.

Premièrement regardons le cas du canal utilisé pour les essais. Celui-ci a une pente très faible, nous serons donc dans un cas appelé "Mild slope". Les cas de "Steep slope" et "Critical slope" dont les pentes sont plus importantes ne seront donc pas analysés dans ce rapport.

Hypothèses

- Section du canal constante
- Débit constant
- Pente faible

Deux hauteurs caractéristiques sont importantes à connaître pour la suite du raisonnement.

Il y a premièrement la hauteur critique, il s'agit de la hauteur à laquelle l'énergie spécifique sera minimale. Nous pouvons donc obtenir cette hauteur en égalant la dérivée de

l'énergie spécifique à zéro. Voici le résultat pour un canal avec une section rectangulaire.

$$\begin{aligned}\frac{dE}{dh} &= \frac{d\left(h_c\sqrt{1-S_0^2} + \alpha\frac{Q^2}{2g(h_cL)^2}\right)}{dh_c} = 0 \\ \sqrt{1-S_0^2} - \alpha\frac{Q^2}{gL^2h_c^3} &= 0 \\ h_c &= \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{(1-S_0^2)^{1/2}gL^2}}\end{aligned}$$

Pour une section non rectangulaire, il est possible d'obtenir la hauteur critique en résolvant l'équation suivante par itération :

$$\sqrt{1-S_0^2} = \frac{\alpha Q^2 L_c}{g A_c^3} \quad (5.2)$$

où Q est le débit [m^3/s], A_c est l'aire humide pour la hauteur h_c , S_0 est la pente [-], α est le coefficient de Bernoulli [-], L_c est la largeur du canal [m] et g est l'accélération de pesanteur [m/s^2].

La deuxième hauteur caractéristique intéressante à connaître est la hauteur uniforme h_u . Cette hauteur uniforme est la profondeur d'eau à lorsque l'écoulement est à l'équilibre. Celle-ci peut s'obtenir en résolvant cette équation par itération :

$$S_0 = \frac{Q^2 n^2}{A_u^2 R_u^{4/3}} \quad (5.3)$$

où R_u est le rayon hydraulique pour la hauteur h_u [m], Q est le débit [m^3/s], A_u est l'aire humide pour la hauteur h_u [m^2], S_0 est la pente [-] et n est le coefficient de Manning [$s/m^{1/3}$].

Une pente faible correspond à un régime de type Mild Slope, dans lequel la hauteur critique h_c est inférieure à la hauteur uniforme h_u . Le graphique ci-dessous illustre, pour un débit donné, l'évolution de ces hauteurs caractéristiques en fonction de la pente. On y observe que, lorsque la pente est faible, la hauteur uniforme dépasse la hauteur critique, ce qui confirme que l'écoulement se situe bien dans un régime Mild Slope.

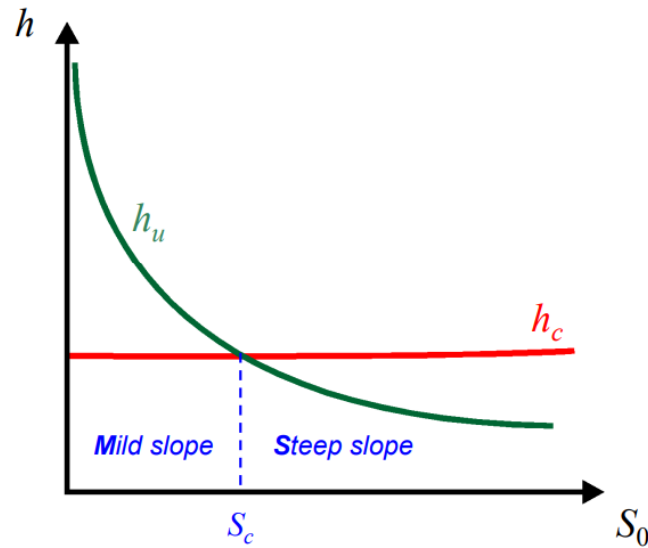


FIGURE 5.1 – Évolution des hauteurs caractéristiques en fonction de la pente [31]

Avec ces données, il existe 4 types de profil possibles dans le canal, ces profils dépendent de leur position relative aux hauteurs caractéristiques et sont visibles à la Figure [5.2].

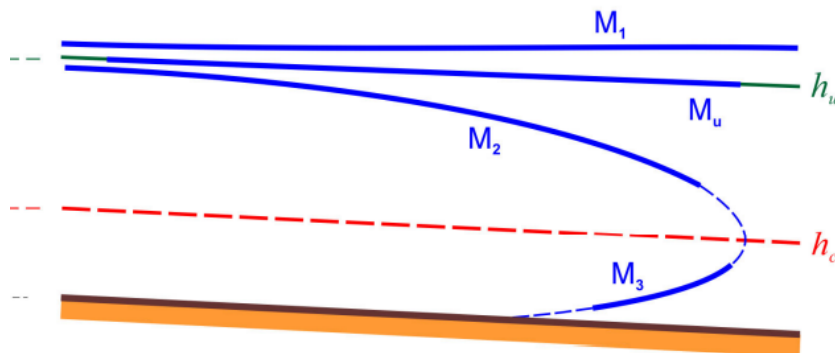


FIGURE 5.2 – Différents profils de hauteur d'eau [31]

Nous pouvons voir qu'en fonction de la hauteur l'allure du profil sera différente. Si nous nous trouvons en dessous de la hauteur critique, nous serons donc en écoulement super-critique et le nombre de Froude sera supérieur à 1. Dans ce cas, la hauteur d'eau aura tendance à augmenter de plus en plus vite le long du canal.

Si le nombre de Froude est inférieur à 1, alors il s'agit d'un écoulement subcritique, la hauteur d'eau se trouve au dessus de h_c , différents profils sont possibles en fonction de si la hauteur se trouve en dessous, au dessus ou au niveau de la hauteur uniforme.

Une chose à ajouter est qu'il est possible que l'écoulement passe d'un profil M3 à un profil M2, grâce à un ressaut hydraulique. Le ressaut hydraulique est une variation de hauteur sur une distance très courte, celle-ci permet de franchir la hauteur critique. Une visualisation de ce phénomène est disponible à la Figure [5.3].

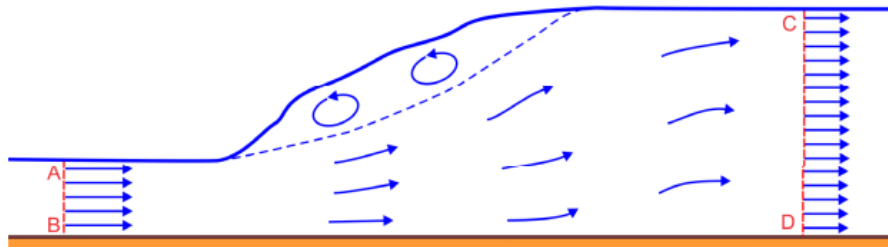


FIGURE 5.3 – Ressaut hydraulique [31]

6 Forces

Il peut être utile de séparer tous les types de forces hydrauliques qui agissent sur un bâtiment lors des crues. Afin de connaître tous les paramètres qui influencent la force résultante. Les paramètres les plus évidents, sont la force hydrostatique et la force hydrodynamique celles-ci sont expliquées dans les Sections [6.1] et [6.2]. La force due à l'impact des débris, est également un paramètre à prendre en compte. En effet, lors de crues, des débris parfois très importants sont transportés par l'eau, lorsque ces débris impactent une construction, les dégâts peuvent être importants. Les impacts de ces débris ont été analysés dans le mémoire CHAVET et KRINGS [4]

Ce mémoire va se focaliser sur les forces qui agissent dans un écoulement sans débris.

6.1 Forces hydrostatique

La pression hydrostatique est liée au poids d'eau au dessus d'un point. Elle dépend donc uniquement de la profondeur d'eau, et de sa densité. Elle sera donc plus importante au fond du canal et sera nulle à la surface de l'eau. La force hydrostatique agit toujours perpendiculairement à la face sur laquelle elle agit, peu importe l'orientation de celle-ci, dans notre cas, la boîte ayant toutes ses faces verticales, ces forces hydrostatiques seront donc toujours horizontales. Si la hauteur d'eau est constante autour d'un obstacle, la force hydrostatique résultante est donc nulle, mais dans le cas d'un écoulement, la hauteur ne sera pas constante autour de la boîte, nous ne pouvons donc pas négliger cette partie lors du calcul de la force totale.

Sur la Figure [6.1], est imagée la force hydrostatique qui agit sur une face de notre boîte.

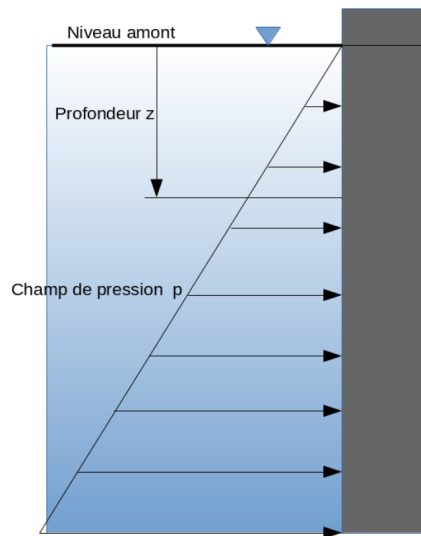


FIGURE 6.1 – Représentation des forces hydrostatiques [19]

La pression hydrostatique en un point se mesure à l'aide de cette formule :

$$P = \gamma H \quad (6.1)$$

où γ est le poids volumique de l'eau (9810 N/m^3), et H est la hauteur immergée en mètres. Cette pression s'exprime en N/m^2

Pour un cas donné, la pression dépend donc uniquement linéairement de la hauteur d'eau. La force totale qui s'exprime sur une face verticale peut donc s'obtenir en intégrant la pression, voici la formule de la force hydrostatique sur une face.

$$F_{st} = \frac{\gamma A_i H}{2} \quad (6.2)$$

où A_i est la surface immergée de la face en m^2 .

6.2 Forces hydrodynamique

Une donnée qu'il faut également prendre en compte est la force hydrodynamique. Celle-ci est due au mouvement de l'eau autour de la boîte.

Pour prendre en compte toutes les forces dues à la vitesse de l'écoulement, il faut prendre en compte tous les paramètres visibles à la Figure suivante [6.2].

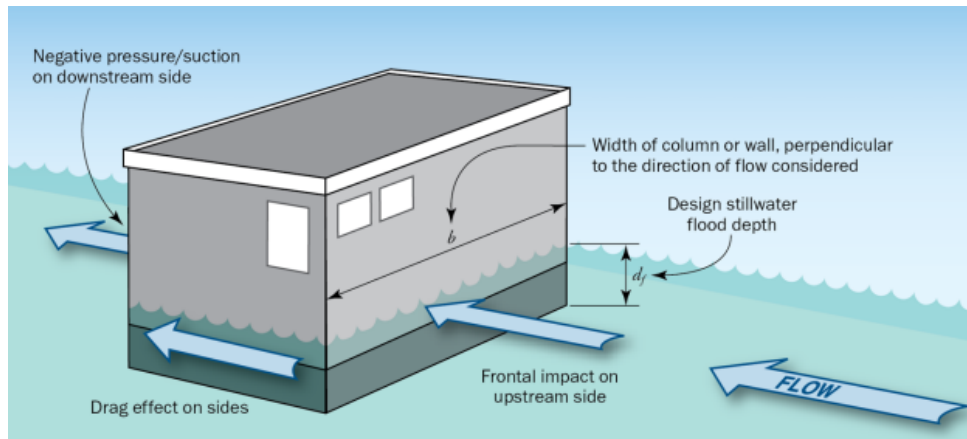


FIGURE 6.2 – Représentation des forces hydrodynamiques [7]

Sur ce schéma, est présenté une force qui agit sur la face amont de l'écoulement due à la collision entre l'eau et la paroi de la boîte, une autre force qui agit comme traînée sur les faces latérales et enfin une force de succion à l'arrière du bâtiment. Les forces de succions et de traînées étant bien plus faibles que les forces dues à la collisions entre l'eau et la face avant, seront négligées dans nos analyses.

Dans le cas de cette étude, la boîte ne sera pas perpendiculaire à l'écoulement, il faut donc considérer les composantes de la vitesse qui agissent perpendiculairement aux 2 faces avant. Afin de connaître la force qui agit sur une face de façon frontale à l'écoulement, nous pouvons utiliser la formule [6.3], cette formule est valable lorsque la vitesse est constante sur l'entièreté de la face considérée.

$$F_{dyn} = \frac{\rho v_{\perp}^2 A_i}{2} \quad (6.3)$$

où ρ est la masse volumique de l'eau [kg/m^3], $v_{\perp}$ est la composante de la vitesse orthogonale à la face [m/s] et A_i est l'aire immergée de la face [m^2].

Cette formule montre bien l'influence de la vitesse sur la force, la force dépend du carré de la vitesse, pour réduire la force totale, il sera primordial de réduire la vitesse.

Dans des cas réels, la force hydrodynamique est particulièrement élevée lors de l'impact initial de l'écoulement sur la structure. Par la suite, cette force sera moins importante, l'énergie cinétique étant en partie convertie en énergie potentielle au pied de la paroi. Le niveau d'eau s'élève alors devant la face du bâtiment, formant une sorte de « mur d'eau » qui freine l'écoulement localement. Ce mur avec une hauteur d'eau plus importante est maintenu par la vitesse de l'écoulement. Il en résulte une augmentation de la force hydrostatique exercée sur la structure, tandis que la composante hydrodynamique est moins importante.

7 Application à un écoulement transitoire

Un écoulement transitoire est un écoulement dont les grandeurs caractéristiques telles que la vitesse, la hauteur d'eau ou le débit varient avec le temps. Ce type d'écoulement apparaît généralement lors de changements de conditions en amont ou en aval, comme une ouverture de vanne ou l'arrivée d'une onde de crue.

Il est assez intéressant de différencier l'écoulement transitoire en plusieurs étapes clés. Dans chaque étape, les intensités et allures des forces ne seront pas les mêmes, et les causes de rupture ne seront pas nécessairement les mêmes non plus. Les ruptures peuvent être dues à un pic de force, une force présente sur une durée trop importante, un moment de force trop important à la base du bâtiment, etc.

Dans ce cas d'écoulement transitoire, nous allons considérer une simulation d'une grande quantité d'eau qui serait lâchée ce qui pourrait arriver lors d'une crue. Ce type d'écoulement est appelé une rupture de barrage. En effet, lors de crues, des pics de débit sont assez fréquents lorsqu'un obstacle (une voiture, un muret, ...) se déplace ou cède, cela engendre un pic de débit en aval. Des écoulements transitoires sont comme vu précédemment surtout présents lors d'inondation par ruissellement.

Lors d'une rupture de barrage, un pic de débit atteint soudainement les structures situées en aval. Ce pic se traduit par l'arrivée brutale d'une grande masse d'eau, provoquant une augmentation rapide du débit. Celui-ci reste ensuite relativement constant pendant le temps que l'eau stockée en amont se vide, avant de diminuer progressivement. Dans le cadre de ces essais, cet écoulement peut être représenté par plusieurs phases. Ces phases seront déterminées en fonction des forces qui agissent sur la boîte.

RYCKAMANS et SOARES-FRAZAO [28] décrit plusieurs phases lors d'un écoulement transitoire formé par une rupture de barrage. Ces différentes phases vont de l'impact à la phase quasi-permanente et sont expliquées ci-dessous.

7.1 Phase 1 : Impact

Lors d'un essai avec rupture de barrage, la première phase est l'impact, lorsque la vague arrive sur la construction. Il y aura d'importantes éclaboussures sur les faces amont de la boîte. RYCKAMANS et SOARES-FRAZAO [28] indique que la pression lors de l'impact initial peut atteindre 1.5 à 3 fois la pression maximale observée après l'impact initial. Ces pressions seront cependant de très courtes durées et locales, ce qui limite ses effets. Pour cette étape, la force hydrodynamique sera majoritairement présente du au grand volume d'eau qui vient impacter la boîte. Lors de cette phase, la hauteur maximale sera observée.

7.2 Phase 2 : Force maximale locale

Les éclaboussures créées lors de l'impact reviennent vers l'amont et se mêlent avec l'eau supplémentaire qui arrive, cela crée une zone de remous et de turbulence. Ces turbulences introduisent des pressions sur les faces avant de la boîte. A ces pressions s'ajoutent, les

pressions hydrostatiques qui dépendent de la hauteur d'eau. Lors de cette phase, la force maximale sera observée sur les faces avant de la boîte.

Cette phase avec la phase 1 seront principalement analysées car elles représentent un risque majeur pour les constructions, comme expliqué la force maximale agit lors de cette phase et cette force maximale sera donc analysée en détails.

7.3 Phase 3 : Phase transitoire

Durant cette phase une réduction de la force est observée, cette réduction peut aller jusqu'à 60% et atteindre un minimum local. Ensuite une nouvelle légère augmentation constante de la force est observée.

7.4 Phase 3b : Déviation du flux

Dans notre cas, du à la largeur limitée du canal, un flux revient sur la boîte après avoir été repoussé par les bords du canal, cette nouvelle augmentation du débit recrée un léger pic de force. Cette augmentation du débit est encore plus présente avec une barrière de protection, car la barrière aura tendance à repousser l'écoulement vers les bords.

7.5 Phase 4 : État quasi-permanent

Quelques dizaines de secondes après l'ouverture de la porte, l'écoulement est stabilisé dans le canal, avec une légère diminution du débit du au fait que le réservoir en amont n'est pas infini. Le niveau d'eau autour de la boîte diminue donc lentement, les pressions autour de la boîte diminuent donc également légèrement de façon constante.

7.6 Phase Permanente

Lors d'une phase permanente, les paramètres de l'écoulement ne varient plus, c'est pourquoi, nous ne verrons pas cette phase dans les essais de rupture de barrage, cependant les mémoires BONSEMBIANTE [2] et ADYNS et ADRIAENS [1], discutent de cette phase avec et sans barrière de protection.

Quatrième partie

Essais en laboratoire

Cette section analyse les essais expérimentaux réalisés dans le canal du Laboratoire d'Essais Mécaniques, Structures et Génie Civil (LEMSC) de l'École Polytechnique de Louvain. Ces tests sont donc des simulations de ruptures de barrages qui ont été réalisés par Charles Ryckmans et Lorenzo Bonsembiante en 2023. 31 tests ont été réalisés au total. 3 tests expérimentaux seront analysés plus en profondeur et seront présentés en détails dans ce mémoire. Enfin, une analyse statistique sera réalisée à la fin de cette section pour connaître les paramètres qui influent le plus la force sur la boîte.

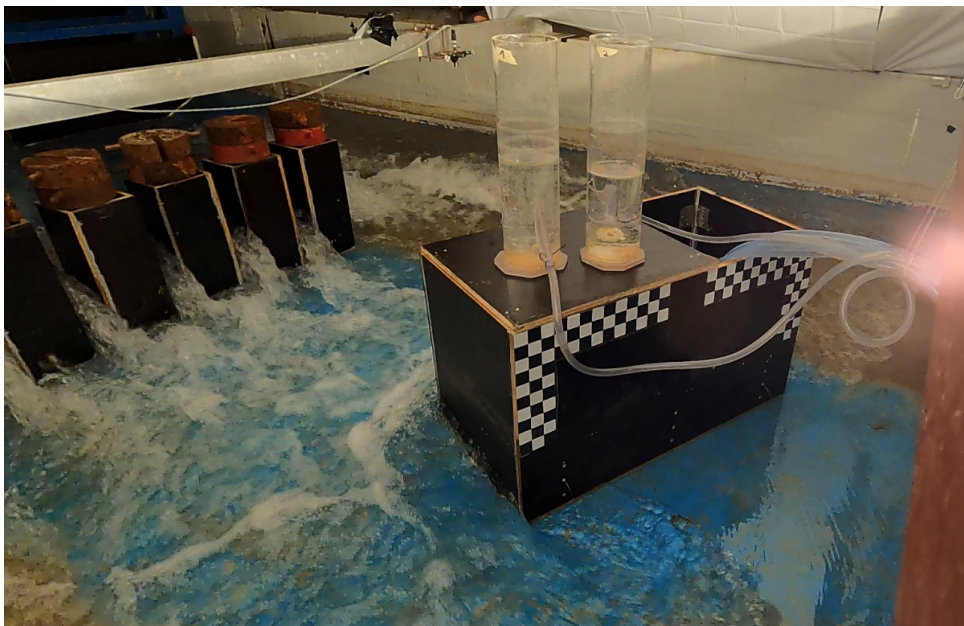


FIGURE 7.1 – Photo prise lors d'un essai

8 Représentation du laboratoire

Le laboratoire est représenté aux Figures [8.1] et [8.2]. Il s'agit d'un canal horizontal de 36,18 mètres de long et 3,6 mètres de large. Aux extrémités du canal, s'ajoutent des parties plus larges. Ce canal est séparé en 2 parties par une porte verticale de 1m de large, une partie amont et une partie aval. Ces parties font respectivement 9,64 et 26,08 mètres de long.

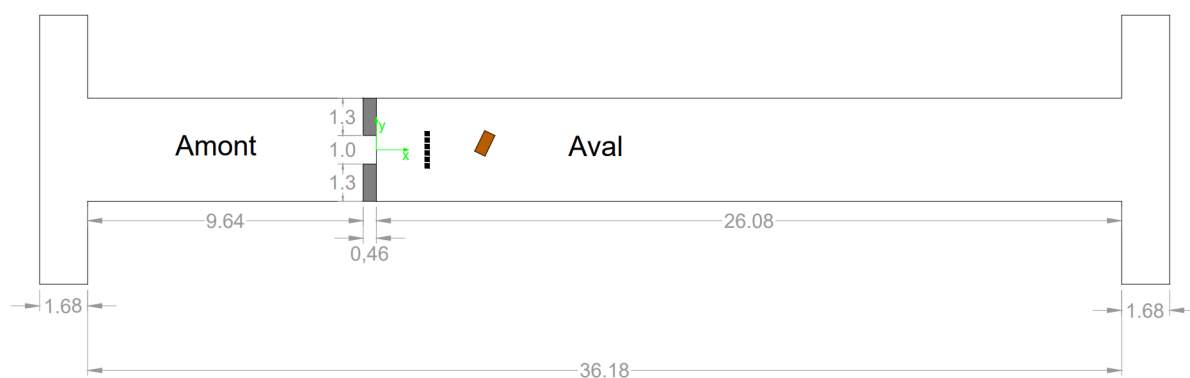


FIGURE 8.1 – Vue en plan du laboratoire d’essai

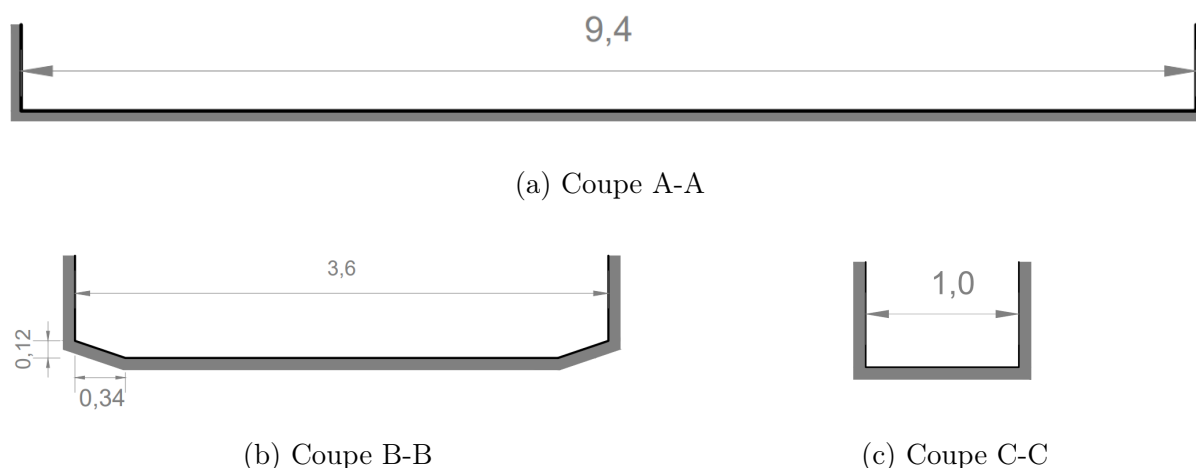


FIGURE 8.2 – Différentes coupes du laboratoire d’essai (les cotes sont en mètres)

Pour réaliser les expérimentations, des hauteurs d’eau différentes seront initialement imposées de part et d’autre du canal. Une hauteur d’eau plus élevée sera placée en amont, tandis qu’une hauteur plus faible sera maintenue en aval. Au début des tests, cette porte va s’ouvrir rapidement de sorte à ce que l’on puisse considérer son ouverture comme une rupture de barrage instantanée. Une grande quantité d’eau va donc s’écouler soudainement dans la partie aval. Cette rupture de barrage se fait sur une largeur partielle du canal (1 mètre). Sur le côté avec la hauteur d’eau la plus faible (côté aval) va être placé une boîte rectangulaire (0.8 X 0.4m) légèrement décalée par rapport au centre du canal à 3.44 m de la porte. Cette boîte sera positionnée avec un angle de 64° , il s’agit de la boîte sur laquelle toutes les mesures de pressions seront faites. Ensuite devant la boîte sera positionnée une barrière, celle-ci est composée de plots carré de 0.162m de côté. Cette barrière aura plusieurs paramètres qui seront modifiés lors des essais, comme sa distance de la boîte : X , l’écart entre les plots : t , le nombre de plots : n , la porosité ρ et la longueur de la barrière : L (dans la suite du mémoire, L^* sera considéré comme la longueur de la barrière divisée par la largeur du canal pour représenter le taux d’obstruction).

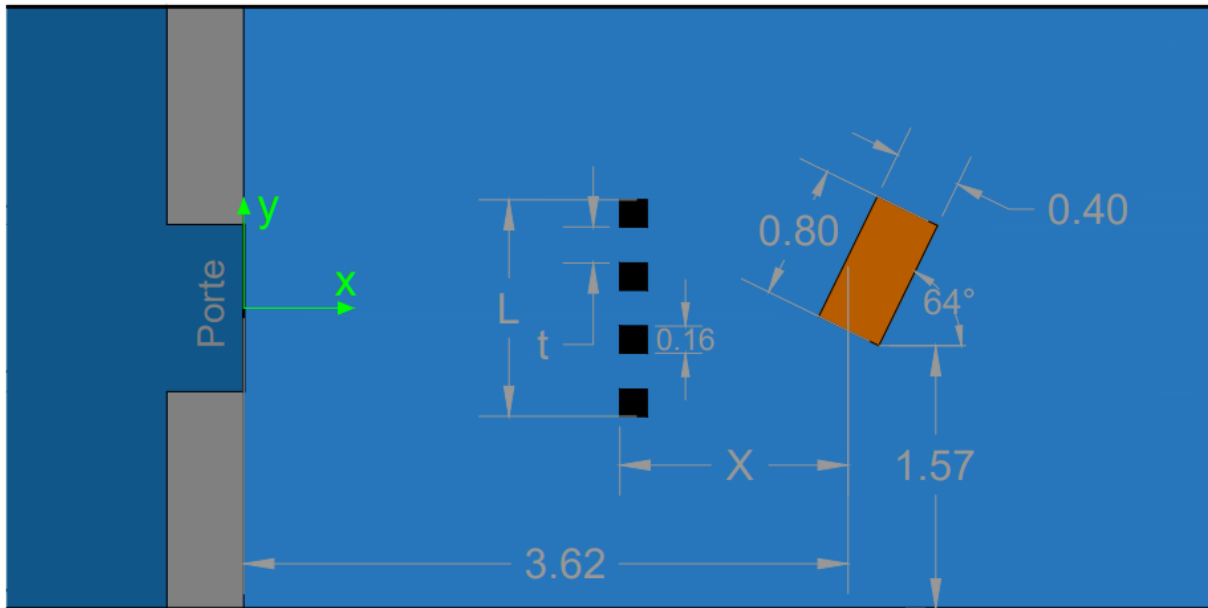


FIGURE 8.3 – Représentation du canal d'expérimentation avec la boîte et une barrière (les côtes sont en mètres)

8.1 Paramètres de l'expérimentation

Lors de ces tests, différents paramètres ont été modifiés. Faire des tests en modifiant ces paramètres permet de connaître l'influence de ceux-ci sur la force mesurée.

Tous les paramètres modifiés sont présentés dans les sections suivantes.

Il est utile de noter que certains paramètres sont modifiés mais non repris dans la liste car ils dépendent uniquement de paramètres notés dans la liste. Par exemple le nombre de plots carrés dans la barrière. Ce paramètre n'est pas repris car il dépend uniquement de la longueur et de la porosité de la barrière.

8.1.1 Différence de hauteur initiale

La partie amont et aval de la porte seront remplies à des hauteurs d'eau différentes avant l'ouverture de la porte. Cette différence de hauteur va créer un écoulement transitoire vers l'aval. Varier ce ΔH va varier l'intensité du front qui va impacter la barrière et ensuite la boîte. Lors de ces tests, les hauteurs ΔH varieront entre 200 et 400 mm.

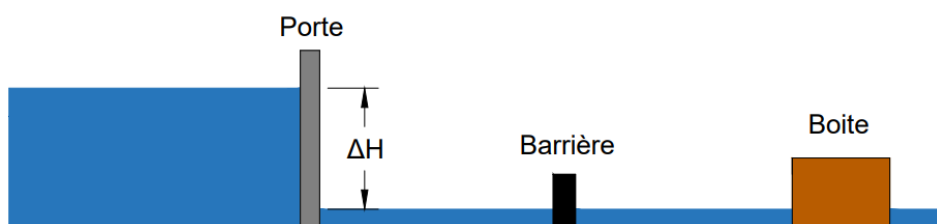


FIGURE 8.4 – Illustration de la différence de hauteur initiale

8.1.2 Distance entre la boîte et la barrière

Comme précisé précédemment, la boîte a une position fixe dans le canal mais la barrière quant à elle peut varier de position pour s'éloigner et se rapprocher de la boîte. Lors de ces tests, 3 distances ont été utilisées. La mesure X sera utilisée et représentera la distance dans la longueur du canal entre la face amont de la barrière et le milieu de la grande face avant de la boîte. Lors de ces tests, la distance X variera entre 1.365 et 2.465.

Cette distance X est illustré à la Figure [8.3]

8.1.3 Porosité de la barrière

Des espaces peuvent être présents entre les plots représentant la barrière. Ces espaces vont également varier en fonction des essais. Ils seront pris en compte avec la variable de porosité. Cette variable se calcule comme ceci :

$$\rho = \frac{n \cdot d}{L} \quad (8.1)$$

Où n est le nombre de plots carré dans la barrière, d est la dimensions de ces boîtes (0.162 m) et L est la longueur de la barrière comme représenté à la Figure [8.3].

Cette porosité variera entre 0 et 0.5.

Dans un cas réel, une porosité peut représenter une haie d'arbustes, un parking avec des voitures garées, etc.

8.1.4 Longueur de la barrière

La longueur de la barrière sera représenté par le taux d'obstruction qui peut être calculé comme ceci :

$$L^* = \frac{L}{3.6} \quad (8.2)$$

Où L est la longueur de la barrière comme représenté à la Figure [8.3] et 3.6 est la largeur du canal en mètre.

Ce taux d'obstruction variera pour nos essais entre 0.222 et 0.666.

9 Matériel utilisé

La barrière et la boîte sur laquelle les observations seront mesurées ont été réalisées en bois, les dimensions ont été mentionnées ci-dessus à la Figure [8.3].

9.1 Mesures hauteurs

Des jauges ont été utilisées pour connaître les hauteurs d'eau à différents endroits dans le canal. Ces hauteurs ont été mesurées grâce à des sondes Baumer qui offrent une précision de mesure à ± 0.4 mm, cette donnée de précision a été obtenue par étalonnage. Ces sondes ont été placées à 3 endroits différents, les coordonnées des points sont accessibles dans le Tableau [9.1] ainsi que une visualisation des positions dans le canal à la Figure [9.1]. Une

sonde a été placée à l'amont de la porte, cette sonde permet de connaître la hauteur d'eau exacte au début de l'essai et permet aussi de se rendre compte lors des comparaisons avec la simulation numérique si celle-ci prédit correctement le vidage de la partie amont et donc le débit qui traverse la porte. Les deux autres sondes sont donc placées dans la zone aval. Leur position fait en sorte que lors de tous les essais réalisés, ces capteurs soient dans tous les cas à l'aval de la barrière. La sonde *J2* a été placée plus au centre du canal que la sonde *J3*, de manière à comparer l'influence de la barrière sur la même section du canal mais à des largeurs différentes.

	X[m]	Y[m]
J1	2.65	1.15
J2	2.65	-0.6
J3	-1.48	-0.38

TABLE 9.1 – Positions des sondes Baumer

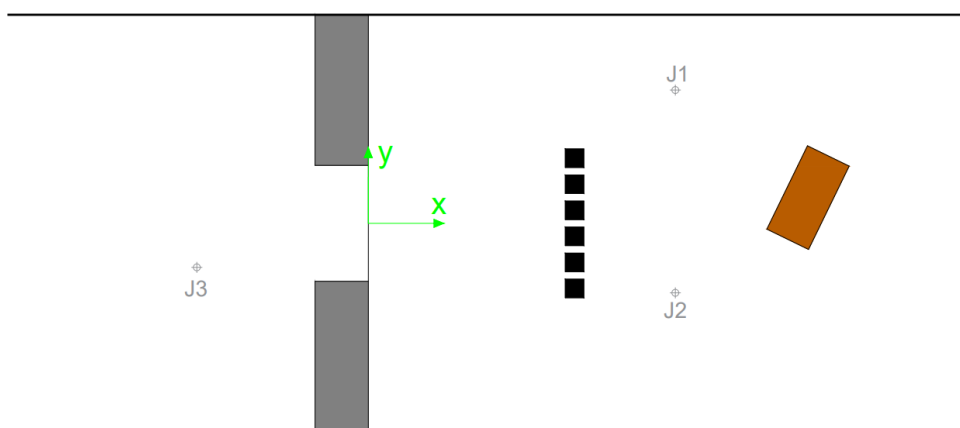


FIGURE 9.1 – Positions Baumers dans le canal

Ces sondes Baumer mesurent la hauteur d'eau dans le canal en émettant des ultra sons à une fréquence de 10 Hz. En fonction du temps que met cet ultra son à réfléchir sur la surface de l'eau et revenir vers le capteur, il est possible d'en déduire la distance entre le capteur et la surface d'eau et donc la hauteur d'eau. Plus d'informations sont disponible sur le site web du fournisseur [8]. Cette méthode est très pratique car elle n'est pas en contact avec l'eau et elle ne modifie donc pas l'écoulement.

9.2 Mesures pressions

Une autre mesure indispensable est de connaître les pressions qui agissent sur la boîte pour ensuite pouvoir par intégration connaître la force totale de l'écoulement sur cette boîte. Pour cela, des capteurs ont été placés sur les faces de la boîte. 9 capteurs ont été placés sur les grandes faces et 3 sur les petites faces, comme montré à la Figure [9.2]. Des capteurs de pression différentielle Druck LPM 9000, ont donc été utilisés pour ces tests,

ceux-ci ont une fiabilité déterminée par calibrage de ± 0.1 mbar.

Dans ce rapport, les forces de succion et de trainée sont négligées car elles n'impactent que légèrement la force totale lors de l'impact. Pour cela, les forces ne seront considérées que sur les faces avant.

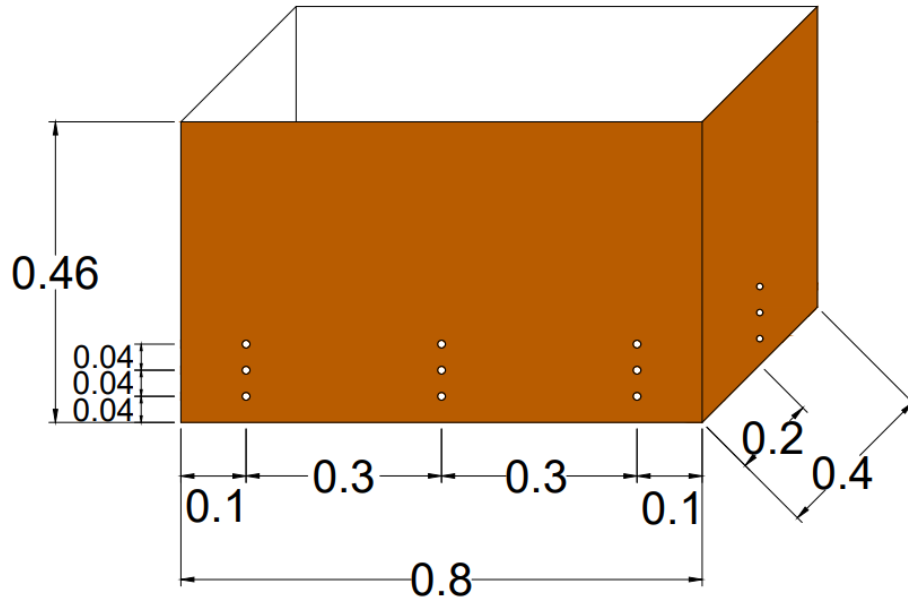


FIGURE 9.2 – Placement des capteurs de pressions sur la boîte (les côtes sont en mètres)

Avec ces capteurs de pressions, il est possible de connaître la pression en ces points, il faudra donc ensuite faire une interpolation pour connaître les pressions en tous points sur toute la face. Des techniques différentes vont être utilisées en fonction de la face, mais ces 2 techniques se basent sur le fait que la pression sera plus faible en surface du aux pressions hydrostatiques qui vont diminuer.

9.2.1 Grande face

Concernant la grande face, 9 capteurs sont présents, ceux-ci prennent des mesures avec une fréquence de 10 Hz, ce qui représente en moyenne une mesure tous les 0.1 seconde. Avec ces mesures, nous allons interpoler linéairement ces pressions pour obtenir les pressions à un même instant, en effet les 9 capteurs donnent une pression toutes les 0.1 secondes mais les pressions de tous les capteurs ne sont pas nécessairement prises en même temps. Avec ces 9 pressions pour un certain temps, nous allons utiliser la fonction *linalg.lstsq* de la librairie *numpy* en Python, cette fonction va donner les paramètres *a*, *b* et *c* qui définissent un plan à partir de ces 9 valeurs et qui minimise la somme du carré des écarts entre ce plan et les pressions mesurées. Une fois ce plan de pressions obtenu, on considère uniquement la partie positive, en supposant que la surface de l'eau est l'endroit où la pression est nulle.

Une fois la pression interpolée pour chaque position de la face, il ne reste plus qu'à intégrer la pression sur l'intégralité de la face pour obtenir la force totale sur cette face.

9.2.2 Petite face

Pour la petite face, il n'y a que 3 capteurs de pressions. De plus il n'y a parfois que un seul capteur immergé. Une autre méthode doit donc être utilisée.

Pour cette face, au lieu de prendre un plan, des interpolations linéaires seront faites. Une interpolation sera faite entre le capteur à une hauteur de 0.04m et celui du milieu à une hauteur de 0.08m, cette interpolation détermine la pression entre 0 et 0.08m. Une seconde interpolation linéaire est faite entre le capteur à 0.08m et celui à 0.12m, cette interpolation quant à elle détermine les pressions au dessus de 0.08m.

Cette fois, la même pression sera considérée équivalente sur toute la largeur de la petite face. Il suffit donc une nouvelle fois d'intégrer cette pression sur l'entièreté de la face pour obtenir la force totale sur cette face.

À nouveau, la hauteur d'eau considérée est la hauteur pour laquelle la pression est nulle.

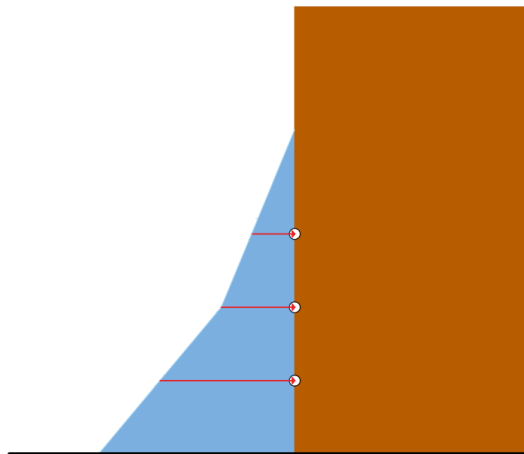


FIGURE 9.3 – Exemple de pressions prises en compte en fonction des 3 pressions mesurées

Une autre méthode qui aurait pu être utilisée pour les 2 faces est d'obtenir les hauteurs devant la face, de façon manuelle ou numérique, en analysant les vidéos des essais. Malheureusement, le faire manuellement pour 31 essais de 30 secondes demande un temps assez important et numériquement des vagues présentent entre les caméras et la boîte créent des approximations trop importantes au niveau des hauteurs prises en compte par les logiciels.

10 Résultats

Ce mémoire va donc principalement traiter l'effet transitoire de la barrière sur la boîte. Les premières secondes seront donc intéressantes à analyser pour ce cas.

Comme expliqué au début de cette section, 3 tests seront analysés plus en profondeur dans ce mémoire, ils ont été choisis pour avoir 3 ΔH différents.

Étant donné le nombre limité de capteurs de pressions à disposition, chaque essai a été réalisé trois fois avec les capteurs de pressions placés à des endroits différents. Les trois capteurs de hauteurs étant présents pour chaque essais au même endroit, il y a la possibilité de comparer les hauteurs des trois tests pour vérifier la répétabilité des essais. Contrairement aux hauteurs, les pressions quant à elles ne sont mesurées que une fois par position, il n'est donc pas possible de comparer les résultats des forces mesurées entre eux.

Lors de ces essais, un temps initial doit être pris en compte, pour ce mémoire, le temps 0 est lorsque la porte du canal d'essai s'ouvre.

Lors des tests, la fin du canal d'essai étant limitée, après un certains temps, pour des écoulement subcritique, la condition en aval se fait ressentir au niveau de la boîte où l'on mesure les forces. Bien évidemment, nous ne voulons pas prendre en compte cette influence dans nos résultats, c'est pourquoi les analyses sont faites sur les 30 premières secondes uniquement.

10.1 Vérifications des résultats

Afin d'être certain que les résultats obtenus en laboratoire soient fiable et que nos méthodes pour en déduire les forces soient cohérentes, des tests doivent être réalisés.

Pour cela, un essai a été répété six fois pour ensuite pouvoir comparer les résultats obtenus et vérifier la répétabilité des tests.

Le test répété avait les paramètres suivant :

ΔH [mm]	X [m]	ρ [%]	L^* [%]
300	1.7	25	44.4

TABLE 10.1 – Paramètres du test de répétabilité

Dans le tableau [10.2], il est possible de voir les forces maximales obtenues pour chaque répétition.

	Force [N]
1	138.69
2	126.04
3	140.92
4	125.87
5	128.57
6	129.18

TABLE 10.2 – Données des tests de répétabilité

Avec ces données pour pouvoir vérifier leur cohérence, il peut être utile de calculer la moyenne, l'écart type et un coefficient de variation qui se calcule comme suit :

$$CV = \frac{\text{écart-type}}{\text{moyenne}} \cdot 100\% \quad (10.1)$$

Voici les résultats obtenus :

Moyenne [N]	Écart-type [N]	CV [%]
131.545	6.571	4.995

TABLE 10.3 – Indicateurs statistiques des tests de répétabilité

Les données donnent donc un coefficient de variation inférieur à 5% ce qui montre que les variations sont raisonnables et que la répétabilité des essais est convenable pour pouvoir en faire des analyses et conclusions.

10.2 Les 3 essais analysés

Comme expliqué précédemment, trois essais seront analysés plus en profondeur, pour cela, des essais avec 3 ΔH différents ont été analysés. Malheureusement, afin d'optimiser le nombre d'essais. La même barrière n'a été testée pour les 3 différences de hauteurs. Les barrières sont donc différentes pour chacun des 3 essais analysés

. Les 3 essais analysés sont les suivant, voici les caractéristiques de chacun :

	ΔH [mm]	$X[m]$	$L^*[/math>]$	$\rho[/math>]$
Essai 1	400	1.7	0.222	0.5
Essai 2	300	1.7	0.444	0.25
Essai 3	200	2.25	0.444	0.5

TABLE 10.4 – Données des 3 essais analysés

Voici maintenant, les représentations imagées du canal pour chaque test, réalisé :

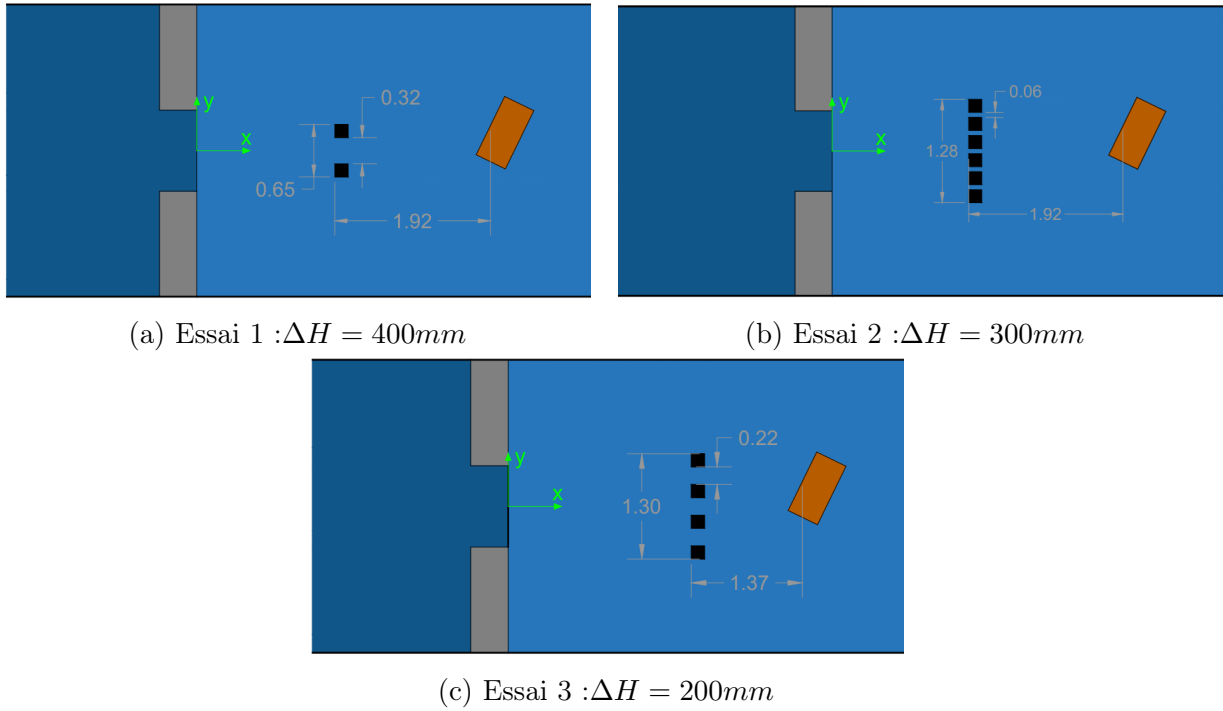


FIGURE 10.1 – Zoom du plan du canal avec la configuration des barrières pour les 3 essais (les côtes sont en mètres)

10.2.1 Hauteurs mesurées

Voici les hauteurs mesurées pour les 3 jauges dans les 3 essais. Pour chaque essai, 3 essais ont été réalisés, il est donc possible de comparer les hauteurs enregistrées qui devraient être similaires. A la Figure [10.2] sont visibles ces trois hauteurs moyennes pour les trois essais, ainsi que les écarts dans lesquelles les 3 mesures se trouvent. Pour rappel, les positions des capteurs de hauteurs sont disponibles à la Section [9.1].

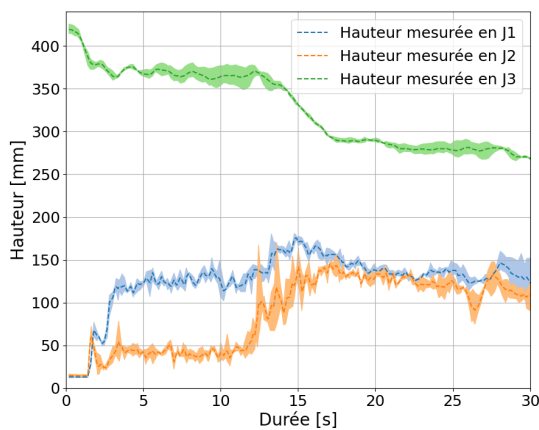
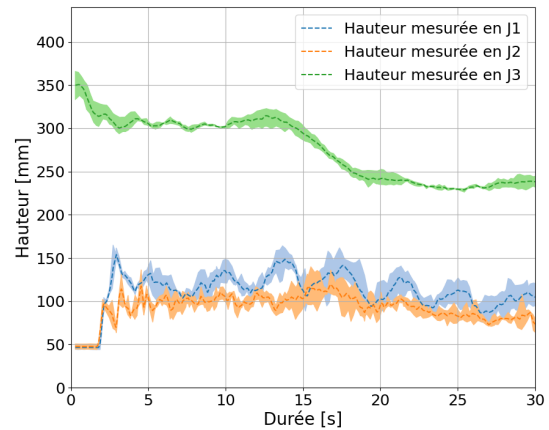
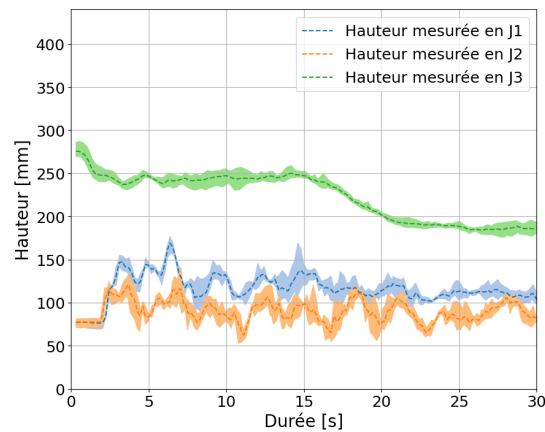
(a) Essai : $\Delta H = 400\text{mm}$ [10.1a](b) Essai : $\Delta H = 300\text{mm}$ [10.1b](c) Essai : $\Delta H = 200\text{mm}$ [10.1c]

FIGURE 10.2 – Hauteurs mesurées aux jauges en laboratoire

Les résultats de ces hauteurs sont assez cohérents, il y a peu d'écart entre les mesures ce qui montre une assez bonne répétabilité des tests.

Détaillons désormais chaque position. Pour rappel, 3 capteurs sont positionnés dans le canal d'essais aux positions $J1$, $J2$ et $J3$. Le détails de leurs positions a été discuté à la Section [9.1].

Premièrement, l'évolution de la hauteur à la position $J3$ a la même allure peu importe la différence de hauteur, ce qui implique que l'évolution du débit qui traverse la porte aura également la même allure. Bien évidemment, étant assez loin à l'aval et de l'autre côté de la porte, la barrière n'aura aucun impact sur l'évolution de la hauteur d'eau en $J3$.

Pour l'essai avec un ΔH de 400 mm (Figure [10.2a]), il est possible d'observer que la

hauteur d'eau en $J2$ augmente environ 10 secondes après la hauteur en $J1$. Cela est dû au fait que la position $J2$ est plus à l'abri de la barrière et un léger ressaut hydraulique se crée devant la boîte, celui-ci va peu à peu se déplacer vers l'amont et atteindre la position $J2$ environ 13 secondes après l'ouverture de la porte. Cette observation peut se faire sur les vidéos de l'essai. A la Figure 10.3, il est possible d'observer l'évolution de ce ressaut à différents intervalles de temps.

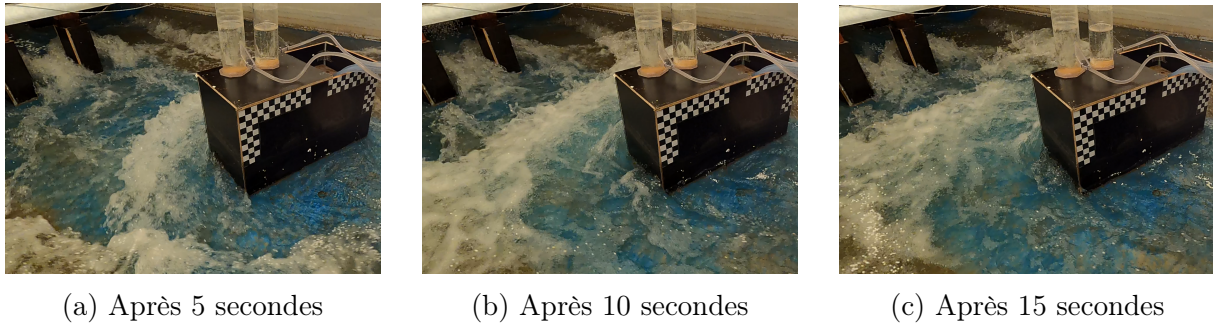


FIGURE 10.3 – Photos de l'évolution du ressaut hydraulique dans l'essai : $\Delta H = 400\text{mm}$

Lors des 2 autres essais, ce comportement n'est pas observé, et leurs allures sont assez similaire.

Pour l'entièreté des essais, les hauteurs d'eau en aval, subissent une augmentation soudaine lorsque la vague arrive, les valeurs de ces augmentations sont directement liées aux ΔH initiaux (Au plus le ΔH sera élevé, au plus le pic sera important). Ensuite les valeurs tournent autour d'une valeur constante, avec des légères vagues qui créent des petites fluctuations. Après un certain temps, les hauteurs ont tendance à diminuer très légèrement, cette diminution est due au fait que le débit commence à diminuer dans le canal du au fait que le réservoir en amont de la porte est de moins en moins rempli.

Une dernière observation concerne les capteurs situés à l'aval de la porte, peu importe l'essai, la position plus centrale ($J2$) aura une hauteur plus faible que celle la plus proche de la rive. Pourtant, le capteur $J2$ est plus proche de la rive que l'extrémité de la barrière dans certains essais, ce qui fait qu'elle n'est pas directement protégée par celle-ci.

10.2.2 Forces calculées

Concernant, les forces, lors de ce mémoire, la résultante des forces sur la face avant et celle de droite sera prise en compte, en effet, les 2 faces arrières seront négligées car elles ont un faible impacts sur la force totale lors de l'impact.

Voici pour les 3 essais les forces résultantes obtenues.

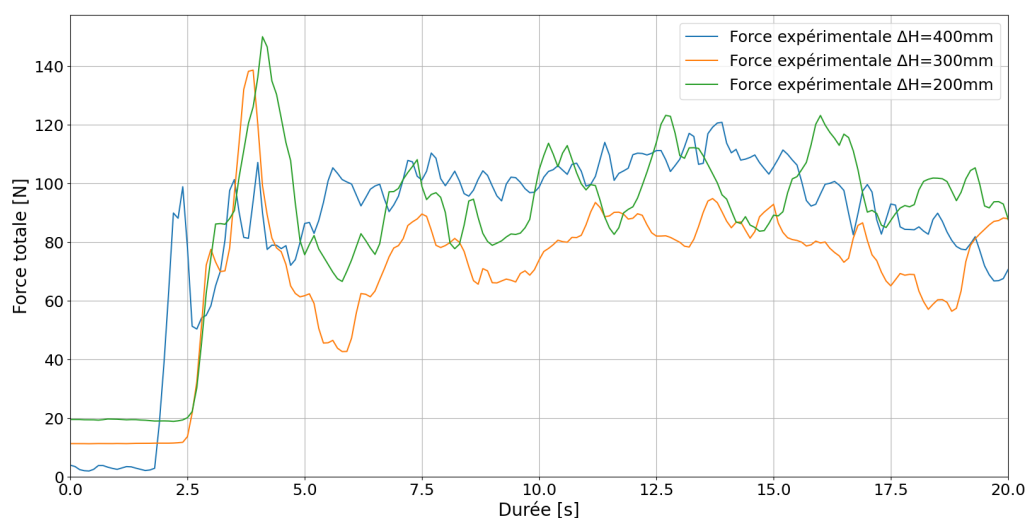


FIGURE 10.4 – Forces expérimentales des 3 essais analysés

Il est assez contre intuitif de se rendre compte que la force maximale est inversement proportionnelle au ΔH pour nos 3 cas. Ceci peut être dû au fait que les hauteurs initiales dans le canal ne sont pas identiques, les forces hydrostatiques sont donc moins présentes pour les ΔH plus élevés. Il est cependant difficile de comparer ce critère car les barrières pour ces 3 cas ne sont pas identiques, il y a donc plusieurs paramètres qui rentrent en compte, l'influence de chaque paramètre sur la force maximale est analysée à la Section [10.3].

Une autre remarque assez intéressante est que au plus le ΔH est élevé, au plus la vitesse de l'écoulement sera rapide, ce qui explique pourquoi, les pics de forces n'agissent pas en même temps. La différence de hauteur étant plus importante, d'avantage d'énergie potentielle est stockée, une fois la porte ouverte, cette énergie potentielle se transforme en énergie cinétique ce qui augmente donc la vitesse de l'écoulement en lien avec la différence de hauteur initiale.

Pour chaque essai, on observe un double pics lors de l'impact, le deuxième pic est supérieur au premier dans le cas des essais avec des ΔH de 200 et 300. Alors qu'il est du même ordre de grandeur pour l'essai avec un ΔH de 400. Ces pics sont également bien visibles sur les vidéos des essais. Les différentes phases expliquées dans la Section [7], peuvent donc être mises en application avec ces essais. Le premier pic est lorsque le front de la vague arrive sur la boîte et crée des éclaboussures, c'est à ce moment que la hauteur d'eau sera maximale devant la boîte. Le deuxième pic est observé lorsque ces éclaboussures retombent devant la boîte et que le flux plus en amont arrive également au niveau de la boîte, lors de ce deuxième pic, la hauteur a déjà légèrement diminué mais les pressions sont maximales.

Après l'impact la force n'est pas constante, elle varie légèrement, ceci est dû à des va-

riations de hauteurs devant la boîte visibles sur les vidéos des essais. Ces variations sont plus importantes pour des ΔH faibles ce qui se confirme avec les données mesurées, les fluctuations après l'impact sont plus importantes pour les petits ΔH .

Dans les étapes de l'écoulement expliquées à la Section [7], ces étapes indiquent que la force sur la boîte est toujours maximale lors de l'impact, ce graphe montre bien que pour le cas avec un ΔH de 400 mm, la force maximale sera atteinte après environ 13 secondes alors que l'impact a lieu un peu avant 2.5 secondes. Dans le cas transitoire avec une barrière la force maximale dans un écoulement n'agit pas toujours lors de l'impact.

Regardons dans quels cas cette force n'agit pas lors de l'impact, au total des 31 essais, la force ne sera pas maximale lors de l'impact pour 9 d'entre eux. Voici la configuration de ces essais :

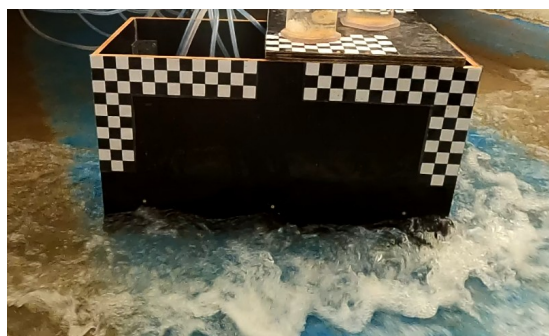
Essai	ΔH	X	L^*	ρ
1	400	1.365	0,444	0,25
2	400	1.915	0,222	0,5
3	400	1.365	0,666	0,5
4	400	2.465	0,666	0
5	300	1.365	0,222	0,25
6	400	2.465	0,444	0,5
7	400	1.365	0,222	0
8	300	1.915	0,44383	0,25
9	350	1.365	0,49932	0

TABLE 10.5 – Configuration des essais dont la force maximale n'est pas atteinte lors de l'impact

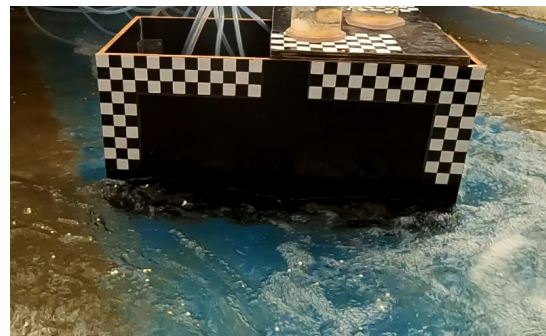
Lorsque l'on analyse les données de ces tests, on remarque assez facilement qu'il ne s'agit que de tests avec un grand ΔH il s'agit pour la majorité, des essais avec une différence de hauteur de 400 mm alors que dans les essais réalisés, les variations de hauteur allaient de 200 à 400 mm.

Ce phénomène peut s'expliquer par le fait qu'une grande différence de hauteur lors de la rupture de barrage implique un volume d'eau plus important stocké dans le réservoir amont. Si cette barrière est plus efficace en rompant le front de la vague avant que celle-ci impacte la boîte, le débit généré sera malgré tout plus élevé et restera sur une durée plus longue. Cette augmentation prolongée du débit crée une élévation progressive du niveau d'eau devant la boîte, ce qui accentue la force exercée sur la boîte quelques secondes après l'impact. La barrière permet donc de bien diminuer l'impact sur la boîte en rompant le front de la vague, mais empêche plus difficilement la montée du niveau d'eau ensuite.

Voici à la Figure [10.5] un exemple de la hauteur d'eau sur la face avant lors du pic de force qui agit lors de l'impact en comparaison avec la hauteur d'eau lorsque la force est maximale. En comparant l'entièreté de la vidéo au graphe représentant la force, on se rend bien compte que la hauteur est maximale au même moment que la force.



(a) Hauteur d'eau lors de l'impact



(b) Hauteur d'eau lorsque la force est maximale

FIGURE 10.5 – Comparaison des hauteurs d'eau sur la face avant de la boîte à 2 moments clés

10.3 Influence des différents paramètres

Dans le cas de l'effet transitoire, ce mémoire se concentre sur l'analyse de la force maximale exercée sur la boîte. Pour ce faire, 31 configurations expérimentales ont été testées et analysées. Pour chacune d'entre elles, seule la force maximale exercée durant les 20 premières secondes de l'écoulement a été retenue, cette valeur maximale comme expliqué précédemment, n'apparaît pas toujours dans la même phase de l'écoulement. Cette force a été mesurée uniquement sur la face avant de la boîte, afin de pouvoir comparer ces résultats avec les résultats obtenus pour les mêmes barrières dans un écoulement permanent. Ces résultats et analyses pour un écoulement permanent ont été réalisés dans le mémoire BONSEMBIANTE [2].

Les valeurs de forces maximales ainsi obtenues ont ensuite été introduites dans le logiciel statistique *JMP* [15]. Ce dernier a permis de développer une formulation permettant de prédire la force maximale en fonction de plusieurs paramètres expérimentaux. Cette relation fait intervenir des combinaisons linéaires, quadratiques et bilinéaires des paramètres définis précédemment : la hauteur d'eau en amont (ΔH), la porosité de la barrière (ρ), le taux d'obstruction (L^*), ainsi que sa distance à la boîte (X).

Dans un souci d'amélioration de la précision du modèle, certains essais ont été volontairement exclus de l'analyse. Deux essais en particulier ont été retirés. Ils correspondaient à des configurations avec des barrières non poreuses ($\rho = 0$), longues (L élevé) et placées très proches de la boîte (X faible). Dans ces cas, l'eau était fortement déviée à côté de la boîte, ce qui empêchait donc tout impact avec la boîte. Les mesures obtenues ne reflétaient donc pas un véritable impact et, par conséquent, leur inclusion dans le modèle avait pour effet de sous-estimer la force d'impact.

Par ailleurs, il est important de souligner que les essais ont été réalisés sur plusieurs semaines. Bien que le canal d'essai soit un circuit fermé, une évaporation progressive de l'eau a été observée au fil du temps. En conséquence, la quantité d'eau présente dans le

canal n'était pas strictement identique d'un essai à l'autre. Ce paramètre, bien que non contrôlé, influence les forces exercées sur la boîte. C'est pourquoi *JMP* l'a intégré comme une variable aléatoire, c'est à dire que sa présence est prise en compte dans l'analyse, mais son influence propre n'est pas interprétée.

10.3.1 Validation du modèle statistique *JMP*

A la Figure [10.6], se trouve pour chaque essai la comparaison entre les forces mesurées et celles obtenues avec la formule du modèle. Des légères approximations sont donc faites, mais celles-ci restent dans une marge d'erreur tout à fait acceptable. Pour vérifier la validité de la formule, il est aussi possible d'analyser le graphe des résidus à la Figure [10.7], celui-ci ne montre aucune tendance, cela prouve donc la qualité du modèle.

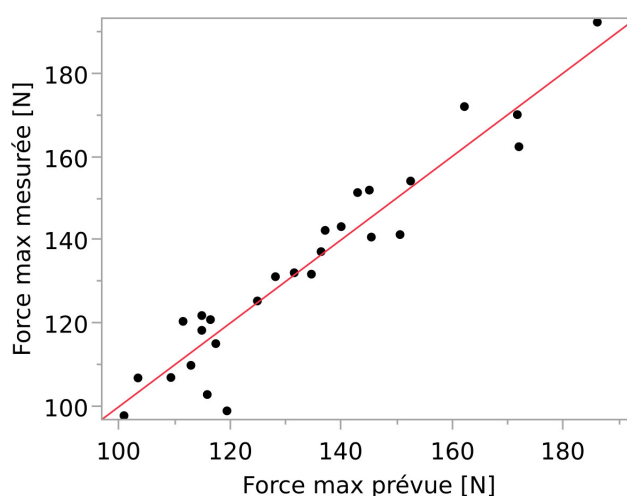


FIGURE 10.6 – Comparaison forces mesurées et prévues

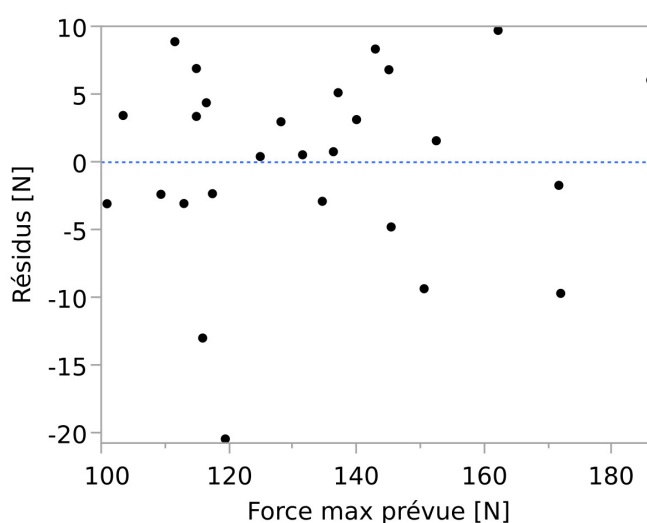


FIGURE 10.7 – Résidus du modèle *JMP*

Sur les 31 essais initiaux, deux ont été exclus de l'analyse pour les raisons évoquées précédemment. Il reste donc 29 essais exploitables. Parmi ceux-ci, 27 ont été utilisés pour construire le modèle dans le logiciel *JMP*. Les 2 essais restants ont quant à eux été volontairement mis de côté dans le but de valider la relation obtenue. En comparant les valeurs prédites par la formulation aux mesures réalisées dans le canal, il est possible d'évaluer la capacité du modèle à reproduire des cas non inclus dans son élaboration. Voici donc les configurations du canal pour ces deux essais.

Validation	ΔH	X	L^*	ρ
1	300	1.915	0.4438	0.25
2	400	1.715	0.4438	0.375

TABLE 10.6 – Paramètres des essais de validation du modèle

Voici ensuite les résultats de ces essais de validation.

Validation	Force mesurée [N]	Force prédite [N]	Erreur relative [%]
1	118.4	117.30	0.93
2	129.29	136.62	5.67

TABLE 10.7 – Comparaisons des valeurs mesurées et prédites

Ces 2 essais montrent donc des erreurs relatives raisonnables, la force prédite est correcte à 5% près. Sachant qu'en mesurant la répétabilité des essais, le coefficient de variance était de 4.99%. Ce modèle statistique montre des résultats fiables.

Le modèle a été testé avec des paramètres situés dans certaines marges spécifiques. Il est donc important de souligner que la validité des résultats en dehors de ces plages de valeurs n'est pas garantie. Ces plages de valeurs sont disponibles aux Tableau [10.8]. Par ailleurs, ce modèle est adapté au cas particulier du canal étudié, et ne peut pas être généralisé à l'ensemble des configurations possibles. Par exemple, la présence de parois latérales (à gauche et à droite du canal) influence significativement les résultats obtenus. Néanmoins, l'analyse des phénomènes observés permet de dégager certaines tendances et de mieux comprendre l'influence relative des paramètres dans des cas plus généraux.

Paramètres	Borne inférieure	Borne supérieure
ΔH	200	400
L^*	0.222	0.666
X	1.365	2.465
ρ	0	0.5

TABLE 10.8 – Plages de valeurs des essais en laboratoire

10.4 Analyse du modèle statistique *JMP*

Avec cette analyse de vérification du modèle, il est désormais possible de se focaliser sur l'influence de chaque paramètre et de comprendre le modèle afin de trouver la meilleure barrière de protection.

Le logiciel *JMP* fournit également un indice qui indique les paramètres les plus influents dans le modèle, ceux-ci sont une première bonne analyse pour se rendre compte du cas où un paramètre aurait très peu ou inversement énormément d'importance. Avec ces données, *JMP* donne 3 critères qui influent fortement la force sur la boîte en aval. Ces paramètres sont la différence de hauteur ΔH , le taux d'obstruction de la barrière et la multiplication de ces 2 paramètres. Les autres paramètres influencent aussi la force mais de façon moindre.

Pour évaluer l'influence d'un paramètre, le logiciel *JMP* utilise la p-value. Elle provient d'un test d'hypothèse statistique dont l'objectif est de déterminer si l'effet observé d'un paramètre est suffisamment marqué pour être considéré comme réel, et non dû au hasard.

Plus précisément, la p-value correspond à la probabilité d'observer un effet au moins aussi extrême que celui mesuré, sous l'hypothèse nulle, c'est-à-dire l'hypothèse selon laquelle le paramètre n'a aucun effet sur la variable dépendante.

Une p-value faible indique que l'effet observé est peu probable s'il n'existait réellement aucun lien. On rejette donc l'hypothèse nulle et on considère que le paramètre a une influence statistiquement significative.

À l'inverse, une p-value élevée suggère que les résultats peuvent être dus au hasard. On ne rejette pas l'hypothèse nulle, et l'effet du paramètre n'est pas considéré comme significatif.

Ainsi, la p-value permet d'identifier quels paramètres ont une influence notable dans le modèle et doivent être retenus dans l'analyse. Voici donc le tableau suivant qui montre la p-value de chaque paramètre utilisé pour ces essais. Ces paramètres sont triés du plus influents au moins influents.

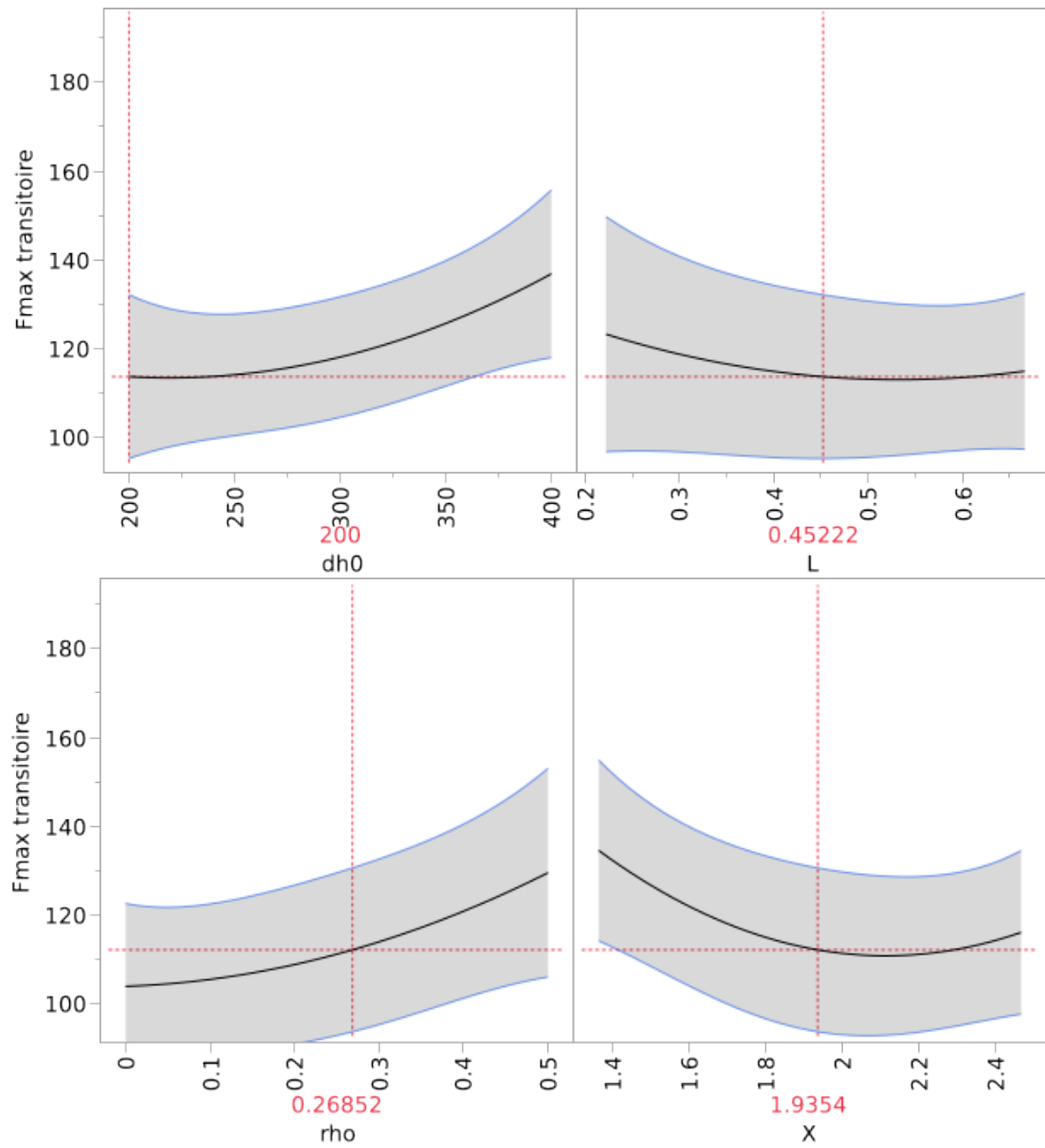
Voici un bref rappel du lexique utilisé :

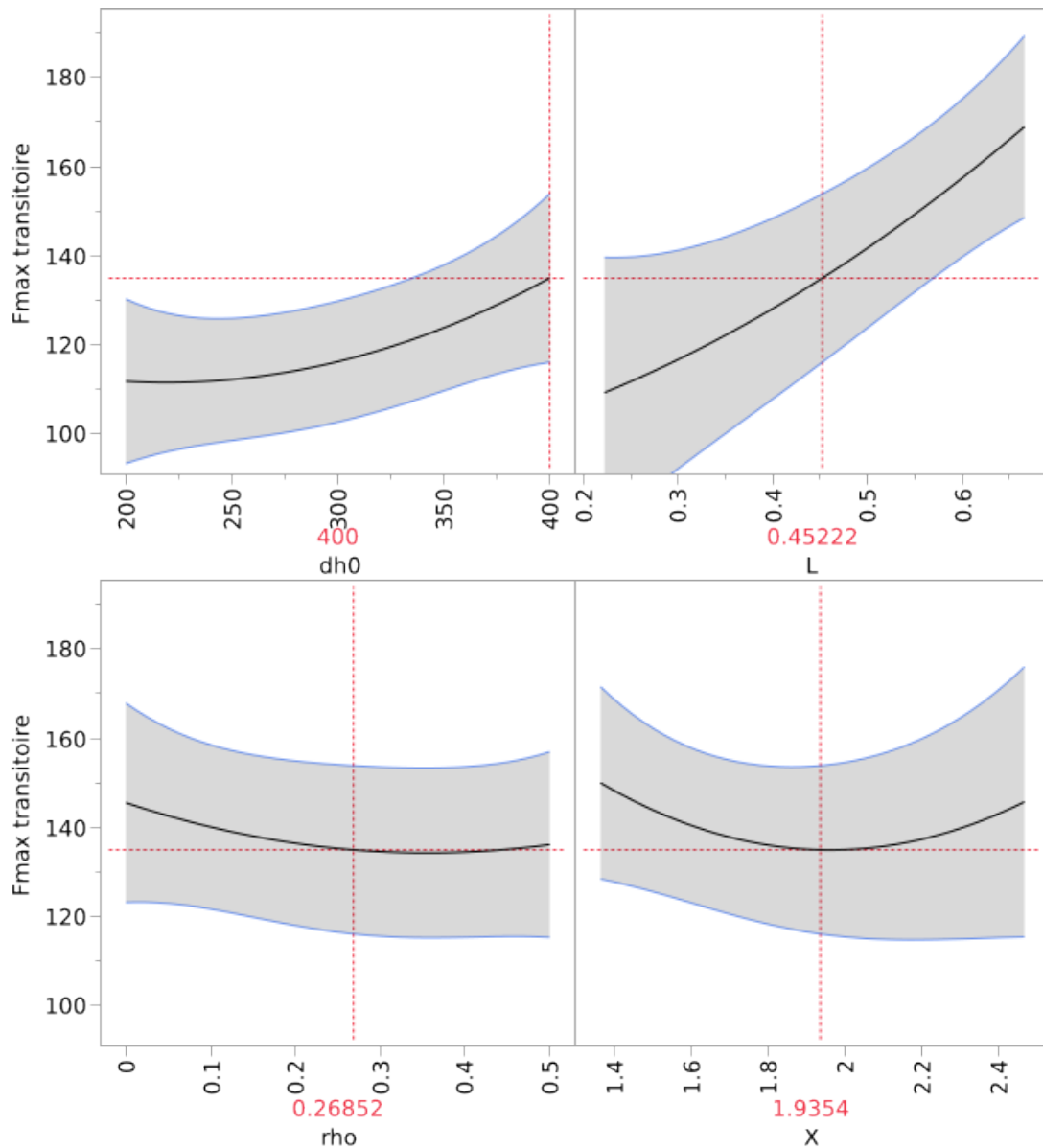
- ΔH : Différence de hauteur initiale entre le canal amont et aval
- L^* : Longueur relative de la barrière
- ρ : Porosité de la barrière
- X : Distance entre la barrière et la boîte

Paramètres	p-value
$\Delta H \cdot L^*$	0.0084
L^*	0.0257
ΔH	0.0265
$\Delta H \cdot \rho$	0.0542
X^2	0.0690
ρ	0.1357
$\rho \cdot L^*$	0.2307
$(\Delta H)^2$	0.2689
X	0.2720
$X \cdot \rho$	0.3082
L^{*2}	0.3662
ρ^2	0.3790
$\Delta H \cdot X$	0.4458
$L^* \cdot X$	0.5715

TABLE 10.9 – p-values des différents paramètres

Une information particulièrement intéressante à tirer de ce modèle est l'influence qu'a un paramètre sur l'évolution d'un autre. Pour cela, les graphiques suivants permettent de visualiser la force résultante pour une configuration donnée. Chaque sous-graphe montre comment la force varie lorsqu'un seul paramètre est modifié, les autres restant constants. On peut ainsi observer l'influence isolée de chaque variable. Par exemple, en modifiant uniquement le delta de hauteur, on peut constater comment cela affecte la courbe du taux d'obstruction de la barrière. Étant donné que le terme $\Delta H \cdot L^*$ a une influence significative dans le modèle, on s'attend à ce que la modification d'un paramètre modifie sensiblement l'allure de la courbe associée à l'autre. Cette interaction est mise en évidence dans les graphiques présentés ci-dessous.

FIGURE 10.8 – Avec un ΔH de 200 mm

FIGURE 10.9 – Avec un ΔH de 400 mm

Le graphique [10.8] illustre l'évolution de la force en fonction de différents paramètres, dans le cas d'une faible différence de hauteur initiale entre l'amont et l'aval.

Certaines tendances apparaissent comme assez intuitives. La force diminue lorsque la barrière devient plus large ou lorsque sa porosité diminue.

Toutefois, un comportement plus complexe arrive lorsqu'on considère le paramètre de position de la barrière. L'effet quadratique est assez fort prononcé avec un minimum. De plus, la force maximale est observée lorsque la barrière est placée au plus proche de la boîte.

Cette observation pourrait s'expliquer par la configuration du canal, dont la largeur est limitée. Il semble exister une position optimale de la barrière qui minimise la force transmise à la boîte. Cette position permettrait à l'écoulement de contourner efficacement la boîte sans heurter les parois du canal trop tôt, évitant ainsi des réflexions sur ces parois

qui pourraient renforcer l'impact sur la boîte.

A la Figure [10.9] les relations sont différentes, l'allure de l'influence de la longueur s'inverse, une grande différence de hauteur initiale entre l'amont et l'aval fait donc en sorte que la barrière soit moins efficace en augmentant sa longueur. Ceci est probablement dû au fait que à nouveau, une longueur optimale existe afin que l'écoulement contourne la boîte sans non plus rebondir contre les parois et revenir ensuite sur la boîte. Malgré cela, aucun minimum n'apparaît dans l'analyse du fait que cette longueur optimale n'est pas dans l'intervalle de valeurs analysées. La variation de l'influence de la longueur confirme bien le lien présent entre les paramètres ΔH et L^* que le modèle montre comme significatif.

Des graphes similaires peuvent être réalisés pour analyser la variation de longueur de la barrière, ils sont disponibles en Annexe A.

Étant donné le lien fort entre la porosité et la longueur de la barrière, il est possible de faire une variable avec ces 2 variables différentes, cette nouvelle variable est donc l'espace disponible à l'écoulement dans le canal au niveau de la barrière et se définit comme ceci :

$$L_{eff} = (1 - L^*) + rho L^* \quad (10.2)$$

Le premier terme étant la largeur disponible sur les côtés de la barrière et le second terme représente les interstices entre les plots de la barrière lorsque la porosité n'est pas nulle. En faisant cette analyse, les résultats restent cohérents mais les approximations sont légèrement plus importantes qu'avec le premier modèle.

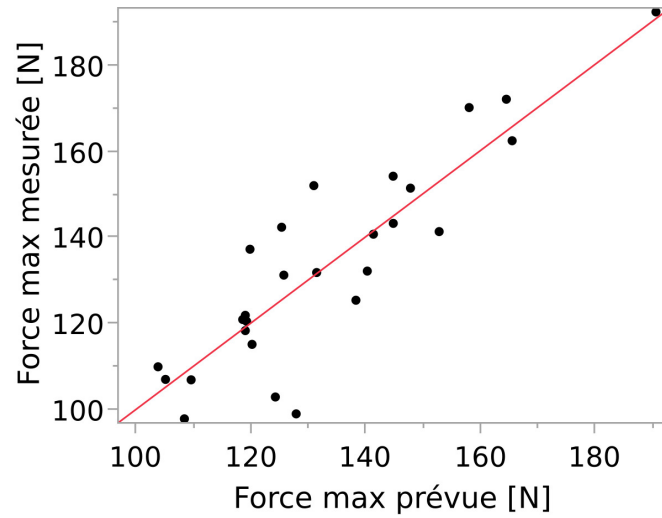


FIGURE 10.10 – Comparaison forces mesurées et prévues avec la nouvelle variable L_{eff}

La perte de qualité des résultats montre donc qu'il est plus intéressant de séparer ces 2 variables. Cela prouve donc qu'il faut bien différencier l'écoulement qui passe à travers la porosité de la barrière de celui qui la contourne.

Les résultats sont moins bons mais restent tout de même raisonnables, il peut donc être utile de tout de même observer quels paramètres influenceront le plus sur la force avec cette méthode. Pour cela il faut toujours regarder les p-values.

Paramètres	p-value
$\Delta H \cdot L_{eff}$	0.0046
ΔH	0.0083
X^2	0.0349
$X \cdot L_{eff}$	0.0788
$(\Delta H)^2$	0.2398
$\Delta H \cdot X$	0.2485
L_{eff}	0.3361
X	0.3562
L_{eff}^2	0.5964

TABLE 10.10 – p-values des différents paramètres du deuxième modèle avec L_{eff}

Ces p-values sont assez cohérentes avec celles du premier modèle. Elles montrent bien l'influence du paramètre ΔH ainsi que son influence liée avec l'espace disponible à l'écoulement L_{eff} . Les 2 dernières p-values les plus faibles montrent que la force dépend de la distance de la barrière de façon quadratique et de la relation entre cette distance et l'espace disponible à l'écoulement. Les autres paramètres se montrent très peu influents.

10.5 Comparaison des résultats avec une autre étude

L'article FANG et al. [5], présenté à la Section [3.1], a également analysé l'influence de certains paramètres.

Les auteurs expliquent que les bords du canal d'essai influencent fortement les résultats. En effet, dans certains cas, après avoir été dévié par la barrière l'écoulement vient frapper le bord du canal pour ensuite converger vers la boîte. Ceci est également le cas pour nos essais.

Plusieurs conclusions ont été formulées il peut donc être utile de les comparer à nos analyses :

Différence de hauteur initiale (ΔH) Cet article montre que plus la différence de hauteur initiale est importante, plus la force exercée sur la boîte est élevée. Cette observation est confirmée par nos mesures expérimentales ainsi que par les analyses statistiques menées dans ce mémoire.

Longueur relative de la barrière (L^*) L'analyse de l'article indique que plus la barrière est longue, plus la force d'impact sur le bâtiment en aval est faible. Nos données suggèrent qu'il existe également un lien notable entre la différence de hauteur initiale et

la longueur de la barrière.

Pour déterminer l'influence de la longueur de la barrière, les auteurs ont réalisé plusieurs essais en maintenant les autres paramètres constants. Il n'est donc pas possible avec ces analyses de comparer l'effet qu'un paramètre a sur un autre. Du au fait que le canal d'essai utilisé soit différent, il est difficile de reproduire les mêmes paramètres. Cependant, dans notre modèle l'influence de la longueur de la barrière est similaire à la leur sous certaines conditions.

Distance entre la boîte et la barrière (X) Selon l'article, plus la barrière est éloignée du bâtiment, plus la force exercée sur celui-ci est importante. Dans notre étude, les résultats suggèrent au contraire qu'il existe une distance optimale pour laquelle la force sur la boîte est minimale, indépendamment des autres conditions testées.

Il est possible que l'intervalle des distances analysées dans l'étude de FANG et al. [5] n'ait pas été suffisamment large pour faire apparaître ce minimum. Une autre hypothèse est que, selon certaines configurations du canal, cette distance optimale pourrait exister dans des cas spécifiques, mais ne pas être présente de manière systématique dans toutes les conditions expérimentales.

10.6 Comparaison avec un écoulement permanent

Les essais avec les mêmes barrières et dans le même canal mais en écoulement permanent ont été réalisés et analysés dans le mémoire BONSEMBIANTE [2]. La comparaison peut donc s'avérer utile.

Lors d'un écoulement permanent, les forces sur la boîte seront principalement des forces hydrostatiques, tandis que les forces d'impact lors d'un écoulement transitoire seront principalement des forces hydrodynamiques. L'influence de chaque paramètre peut donc être totalement différente en fonction du cas.

L'analyse de l'écoulement permanent montre des paramètres d'influence assez semblables avec une forte influence du débit qui dans notre cas est lié au ΔH . Cependant la longueur de la barrière n'avait montré qu'une faible influence ce qui n'est pas le cas dans un écoulement transitoire. Ceci signifie donc que lors de l'impact ce paramètre a une influence mais si le débit reste ensuite constant, ce paramètre deviendra négligeable. Ceci peut être du au fait que à long terme, le niveau d'eau va augmenter surtout avec une barrière poreuse. Ceci va donc impliquer des forces hydrostatiques importantes. Alors que à court terme, une barrière même avec une forte porosité va briser le front de la vague d'impact ce qui va réduire cette force d'impact.

Cinquième partie

Simulations numériques

Les simulations numériques ont été réalisées avec le code de calcul *Watlab*, ce code de calcul a été créé par FRAZÃO [9] et a ensuite été maintenu et amélioré par l'équipe hydraulique de l'École Polytechnique de Louvain. Le but de cette simulation numérique est donc d'obtenir des données sur l'écoulement comme la hauteur et la vitesse de l'eau. Ces données sont utilisées avec différentes méthodes afin de connaître la force qui agit sur un bâtiment. Il est donc utile de vérifier que les résultats obtenus avec ces différentes méthodes soient bien cohérents avec les essais réalisés dans le canal. Cette vérification permettra donc d'avoir une certaine confiance en la simulation et envers les méthodes présentées afin de pouvoir les mettre en œuvre dans des cas réels comme des villes et ainsi simuler des écoulements avec des barrières comme des haies, des voitures ou même d'autres bâtiments.

Les simulations numériques sont un vrai plus pour bien évidemment pouvoir prévoir les efforts qui pourraient agir sur les structures en cas de crues, celles-ci peuvent être utilisées lors de conception de bâtiments ou de réhabilitations d'ouvrages. Connaître leur degré de précision dans chaque cas est donc primordial pour la conception d'ouvrages.

11 Watlab

Les simulations numériques sont réalisées sur *Watlab*. *Watlab* est un code de calcul de volume fini qui permet de reproduire un écoulement en 2 dimensions en résolvant les équations de Saint-Venant expliquées à la Section 4. *Watlab*, prend donc en entrée un maillage non structuré triangulaire réalisé sur gmsh GEUZAINÉ et REMACLE [10] ainsi que des conditions frontières à ce maillage et des conditions initiales.

12 Maillage

Comme expliqué dans la Section 11, il faut réaliser un maillage de la zone expérimentée pour que *Watlab* calcule l'écoulement sur la zone. Pour cela, l'outil *Gmsh* [10] sera utilisé. Il s'agit d'un programme qui permet de créer un maillage triangulaire. Il est possible de varier la taille du maillage en fonction de la position. Le choix de mailles triangulaires a été fait car les mailles triangulaires sont plus faciles à mettre en place dans des zones complexes, il sera donc plus facile à mettre en place dans des villes avec beaucoup d'obstacles à contourner.

12.1 Conditions frontières et conditions initiales

Pour fonctionner, *Watlab* a besoin de conditions frontières sur les limites du domaine du maillage. Bien évidemment, aucun débit ne peut passer à travers ni les parois du canal, ni les plots de la barrière ni la boîte présente dans le canal. Seul un débit sera autorisé

en sortie du canal. Les conditions frontières sont illustrées à la Figure [12.1] : les lignes rouges représentent une condition qui empêche le débit de passer, tandis que la ligne verte indique une condition qui permet le passage du débit.

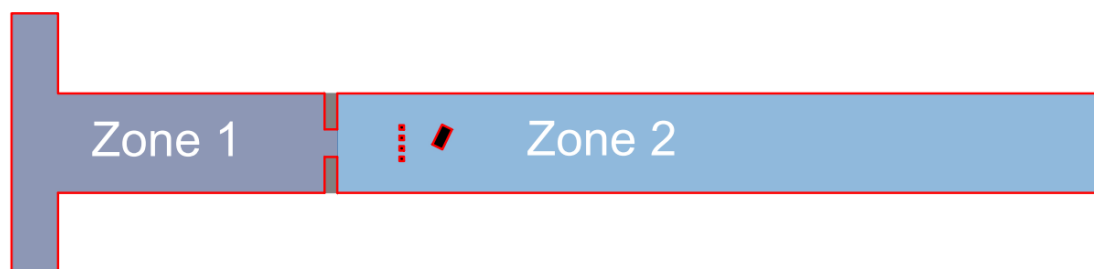


FIGURE 12.1 – Conditions frontières et initiales dans le maillage

Concernant les conditions initiales, *Gmsh* a l'avantage de permettre la définition de régions dans la zone totale, afin que *Watlab* puisse ensuite appliquer des hauteurs d'eau initiales personnalisées dans chaque région.

Sur la Figure [12.1], il est également possible d'observer les conditions initiales. La zone 1 est celle où la hauteur d'eau est la plus élevée, tandis que la zone 2 correspond à la zone avec le niveau d'eau le plus bas. La différence entre ces deux niveaux constitue le ΔH de l'essai.

12.2 Taille caractéristique du maillage

Pour connaître le maillage idéal pour une série d'essais, différents tests peuvent être réalisés. La taille du maillage va bien évidemment fortement impacter la précision des résultats. Plus un maillage sera fin, plus il sera précis, mais un maillage plus fin va aussi considérablement augmenter la durée de la simulation, ainsi que l'espace de stockage nécessaire. Il faut donc trouver le juste milieu.

Une des méthodes qui peut être utilisée est de raffiner uniquement certaines positions clés, dans lesquelles l'écoulement est plus complexe.

Le premier cas est testé avec un maillage composé de triangles de tailles caractéristiques de 10 cm. Avec cette solution, les approximations sont assez importantes. C'est pourquoi la première décision prise a été de raffiner le maillage à l'endroit où l'on calcule les forces, c'est-à-dire autour de la boîte.

Dans le tableau [12.1], différents temps de simulation ont été mesurés en fonction de la taille des mailles autour de la boîte. Cela montre bien l'importance de connaître les positions les plus intéressantes à raffiner. Il ne faut donc bien sûr pas raffiner tout le canal, cela augmenterait beaucoup trop la durée de la simulation alors que la majorité des endroits dans le canal ne sont pas critiques et ne nécessitent donc pas de raffinement.

Taille du maillage caractéristique [cm]	Nombre d'éléments [-]	Durée du calcul numérique [s]
10	36 962	151
1	45 582	1 129
0,4	56 116	7 222
0,1	101 404	25 057

TABLE 12.1 – Comparaison du nombre d'éléments et du temps de calcul en fonction de la taille du maillage autour de la boîte

Voici maintenant les résultats obtenus pour les différents raffinements de maillage autour de la boîte.

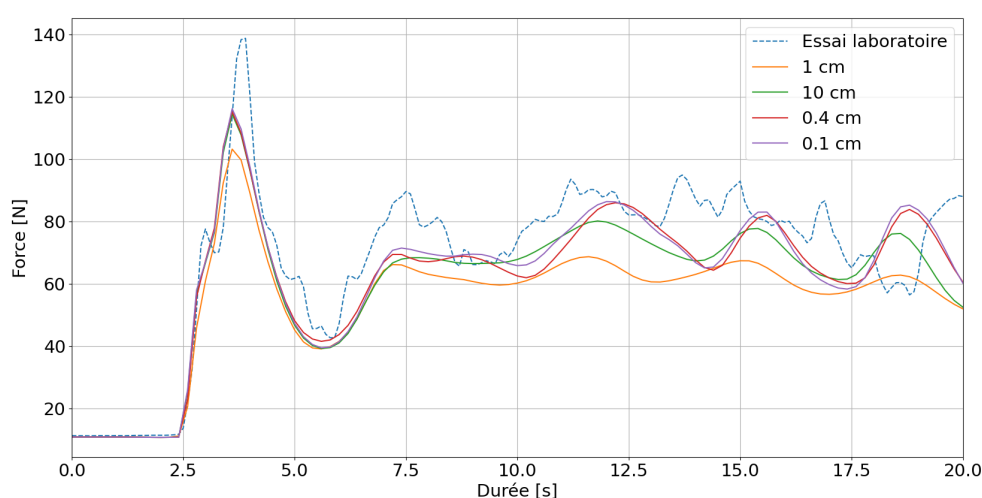


FIGURE 12.2 – Force numérique sur les faces avant en fonction de la taille du maillage autour de la boîte

En analysant ce graphe, on observe une nette augmentation de la précision à l'impact entre un raffinement de 10 à 1 cm autour de la boîte, alors que pour les raffinements de 1, 0.4 et 0.1 cm, peu de changements sont observés au niveau de la force d'impact.

Cependant, dans la zone quasi-statique, il faut atteindre un raffinement de 0.4 cm pour que celle-ci ne s'améliore plus de façon significative. C'est pourquoi un maillage de 0.4 cm sera conservé autour de la boîte lors de toutes les simulations numériques.

Avec ce raffinement, une meilleure précision est obtenue. Malgré cela, l'erreur reste assez importante par rapport aux essais dans le canal. Voilà pourquoi il a également été décidé de mettre un maillage plus fin autour de la barrière. Deux solutions s'offrent à nous : réaliser un maillage plus fin uniquement entre les blocs de la barrière, ou également sur les bords de la barrière, afin d'observer l'amélioration due au maillage sur les côtés de la barrière. Les deux résultats sont disponibles à la Figure suivante [12.3].

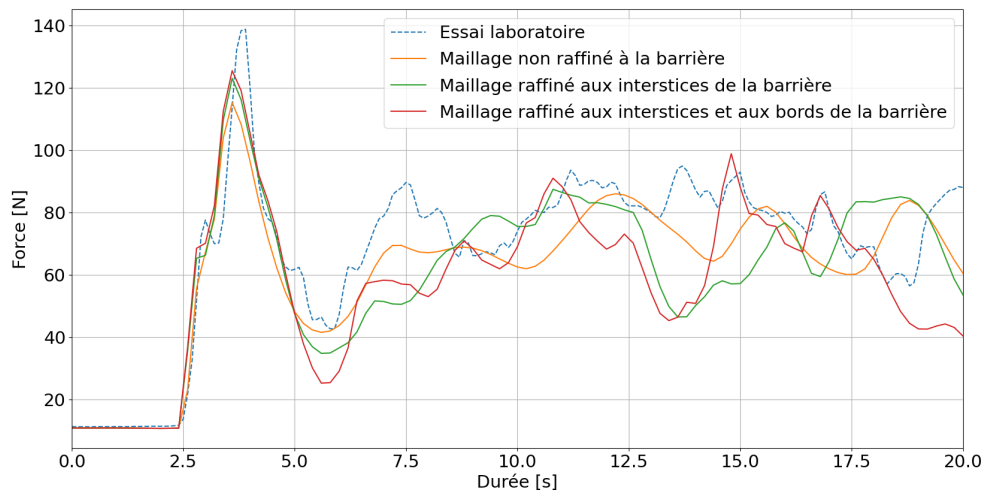


FIGURE 12.3 – Impact du raffinement du maillage autour de la barrière

En comparant les deux solutions, il est possible de se rendre compte de la légère amélioration due à ce raffinement, surtout lors de l'impact. Lors de l'écoulement quasi-permanent, l'ordre de grandeur des forces est correct, mais les fluctuations ne sont pas toujours correctement simulées. Malgré ce raffinement autour de la barrière, le temps de simulation n'augmente pas de façon exagérée. C'est pourquoi il a été décidé, pour toutes les simulations, de prendre un maillage caractéristique général de 10 cm et de raffiner à 4 mm autour de la boîte et de toute la barrière.

Voici un exemple du maillage utilisé lors de ce mémoire pour une simulation :

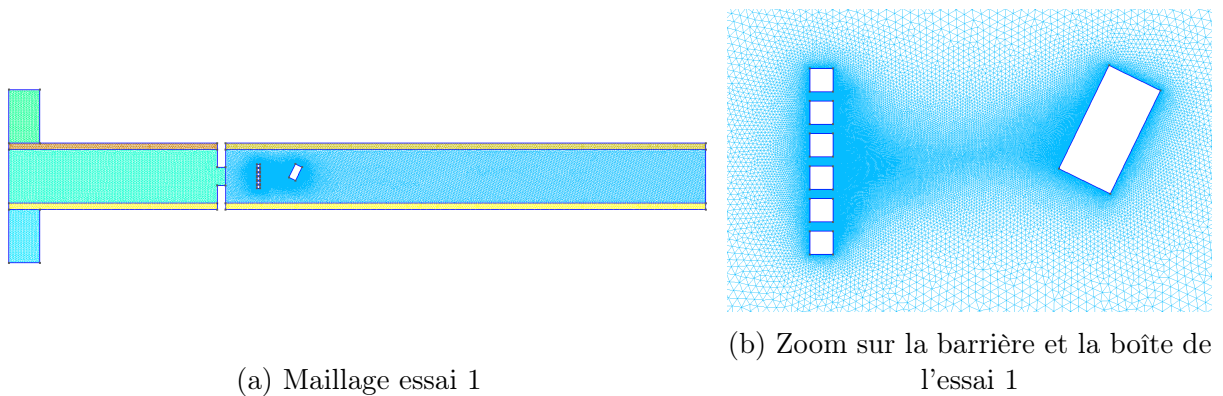


FIGURE 12.4 – Exemple de maillage final utilisé

13 Analyse des hauteurs d'eau aux jauges

Une analyse des hauteurs aux jauges peut se révéler utile. En effet, cette hauteur n'est pas prise en compte dans les calculs des efforts sur la boîte, mais elle révèle des informations

qui peuvent être indispensables sur la précision du modèle numérique. Il s'agit en effet des seules mesures prises dans le canal qui sont directement obtenues par la simulation, sans passer par des méthodes qui réduisent la précision. Voici donc, pour les trois essais, la comparaison entre les hauteurs expérimentales et numériques à la Figure [13.1].

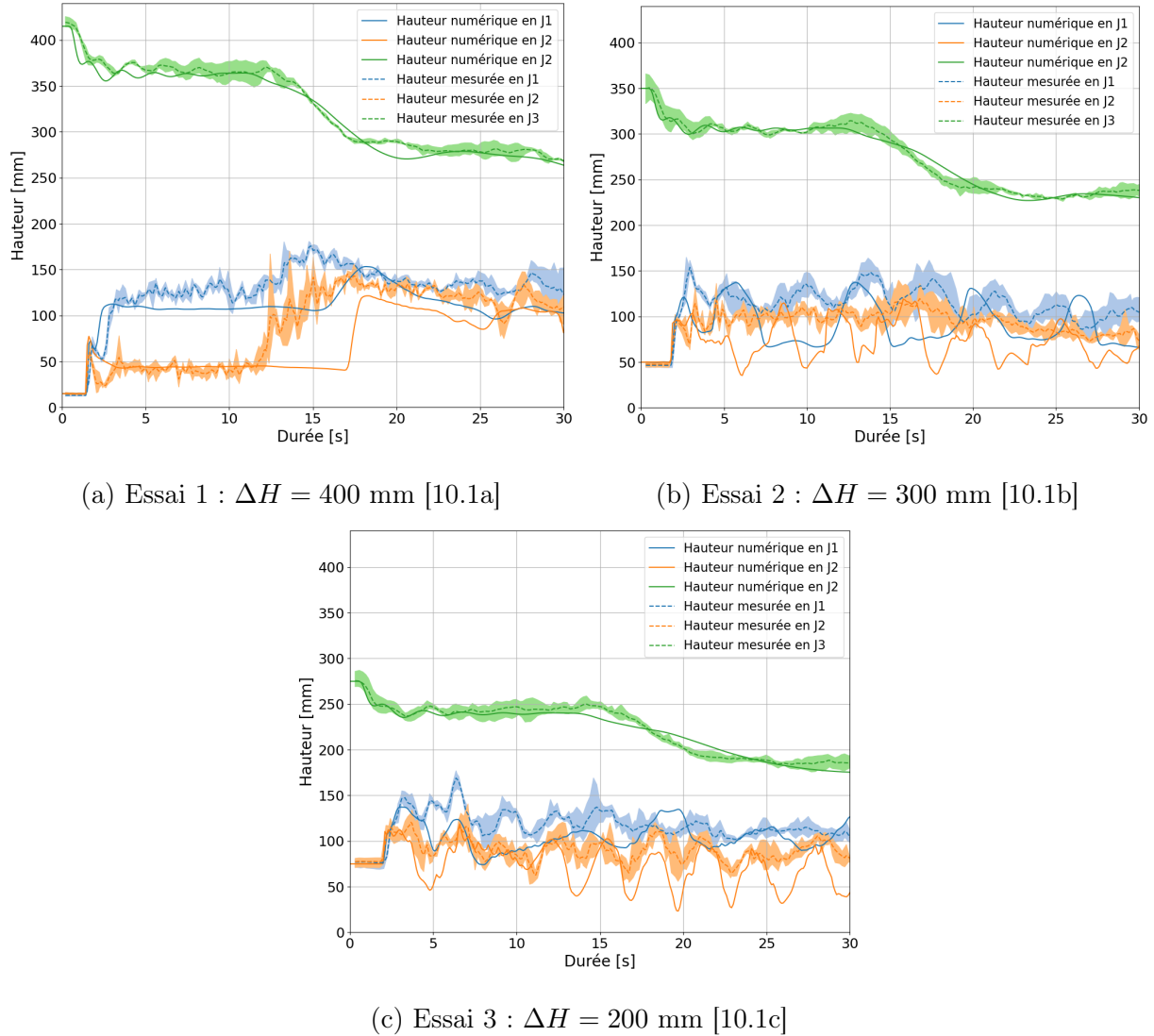


FIGURE 13.1 – Comparaison des hauteurs mesurées dans le canal avec celles obtenues numériquement

Sur ces graphes, on remarque une assez bonne estimation des hauteurs par le modèle numérique. Malgré tout, certains points diffèrent légèrement.

Pour l'essai 1 [13.1a], une différence temporelle se fait au niveau de la position $J3$. L'explication générale de ce ressaut a été donnée à la Section [10.2.1]. Nous voyons ici dans le graphe que ce ressaut agit plus tard pour la simulation numérique que pour les essais en laboratoire. Deux justifications peuvent expliquer cela. La première serait que la simulation numérique sous-estime légèrement la vitesse de propagation de ce ressaut hydraulique.

Cette hypothèse est peu probable, étant donné que pour le reste de la simulation, les temps sont très cohérents. La seconde serait que, étant donné que dans un ressaut hydraulique il s'agit principalement d'eau sous forme de remous avec des éclaboussures, ces éclaboussures et remous sont captés par les capteurs mais pas notés dans la simulation numérique. Cela expliquerait donc que la simulation numérique notifie l'augmentation une fois que ce remous est passé. Cette hypothèse est assez probable. Il faudra donc bien se rendre compte que, dans des zones de remous et d'éclaboussures, la simulation numérique avec *Watlab* ne sera pas optimale. Cela confirme bien nos hypothèses faites lors des explications des équations de Saint-Venant.

Dans les essais 2 et 3 [13.1b], [13.1c], la simulation numérique simule des variations assez importantes du niveau d'eau aux deux positions *J1* et *J2*. Ces variations sont présentes mais légèrement moins prononcées dans le cas en laboratoire. De plus, la hauteur d'eau générale est légèrement plus importante en réalité que dans la simulation. Hormis cela, la simulation est assez fiable, avec des résultats très proches de la réalité, avec notamment une bonne représentation des variations de hauteurs. Ceci montre que nous pourrions nous fier à ces essais numériques pour connaître l'influence des barrières dans un écoulement.

14 Déterminer les forces

Pour déterminer numériquement les forces qui agissent sur la boîte, deux méthodes différentes vont être présentées ci-dessous.

14.1 Méthode 1 : Avec le bâtiment dans le maillage

La première méthode consiste à représenter dans le maillage la zone avec la structure sur laquelle les forces seront analysées. *Watlab* va ensuite fournir les vitesses et les hauteurs d'eau obtenues aux contours de la boîte. Il sera possible de les mettre dans l'équation suivante [14.1], qui représente la somme de la force hydrostatique avec la force hydrodynamique. Elle représente donc la force qui agit en considérant une hauteur et une vitesse constantes sur toute la surface. L'analyse numérique donnera les résultats pour un nombre de points sur le contour de la boîte. Les valeurs des points intermédiaires seront donc estimées comme égales aux valeurs du point le plus proche.

$$F_{tot} = \underbrace{\frac{\gamma H A}{2}}_{\text{Force hydrostatique}} + \underbrace{\frac{\rho A v_{\perp}^2}{2}}_{\text{Force hydrodynamique}} \quad (14.1)$$

Où γ représente le poids volumique ($9810 \frac{N}{m^3}$ dans le cas de l'eau), H est la hauteur d'eau [m], $v_{\perp}$ est la vitesse de l'eau [m/s], A est l'aire sur laquelle on considère cette vitesse et cette hauteur [m²], et ρ est la masse volumique du fluide ($1000 \frac{kg}{m^3}$ dans le cas de l'eau).

Avec cette méthode où la boîte se trouve dans le maillage, celle-ci va « bloquer » l'écoulement. La vitesse devant la boîte sera donc fortement réduite et l'énergie cinétique de l'eau sera transformée en énergie potentielle, ce qui augmentera la hauteur d'eau devant

la boîte et donc la force hydrostatique. La force sera donc principalement liée à la partie hydrostatique de sa formule, hormis lors de l'impact, où l'écoulement viendra frapper les deux faces avant.

Ces forces obtenues via la voie numérique seront donc comparées aux forces mesurées en laboratoire à la Section [14.3].

L'avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas d'expérimentation, toutes les valeurs sont connues et peu d'approximations sont faites. Cependant, le maillage étant raffiné autour de la barrière ainsi qu'autour de la boîte, le nombre d'éléments dans le maillage augmente considérablement, ce qui accroît fortement le temps de calcul de la simulation, et les données prennent également plus de place pour le stockage. Ceci est un désavantage assez important lorsqu'il faut simuler une crue pour toute une ville, par exemple : devoir raffiner tous les bâtiments augmente considérablement la simulation.

14.2 Méthode 2 : Sans le bâtiment dans le maillage

Pour essayer de régler ce problème de durée de simulation lié au raffinage du maillage autour de la boîte, une deuxième méthode va être présentée ici. Cette méthode consiste à ne pas placer dans le maillage la structure sur laquelle l'analyse va être faite. La simulation numérique se fait donc comme si celle-ci n'existait pas. Ensuite, pour calculer la force, il est possible d'utiliser cette formule :

$$F = \frac{1}{2}\rho gh^2 A + \frac{1}{2}C_D \rho v_{\perp}^2 A \quad (14.2)$$

Où A est la surface immergée de la face que l'on analyse [m^2], ρ est la masse volumique (dans ce cas de l'eau claire, $1000 [kg/m^3]$), h est la hauteur moyenne du fluide sur cette face [m], $v_{\perp}$ est la composante de la vitesse moyenne perpendiculaire à la face, et C_D est le coefficient de traînée.

14.2.1 Coefficient de résistance C_r

La formule [14.2] peut être simplifiée en intégrant la partie hydrostatique ($\frac{1}{2}\rho gh^2 A$) dans le coefficient C_D , qui devient alors C_r . Cette simplification rend l'équation plus intuitive : en effet, prendre en compte la force hydrostatique qu'il y aurait avec la hauteur d'eau sans la boîte n'a pas vraiment de sens, étant donné que cette hauteur ne sera pas la même avec la boîte. Séparer les forces hydrostatiques et hydrodynamiques devient donc inutile. Cette équation donne :

$$F = \frac{1}{2}C_r \rho v_{\perp}^2 A \quad (14.3)$$

Le coefficient C_r varie en fonction de l'écoulement, mais aussi de la boîte (forme, matière, orientation, etc.).

Il y a plusieurs moyens d'approximer ce coefficient. Un moyen consiste à l'approximer à

partir des essais en laboratoire. [5] présente un moyen de l'estimer expérimentalement. Cette méthode consiste à déterminer le coefficient C_r à partir de la situation où le flux est à l'équilibre, selon la formule suivante :

$$C_r = \frac{2F}{\rho D h v_{\perp}^2} \quad (14.4)$$

Où D est la longueur du bâtiment $[m]$ et F est la force $[N]$.

Se baser sur l'écoulement à l'équilibre permet d'avoir une très bonne approximation de la force lorsque l'écoulement est stable. Malheureusement, la force sera bien moins précise avec cette méthode tant que l'écoulement n'a pas atteint une stabilité minimale. C'est-à-dire que, lors de l'impact, cette méthode ne sera pas du tout fiable. Cela se confirmera lorsque la comparaison des méthodes sera faite à la Section [14.3].

14.2.2 Vérifier l'équilibre de l'écoulement

Pour vérifier qu'un écoulement est à l'équilibre, comme requis pour utiliser la formule [14.4], deux méthodes seront discutées dans ce mémoire. Ces méthodes sont celles utilisées dans l'article RYCKAMANS et SOARES-FRAZAO [28].

Les deux méthodes analysent l'équilibre de l'écoulement sur la ligne 1, située devant la boîte (voir Figure [14.1]). Cette droite est longue de 0,89 m.

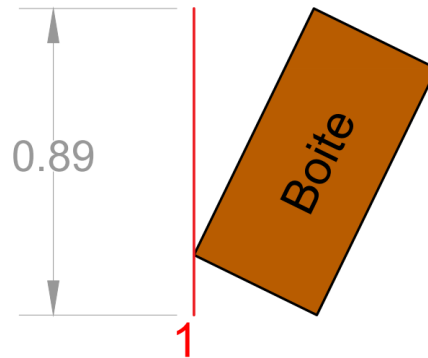


FIGURE 14.1 – Droite 1 sur laquelle l'analyse d'équilibre est faite

La première méthode consiste à évaluer l'évolution du débit sur la ligne. Lorsque le débit devient constant dans le temps, nous pouvons considérer que l'équilibre est atteint selon ce critère.

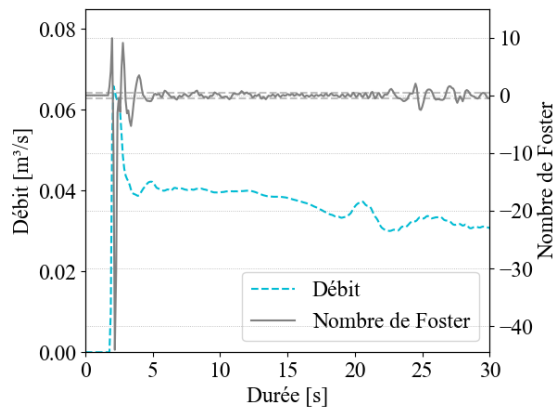
Malheureusement, dans le cas de ce canal avec une barrière, l'équilibre devant la boîte met trop de temps à s'établir. La réserve d'eau en amont est donc trop petite, et ce critère ne sera pas atteint sur une période suffisamment longue pour être exploitable.

Une deuxième méthode consiste à utiliser le critère de Foster. Le nombre de Foster est défini à partir de la variation de hauteur d'eau. Nous allons donc calculer la moyenne de ce nombre de Foster sur la ligne. Lorsque la valeur absolue de la moyenne du nombre de Foster est inférieure à 0,5, nous pouvons considérer l'écoulement comme stable sur cette ligne.

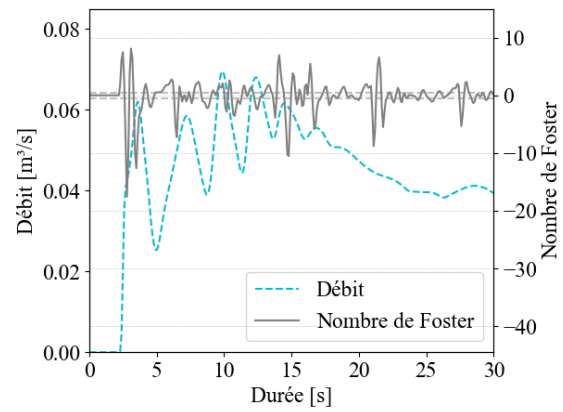
Voici la formule de ce nombre de Foster :

$$Foster = \frac{\partial^2 h}{\partial t^2} \frac{h}{gL} \quad (14.5)$$

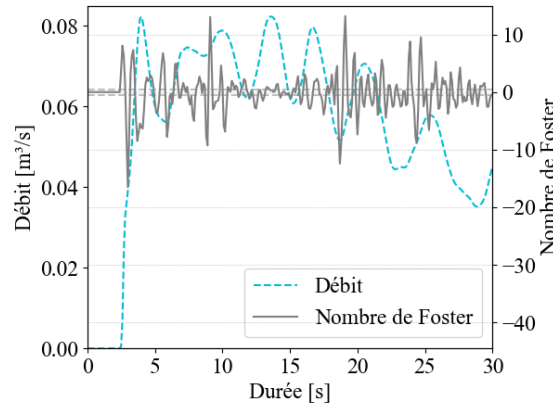
Pour les 3 essais, il est possible de représenter ces 2 critères en fonction du temps, voici ces représentations à la Figure [14.2] :



(a) Essai 1 : $\Delta H = 400mm$ [10.1a]



(b) Essai 2 : $\Delta H = 300mm$ [10.1b]



(c) Essai 3 : $\Delta H = 200mm$ [10.1c]

FIGURE 14.2 – Évolution dans le temps du débit et du nombre de Foster sur la droite 1

Comme il est possible de le voir sur la Figure [14.2], le débit ne présente pas de partie constante lors des essais. Il faut donc analyser le critère de Foster.

Cependant, lors de nos tests, ce critère n'est pas toujours respecté non plus sur une période suffisamment longue. En particulier, lorsque la barrière de protection est plus importante (essais 2 et 3), celle-ci déstabilise l'écoulement et augmente ce paramètre.

Dans le cas où le critère de Foster n'est pas respecté pendant au minimum 2 secondes, une analyse conjointe du débit et du nombre de Foster est réalisée au cas par cas, afin de déterminer la période durant laquelle l'écoulement est le plus stable possible en tenant compte des deux critères. Voici les périodes considérées comme à l'équilibre pour chaque cas. Le fait de devoir être plus souple quant aux critères d'équilibre de l'écoulement peut entraîner une légère perte de précision lors du calcul du coefficient de résistance.

Pour comprendre pourquoi le débit n'est pas constant à long terme, il faut examiner le débit à la porte, comme illustré à la Figure [14.3]. Ce débit augmente rapidement jusqu'à une valeur maximale, reste stable pendant environ 10 secondes, puis diminue. L'équilibre n'a donc pas le temps de s'établir correctement derrière la barrière avec un débit stable d'une durée aussi courte. C'est pourquoi il n'existe pas de situation d'équilibre parfait dans les essais.

Nous pouvons cependant observer que la situation la plus proche de l'équilibre se situe généralement aux alentours de 15 secondes. Cela correspond sur nos graphiques à la fin de la phase de débit constant, avec un léger décalage représentant le temps que cette variation de débit met pour aller de la porte à la droite 1, représentée à la Figure [14.1].

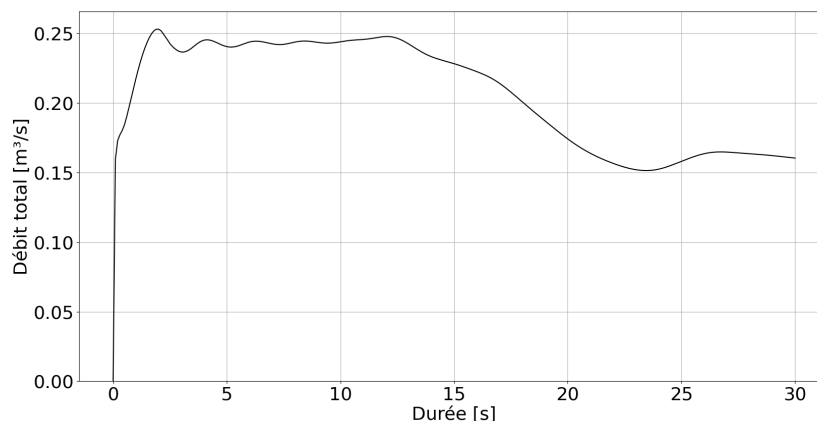


FIGURE 14.3 – Évolution temporelle du débit à la porte pour un ΔH de 300 mm

Voici un tableau récapitulatif présentant les zones d'équilibre utilisées pour chacun des trois essais, ainsi que le coefficient de résistance obtenu à l'aide de la formule [14.4].

Essai	Période d'équilibre (s)		C_r
	Début	Fin	
1 ($\Delta H = 400$ mm)	12.63	15.00	3.83
2 ($\Delta H = 300$ mm)	19.40	22.40	4.79
3 ($\Delta H = 200$ mm)	12.65	15.00	3.65

TABLE 14.1 – Périodes d'équilibre et coefficients de résistance mesurés pour chaque essai

14.2.3 Avantages et inconvénients

Cette technique, sans la boîte dans le maillage, présente plusieurs inconvénients.

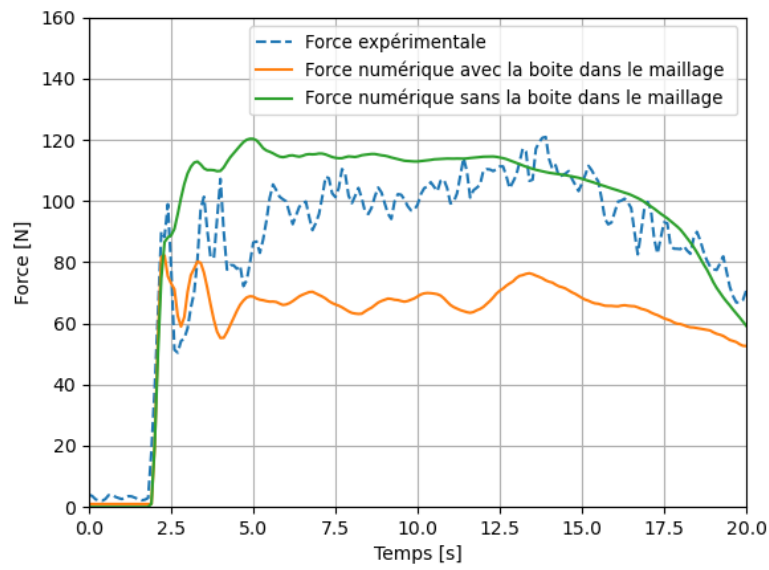
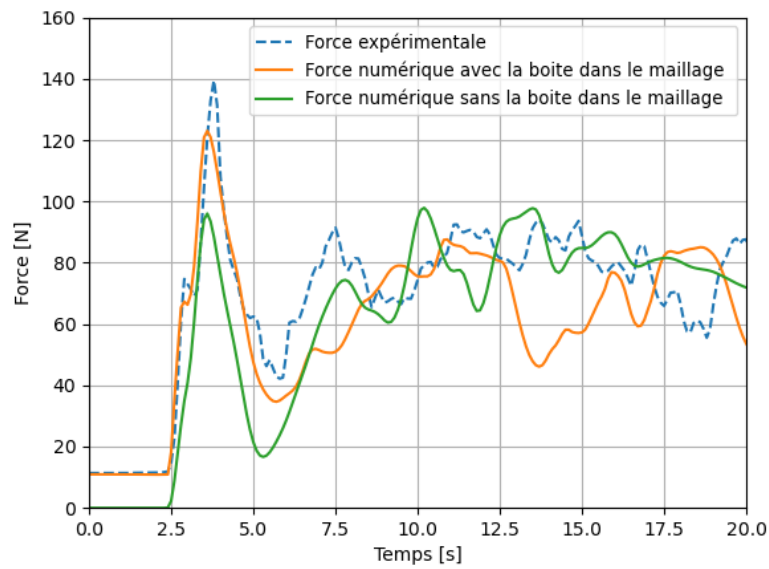
Premièrement, elle nécessite d'avoir préalablement réalisé des essais en laboratoire pour obtenir les forces, ce qui n'est pas toujours possible, notamment pour des études sur des cas réels. C'est pourquoi la littérature propose des tableaux de prédiction des coefficients, mais ceux-ci entraînent souvent des approximations importantes.

Le second inconvénient majeur est que cette méthode n'est pas fiable lors de l'impact, alors que c'est précisément durant cette phase que la force maximale est exercée. Cette méthode est donc plus adaptée aux écoulements permanents.

Elle présente cependant aussi certains avantages. Elle utilise moins d'éléments dans le maillage, car aucun raffinement n'est nécessaire au niveau de la boîte. Le seul raffinement requis est autour de la barrière. Étant donné qu'il y a moins d'éléments à calculer, la simulation numérique est plus rapide et demande moins d'espace de stockage.

14.3 Comparaison des méthodes numériques pour obtenir la force totale

Il peut être intéressant d'identifier la méthode la plus adaptée à notre cas. Nous allons donc comparer aux essais en laboratoire les résultats obtenus avec les deux méthodes.

(a) Essai 1 : $\Delta H = 400$ mm [10.1a](b) Essai 2 : $\Delta H = 300$ mm [10.1b]

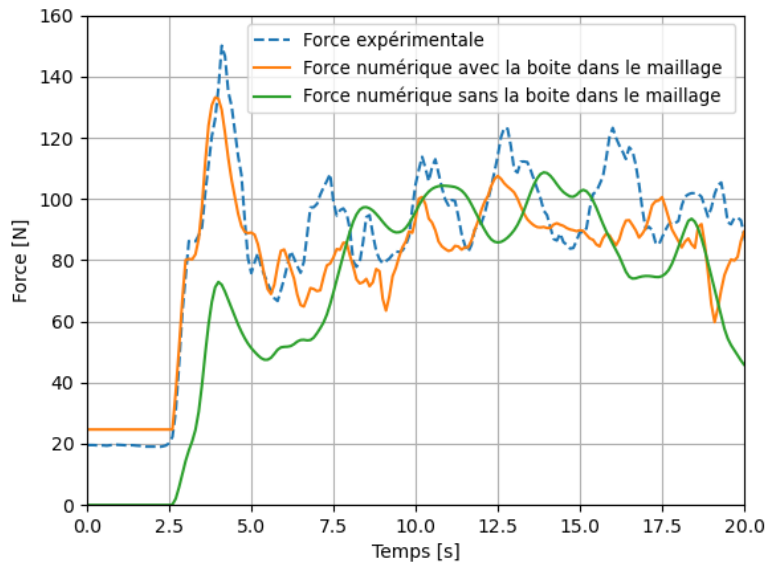
(c) Essai 3 : $\Delta H = 200$ mm [10.1c]

FIGURE 14.4 – Comparaison des méthodes pour obtenir la force totale sur la boîte

Les deux méthodes ont donc des allures assez différentes. Nous pouvons facilement remarquer que la méthode avec la boîte dans le maillage est, comme attendu, plus précise lors de l'impact, alors que la méthode sans la boîte dans le maillage est plus efficace dans la zone à l'équilibre. Cela est assez cohérent étant donné que le coefficient C_r a été défini avec les valeurs de cette zone. Comme prévu, la méthode sans la boîte dans le maillage n'est pas du tout fiable lors de l'impact ; il ne faut donc pas la prendre en compte. Nous observons que le double pic lors de l'impact, expliqué à la Section [10.2.2], est bien repris dans la méthode avec la boîte dans le maillage.

Assez logiquement, pour le cas sans la boîte dans le maillage, la force est nulle avant l'impact car l'équation qui détermine la force [14.3] se base sur la vitesse. Les forces hydrostatiques sont donc prises en compte dans le coefficient de résistance C_r , mais celui-ci est multiplié par la vitesse, qui est nulle avant l'impact. Cette méthode n'est donc pas valable non plus pour estimer les forces hydrostatiques avant l'impact.

Malgré cela, les simulations numériques prédisent assez bien l'écoulement observé en laboratoire. Elles prennent donc correctement en compte les barrières ainsi que leur influence sur les hauteurs et les vitesses.

Dans ce mémoire, une attention prioritaire va être portée sur l'impact ; il est donc primordial de se baser sur la méthode avec la boîte dans le maillage. C'est pourquoi les simulations suivantes seront réalisées avec cette méthode. Il sera notifié lorsque la méthode sans la boîte dans le maillage sera prise en compte.

14.4 Force d'impact

Comme observé dans la Section [14.3], la méthode sans la boîte dans le maillage n'est pas fiable lors de l'impact. Sur la Figure [14.4], nous apercevons que la force est toujours sous-estimée avec cette méthode.

Il est donc possible qu'un paramètre supplémentaire soit à prendre en compte. L'article RYCKAMANS et SOARES-FRAZAO [28] a montré qu'en effet, la variation de la vitesse au niveau de la face de la boîte aurait un impact sur la force. Ceci est appelé l'inertie de l'écoulement.

Plusieurs formules sont disponibles dans la littérature pour estimer cette force d'impact avec les données numériques sans la boîte dans le maillage. La formule la plus répandue est la suivante.

$$F_I = \rho V C_m \frac{\partial U}{\partial t} \quad (14.6)$$

où V est le volume immergé de la boîte, C_m un coefficient d'inertie, et $\frac{\partial U}{\partial t}$ la variation de la vitesse dans le temps à l'endroit de la boîte.

Cette formule montre donc que la force dépendrait linéairement de la variation de la vitesse, ce qui ajouterait une force plus importante lors de l'impact, et nulle à l'équilibre. Cela confirmerait une amélioration notable des Figures [14.4].

14.4.1 Coefficient d'inertie C_m

Une nouvelle fois, il est possible d'obtenir le coefficient d'inertie en réalisant des tests en laboratoire et en comparant ensuite les forces calculées aux valeurs numériques. Mais en pratique, lors de prévisions de crues, il est très rare d'avoir des données d'anciennes crues. C'est pourquoi il doit souvent être estimé. Un coefficient d'inertie $C_m = 1$ est conseillé par *Morison et al.*, mais d'autres valeurs existent pour des cas plus précis ou des formes de boîte particulières.

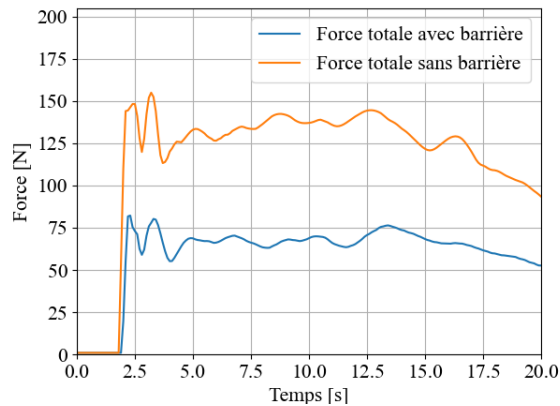
15 Influence de la barrière

Une des données primordiales de cette recherche est de connaître l'influence de la barrière. Pour cela, les essais numériques ont été réalisés avec et sans barrière, afin de comparer ensuite les forces sur la boîte. Voici les forces résultantes sur les deux faces avant pour les trois essais réalisés en laboratoire. Les configurations des barrières sont disponibles à la Figure [10.1].

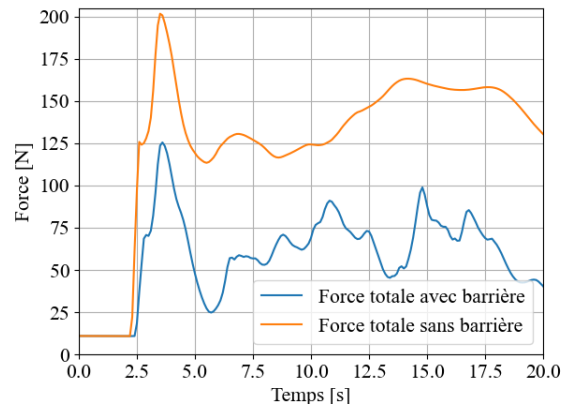
Ces données comparent donc les forces obtenues numériquement avec la méthode comprenant la boîte dans le maillage.

Essai	Force sans barrière [N]	Force avec barrière [N]	Réduction force [%]
1 ($\Delta H = 400$ mm)	154.91	82.20	46.94
2 ($\Delta H = 300$ mm)	201,62	125.46	37.78
3 ($\Delta H = 200$ mm)	145.94	133.17	8.75

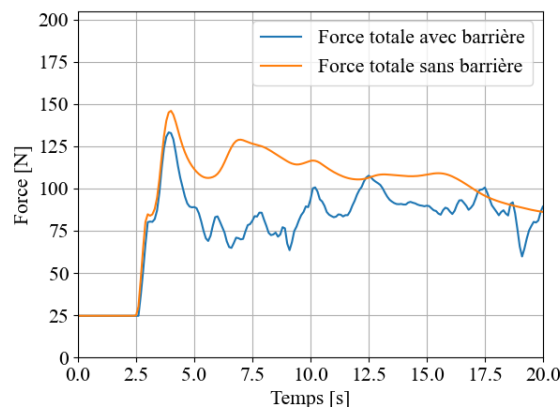
TABLE 15.1 – Comparaison des forces maximales avec et sans barrière pour les 3 essais analysés en laboratoire



(a) Essai 1 : $\Delta H = 400$ mm [10.1a]



(b) Essai 2 : $\Delta H = 300$ mm [10.1b]

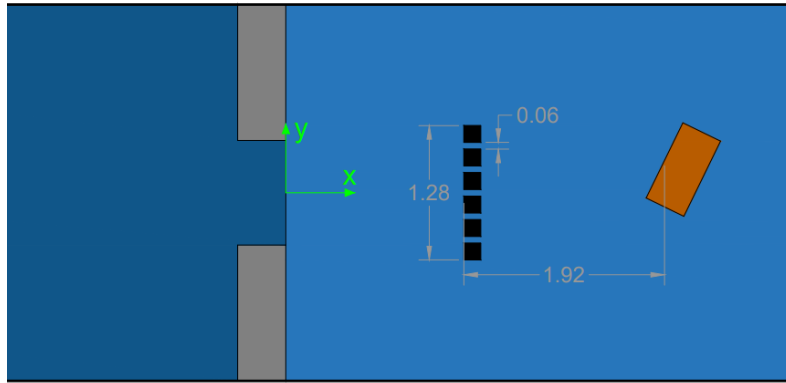


(c) Essai 3 : $\Delta H = 200$ mm [10.1c]

FIGURE 15.1 – Influences des barrières lors des différents tests réalisés

Analysons maintenant l'influence de la barrière pour ces 3 cas. Il est possible de les comparer mais il ne faut pas oublier que ces 3 tests sont réalisés avec des ΔH différents mais également des configurations de barrières différentes.

La première chose qui saute aux yeux est que la barrière réduit toujours la force maximale mais à des proportions différentes. Quant à l'allure du graphe qui représente la force, la barrière ne l'influence pas beaucoup, les graphes ont des allures similaires avec et sans barrière, cela signifie donc que l'allure de la force dépend fortement du ΔH .

FIGURE 16.1 – Configuration de la barrière pour l'analyse de l'influence du ΔH

Une autre chose à noter est que plus la différence de hauteur initiale est importante, plus l'influence de la barrière sera importante. Une barrière est donc nettement plus efficace dans les cas les plus extrêmes.

16 Influence de la différence de hauteur initiale

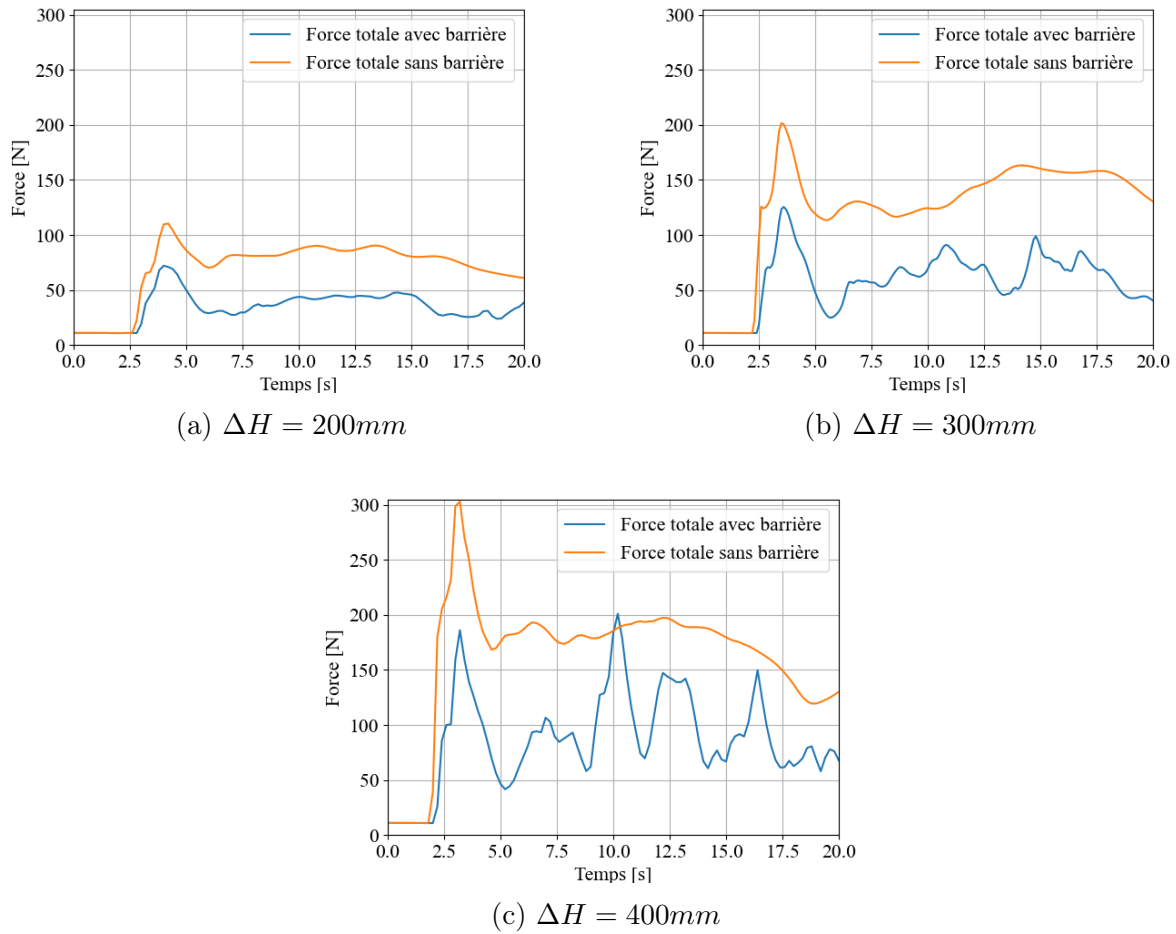
Nous avons pu remarquer à la Section [14.3] que les résultats numériques sont assez représentatifs des résultats en laboratoire, c'est pourquoi, nous allons dans cette section nous baser sur des tests numériques qui n'ont pas été réalisés dans le canal d'essais.

Dans cette section, la configuration de la barrière ne va pas être modifiée, la configuration sera dans tous les tests celle de la Figure [16.1]. Ce qui va être modifié est la différence de hauteur initiale entre la partie amont et aval du canal. Cela permettra de bien se rendre compte de l'influence de cette différence de hauteur en laissant les autres constantes, et éventuellement de se rendre compte de certaines relations entre la réduction de la force et la variation du ΔH .

Voici les résultats obtenus :

ΔH	Force sans barrière [N]	Force avec barrière [N]	Réduction force [%]
$\Delta H = 400 \text{ mm}$	302.93	201.05	33.63
$\Delta H = 300 \text{ mm}$	201.62	125.46	37.78
$\Delta H = 200 \text{ mm}$	110.44	72.05	34.76

TABLE 16.1 – Comparaison des forces maximales avec et sans barrière pour 3 tests numériques avec des ΔH différents

FIGURE 16.2 – Influence du ΔH sur les essais avec ou sans barrière

La force est plus élevée avec un ΔH plus important, mais la réduction relative de la force reste avec les trois ΔH autour de 35%. Cela montre que la réduction reste similaire peu importe le ΔH .

Ces essais confirment cependant ce qui a été expliqué à la Section 10. Un effet de la barrière est qu'avec un ΔH élevé, la force maximale n'agit pas toujours lors de l'impact. Dans ce cas-ci, elle agit environ 10 secondes après l'ouverture de la porte. Lors de ce pic de force, la force est même supérieure à celle sans barrière. Ceci montre bien que la barrière a une grosse influence positive lors de l'impact, mais qu'au plus le ΔH augmente, au moins l'effet à long terme de la barrière est intéressant.

17 Analyse du nombre de Froude

Le nombre de Froude, comme expliqué dans la Section [5], est un très bon indicateur pour exprimer le type d'écoulement présent. Nous allons donc l'analyser dans cette section et observer l'influence d'une barrière sur ce nombre de Froude.

Dans cette section, le nombre de Froude a donc été analysé le long de la droite représentée

en Figure [14.1]. Pour obtenir des nombres de Froude cohérents et obtenir uniquement l'influence de la barrière, les données ont été obtenues numériquement avec la barrière dans le maillage mais sans la boîte. Voici ci-dessous un exemple de maillage utilisé.

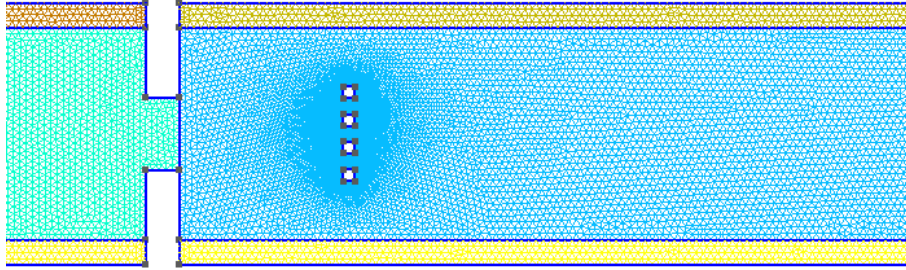


FIGURE 17.1 – Exemple de maillage utilisé pour obtenir le nombre de Froude

17.1 Influence des barrières sur le nombre de Froude

La première chose à réaliser est de chercher le nombre de Froude moyen sur la droite 1 représentée à la Figure [14.1]. Cette analyse va donc calculer le nombre de Froude moyen en fonction du temps pour le cas avec et sans barrière. Cela permettra de bien se rendre compte de l'influence de cette barrière sur le nombre de Froude durant les différentes phases de l'écoulement.

L'évolution de ce nombre de Froude pour les 3 essais de référence est donc disponible à la Figure [17.2].

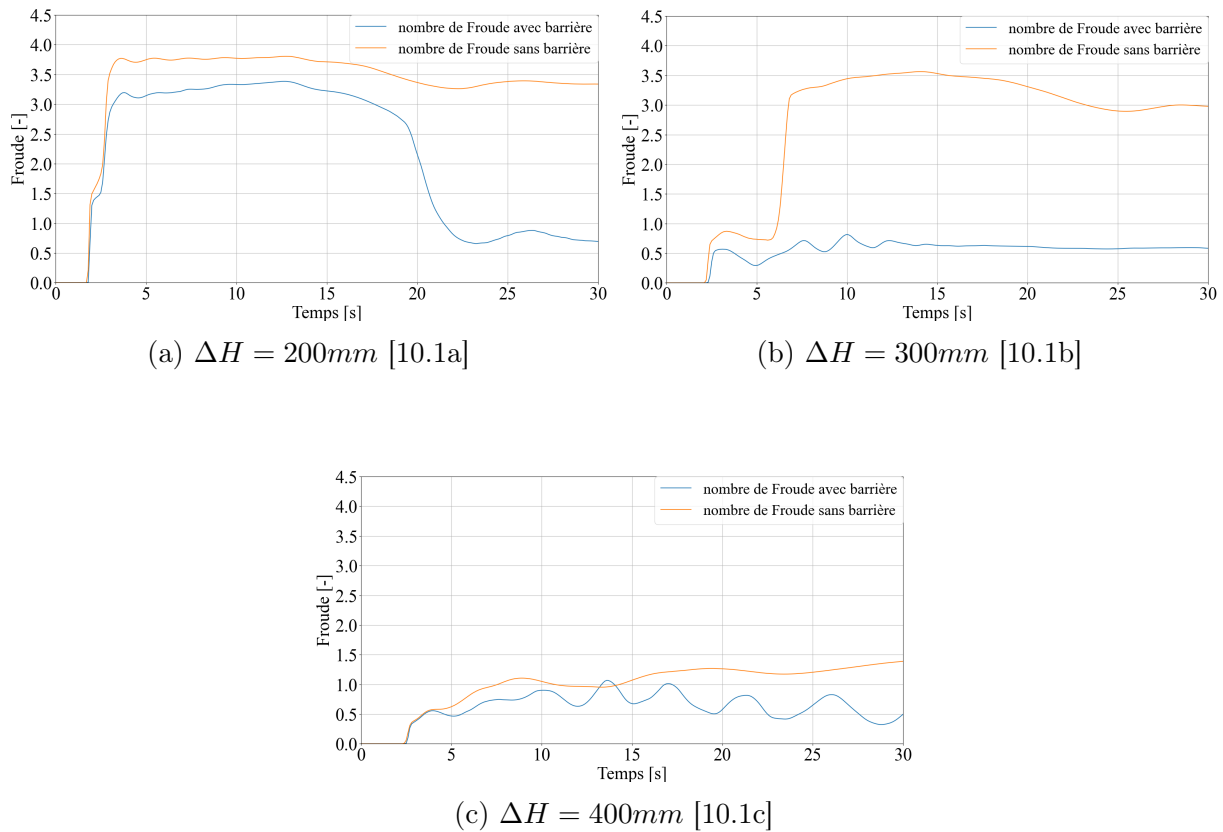


FIGURE 17.2 – Influence de la barrière sur le nombre de Froude

Ces graphes montrent bien que le nombre de Froude peut fortement être réduit grâce à une barrière. L'essai 17.2b avec un ΔH de 300 mm montre que les écoulements peuvent même être modifiés et passer d'un écoulement supercritique sans barrière à un écoulement subcritique avec barrière. Cela modifie donc complètement l'écoulement.

De plus, pour les 3 essais, le nombre de Froude est davantage impacté à long terme, cela signifie que la barrière diminue bien le nombre de Froude lorsque l'écoulement est stable. Mais lors de l'impact, la barrière a nettement moins d'effet sur le nombre de Froude, cela montre donc une limite des barrières concernant le nombre de Froude lors de l'impact.

La barrière va donc diminuer le nombre de Froude mais elle va également totalement modifier l'allure de l'évolution du nombre de Froude dans le temps, ce qui fait qu'à certains moments, le nombre peut être supérieur dans le cas avec une barrière par rapport au cas sans barrière, cela est notamment visible dans l'essai avec un ΔH de 400 mm 17.2c.

Nous observons la diminution du nombre de Froude moyen sur une droite mais observer la variation de celui-ci sur cette droite peut être intéressant. Pour cela, il faut choisir les moments les plus pertinents. Le choix a été de prendre 2 temps où la force et/ou le nombre de Froude a une particularité : le moment où la force est maximale, ainsi que le moment où le nombre de Froude moyen est maximal. Comme dit précédemment, la droite sur laquelle le nombre de Froude va être analysé se situe devant la boîte, avec son origine du côté droit du canal comme montré sur la Figure [17.3].

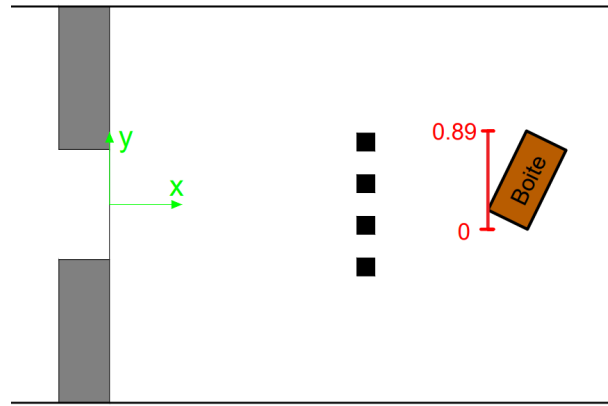
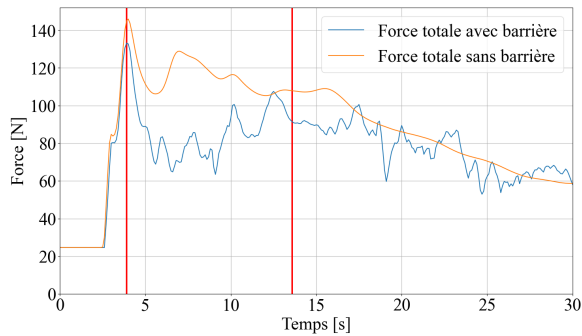


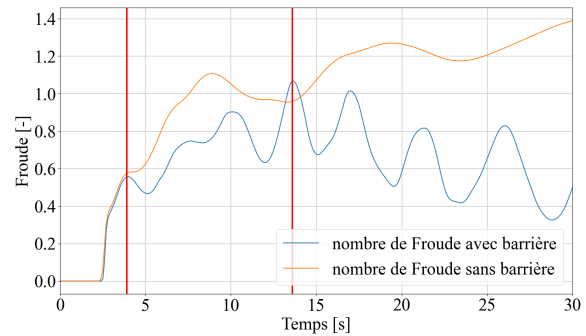
FIGURE 17.3 – Droite sur laquelle le nombre de Froude est calculé

Les graphes de l'essai 3 avec un ΔH de 400 seront analysés ici (la visualisation de la barrière est disponible à la Figure [10.1c]), les résultats pour les 2 autres tests sont disponibles en Annexe B.

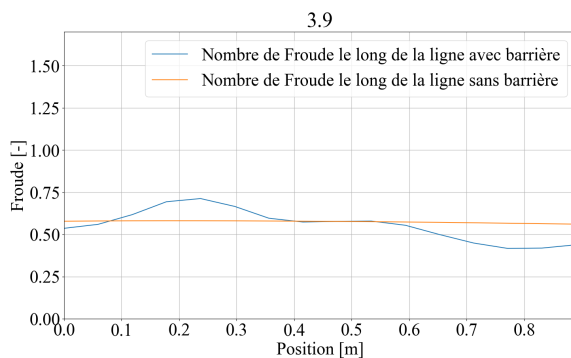
Les graphes [17.4a] et [17.4b] montrent donc les forces et nombres de Froude au niveau de la face avant de la boîte en fonction du temps. Des axes rouges sont également positionnés aux moments où une analyse sera faite. Cette analyse consiste à observer l'évolution du nombre de Froude le long de la ligne. Elles sont visible aux Figures [17.4c] et [17.4d].



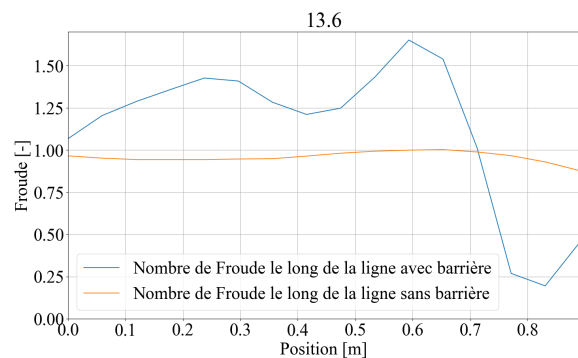
(a) Force avec et sans barrière



(b) Froude avec et sans barrière



(c) Froude le long de la droite [17.3] après 3.9 secondes



(d) Froude le long de la droite [17.3] après 13.6 secondes

FIGURE 17.4 – Analyse du nombre de Froude sur la droite [17.3] à différents moments

Lorsque la force est maximale (après 3.9 secondes), le nombre de Froude moyen sur la droite est de 0.55. Lors de l'impact, la barrière a peu d'influence pour cet essai, aussi bien sur le nombre de Froude que sur la force. Il est tout de même possible d'observer que le nombre de Froude est légèrement perturbé le long de la ligne à cause de la barrière et n'est pas aussi constant que sans barrière.

Pour le cas où le nombre de Froude avec barrière est maximum (après 13.6 secondes), il s'agit du seul moment où le nombre de Froude sans barrière est inférieur au nombre de Froude avec barrière. Nous voyons une nouvelle fois que le cas avec barrière déstabilise fortement le nombre de Froude, qui est presque constant le long de la ligne dans le cas sans barrière. Dans le cas avec barrière, nous voyons une forte baisse du nombre de Froude sur la fin de la ligne. Pour comprendre ceci, il faut regarder la Figure [17.5]. Cette figure montre la hauteur et la vitesse dans le canal après 13.6 secondes. Sur cette figure, la vitesse et la hauteur diminuent fortement sur la fin de la ligne ; cependant, la vitesse diminue plus fortement et la hauteur n'est qu'à l'exposant $1/2$ dans la formule du nombre de Froude, ce qui diminue donc le nombre de Froude. La Figure [17.5b] montre clairement que cette variation de vitesse est due à la porosité de la barrière. En effet, cette vitesse et hauteur plus élevées au centre du canal sont dues à l'écoulement qui passe à travers la barrière. La porosité de la barrière va donc amener un nombre de Froude le long de la boîte très variable.

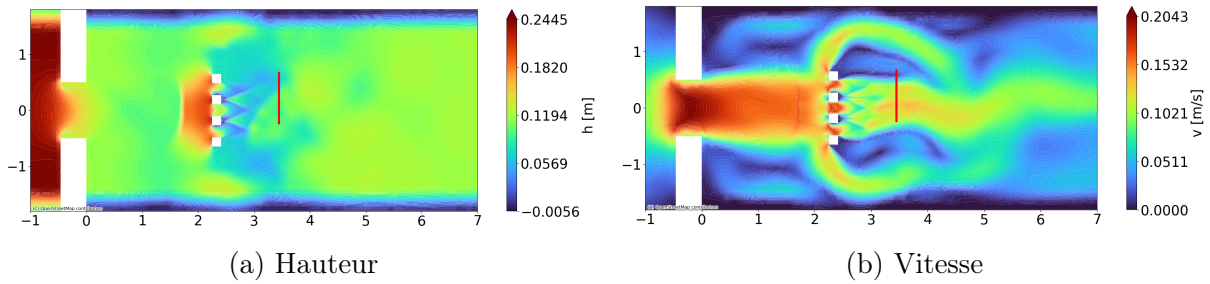


FIGURE 17.5 – Données de la simulation numérique après 13.6 secondes

Une autre analyse à faire sur cette représentation des vitesses à la Figure [17.5b] est qu'après 13.9 secondes, les vitesses et hauteurs minimales ne sont pas directement à l'abri derrière la barrière, mais légèrement décalées. Pour minimiser les forces hydrodynamiques et hydrostatiques sur la boîte, il vaut donc mieux légèrement décaler la boîte par rapport à la barrière.

17.1.1 Analyse de la vitesse

S'intéresser à ces zones avec des vitesses plus faibles peut donc s'avérer utile pour minimiser la force sur la boîte. De plus, la Figure [17.6] montre que la zone en aval, légèrement décalée de la barrière, a, lors de toute la durée de l'écoulement, des vitesses plus faibles que juste derrière la barrière.

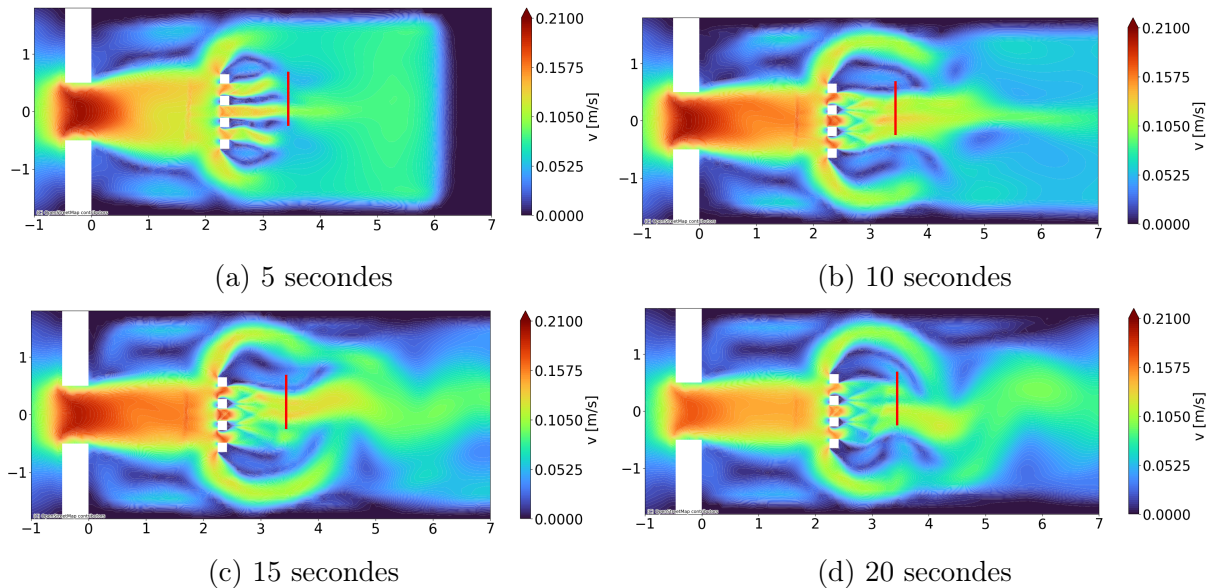


FIGURE 17.6 – Carte de vitesse à différents moments de l'écoulement

Il est également possible de se rendre compte avec ces images que le fait que le canal soit limité au niveau de sa largeur diminue cette zone de vitesse réduite. En effet, une zone de vitesse plus importante vient taper le bord du canal pour revenir vers le centre

et diminuer cette zone de vitesse réduite.

Malgré cela, le fait que la rupture de barrage ne soit faite que sur une proportion du canal amplifie ce phénomène. Si l'eau était lâchée sur toute la largeur, cela diminuerait cet effet dû au fait que l'eau lâchée sur les bords du canal ne viendrait pas impacter la barrière et serait directement amenée dans cette zone.

17.2 Lien entre le nombre de Froude et la force

Une fois l'influence de la barrière sur le nombre de Froude bien détectée, une donnée qui pourrait fortement être enrichissante est de trouver un lien entre le nombre de Froude et la force. C'est dans cette idée que va se diriger cette section.

Désormais, le nombre de Froude sera calculé numériquement le long de la grande face avant. Pour déterminer les vitesses et hauteurs d'eau nécessaires à calculer le nombre de Froude, la simulation avec la barrière et sans la boîte sera faite dans *Watlab*. Concernant la force, nous allons prendre en compte la force sur la face avant calculée numériquement, dont la méthode sera celle avec la boîte dans le maillage.

Voici l'évolution du nombre de Froude et de la force en fonction du temps pour les 3 essais analysés :

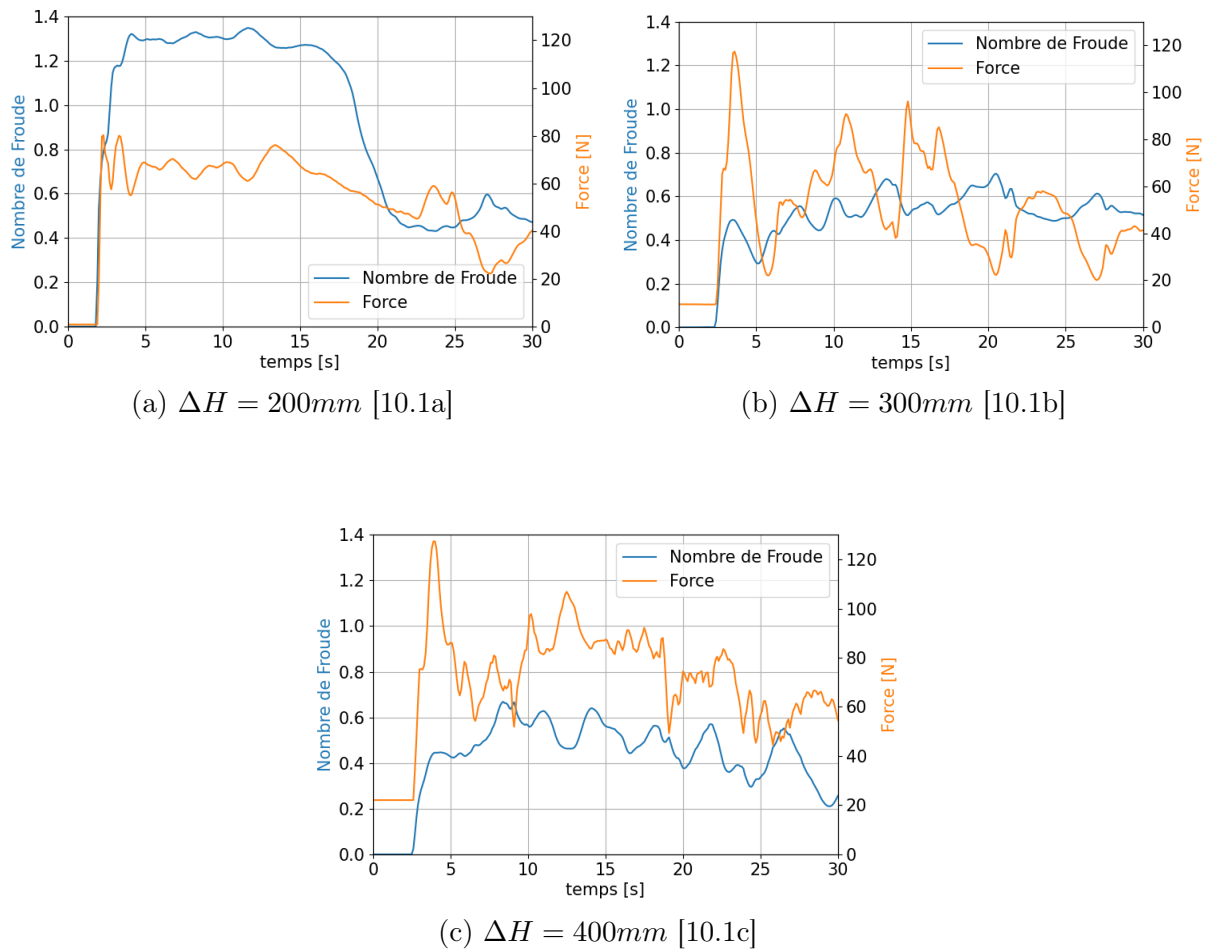


FIGURE 17.7 – Comparaison de l'évolution de la force et du nombre de Froude

Avec ces courbes, il est difficile de se rendre compte d'un réel lien entre le nombre de Froude et la force. Une chose à remarquer est que la force d'impact la moins importante a lieu dans l'essai où le nombre de Froude est le plus élevé lors de l'impact, tandis que les deux autres tests ont un nombre de Froude similaire et une force d'impact similaire également.

Le nombre de Froude élevé peut être dû au fait que la hauteur d'eau initiale était moins élevée pour le test avec un ΔH de 200 mm. Le dénominateur $\sqrt{gh}$ qui compose le nombre de Froude sera donc moins élevé.

Cette méthode ne permet pas de trouver des liens forts entre la force et le nombre de Froude, il peut donc être utile d'utiliser une autre méthode. Dans cette idée, nous allons comparer le nombre de Froude en fonction de la force.

La Figure [17.9] représente donc l'évolution du nombre de Froude en fonction de la force pour chacun des trois essais. Chaque point de ce graphe représente une donnée, les don-

nées ont été prises toutes les 0.1 secondes. Le code couleur est découpé pour représenter les différentes phases de l'écoulement devant la boîte. La phase 1, en bleu, représente le moment avant l'impact dû à l'ouverture de la porte. Ensuite arrive la phase 2, en vert ; cette phase finit lorsque la force est maximale lors de l'impact. Après arrive la phase 3, en rouge, qui se termine lorsque la diminution de la force après l'impact s'arrête et atteint donc un minimum local. Enfin, la dernière phase représente la fin de l'écoulement lorsque celui-ci est quasi-permanent.

Pour mieux représenter ces phases, la Figure [17.8] représente les 4 phases qui sont déterminées en fonction de la force.

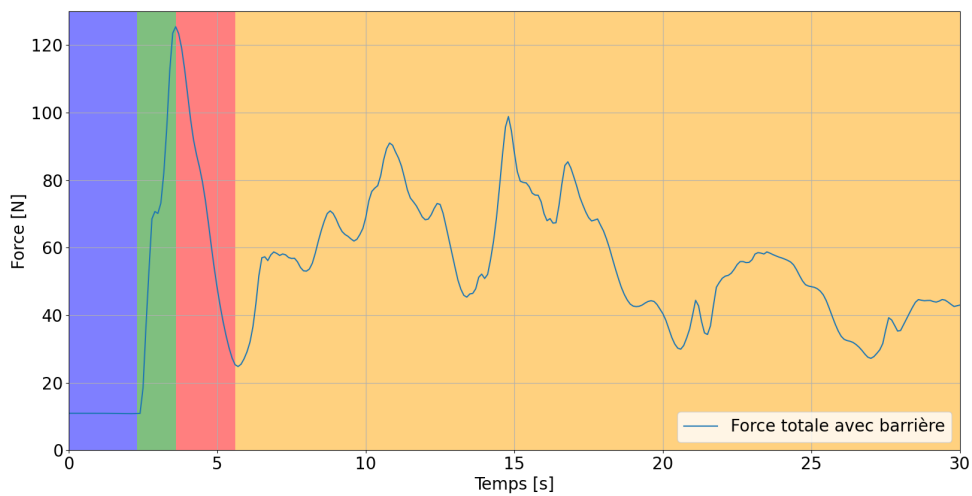


FIGURE 17.8 – Visualisation des phases pour le cas de l'essai avec $\Delta H=300\text{mm}$

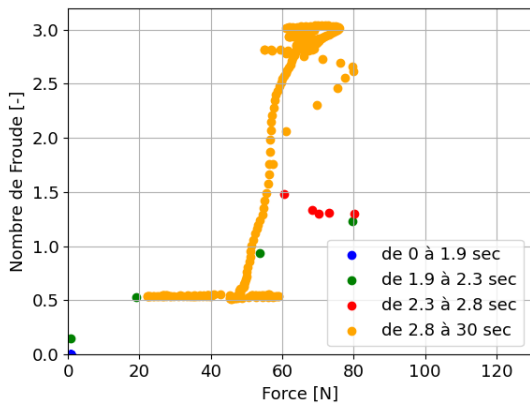
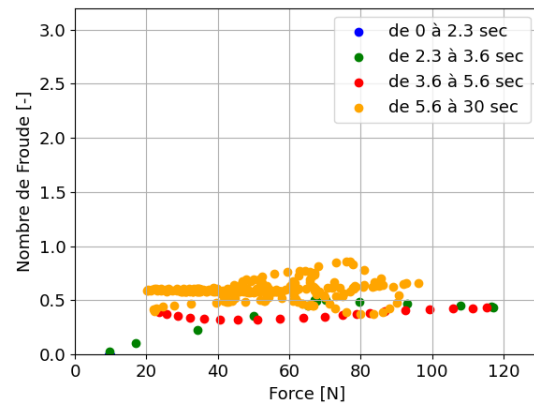
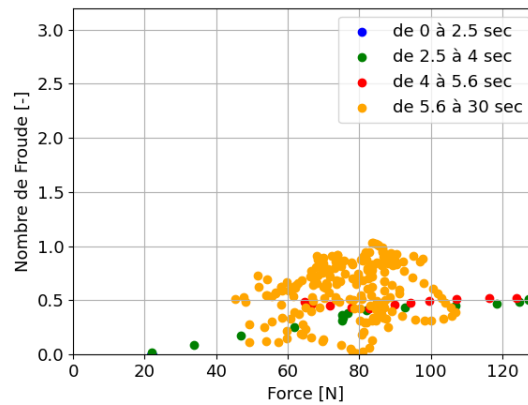
(a) $\Delta H = 200mm$ [10.1a](b) $\Delta H = 300mm$ [10.1b](c) $\Delta H = 400mm$ [10.1c]

FIGURE 17.9 – Lien entre le nombre de Froude et la force

Une nouvelle fois, il est difficile de trouver un lien clair et valable pour chaque phase entre le nombre de Froude et la force qui agit sur la face avant. Nous pouvons cependant trouver des similitudes entre ces cas.

Phase bleue Pour la première phase, il y aura peu, voire pas d'écoulement. La vitesse sera donc nulle, et le nombre de Froude aussi ; cela peut se déduire assez facilement.

Phase verte Pour la deuxième phase, celle entre le début de l'impact et le moment où la force est maximale, la relation entre le nombre de Froude et la force augmente de façon linéaire, avec une pente qui dépend de l'essai.

Phase rouge Pour la troisième phase, après l'impact, la force diminue durant une durée variable. Mais pendant cette diminution de la force jusqu'au premier minimum local, le nombre de Froude reste constant.

Phase orange Pour la dernière phase, il est plus difficile de trouver une vraie relation, hormis que le nombre de Froude ne varie plus très fortement, contrairement à la force. Pour le cas de la Figure 17.9a, il tend vers 3, puis change rapidement de valeur et tend vers 0.5, pour y rester. Pour le cas de la Figure [17.9c], il va davantage bouger, mais rester tout de même entre 0 et 1. L'écoulement sera donc subcritique.

Sixième partie

Conclusion

Dans un contexte de changement climatique et d'augmentation de la fréquence des événements extrêmes, ce mémoire a analysé l'influence d'une barrière de protection en amont sur les forces exercées par un écoulement transitoire sur un bâtiment. L'objectif principal était double. D'une part, analyser expérimentalement les paramètres influençant les forces maximales sur une structure située en aval et d'autre part, évaluer la fiabilité d'outils numériques pour reproduire ces phénomènes dans un cadre simplifié mais représentatif.

Le volet expérimental a permis de simuler des ruptures de barrage dans un canal de laboratoire. Trente-et-une configurations ont été testées, en faisant varier quatre paramètres clés : la hauteur d'eau en amont ΔH , la porosité ρ de la barrière, la longueur relative de la barrière L^* et la distance X séparant la barrière du bâtiment.

Les résultats ont mis en évidence l'influence de la barrière, la réduction de la force lors de l'impact peut être significative. Cette recherche a aussi mis en évidence son influence plus réduite dans l'écoulement transitoire après la force d'impact. Cela engendre donc parfois des forces plus importantes après l'impact ce qui n'est pas le cas lors d'un écoulement sans barrière.

Une étude statistique a permis de montrer l'influence de chaque paramètre sur la force maximale. Parmi les paramètres étudiés, la différence de hauteur initiale et la longueur relative de la barrière ont montré une forte influence. Toutefois, certaines configurations peuvent fortement diminuer l'impact mais également provoquer une montée plus lente mais durable du niveau d'eau, engendrant une seconde phase de sollicitation non négligeable. Une autre analyse a montré un fort lien entre la porosité de la barrière et sa longueur relative. Il est donc possible de les considérer comme un seul paramètre, ce paramètre est l'espace disponible à l'écoulement. Un modèle statistique est réalisé, celui-ci est un peu moins efficace mais montre les mêmes tendances.

Le second volet de ce travail a porté sur la comparaison entre les forces mesurées et celles obtenues par des méthodes de simulation numérique à l'aide du code de calcul *Watlab*. Basé sur la résolution des équations de Saint-Venant 2D, ce code permet de prédire les vitesses et hauteurs d'eau dans le canal, lesquelles ont été ensuite converties en efforts sur la structure via différentes méthodes. Les comparaisons montrent que la méthode en considérant la boîte dans le maillage obtient des bons résultats pour un écoulement transitoire. Les résultats simulés sont en bon accord avec les valeurs expérimentales. Cela valide l'approche numérique dans ce type de configuration. Cependant, la durée de la simulation reste un problème du fait que le maillage doit être raffiné au niveau de la boîte et de la barrière.

Enfin, l'analyse du nombre de Froude a permis de trouver certains liens entre le nombre de Froude et la force. Ce lien entre le nombre de Froude et la force varie en fonction de la phase dans laquelle l'écoulement transitoire se trouve.

Pour conclure, ce mémoire met en évidence plusieurs contributions majeures :

- L'élaboration d'une base de données expérimentales permettant de mieux comprendre l'effet des barrières dans un écoulement transitoire.
- La formulation d'un modèle statistique prédictif robuste qui permet de se rendre compte de l'influence de chaque paramètre analysé.
- La validation d'un outil numérique (Watlab) et de méthodes pour simuler des efforts hydrodynamiques réalistes sur des structures.

Les limites de ce travail résident principalement dans la généralisation des résultats à d'autres géométries ou configurations de canal plus complexes. De futures recherches pourraient ainsi porter sur :

- L'application de ces méthodes à des scénarios de crues réelles.
- L'extension du modèle statistique à un plus large éventail de conditions hydrauliques.

Ce travail contribue donc à une meilleure compréhension des effets des crues sur les structures ainsi que l'influence des barrières en amont, et fournit des outils concrets pour améliorer leur résilience dans un contexte de changement climatique.

Références

- [1] Lisa ADYNS et Delphine ADRIAENS. « Etude expérimentale de la résistance des bâtiments en cas de crue ». In : (2023).
- [2] Lorenzo BONSEMBIANTE. « Influence d’une barrière de protection sur la force induite par un écoulement permanent contre un bâtiment : étude expérimentale et numérique ». In : (2024).
- [3] H. CHANSON. « Tsunami surges on dry coastal plains : Application of dam break wave equations. » In : *Coastal 510 engineering journal*, 48(4), 355–370. (2006).
- [4] Tommy CHAVET et Jonah KRINGS. « Impact of floating debris on flood barriers ». In : (2023).
- [5] Qi FANG et al. « Experimental Investigation of Extreme Flood Loading on Buildings Considering the Shadowing Effect of the Front Building ». In : *ASCE* (2022).
- [6] FEMA. Consulté le 23 avril 2025. URL : <https://www.fema.gov/>.
- [7] FEMA. « Building Designer’s Guide to Calculating Flood Loads Using ASCE ». In : (2024).
- [8] *Fonctionnement et technologie de la mesure de niveau et des capteurs de niveau*. Consulté le 24 avril 2025. URL : https://www.baumer.com/fr/fr/service-assistance/fonctionnement/fonctionnement-et-technologie-de-la-mesure-de-niveau/a/Know-how_Function_Level-sensors#ultrasonic.
- [9] S Soares FRAZÃO. « Dam-break induced flows in complex topographies. theoretical, numerical and experimental approaches ». Thèse de doct. Université Catholique de Louvain, 2002.
- [10] C. GEUZAIN et J.-F. REMACLE. « Gmsh : A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities ». In : *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 79.11 (2009). DOI : 10.1002/nme.2579.
- [11] IDEAT. Consulté le 10 mai 2025. URL : <https://ideat.fr/les-incroyables-maisons-flottantes-de-waterstudio/#:~:text=Aux%20Pays%2DBas%2C%20le%20cabinet,changement%20climatique%20%C3%A0%20l’urbanisation..>
- [12] INSTITUT ROYAL MÉTÉOROLOGIQUE DE BELGIQUE. Consulté le 29 mars 2025. 2025. URL : <https://www.meteo.be/fr/belgique>.
- [13] IRM. *Observations en Belgique*. Consulté le 30 mars 2025. 2025. URL : <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/changements-observees>.
- [14] JapanGov. Consulté le 21 avril 2025. URL : <https://www.japan.go.jp/directory/index.html#agencies>.
- [15] JUMP. URL : <https://www.jump.com/fr/software>.
- [16] Naoto KIHARA et al. « A physical model of tsunami inundation and wave pressures for an idealized coastal industrial site ». In : *Elselvier* (2020).
- [17] L’avenir. Consulté le 12 avril 2025. URL : <https://www.lavenir.net/regions/verviers/pepinster/2021/07/18/inondations-plus-de-1000-personnes-ont-du-quitter-leur-maison-a-pepinster-450H7JGZUJCQHM24EF2WZL5AMA/>.
- [18] La Libre. Consulté le 15 mai 2025. URL : <https://www.lalibre.be/regions/namur/2021/07/25/des-routes-arrachees-et-quatre-personnes-relogees-apres-les-inondations-a-dinant-JYPMUIGBQNF6LGZRQMQK4QQB4M/>.
- [19] *La pression due à la gravité*. Consulté le 14 mai 2025. URL : https://michelsabourin.scenari-community.org/SimTurbTech/co/1_211_Hydrostatique.html.

-
- [20] Le Soir. Consulté le 12 avril 2025. URL : <https://www.lesoir.be/392063/article/2021-08-30/une-facade-de-maison-touchee-par-les-inondations-secroule-pepinster-video>.
 - [21] Le Soir. Consulté le 15 mai 2025. URL : https://www.lesoir.be/art/m/la-meuse-deborde-a-dinant_t-20110107-016XK2.html.
 - [22] Thomas LORQUET et al. BILAN DE L'ARTIFICIALISATION DES SOLS EN WALLONIE. Consulté le 29 mars 2025. 2020. URL : https://cpdt.wallonie.be/wp-content/uploads/2023/03/NDR_BilanArtificialisation.pdf.
 - [23] Frédérique MARTINI. « La directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation – la représentation des inondations : des exigences du texte à la mise en œuvre en France ». In : (2011).
 - [24] PPRI-YON. Bassin versant Yon. Consulté le 02 avril 2025. 2025. URL : <https://ppri-yon.fr/le-bassin-versant/3-formes-de-debordement/>.
 - [25] RÉGION WALLONNE. Wallonamap. Consulté le 31 mars 2025. 2025. URL : <https://geoportail.wallonie.be/walonmap#BB0X=-91679.3588603844,308503.7331724664,14376.85530437727,169489.14469562273>.
 - [26] RÉGION WALONNE. Etat de l'environnement wallon. Consulté le 30 mars 2025. 2025. URL : <https://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicator sheets/TERRIT%202.html>.
 - [27] RTBF. Inondations en Wallonie : trois ans après les inondations, l'immobilier se porte bien dans Consulté le 30 mars 2025. 2024. URL : <https://www.rtbef.be/article/inondations-en-wallonie-trois-ans-apres-les-inondations-l-immobilier-se-porte-bien-dans-les-zones-sinistrees-11404195>.
 - [28] Charles RYCKAMANS et Sandra SOARES-FRAZAO. « Evaluation of the hydrodynamic forces on an isolated building induced by a dam-break flow ». In : UCLouvain (2024).
 - [29] Barré de SAINT-VENANT. « The Theory of Open-Channel Flows with Variable Discharge ». In : Compte rendu de l'Academie de Paris (1871).
 - [30] Mirei SHIGE-EDA et Juichiro AKIYAMA. « Influence d'une barrière de protection sur la force induite par un écoulement permanent contre un bâtiment : étude expérimentale et numérique ». In : (2003).
 - [31] Sandra SOARES-FRAZAO. « Slides LGCIV2051 - Applied hydraulics : open-channel flows ». In : UCLouvain (2025).
 - [32] The conversation. Consulté le 15 mai 2025. URL : <https://images.theconversation.com/files/629210/original/file-20241030-21-qw92cn.jpeg?ixlib=rb-4.1.0&>.
 - [33] WIKIPÉDIA. Grande inondation de Valence. Consulté le 30 mars 2025. 2025. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Grande_inondation_de_Valence.

Annexes

Annexe A

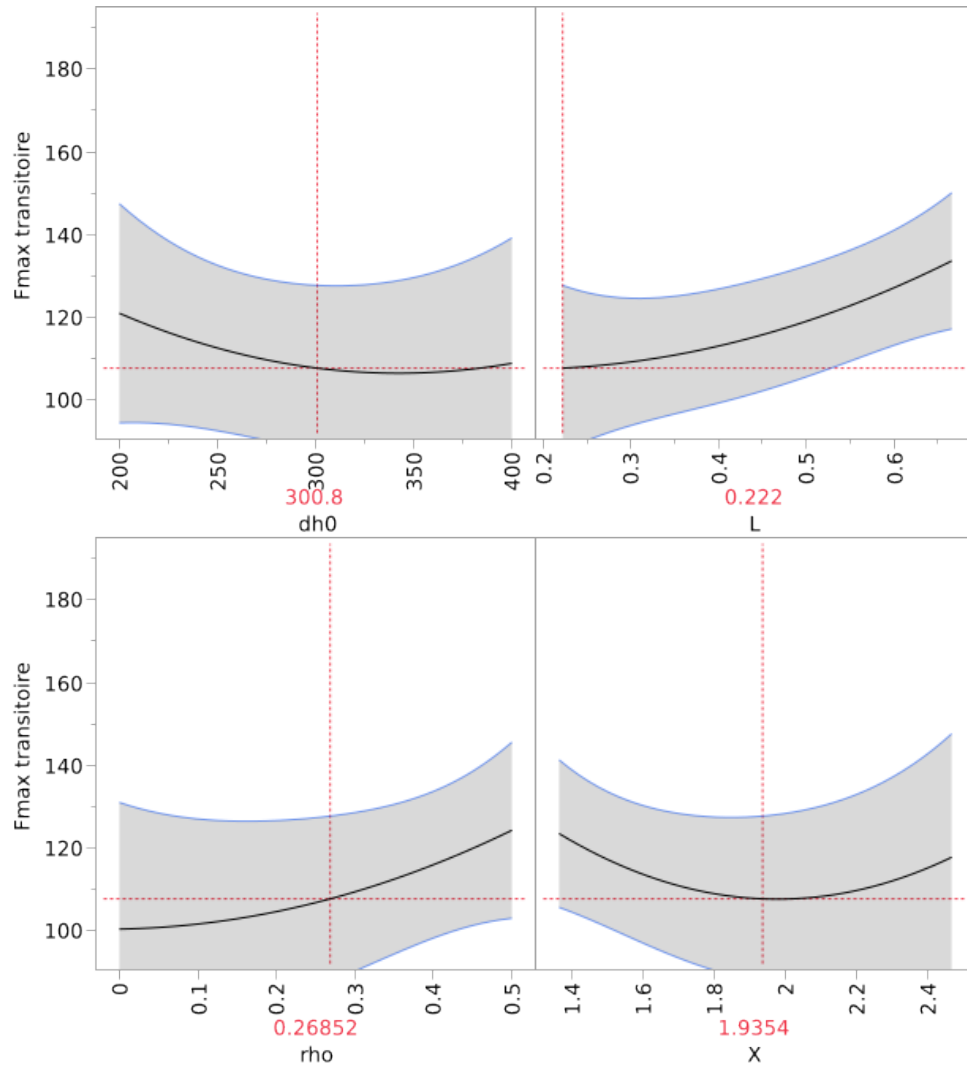


FIGURE 17.10 – Avec une longueur de barrière faible

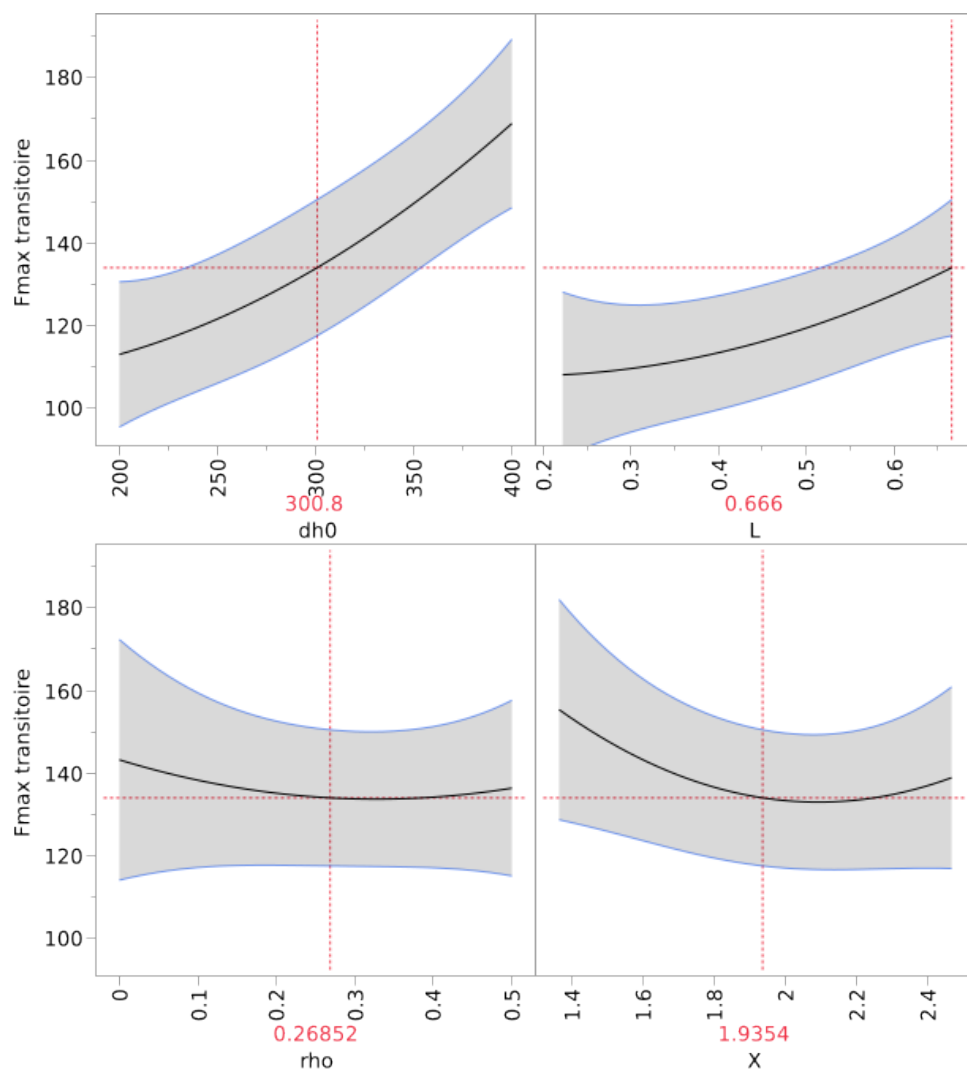
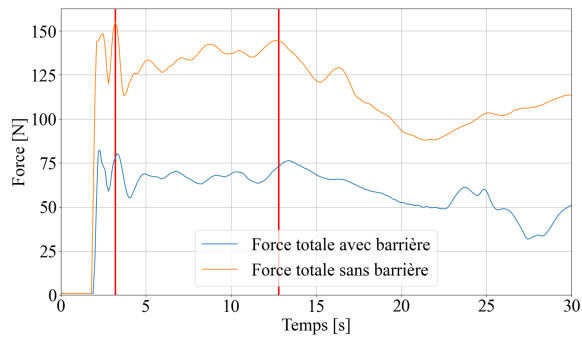
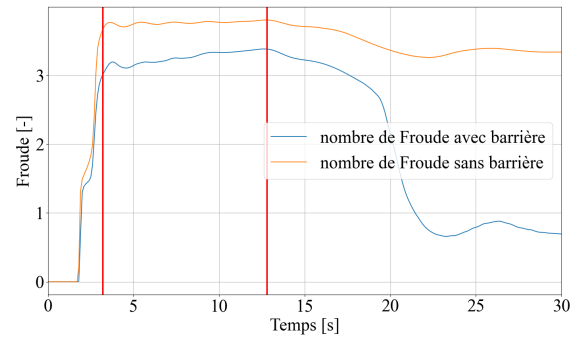


FIGURE 17.11 – Avec une longueur de barrière élevée

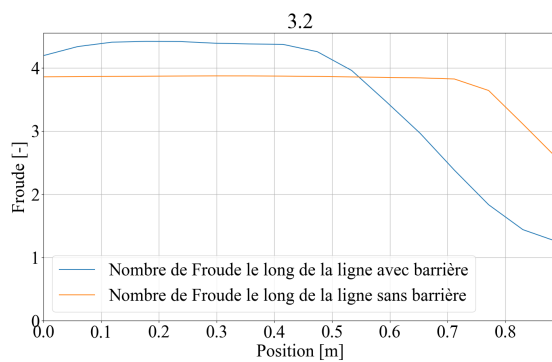
Annexe B



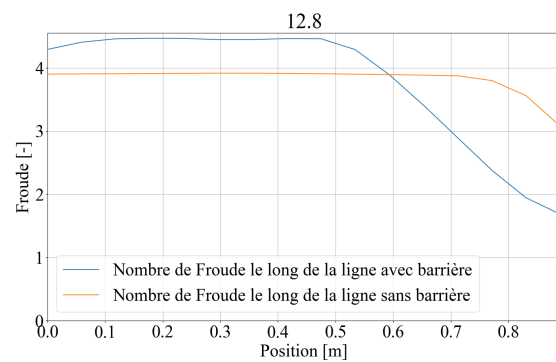
(a) Force avec et sans barrière



(b) Froude avec et sans barrière

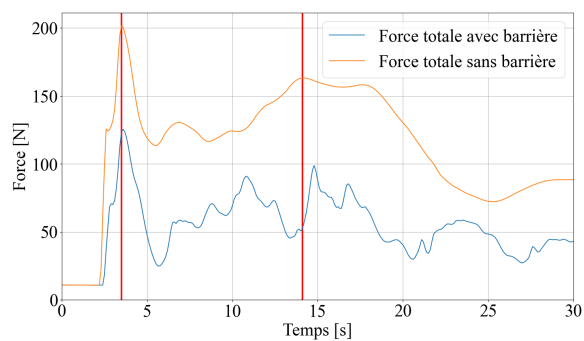


(c) Froude le long de la droite [17.3] après 3.2 secondes

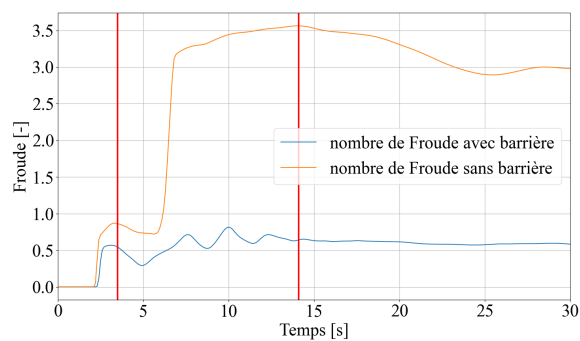


(d) Froude le long de la droite [17.3] après 12.8 secondes

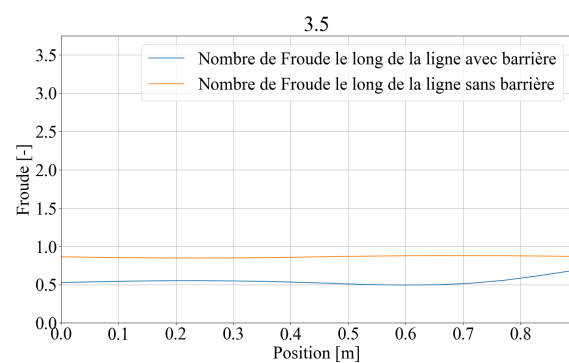
FIGURE 17.12 – Analyse du nombre de Froude sur la droite [17.3] à différents moments pour l'essai avec un ΔH de 200 mm [10.1a]



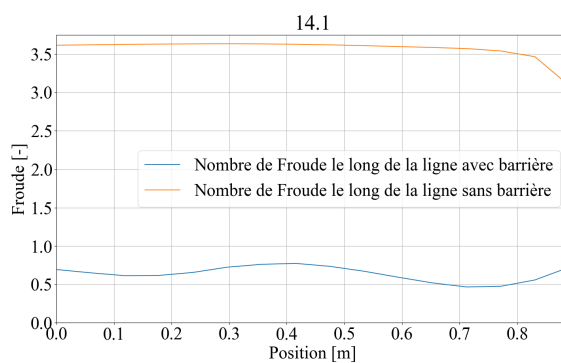
(a) Force avec et sans barrière



(b) Froude avec et sans barrière



(c) Froude le long de la droite [17.3] après 3.5 secondes



(d) Froude le long de la droite [17.3] après 14.1 secondes

 FIGURE 17.13 – Analyse du nombre de Froude sur la droite [17.3] à différents moments pour l'essai avec un ΔH de 300 mm [10.1b]

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

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