POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

Modélisation des effets des inondations sur les structures en présence d'un couvert de glace

LÉA ZHENG
Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie civil

Avril 2026

© Léa Zheng, 2026.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Modélisation des effets des inondations sur les structures en présence d'un couvert de glace

présenté par **Léa ZHENG**
en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Sanda KOBOEVIC, présidente
Najib BOUAANANI, membre et directeur de recherche
Rocio SEGURA, membre

DÉDICACE

À ma famille,
À mes ami.e.s,
& au GRS.

REMERCIEMENTS

Ce mémoire n'aurait pas pu exister sans l'implication ni le soutien de plusieurs personnes qui me sont très chères.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de recherche Pr. Najib Bouaanani qui m'a donné l'opportunité de travailler sur un sujet intéressant et stimulant.

Je souhaite également remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et le Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQNT) pour leur soutien financier qui a rendu possible ce mémoire de recherche.

Je remercie les membres du jury de mon mémoire pour leur temps et leur énergie consacrés évaluer le projet.

Je remercie Maxence Nicq, avec qui j'ai travaillé et collaboré pendant tout le long du projet, et dont les échanges ont été enrichissants.

Je souhaite également remercier Ehsan Rowzeh, Jianguo Wang et Ramtin Kouhdasti pour leur expertise et leur transmission de savoir.

Je remercie chaleureusement les membres du Groupe de Recherche en génie des Structures (GRS), pour leur présence et leur bonne humeur, et en particulier Kamrul Islam, Morane Wack, Oudom Chhoeng, Elisa Carleschi, Daniela Andrea Riascos Montenegro, Paul Gouëzec, Jean-Baptiste Charrié, Lucie Lechevalier et Nadia Sekhri.

Pour leur soutien émotionnel et leur gaieté même dans le froid de l'hiver québécois, je remercie mes ami.e.s Lucas Poitevin, Marc Berenguer, Alexandre Carayon, Lucie Calonnec, Melvin Huang et François Mourier.

Enfin, je remercie ma famille, qui, malgré la distance, est toujours présente.

RÉSUMÉ

Les inondations sont reconnues comme les catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus destructrices dans le monde. Dans les pays du nord, les inondations dues à la glace sont à l'origine des désastres les plus importants et les plus dévastateurs. En effet, les inondations en présence de glace sont souvent associées à des niveaux d'eau et des dommages plus importants que celles sans. Ces dernières sont d'autant plus dangereuses par leur caractère imprévisible. Elles peuvent causer des inondations en amont et des crues éclaires en aval. En plus des dommages causés par l'eau de crue, et les courants rapides, la charge appliquée par les gros blocs de glace aggrave les dommages et peut créer des conditions mortelles.

Le changement climatique exacerbe ces phénomènes dans certaines régions du monde, par l'augmentation globale des températures et des précipitations. Mais le changement climatique est également à l'origine des évènements de températures extrêmes, et donc de froid intense.

Les structures construites dans les zones à risque d'inondation, comme les ponts, les routes et les barrages, sont d'autant plus vulnérables aux inondations sévères.

Dans les problèmes impliquant des écoulements d'eau, les chercheurs en hydraulique considèrent généralement que les structures sont infiniment rigides. Mais en réalité, les structures peuvent se déformer, vibrer, et s'endommager lors des inondations. Du point de vue de l'ingénieur structurel, il est important d'incorporer la flexibilité des structures pour adopter une approche plus réaliste et moins conservatrice. Un modèle numérique 3D en éléments finis et mécanique des fluides numérique d'un cas expérimental d'une structure rigide impactée par une rupture de barrage a été construit et validé. Une étude de convergence a été réalisée sur ce modèle. L'influence de la flexibilité, des conditions de bords de la structure, et de la hauteur du lit d'eau ont également été étudiés. Ces paramètres ont tous un impact sur le déplacement relatif de la structure, la réaction à la base, et les contraintes. Le domaine du fluide est beaucoup plus grand que celui du solide. Afin d'étudier le comportement de la structure, son maillage doit être raffiné. Mais son raffinement entraîne aussi celui du fluide, et le temps de calcul devient d'autant plus long. Cet effet est exacerbé lorsque la modélisation est en 3D. Afin d'optimiser le temps de calcul, des modèles tronqués ont été créés en diminuant le domaine de fluide. Les résultats des modèles complets et tronqués concordent, ce qui démontre l'efficacité de la troncation.

Dans les pays nordiques comme le Canada, l'effet combiné des crues et de la glace est dévastateur sur les structures. Cependant, leur effet combiné n'est que très peu étudié. Sur la base du modèle numérique du cas expérimental, un couvert de glace solidaire à la structure a été

ajouté. La présence du couvert de glace impacte significativement la réponse de la structure en déplacement, réaction, et impacte également l'écoulement d'eau. Une autre manière de réduire le temps de calcul des modèles avec interaction fluide-structure est la modélisation en hydrodynamique des particules lissées. C'est pourquoi des modèles numériques particulaires ont été développés, comparés aux modèles avec maillage. Les résultats concordent, mais chaque modélisation comprend des avantages et des défauts. Les modèles particulaires sont beaucoup plus rapides, mais la pression du fluide est difficilement exploitable car trop instable.

Un modèle particulaire d'un cas expérimental d'une onde générée par une rupture de barrage sur une structure rigide a été développé. La prédiction de la hauteur d'eau, comparée aux résultats expérimentaux et aux résultats numériques issus de la mécanique des fluides, montre des tendances très similaires.

Un modèle particulaire d'un barrage de taille réelle a également été développé. Les formes d'écoulement sont similaires à ceux du modèle en mécanique des fluides numériques.

Ce mémoire a permis de quantifier l'influence du maillage, de la flexibilité, des conditions de bord, de la hauteur du lit d'eau sur la structure dans des modèles avec maillage. Il a également permis de montrer que la méthode particulaire d'hydrodynamique des particules lissées est une alternative rapide et fiable de modélisation d'interaction fluide-structure et fluide-glace-structure.

ABSTRACT

Floods are recognized as the most frequent and destructive natural disasters worldwide. In northern countries, ice-induced flooding is responsible for the most significant and devastating disasters. Indeed, floods occurring with ice are often associated with higher water levels and greater damage than those occurring without. These floods are all the more dangerous due to their unpredictable nature. They can cause upstream flooding and flash floods downstream. In addition to the damage caused by floodwater and rapid currents, the force exerted by large blocks of ice exacerbates the damage and can create deadly conditions.

Climate change is exacerbating these phenomena in certain regions of the world through the overall increase in temperatures and precipitation. But climate change is also responsible for extreme temperature events, and therefore intense cold. Structures built in flood-prone areas, such as bridges, roads, and dams, are particularly vulnerable to severe flooding.

In problems involving water flow, hydraulics researchers generally assume that structures are infinitely rigid. However, in reality, structures can deform, vibrate, and be damaged during floods. From a structural engineer's perspective, it is important to incorporate structural flexibility to adopt a more realistic and less conservative approach. A 3D numerical model using finite elements and computational fluid dynamics (CFD) of an experimental case of a rigid structure impacted by a dam failure was built and validated. A convergence study was performed on this model. The influence of flexibility, the structure's boundary conditions, and the waterbed height was also investigated. These parameters all impact the relative displacement of the structure, the base reaction, and the stresses. The fluid domain is much larger than the solid domain. To study the structure's behavior, its mesh must be refined. However, refining the mesh also refines the fluid domain, thus increasing computation time. This effect is exacerbated when the modeling is in 3D. To optimize computation time, truncated models were created by reducing the fluid domain. The results of the full and truncated models are consistent, demonstrating the effectiveness of truncation.

In northern countries like Canada, the combined effect of flooding and ice is devastating to structures. However, their combined effect is rarely studied. Based on the numerical model of the experimental case, an ice cover attached to the structure was added. The presence of the ice cover significantly impacts the structure's response in terms of displacement and reaction, and also affects water flow. Another way to reduce the computation time of fluid-structure interaction models is through smoothed particle hydrodynamics. Therefore, particle-based numerical models have been developed and compared to mesh-based models. The results are

consistent, but each model has its advantages and disadvantages. Particle-based models are much faster, but the fluid pressure is difficult to exploit due to its high instability. A particle-based model of an experimental case involving a wave generated by a dam break on a rigid structure was developed. The prediction of the water level, compared to experimental and computational fluid dynamics results, shows very similar trends. A particle-based model of a full-scale dam was also developed. The flow shapes are similar to those of the computational fluid dynamics model.

This thesis quantified the influence of mesh size, flexibility, boundary conditions, and water level on the structure in mesh-based models. It also helped to show that the particle method of smoothed particle hydrodynamics is a fast and reliable alternative for modeling fluid-structure and fluid-ice-structure interaction.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iii

REMERCIEMENTS iv

RÉSUMÉ v

ABSTRACT vii

LISTE DES TABLEAUX xii

LISTE DES FIGURES xiii

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS xix

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1
1.1 Définitions et concepts de base 1
1.1.1 Les inondations 1
1.1.2 Les inondations dues à la glace 2
1.2 Éléments de la problématique 3
1.3 Objectifs de recherche 4
1.4 Plan du mémoire 4

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE 5
2.1 Introduction 5
2.2 Effets des charges hydrauliques extrêmes sur les structures 5
2.2.1 Impact des inondations 5
2.2.2 Effets de la glace sur les inondations 9
2.2.3 Effets du changement climatique 12
2.3 La glace 15
2.3.1 Structure moléculaire de la glace 15
2.3.2 Formation de la glace 17
2.3.3 Classification de la glace 18
2.4 Estimation de la charge 18
2.4.1 Les équations empiriques de l'effet de la glace 19
2.4.2 Méthodes expérimentales 21
2.5 Formulations numériques 25
2.5.1 Équations de Navier-Stokes 25

2.5.2 La méthode des éléments finis 26
2.5.3 L'hydrodynamique des particules lissées 34

CHAPITRE 3 DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES ÉLÉMENTS FINIS 38
3.1 Introduction 38
3.2 Construction et validation de modèles numériques 38
3.2.1 Description du cas d'étude expérimental : structure rigide impactée pour une rupture de barrage 38
3.2.2 Modélisation numérique et validation 39
3.2.3 Étude de convergence 41
3.3 Étude de différentes configurations 48
3.3.1 Influence de la flexibilité de la structure 48
3.3.2 Influence des conditions de bord de la structure 52
3.3.3 Influence du lit d'eau 57
3.3.4 Conclusion 62
3.4 Troncation 63
3.4.1 Modélisation de la troncation 63
3.4.2 Développement de modèles tronqués d'un cas expérimental 71

CHAPITRE 4 DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES AVEC HYDRODYNAMIQUE DES PARTICULES LISSÉES ET COMPARAISON AVEC LE MODÈLE ÉLÉMENTS FINIS 75
4.1 Introduction 75
4.2 Description des modèles 75
4.3 La statique en mécanique des fluides numériques et l'hydrodynamique des particules lissées 76
4.3.1 La statique en éléments finis 76
4.3.2 La statique en hydrodynamique des particules lissées 79
4.3.3 Influence d'un couvert de glace en mécanique des fluides numériques en statique 80
4.3.4 Influence d'un couvert de glace en hydrodynamique des particules lissées en statique 86
4.4 Avec une rupture de barrage 91
4.5 Cas expérimental de couvert de glace 94
4.5.1 Description du cas étude expérimental : onde générée par une rupture de barrage 94
4.5.2 Modélisation numérique et validation 96

4.6 Barrage de taille réelle 101

CHAPITRE 5 CONCLUSION 104
5.1 Synthèse des travaux 104
5.2 Limitations de l'étude 105
5.3 Améliorations futures 105

RÉFÉRENCES 106

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Paiements fédéraux relatifs aux inondations depuis 1970 versés en vertu des accords AFC au Québec [1]	8
Tableau 2.2	Comparaison des méthodes de calcul entre différentes normes de conception (piles de pont) [2]	19
Tableau 2.3	Codes de force de glace des rivières [3]	20
Tableau 3.1	Maillages étudiés	42
Tableau 3.2	Temps des modèles selon le maillage	48
Tableau 3.3	Comparaison des déplacement relatif maximum pour les cas flexible et rigide	49
Tableau 3.4	Comparaison des contraintes principales maximales au milieu de la structure pour les cas flexible et rigide	51
Tableau 3.5	Comparaison des déplacement relatifs maximum pour le cas flexible avec bords fixes et bords libres	54
Tableau 3.6	Comparaison des déplacements relatifs maximum pour le cas rigide avec bords fixes et bords libres	54
Tableau 3.7	Comparaison des contraintes principales maximales au milieu de la structure flexible selon les conditions de bords	56
Tableau 3.8	Comparaison des déplacements relatifs maximaux en % pour les différentes hauteurs de lit d'eau en configuration barrage	61
Tableau 3.9	Comparaison des déplacements relatifs maximaux en % pour les différentes hauteurs de lit d'eau en configuration rivière	62
Tableau 3.10	Taille des maillages de 1a à 6a	64
Tableau 3.11	Temps de simulation des différents modèles complet et tronqués	73
Tableau 4.1	Maillages étudiés	77

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Une maison détruite à Benchlands dans le sud de l'Alberta, à la suite des inondations de juin 2013. [4] 2

Figure 1.2 Les glaces du fleuve Yukon pourraient créer un embâcle en aval de Dawson [5] 2

Figure 1.3 Vue schématique des embâcles fluviaux et des niveaux d'eau associés [6] 3

Figure 2.1 Pont emporté après les inondations dues au typhon Ragasa près de Guangfu, Taiwan, 2025 [7] 5

Figure 2.2 Bâtiments détruits par les inondations suite à des pluies torrentielles à Bali, Indonésie, 2025 [8] 6

Figure 2.3 Vue aérienne de bâtiments détruits par les inondations éclaires à Mokwa, Nigéria, 2025 [9] 6

Figure 2.4 Effondrement d'un pont dû aux inondations après une tempête dans la province du Shaanxi, Chine, 2024 [10] 7

Figure 2.5 Pont emporté par la rivière à cause des précipitations dans l'Aude, France, 2018 [11] 7

Figure 2.6 Pont résistant aux flots à Baie-Saint-Paul, Québec, Canada 2023 [12] 8

Figure 2.7 Répartition géographique et fréquence des études de cas sur les inondations dues aux embâcles. La taille du cercle est proportionnelle au nombre d'études de cas rapportées dans la littérature. [13] 10

Figure 2.8 Des morceaux de glace de grande taille recouverts de boue jonchent la route le long de Riverview Drive, qui encadre le côté est de Hay River. [14] 11

Figure 2.9 Embâcles obstruant l'écoulement d'eau au niveau de plusieurs ponts au Canada 11

Figure 2.10 Effondrements de ponts suite à un embâcle à Bromptonville (Québec, Canada, 2018) [15] 12

Figure 2.11 Tendances de la chronologie des crues dues aux embâcles entre 1903 et 2015. Les cercles rouges (valeurs négatives) indiquent les décalages précoces, tandis que les cercles bleus (valeurs positives) représentent les décalages tardifs. La taille du cercle est proportionnelle à l'ampleur du décalage. [13] 14

Figure 2.12 Tendances observées des débits de pointe des crues dues aux embâcles de 1903 à 2015. Le triangle rouge descendant (valeurs négatives) indique une diminution de l'ampleur (en pourcentage par an), tandis que le triangle bleu ascendant (valeurs positives) représente une augmentation de l'ampleur (en pourcentage par an) des embâcles. La taille du triangle est proportionnelle à l'ampleur de la tendance. [13] 15
Figure 2.13 Arrangement des atomes d'oxygène dans la glace [16] 16
Figure 2.14 Densités de la glace et de l'eau saturée en air à la pression atmosphérique [17] 16
Figure 2.15 Étapes du développement de la glace fluviale [18] 17
Figure 2.16 Formation d'un couvert de glace uniforme [19] 18
Figure 2.17 Dispositif expérimental pour l'étude de migration d'une onde de particules de glace [20] 21
Figure 2.18 Dispositif expérimental pour l'étude de l'impact d'un couvert de glace rigide. [21] 22
Figure 2.19 L'embâcle le plus épais se trouve au milieu du canal, en aval du pilier du pont. [22] 23
Figure 2.20 Configuration expérimentale de rupture de barrage. (a) image de la configuration (b) la configuration schématique et (c) la disposition initiale des blocs. [23] 24
Figure 3.1 Dimensions (m) du dispositif expérimental de Koshizuka et al. (1995) [24] 39
Figure 3.2 Schéma explicatif de la méthode de volume de fluide et de l'Interaction Fluide-Structure (IFS) (Communication personnelle de Bouaanani (2024)) 39
Figure 3.3 Schéma du modèle éléments finis (Adapté d'une communication personnelle de Bouaanani (2024)) 40
Figure 3.4 Comparaison de la pression au milieu de la structure sur la surface en amont (a) en 2D et 3D de Jianguo et al. (2024) [2] (b) résultats numériques de Hansch et al. (2014) [25] ; Issakhov et al. (2018) [26] ; OpenFOAM 41
Figure 3.5 Structure avec maillage de 1 à 6 42
Figure 3.6 Déplacement relatif au sommet de la structure flexible en amont selon les maillages 1 à 6 43
Figure 3.7 Déplacement relatif maximal au sommet de la structure flexible en amont selon les maillages 1 à 6 43
Figure 3.8 Réaction à la base de la structure flexible en amont selon les maillages 1 à 6 44

Figure 3.9 Réaction Y maximale à la base de la structure flexible selon les maillages 1 à 6 44
Figure 3.10 Temps d'impact maximal selon les maillages 1 à 6 45
Figure 3.11 Coupes de contrainte principale maximale pour le maillage 1 45
Figure 3.12 Coupes de contrainte principale maximale pour le maillage 2 46
Figure 3.13 Coupes de contrainte principale maximale pour le maillage 3 46
Figure 3.14 Coupes de contrainte principale maximale pour le maillage 4 46
Figure 3.15 Coupes de contrainte principale maximale pour le maillage 5 47
Figure 3.16 Coupes de contrainte principale maximale pour le maillage 6 47
Figure 3.17 Contrainte principale maximale pour les maillages 1 à 6 48
Figure 3.18 Déplacement au milieu de la structure en amont de l'écoulement . . . 49
Figure 3.19 Réaction à la base des structures flexibles et rigides 50
Figure 3.20 Coupes de contrainte principale maximale de la structure flexible . . 51
Figure 3.21 Coupes de contrainte principale maximale de la structure rigide . . . 52
Figure 3.22 Schéma du cas de Koshizuka et al. [24] en 3D avec conditions aux bords 52
Figure 3.23 Cas avec structure flexible selon différentes conditions de bords à $t =$ 0.15 s avec un facteur d'amplification de 10 53
Figure 3.24 Déplacement relatif en fonction des conditions de bords pour les structures (a) flexible et (b) rigide 53
Figure 3.25 Réactions selon les conditions de bord pour de la structure flexible en (a) en Y, (b) en Z, (c) norme, de la structure rigide en (d) en Y, (e) en Z, (f) norme 55
Figure 3.26 Coupes de contrainte principale maximale de la structure flexible avec bords fixes pour le maillage 5 56
Figure 3.27 Coupes de contrainte principale maximale de la structure flexible avec bords libres pour le maillage 5 56
Figure 3.28 Modèle avec lit d'eau pour différentes hauteurs en m 57
Figure 3.29 Niveaux de lits d'eau étudiés. Le niveau d'eau en mètre à gauche, la proportion par rapport à la structure à droite 57
Figure 3.30 Déplacement relatif au sommet en amont de la structure flexible avec bords fixes pour un lit d'eau en configuration barrage pour les niveaux (a) 1/3, (b) 1/2, (c) 2/3, (d) 3/3 58
Figure 3.31 Déplacement relatif au sommet en amont de la structure rigide avec bords fixes pour un lit d'eau en configuration barrage pour les niveaux (a) 1/3, (b) 1/2, (c) 2/3, (d) 3/3 59

Figure 3.32 Réactions selon la configuration du lit d'eau pour de la structure flexible en (a) en Y, (b) en Z, (c) norme, de la structure rigide en (d) en Y, (e) en Z, (f) norme 60
Figure 3.33 Déplacement relatif au sommet en amont de la structure flexible (a) avec bords fixes, (b) bords libres, pour la structure rigide (c) bords fixes, (d) bords libres en configuration barrage 61
Figure 3.34 Déplacement relatif au sommet en amont de la structure flexible (a) avec bords fixes, (b) bords libres, pour la structure rigide (c) bords fixes, (d) bords libres en configuration rivière 62
Figure 3.35 Dimensions du modèle 3D complet en m 64
Figure 3.36 Définition des variables d'entrée à la surface d'entrée (en violet) . . . 65
Figure 3.37 Définition des maillages 1a à 6a 65
Figure 3.38 Comparaison des variables d'entrée et les valeurs considérées par la formulation Flow-Condition-Based-Interpolation-Centered (FCBI-C), maillage 1a 66
Figure 3.39 Comparaison des variables d'entrée et les valeurs considérées par la formulation FCBI-C, maillage 6a 67
Figure 3.40 Comparaison des variables d'entrée et les valeurs considérées par la formulation FCBI-C, maillages 1a à 6a 68
Figure 3.41 Dimensions du modèle 3D tronqué en (m) 69
Figure 3.42 Procédure de transfert des paramètres du modèle 3D complet vers le modèle tronqué pour le maillage 1a 69
Figure 3.43 Comparaison des variables d'entrée et les valeurs considérées par la formulation FCBI-C à la surface de troncation à $x = 0.03$, maillage 1a 70
Figure 3.44 Comparaison des variables d'entrée et les valeurs considérées par la formulation FCBI-C à la surface de troncation à $x = 0.03$, maillage 6a 71
Figure 3.45 Emplacement des lignes de troncations (m) 72
Figure 3.46 Définition des troncations du modèle issu du cas expérimental 72
Figure 3.47 Comparaison du déplacement relatif au milieu du sommet des modèles complet, troncation A et troncation B 73
Figure 3.48 Comparaison de la réaction à la base des modèles complet, troncation A et troncation B 74
Figure 4.1 Cas statique avec lit d'eau au niveau 2/3 en configuration barrage . . 77
Figure 4.2 Pression à la base de la structure selon plusieurs maillages 78
Figure 4.3 Réaction à la base de la structure selon plusieurs maillages 78
Figure 4.4 Pression à la base de la structure pour différents espacements h_0 . . . 79

Figure 4.5 Réaction à la base de la structure pour différents espacements h_0 . . . 80
Figure 4.6 Cas avec un couvert de glace . . . 81
Figure 4.7 Maillage de la structure avec couvert de glace pour un maillage 5 . . 81
Figure 4.8 Comparaison de la pression à la base de la structure selon plusieurs maillages . . . 82
Figure 4.9 Comparaison de la réaction à la base de la structure selon plusieurs maillages . . . 83
Figure 4.10 Comparaison de la pression à la base de la structure sans glace, avec glace rigide, flexible, selon plusieurs maillages . . . 84
Figure 4.11 Triangle de pression le long de la structure avec glace rigide, flexible, et sans glace, à 0.5s . . . 85
Figure 4.12 Comparaison du déplacement du couvert de glace selon Z selon plusieurs maillages . . . 85
Figure 4.13 Comparaison de la pression à la base de la structure selon plusieurs maillages . . . 86
Figure 4.14 Comparaison de la réaction à la base de la structure selon plusieurs maillages . . . 87
Figure 4.15 Comparaison de la pression à la base de la structure sans glace, avec glace rigide, flexible, selon plusieurs h_0 . . . 88
Figure 4.16 Déplacement à l'extrémité de la glace flexible selon plusieurs maillages 88
Figure 4.17 Comparaison de la pression à la base de la structure selon plusieurs maillages . . . 89
Figure 4.18 Comparaison de la réaction à la base de la structure selon plusieurs maillages . . . 90
Figure 4.19 Comparaison du déplacement à l'extrémité inférieure du couvert de glace flexible pour plusieurs maillages . . . 91
Figure 4.20 Dimensions de rupture de barrage modifiées (m) . . . 92
Figure 4.21 Ecoulement de l'eau en Mécanique des Fluides Numériques (MFN) sur plusieurs pas de temps . . . 92
Figure 4.22 Ecoulement de l'eau en Hydrodynamique des Particules Lissées (HPL) sur plusieurs pas de temps . . . 93
Figure 4.23 Réaction à la base de la structure selon différents couverts de glace . 94
Figure 4.24 Coupe longitudinale du dispositif expérimental de Fuamba et al. (2007) [21] . . . 95
Figure 4.25 Dispositif expérimental de Fuamba et al. (2007) [21] . . . 95
Figure 4.26 Hydrographe de Fuamba et al. (2007) [21] . . . 96

Figure 4.27 Modèle de Nomeritae et al. (2018) [27] avec conditions initiales 96
Figure 4.28 Modèle de Knuchel et al. (2021) [28] avec conditions initiales 97
Figure 4.29 Profil de vitesse de l'écoulement appliqué au niveau du déversoir . . . 97
Figure 4.30 Dimensions du canal sans la glace 98
Figure 4.31 Hauteur d'eau sans glace au niveau de la structure, avec des structures de 0.22 m et de 0.505 m 98
Figure 4.32 Hauteur d'eau sans glace au niveau de la structure, avec une structure de 0.22 m 99
Figure 4.33 Dimensions du canal avec la glace 100
Figure 4.34 Hauteur d'eau avec glace au niveau de la structure au dessus du couvert, avec des structures de 0.22 et 0.505 m de haut 100
Figure 4.35 Hauteur d'eau avec glace au niveau de la structure au dessus du couvert, avec une structure de 0.505 m de haut 101
Figure 4.36 Dimensions du modèle préliminaire du barrage en taille réelle (m) . . 102
Figure 4.37 Profil de vitesse de l'écoulement appliqué à l'entrée du modèle (m/s) 102
Figure 4.38 Ecoulement de l'eau en MFN sur plusieurs pas de temps 103
Figure 4.39 Ecoulement de l'eau en HPL sur plusieurs pas de temps 103

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

EF	Éléments Finis
FCBI	Flow-Condition-Based-Interpolation
FCBI-C	Flow-Condition-Based-Interpolation-Centered
IFS	Interaction Fluide-Structure
HPL	Hydrodynamique des Particules Lissées
LEA	Lagrangienne-Eulérienne Arbitraire
MEF	Méthode des Éléments Finis
no-FCBI	no-Flow-Condition-Based-Interpolation
SST	Shear Stress Transport
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
VOF	Volume Of Fluid

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les inondations sont les catastrophes naturelles qui provoquent le plus de dégâts matériels au Canada et dans le monde. Elles peuvent survenir en ville comme à la campagne, à n'importe quelle période de l'année [29]. Les structures hydrauliques et les ponts sont particulièrement vulnérables aux inondations du fait de leur proximité aux étendues d'eau. Et à cause du changement climatique, les inondations extrêmes sont en fréquence et en intensité plus élevées. Dans les pays du nord, la formation de glace pendant l'hiver rend les inondations d'autant plus dangereuses et destructrices. L'intégrité de ces structures est essentielle pour protéger les vies et maintenir le bon fonctionnement des sociétés. C'est pourquoi il est primordial de connaître l'impact de la glace et des inondations, afin de construire des structures durables et rénover les structures vulnérables.

1.1 Définitions et concepts de base

1.1.1 Les inondations

La crue est la submersion d'un espace par de l'eau liquide. Son origine peut être due au débordement d'un cours d'eau, du ruissellement d'origine pluviale, de débordement ou de rupture d'ouvrages artificiels hydrauliques. Les inondations sont des crues qui menacent les vies humaines, les habitations, les industries ou les infrastructures essentielles comme les ponts ou les routes. Au Canada, la plupart des inondations sont causées par le débordement de cours d'eau. La principale cause est l'accumulation des précipitations hivernales, où l'eau est retenue sous forme de neige, de verglas ou de grésil. Avec le dégel printanier, cette dernière s'écoule en quelques semaines [29].

Une des pires inondations récente du Canada est celle dans le centre et le sud de l'Alberta en juin 2013, illustrée par une maison détruite dans la figure 1.1.



FIGURE 1.1 Une maison détruite à Benchlands dans le sud de l'Alberta, à la suite des inondations de juin 2013. [4]

1.1.2 Les inondations dues à la glace

Définitions

Débâcle : Dislocation des glaces recouvrant un cours d'eau, qui sont emportées par le courant.

La glace du fleuve Yukon s'est fendue, puis une débâcle a eu lieu en 2025. Ce phénomène est illustré dans la figure 1.2.



FIGURE 1.2 Les glaces du fleuve Yukon pourraient créer un embâcle en aval de Dawson [5]

Dans certaines régions, les débâcles ont lieu chaque année à l'arrivée du printemps lorsque les températures augmentent. Ainsi, le risque est d'inondation est présent chaque année.

Embâcle : Formation d'un amoncellement, en particulier de glaçons ou de bois flottés, qui obstrue un cours d'eau.

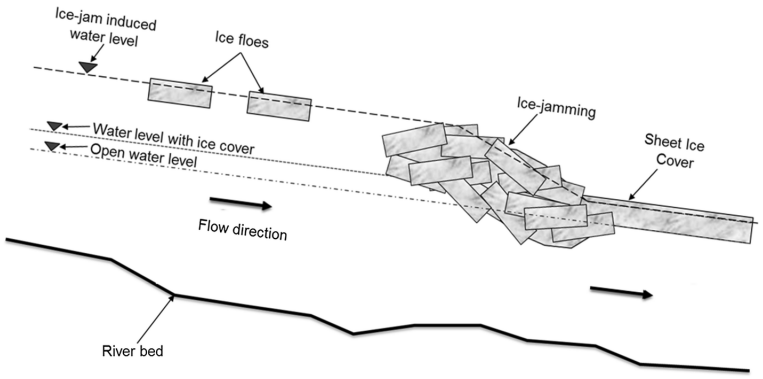


FIGURE 1.3 Vue schématique des embâcles fluviaux et des niveaux d'eau associés [6]

Mécanisme

Les débâcles dues aux gel ont un potentiel moindre de d'engendrer des dégâts car les débits sont moins élevés. Les embâcles peuvent rester en place pendant quelques minutes ou plusieurs jours, sur quelques centaines de mètres ou bien plusieurs kilomètres. Le processus de débâcles et d'embâcles dépendent de trois facteurs [30] :

- l'hydrographe d'écoulement
- l'épaisseur du couvert de glace
- la morphologie du cours d'eau

Il existe deux types d'embâcles [31] :

- thermiques, lorsque le couvert de glace fond et devient fragilisé. Le courant la brise.
- mécaniques, lorsque le couvert de glace se brise à cause de forces extérieures, comme le vent.

Les instances œuvrant dans le domaine des inondations possèdent très peu d'outils permettant la détermination du risque hivernal et printanier associé à la glace [32].

1.2 Éléments de la problématique

Les infrastructures civils comme les ponts et les barrages, sont de plus en plus affectés par les inondations dues à la glace. Plusieurs méthodes pour modéliser l'écoulement de l'eau existent, comme la MFN, HPL. Ces modèles permettent de prédire avec précision la variation de l'écoulement pendant le temps, dont la position de la surface libre, ainsi que d'estimer les propriétés de l'écoulement comme les pressions et la vitesse.

Du point de vue du génie hydraulique, lorsqu'une structure est soumise à des charges dues au crues, elle est généralement supposée infiniment rigide. Cependant, on a observé que les

structures peuvent se déformer et vibrer. Leurs déformations ont un impact sur l'interaction fluide-structure et doit être prise en compte. Du point de vue du génie civil, c'est le comportement de la structure qui est étudié, sans prendre en compte les détails de l'impact du fluide. Donc il est crucial de réaliser des analyses fiables en considérant à la fois l'écoulement du fluide et la flexibilité des structures. De plus, l'effet des couverts de glace, des débâcles et des embâcles ne sont pas bien connus. Par conséquent, il est important de prendre en compte la glace dans les simulations.

1.3 Objectifs de recherche

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier la réponse des structures soumises à des charges dues aux crues, en se focalisant sur l'interaction dynamique entre le fluide et la structure, les effets 3D du fluide sur la structure, et l'effet de la présence d'un couvert de glace pendant la crue.

Les sous-objectifs sont :

- Développer et valider des modèles numériques d'interaction fluide-structure avec la méthode des éléments finis et la mécanique des fluides numériques
- Développer des modèles en hydrodynamique des particules lissées et les comparer aux modèles précédents
- Incorporer l'effet d'un couvert de glace sur les modèles développés

1.4 Plan du mémoire

Le plan du mémoire est le suivant :

- La revue de littérature au chapitre 2
- L'étude de différentes configurations sur la réponse structurelle due aux charges liées aux crues au chapitre 3
- L'influence de la présence d'un couvert de glace au chapitre 4
- La conclusion au chapitre 5.

Après l'introduction, une revue de littérature sur les équations empiriques des charges dues à la glace sur les structures, les méthodes numériques et les analyses réalisées est présentée au chapitre 2.

Le dernier chapitre du mémoire (i.e. chapitre 5) présente les principales conclusions et fournit des suggestions pour les études futures.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Ce chapitre présente quelques enjeux liés aux inondations et à la glace, ainsi que des outils d'analyse et des modèles numériques disponibles dans la littérature.

2.2 Effets des charges hydrauliques extrêmes sur les structures

2.2.1 Impact des inondations

Les inondations sont les catastrophes causant le plus de dégâts matériels dans le monde. Elles détruisent les infrastructures, ce qui met en danger les vies. Plusieurs évènements récents illustrent leur nocivité.

Le typhon Ragasa est un super typhon de catégorie 5 sur l'échelle de Saffir-Simpson, qui est l'intensité la plus élevée. Il a touché les Philippines, Taïwan, Hong Kong, Macao. Au moins 14 personnes sont décédées à Taïwan suite à la rupture d'une digue, et un pont a notamment été emporté par une rivière en crue près de la ville de Guangfu. [7]



FIGURE 2.1 Pont emporté après les inondations dues au typhon Ragasa près de Guangfu, Taiwan, 2025 [7]

Les pluies torrentielles du 9 septembre 2025 ont provoqué des inondations sur l'île de Bali, qui ont fait au moins 13 morts et 4 disparus. Les changements climatiques ont accru l'intensité des tempêtes, entraînant des pluies plus abondantes, des crues soudaines et des rafales plus violentes. Certains bâtiments n'ont pas résisté aux crues. [8]



FIGURE 2.2 Bâtiments détruits par les inondations suite à des pluies torrentielles à Bali, Indonésie, 2025 [8]

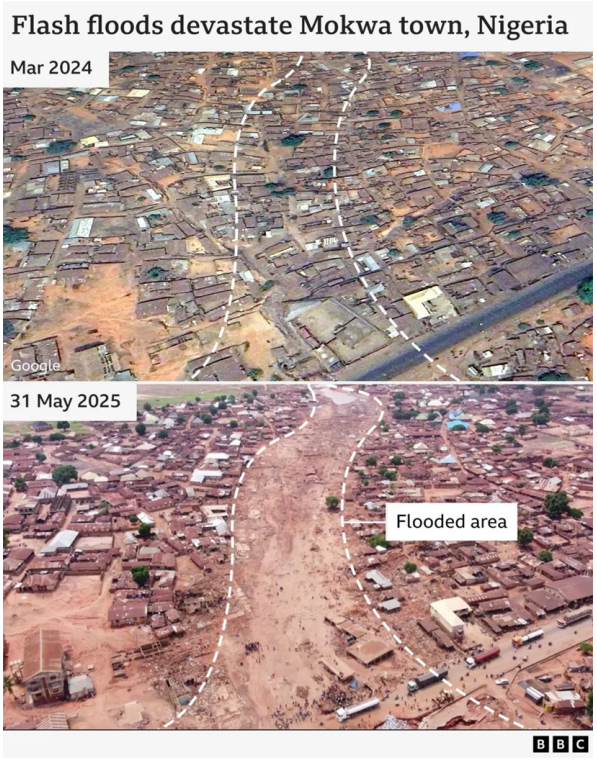


FIGURE 2.3 Vue aérienne de bâtiments détruits par les inondations éclaires à Mokwa, Nigéria, 2025 [9]

La figure 2.3 illustre l'impact qu'ont eu les crues soudaines dans la ville de Mokwa au Nigéria. Les infrastructures sur le passage de l'inondation ont été rasées. Avec plus de 200 morts, cette inondation due aux pluies torrentielles est la pire qu'a connu le pays les 60 dernières années [9].



FIGURE 2.4 Effondrement d'un pont dû aux inondations après une tempête dans la province du Shaanxi, Chine, 2024 [10]

En Chine, après une tempête, au moins 11 personnes avaient été tuées et 30 autres portées disparues à la suite de l'effondrement du pont [10]. Les inondations mettent en péril les infrastructures comme les ponts, qui sont d'autant plus essentielles lors des catastrophes. Parce qu'elles permettent l'évacuation des populations, le transport des blessés, l'acheminement d'aide et de nourriture. Lorsque ces infrastructures sont détruites par les inondations, les populations peuvent se retrouver isolées, et donc en danger. C'est ce qui s'est passé en France, lors des inondations dues aux précipitations dans l'Aude, illustré dans la figure 2.5.



FIGURE 2.5 Pont emporté par la rivière à cause des précipitations dans l'Aude, France, 2018 [11]



FIGURE 2.6 Pont résistant aux flots à Baie-Saint-Paul, Québec, Canada 2023 [12]

Les inondations sont les catastrophes les plus courantes et les plus coûteuse au Canada. Chaque année, elles touchent des centaines de milliers de Canadiens et causent des millions de dollars de dégâts. Au cours des dernières décennies, le problème des inondations en milieu urbain n'a cessé de prendre de l'ampleur, causant des dommages de plus de 20 milliards $ entre 2003 et 2012. Qui plus est, de nombreux propriétaires canadiens ne sont pas assurés contre les inondations et peuvent devoir débourser de leur poche pour remplacer leurs biens et effectuer les réparations nécessaires. [33]

TABLEAU 2.1 Paiements fédéraux relatifs aux inondations depuis 1970 versés en vertu des accords AFC au Québec [1]

Inondation	**Part du fédéral réelle / estimée**
1974	8 670 477 $
1976	7 582 330 $
1983	17 346 772 $
1987	5 580 267 $
1996 (juillet)	250 000 000 $ Inondation pour laquelle un paiement final n'a pas encore été fait. Ainsi, le chiffre indique les paiements jusqu'ici et/ou les paiements estimatifs à venir.
1996 (novembre)	6 000 000 $ Inondation pour laquelle un paiement final n'a pas encore été fait. Ainsi, le chiffre indique les paiements jusqu'ici et/ou les paiements estimatifs à venir.
1998 (mars/avril)	6 000 000 $ Inondation pour laquelle un paiement final n'a pas encore été fait. Ainsi, le chiffre indique les paiements jusqu'ici et/ou les paiements estimatifs à venir.

Le coût total estimé par Sécurité publique Canada pour le Québec s'élève à 301 179 846 $. Pour le Canada, il s'élève à 713 951 406 $ [1].

2.2.2 Effets de la glace sur les inondations

Dans l'hémisphère nord, presque 60% des rivières connaissent un impact important saisonnier de la glace [34]. En effet, sur le continent Nord-Américain, la plupart des cours d'eau et des lacs au dessus de la 35° parallèle nord ont généralement un couvert de glace permanent chaque hiver [17]. Dans les pays nordiques, les embâcles provoquent des inondations parmi les plus importantes et les plus destructrices [32]. Lorsqu'il fait froid, une partie de l'eau des rivières gèle et un couvert de glace se forme. La glace peut se briser, à cause des forces extérieures ou lorsque les températures augmentent. Les morceaux de glace flottants sont emportés par le courant : ce sont les débâcles. A cause divers obstacles comme les ponts, un rétrécissement du cours d'eau, un coude, ou un couvert de glace, la glace flottante peuvent se retrouver bloquer. Ces dernières peuvent obstruer partiellement ou complètement le lit d'eau pendant de heures ou mêmes des jours : ce sont les embâcles. Ainsi, cela cause des inondations non seulement en amont, mais aussi en aval de l'embâcle lorsque cette dernière se brise, résultant en des inondations éclaires [35]. Selon la saison, les inondations dues aux embâcles peuvent durer très longtemps. Souvent, elles peuvent être intenses, mais persistent relativement peu de temps. C'est particulièrement vrai lors des embâcles de débâcle printanière. Le niveau d'eau baisse généralement après la libération ou la fonte de l'embâcle. En cas d'embâcles de gel, de mi-hiver ou de barrages de glace suspendus, les inondations peuvent persister plusieurs mois, les températures restant négatives, ce qui empêche la fonte des glaces. À la fin de l'automne 2005 et au début de l'hiver 2006, d'importantes quantités de frasil se sont formées dans la rivière Kaministiquia créant un embâcle sur plus de 10 km [36]. Le gel des eaux de crue retenues derrière ces embâcles persistants peut également causer des dommages supplémentaires. Par exemple, dans la ville de St. Raymond de Portneuf dans la province du Québec au Canada, des digues ont été construites en 2009 pour protéger le centre-ville contre une crue de récurrence centennale. Cependant, elles ont débordé lors des débâcles de 2012 et 2014, causant respectivement 1 et 4 millions CAD de dommages [32]. Les inondations dues à la glace peuvent survenir très rapidement et sont difficiles à prédire. Il n'y a parfois pas assez de temps pour prévenir les habitants. [35] Outre les dégâts causés par les crues et les rapides, les forces considérables exercées par les gros morceaux de glace en mouvement aggravent les dégâts et peuvent mettre en danger la vie des populations [32].

Les inondations dues aux embâcles sont fréquentes dans de nombreux pays nordiques, dont le Canada, les Etats-Unis d'Amérique, la Russie, la Pologne, et la Chine [13].

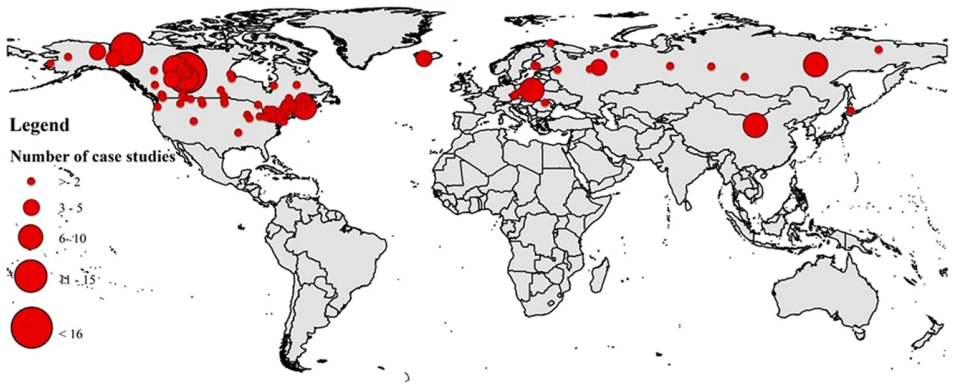


FIGURE 2.7 Répartition géographique et fréquence des études de cas sur les inondations dues aux embâcles. La taille du cercle est proportionnelle au nombre d'études de cas rapportées dans la littérature. [13]

Il est à noter que la figure 2.7 reflète seulement les régions où il y a eu des études de cas dans les articles scientifiques. De nombreuses inondations dues aux embâcles ne sont pas reportées [13]. Les coûts financiers sont difficiles à estimer. En Amérique du Nord, ils sont estimés à 300 millions USD en 2017 Les estimations ne tiennent que en compte des coûts monétaires et concrets et ne reflète pas d'autres implications graves comme le déménagement des sinistrés ou même la perte de vie [13]. Lamichhane et al. (2022) [37] ont remarqué que le couvert de glace avait un effet significatif dans la plupart des sections de la rivière Grand River dans l'Ohio aux États-Unis d'Amérique. L'augmentation moyenne du niveau de la rivière due à la présence de glace sur la rivière Grand était d'environ 60 cm, la hausse maximale atteignant 2 mètres dans la section amont du pont South Madison. De plus, l'effet des embâcles a également été considérablement observé dans la section amont du pont. De plus, les inondations causées par la glace surviennent de manière imprévisible. Les dommages peuvent survenir aux propriétés, infrastructures, à l'électricité, aux eco-systèmes. Les inondations dues à la glace peuvent également provoquer des coûts indirects, comme la perturbation de circulation, la perte de production industrielle, le déploiement d'équipes d'urgence [32].

Dans les Territoires du Nord-Ouest à Hay River et dans la Première Nation K'atl'odeeche, les niveaux d'eau ont atteint de nouveaux sommets à cause de la débâcle. La montée des eaux a inondé et gravement endommagé les infrastructures des deux communautés. Les eaux ont aussi mis à mal le réseau d'égouts et privé d'électricité l'usine de traitement des eaux. Les populations ont dues être évacuées.



FIGURE 2.8 Des morceaux de glace de grande taille recouverts de boue jonchent la route le long de Riverview Drive, qui encadre le côté est de Hay River. [14]

Les ponts se trouvant au dessus de cours d'eau sont particulièrement vulnérables à la glace, qui peut s'accumuler dessous et générer des forces importantes.



(a) Embâcle à Golden, Colombie-Britannique, Canada, 2013 [38]



(b) Embâcle à Perth-Andover, Nouveau-Brunswick, Canada, 2015 [14]

FIGURE 2.9 Embâcles obstruant l'écoulement d'eau au niveau de plusieurs ponts au Canada

Dans les figures 2.9b et 2.9a, un embâcle est formé en dessous du pont, et engendre une force de poussée sur les piles. La structure pourrait céder. L'incertitude de l'intégrité des ponts avec la vieillissement rend la situation d'autant plus dangereuse. Un autre exemple sont les ponts qui se sont effondrés à cause d'un embâcle sur la rivière St-François, à Bromptonville au Québec [15].

Cinq facteurs déterminent si les blocs de glace peuvent atteindre les zones de débordement et l'ampleur des dommages qu'ils peuvent causer en l'absence de digues [32] :

— La hauteur d'eau par rapport à la rive

— L'épaisseur des blocs de glace, qui détermine si leur côté inférieur peut franchir le bord des berges et atteindre la plaine inondable
— La vitesse de l'eau dans la plaine inondable, qui affecte les forces d'impact des blocs de glace sur les structures
— La taille ou la masse des blocs de glace dans la plaine inondable, qui détermine également les forces d'impact des blocs de glace sur les structure
— La présence ou l'absence d'obstacles sur la berge pouvant empêcher ou non l'écoulement des blocs de glace dans la plaine inondable (couche de neige, arbres de taille et de densité variables, ouvrages de contrôle des glaces ou autres infrastructures)



(a) Pont ferroviaire effondré



(b) Pont pour motoneigistes, quadistes et cyclistes effondré

FIGURE 2.10 Effondrements de ponts suite à un embâcle à Bromptonville (Québec, Canada, 2018) [15]

Les inondations causées par la débâcle des glaces montent souvent rapidement et il n'y a pas toujours le temps de mettre en œuvre des mesures d'évacuation ou d'atténuation [32].

2.2.3 Effets du changement climatique

Le changement climatique, causé par l'activité humaine, altère le comportement de l'atmosphère terrestre. Il a un impact significatif sur le cycle de l'eau, et donc sur les cours d'eau et sur la formation la glace. Le changement climatique entraîne des modifications de la fréquence, de l'intensité, de l'étendue spatiale, de la durée et du calendrier des extrêmes météorologiques et climatiques, et peut engendrer des phénomènes extrêmes sans précédent. Il existe des preuves que certains extrêmes ont changé en raison d'influences anthropiques, notamment l'augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre. Il est probable que la fréquence des fortes précipitations ou la proportion des précipitations totales

provenant de fortes pluies augmentera au cours du XXIe siècle dans de nombreuses régions du globe. Les inondations risquent donc d'être de plus en plus fréquentes et d'augmenter en intensité. [39] A cause du changement de climatique et de la hausse des températures moyennes, la glace serait plus fine, et les charges induites pas le ruissellement plus soudaines. La durée de la saison des couverts de glace diminue à cause du changement climatique. Un climat plus chaud et plus humide retarde le début de la période de gel. Si le climat devient plus chaud ou s'il y a plus de précipitations, la probabilité de débâcles hivernales augmente pour les régions modérément froides comme le centre du Québec. Ces dernières sont d'autant plus dangereuses que leur équivalent printanière, car le froid entrave la lutte contre les inondations et les secours. Dans les régions modérément froides, la présence de couvert de glace sera intermittente durant l'hiver ; si les températures augmente encore davantage, il n'y aura plus de couverts de glace. Dans les régions très froides, où les rivières ont un couvert de glace complet et intact pendant tout l'hiver, le changement climatique va augmenter la probabilité de débâcles hivernales, qui pourraient être destructrices [40].

Lamichhane et al. (2022) [37] évaluent les effets de la couverture de glace hivernale et simulent les inondations à proximité du pont de la *Grand River*, dans l'état d'Ohio aux États-Unis d'Amérique. Ils réalisent pour la période historique et font des prédictions sur l'avenir, selon différents scénarios. Les résultats de la simulation montrent que l'épaisseur de la glace estimée devrait diminuer à l'avenir, en particulier avec le RCP 8,5. Étant donné que les inondations par embâcle sont très complexes et dépendent de divers facteurs, notamment l'intensité des précipitations, la vitesse d'écoulement, le débit, la largeur, la pente et l'emplacement de la rivière, les inondations par embâcle peuvent ou non diminuer à l'avenir. En effet, une ampleur plus faible (disons 5 pouces) de l'épaisseur de la glace pourrait être cruciale qu'une ampleur plus élevée (disons 10 pouces) de l'épaisseur de la glace, selon les caractéristiques du site. Par conséquent, des recherches supplémentaires sont nécessaires sur les inondations par embâcle [37]. Au Canada, le décalage de la date des inondations dues aux embâcles dépend de la région. Les régions du sud-est et quelques endroits de l'ouest canadien montre une tendance plus tôt d'inondations. Au contraire, dans les régions centrales et de l'Atlantique, la tendance est vers un retard [13].

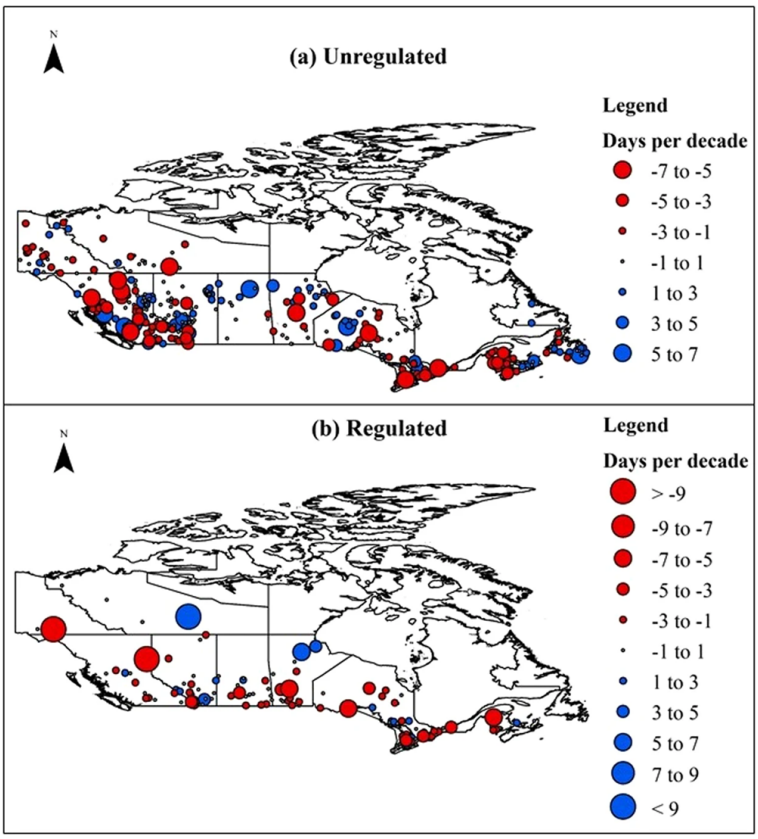


FIGURE 2.11 Tendances de la chronologie des crues dues aux embâcles entre 1903 et 2015. Les cercles rouges (valeurs négatives) indiquent les décalages précoces, tandis que les cercles bleus (valeurs positives) représentent les décalages tardifs. La taille du cercle est proportionnelle à l'ampleur du décalage. [13]

Il y aura également une variation de l'ampleur des inondations dues aux embâcles. Dans les cours d'eau du nord-ouest et dans certaines régions centre-sud du Canada, la tendance est vers des débits de pointe accrus. En ce qui concerne les régions du nord de l'Alberta, de l'Atlantique, du sud de l'Ontario et au nord du Saskatchewan et du Manitoba, la tendance est vers une baisse [13].

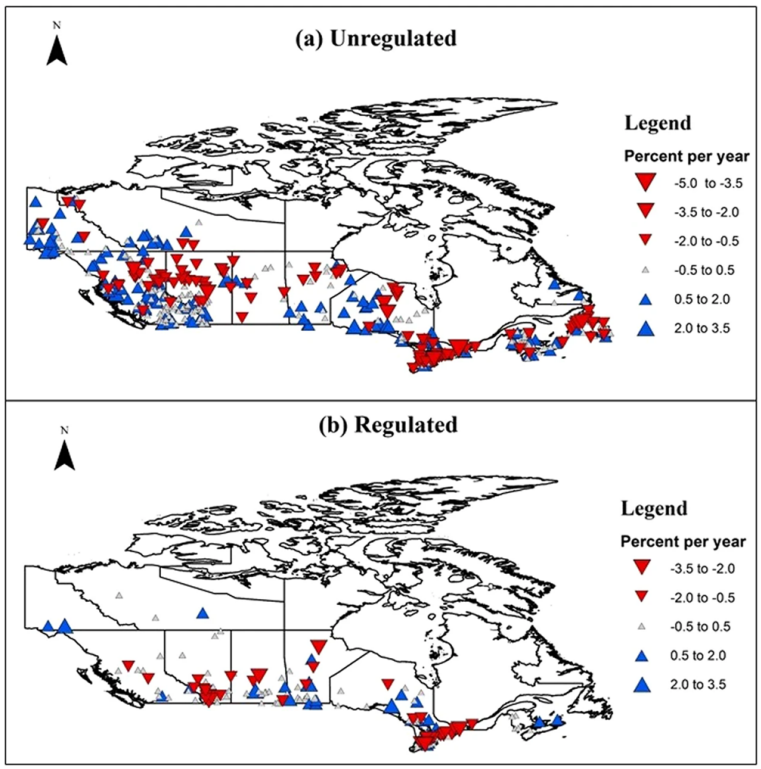


FIGURE 2.12 Tendances observées des débits de pointe des crues dues aux embâcles de 1903 à 2015. Le triangle rouge descendant (valeurs négatives) indique une diminution de l'ampleur (en pourcentage par an), tandis que le triangle bleu ascendant (valeurs positives) représente une augmentation de l'ampleur (en pourcentage par an) des embâcles. La taille du triangle est proportionnelle à l'ampleur de la tendance. [13]

2.3 La glace

2.3.1 Structure moléculaire de la glace

La glace est l'eau dans son état solide. Une molécule d'eau est un composée de deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène. Lorsque l'eau liquide gèle dans des conditions atmosphériques normales entre 0 et -80°C, les molécules d'eau sont ordonnées pour former un solide cristallin à symétrie hexagonale [16].

La Figure 2.13 montre que la glace a une structure très ouverte et cela se reflète dans sa faible densité par rapport à l'eau liquide. L'eau pure se dilate d'environ 9% en gelant [17].

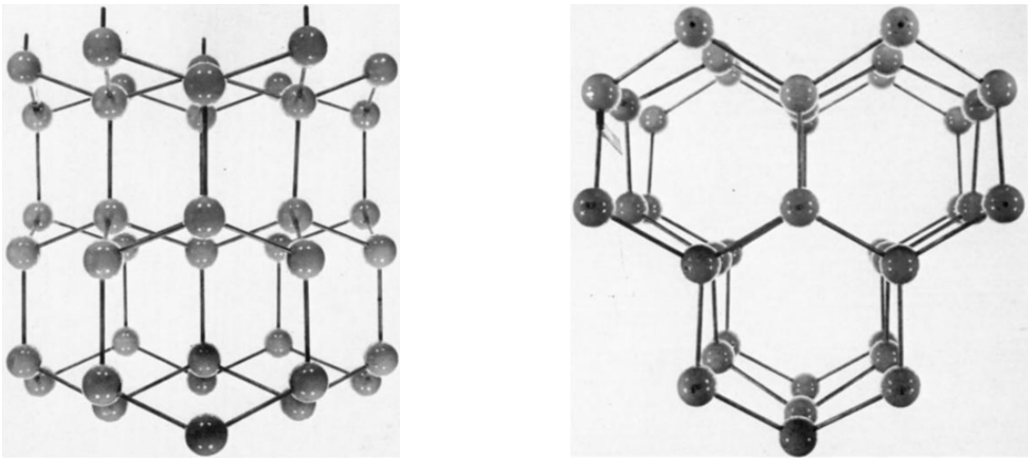


FIGURE 2.13 Arrangement des atomes d'oxygène dans la glace [16]

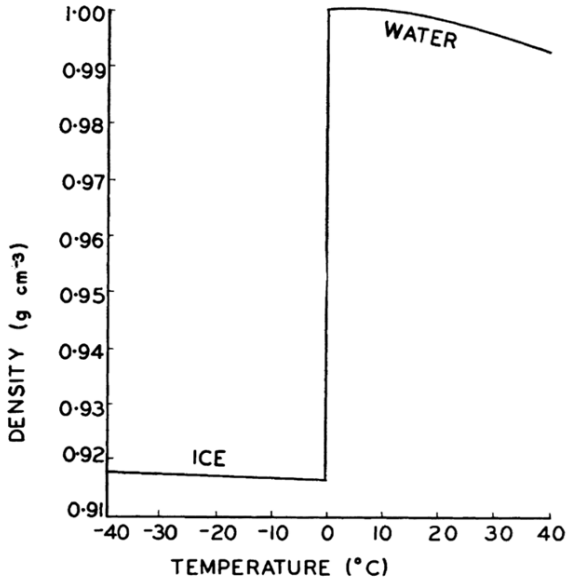


FIGURE 2.14 Densités de la glace et de l'eau saturée en air à la pression atmosphérique [17]

2.3.2 Formation de la glace

L'eau douce, se trouvant dans les rivières et les lacs, contient des impuretés dont la concentration est de quelques centaines par million. Bien que ces impuretés soient de grande importance biologiquement, leurs effets sont négligeables concernant les constantes thermiques de l'eau et de la glace. L'eau de mer, contenant différents ions en quantités non négligeables, a une température de solidification dépendant de sa salinité [17]. Pour une grande étendue d'eau douce et calme, comme celles des lacs et des réservoirs, lorsque la température atteint 0°C, de la glace se forme à la surface de l'eau. Elle réduit les pertes de chaleur de l'eau liquide située en dessous, la glace est un bon isolant thermique. [17]. Le processus de formation, de développement et de détérioration d'un couvert de glace dans une rivière diffère sensiblement de celui des réservoirs et des lacs. En effet, l'écoulement des rivières est en général avec une vitesse non-négligeable et turbulent. Donc l'hydraulique joue un rôle aussi important que les conditions météorologiques. Dans les zones peu profondes, comme le long des berges et autour des îles, où la vitesse d'écoulement est relativement faible et où la turbulence négligeable, les particules de glace forment une couche continue de glace superficielle à la surface de l'eau. Dans les zones de grandes turbulences, des morceaux de glace se forment dans le courant et s'accumulent dans les virages serrés, aux endroits où la rivière se rétrécit comme entre les piles de pont ou dans les étranglements naturels. Un couvert de glace se forme [41].

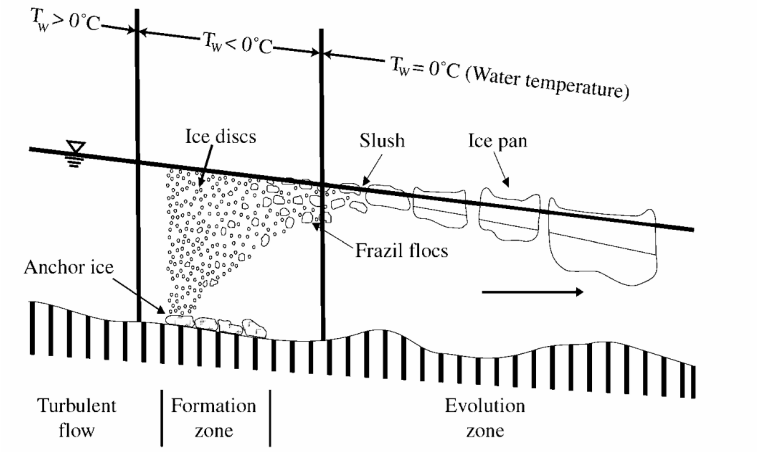


FIGURE 2.15 Étapes du développement de la glace fluviale [18]

Là où le courant est très faible, près des rivages et dans les petites baies, la glace se forme à partir de la rive vers l'extérieur, comme dans un petit lac ; on l'appelle «glace de bordure ». Si ces conditions calmes persistent, la glace de bordure de chaque rive peut se rejoindre pour former une couverture de glace continue et lisse. Dans ces conditions, la surface inférieure de la glace est relativement lisse et la remontée du niveau d'eau en amont (refoulement) est

faible . [19]

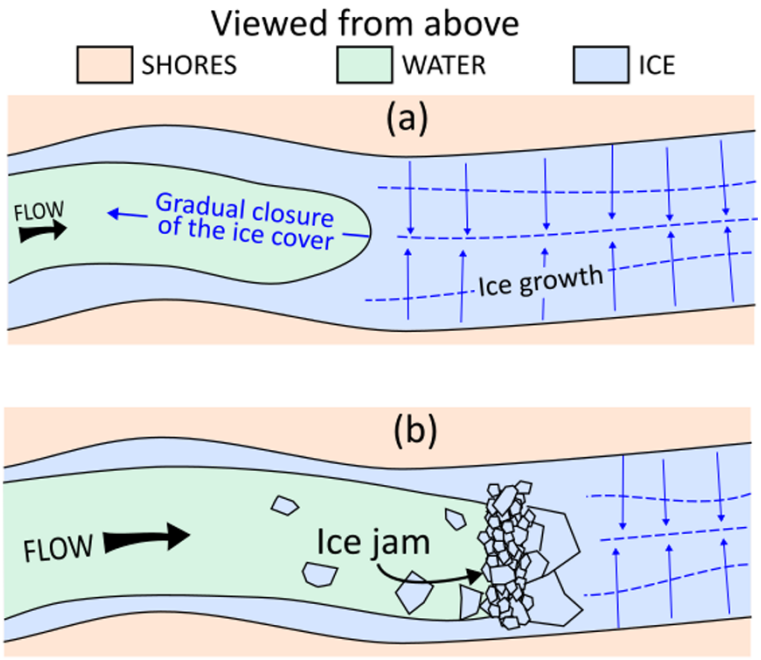


FIGURE 2.16 Formation d'un couvert de glace uniforme [19]

2.3.3 Classification de la glace

Une calotte glaciaire lacustre statique est souvent constituée de deux couches [42] :

- la glace primaire, créée par le gel de l'eau de surface en une couche de glace solide qui se développe dans l'eau
- la glace de neige, formée lorsque la neige, saturée d'eau sur les surfaces glacées ou flottant dans l'eau, gèle.

Il y a plusieurs types de glace issus du gel de l'eau douce [17] :

- Glace transparente
- Glace bulleuse, contenant des bulles d'air
- Glace de neige, lorsque la neige est submergée d'eau puis gèle
- Frasil, petits spicules et disques de dimensions maximales de 2,5 cm
- Glace de fond, qui se forme au fond des rivières

2.4 Estimation de la charge

Il existe plusieurs manières d'estimer la charge de l'eau sur les structures.

TABLEAU 2.2 Comparaison des méthodes de calcul entre différentes normes de conception (piles de pont) [2]

Normes	**Pression hydraulique (force)**
FEMA	$F_{\text{dyn}} = \frac{1}{2} C_d \rho V^2 A$
FHWA	$F_{\text{dyn}} = \frac{1}{2} C_d \rho V^2 H$
Norme australienne	$F_d = 0,5 C_d V^2 A_d$ $P = 0,51 K U^2$
Norme européenne	$F_D = \frac{C_D \rho U_0^2 y_0 L}{2000}$
AASHTO	$F_{du}^* = 0,5 \rho C_d V_u^2 A_d$
ASCE 7	$f_{\text{dyn}} = \frac{1}{2} C_d \rho V^2 d$
Norme chinoise	$F_w = K A \frac{\gamma V^2}{2g}$
Code des charges	$F_w = C_w \frac{\rho}{2} V^2 A$
Norme canadienne	$F_w = C_D \frac{\rho}{2} V^2 A$

2.4.1 Les équations empiriques de l'effet de la glace

Des équations empiriques sont disponibles dans diverses normes.

Les structures se trouvant au dessus et au long des rivières peuvent subir des charges élevées dues à la glace [3]. C'est pourquoi ces structures doivent être conçues pour résister aux charges dues à la glace afin d'assurer la sécurité et la fiabilité. Il existe deux types d'embâcles [31] :

— thermiques, lorsque le couvert de glace fond et devient fragilisé. Le courant la brise.

— mécaniques, lorsque le couvert de glace se brise à cause de forces extérieures, comme le vent.

La glace des embâcles thermiques est plus fragilisées sur celles mécaniques. Les forces générées sont également plus faibles.

TABLEAU 2.3 Codes de force de glace des rivières [3]

Code/Norme	**Équation**	**Source**
Istyck mot bropelare (Pratique suédoise)	$F_h = \frac{i_2(L_1+L_2)}{2}$ $F_h = C_A \sigma_c bh$ $F_h = C_A C_W C_S \sigma_c bh$	Vägverket, 1987
Code norvégien/ISO19906	$F_h = Ch\left(\frac{b}{h}\right)^{-0.16}\left(\frac{h}{h_1}\right)^n$	Håndbok N400, 2015, p.71
Reglur um hönnum brúa (Pratique islandaise)	$F_h = \frac{i_2(L_1+L_2)}{2}$ $F_h = C_A C_W C_S \sigma_c bh$ $F = Ch\left(\frac{b}{h}\right)^{-0.16}\left(\frac{h}{h_1}\right)^n$	Hafliðason et al., 2018
SNiP 2.06.04-82 (Pratique russe)	$F_h = mk_b k_\nu bh\sigma_c$	Frederking, 2012
Code canadien CSA-S6 :19	$F_c = \left(\sqrt{5\frac{h}{b}+1}\right)\sigma_c bh$ $F_b = \frac{1}{2}\tan(105-\beta)\sigma_c h^2$ $F_{bc} = \left[\frac{\frac{1}{2}\tan(105-\beta)+\sqrt{66}}{72}\right]\sigma_c b^2$	CSA, 2019, pp.152-156
Eurocode finlandais	$F_h = \sigma bh$	Eurocode finlandais, 2017

Dans le code suédois, trois équations sont proposées pour les cas suivants :

— Débris de glace dérivant contre une pile avec des pile adjacentes de géométrie arbitraire

— Glaces flottantes dérivant contre une pile verticale

— De la glace flottante qui dérive contre une pile en pente et en forme coin

L'approche du code ISO, et donc du code norvégien, est basée sur les données de nombreuses régions du monde

La norme russe prend en compte les caractéristiques de résistance et d'épaisseur selon la région de Russie. Elle spécifie également une méthode de calcul de la résistance de la glace en fonction de la résistance en compression uniaxiale des couches de glace. De plus, elle prend en compte la température de la glace.

Il y a dans le code canadien deux équations :

— Équation de la force d'écrasement en fonction de l'épaisseur de la glace

— Équation de la force de flexion en fonction du carré de l'épaisseur de la glace

Le choix de la résistance de la glace est laissée à l'ingénieur.

Selon la pratique finlandaise, la force de la glace est égale à une résistance donnée de glace $\times$ l'épaisseur de glace $\times$ la largeur de la structure.

Les méthodes de calcul citées précédemment donnent des forces de glace très différentes.

2.4.2 Méthodes expérimentales

Des chercheurs ont réalisé des études expérimentales de l'influence de la glace sur différents phénomènes.

Affouillement

L'affouillement désigne un type d'érosion par la base provoquée par le courant d'un cours d'eau, la mer, mais aussi par le sable et le vent, créant un vortex. Des essais expérimentaux ont été réalisés pour connaître l'impact de la glace sur l'affouillement. Sirianni et al. (2022) [43] ont étudié l'impact de couverts de glace pas complètement développés sur l'affouillement des piles de ponts. Différentes longueurs de couverts ont été testées, à différentes distances de la pile. La couche de la plus longue n'a pas entraîné l'affouillement le plus important. Cela est probablement à cause de l'écoulement descendant dû à la proximité de la pile avec le bord du couvert de glace. Wang et al. (2021) [20] font l'expérience en laboratoire du processus d'affouillement induits par la glace à proximité de piles de ponts.

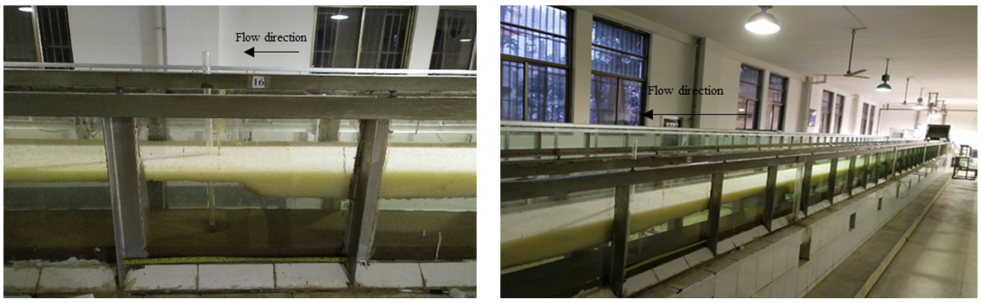


FIGURE 2.17 Dispositif expérimental pour l'étude de migration d'une onde de particules de glace [20]

Les résultats montrent qu'avec une calotte glaciaire, la profondeur des trous d'affouillement autour d'un pont augmente d'environ 10% par rapport à des conditions d'écoulement libre équivalentes [20]. Les écoulements avec embâcle induisent à la fois des profondeurs d'affouillement plus importantes et une plus grande variabilité de l'affouillement, la profondeur maximale d'affouillement sous un écoulement avec embâcle étant jusqu'à 200% supérieure à celle sous des conditions d'écoulement libre équivalentes [20].

Couvert de glace

Fuamba et al. (2007) [21] ont réalisé un essai en laboratoire d'une rupture de barrage avec et sans couvert de glace. Le couvert de glace est supposé rigide (i.e. sans aucune déformation

interne)

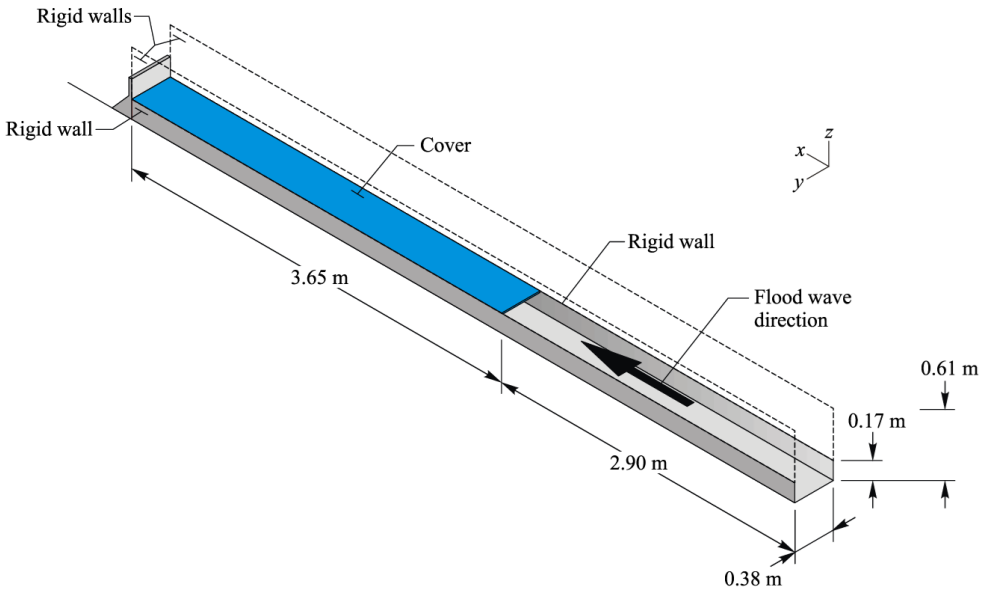


FIGURE 2.18 Dispositif expérimental pour l'étude de l'impact d'un couvert de glace rigide. [21]

L'article de Fuamba et al. (2007) [21] se concentre sur la formulation de l'écoulement et surtout la transition de la zone en surface libre vers la zone couverte par la glace. La réponse structurelle de l'obstacle à l'aval est évaluée de manière approximative.

Formation d'embâcles

Wang et al. (2019) [44] étudient la formation d'embâcles au niveau de piles de pont dans un canal droit en laboratoire. Il existe deux types de formation d'embâcles : l'accumulation superficielle de blocs de glace (blocage de glace de surface) et l'accumulation épaissie de blocs de glace (blocage vertical). Il a été constaté que la concentration critique de glace pour le blocage d'embâcle dépend de la dimension du bloc de glace, de l'ouverture du canal et des conditions d'écoulement. Wang et al. (2018) [22] dont une étude expérimentale de l'impact des piliers de pont sur le niveau d'eau pendant la période d'embâcle dans le canal de courbure.

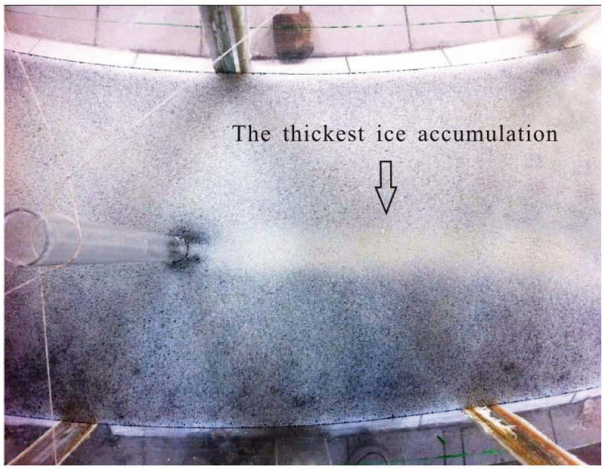


FIGURE 2.19 L'embâcle le plus épais se trouve au milieu du canal, en aval du pilier du pont. [22]

Billy et al. (2023) [23] réalisent un essai expérimental de rupture de barrage avec blocs de glace flottant, avec des piliers cylindriques placés en aval pour étudier l'interaction vague, glace, et structure, dans les conditions hautement dynamiques qui se produisent par exemple lors de la libération d'embâcles.

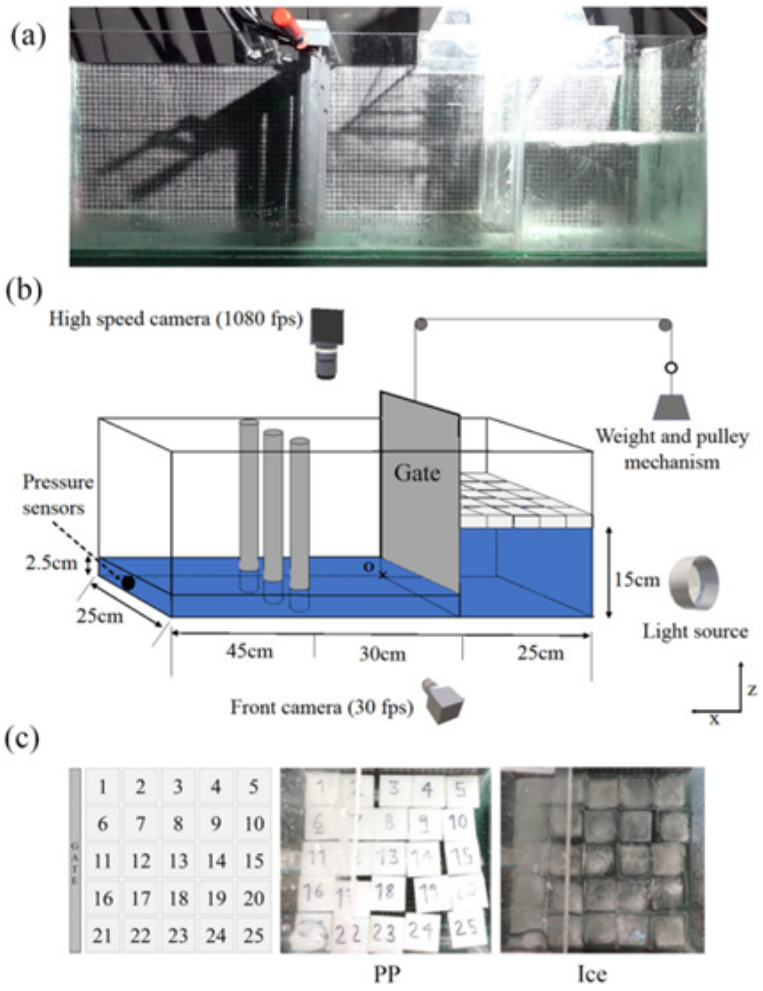


FIGURE 2.20 Configuration expérimentale de rupture de barrage. (a) image de la configuration (b) la configuration schématique et (c) la disposition initiale des blocs. [23]

La glace

En raison des limitations des conditions de laboratoire et du budget, les chercheurs utilisent normalement d'autres matériaux pour modéliser la glace [20]. Sirianni et al. (2022) [43] ont utilisé un couvert de glace artificiel, composé de bois, contreplaqué et de PVC. Wang et al. (2018) [22] ont utilisé du polyester pour le couvert de glace. Wang et al. (2018) [22], (2019) [44], (2021) [20] utilisent des particules de polyéthylène de masse volumique presque identique à celle de la glace naturelle. Billy et al. (2023) [23] utilisent de la vraie glace ainsi que du polypropylène. Les deux types de matériaux présentent des résultats similaires. Cependant, comparés au polypropylène, les blocs de glace réels ont tendance à se coller les uns aux autres lors des expériences. Le modèle numérique ne prend pas en compte la liaison des blocs. La comparaison des résultats de la glace artificielle polypropylène (couramment

utilisée dans les expériences sur la glace de rivière) et de la glace réelle a révélé des différences notables. La glace réelle a entraîné une évolution et une libération plus rapides de l'embâcle. Cette différence peut être attribuée à la différence de propriétés du matériau ainsi qu'à la légère différence de taille des blocs. Fuamba et al. (2007) [21] utilisent une plaque de contreplaqué pour modéliser le couvert de glace, supposé rigide.

2.5 Formulations numériques

2.5.1 Équations de Navier-Stokes

Les équations de Navier-Stokes décrivant le mouvement des fluides newtonien sont définies de la manière suivante [45] [46] :

Conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \tag{2.1}$$

Conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}\mathbf{v} - \tau) = \mathbf{f}^B \tag{2.2}$$

Conservation de l'énergie

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} E - \tau \cdot \mathbf{v} + \mathbf{q}) = \mathbf{f}^B \cdot \mathbf{v} + q^B \tag{2.3}$$

où t désigne le temps, ρ la masse volumique du fluide, $\mathbf{v}$ le vecteur vitesse d'écoulement, $\mathbf{f}^B$ le vecteur force de volume du fluide, τ le tenseur des contraintes, E énergie totale spécifique, $\mathbf{q}$ le flux thermique, q^B taux spécifique de génération de chaleur et g le vecteur accélération gravitaire.

L'énergie totale spécifique et les contraintes sont définies comme :

$$E = \frac{1}{2}\mathbf{v} \cdot \mathbf{v} + e \equiv b + e \tag{2.4}$$

$$\tau = (-p + \lambda \nabla \cdot \mathbf{v})\mathbf{I} + 2\mu \mathbf{e} \tag{2.5}$$

$$E = \frac{1}{2}\mathbf{v} \cdot \mathbf{v} + e \equiv b + e \tag{2.6}$$

où e est l'énergie interne spécifique, b est l'énergie cinétique spécifique, p est la pression, μ, λ sont les coefficients de viscosité dynamique, $\mathbf{e}$ est le tenseur des déformations (défini ci-dessous) :

$$\mathbf{e} = \frac{1}{2}\left(\nabla\mathbf{v} + \nabla\mathbf{v}^T\right) \tag{2.7}$$

Le flux de chaleur est supposé suivre à la loi de Fourier sur la conduction thermique :

$$\mathbf{q} = -k\nabla\theta \tag{2.8}$$

où θ est la température et k est le coefficient de conductivité thermique

L'une des forces de volume les plus importantes est le poids :

$$\mathbf{f}_g^B = \rho\mathbf{g} \tag{2.9}$$

avec $\mathbf{g}$ le vecteur d'accélération gravitationnelle.

2.5.2 La méthode des éléments finis

La Méthode des Éléments Finis (MEF) repose sur la discrétisation du domaine en sous-domaines de formes géométriques simples, les éléments finis. Les fonctions ϕ satisfont précisément les équations de Navier-Stokes à chaque nœud. Elles décrivent les variations locales des différentes variables avec des fonctions polynomiales entre chaque nœud. Donc les dérivées d'ordre plus bas que l'équation sont nécessaires. Lorsque les fonctions approximatives sont remplacées par les équations de Navier-Stokes, un résidu apparaît. Ce dernier doit être multiplié par une fonction de forme pour être minimisé, et ainsi optimiser les fonctions ϕ et les solutions pour chaque élément fini. Puis le produit est intégré sur l'ensemble du domaine.

Formulation du fluide

Dans le logiciel ADINA, la formulation mathématique utilisée pour la MEF est [46] :

$$\int_V \left(h^p G^p + \mathbf{Q}^p \cdot \nabla h^p\right) dV = \int_S h^p \mathbf{Q}^p \cdot d\mathbf{S} \tag{2.10}$$

$$\int_V \left(h^{\mathbf{v}} G^{\mathbf{v}} + \mathbf{Q}^{\mathbf{v}} \cdot \nabla h^{\mathbf{v}}\right) dV = \int_S h^{\mathbf{v}} \mathbf{G}^{\mathbf{v}} \cdot d\mathbf{S} \tag{2.11}$$

où p est la pression, $\mathbf{v}$ est la vitesse, h^p et $h^{\mathbf{v}}$ sont respectivement les quantités virtuelles de pression et de vitesse.

Lorsque plusieurs fluides non miscibles comme l'eau et l'air sont impliqués, la méthode du volume de fluide est utilisée pour déterminer la position de la surface libre. Avec cette méthode, les fluides partagent des équations de quantité de mouvement, et chacun d'eux est convecté à travers le domaine en résolvant des équations de transport scalaires, où ϕ_i représente le rapport de masse de la $i^{ème}$ espèce.

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t} + v\nabla\phi_i = 0 \quad (i = 1, 2) \tag{2.12}$$

La formulation de la MEF implique qu'il n'y a seulement qu'une conservation globale des propriétés, et non locale. Dans le logiciel ADINA, il y a trois formulations de fluides avec la MEF [47] :

1. L'interpolation basée sur les conditions d'écoulement (Flow-Condition-Based-Interpolation (FCBI))

   Cette formulation définit toutes les variables à tous les nœuds. Elle est la plus précise mais requiert plus de ressources et de mémoire pour faire rouler les analyses

2. L'interpolation centrée sur les conditions d'écoulement (FCBI-C)

   Cette formulation offre une autre approche puisqu'elle définit tous les degrés de liberté au centre de l'élément. La solution est supposée être continue tout au long de l'analyse et est interpolée aux nœuds qui sont des coins pour des raisons de traitement après analyse.

3. La non interpolation basée sur les conditions d'écoulement (no-Flow-Condition-Based-Interpolation (no-FCBI))

   Cette formulation ressemble à celle FCBI mais ne définit pas toutes les variables à tous les nœuds.

Dans le cas de FCBI (interpolation basée sur les conditions d'écoulement) [48] :

Les éléments FCBI ont été développés pour les écoulements incompressibles, légèrement compressibles et compressibles à faible vitesse.

L'approche fondamentale du développement consiste à utiliser des interpolations basées sur les conditions d'écoulement FCBI dans les termes convectifs du fluide et à utiliser des volumes de contrôle élémentaires (comme dans la méthode des volumes finis) afin d'assurer la conservation locale de la masse et de la quantité de mouvement. Pour présenter l'approche

fondamentale des schémas FCBI, considérons la résolution des équations de Navier-Stokes suivantes.

Trouver la vitesse $\mathbf{v}(\mathbf{x}) \in V$ et la pression $p(\mathbf{x}) \in P$ dans le domaine Ω tels que :

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \mathbf{x} \in \Omega \tag{2.13}$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{v}\mathbf{v} - \boldsymbol{\tau}) = 0, \mathbf{x} \in \Omega \tag{2.14}$$

$$\boldsymbol{\tau} = -p\mathbf{I} + \frac{1}{\mathrm{Re}} \left[\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T\right] \tag{2.15}$$

où :

— V et P sont des espaces de Hilbert appropriés
— $\boldsymbol{\tau}$ est le tenseur des contraintes
— Re est le nombre de Reynolds

La formulation variationnelle de Petrov-Galerkin est utilisée, avec les sous-espaces U_h, V_h, $W_h \subset V$ et P_h, $Q_h \subset P$.

La formulation de la solution numérique est comme suit.

Trouver $\mathbf{u}_h \in U_h$, $\mathbf{v}_h \in V_h$ et $p_h \in P_h$ tels que pour tout $w \in W_h$ et $q \in Q_h$:

$$\int_\Omega w \nabla \cdot (\mathbf{u}_h \mathbf{v}_h - \boldsymbol{\tau}(\mathbf{u}_h, p_h)) \, \mathrm{d}\Omega = 0 \tag{2.16}$$

$$\int_\Omega q \nabla \cdot \mathbf{u}_h \, \mathrm{d}\Omega = 0 \tag{2.17}$$

Les fonctions d'essai dans U_h et P_h sont les fonctions usuelles des interpolations par éléments finis pour la vitesse et la pression, respectivement. Elles sont sélectionnées pour satisfaire la condition inf-sup de l'analyse incompressible. Il est important de noter que les fonctions d'essai dans Vh sont différentes des fonctions U_h et qu'elles sont définies à l'aide des conditions d'écoulement afin de stabiliser le terme de convection. Les fonctions de pondération dans les espaces W_h et Q_h sont des fonctions en escalier, qui garantissent respectivement la conservation locale de la quantité de mouvement et de la masse.

Lorsqu'un degré de liberté est défini au centre de l'élément, l'élément FCBI devient l'élément FCBI-C. Les éléments FCBI-C sont associés à la méthode segréguée (*segregrated method*), qui est un algorithme itératif pour résoudre le système de fluide non linéaire.

Turbulence

Les écoulements étudiés dans les inondations et les crues sont presque toujours turbulents. Le mouvement du fluide est hautement aléatoire, instable et tridimensionnel [46].

Le modèle de turbulence $K-\epsilon$ pour les fluides incompressibles est défini comme suit :

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \tag{2.18}$$

$$k_t = \frac{\mu_t C_p}{\sigma_\theta} \tag{2.19}$$

où K et ε, appelés respectivement énergie cinétique turbulente et taux de dissipation de la turbulence, sont définis par :

$$K = \frac{1}{2}\overline{\mathbf{v}' \cdot \mathbf{v}'} \tag{2.20}$$

$$\varepsilon = \frac{\mu_0}{\rho}\overline{(\nabla \mathbf{v}') \otimes (\nabla \mathbf{v}')} \tag{2.21}$$

Ici, $\mathbf{v}'$ est la vitesse fluctuante ou la différence de vitesse entre la vitesse turbulente et la vitesse moyenne. K et ε sont des variables supplémentaires régies par deux équations additionnelles :

$$\frac{\partial \left(y^a \rho K\right)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[y^a \left(\rho \mathbf{v} K - \mathbf{q}_K\right)\right] = y^a S_K \tag{2.22}$$

$$\frac{\partial \left(y^a \rho \varepsilon\right)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[y^a \left(\rho \mathbf{v} \varepsilon - \mathbf{q}_\varepsilon\right)\right] = y^a S_\varepsilon \tag{2.23}$$

où a vaut zéro pour les écoulements en deux et trois dimensions, et un pour les écoulements axisymétriques. D'autres termes correspondant sont définis comme suit :

$$\mathbf{q}_K = \left(\mu_0 + \frac{\mu_t}{\sigma_K}\right) \nabla K \tag{2.24}$$

$$\mathbf{q}_\varepsilon = \left(\mu_0 + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) \nabla \varepsilon \tag{2.25}$$

$$S_K = 2\mu_t D^2 - \rho\varepsilon + B \tag{2.26}$$

$$S_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{K}\left[2c_1\mu_t D^2 - c_2\rho\varepsilon + c_1\left(1-c_3\right)B\right] \tag{2.27}$$

$$B = \left[\mu_0 + \frac{\mu_t}{\sigma_\theta}\right]\beta\mathbf{g}\cdot\nabla\theta \tag{2.28}$$

Ici, C_μ, C_1, C_2, C_3, σ_K, σ_ε et σ_θ sont des constantes du modèle.

Le modèle de turbulence K-ε est applicable aux écoulements à nombre de Reynolds élevé.

Pour le modèle de turbulence k-ω à haut nombre de Reynolds pour les écoulements incompressibles : La variable ω, initialement introduite d'un point de vue purement mathématique, est appelée le taux de dissipation spécifique de la turbulence. Elle est reliée à K et ε par la relation approximative :

$$\omega \sim \frac{\varepsilon}{K} \tag{2.29}$$

Les coefficients μ_t et k_t sont alors calculés par :

$$\mu_t = \alpha\rho\frac{K}{\omega} \tag{2.30}$$

$$k_t = \frac{\mu_t C_p}{\sigma_\theta} \tag{2.31}$$

Les équations régissant K et ω sont :

$$\frac{\partial(y^a\rho K)}{\partial t} + \nabla\cdot\left[y^a(\rho\mathbf{v}K - \mathbf{q}_K)\right] = y^a G_K \tag{2.32}$$

$$\frac{\partial(y^a\rho\omega)}{\partial t} + \nabla\cdot\left[y^a(\rho\mathbf{v}\omega - \mathbf{q}_\omega)\right] = y^a G_\omega \tag{2.33}$$

où a vaut 0 pour les écoulements en 2D ou 3D, et 1 pour les écoulements axisymétriques.

Les autres termes correspondants sont définis comme suit :

$$\mathbf{q}_\omega = \left(\mu_0 + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right)\nabla\omega \tag{2.34}$$

$$G_K = 2\mu_t D^2 - \beta_K\rho K\omega + B \tag{2.35}$$

$$G_\omega = \frac{\omega}{K}\left(2\alpha_\omega \mu_t D^2 - \beta_\omega \rho K \omega + \beta_\theta B\right) \tag{2.36}$$

Ici, α, α_ω, β_K, β_ω, σ_K, σ_ω, σ_θ et β_θ sont des constantes du modèle.

Pour le modèle de turbulence avec transport de la contrainte de cisaillement (Shear Stress Transport (SST)) : l'idée principale du modèle est de combiner la précision du modèle k-ω dans les régions proches des parois, avec l'indépendance du modèle k-ε vis-à-vis des conditions en amont. En conséquence, le modèle SST offre une meilleure prédiction de la séparation sans dépendance au flux libre.

Les équations du modèle k-ω sont utilisées sans modifications dans le modèle SST. Toutefois, la viscosité turbulente est redéfinie comme suit :

$$\mu_t = \alpha^s \rho a_1 \frac{K}{\max(a_1\omega, \sqrt{2DF_2})} \tag{2.37}$$

De plus, le terme source dans l'équation de ω du modèle SST, noté G_ω^S, possède une contribution additionnelle appelée le terme de diffusion croisée C :

$$G_\omega^S = G_\omega + C = G_\omega + 2\rho(1-F_1)\sigma_{\omega_2}(\nabla K)\cdot(\nabla \ln \omega) \tag{2.38}$$

Les fonctions F_1 et F_2 sont conçues pour valoir 1 près de la paroi et 0 dans les zones de couche libre :

$$(F_1, F_2) = \left(\tanh(\Phi_1^4), \tanh(\Phi_2^2)\right) \tag{2.39}$$

où :

$$\Phi_1 = \min\left\{\max\left(\frac{\sqrt{K}}{\beta_K \omega y}, \frac{500\mu}{\rho\omega y^2}\right), \frac{4\rho\sigma_{\omega_2}K}{C^+ y^2}\right\} \tag{2.40}$$

$$\Phi_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{K}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho\omega y^2}\right) \tag{2.41}$$

$$C^+ = \max\left(C, 10^{-10}\right) \tag{2.42}$$

Les constantes utilisées dans le modèle SST $\phi = (\alpha^S, \alpha_\omega^S, \beta_\omega^S, \sigma_k^S, \sigma_\omega^S, \dots)$ sont calculées en utilisant la fonction F_1 de la manière suivante :

$$\phi = F_1\phi_1 + (1 - F_1)\phi_2 \tag{2.43}$$

où ϕ_1 et ϕ_2 sont les constantes pour les modèles k-ω et k-ε respectivement.

Il existe plusieurs modèles de simulation pour résoudre les équations des écoulements turbulents.

Le modèle de simulation des grandes échelles (Large-Eddy-Simulation (LES)) est un modèle algébrique où μ_t et k_t sont calculés par des fonctions directement définies :

$$\mu_t = \sqrt{2}\rho k_D^2 \Lambda^2 D \tag{2.44}$$

$$k_t = \frac{\mu_t C_p}{\mathrm{Pr}} \tag{2.45}$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu C*}{k} \tag{2.46}$$

où D est le taux de déformation effectif, k_D est une constante sans dimension du modèle, Λ est la taille caractéristique de l'élément, Pr est le nombre de Prandtl turbulent, ρ est la masse volumique du fluide, et C_p est la capacité thermique à pression constante.

Dans les modèles de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds (Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)), les équations du fluide sont moyennées en fonction du temps.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = 0 \tag{2.47}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \lambda)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] + g_i \tag{2.48}$$

où x représente les coordonnées cartésiennes, u est la vitesse, ρ est la densité de l'eau, μ est la viscosité cinématique, λ est la viscosité tourbillonnaire, p est la pression, t est le temps, et g est la gravité.

Comportement du solide

Le comportement des structures est déterminé en effectuant une analyse dynamique implicite. L'équation de base du mouvement résolue par analyse dynamique transitoire est sous une

forme lagrangienne classique :

$$[\mathbf{M}]\ddot{\mathbf{u}} + [\mathbf{C}]\dot{\mathbf{u}} + [\mathbf{K}]\mathbf{u} = [\mathbf{F}](t) \tag{2.49}$$

où $[\mathbf{M}]$, $[\mathbf{C}]$ et $[\mathbf{K}]$ sont respectivement les matrices de masse, d'amortissement et de raideur ; $\ddot{\mathbf{u}}$, $\dot{\mathbf{u}}$ et $\mathbf{u}$ sont les vecteurs instantanés de l'accélération nodale, la vitesse nodale et le déplacement nodal ; et $[\mathbf{F}](t)$ désigne le vecteur de charge, qui inclut la force fluide, la force de frottement, la gravité, etc.

Cet algorithme est largement utilisé dans les programmes de MEF. Une fois que la structure est convertie en un système d'éléments finis — où les éléments sont générés en connectant les nœuds — les matrices de masse, d'amortissement et de raideur sont construites. Ensuite, les équations peuvent être résolues pour déterminer les valeurs de déplacement nodal $\mathbf{u}(t)$.

Interaction fluide structure : contact et couplage

Dans les analyses d'interaction fluide-structure, les forces fluides sont appliquées au solide et la déformation du solide modifie le domaine fluide. Pour la plupart des problèmes d'interaction, le domaine de calcul est divisé en domaine fluide et domaine solide, où un modèle fluide et un modèle solide sont définis respectivement, à partir de leurs données matérielles, de leurs conditions aux limites, etc. L'interaction se produit à l'interface des deux domaines. Le couplage des deux modèles permet de réaliser des simulations et des prédictions de nombreux phénomènes physiques.

Bathe et al. (1999) [47] ont résolu le modèle mathématique d'IFS à l'aide de la MEF. Dans ce modèle, le comportement structurel est décrit selon la formulation lagrangienne classique, tandis que les vibrations dynamiques des fluides sont modélisées selon des formes Lagrangienne-Eulérienne Arbitraire (LEA). Les problèmes de couplage sont ensuite résolus en égalisant les forces internes $\mathbf{F_t}$ et externes $\mathbf{R_t}$ à chaque instant t discrétisé, englobant les forces dans le domaine fluide.

$$\mathbf{F}_t = \mathbf{R}_t \tag{2.50}$$

Le schéma de couplage utilisé est la méthode SIMPLE, où il y a généralement deux facteurs de sous-relaxation : λ_v pour la vitesse, et λ_p pour la pression. Ces facteurs doivent être appliqués pour assurer la convergence globale [46].

2.5.3 L'hydrodynamique des particules lissées

L'HPL est une méthode lagrangienne sans maillage développée par Gingold et al. [49], initialement pour des problèmes d'astrophysique. Elle est maintenant couramment utilisée dans de nombreux domaines, dont la dynamique des fluides. La formulation de l'HPL est décrite [50]. L'approximation particulaire de la fonction est :

$$\Pi^h f(x) = \int f(y)\, W(x-y,h)\, dy \tag{2.51}$$

avec W la fonction noyau.

La fonction noyau W est définie à l'aide de la fonction θ par la relation :

$$W(\mathbf{x},h) = \frac{1}{h(\mathbf{x})^d}\,\theta(\mathbf{x}) \tag{2.52}$$

où d est le nombre de dimensions de l'espace et h est la longueur de lissage, qui varie dans le temps et dans l'espace. W doit être une fonction à pic central. Le noyau de lissage le plus couramment utilisé par la communauté de l'HPL est la B-spline cubique, en choisissant θ comme suit :

$$\theta(u) = C \times \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}u^2 + \frac{3}{4}u^3, & |u| \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-u)^3, & 1 \leq |u| \leq 2 \\ 0, & 2 < |u| \end{cases} \tag{2.53}$$

où C est une constante de normalisation qui dépend du nombre de dimensions de l'espace.

La méthode de l'HPL est basée sur une formule de quadrature pour les particules en mouvement $\mathbf{x}_i(t), i \in \{1,2,...,N\}$, où $\mathbf{x}_i$ est l'emplacement de la particule, qui se déplace le long du champ de vitesse v.

L'approximation particulaire d'une fonction peut maintenant être définie par :

$$\Pi^h f(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^{N} w_j f(\mathbf{x}_i) W\left(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j, h\right) \tag{2.54}$$

où $w_j = \frac{m_j}{\rho_j}$ est le « poids » de la particule. Le poids d'une particule varie proportionnellement à la divergence de l'écoulement.

Le formalisme de l'HPL implique un opérateur de dérivation. Une approximation particulaire de cet opérateur doit être définie. Avant de donner la définition de cette approximation,

définissons le gradient d'une fonction comme suit :

$$\nabla f(x) = \nabla f(x) - f(x)\nabla 1(x) \tag{2.55}$$

où 1 est la fonction unitaire.

À partir de cette relation, nous pouvons définir l'approximation particulaire du gradient d'une fonction :

$$\Pi^h \nabla f(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} \Big[f(\mathbf{x}_j) A_{ij} - f(\mathbf{x}_i) A_{ij} \Big] \tag{2.56}$$

où A_ij est déterminée de la manière suivante :

$$A_{ij} = \frac{1}{h^{d+1}} \theta' \left(\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|}{h} \right) \tag{2.57}$$

Nous pouvons également définir l'approximation particulaire de la dérivée partielle $\frac{\partial}{\partial x^\alpha}$:

$$\Pi^h \left(\frac{\partial f}{\partial x^\alpha} \right) (\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^{N} w_j f(\mathbf{x}_j) A^\alpha(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \tag{2.58}$$

où $\mathbf{A}$ est l'opérateur défini de la manière suivante :

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \frac{1}{h^{d+1}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)} \frac{(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)}{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|} \theta' \left(\frac{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|}{h(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)} \right) \tag{2.59}$$

A^α est la composante α du vecteur $\mathbf{A}$.

L'écoulement du fluide est décrit par la conservation de la masse et de la quantité de mouvement dans un cadre lagrangien. L'HPL est une méthode particulaire sans maillage qui considère que l'eau est un ensemble de particules sans lien, libres de se déplacer. L'un des principaux avantages des méthodes particulaires réside dans leur capacité à simuler des surfaces et interfaces libres très dynamiques, qui sont difficiles de simuler avec des méthodes basées sur le maillage [23].

La pression est calculée à l'aide de l'approche de l'HPL faiblement compressible, couramment utilisé pour simuler les fluides incompressibles. Dans le logiciel LS-DYNA, les équations suivantes ont été utilisées [51]. L'équation d'état de Murnaghan a été conçue pour modéliser

un fluide quasi-incompressible en HPL [52] :

$$p = k_0 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\gamma} - 1 \right] \tag{2.60}$$

où ρ_0 est la masse volumique du fluide au repos, ρ la masse volumique du fluide, γ et k_0 des constantes de l'équation d'état. Pour modéliser avec précision les écoulements de fluide, γ vaut habituellement 7, et k_0 est souvent choisi tel que :

$$c_0 = \sqrt{\frac{\gamma k_0}{\rho_0}} \geq 10 v_{max} \tag{2.61}$$

Les formulations de l'HPL traditionnelles peuvent présenter des oscillations de pression très importantes lors de la modélisation des écoulements de fluides. Une approche courante pour surmonter ce problème consiste à utiliser un schéma de réinitialisation de densité [53]. Un filtre de Shepard est construit à partir de fonctions noyau de l'HPL et appliqué au champ de densité de telle sorte que :

$$\rho_I^{\text{new}} = \sum_J \rho_J \tilde{W}_{IJ} \frac{m_J}{\rho_J} = \sum_J \tilde{W}_{IJ} m_J \tag{2.62}$$

où

$$\tilde{W}_{IJ} = \frac{W_{IJ}}{\sum_K W_{IK} \frac{m_K}{\rho_K}} \tag{2.63}$$

Le champ de densité résultant est beaucoup plus lisse, ce qui produit à son tour un champ de pression plus lisse à travers l'équation d'état.

Un dernier point important concerne la viscosité artificielle employée dans la simulation. L'équation de quantité de mouvement dans HPL peut s'écrire ainsi [51] :

$$\frac{d\boldsymbol{v}_I}{dt} = -\sum_J m_J \left(\frac{\sigma_I}{\rho_I^2} + \frac{\sigma_J}{\rho_J^2} + \Pi_{IJ} \right) \nabla W_{IJ} \tag{2.64}$$

Avec

$$\nabla W_{IJ} = \nabla W \left(\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_j\| / h \right) \Big|_{\mathbf{x} \to \mathbf{x}_j} \tag{2.65}$$

Où σ_I est le tenseur de contrainte à la particule I en notation de Voigt, $\mathbf{v}_I$ est la vitesse à la particule I et N est le gradient de la fonction noyau associée à la particule J, évaluée à la particule I. $\Pi_I J$ est le terme de viscosité artificielle, exprimé comme suit [51] :

$$\Pi_{IJ} = \begin{cases} -\dfrac{Q_2 \bar{c}_{IJ} \mu_{IJ} + Q_1 \mu_{IJ}^2}{\rho_{IJ}} & \text{si } \boldsymbol{v}_{IJ} \cdot \boldsymbol{x}_{IJ} < 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \tag{2.66}$$

avec $\boldsymbol{x}_{IJ} = \boldsymbol{x}_I - \boldsymbol{x}_J$, $\boldsymbol{v}_{IJ} = \boldsymbol{v}_I - \boldsymbol{v}_J$ et :

$$\mu_{IJ} = \frac{\bar{h}_{IJ} \boldsymbol{v}_{IJ} \cdot \boldsymbol{x}_{IJ}}{\|\boldsymbol{x}_{IJ}\|^2 + 0.01 \bar{h}_{IJ}} \tag{2.67}$$

où $\bar{h} = \frac{h_i + h_j}{2}$, et Q_1 et Q_2 sont des paramètres définis par l'utilisateur.

Le logiciel LS-DYNA utilise la formulation explicite [54]. Donc le pas de temps est limité par :

$$\Delta t < t_{crit} \tag{2.68}$$

Le temps critique t_{crit} est défini par la formule suivante :

$$t_{crit} = f \times \frac{L}{c} \tag{2.69}$$

Avec f le facteur d'échelle, inférieur ou égal à 1 ; L la longueur caractéristique du plus petit élément ; c la vitesse du son dans le matériau, qui est proportionnelle au module d'Young E et inversement proportionnelle à la masse volumique ρ.

CHAPITRE 3 DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES ÉLÉMENTS FINIS

3.1 Introduction

Ce chapitre présente les outils numériques utilisés dans ce mémoire afin de modéliser l'écoulement d'eau. L'objectif principal est de développer des modèles en éléments finis et de faire une étude de sensibilité sur différents paramètres.

3.2 Construction et validation de modèles numériques

3.2.1 Description du cas d'étude expérimental : structure rigide impactée pour une rupture de barrage

Le cas étudié est celui de Koshizuka et al. (1995) [24]. Il s'agit d'un essai en laboratoire d'une structure rigide impactée par un écoulement résultant d'une rupture de barrage. Ce cas expérimental sert de référence de validation pour les modèles numériques avec un écoulement de fluide impactant un obstacle rigide. Dans un réservoir de 0.584 m de large, se trouvent une colonne d'eau et une structure. La colonne d'eau qui a une hauteur de 0.292 m, une largeur de 0.146 m et une profondeur de 0.2 m de, est retenue par une vanne. La structure, située à 0.146 m de la vanne, a une hauteur de 0.048 m, une largeur de 0.024 m et une profondeur de 0.2 m. La hauteur du réservoir d'eau numérique est étendue à 0.584 m pour éviter le débordement des gouttelettes d'eau. Les dimensions du cas expérimental sont représentées dans la Figure 3.1.

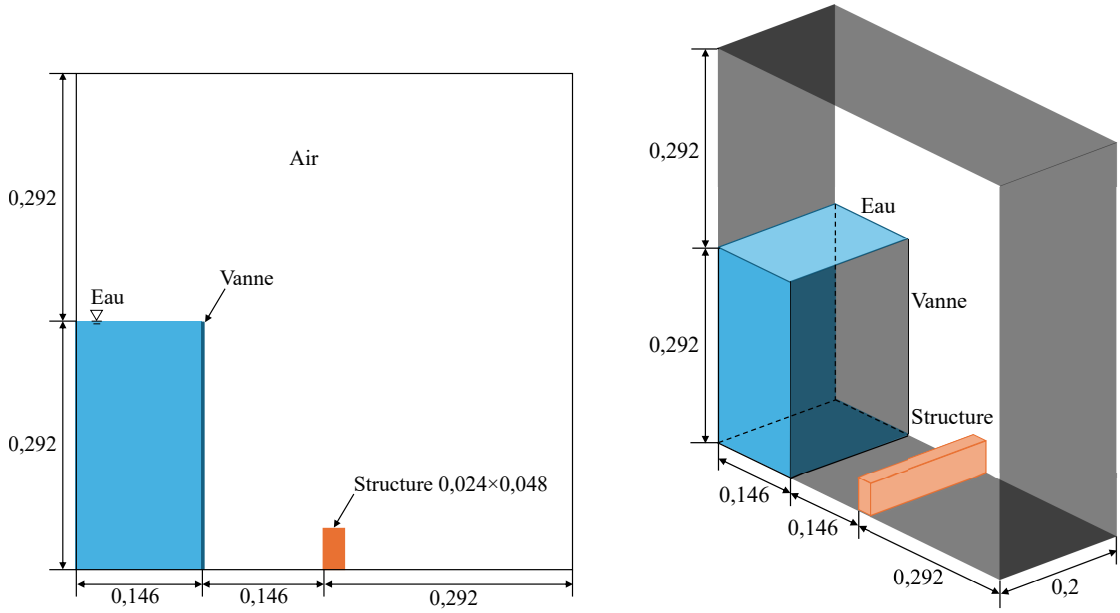


FIGURE 3.1 Dimensions (m) du dispositif expérimental de Koshizuka et al. (1995) [24]

3.2.2 Modélisation numérique et validation

La modélisation numérique se fait par Éléments Finis (EF), avec la formulation de l'IFS. La structure, rigide, a un module d'Young de $E = 1 \times 10^{20}$ Pa, et une masse volumique $\rho = 2500\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$. Une formulation eulérienne est adoptée pour la modélisation de l'écoulement. La méthode du volume de fluide (Volume Of Fluid (VOF)) est utilisée pour capter la surface libre de l'écoulement et résoudre les équations de Navier-Stokes.

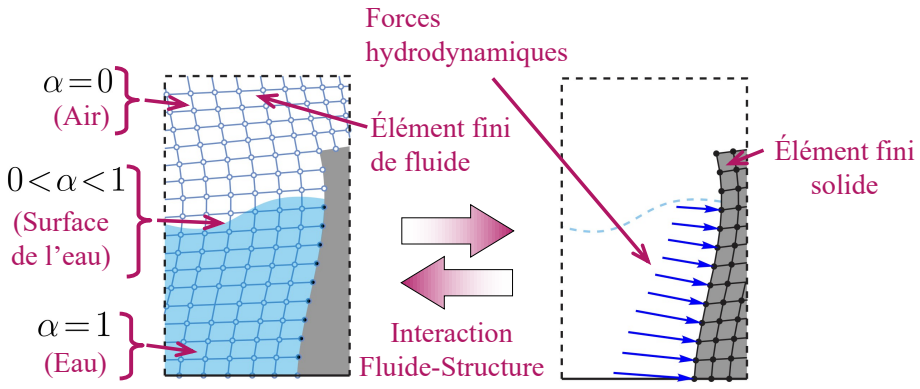


FIGURE 3.2 Schéma explicatif de la méthode de volume de fluide et de l'IFS (Communication personnelle de Bouaanani (2024))

Comme indiqué dans la Figure 3.2, avec la méthode de volume de fluide lorsque $\alpha = 1$, la

maille est remplie d'eau ; lorsque $\alpha = 0$, la maille est remplie d'air ; la position de la surface libre est décrite par $0 < \alpha < 1$. Le fluide est défini avec le modèle turbulent $k - \omega SST$, avec les équations RANS.

On suppose que la perturbation de l'eau due au retrait de la vanne est ignorée. Par conséquent, $t = 0$ s correspond au moment où la vanne est complètement retirée lors de l'expérience, et l'état de l'eau correspondant est modélisé par la condition initiale de volume de fluide. Les conditions frontières des parois sont des murs avec des conditions sans glissement, où les vitesses normale et tangentielle sont toutes deux nulles (*wall boundaries with no-slip conditions*). La simulation dure 0.6 seconde, et le pas de temps est de 0.001 seconde. La gravité, d'une accélération de $g = 9.81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$ est appliquée sur l'eau, l'air et la structure.

Les modèles ont été réalisés à l'aide du logiciel ADINA, dans lequel les éléments linéaires FCBI-C sont utilisés :

— pour les modèles 2D, des éléments quadrilatères à 4 nœuds
— pour les modèles 3D, des éléments briques à 8 nœuds

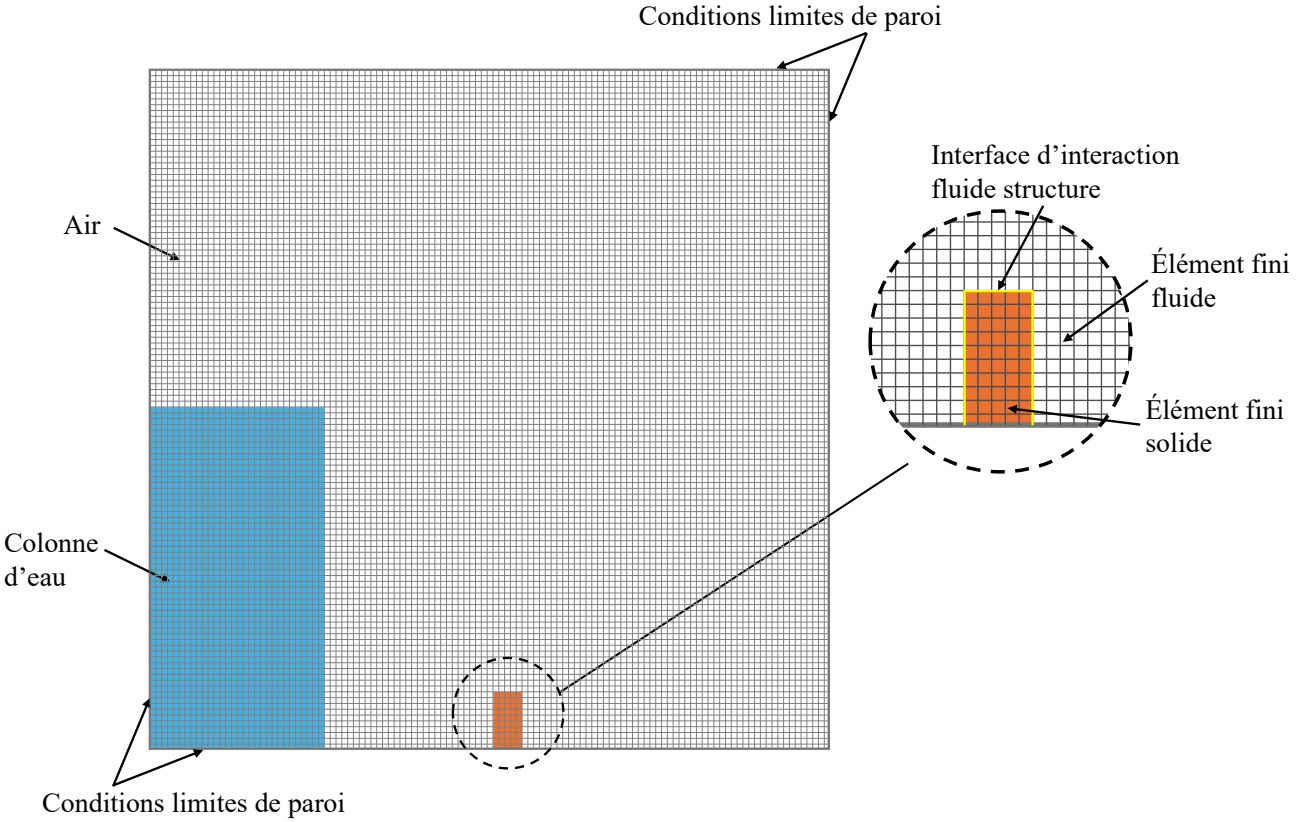


FIGURE 3.3 Schéma du modèle éléments finis (Adapté d'une communication personnelle de Bouaanani (2024))

La validation du modèle numérique a été faite par Wang et al. (2024) [2], en comparant

les variations de pression au niveau de la structure avec celles des modèles de la littérature. La variation de la pression à partir des formulations laminaire et turbulente ($k - \omega SST$) à la hauteur moyenne de la surface amont de l'obstacle est limitée [2]. Cette observation concorde avec les conclusions de Xu et al. (2016) [55], Yang et al. (2018) [56], Isshakov et al. (2018) [26]. La pression fournie par le modèle numérique correspond à celles de Hänsch et al. (2014) [25], Isshakov et al. (2018) [26], ainsi qu'aux résultats du logiciel OpenFOAM basé sur la méthode des volumes finis. La Figure 3.4 montre les courbes de pression superposées. Ainsi, la simulation numérique décrivant la dynamique du mélange air-eau estime efficacement l'écoulement du fluide.

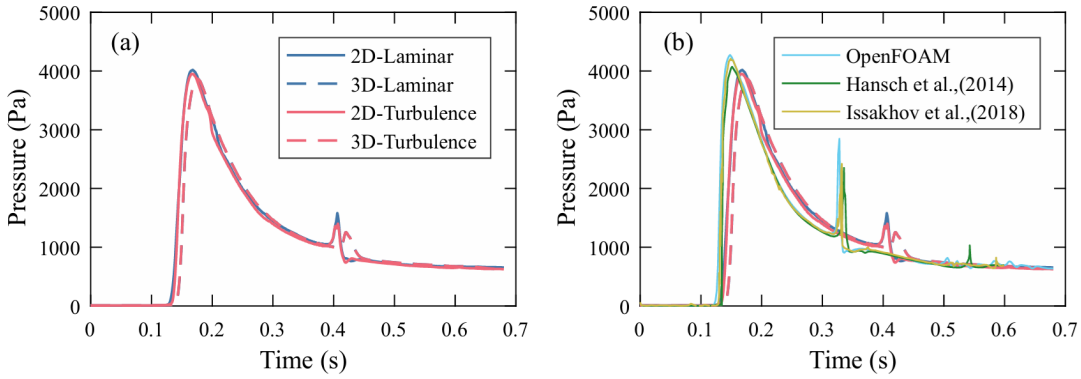


FIGURE 3.4 Comparaison de la pression au milieu de la structure sur la surface en amont (a) en 2D et 3D de Jianguo et al. (2024) [2] (b) résultats numériques de Hansch et al. (2014) [25] ; Issakhov et al. (2018) [26] ; OpenFOAM

3.2.3 Étude de convergence

L'étude de convergence est réalisée pour les tailles de maillage du Tableau 3.1. Les maillages ont été choisis afin d'étudier l'effet progressif du raffinement du maillage, d'une taille de maille extrêmement grossière jusqu'à une taille de maille très raffinée. Sur la structure, les différents maillages y sont représentés dans la Figure 3.5.

TABLEAU 3.1 Maillages étudiés

N° de maillage	Taille d'une maille (m)
1	2.5×10^{-2}
2	2.5×10^{-2} par 1.6×10^{-2}
3	$0.146/15 = 9.73 \times 10^{-3}$
4	8.0×10^{-3}
5	$0.146/30 = 4.87 \times 10^{-3}$
6	$0.146/60 = 2.43 \times 10^{-3}$

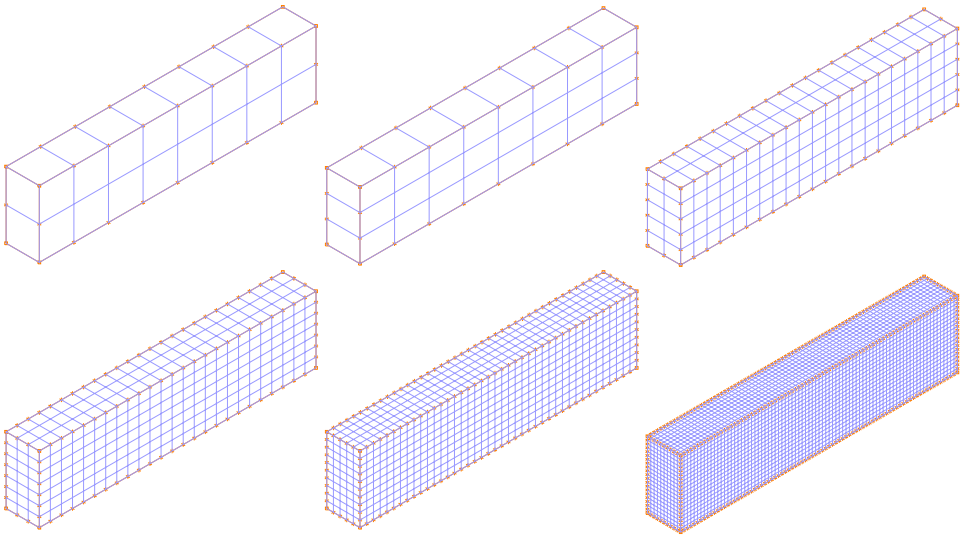


FIGURE 3.5 Structure avec maillage de 1 à 6

L'étude de convergence a été réalisée des maillages 1 à 6 pour la structure flexible. Cette dernière porte sur l'allure de l'écoulement, la réaction, le déplacement relatif maximal, et première la contrainte principale.

Le déplacement relatif

Le déplacement relatif est défini comme le déplacement latéral divisé par la hauteur de la structure. L'influence du raffinement du maillage sur le déplacement relatif est étudiée dans cette partie.

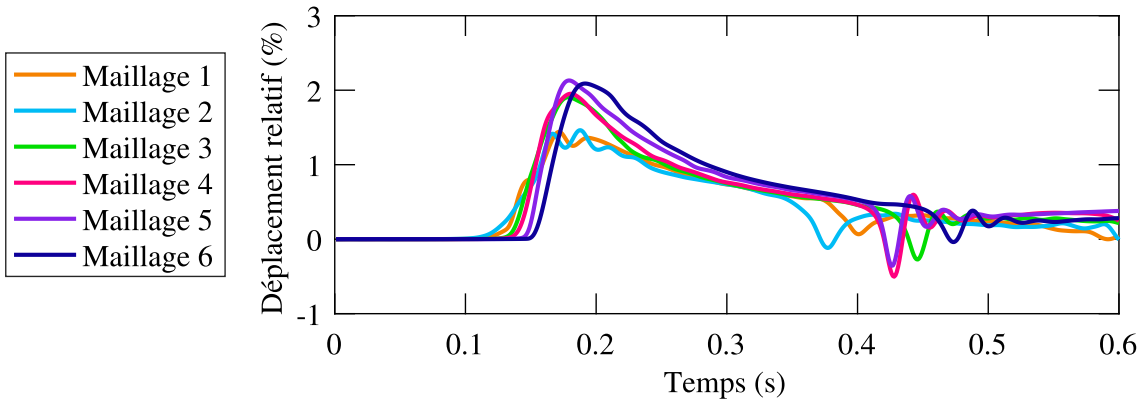


FIGURE 3.6 Déplacement relatif au sommet de la structure flexible en amont selon les maillages 1 à 6

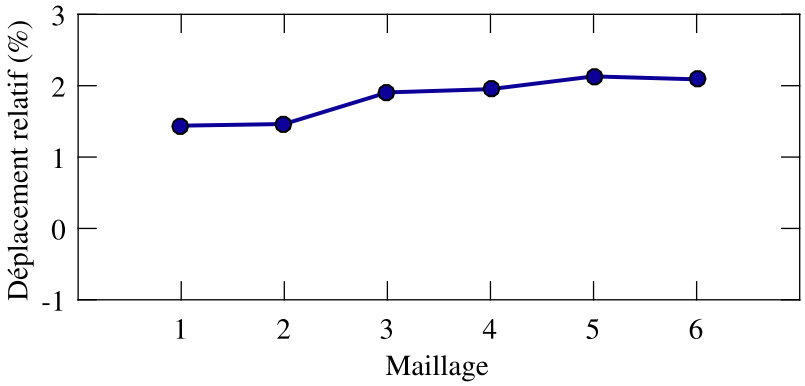


FIGURE 3.7 Déplacement relatif maximal au sommet de la structure flexible en amont selon les maillages 1 à 6

La Figure 3.6 représente le déplacement relatif de la structure par rapport au temps, selon les maillages. La tendance des courbes est similaire : le temps d'impact est d'environ $t = 0.15\ s$. Cependant, la valeur maximale du déplacement relatif est beaucoup plus faible pour les maillages 1 et 2, qui sont les maillages les plus grossiers. Le déplacement relatif converge à partir du maillage 3, tant en valeur qu'en temps de pic, comme le montre la Figure 3.7. Les valeurs des modèles avec maillage 5 et 6 conviennent.

La réaction

L'effet du raffinement du maillage sur la réaction à la base de la structure est étudié dans cette partie. L'axe Z correspond à la verticale et l'axe Y à la direction de l'écoulement suite à la rupture de barrage.

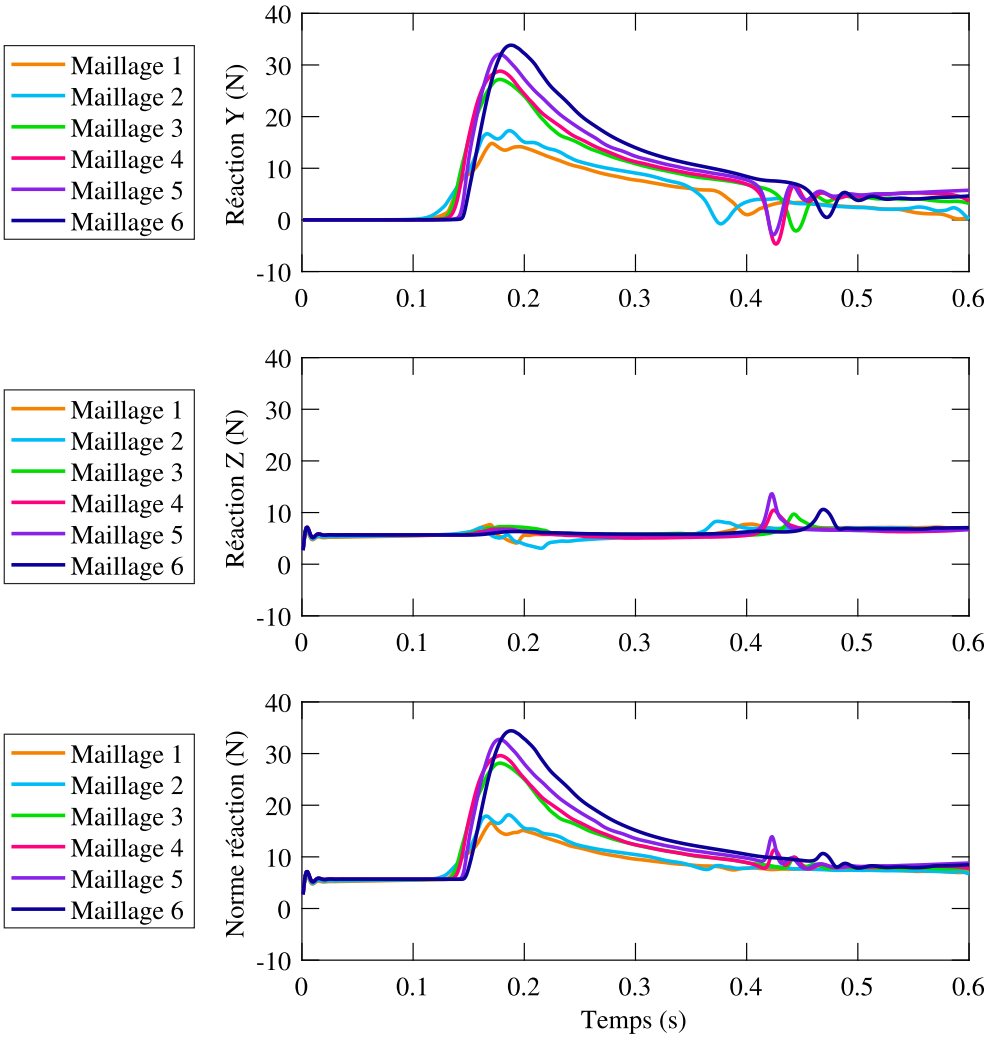


FIGURE 3.8 Réaction à la base de la structure flexible en amont selon les maillages 1 à 6

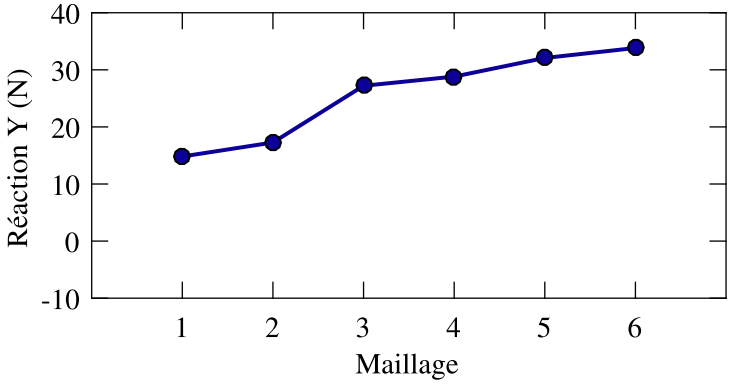


FIGURE 3.9 Réaction Y maximale à la base de la structure flexible selon les maillages 1 à 6

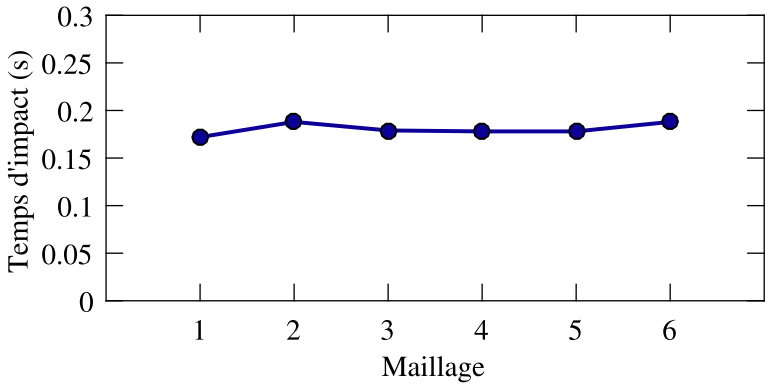
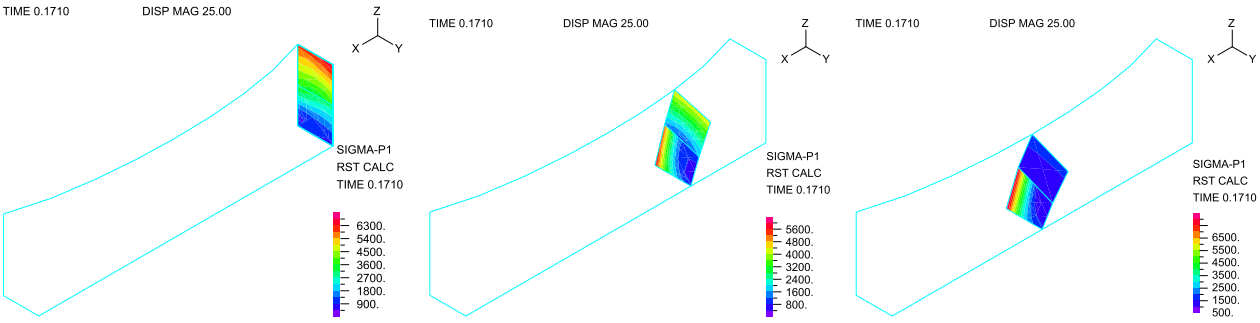


FIGURE 3.10 Temps d'impact maximal selon les maillages 1 à 6

La Figure 3.8 représente la réaction à la base de la structure pour les maillages 1 à 6. Bien que les courbes aient toutes les mêmes tendances, les réactions maximales des maillages 1 et 2 sont beaucoup plus faibles que celles des maillages plus raffinés. Ces valeurs sont explicitées dans la Figure 3.9. La Figure 3.10 représente le temps d'impact de l'eau sur la structure. La convergence apparaît à partir du maillage 3, et est satisfaisante pour les maillages 5 et 6.

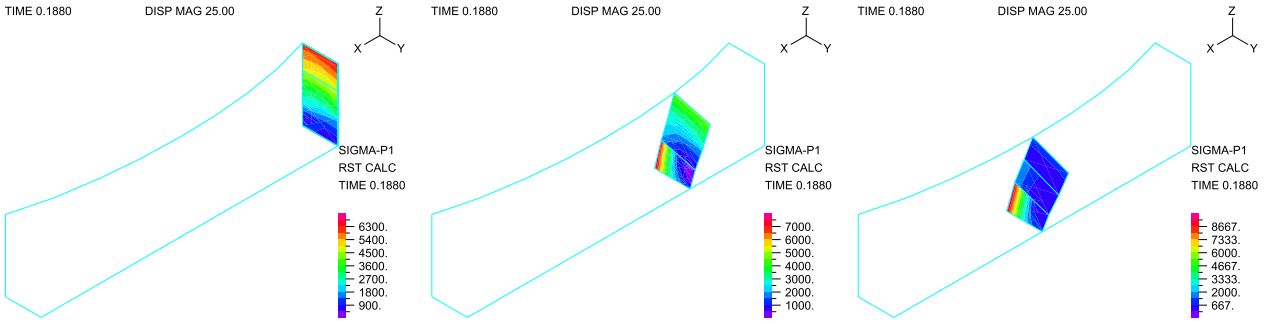
La contrainte principale σ_1

L'effet du raffinement du maillage sur la première contrainte principale maximale est étudié dans cette partie. Afin de montrer l'effet le long de la structure, des coupes de contrainte ont été réalisées au bord, au quart, et au milieu de la structure pour chacun des maillages étudiés.



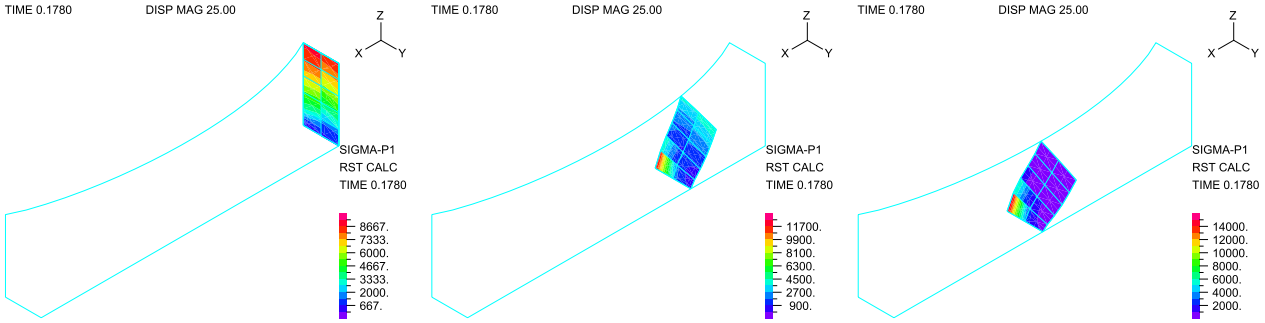
(a) Coupe au bord (b) Coupe au quart (c) Coupe au milieu

FIGURE 3.11 Coupes de contrainte principale maximale pour le maillage 1



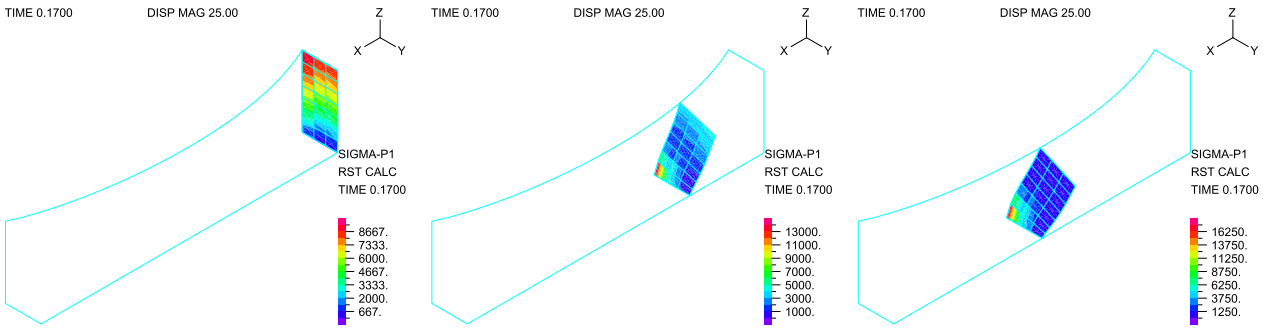
(a) Coupe au bord (b) Coupe au quart (c) Coupe au milieu

FIGURE 3.12 Coupes de contrainte principale maximale pour le maillage 2



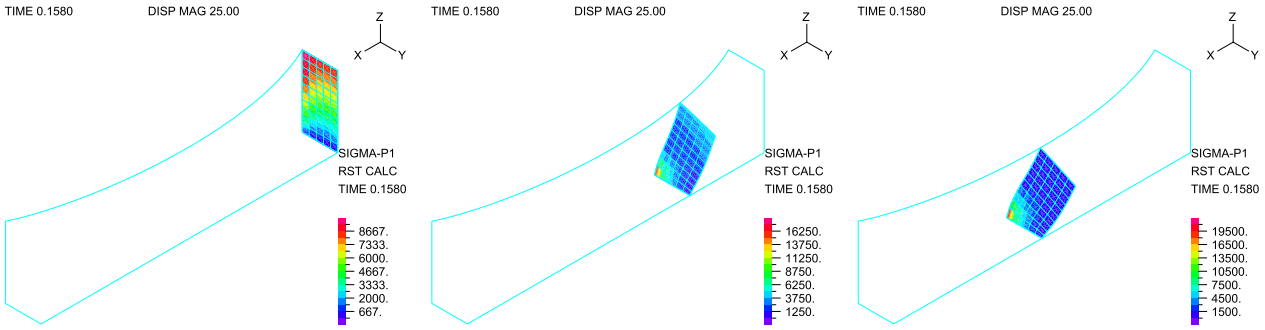
(a) Coupe au bord (b) Coupe au quart (c) Coupe au milieu

FIGURE 3.13 Coupes de contrainte principale maximale pour le maillage 3



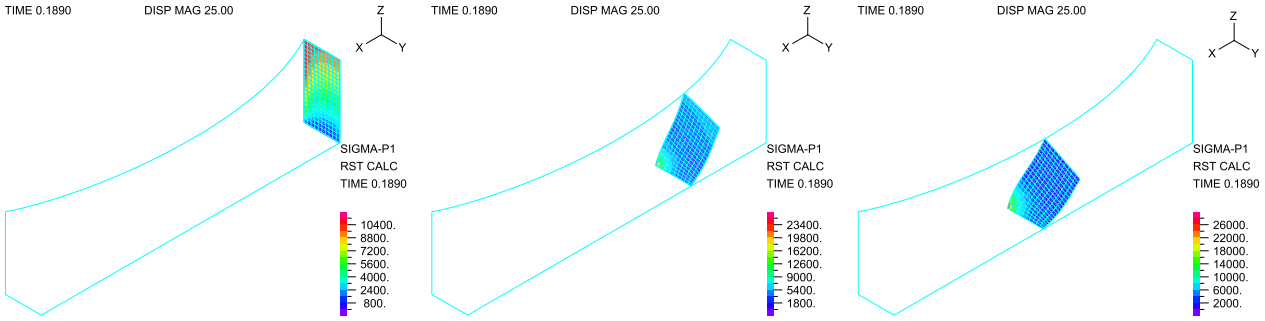
(a) Coupe au bord (b) Coupe au quart (c) Coupe au milieu

FIGURE 3.14 Coupes de contrainte principale maximale pour le maillage 4



(a) Coupe au bord (b) Coupe au quart (c) Coupe au milieu

FIGURE 3.15 Coupes de contrainte principale maximale pour le maillage 5



(a) Coupe au bord (b) Coupe au quart (c) Coupe au milieu

FIGURE 3.16 Coupes de contrainte principale maximale pour le maillage 6

Le raffinement du maillage a une grande influence sur la répartition ainsi que la valeur de la contrainte maximale (Figures 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 et 3.16.). Plus le maillage est raffiné, plus la répartition des contraintes devient précise. C'est le cas notamment du maximum de la contrainte, se trouvant au bord inférieur en amont de l'écoulement. Pour un maillage très grossier, comme les maillages 1 et 2, les contraintes ne sont pas réalistes. Avec les maillages 3 et 4, la répartition devient d'autant meilleure. Les maillages 5 et 6 représentent une répartition satisfaisante.

Temps de calcul

Puisque le raffinement du maillage de la structure entraîne le raffinement du maillage du domaine du fluide, et que ce dernier est beaucoup plus grand, le temps de calcul augmente drastiquement.

Le Tableau 3.2 contient les temps des modèles selon les maillages. Le maillage 6 est extrê-

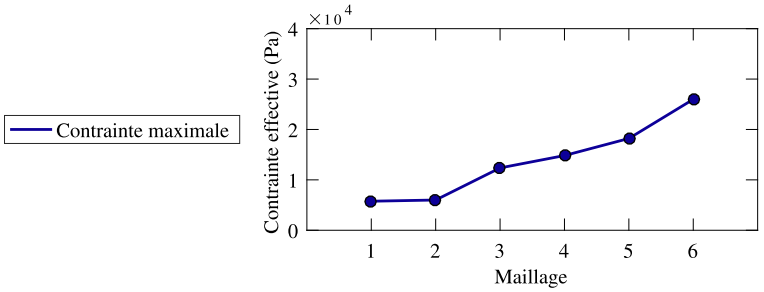


FIGURE 3.17 Contrainte principale maximale pour les maillages 1 à 6

TABLEAU 3.2 Temps des modèles selon le maillage

N° de maillage	**Temps en seconde**	**Temps en jour, heure, minute, seconde**
1	517	8 min 37 s
2	931	15 min 31 s
3	9 197	2 h 33 min 17 s
4	20 334	5 h 38 min 54 s
5	170 311	1 j 23 h 18 min 31 s
6	6 056 223	70 j 02 h 17 min 03 s

mement chronophage : son temps de calcul est supérieur à 70 jours. Il n'est donc pas réaliste de le considérer pour la suite des travaux. Le maillage 5 est satisfaisant d'après l'étude de convergence et a été retenu pour le reste des analyses.

3.3 Étude de différentes configurations

Plusieurs paramètres et configurations du modèle développé sont étudiées dans cette section :

- La flexibilité de la structure
- Les conditions de bords de la structure
- La présence d'un lit d'eau

Une comparaison de l'influence de chacun des paramètres sur le déplacement relatif, la réaction, et la contrainte sera effectuée.

3.3.1 Influence de la flexibilité de la structure

Dans cette partie, une étude de l'influence de la flexibilité de la structure sera réalisée, en prenant en compte pour la structure deux modules d'Young, pour des matériaux linéaires élastiques :

- structure flexible, $E = 1 \times 10^6$ Pa
- structure rigide, $E = 1 \times 10^{20}$ Pa

Le déplacement relatif

Le déplacement relatif est défini comme le déplacement latéral divisé par la hauteur de la structure. L'influence de la flexibilité de la structure sur le déplacement relatif est étudiée dans cette partie.

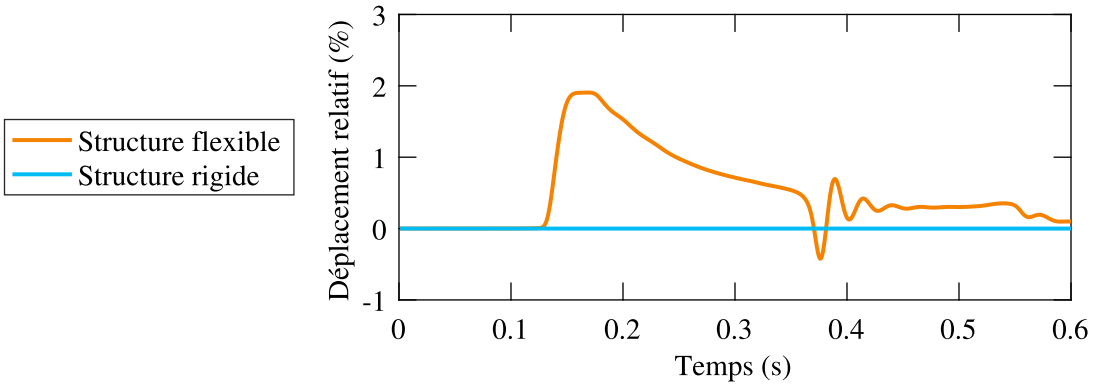


FIGURE 3.18 Déplacement au milieu de la structure en amont de l'écoulement

TABLEAU 3.3 Comparaison des déplacement relatif maximum pour les cas flexible et rigide

Type de structure	**Déplacement relatif maximum (%)**
Flexible	1.91
Rigide	1.95×10^{-14}

La Figure 3.18 représente le déplacement relatif du sommet de la structure par rapport au temps. La flexibilité a un impact significatif sur le déplacement relatif : plus la structure est flexible, plus de déplacement relatif augmente. Pour la structure rigide, ce dernier devient négligeable. Les déplacements maximaux sont précisés dans le Tableau 3.3. Ainsi, la flexibilité influence grandement le déplacement de la structure.

La réaction

L'effet de la flexibilité sur la réaction à la base de la structure est étudié dans cette partie. L'axe Z correspond à la verticale et l'axe Y à la direction de l'écoulement suite à la rupture de barrage.

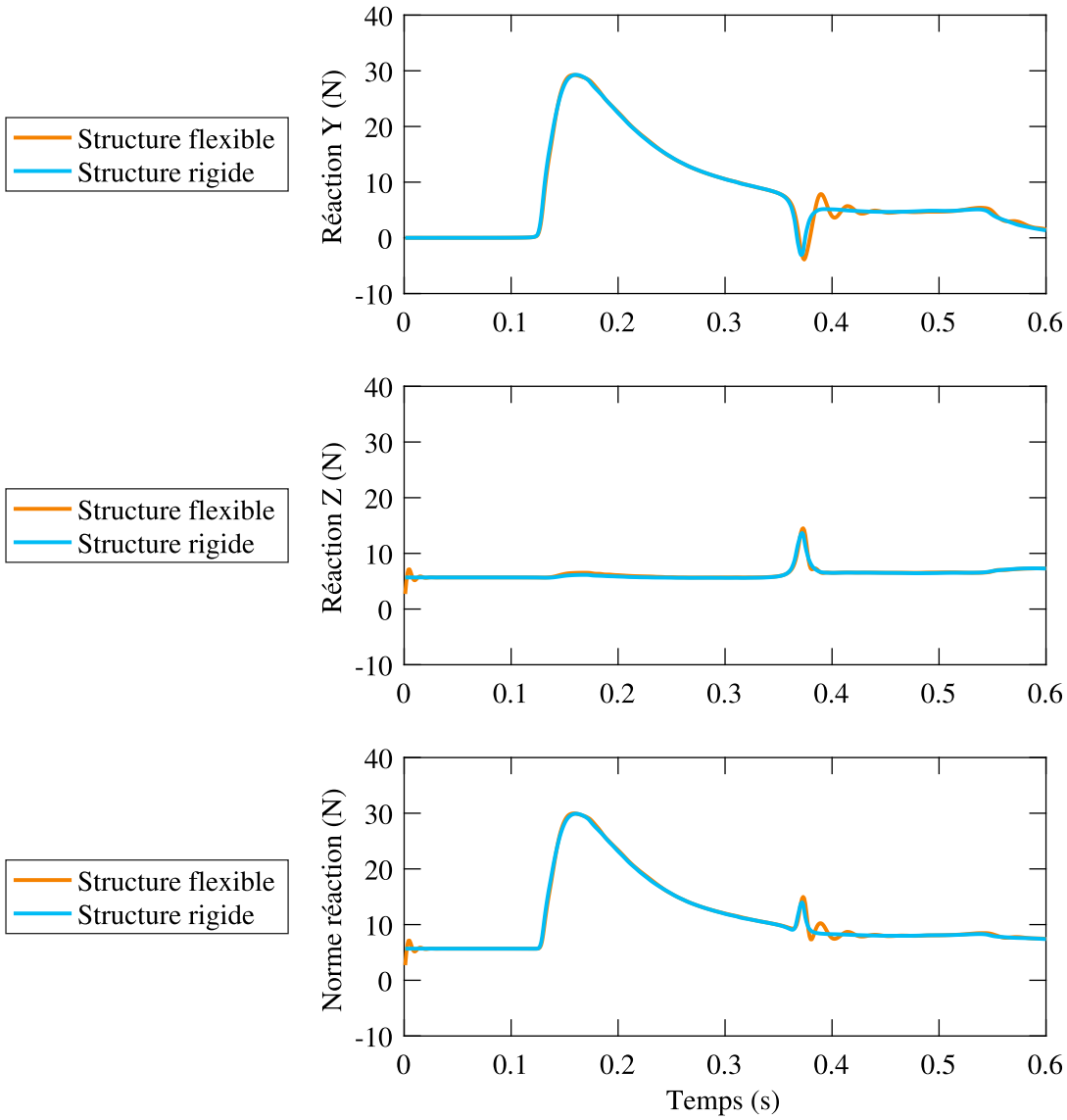


FIGURE 3.19 Réaction à la base des structures flexibles et rigides

La Figure 3.19 représente la réaction à la base des structures flexibles et rigides en fonction du temps. Les deux courbes ont les mêmes tendances et sont quasiment superposées. La réaction en Z vaut 5.68 N. Le poids de la structure est :

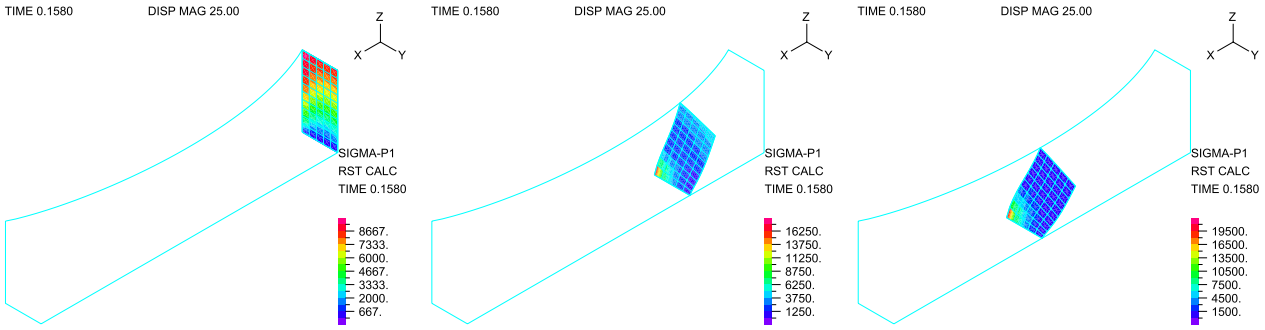
$$P = \rho \times V \times g = 2500 \times 0.024 \times 0.048 \times 0.2 \times 9.81 = 5.65 \text{ N} \tag{3.1}$$

La réaction en Z correspond au poids de la structure.

La flexibilité n'a pas d'influence sur la réaction maximale à la base de la structure. On remarque cependant qu'il y a des oscillations dans la réaction de la structure flexible après 0.3 s.

Contrainte principale σ_1

L'effet de la flexibilité sur la première contrainte principale maximale est étudié dans cette partie. Afin de montrer l'effet le long de la structure, des coupes de contrainte ont été réalisées au bord, au quart, et au milieu de la structure pour chacun des maillages étudiés.



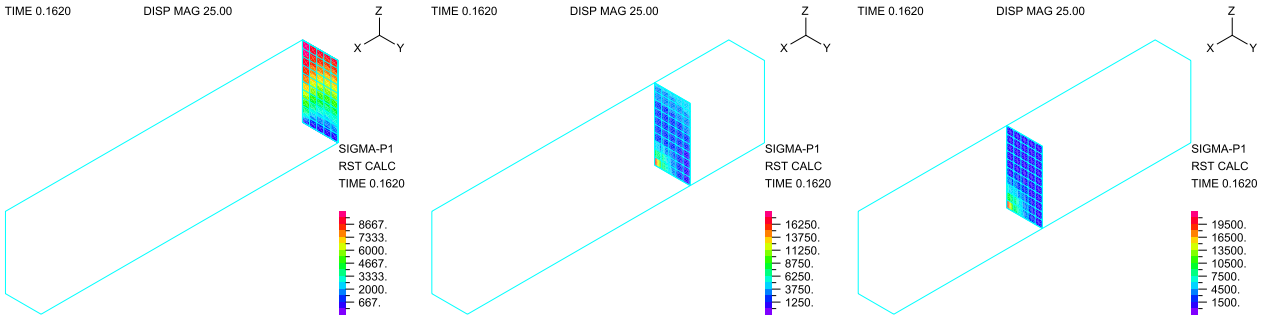
(a) Coupe au bord (b) Coupe au quart (c) Coupe au milieu

FIGURE 3.20 Coupes de contrainte principale maximale de la structure flexible

TABLEAU 3.4 Comparaison des contraintes principales maximales au milieu de la structure pour les cas flexible et rigide

Type de structure	**Contrainte principale maximale (Pa)**
Flexible	1.821×10^4
Rigide	1.855×10^4

Les Figures 3.20 et 3.21 représentent respectivement les coupes des contraintes des structures flexible et rigide. Bien que les deux cas aient des déformées différentes, la répartition des contraintes est similaire sur l'ensemble des coupes. Les contraintes maximales se trouvent



(a) Coupe au bord (b) Coupe au quart (c) Coupe au milieu

FIGURE 3.21 Coupes de contrainte principale maximale de la structure rigide

dans le Tableau 3.7. La contrainte est plus élevée dans la structure rigide. Donc la flexibilité a un impact sur la valeur de la contrainte maximale.

3.3.2 Influence des conditions de bord de la structure

Pour le modèle 3D, il y a différentes conditions des bords de la structure :

— bords fixes, où ils sont solidaires aux parois

— bords libres, où ils peuvent glisser le long des parois

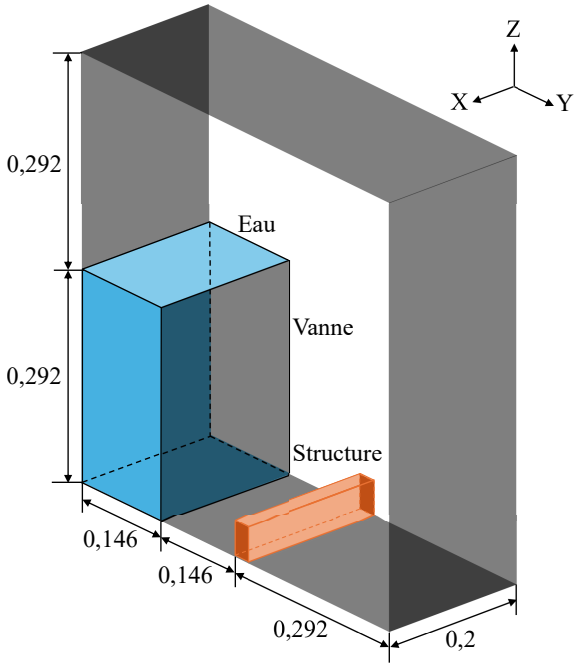
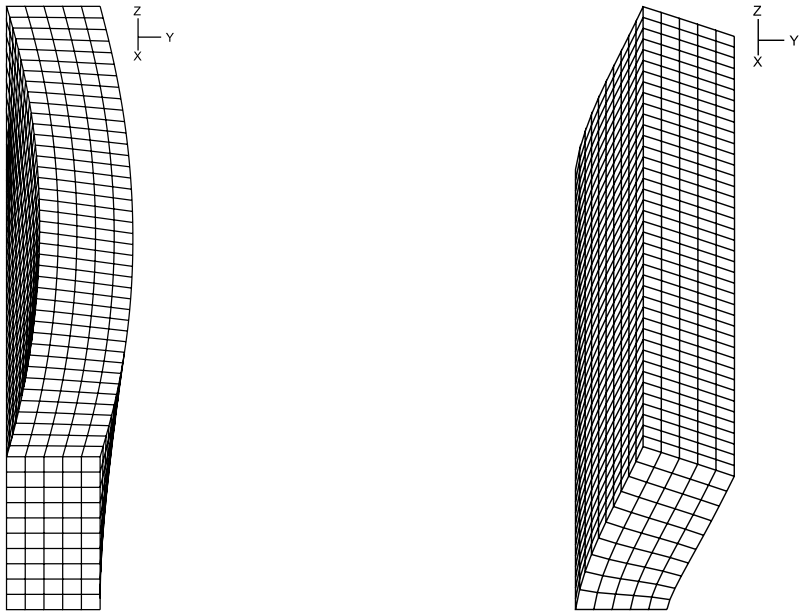


FIGURE 3.22 Schéma du cas de Koshizuka et al. [24] en 3D avec conditions aux bords

Le déplacement relatif

Le déplacement relatif est défini comme le déplacement latéral divisé par la hauteur de la structure. L'influence des conditions de bord de la structure sur le déplacement relatif est étudiée dans cette partie.



(a) Bords fixes (b) Bords libres

FIGURE 3.23 Cas avec structure flexible selon différentes conditions de bords à $t = 0.15$ s avec un facteur d'amplification de 10

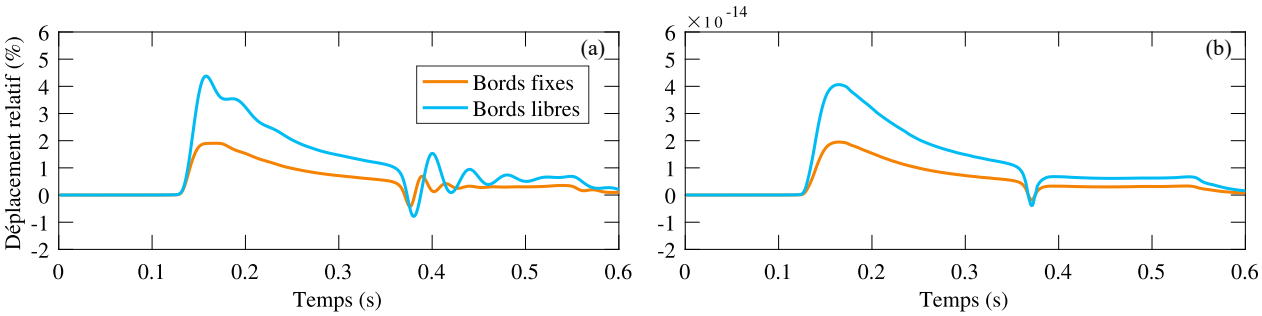


FIGURE 3.24 Déplacement relatif en fonction des conditions de bords pour les structures (a) flexible et (b) rigide

Dans la Figure 3.24, on remarque que le déplacement relatif maximal du cas avec bords libres est plus élevé que celui du cas avec bords fixes. Les déformées des structures avec bords fixes et bords libres dans les Figures 3.23a et 3.23b représentent cet écart.

Tableau 3.5 Comparaison des déplacement relatifs maximum pour le cas flexible avec bords fixes et bords libres

Type de bords	**Déplacement relatif maximaux(%)**
Bords fixes	1.91
Bords libres	4.38

Le rapport des déplacements relatifs maximaux issus du Tableau 3.5 vaut 2.29. Ainsi, la condition au bords fixe ou libre a un impact significatif sur le déplacement de la structure flexible.

Tableau 3.6 Comparaison des déplacements relatifs maximum pour le cas rigide avec bords fixes et bords libres

Type de bords	**Taux de dérive maximum (%)**
Bords fixes	1.95×10^{-14}
Bords libres	4.06×10^{-14}

Dans le cas d'une structure rigide, le rapport des déplacements maximaux issus du Tableau 3.6 vaut 2.08. De même que dans le cas flexible, la condition aux bords dans le cas rigide a un grand impact sur le déplacement de la structure, mais moindre.

La réaction

L'effet des conditions aux bords sur la réaction à la base de la structure est étudié dans cette partie. L'axe Z correspond à la verticale et l'axe Y à la direction de l'écoulement suite à la rupture de barrage.

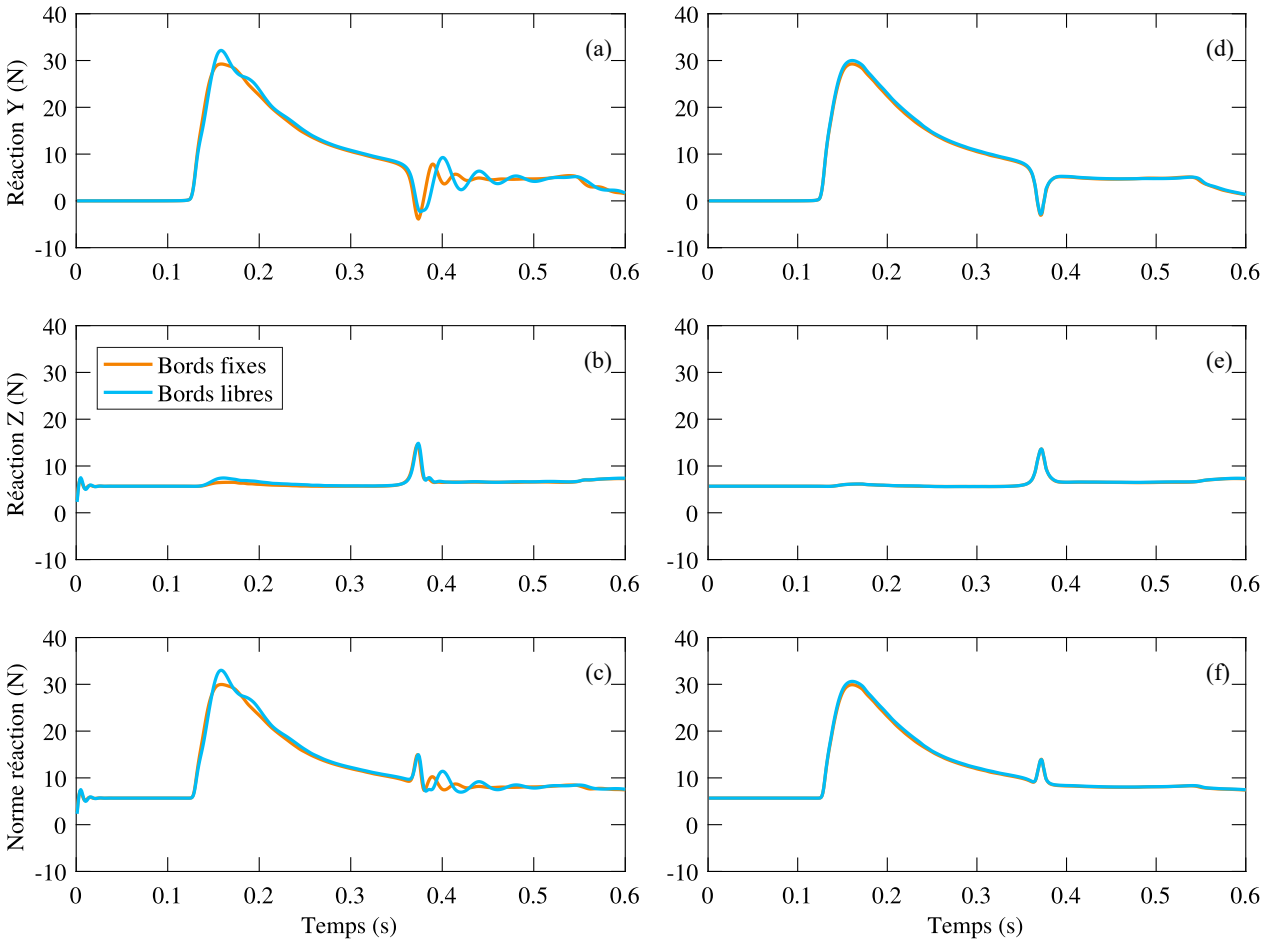


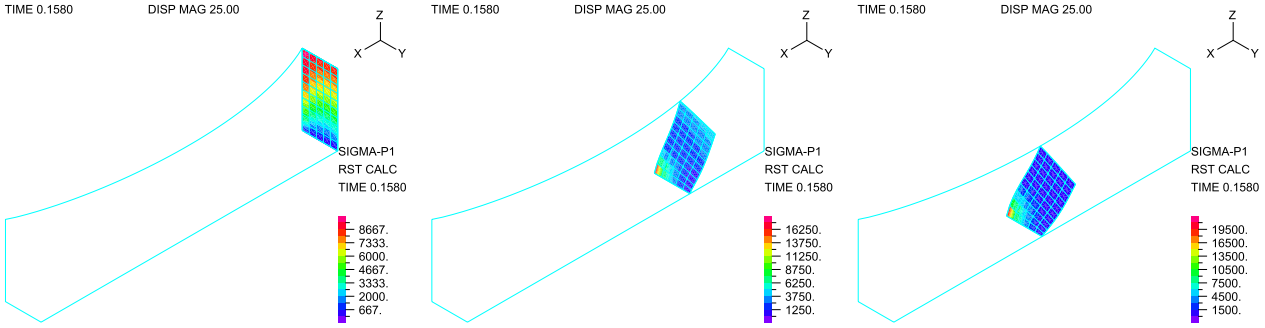
FIGURE 3.25 Réactions selon les conditions de bord pour de la structure flexible en (a) en Y, (b) en Z, (c) norme, de la structure rigide en (d) en Y, (e) en Z, (f) norme

La Figure 3.25 représente les réactions en fonction du temps selon les conditions aux bords pour les structures flexible et rigide. Les réactions suivent les mêmes tendances dans tous les cas. Mais pour la structure flexible, il existe de petites différences. Au pic, autour de 0.15 seconde, la réaction en Y est légèrement supérieure pour la structure avec bords libres. Alors que pour la structure rigide, la réaction est indépendante de la condition frontière aux bords.

La contrainte principale σ_1

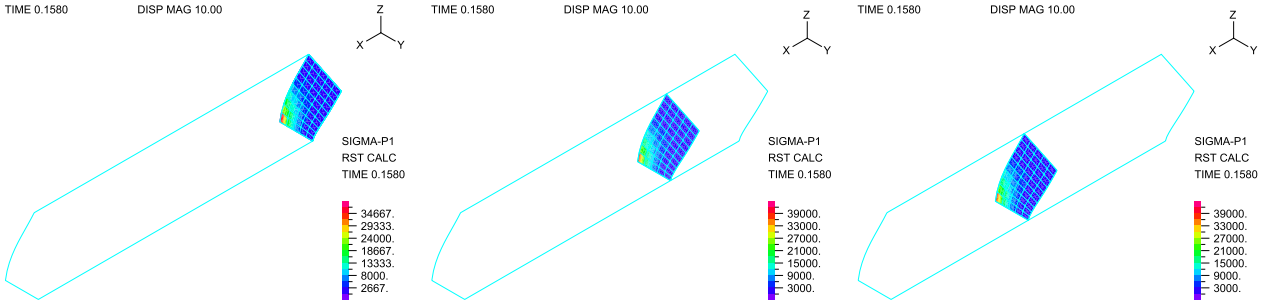
Les Figures 3.26 et 3.27 représentent respectivement les coupes de la première contrainte principale de la structure flexible pour les bords fixes et les bords libres. Plus la coupe s'approche du bord, plus la répartition des contraintes diffère entre les bords fixes et les bords libres. Cette différence est particulièrement visible sur les coupes situées au bord de la structure. Sur la Figure 3.26a, le maximum de contrainte se situe sur la partie supérieure de

la structure, alors que sur la Figure 3.27a, elle se situe sur le bord inférieur. Cette différence de répartition est également légèrement visible sur les coupes au quart (Figures 3.26b et 3.27b). Pour la coupe au milieu, la répartition est similaire (Figures 3.26c et 3.27c).



(a) Coupe au bord (b) Coupe au quart (c) Coupe au milieu

FIGURE 3.26 Coupes de contrainte principale maximale de la structure flexible avec bords fixes pour le maillage 5



(a) Coupe au bord (b) Coupe au quart (c) Coupe au milieu

FIGURE 3.27 Coupes de contrainte principale maximale de la structure flexible avec bords libres pour le maillage 5

TABLEAU 3.7 Comparaison des contraintes principales maximales au milieu de la structure flexible selon les conditions de bords

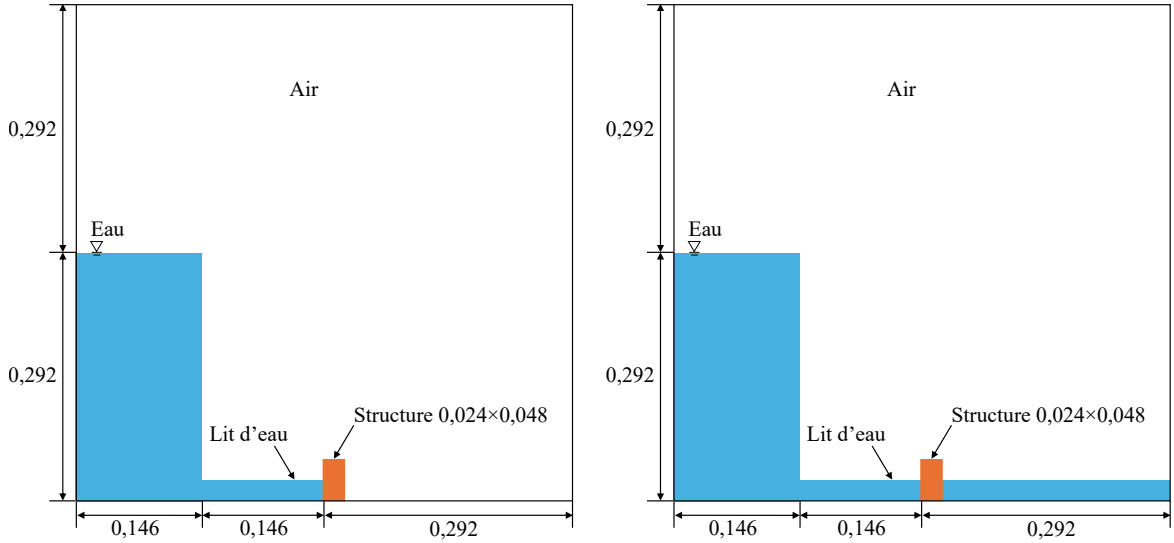
Type de conditions aux bords	**Contrainte principale maximale (Pa)**
Fixes	1.821×10^4
Libres	3.500×10^4

Outre la répartition, la valeur des contraintes diffère également, comme l'illustre le Tableau 3.7. Le rapport entre les contraintes maximales vaut 1.92, ce qui est significatif. Donc, les conditions aux bords ont un impact significatif sur la répartition et la valeur des contraintes dans la structure.

3.3.3 Influence du lit d'eau

Dans cette partie, l'effet du lit d'eau est étudié les configurations suivantes :

— sec, lorsqu'il n'y a pas de lit d'eau
— barrage, lorsque le lit d'eau est seulement en amont de la structure
— rivière, lorsque le lit d'eau est en amont et en aval de la structure



(a) Configuration barrage (b) Configuration rivière

FIGURE 3.28 Modèle avec lit d'eau pour différentes hauteurs en m

On étudie différents niveaux de lit d'eau pour chacune des configurations, représentés dans la Figure 3.29.

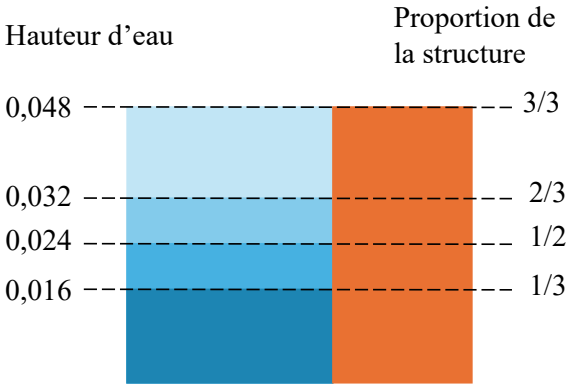


FIGURE 3.29 Niveaux de lits d'eau étudiés. Le niveau d'eau en mètre à gauche, la proportion par rapport à la structure à droite

Influence de la configuration barrage et rivière

L'influence de la présence d'un lit d'eau en amont (barrage) ou en amont et en aval (rivière) de la structure est étudiée dans cette partie.

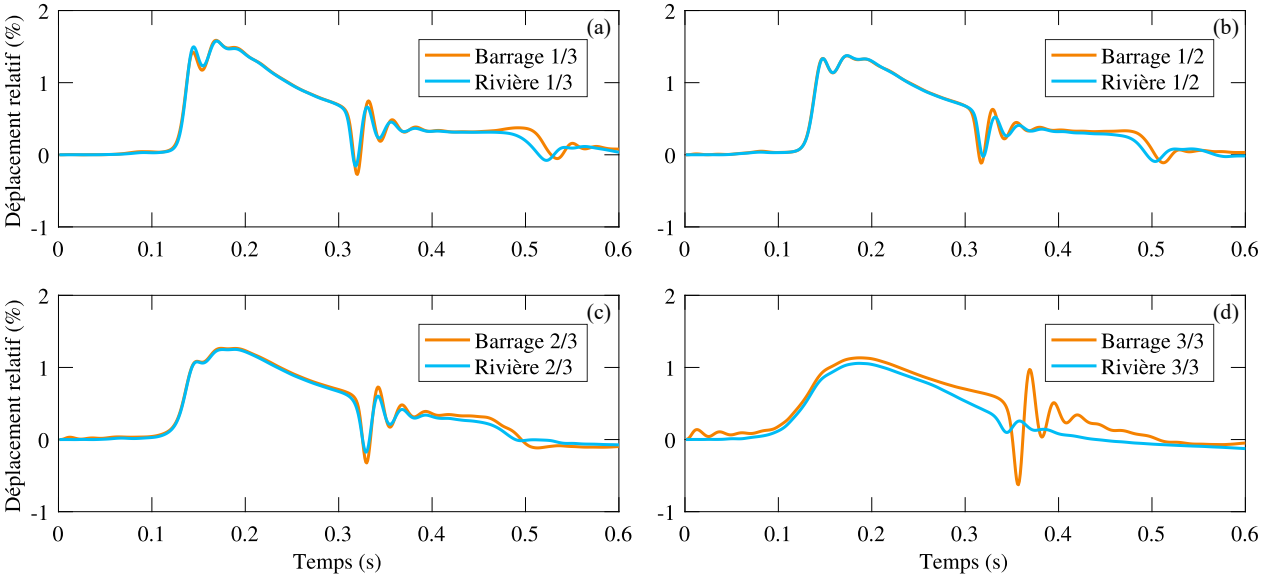


FIGURE 3.30 Déplacement relatif au sommet en amont de la structure flexible avec bords fixes pour un lit d'eau en configuration barrage pour les niveaux (a) 1/3, (b) 1/2, (c) 2/3, (d) 3/3

Dans la Figure 3.30, la configuration barrage ou rivière n'a pas d'impact sur le déplacement relatif maximal de la structure flexible. Cependant, elle influence légèrement le retour de la structure après 0.3 s : le modèle avec rivière a un taux de dérive inférieur au modèle avec barrage. L'eau se trouvant en aval de la structure amortit légèrement son déplacement. De plus, plus le niveau d'eau augmente, plus cette différence est exacerbée.

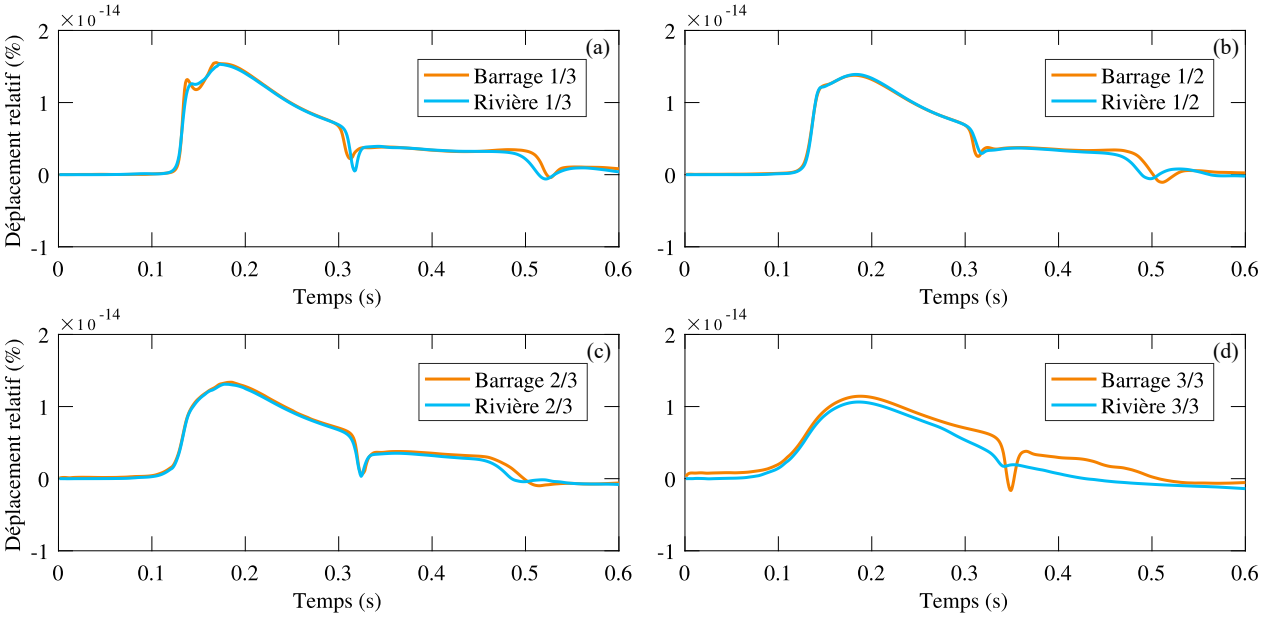


FIGURE 3.31 Déplacement relatif au sommet en amont de la structure rigide avec bords fixes pour un lit d'eau en configuration barrage pour les niveaux (a) 1/3, (b) 1/2, (c) 2/3, (d) 3/3

Dans le cas de la structure rigide, représenté dans la Figure 3.31, le déplacement relatif maximal est le même pour les configurations barrage et rivière, mais l'eau en aval de la structure a quand même un effet sur la forme qui est plus amortie.

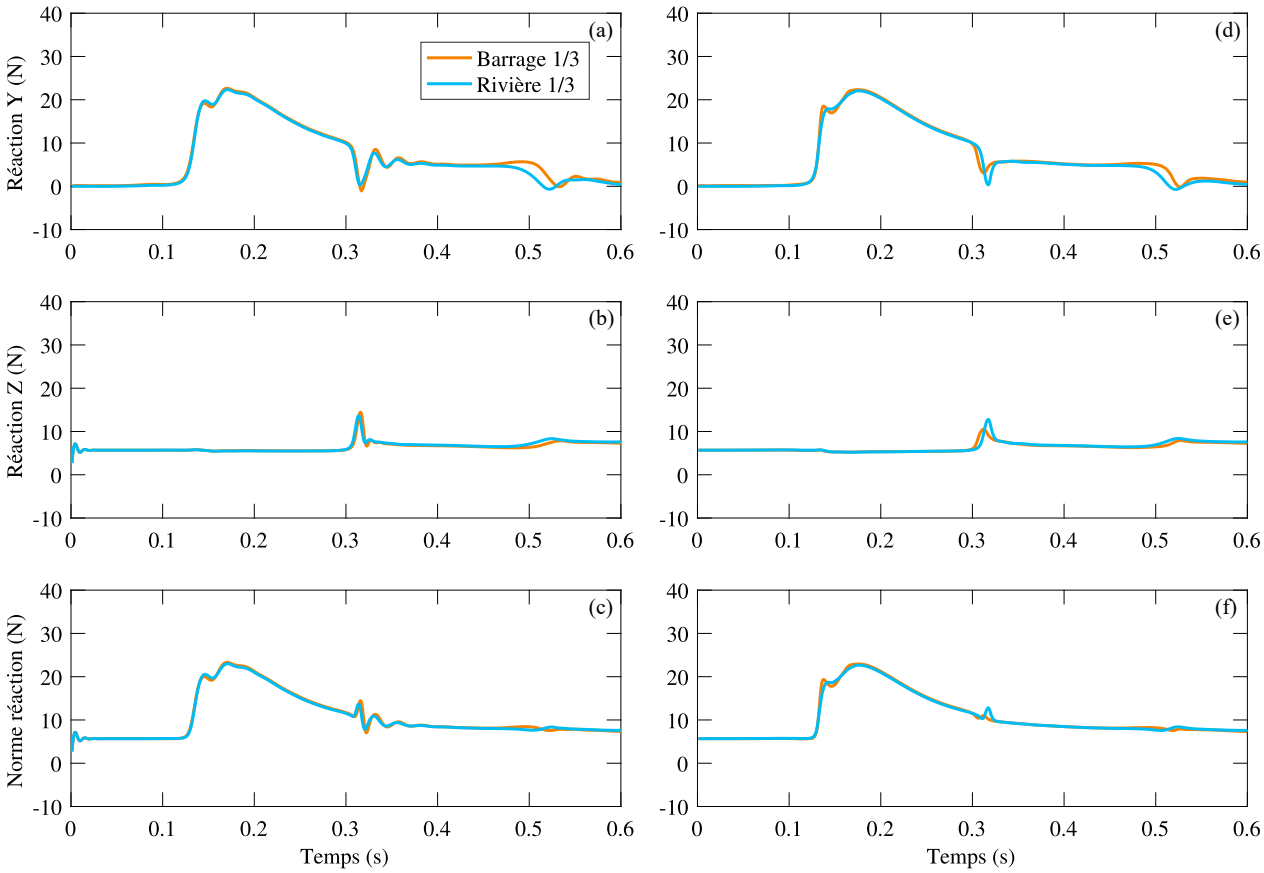


FIGURE 3.32 Réactions selon la configuration du lit d'eau pour de la structure flexible en (a) en Y, (b) en Z, (c) norme, de la structure rigide en (d) en Y, (e) en Z, (f) norme

De même que le déplacement relatif, il y a peu de différence dans la réaction entre les configurations barrage et rivière pour la structure flexible, dans la Figure 3.32. Aussi, l'eau en aval de la structure amortit le retour élastique de la structure après 0.3 seconde.

Le cas rigide est similaire à celui flexible. Il y a peu de différence entre les configurations barrage et rivière, mais cette dernière amortit légèrement la réaction.

Influence de la hauteur du lit d'eau en configuration barrage

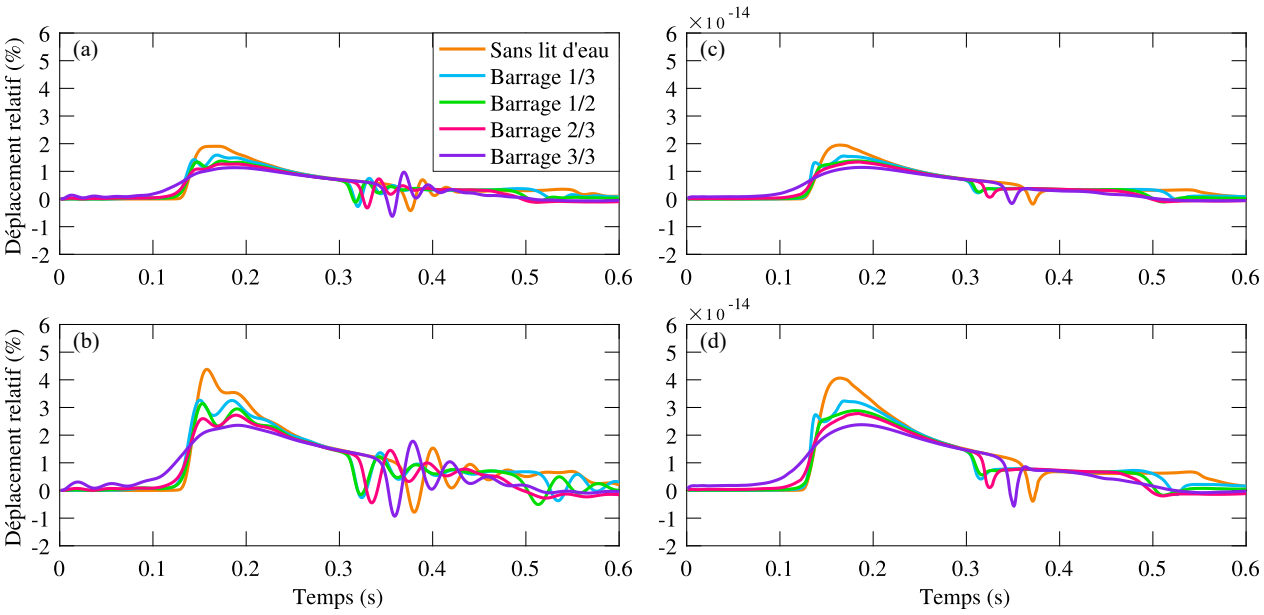


FIGURE 3.33 Déplacement relatif au sommet en amont de la structure flexible (a) avec bords fixes, (b) bords libres, pour la structure rigide (c) bords fixes, (d) bords libres en configuration barrage

TABLEAU 3.8 Comparaison des déplacements relatifs maximaux en % pour les différentes hauteurs de lit d'eau en configuration barrage

Lit d'eau	**Structure flexible**		**Structure rigide**	
	Bords fixes	**Bords libres**	**Bords fixes**	**Bords libres**
Sans lit d'eau	1.91	4.38	1.95×10^{-14}	4.06×10^{-14}
Barrage 1/3	1.59	3.26	1.55×10^{-14}	3.24×10^{-14}
Barrage 1/2	1.37	3.14	1.38×10^{-14}	2.88×10^{-14}
Barrage 2/3	1.26	2.72	1.34×10^{-14}	2.78×10^{-14}
Barrage 3/3	1.13	2.36	1.14×10^{-14}	2.38×10^{-14}

La hauteur de lit d'eau influence le déplacement relatif au sommet de la structure, comme le montre la Figure 3.33. En effet, plus le niveau d'eau est élevé, moins le déplacement l'est. Cela s'explique par le fait que l'eau agit comme un amortisseur sur la structure. La présence du lit d'eau modifie également le pic du déplacement autour de 0.15 seconde : pour les niveaux 1/3, 1/2 et 2/3, les oscillations forment deux pics. Les déplacements maximaux sont quantifiés dans le Tableau 3.8, ce qui montre bien l'influence du niveau d'eau sur le déplacement de la structure.

Influence de la hauteur du lit d'eau en configuration rivière

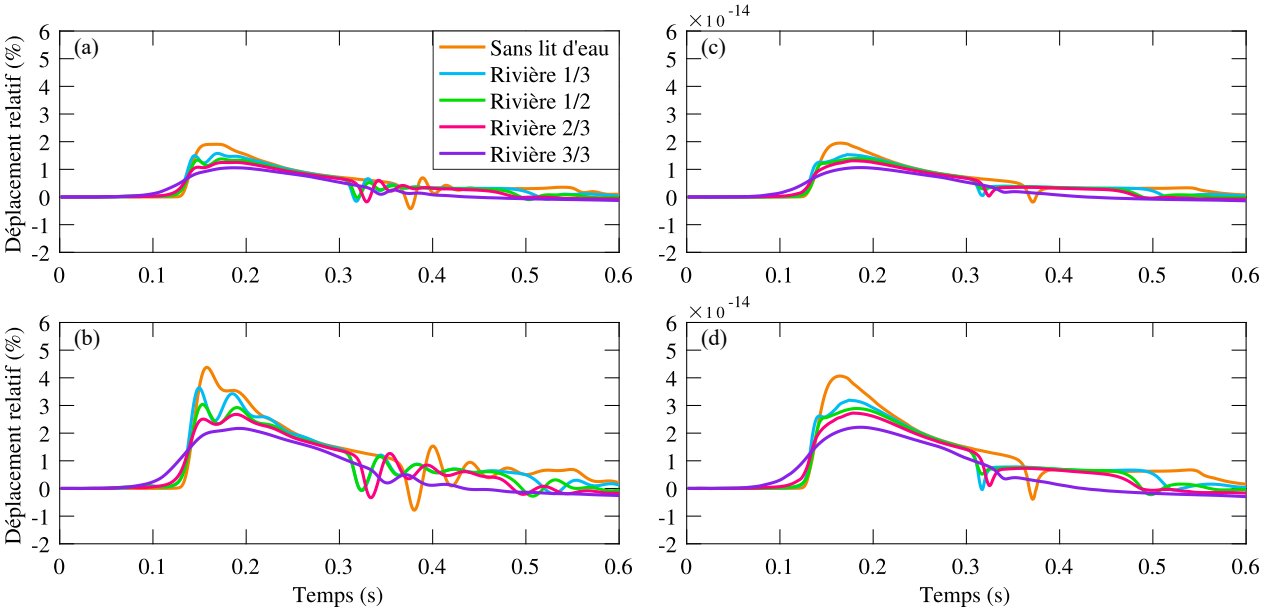


FIGURE 3.34 Déplacement relatif au sommet en amont de la structure flexible (a) avec bords fixes, (b) bords libres, pour la structure rigide (c) bords fixes, (d) bords libres en configuration rivière

TABLEAU 3.9 Comparaison des déplacements relatifs maximaux en % pour les différentes hauteurs de lit d'eau en configuration rivière

Lit d'eau	**Structure flexible**		**Structure rigide**	
	Bords fixes	**Bords libres**	**Bords fixes**	**Bords libres**
Sans lit d'eau	1.91	4.38	1.95×10^{-14}	4.06×10^{-14}
Rivière 1/3	1.58	3.63	1.53×10^{-14}	3.19×10^{-14}
Rivière 1/2	1.38	3.04	1.39×10^{-14}	2.89×10^{-14}
Rivière 2/3	1.25	2.68	1.31×10^{-14}	2.72×10^{-14}
Rivière 3/3	1.06	2.17	1.063×10^{-14}	2.21×10^{-14}

La Figure 3.34 et le Tableau 3.9 montrent l'influence de la hauteur d'eau en configuration rivière sur le déplacement de la structure. De la même manière que dans la configuration barrage, le niveau d'eau a un impact significatif sur le déplacement. Les tendances des courbes des Figures 3.33 et 3.34 sont similaires. Les valeurs des Tableaux 3.8 et 3.9 sont proches.

3.3.4 Conclusion

La flexibilité a un impact sur le déplacement relatif maximal, mais n'a pas d'influence sur la réaction maximale à la base de la structure. De plus, elle a un impact sur la répartition et la valeur des contraintes. Ces dernières sont plus grandes dans la structure flexible. Les

conditions des bords, fixes ou libres ont un impact sur la déformée de la structure. Les déplacements et les contraintes en sont directement impactés. L'eau, présente en amont et ou en aval de la structure dans des conditions barrage ou rivière n'a pas d'impact sur le déplacement maximal. Plus la hauteur d'eau est importante, moins le déplacement maximal est grand. Elle amortit la crue générée par la rupture de barrage.

3.4 Troncation

En général, le domaine de la MFN est beaucoup plus grand que le domaine des structures. De plus, le maillage du domaine de la MFN doit être assez raffiné, surtout aux alentours de la structure pour avoir une réponse structurelle adéquate. Les modèles sont donc très chronophages en raison de la taille du domaine de fluide. Le développement de modèles tronqués permet de supprimer une partie du domaine de la MFN ; des variables d'entrées à la troncation sont utilisées pour représenter le comportement des fluides. Ainsi, cette méthode améliore grandement l'efficacité de calcul.

3.4.1 Modélisation de la troncation

La définition d'une limite de troncation a pour but d'introduire une entrée de flux qui assure la continuité de l'écoulement des fluides. Dans le modèle tronqué, les états d'écoulement des fluides et les forces hydrodynamiques devraient correspondre à ceux du modèle complet. C'est pourquoi des variables de fluides d'entrée sont implémentées aux nœuds de la troncation. Le programme ADINA est utilisé, car c'est un logiciel d'EF puissant qui peut résoudre des problèmes d'analyse des structures, de MEF ainsi que l'IFS. La formulation FCBI-C a une bonne convergence et est couramment utilisé pour les analyses numériques. Dans un premier temps, on vérifie que la formulation FCBI-C est adéquate pour définir des variables d'entrée des écoulements des fluides.

On étudie le modèle MFN suivant :

La condition aux limites "mur" (*wall*) est appliquée à toutes les surfaces sauf celles dont la normale est y. Le maillage le plus grossier, le maillage 1, vaut 0.03 m.

Sur le modèle avec maillage 1a représenté par la Figure 3.36, des variables d'entrée sont appliquées sur la surface d'entrée. Pour la partie inférieure $x \leq 0.03$ (flèches oranges), le volume de fluide et la vitesse selon Y valent 1. Pour la partie supérieure $x > 0.03$ (flèches bleues), toutes les variables valent 0.

Six maillages sont étudiés, chaque maillage étant deux fois plus raffiné que le précédent.

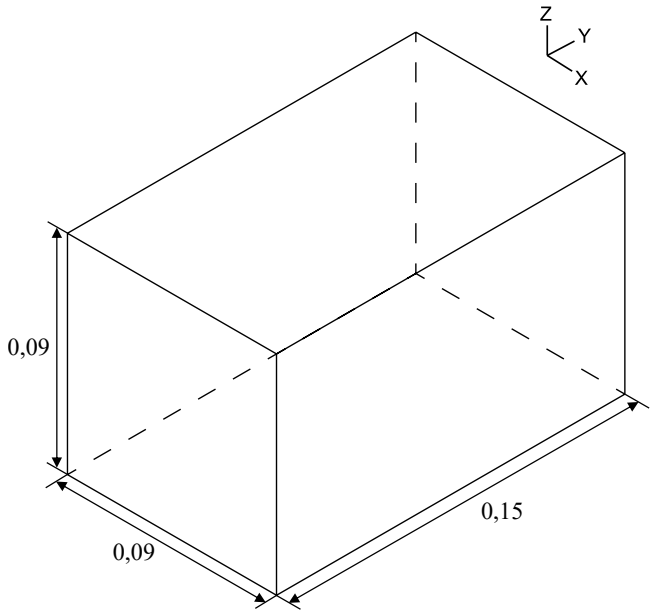


FIGURE 3.35 Dimensions du modèle 3D complet en m

N° du maillage	**Taille du maillage** (m)
1a	3×10^{-2}
2a	1.5×10^{-2}
3a	7.5×10^{-3}
4a	3.75×10^{-3}
5a	1.875×10^{-3}
6a	9.375×10^{-4}

TABLEAU 3.10 Taille des maillages de 1a à 6a

On compare les variables d'entrée avec les valeurs considérées au nœuds par la formulation FCBI-C.

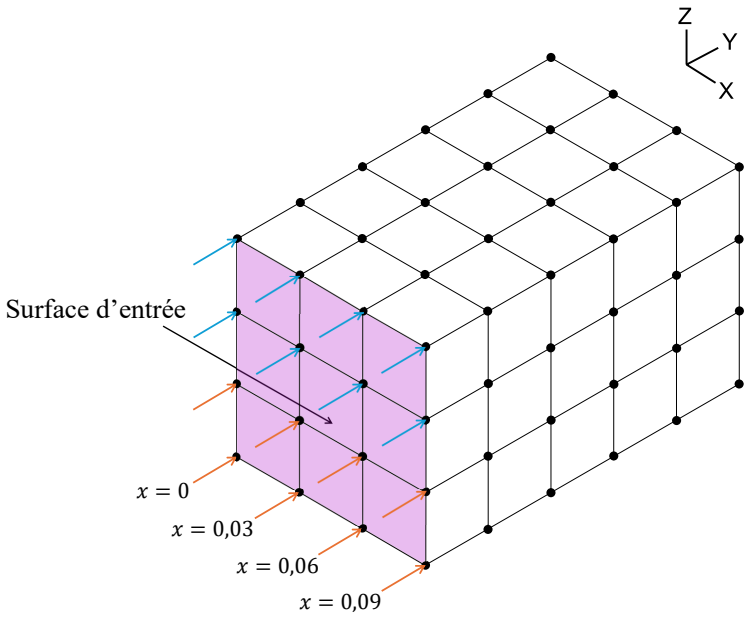


FIGURE 3.36 Définition des variables d'entrée à la surface d'entrée (en violet)

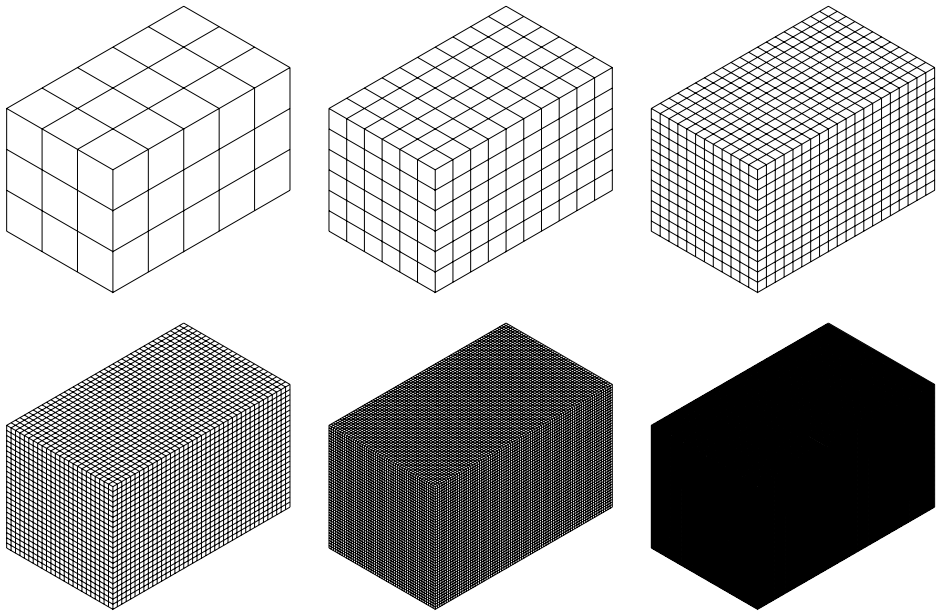


FIGURE 3.37 Définition des maillages 1a à 6a

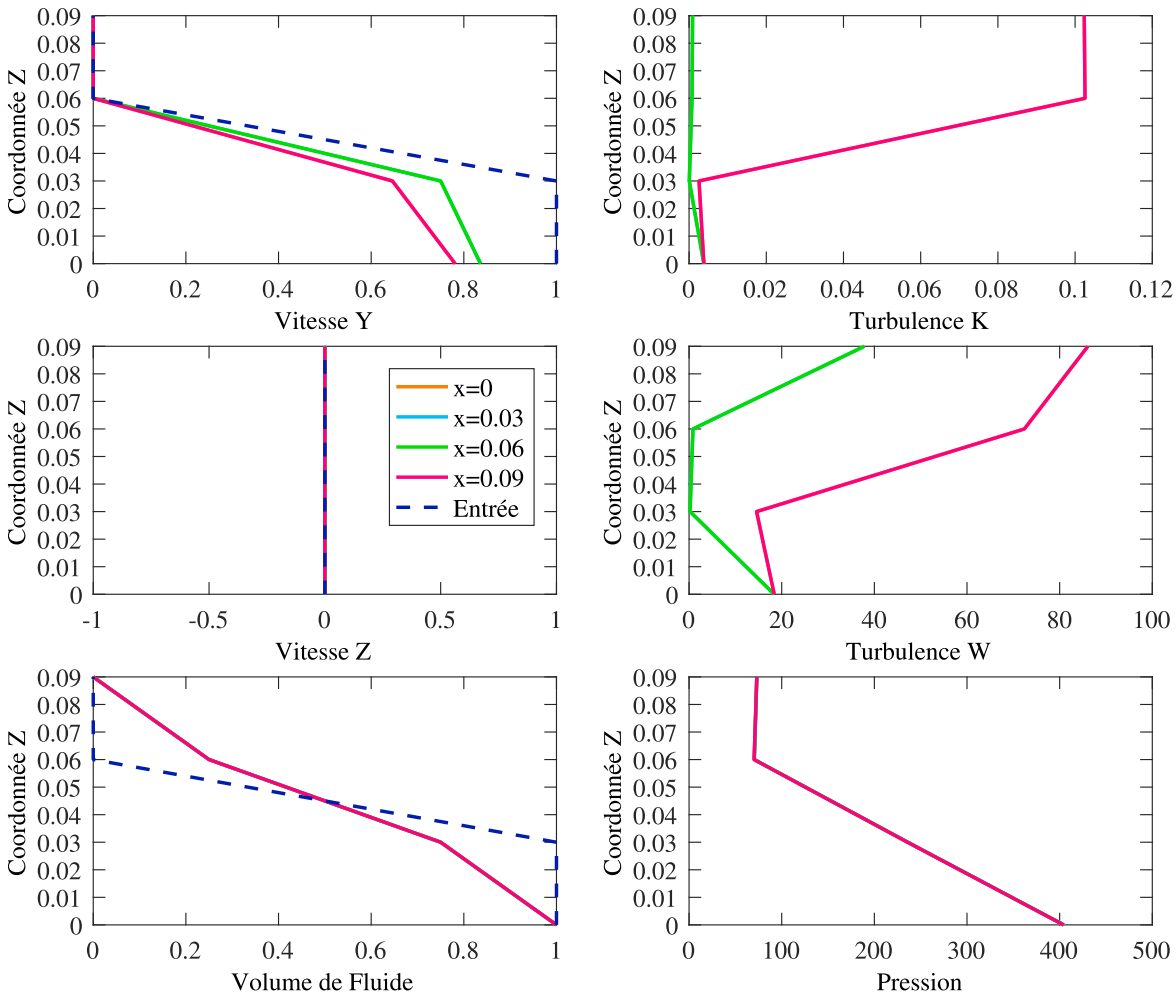


FIGURE 3.38 Comparaison des variables d'entrée et les valeurs considérées par la formulation FCBI-C, maillage 1a

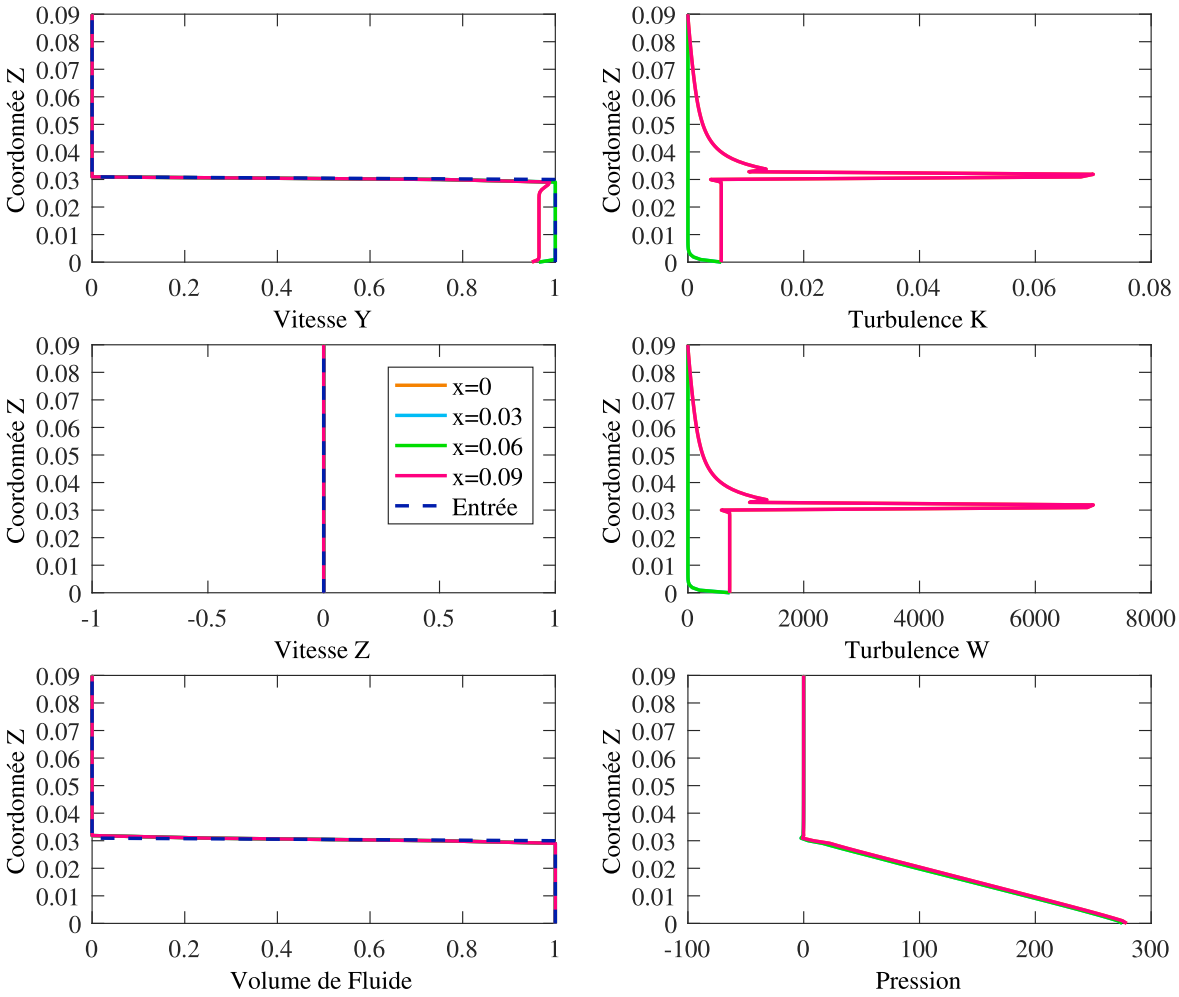


FIGURE 3.39 Comparaison des variables d'entrée et les valeurs considérées par la formulation FCBI-C, maillage 6a

Avec un maillage raffiné, on a une bonne correspondance entre les variables d'entrée et les valeurs considérées par la formulation FCBI-C.

Contrairement au maillage 1 qui est grossier, pour le maillage raffiné 6 il n'y a plus de différence de paramètres de fluide hormis les turbulences entre les colonnes $x = 0$, $x = 0.03$, $x = 0.06$, $x = 0.09$.

Donc l'effet 3D est négligeable pour un maillage assez raffiné.

L'effet de raffinement du maillage pour $x = 0.03$ est présenté dans la figure suivante :

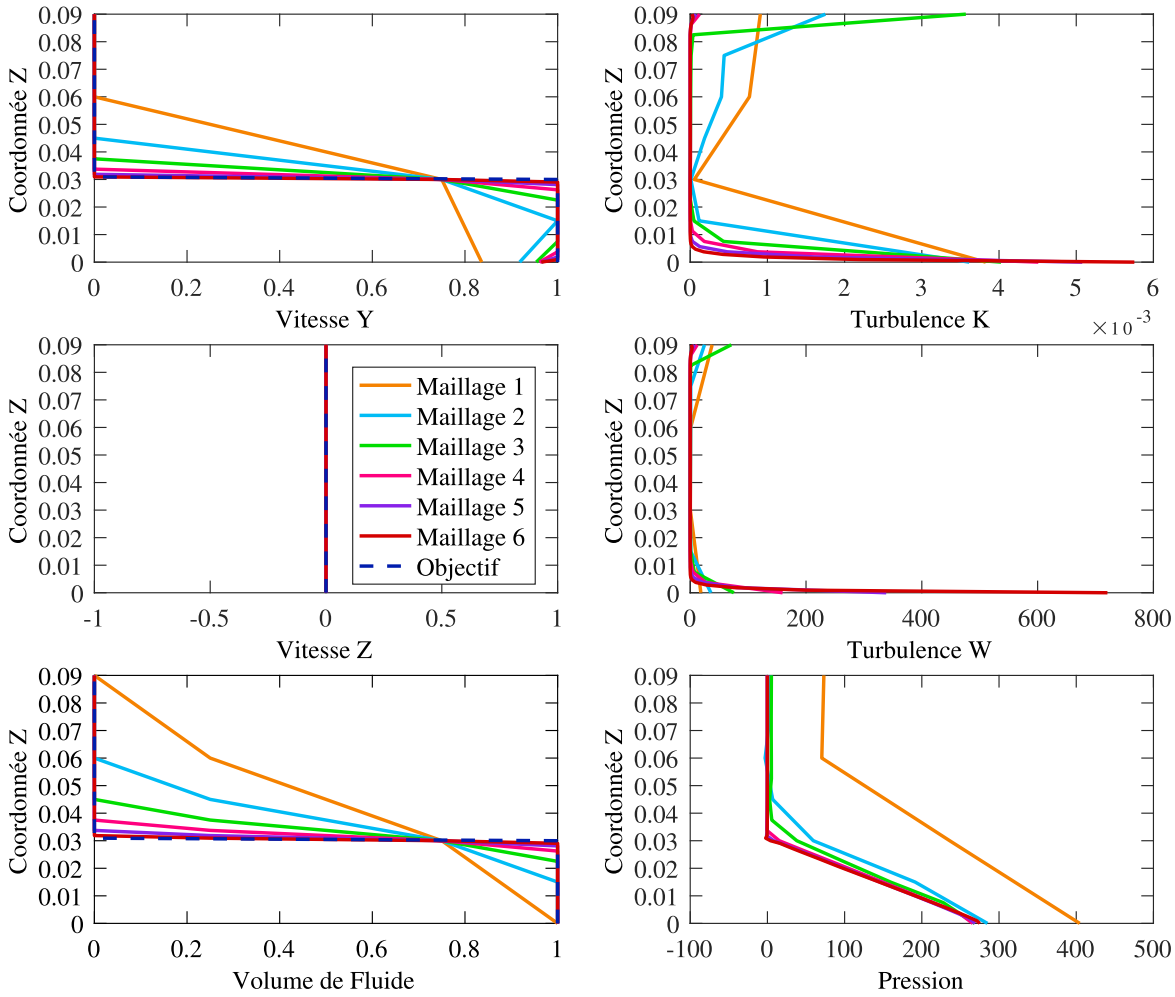


FIGURE 3.40 Comparaison des variables d'entrée et les valeurs considérées par la formulation FCBI-C, maillages 1a à 6a

Dans la Figure 3.40, on observe bien l'effet du raffinement progressif du maillage. Les différents paramètres convergent vers l'objectif. Les maillages 1, 2, et 3 sont trop grossiers. Les maillages 4, 5 et 6 sont satisfaisants.

Par conséquent, la formulation FCBI-C peut-être utilisée pour introduire des variables d'entrée pour un maillage assez raffiné.

Pour valider la modélisation de la troncation, une étude préliminaire sur le modèle précédent tronqué est réalisée selon différents maillages :

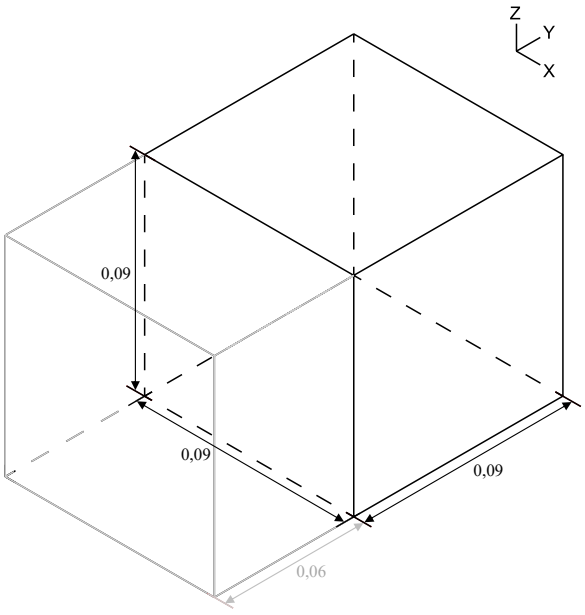
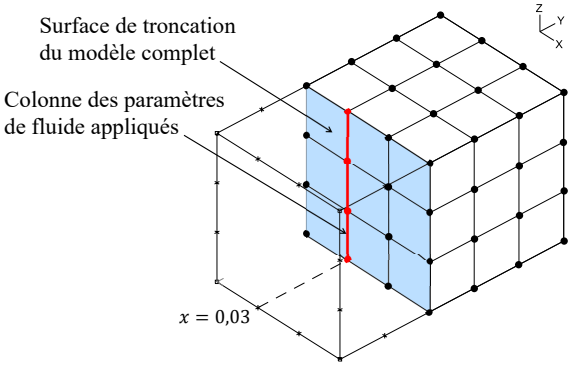
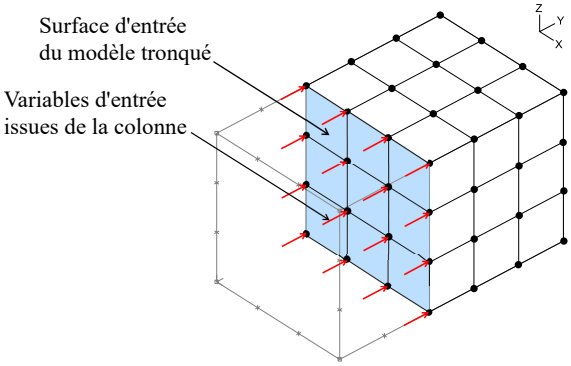


FIGURE 3.41 Dimensions du modèle 3D tronqué en (m)

La Figure 3.41 montre la définition du modèle tronqué. La différence avec la Figure 3.35 est le volume coupé, montré en gris, de $y = 0$ à $y = 0.06$.



(a) Définition des paramètres appliqués provenant du modèle complet, maillage 1a



(b) Application des variables de fluide sur le modèle tronqué, maillage 1a

FIGURE 3.42 Procédure de transfert des paramètres du modèle 3D complet vers le modèle tronqué pour le maillage 1a

En vu de l'effet 3D négligeable, il a été décidé d'appliquer les paramètres d'entrée issus de la colonne $x = 0.03$ de la surface de troncation du modèle complet, illustré dans la Figure 3.42.

Ainsi, les variables d'état de la colonne sont appliquées à toutes les colonnes du modèle tronqué (pour le maillage 1a, les colonnes sont $x = 0$, $x = 0.03$, $x = 0.06$, $x = 0.09$)

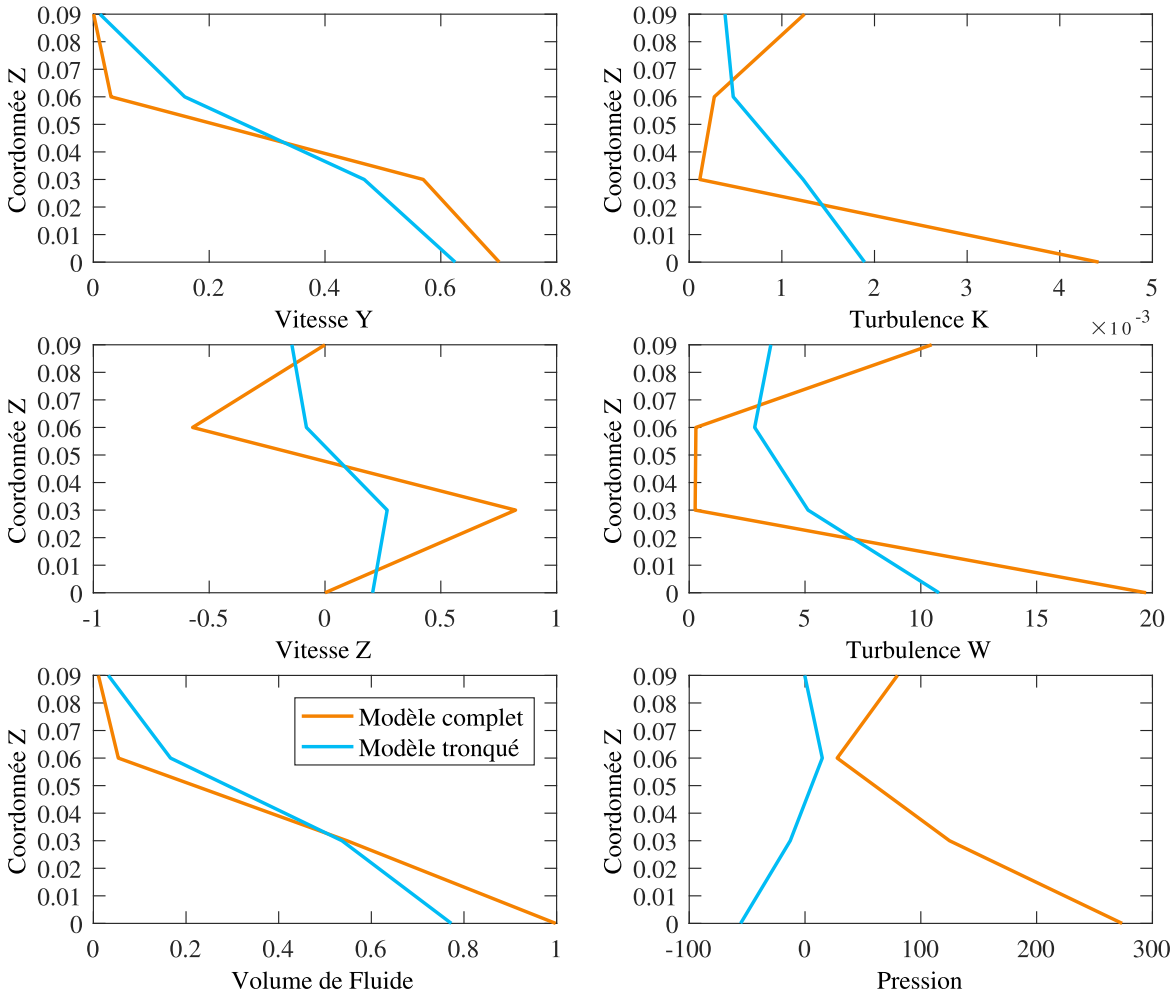


FIGURE 3.43 Comparaison des variables d'entrée et les valeurs considérées par la formulation FCBI-C à la surface de troncation à $x = 0.03$, maillage 1a

Tout comme dans la Figure 3.38, on remarque que pour le maillage grossier 1, il y a une différence entre les variables d'entrées et les paramètres considérés dans le modèle tronqué.

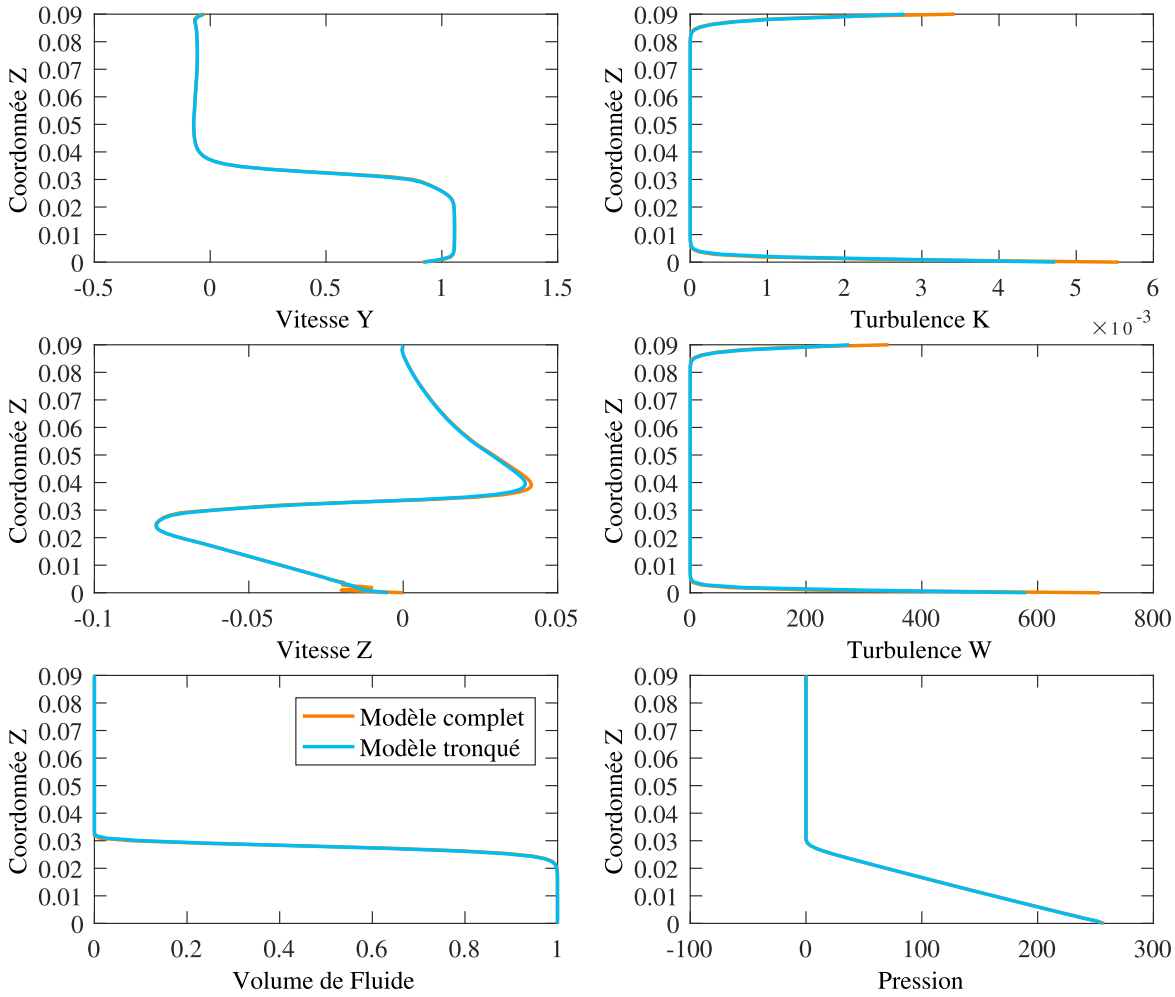


FIGURE 3.44 Comparaison des variables d'entrée et les valeurs considérées par la formulation FCBI-C à la surface de troncation à $x = 0.03$, maillage 6a

Pour le maillage très raffiné 6a, il y a une correspondance parfaite de tous les paramètres de fluide.

Ainsi, pour un maillage assez raffiné, appliquer les variables d'entrée issues du modèle complet sur le modèle tronqué est une méthode adéquate pour réduire la taille du modèle et par conséquent le coût de calculs

3.4.2 Développement de modèles tronqués d'un cas expérimental

Des modèles tronqués de l'expérience de Koshizuka et al. (1995) [24] ont été développés. Deux troncations sont étudiées : une située à 0.1752 m et l'autre à 0.2433 m, plus proche de la structure.

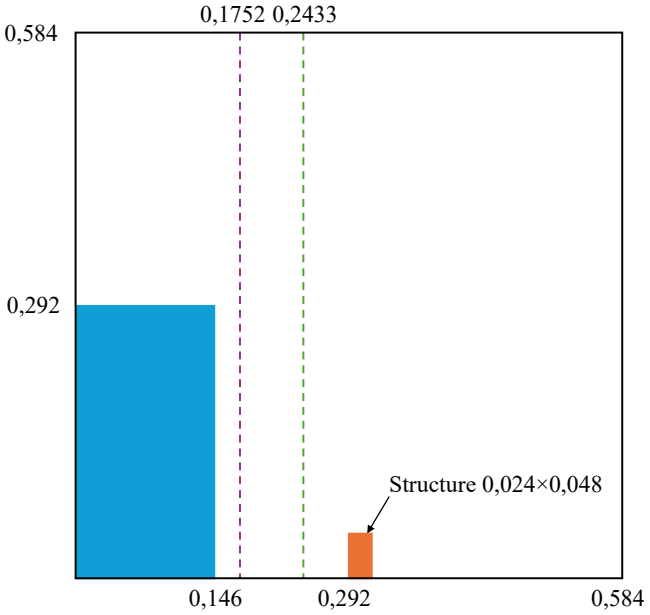
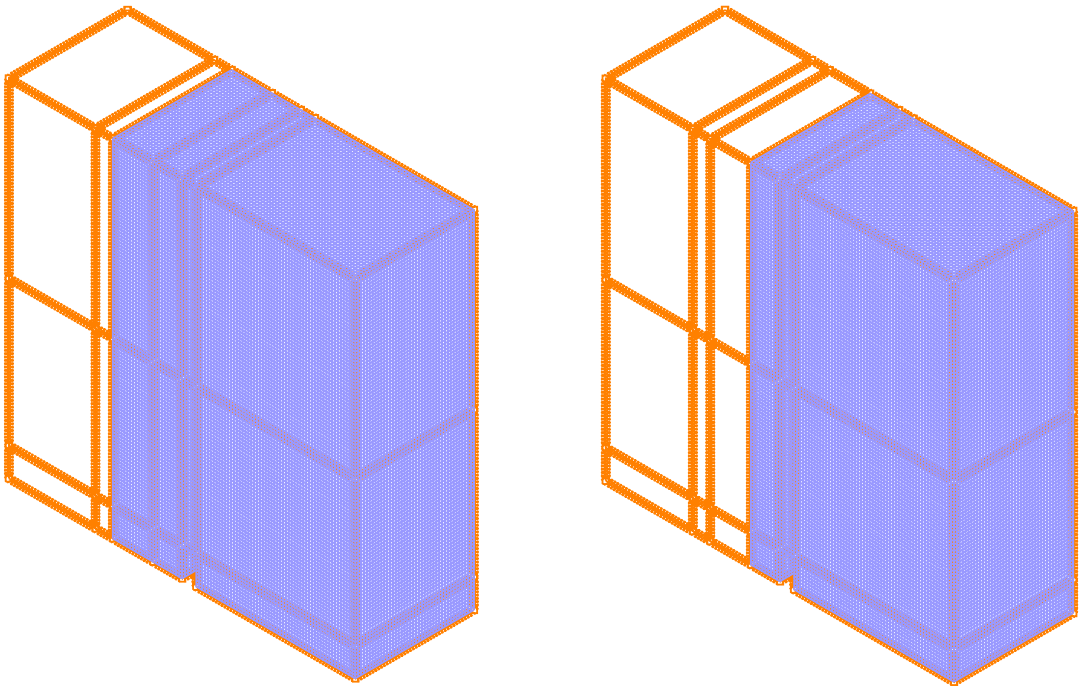


FIGURE 3.45 Emplacement des lignes de troncations (m)

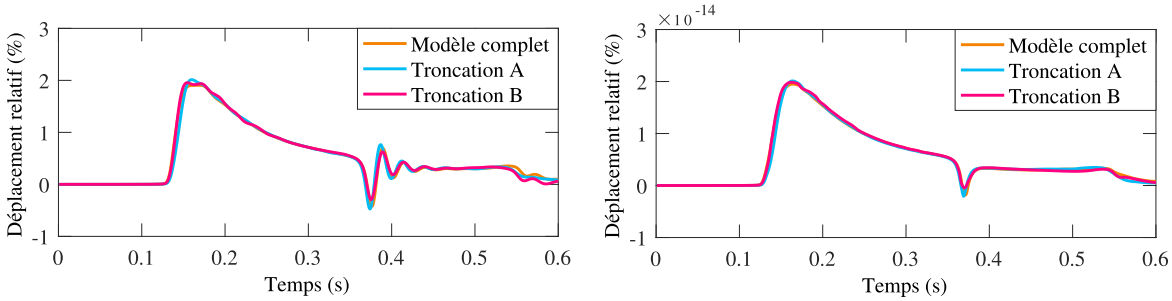


(a) Modèle tronqué A

(b) Modèle tronqué B

FIGURE 3.46 Définition des troncations du modèle issu du cas expérimental

On applique les données de vitesses, volume de fluide, turbulences issus du modèle complet sur les modèles tronqués. Ils correspondent à ceux de la colonne du milieu.



(a) Structure flexible

(b) Structure rigide

FIGURE 3.47 Comparaison du déplacement relatif au milieu du sommet des modèles complet, troncation A et troncation B

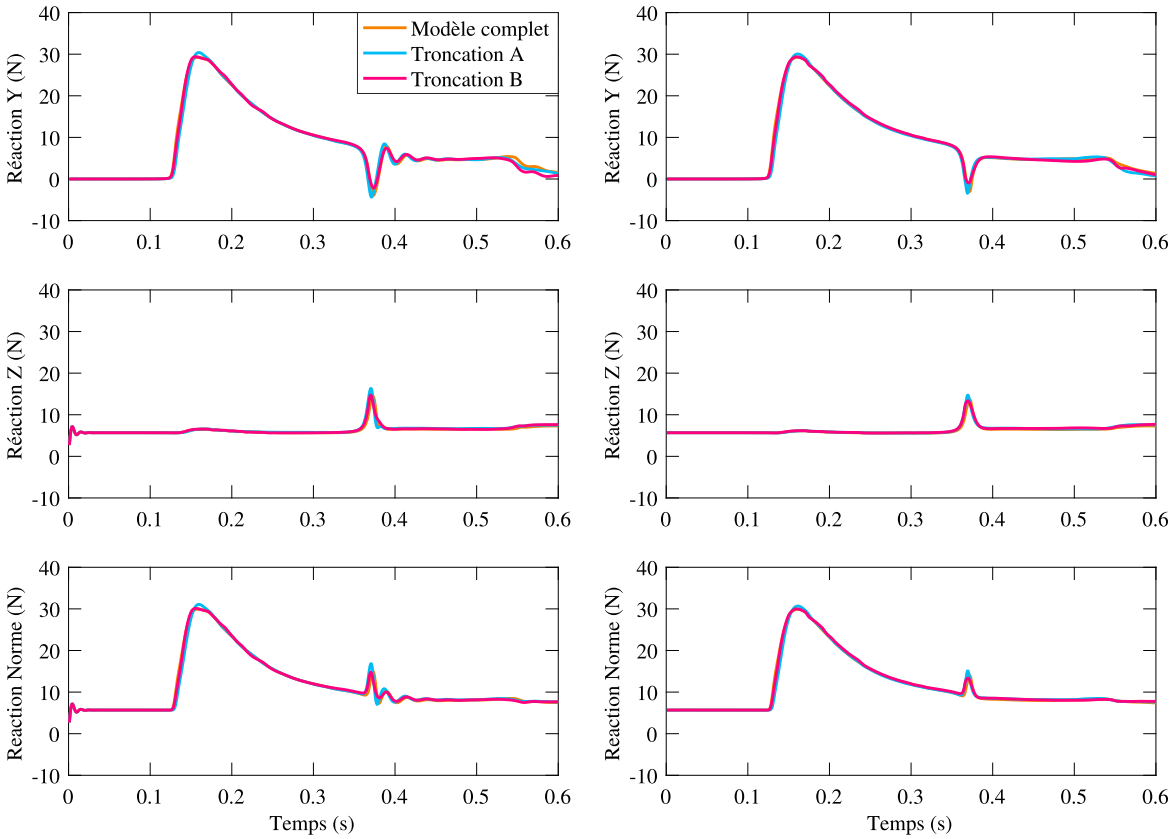
Dans la Figure 3.47, les réactions des trois modèles sont similaires : le pic de réaction est identique pour les cas flexible et rigide.

En comparant le déplacement relatif (Figure 3.47) et la réaction (Figure 3.48) en fonction du temps des modèles complet et tronqués, ils sont similaires pour les cas flexible et rigide. Les valeurs maximales, situées au pic autour de 0.15 seconde sont identiques. Par conséquent, les modèles tronqués fournissent des résultats adéquats.

Les temps de simulation des modèles se trouvent dans le Tableau 3.11. Ainsi, la troncation permet de réduire le temps de simulation. Plus la ligne de troncation est proche de la structure, moins le temps de simulation est long. La troncation A permet d'obtenir un gain de temps de 27,3 %, et la troncation B un gain de temps de 37,6 %.

Modèle	**Temps de simulation**
Complet	49 h 23 min 8 sec
Troncation A	35 h 53 min 37 sec
Troncation B	30 h 49 min 32 sec

TABLEAU 3.11 Temps de simulation des différents modèles complet et tronqués



(a) Structure flexible

(b) Structure rigide

FIGURE 3.48 Comparaison de la réaction à la base des modèles complet, troncation A et troncation B

CHAPITRE 4 DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES AVEC HYDRODYNAMIQUE DES PARTICULES LISSÉES ET COMPARAISON AVEC LE MODÈLE ÉLÉMENTS FINIS

4.1 Introduction

Ce chapitre vise à développer et comparer deux modélisations : celle d'éléments finis sur ADINA et par hydrodynamique des particules lissées sur LS-DYNA.

4.2 Description des modèles

Les modèles développés en EF et MFN sont similaires à ceux décrits dans le chapitre 4.

L'eau est modélisée en HPL. La théorie d'approximation des particules suit la formulation améliorée (*enhanced fluid formulation*). La pression est calculée à l'aide de l'approche de l'HPL faiblement compressible, couramment utilisé pour simuler les fluides incompressibles. Dans le logiciel LS-DYNA, les équations suivantes ont été utilisées [51]. L'équation d'état de Murnaghan est utilisée pour modéliser un fluide quasi-incompressible en HPL. Elle est définie comme suit [52] :

$$p = k_0 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\gamma} - 1 \right] \tag{4.1}$$

où ρ_0 est la masse volumique du fluide au repos, ρ la masse volumique du fluide, γ et k_0 des constantes de l'équation d'état. Pour modéliser avec précision les écoulements de fluide, γ vaut habituellement 7, et k_0 est souvent choisi tel que :

$$c_0 = \sqrt{\frac{\gamma k_0}{\rho_0}} \geq 10 v_{max} \tag{4.2}$$

Les conditions limites sont des murs (*rigid wall*) avec une friction importante, semblable à la condition *no slip* des murs sur ADINA.

Dans la modélisation 2D, l'élément choisi est un élément coque (*shell*) avec déformations planes (*plane strain*) avec intégration complète par quadrature de Gauss d'ordre 2×2. Pour la structure, le matériau est rigide. La glace rigide est un matériau rigide. La glace flexible est un matériau linéaire élastique, avec les mêmes propriétés que le matériau dans le modèle MFN.

4.3 La statique en mécanique des fluides numériques et l'hydrodynamique des particules lissées

4.3.1 La statique en éléments finis

Comme étude préliminaire, on vérifie la pression le long de la structure rigide pour le cas statique barrage 2/3. L'influence de la longueur du lit d'eau en amont de la structure est également étudiée.

On vérifie la pression à la base de la structure. La formule hydrostatique est donnée par :

$$p_{hydro} = \rho_{eau} g h \tag{4.3}$$

avec ρ la masse volumique de l'eau, g la gravité, et h la hauteur d'eau.

En remplaçant par les valeurs :

$$p_{hydro} = 1000 \times 9.81 \times 0.032 = 313.92 \text{ Pa}$$

On prend également en compte la pression p_0 que l'air exerce :

$$p_0 = \rho_{air} g h \tag{4.4}$$

En remplaçant par les valeurs :

$$p_0 = 1 \times 9.81 \times (0.584 - 0.032) = 5.42 \text{ Pa}$$

Donc

$$p_{tot} = p_0 + p_{hydro} = 313.92 + 5.42 = 319.34 \text{ Pa}$$

La réaction en Z devrait être le poids de la structure. Le poids est calculé avec la masse volumique de la structure, son volume, et la constante g.

$$P = \rho_{structure} \times V_{structure} \times g \tag{4.5}$$

En remplaçant par les valeurs :

$$P = 2500 \times 0.024 \times 0.048 \times 1 \times 9.81 = 28.25N$$

La définition des tailles de maillages 5 à 7 est détaillée ci-dessous.

TABLEAU 4.1 Maillages étudiés

N° de maillage	**Taille d'une maille en m**
5	$0.146/30 = 4.87 \times 10^{-3}$
6	$0.146/60 = 2.43 \times 10^{-3}$
7	$0.146/90 = 1.62 \times 10^{-3}$

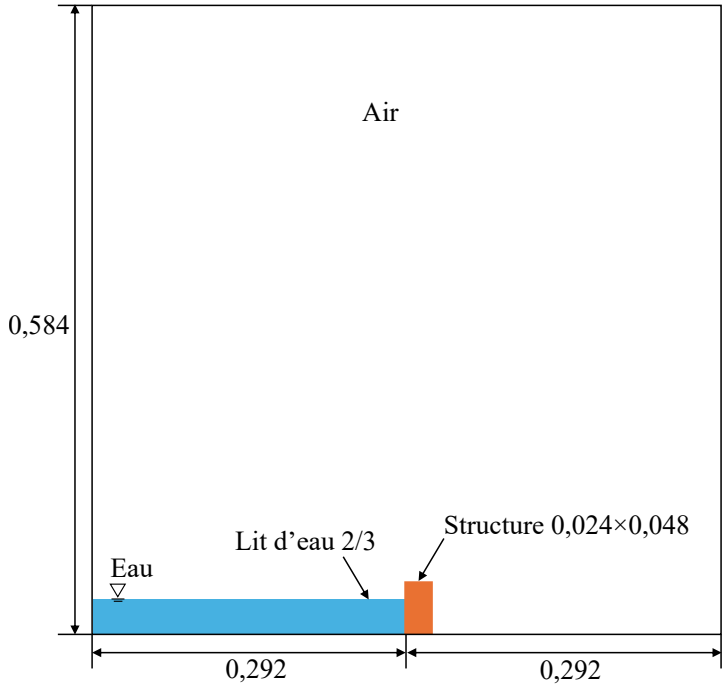


FIGURE 4.1 Cas statique avec lit d'eau au niveau 2/3 en configuration barrage

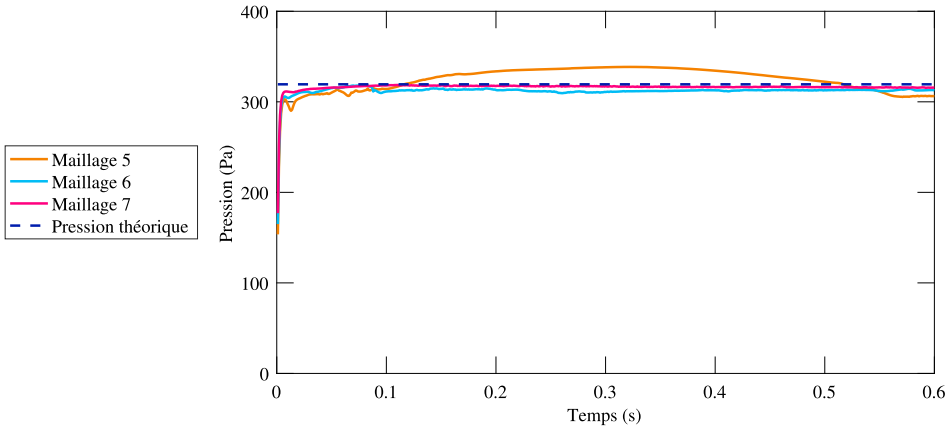


FIGURE 4.2 Pression à la base de la structure selon plusieurs maillages

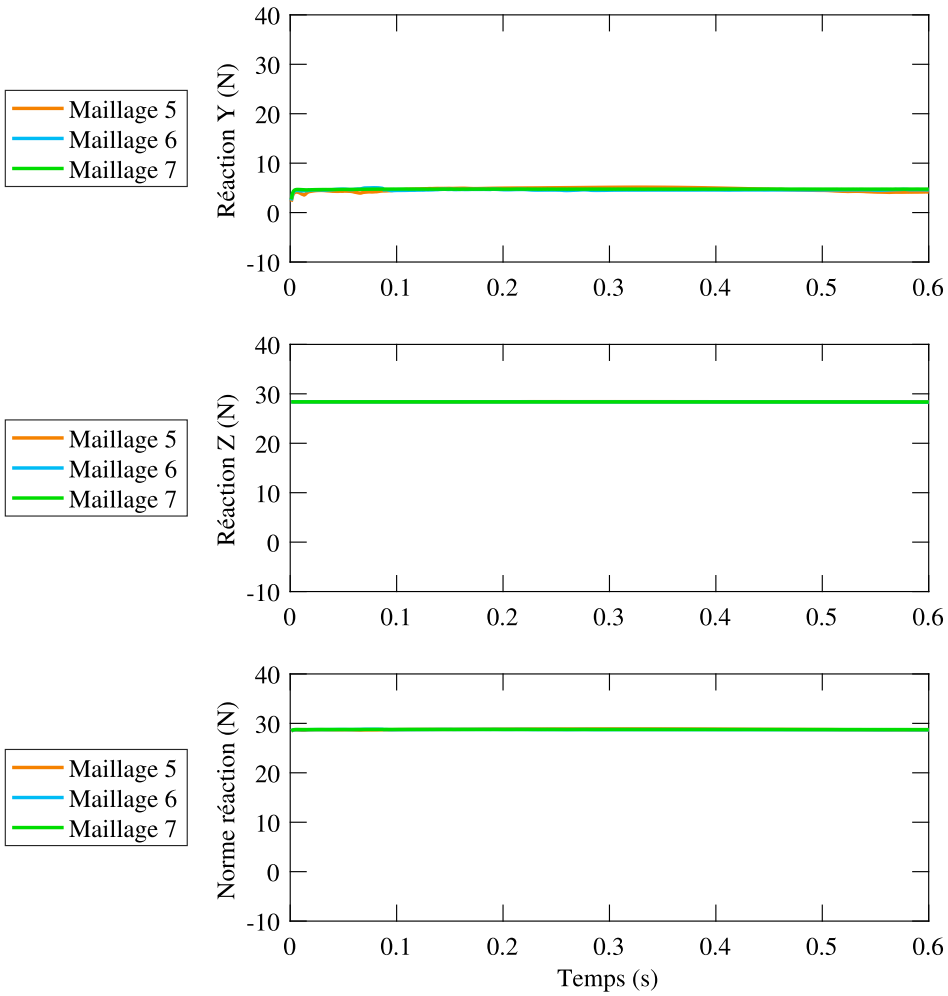


FIGURE 4.3 Réaction à la base de la structure selon plusieurs maillages

La réaction à la base est identique pour les trois maillages. On vérifie bien la valeur du poids dans la réaction en Z, illustré dans la Figure 4.3. Dans la Figure 4.2 fluctuations de la pression sont dues aux mouvements de l'eau. Bien que la configuration soit un lit d'eau statique, le niveau d'eau fluctue. Cet effet disparaît lorsque le maillage se raffine. Ainsi, la pression à la base des modèles avec les maillages 6 et 7 n'ont pas ce problème.

En ce qui concerne la réaction, tous les maillages donnent le même résultat.

4.3.2 La statique en hydrodynamique des particules lissées

On vérifie la pression hydrostatique à la base de la structure pour plusieurs espacements de particules h_0 : 0.003 m ; 0.002 m ; 0.001 m ; 0.0005 m.

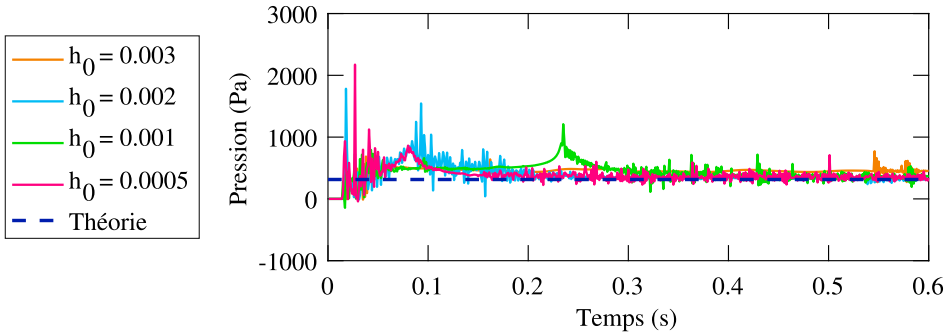


FIGURE 4.4 Pression à la base de la structure pour différents espacements h_0

La Figure 4.4 représente la pression à la base de la structure selon différents espacements de particules d'eau. Il y a une instabilité au début du modèle car la gravité est appliquée progressivement sur 0.05 seconde. Pour $h_0 = 0.003$, la pression paraît stable, mais la valeur est bien supérieure à la pression théorique. Un espacement trop grossier ne convient pas pour représenter de manière adéquate la pression hydrostatique. Pour $h_0 = 0.002$, il y a deux pics de pression : le premier à 0.2 s vaut 1900 Pa et le deuxième à 0.09 s vaut 1500 Pa. Pour $h_0 = 0.001$, un pic se trouve à 0.22 s pour 1200 Pa. Pour $h_0 = 0.0005$, la pression oscille énormément entre 0 et 0.1 s pour ensuite se stabiliser vers la pression théorique. Toutes les pressions convergent vers la pression théorique après 0.3 s seconde. Les oscillations sont dues à la nature de l'HPL.

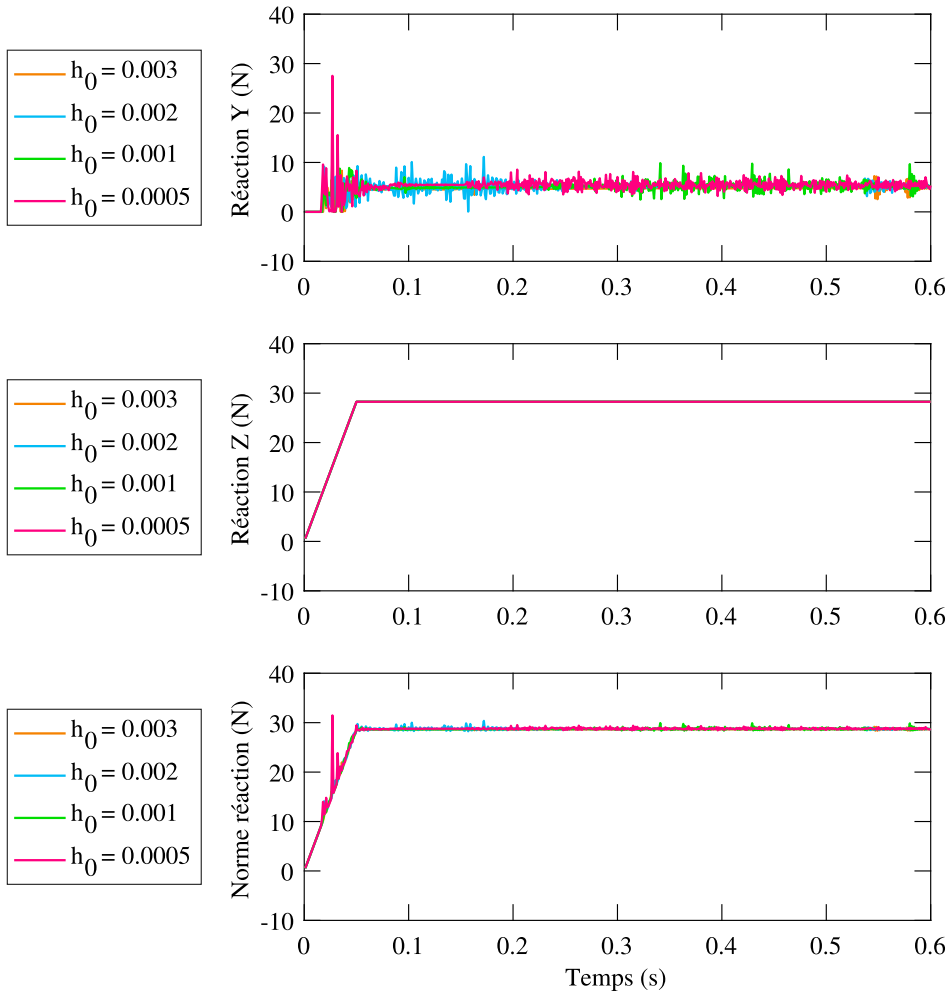


FIGURE 4.5 Réaction à la base de la structure pour différents espacements h_0

Dans la Figure 4.5 représentant la réaction à la base selon différents espacements de particules, la rampe entre 0 et 0.05 s est due à la définition de la gravité, appliquée progressivement pendant cet intervalle de temps. Les valeurs des réactions des modèles MFN et HPL sont très proches.

4.3.3 Influence d'un couvert de glace en mécanique des fluides numériques en statique

Cette partie a pour but d'étudier l'influence de la glace dans le cas statique.

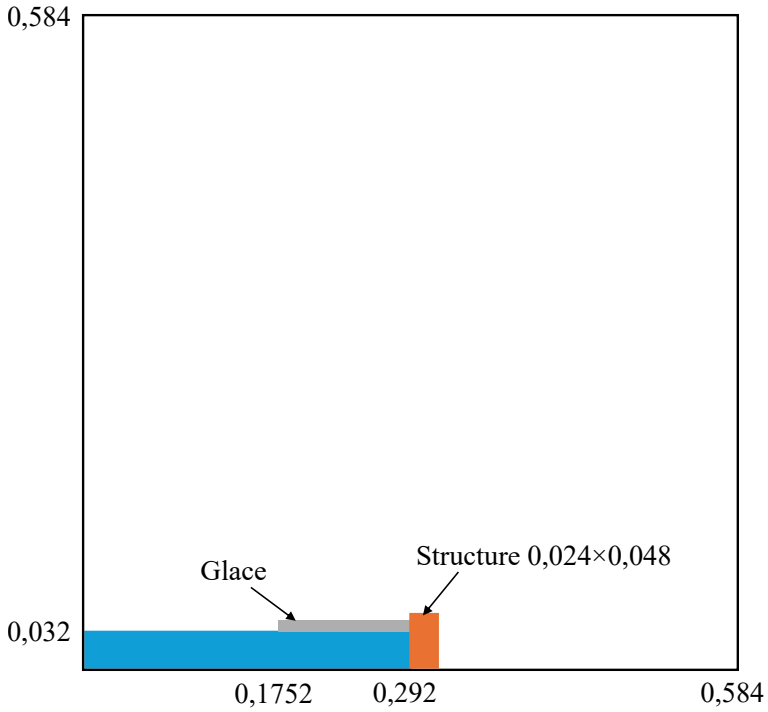


FIGURE 4.6 Cas avec un couvert de glace

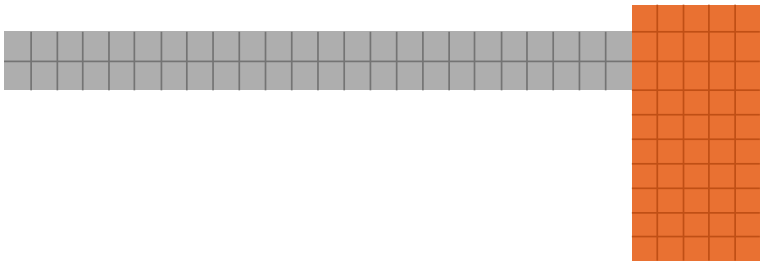
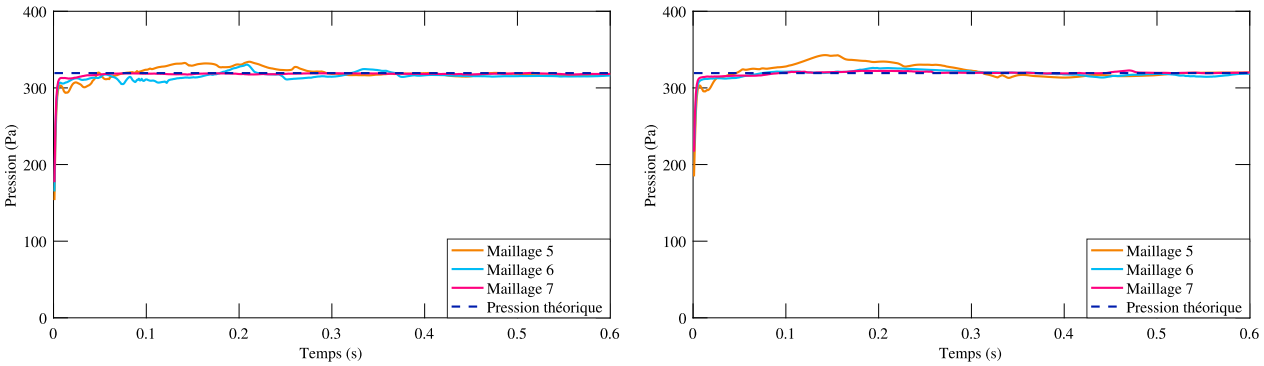


FIGURE 4.7 Maillage de la structure avec couvert de glace pour un maillage 5

Le couvert de glace continu est solidaire à la structure, qui est rigide. Il s'agit d'une hypothèse conservatrice, considérant le cas du confinement parfait où l'eau sous le couvert s'écoule sous pression.

Le couvert de glace a une épaisseur de 0.0107 m et une longueur de 0.1168 m . La glace est modélisée par un matériau linéaire élastique avec les propriétés suivantes : le module d'Young E vaut 9.5 GPa, la masse volumique ρ vaut 910 $\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^{-3}$, le coefficient de poisson ν vaut 0.3. On étudie également un glace rigide, avec un module d'Young de $1 \times 10^{20} Pa$.

Etude de convergence en statique selon la flexibilité de la glace

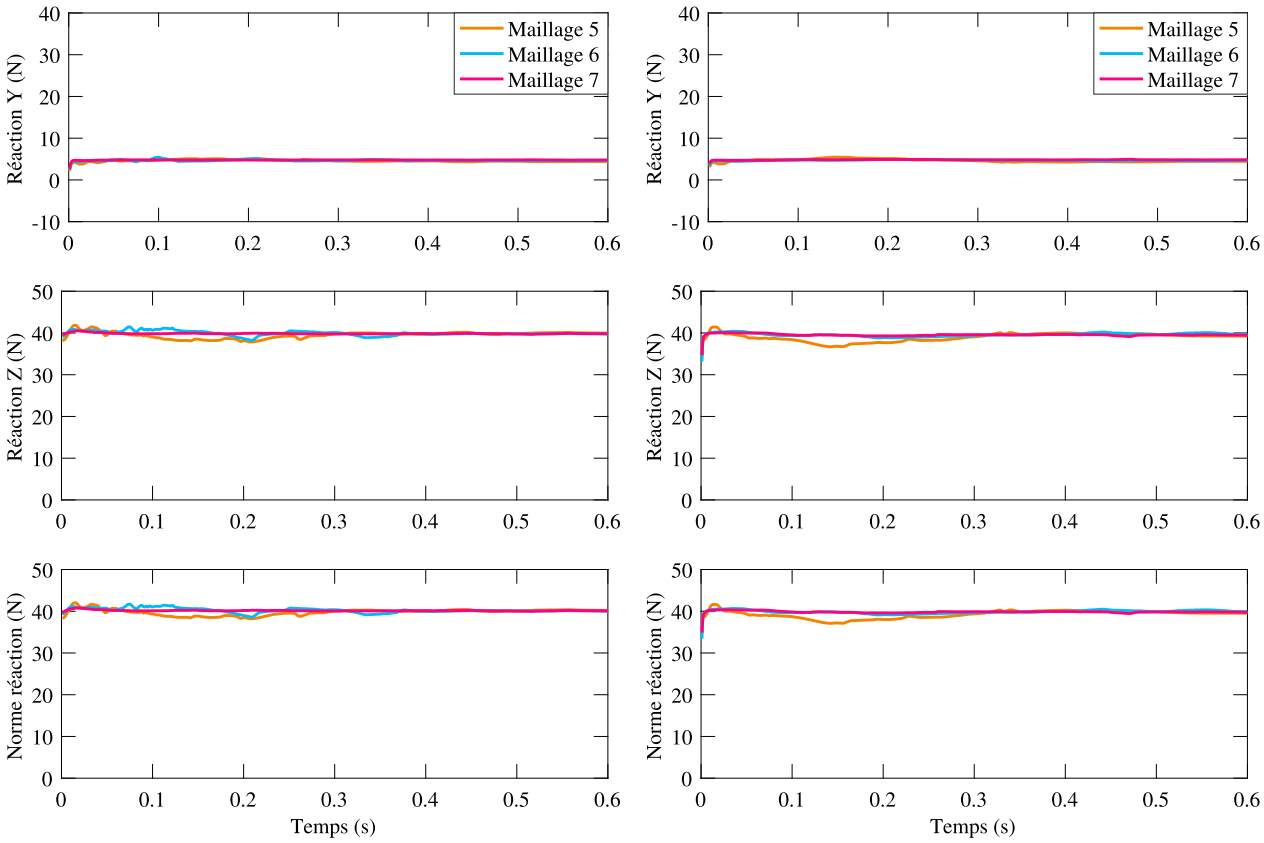


(a) Glace rigide

(b) Glace flexible

FIGURE 4.8 Comparaison de la pression à la base de la structure selon plusieurs maillages

Les Figures 4.8a et 4.8b représentent respectivement la pression à la base de la structure selon différents maillages pour un couvert de glace flexible et rigide. Pour les maillages 5, 6 et 7, toutes les pressions convergent vers la pression théorique à partir de 0.4 seconde. Plus le maillage est grossier, plus la pression à la base. Pour le maillage 5, la pression atteint un maximum à 0.15 seconde pour les cas flexible et rigide. Mais toutes les pressions sont très proches de la valeur théorique.



(a) Glace rigide

(b) Glace flexible

FIGURE 4.9 Comparaison de la réaction à la base de la structure selon plusieurs maillages

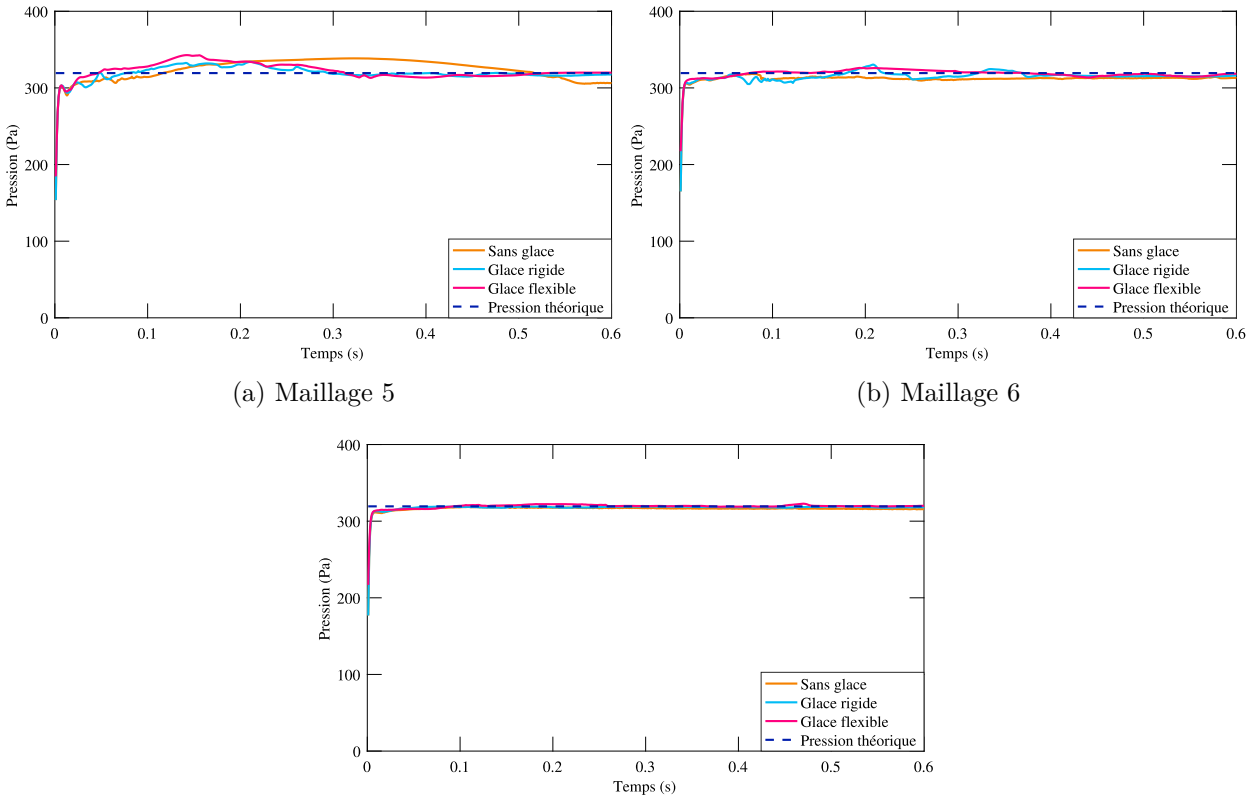
La réaction fluctue pour le maillage 5 pour les glaces rigide (Figure 4.9a) et flexible (Figure 4.9b). L'effet est d'autant exacerbé dans le cas flexible. Ce phénomène disparaît lorsque le maillage se raffine. Ainsi, il n'y est plus pour les maillages 6 et 7.

Impact de la présence d'un couvert de glace selon sa flexibilité

La présence d'un couvert de glace, qui peut-être flexible ou rigide, a une influence sur la réponse structurelle. La pression à la base, la réaction à la base, sont comparées pour les cas suivants : sans couvert de glace, avec couvert de glace rigide, et avec couvert de glace flexible.

D'après la Figure 4.10, l'effet de la glace sur la pression s'estompe lorsque le maillage se raffine. Ainsi, au maillage 7, il n'y a plus de différence entre les pressions. La présence du couvert de glace n'a pas d'influence sur la pression statique.

On retrouve cette même tendance sur le graphe des triangles de pression de la Figure 4.11. Pour tous les maillages, les pressions sont proches de la pression théorique. Il y a tout de



(a) Maillage 5

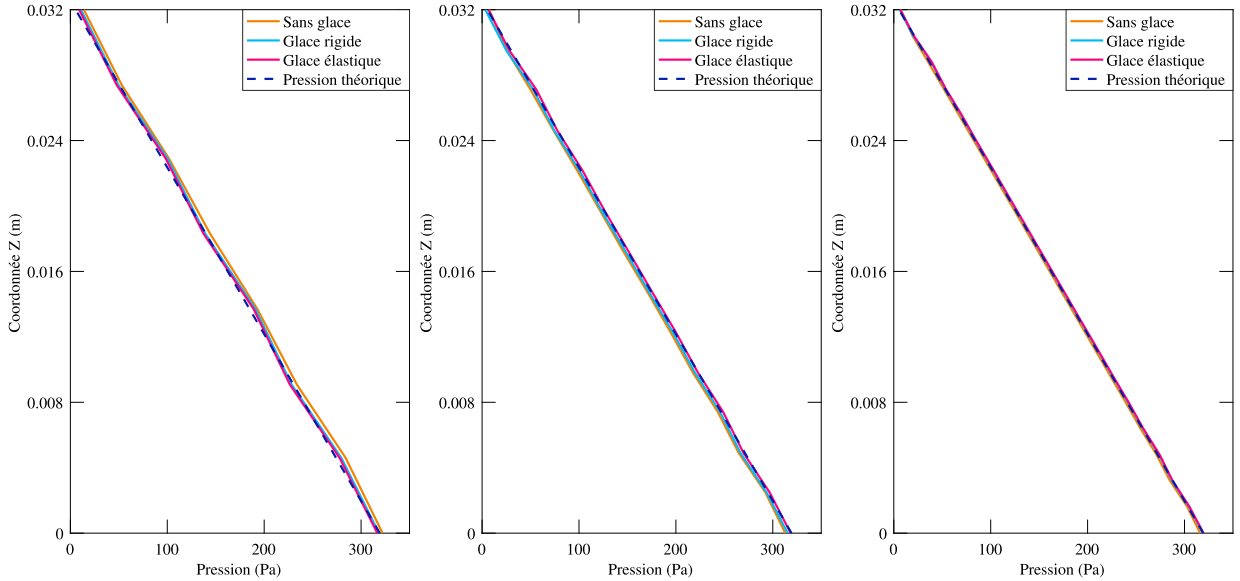
(b) Maillage 6

(c) Maillage 7

FIGURE 4.10 Comparaison de la pression à la base de la structure sans glace, avec glace rigide, flexible, selon plusieurs maillages

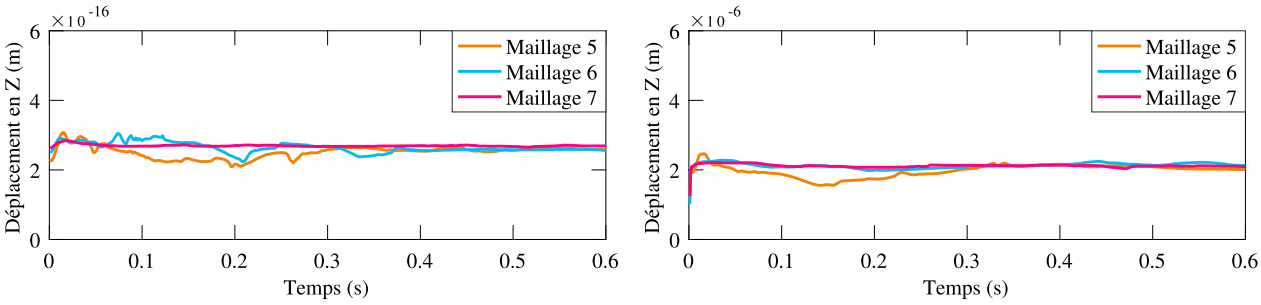
même un phénomène de convergence.

Lorsque l'on raffine le maillage, le triangle de pression de tous les modèles converge vers la pression théorique.



(a) Maillage 5 (b) Maillage 6 (c) Maillage 7

FIGURE 4.11 Triangle de pression le long de la structure avec glace rigide, flexible, et sans glace, à 0.5s



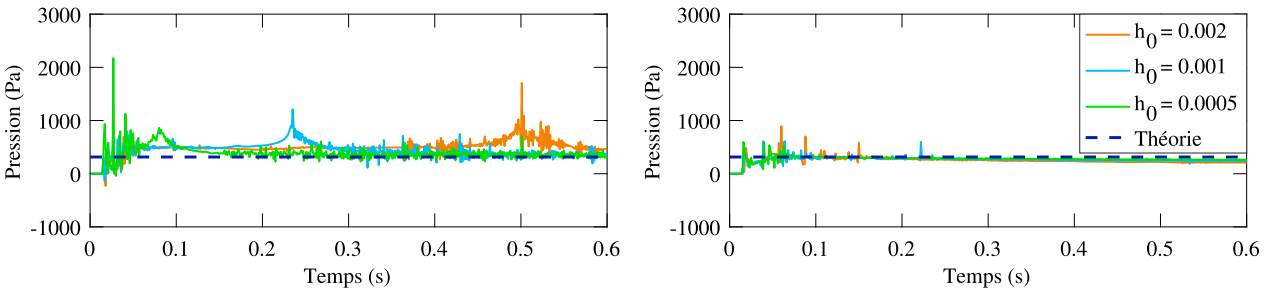
(a) Glace rigide (b) Glace flexible

FIGURE 4.12 Comparaison du déplacement du couvert de glace selon Z selon plusieurs maillages

La Figure 4.12 présente le déplacement à l'extrémité du couvert de glace. Pour les cas de glace rigide et flexible, les déplacements convergent vers la même valeur. Cependant, dans le modèle avec le maillage 5, il converge à partir de 0.3 s.

4.3.4 Influence d'un couvert de glace en hydrodynamique des particules lissées en statique

On étudie l'influence du maillage de la structure, défini dans le Tableau 4.1. En plus du maillage, on étudie également l'influence de l'espacement initial des particules h_0, qui valent respectivement 0.003,0.002, 0.001, 0.0005 m. De la même manière que pour les modèles en MFN, les maillages de la structure étudiés dans cette partie sont les mêmes : maillage 5, 6, et 7. Les espacements initiaux des particules d'HPL associés sont respectivement 0.002, 0.001, et 0.0005 m.

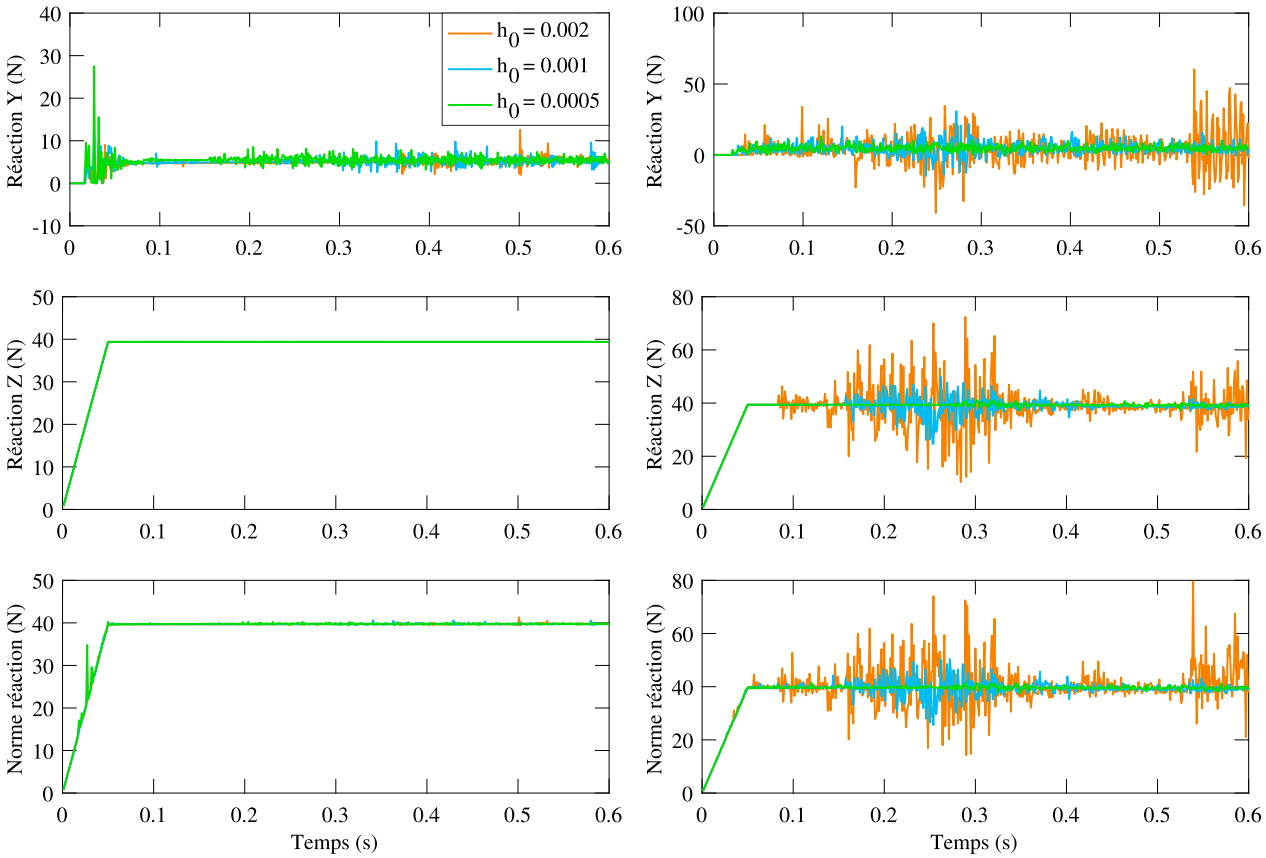


(a) Glace rigide

(b) Glace flexible

FIGURE 4.13 Comparaison de la pression à la base de la structure selon plusieurs maillages

Dans la Figure **??**, la pression sous la glace flexible est beaucoup plus stable que celle sous la glace rigide. Il y a moins de fluctuations et de pics de pression. Pour la glace rigide, plus h_0 est petit, plus le pic de pression arrive tard. Ainsi, pour $h_0 = 0.002$, il arrive à 0.5 s, pour $h_0 = 0.001$, il est à 0.25 s et pour h_0 il est à 0.05 s.



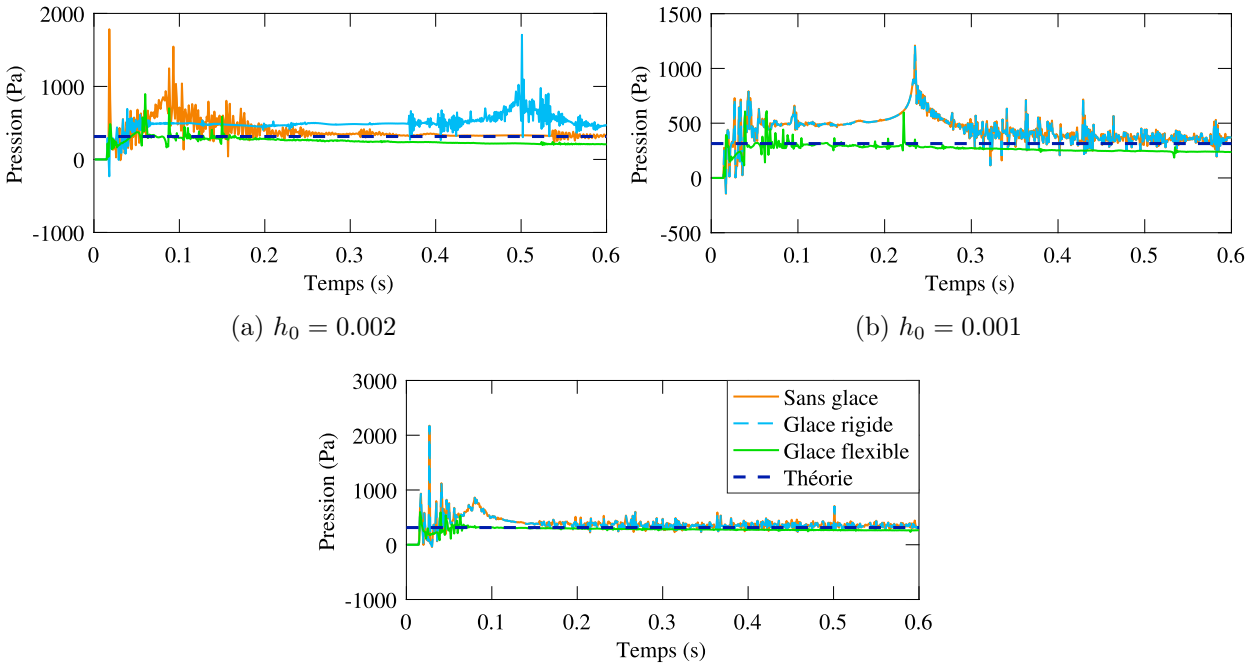
(a) Glace rigide

(b) Glace flexible

FIGURE 4.14 Comparaison de la réaction à la base de la structure selon plusieurs maillages

Concernant la réaction, la Figure 4.20 montre que la réaction avec glace flexible est beaucoup plus instable qu'avec la glace rigide. De plus, les fluctuations sont d'autant plus grandes que le maillage est grossier. Avec un espacement de particules très raffiné, $h_0 = 0.0005$, la réaction est assez stable.

Dans la Figure 4.15 la pression à la base de la structure fluctue en fonction de l'espacement initial des particules. A partir de $h_0 = 0.001$, les pressions des modèles sans glace et avec glace rigide deviennent identiques. Cela s'explique par le fait que la glace rigide soit complètement fixe, et donc n'a pas d'influence sur les particules d'eau qui se trouvent en dessous. Lorsque le nombre de particules augmente, la pression devient plus stable. Ainsi pour l'espacement le plus grossier, on retrouve deux pics de pression. Pour $h_0 = 0.001$, il n'y a plus qu'un seul pic pour les modèles sans glace et avec glace rigide, vers 0.25s. Enfin, pour $h_0 = 0.0005$, le pic se retrouve au début du modèle, correspondant à l'application progressive de la gravité. Donc pour avoir une pression satisfaisante dans un cas statique, il faut un espacement de particules assez petit.



(a) $h_0 = 0.002$ (b) $h_0 = 0.001$

(c) $h_0 = 0.0005$

FIGURE 4.15 Comparaison de la pression à la base de la structure sans glace, avec glace rigide, flexible, selon plusieurs h_0

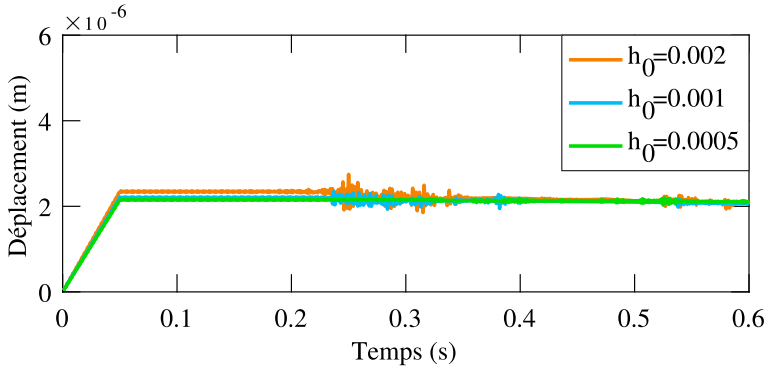
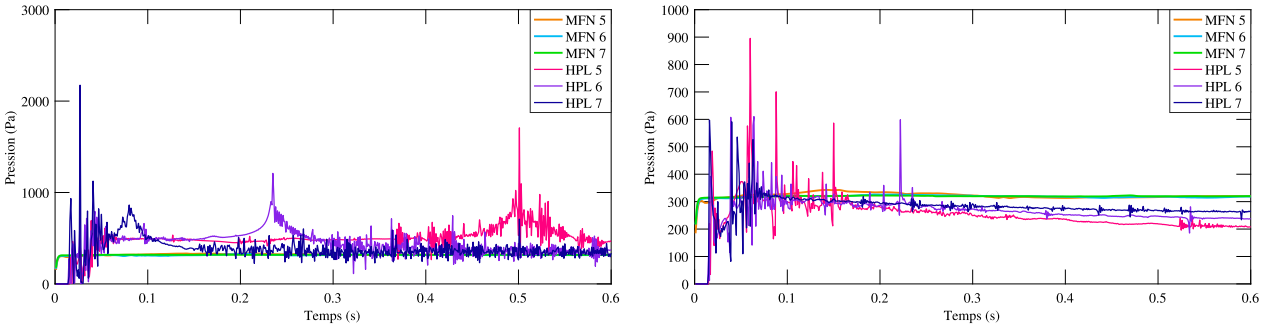


FIGURE 4.16 Déplacement à l'extrémité de la glace flexible selon plusieurs maillages

La Figure 4.16 représente le déplacement à l'extrémité inférieure de la glace selon plusieurs maillages et plusieurs espacements de particules. Ce déplacement converge dès le maillage le plus grossier.

Comparaison MFN et HPL

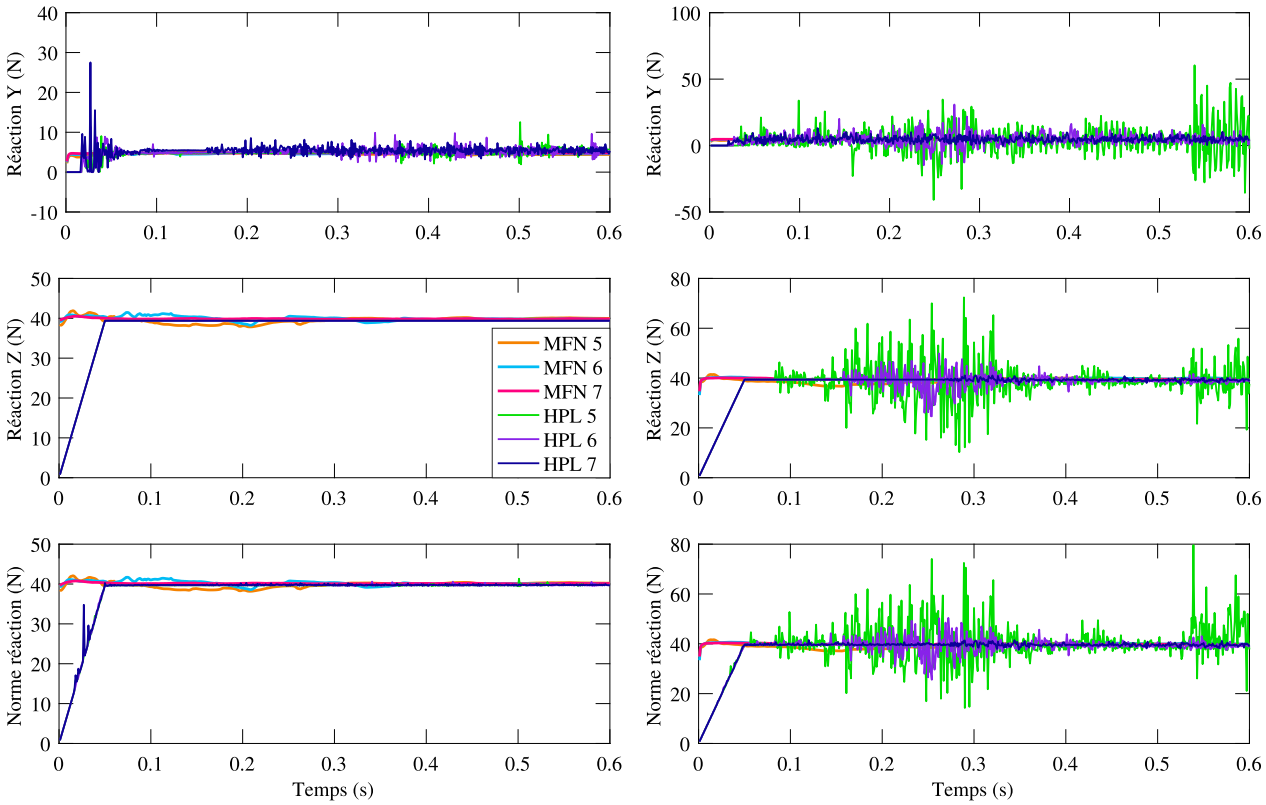


(a) Glace rigide

(b) Glace flexible

FIGURE 4.17 Comparaison de la pression à la base de la structure selon plusieurs maillages

La Figure 4.17 présente les pressions des modèles MFN et HPL superposées. En MFN, peu importe le maillage, la pression à la base est très stable. Ce n'est pas du tout le cas du modèle HPL, qui fluctue pour tous les cas de glace. On remarque également que la pression à la base de converge pas. Cela montre les limites du modèle concernant la pression.



(a) Glace rigide

(b) Glace flexible

FIGURE 4.18 Comparaison de la réaction à la base de la structure selon plusieurs maillages

La Figure 4.18 présente la réaction à la base de la structure pour les modèles MFN et HPL. Tout comme la pression, la réaction obtenue par la méthode particulaire est beaucoup plus instable, surtout avec une glace flexible linéaire élastique. Ainsi pour avoir une pression adéquate, il faut un espacement de particules très faible. Hormis le modèle MFN 5 et 6, les valeurs des réactions sont très proches.

D'après l'équation d'état de Murnaghan (équation 4.6), la pression p est directement liée à la variation de ρ la masse volumique du fluide. Puisque γ vaut 7, une légère variation de ρ entraîne une variation importante de p, ce qui explique les phénomènes d'instabilité observés dans les Figures 4.13, 4.15 et 4.17

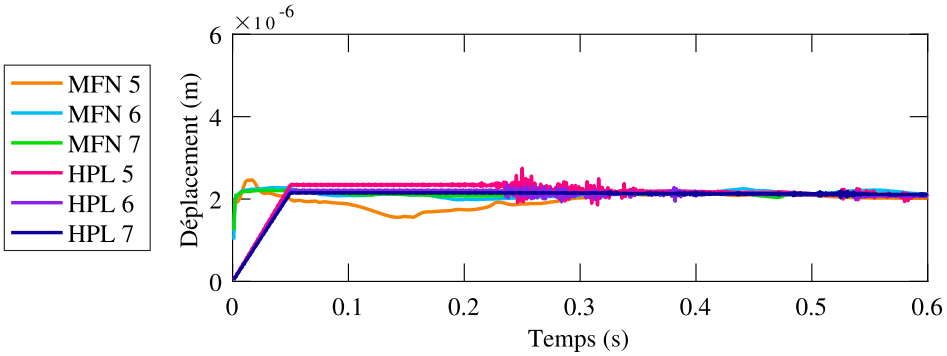


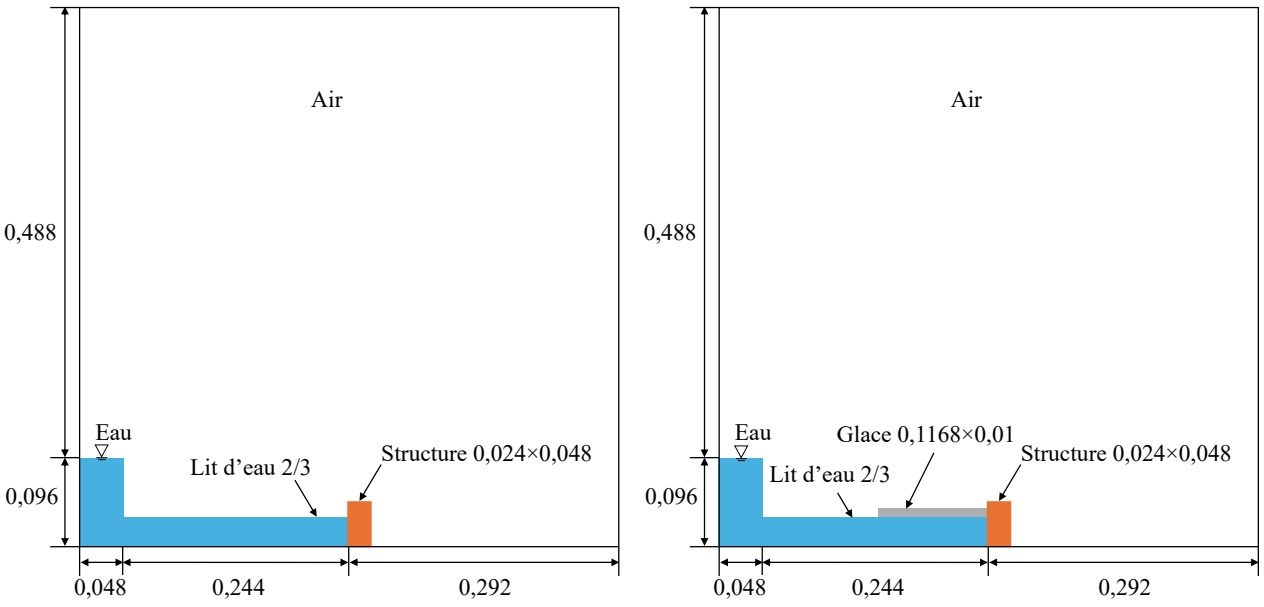
FIGURE 4.19 Comparaison du déplacement à l'extrémité inférieure du couvert de glace flexible pour plusieurs maillages

Dans la Figure 4.19 représentant le déplacement de l'extrémité inférieure du couvert de glace flexible, tous les déplacements convergent vers la même valeur finale, peu importe le maillage ou le modèle. Pour le maillage 5, en MFN il y a une diminution du déplacement vers 0.15 s qui n'est retrouvée nulle par ailleurs. Cela est du à la fluctuation de l'eau. En effet, la pression dans la Figure 4.10 augmente à ce moment, ce qui signifie que le niveau d'eau augmente légèrement. Il est alors normal que le déplacement de la glace diminue. Les modèle HPL ont tous une rampe dans le déplacement entre 0 et 0.05 s, ce qui n'est pas dans les modèles MFN. Cela est du à l'application de la gravité progressive. Le comportement en statique de l'eau des deux modèles, ainsi que l'interaction fluide structure sont similaires.

L'étude en statique a permis de valider numériquement les modèles et comprendre les limites de chacun. Une étude dynamique s'ensuit.

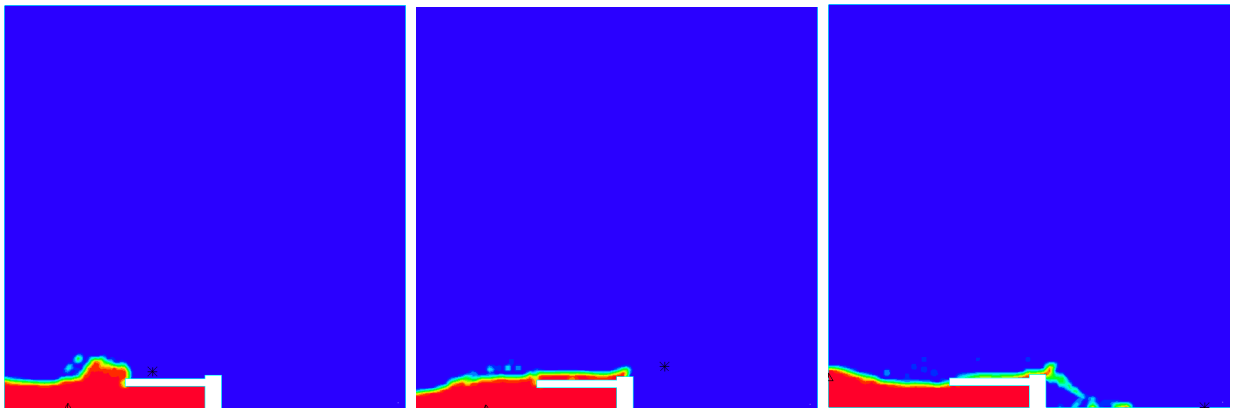
4.4 Avec une rupture de barrage

Avec la glace, la configuration initiale de rupture de barrage de Koshizuka et al. [24] est trop extrême. C'est pourquoi une modélisation avec les dimensions suivantes ont été retenues : 0.048×0.096 m



(a) Sans couvert de glace (b) Avec couvert de glace

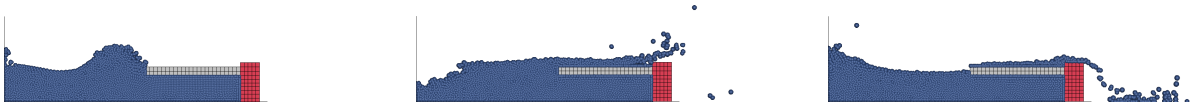
FIGURE 4.20 Dimensions de rupture de barrage modifiées (m)



(a) $t = 0.2s$ (b) $t = 0.4s$ (c) $t = 0.6s$

FIGURE 4.21 Ecoulement de l'eau en MFN sur plusieurs pas de temps

Les Figures 4.21 et 4.22 représentent respectivement l'écoulement selon plusieurs pas de temps pour les modèles en MFN et HPL. Pour $t = 0.2s$, la forme de la vague est semblable pour les deux modèles, et atteint le couvert de glace de la même manière. A $t = 0.4s$, l'eau recouvre entièrement la glace pour les deux modèles. En HPL, l'eau semble avoir une légère avance et une partie passe au dessus de la structure, alors qu'en MFN n'a pas encore dépassé la structure. Pour le dernier pas de temps $t = 0.6s$, le lit d'eau en amont a la même forme pour



(a) $t = 0.2s$ (b) $t = 0.4s$ (c) $t = 0.6s$

FIGURE 4.22 Ecoulement de l'eau en HPL sur plusieurs pas de temps

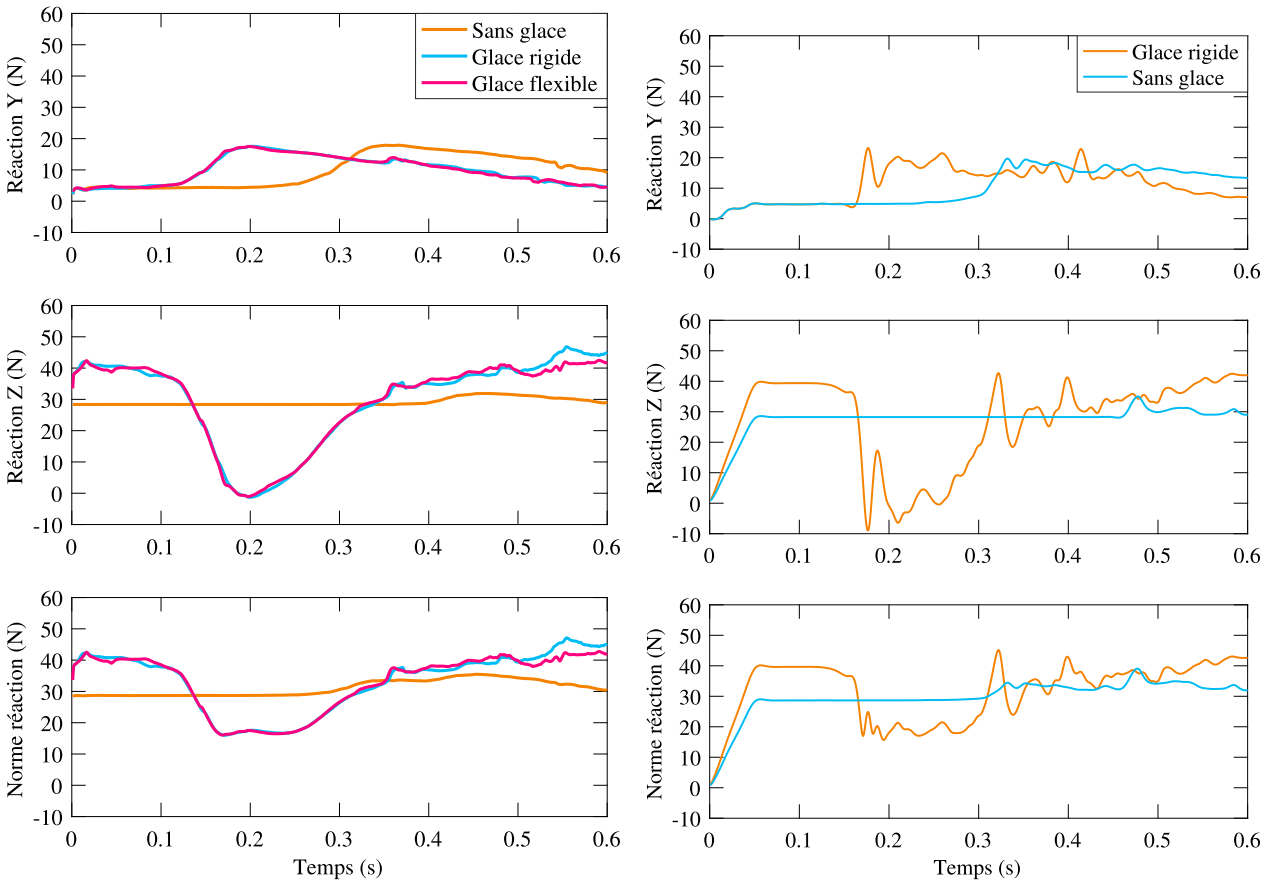
les deux modèles. L'eau a dépassé la structure et s'écoule en aval avec la même tendance. Ainsi, les deux modèles présentent des résultats similaires concernant la forme de l'écoulement d'une rupture de barrage.

La Figure 4.23 présente la réaction à la base de la structure suite à la rupture de barrage. Dans le modèle HPL Figure 4.23b, la réaction liée à la glace flexible n'est pas tracée, car, comme en statique, elle fluctuait de manière très importante. En la traçant, et à cause de l'échelle, les autres réactions n'auraient pas été visibles. Un phénomène similaire a été observé dans le cas statique, dans la Figure 4.18b. Cela met en lumière les limites du modèle particulaire en contact avec une structure flexible. De plus, un filtre a été appliqué aux réactions liées aux modèles sans glace et avec la glace rigide pour obtenir une forme adéquate. Ainsi, les réactions en MFN et HPL sont similaires en valeurs et en tendance, même s'il y a davantage d'oscillations avec la méthode particulaire.

L'utilisation de la formulation HPL est limitée à cause des instabilités liées aux pressions. Il existe des filtres permettant de rendre les résultats exploitables, comme dans la Figure 4.23b. Il existe également des méthodes dans la littérature permettant de stabiliser la pression, notamment par la méthode de filtrage de densité ou l'introduction d'une dissipation numérique implicite.

La méthode sans maillage est beaucoup moins chronophage que celle avec maillage. En effet, le modèle hydrodynamique des particules lissées avec couvert de glace rigide a mis 1 minute et 49 secondes, alors que celui en mécanique des fluides numérique a mis 23 minutes et 24 secondes. Le modèle en HPL est 12 fois plus rapide que celui en MFN, ce qui représente un gain de temps de 92,2 %.

Mais le modèle avec la rupture de barrage a ses limites, car il n'y a pas d'approvisionnement continu d'eau. Lors d'inondations, l'impact initial de l'eau a un effet néfaste. Mais le plus dangereux est l'écoulement continu d'eau de plus en plus rapide, avec un niveau plus élevé. C'est pourquoi la prochaine partie couvre l'influence d'un approvisionnement continu d'eau sur une structure avec et sans couvert de glace



(a) En MFN

(b) En HPL

FIGURE 4.23 Réaction à la base de la structure selon différents couverts de glace

4.5 Cas expérimental de couvert de glace

4.5.1 Description du cas étude expérimental : onde générée par une rupture de barrage

Fuamba et al. (2007) [21] ont réalisé des essais en laboratoire d'une onde générée par une rupture de barrage sur un obstacle rigide, avec et sans couvert de glace rigide. Le canal a une longueur de 6.55 m, 0.38 m de largeur, et 0.61 m de hauteur. Le réservoir en amont a une face latérale qui est un déversoir de 0.41 m de haut. La partie supérieure du déversoir est haute de 0.11 m et se situe au-dessus de la porte qui est utilisée pour créer des vagues. La structure en aval est un barrage de 0.38 m de large et 0.22 m de hauteur muni d'une vanne. Le couvert de glace a une longueur de 3.65 m et une épaisseur de 0.019 m, fixée à une élévation de 0.17 m. Les dimensions du dispositif expérimental sont définis dans les Figures 4.24 et 4.25.

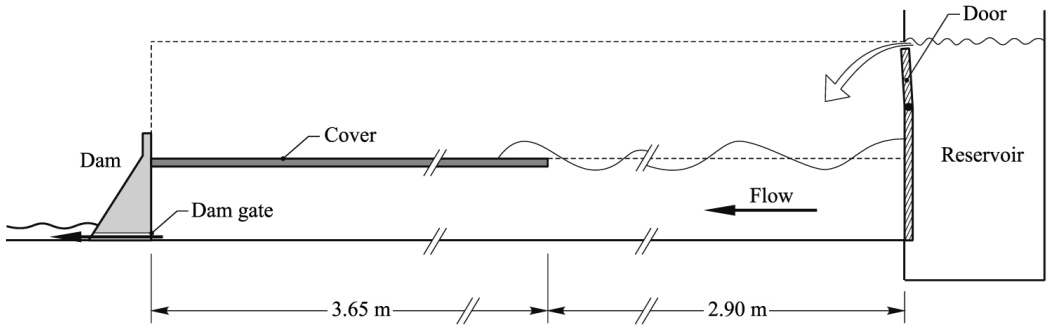


FIGURE 4.24 Coupe longitudinale du dispositif expérimental de Fuamba et al. (2007) [21]

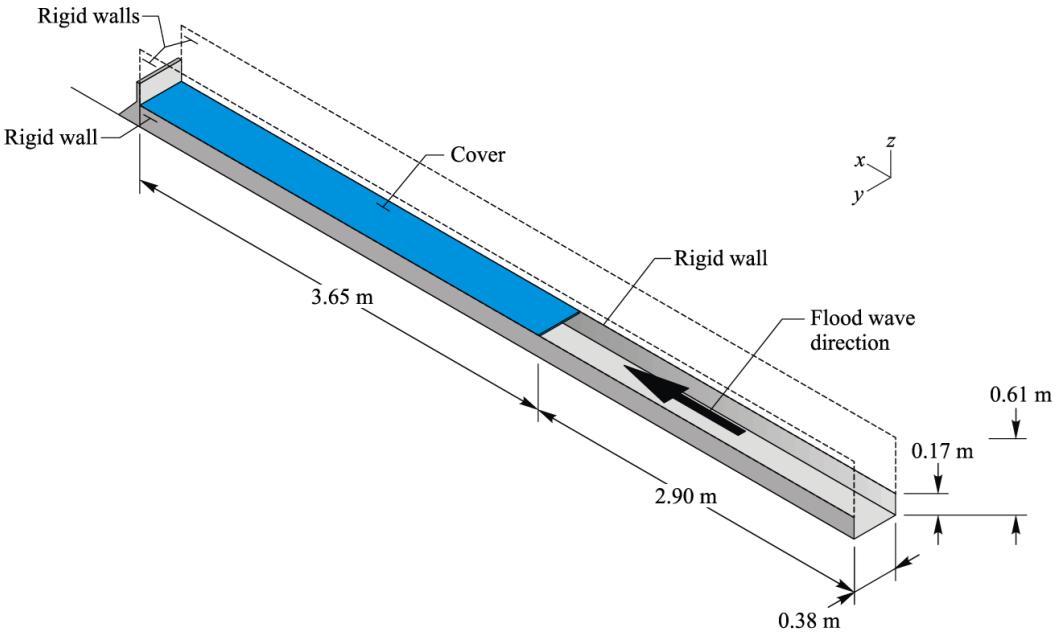


FIGURE 4.25 Dispositif expérimental de Fuamba et al. (2007) [21]

L'hydrographe est mesuré à l'entrée de l'écoulement d'eau provenant du déversoir.

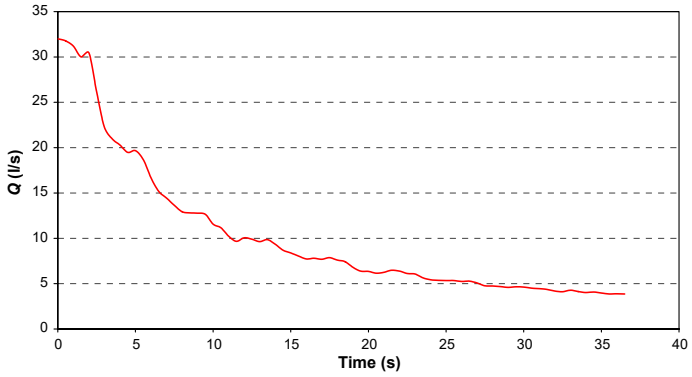


FIGURE 4.26 Hydrographe de Fuamba et al. (2007) [21]

Avant l'ouverture du déversoir, il y a un écoulement initial $Q_0 = 0.0017\ \mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1}$.

4.5.2 Modélisation numérique et validation

Dans cette partie, la modélisation en hydrodynamique des particules lissées (HPL) et éléments finis est décrite. Les résultats sont comparés avec plusieurs modèles en 2D, dont un en MFN par Knuchel et al. (2021) [28] et l'autre en HPL avec formulation explicite incompressible par Nomeritae et al. (2018) [27].

La géométrie ainsi que les conditions initiales du modèle de Nomeritae et al. (2018) [27] sont décrites dans la Figure 4.27. Ils considèrent que l'entrée d'eau de l'hydrogramme se fait par le bas, avec comme hauteur d'eau fixe la hauteur d'eau initiale égale à 0.017 m. Le barrage en aval est remplacé par une structure de 0.3 m de haut et 0.27 m de large, disposant d'une vanne à 0.02 m du fond du canal. Un petit barrage (*weir*) est placé en aval de l'écoulement, à 2 m de la structure. Il mesure 0.157 m de haut, assurant un écoulement initial $Q_0 = 0.0017 m^3/s$.

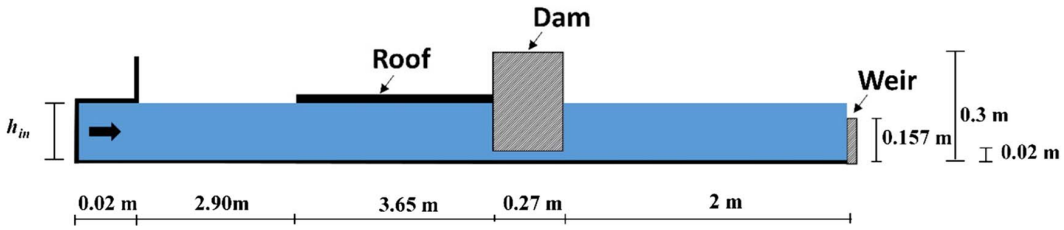


FIGURE 4.27 Modèle de Nomeritae et al. (2018) [27] avec conditions initiales

La géométrie ainsi que les conditions initiales du modèle de Knuchel et al. (2021) [28] sont décrites dans la Figure 4.28. La géométrie et les conditions de ce modèle sont fidèles à celles de l'expérience, réalisée à Polytechnique Montréal. Le flux d'eau entre par un déversoir situé à 0.3 m du fond du canal, avec une hauteur de 0.11 m.

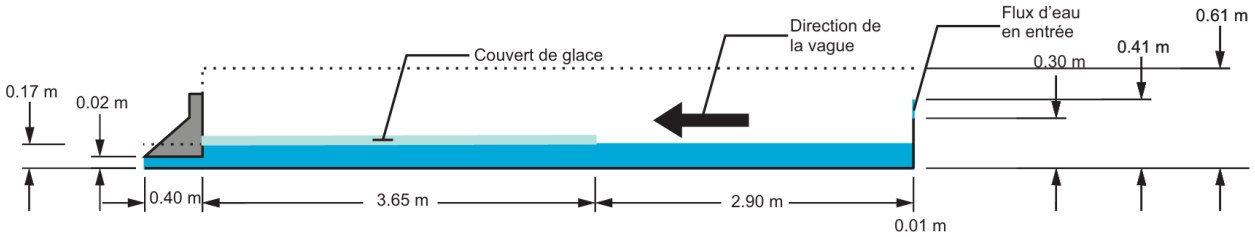


FIGURE 4.28 Modèle de Knuchel et al. (2021) [28] avec conditions initiales

Dans la modélisation 2D, l'élément choisi est un élément coque (*shell*) avec déformations planes (*plane strain*) avec intégration complète par quadrature de Gauss d'ordre 2×2. Les matériaux sont rigides. Dans les conditions frontières, le couvert de glace ainsi que la structure sont fixes. L'eau est modélisée en HPL. La théorie d'approximation des particules suit la formulation améliorée (*enhanced fluid formulation*). L'équation d'état de Murnaghan est utilisée pour modéliser les fluides incompressibles en HPL.

Elle définit la pression comme suit [52] :

$$p = k_0 \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\gamma} - 1 \right] \tag{4.6}$$

Pour modéliser avec précision les écoulements de fluide, γ vaut souvent 7, k_0 est souvent choisi tel que :

$$c_0 = \sqrt{\frac{\gamma k_0}{\rho_0}} \geq 10 v_{max} \tag{4.7}$$

L'espacement initial de particule choisi est 0.005 m, la même que Nomeritae et al. (2018) [27]. Pour calculer la vitesse d'entrée au déversoir v, on divise le débit Q définie dans la Figure 4.26 par la surface d'entrée, qui est 0.38 m $\times$ 0.11 m.

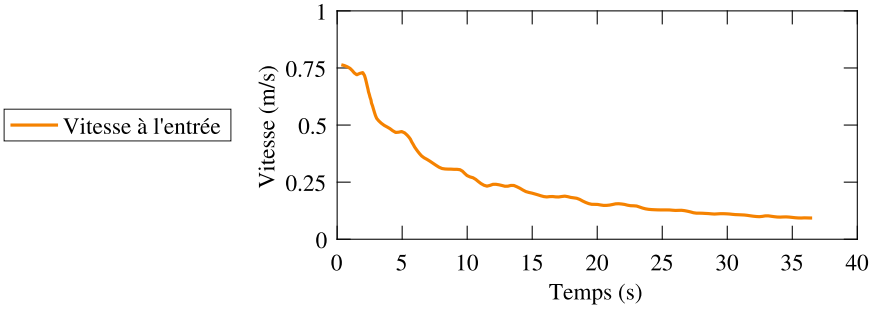


FIGURE 4.29 Profil de vitesse de l'écoulement appliqué au niveau du déversoir

Le profil de vitesse obtenu, représenté dans la Figure 4.29, est appliqué aux particules d'eau issues du déversoir. Les particules se trouvant dans le lit d'eau et sous la structures ont une vitesse initiale correspondant au débit initial Q_0 divisé par la largeur de canal 0.38 m et les hauteurs d'eau respectives suivantes : 0.17 m pour le lit d'eau et 0.2 m pour l'eau dans la vanne.

Concernant la structure en aval de l'écoulement, deux hauteurs ont été étudiées, tout deux disposant d'une vanne de 0.02 m :

— hauteur de 0.22 m

— hauteur de 0.505 m

Configuration sans la glace

La géometrie retenue pour la modélisation en HPL est celle de Knuchel et al. [28]. Elle est représentée dans la Figure 4.30.



FIGURE 4.30 Dimensions du canal sans la glace

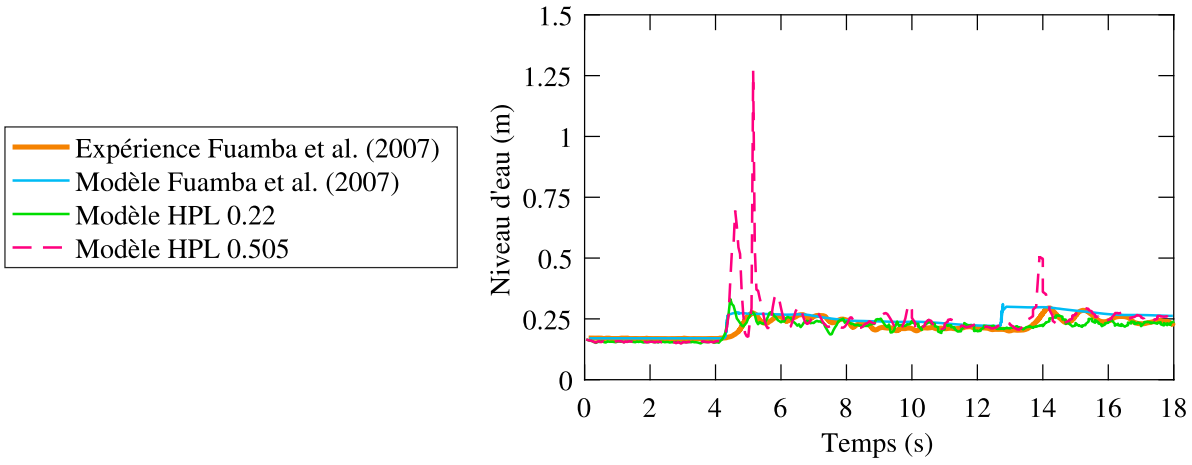


FIGURE 4.31 Hauteur d'eau sans glace au niveau de la structure, avec des structures de 0.22 m et de 0.505 m

La Figure 4.31 représente les hauteurs d'eau au niveau de la structure suivant différentes hauteur de barrage. Les pics de hauteur présents dans le modèle de 0.505 m de haut sont dus

aux particules projetées lors de l'impact. A cause de l'obstacle, elles sont contraintes d'aller vers le haut. Le pic le plus élevé, de 1.25 m, est causé par une seule particule, donc une goutte d'eau, qui n'est pas forcément représentative du niveau d'eau. Néanmoins, les pics sont tous plus élevés que celles de l'expérience. Alors que pour la structure de 0.22 m de haut, le niveau d'eau est moindre car l'eau passe au dessus de la structure. Les résultats plus proches des données expérimentales sont issus du modèle avec une structure d'une moindre taille. Ces derniers sont comparés avec les modèles numériques de Nomeritae et al. [27] et Knuchel et al. [28].

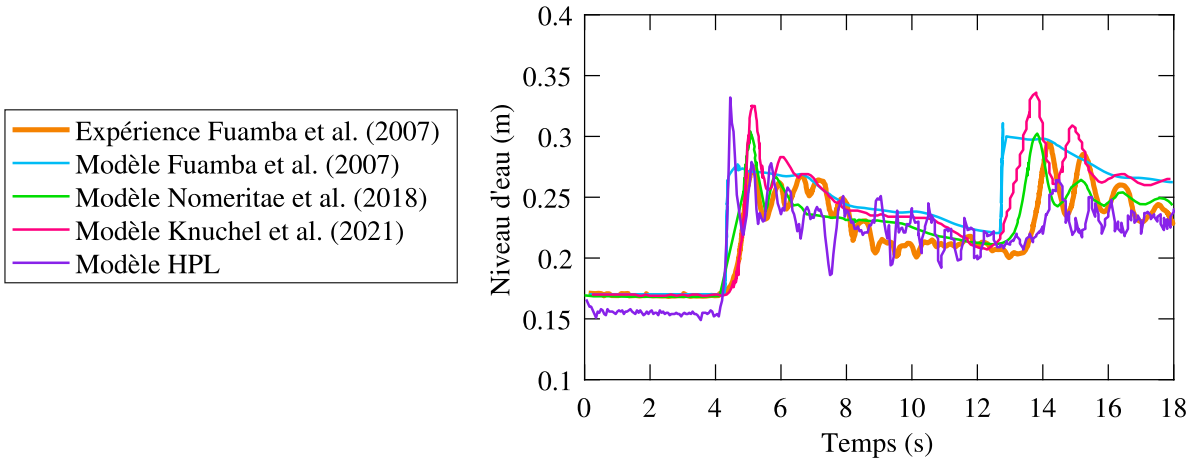


FIGURE 4.32 Hauteur d'eau sans glace au niveau de la structure, avec une structure de 0.22 m

Pendant les quatre premières secondes, le niveau d'eau est inférieur aux données expérimentales. Cela est dû aux conditions initiales, où avant l'ouverture du déversoir, il y a un écoulement stationnaire du lit d'eau à $Q_0 = 0.0017$ m^3/s. Cependant, en raison du manque de précision sur les conditions initiales de l'expérience, l'écoulement initial stationnaire n'a pas pu être reproduit. Les particules du lit d'eau s'écoule par la vanne mais ne sont pas remplacées en amont de l'expérience : c'est pourquoi le niveau d'eau baisse. Cependant, les courbes ont les mêmes tendances : le niveau d'eau stationnaire de 0 à 5 s, suivi d'un pic, puis le niveau d'eau décroît jusqu'au second pic vers 15 s, suivi d'une décroissance. Le premier pic de l'expérience est autour de 5.1 s. Dans le modèle en HPL, il arrive légèrement plus tôt à 4.3 s. Les valeurs diffèrent : 0.27 m pour l'expérience et 0.36 m pour le modèle. Le deuxième pic a lieu à 15.4 s pour une valeur de 0.25 m, alors que dans l'expérience, il a lieu à 14.3 s et vaut 0.28 m. Il est à noter que le modèle numérique de Nomeritae et al. (2018) [27] n'ont pas reproduit l'écoulement du laboratoire. En effet, ils considèrent que le flux entrant est au même niveau que le lit d'eau initial, et non provenant du déversoir au dessus. Et le niveau d'eau relevé n'est pas à la base de la structure, comme dans l'article de Fuamba et al.

(2007) [21] mais à 0.05 m de ce dernier.

Configuration avec la glace

Le couvert de glace est long de 3.65 m et a une épaisseur de 0.017 m. Dans la configuration expérimentale, la glace est remplacée par un couvert en bois rigide, fixé à une hauteur de 0.17 m. C'est pourquoi dans le modèle en HPL, la glace est modélisée par un matériau rigide fixe.

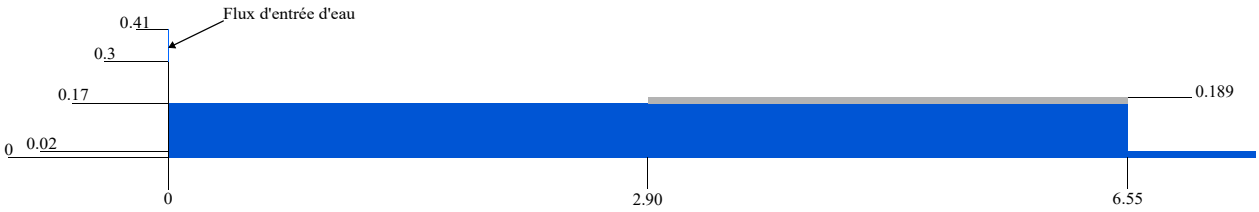


FIGURE 4.33 Dimensions du canal avec la glace

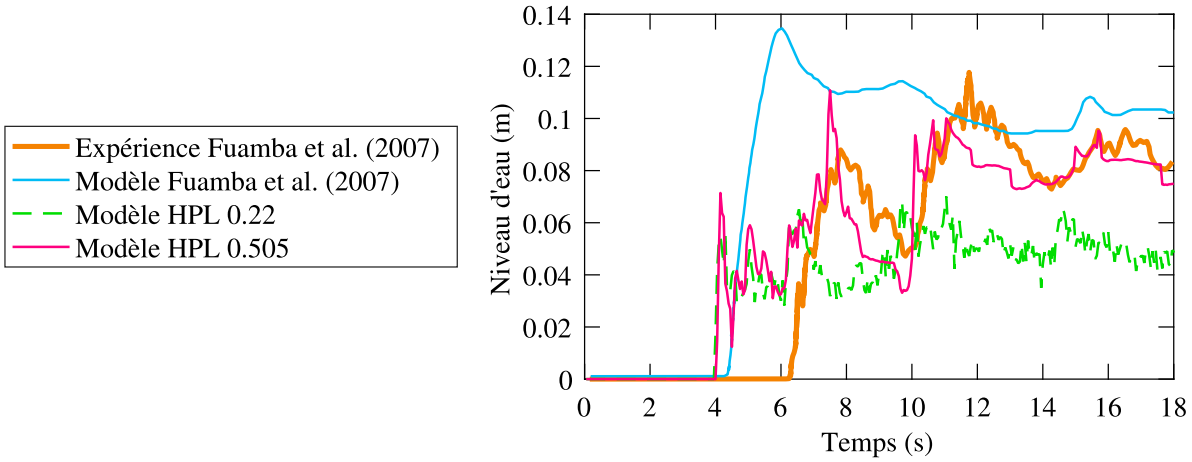


FIGURE 4.34 Hauteur d'eau avec glace au niveau de la structure au dessus du couvert, avec des structures de 0.22 et 0.505 m de haut

Dans la Figure 4.34, la hauteur d'eau au dessus du couvert de glace pour différentes hauteur de structure sont comparées aux valeurs de Fuamba et al. (2007) [21]. La hauteur d'eau du modèle avec la structure de 0.22 m est moindre par rapport aux données expérimentales. Cela s'explique par la présence du couvert de glace, obstacle supplémentaire aux particules d'eau, qui ralentissent. Arrivées à la structure, elles n'ont pas assez de vitesse pour dépasser la hauteur de la structure, et passe par dessus. Les tendances ne sont pas non plus les mêmes que l'expérience. Alors que dans le cas de la structure de 0.505 m, les particules se heurtent à l'obstacle, ce qui leur permet d'atteindre une hauteur d'eau se rapprochant de l'expérience.

La tendance de la courbe est bonne par rapport aux données expérimentales : les premiers pics sont tout deux vers 7 s, les deuxièmes vers 11 s, et les troisièmes vers 16 s. Les valeurs sont également similaires : 0.11 m, 0.1 m, 0.084 m pour le modèle HPL comparable à 0.09 m, 0.11 m, et 0.1 m. Il est à noter que dans tous les modèles numériques, le premier pic arrive plus tôt que celui de l'expérience.

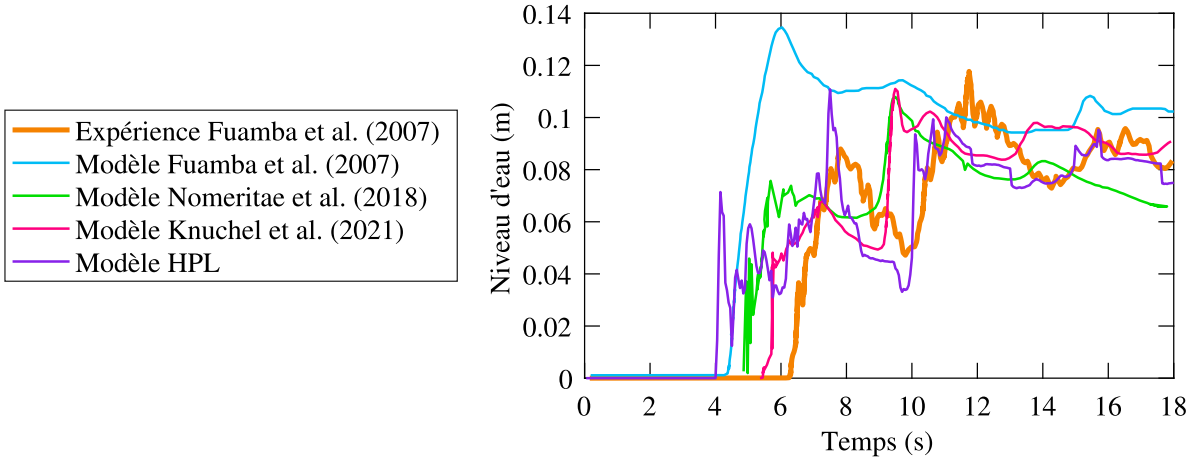


FIGURE 4.35 Hauteur d'eau avec glace au niveau de la structure au dessus du couvert, avec une structure de 0.505 m de haut

Les modèles de la Figure 4.35 sont issus des mêmes références que celles de la figure 4.32. Les premiers pics des modèles numériques sont tous en avance par rapport aux données expérimentales. Cependant, ils ont tous les mêmes tendances, avec une seconde d'avance ou moins. Concernant le modèle HPL, un premier pic apparaît avant le premier pic de l'expérience. Les trois autres pics restant sont bien dans les temps et ont des valeurs similaires de niveau d'eau.

Ainsi, la méthode particulaire HPL peut reproduire des écoulements en laboratoire.

4.6 Barrage de taille réelle

Une étude préliminaire de l'influence d'un flux permanent d'eau dans le lit d'eau sur un barrage de taille réelle. Les dimensions sont représentées dans la Figure 4.36. Le barrage a une hauteur de 35 m, une base de 27,5 m. Un couvert de glace de 17,25 m de long et 1 m d'épaisseur est solidaire à la structure. Le barrage est en matériau linéaire élastique en béton en module d'Young $E = 2.5 \times 10^{10}$ Pa, un coefficient de poisson $\nu = 0.2$ s, et une masse volumique $\rho = 2400$ kg/m^3. La glace est aussi en matériau linéaire élastique, avec en module d'Young $E = 9.5 \times 10^9$ Pa, un coefficient de poisson $\nu = 0.3$ s, et une masse volumique $\rho = 910$ kg/m^3.

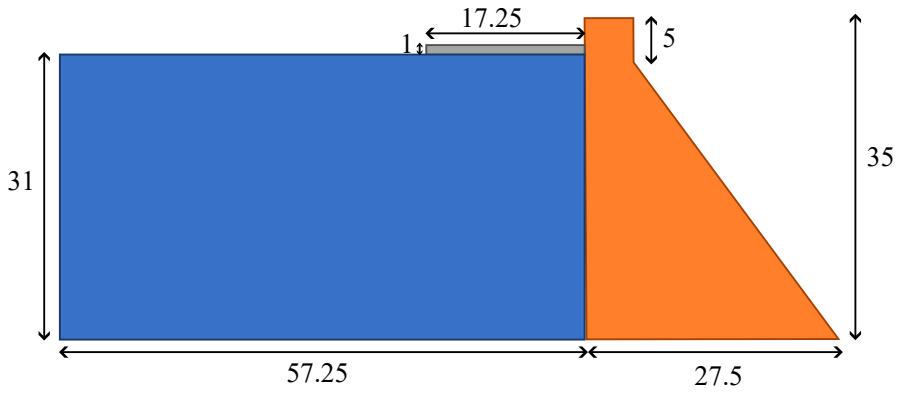


FIGURE 4.36 Dimensions du modèle préliminaire du barrage en taille réelle (m)

Un écoulement permanent dont la vitesse varie avec la hauteur est défini à l'entrée du modèle sur le lit d'eau.

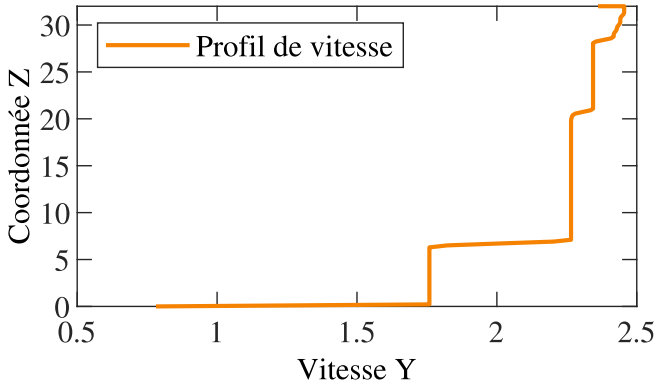
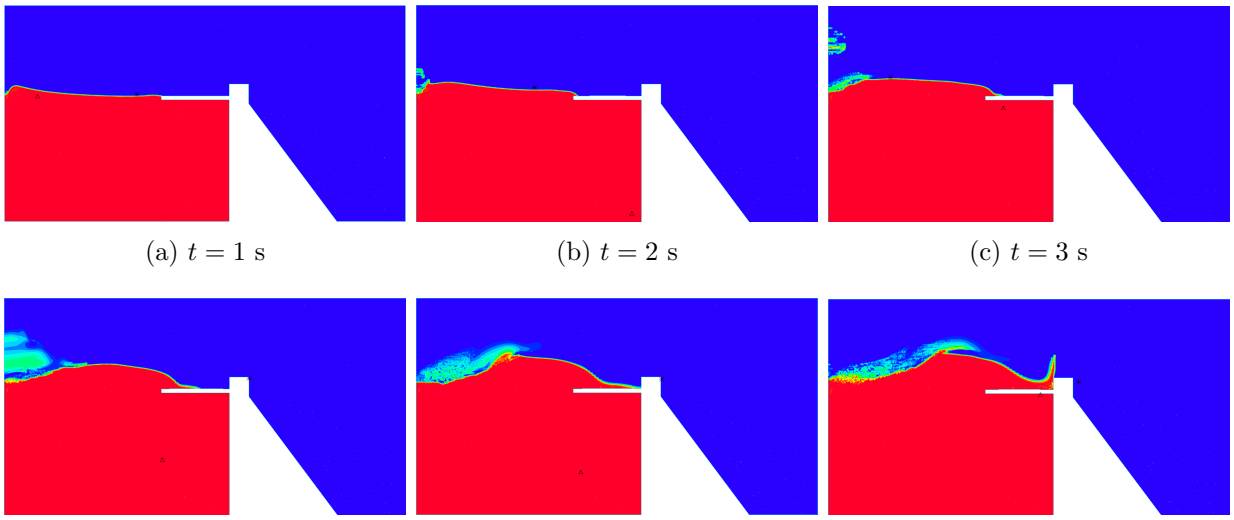


FIGURE 4.37 Profil de vitesse de l'écoulement appliqué à l'entrée du modèle (m/s)

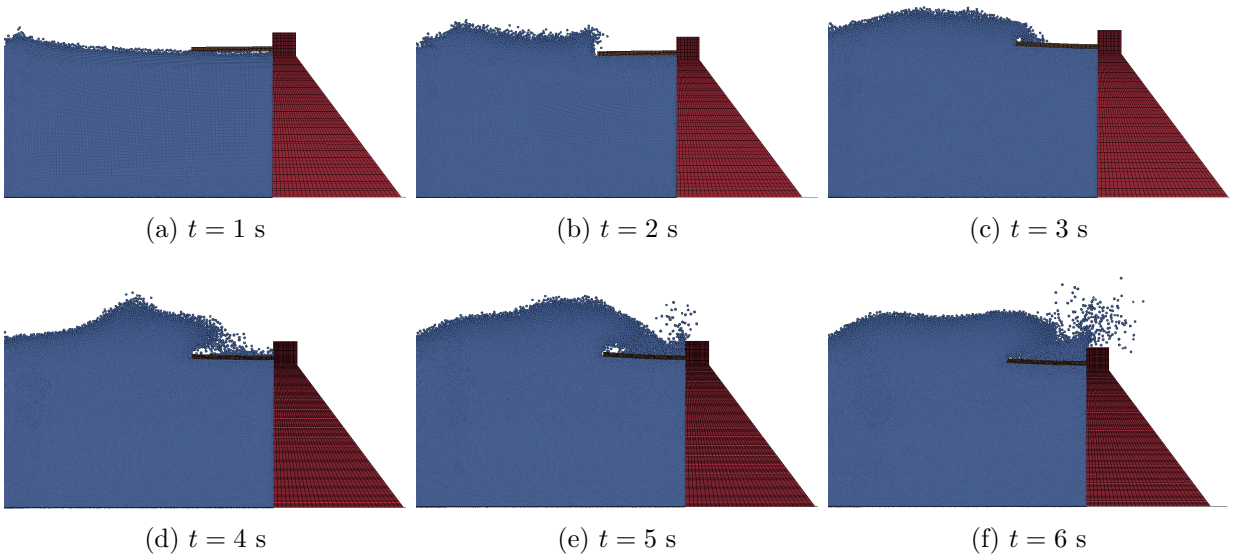
Les Figures 4.38 et 4.39 représentent respectivement les écoulements avec MFN et HPL. A $t = 1$ s, la forme de la vague à l'entrée d'eau est similaire. A $t = 2$ s, le modèle en HPL semble prendre de l'avance, avec une vague qui s'amorce au niveau du couvert de glace. Le niveau d'eau du modèle MFN est un peu moins élevé. A $t = 3$ s, la forme de la vague est identique sur les deux modèles. A partir de $t = 4$ s, l'écoulement est similaire entre les deux modèles. Cependant, il semble que le modèle en HPL ait une légère avance sur celui en MFN. Cela s'illustre notamment à $t = 6$ s, où l'eau atteint un niveau plus élevé dans la Figure 4.39f. Avec les mêmes définitions d'entrée d'eau, les écoulements en MFN et HPL sont similaires. Ainsi, la méthode particulaire avec HPL permet de reproduire des écoulements ici de modèles numériques avec MFN.



(a) $t = 1$ s (b) $t = 2$ s (c) $t = 3$ s

(d) $t = 4$ s (e) $t = 5$ s (f) $t = 6$ s

FIGURE 4.38 Ecoulement de l'eau en MFN sur plusieurs pas de temps



(a) $t = 1$ s (b) $t = 2$ s (c) $t = 3$ s

(d) $t = 4$ s (e) $t = 5$ s (f) $t = 6$ s

FIGURE 4.39 Ecoulement de l'eau en HPL sur plusieurs pas de temps

CHAPITRE 5 CONCLUSION

5.1 Synthèse des travaux

Ce projet de maîtrise a été réalisé afin de développer des modèles numériques incluant les effets de l'interaction fluide-structure (IFS), pour déterminer l'impact des écoulements d'eau générés par des crues ou des inondations sur des structures en aval, avec ou sans la présence de couverts de glace.

La première partie porte sur des modèles basés sur un cas expérimental d'une rupture de barrage sur une structure rigide. Une étude de sensibilité sur le raffinement du maillage, la flexibilité de la structure, les conditions frontières aux bords de la structure et la présence et la hauteur d'un lit d'eau. Inclure la flexibilité permet une approche moins conservatrice, notamment pour l'évaluation des contraintes dans les ouvrages soumis aux inondations, par opposition à l'hypothèse simplificatrice considérant la structure infiniment rigide. Le déplacement de la structure en est fortement impacté, car il est directement lié à la rigidité de la structure. La réaction à la base est moins sensible à la flexibilité, contrairement aux contraintes. Les conditions aux bords, qu'elles soient fixes ou libres, influencent grandement le comportement de la structure en ce qui concerne les réactions, déformations et contraintes, indépendamment de la flexibilité. La structure avec les bords libres a une réaction, des déformations et des contraintes deux fois plus grandes que celle avec bords fixes. Ces conditions ne pouvant être prises en compte que dans une modélisation tri-dimensionnelle, il est impératif de les considérer pour une étude adéquate. La présence d'un lit d'eau au niveau de la structure agit comme un amortisseur : plus le niveau d'eau est élevé, moins le déplacement de la structure est important. Le raffinement du maillage entraîne une précision accrue des résultats mais aussi un temps de calcul conséquent. C'est pourquoi il est pertinent de considérer des modèles tronqués, qui ont un domaine réduit mais fournissent des résultats similaires à ceux des modèles complets.

Au Québec et dans les pays du nord, la présence de glace exacerbe les dégâts dus aux inondations. Une deuxième partie de l'étude porte sur l'influence de la présence d'un couvert de glace au niveau de la structure pour les inondations. La présence d'un couvert de glace ne semble pas avoir d'incidence sur la pression. Mais elle influence grandement le profil de l'écoulement de l'eau, ainsi que la réaction de la structure. En mécanique des fluides numérique (MFN), le domaine de l'eau est souvent bien plus grand que celui des structures, ce qui rend les modèles extrêmement chronophages. Les méthodes lagrangiennes, comme l'hydrodynamique des particules lissées (HPL) permettent de réduire considérablement le

temps des modèles, tout en aboutissant à des réponses hydrodynamiques et structurelles globalement comparables aux autres techniques plus conventionnelles (e.g. éléments finis). Cependant, une expertise plus poussée est requise pour obtenir des résultats de qualité pour certains variables comme la pression hydrodynamique.

En MFN tout comme en HPL, il est possible de définir une entrée d'eau. Les écoulements ainsi obtenus sont similaires, et comparables aux données du cas expérimental sur lequel les modèles sont construits. Ces deux méthodes permettent également de modéliser des structures à taille réelle comme démonté par le modèles préliminaire d'un barrage avec réservoir couvert de glace. Des études plus avancées sont cependant requises pour bien définir les paramètres de ces modèles à grande échelle.

5.2 Limitations de l'étude

Le modèle issu du cas expérimental de rupture de barrage de Koshizuka et al. (1995) se focalise sur la réponse d'une structure de dimensions de laboratoire. Il serait pertinent d'étudier le facteur d'échelle, en modélisant une structure de taille réaliste.

Plusieurs autres limites se présentent à ce projet : dans le cas de Fuamba et al. (2002), la structure et le couvert de glace sont considérés comme infiniment rigides. Or, la flexibilité est importante en ce qui concerne les réponses structurelles. Les modèles sont en 2D, ce qui ne permet pas de prendre en compte certaines conditions frontières, notamment celles aux bords, ainsi que l'effet 3D. L'étude s'est focalisée sur le comportement de l'eau, mais les paramètres comme la réaction, le déplacement, et les contraintes de la structure n'ont pas été mesurés.

5.3 Améliorations futures

Les modèles développés en mécanique des fluides numérique du cas de Koshizuka et al. (1995) pourront servir de base pour développer des modèles incluant les non-linéarités matérielles et géométriques.

Les modèles développés en hydrodynamique des particules lissées du cas de Fuamba et al. (2002) pourront être améliorés en incluant la flexibilité de la structure et de la glace, ses ruptures potentielles, et le contact avec la structure. Modéliser l'influence des embâcles sur les écoulements et la réponse structurelle serait dans la continuité du projet. Ces modèles pourraient aussi permettre la modélisation de crues éclair, en définissant un profil de vitesse variant selon la hauteur d'eau, et dont la profondeur varie selon le temps.

RÉFÉRENCES

[1] E. et Changement climatique Canada, “Les co&xFB ;ts des inondations - Canada.ca — canada.ca,” https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-apercu/volume/couts-inondations.html, 2017, [Accessed 08-12-2025].

[2] J. Wang, “Numerical Investigation Of Structural Responses Impacted By Flood Flow,” Thèse de doctorat, Polytechnique Montréal, mai 2024. [En ligne]. Disponible : https://publications.polymtl.ca/58338/

[3] E. Rødtang *et al.*, “Review of river ice force calculation methods,” *Cold Reg. Sci. Technol*, vol. 209, p. 103809, 2023.

[4] Radio-Canada, “Inondations à Calgary : des milliers d’évacués et des écoles fermées,” https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/619804/inondation-calgary-quartier-ordre-evacuation-mission-elbow-roxboro, 2013, [Accessed 08-05-2025].

[5] J.-B. Lasaygues, “La débâcle du fleuve Yukon a eu lieu à Dawson — ici.radio-canada.ca,” https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/2162196/yukon-dawson-debacle-glace-fleuve, 2025, [Accessed 13-05-2025].

[6] P. Rokaya, S. Budhathoki et K.-E. Lindenschmidt, “Ice-jam flood research : a scoping review,” *Natural Hazards*, vol. 94, n°. 3, p. 1439–1457, 2018.

[7] A. France-Presse, “Typhon Ragasa | La rupture d’un lac à Taïwan piège des centaines de personnes — lapresse.ca,” https://www.lapresse.ca/international/asie-et-oceanie/2025-09-23/typhon-ragasa/la-rupture-d-un-lac-a-taiwan-piege-des-centaines-de-personnes.php, 2025, [Accessed 23-09-2025].

[8] ——, “Indonésie | Au moins 13 morts dans des inondations à Bali et Florès — lapresse.ca,” https://www.lapresse.ca/international/asie-et-oceanie/2025-09-10/indonesie/au-moins-13-morts-dans-des-inondations-a-bali-et-flores.php, 2025, [Accessed 23-09-2025].

[9] A. O. . C. Macaulay, “Nigeria floods : More than 700 believed dead in Mokwa — bbc.com,” https://www.bbc.com/news/articles/c071jz90pj8o, 2025, [Accessed 02-10-2025].

[10] C. Poirier, “Inondations en Chine : 11 morts et des dizaines de disparus après l’effondrement d’un pont routier — dakarinfo.net,” https://dakarinfo.net/

inondations-en-chine-11-morts-et-des-dizaines-de-disparus-apres-leffondrement-dun-pont-routier/, 2024, [Accessed 29-05-2025].

[11] Le téléjournal midi Montréal, "Inondations mortelles en France | Info | Radio-Canada — ici.radio-canada.ca," https://ici.radio-canada.ca/info/videos/1-7972689/inondations-mortel-en-france, 2018, [Accessed 29-05-2025].

[12] L. P. canadienne, "Des municipalités du Québec déclarent l'état d'urgence en raison des inondations — ici.radio-canada.ca," https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1975451/inondations-surveillance-lacs-cours-eau-quebec-precipitations-securite-publique, 2023, [Accessed 25-09-2025].

[13] P. Rokaya, S. Budhathoki et K.-E. Lindenschmidt, "Trends in the timing and magnitude of ice-jam floods in Canada," *Scientific Reports*, vol. 8, n°. 1, p. 5834, 2018.

[14] Radio-Canada, "Inondations à Hay River : « les conséquences se feront sentir très longtemps » — ici.radio-canada.ca," https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1883353/tno-hay-river-inondations-embacle, 2022, [Accessed 13-05-2025].

[15] C. Dauphinais-Pelletier, "Un pont ferroviaire s'effondre à Sherbrooke — latribune.ca," https://www.latribune.ca/2018/01/13/un-pont-ferroviaire-seffondre-a-sherbrooke-2b218889e444b3827c2d623f31c6605a/, 2018, [Accessed 29-05-2025].

[16] P. V. Hobbs, *Ice physics*. OUP Oxford, 2010.

[17] E. R. Pounder, *The physics of ice*. Elsevier, 2013.

[18] F. Hicks et S. Beltaos, "River ice," dans *Cold Region Atmospheric and Hydrologic Studies. The Mackenzie GEWEX Experience : Volume 2 : Hydrologic Processes*. Springer, 2008, p. 281–305.

[19] P. Barrette, T. Ghobrial et T. Kolerski, "On floods caused by river ice : an overview of mitigation measures," National Research Council Canada. Ocean, Coastal and River Engineering, Canada, Technical Report NRC-OCRE-2024-TR-027, févr. 2025, identifier : NR16-477/2025E-PDF. [En ligne]. Disponible : https://doi.org/10.4224/40003460

[20] J. Wang *et al.*, "Local scour around a bridge pier under ice-jammed flow condition–an experimental study," *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, vol. 69, n°. 3, p. 275–287, 2021.

[21] M. Fuamba, N. Bouaanani et C. Marche, "Modeling of dam break wave propagation in a partially ice-covered channel," *Advances in Water Resources*, vol. 30, n°. 12, p. 2499–2510, 2007.

[22] J. Wang *et al.*, "Impacts of bridge piers on water level during ice jammed period in bend channel–An experimental study," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 30, n°. 1, p. 160–168,

2018.

[23] C. Billy, A. Shakibaeinia et T. Ghobrial, "Three-dimensional fully-Lagrangian DEM-SPH modeling of river ice interaction with control structures," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 214, p. 103939, 2023.

[24] S. Koshizuka, "A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation," *Comp. Fluid Dyn. J.*, vol. 4, p. 29–46, 1995.

[25] S. Hänsch *et al.*, "Application of a new concept for multi-scale interfacial structures to the dam-break case with an obstacle," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 279, p. 171–181, 2014.

[26] A. Issakhov, Y. Zhandaulet et A. Nogaeva, "Numerical simulation of dam break flow for various forms of the obstacle by vof method," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 109, p. 191–206, 2018.

[27] N. Nomeritae, H. H. Bui et E. Daly, "Modeling transitions between free surface and pressurized flow with smoothed particle hydrodynamics," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 144, nº. 5, p. 04018012, 2018.

[28] G. Knuchel, "Modélisation numérique des ondes de crues et de leurs impacts sur les structures en amont incluant les effets d'un couvert de glace," Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal, décembre 2021. [En ligne]. Disponible : https://publications.polymtl.ca/10010/

[29] Sécurité publique Canada, "Inondations — securitepublique.gc.ca," https://www.securitepublique.gc.ca/cnt/mrgnc-mngmnt/ntrl-hzrds/fld-fr.aspx, 2022, [Accessed 13-05-2025].

[30] S. Beltaos et T. D. Prowse, "Climate impacts on extreme ice-jam events in Canadian rivers," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 46, nº. 1, p. 157–181, 2001.

[31] S. Beltaos, *River Ice Breakup*. Water Resources Publications, 2008.

[32] N. Kovachis *et al.*, "Ice-jam flood delineation : Challenges and research needs," *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*, vol. 42, nº. 3, p. 258–268, 2017.

[33] Sécurité publique Canada, "Q'est-ce qu'une inondation - Canada.ca — canada.ca," https://www.canada.ca/fr/campagne/prevention-inondation/inondation.html, 2016, [Accessed 23-05-2025].

[34] S. Beltaos, "Advances in river ice hydrology," *Hydrological processes*, vol. 14, nº. 9, p. 1613–1625, 2000.

[35] J. Wagstaffe, "Ice jams : What causes them ?" https://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/ice-jams-what-causes-them-1.2501766, 2014, [Accessed 14-05-2025].

[36] S. Beltaos, P. Boyle et K. Hryciw, “Kaministiquia River near Fort William Historical Park,” 2007.

[37] N. Lamichhane, S. Sharma et A. S. Subedi, “Effects of climate change in winter ice cover and ice thickness in flooding : a case study of Grand River, Ohio, USA,” *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 28, n°. sup1, p. 503–517, 2022.

[38] CBC News, “Ice jam threatens bridge in Golden, B.C.” https://www.cbc.ca/news/canada/british-columbia/ice-jam-threatens-bridge-in-golden-b-c-1.2460456, 2013, [Accessed 13-05-2025].

[39] A. Lavell *et al.*, “Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation,” *A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change (IPCC)*, vol. 3, p. 25–64, 2012.

[40] B. Burrell, S. Beltaos et B. Turcotte, “Effects of climate change on river-ice processes and ice jams,” *International Journal of River Basin Management*, vol. 21, n°. 3, p. 421–441, 2023.

[41] F. Hicks, “An overview of river ice problems : CRIPE07 guest editorial,” *Cold Regions Science and Technology*, vol. 55, n°. 2, p. 175–185, 2009.

[42] S. Beltaos, *River ice formation*. Committee on river ice processes and the environment, Canadian geophysical . . ., 2013.

[43] D. A. Sirianni *et al.*, “Effects of developing ice covers on bridge pier scour,” *Journal of Hydraulic Research*, vol. 60, n°. 4, p. 645–655, 2022.

[44] J. Wang *et al.*, “Initiation of ice jam in front of bridge piers—An experimental study,” *Journal of Hydrodynamics*, vol. 31, n°. 1, p. 117–123, 2019.

[45] K.-J. Bathe, *Finite element procedures*. Klaus-Jurgen Bathe, 2006.

[46] R. Adina, “ADINA theory and modeling guide–volume III : ADINA CFD & FSI.”

[47] K.-J. Bathe, H. Zhang et S. Ji, “Finite element analysis of fluid flows fully coupled with structural interactions,” *Computers & Structures*, vol. 72, n°. 1-3, p. 1–16, 1999.

[48] K.-J. Bathe, “On reliable finite element methods for extreme loading conditions,” dans *Extreme man-made and natural hazards in dynamics of structures*. Springer, 2007, p. 71–102.

[49] R. A. Gingold et J. J. Monaghan, “Smoothed particle hydrodynamics : theory and application to non-spherical stars,” *Monthly notices of the royal astronomical society*, vol. 181, n°. 3, p. 375–389, 1977.

[50] J. O. Hallquist *et al.*, “LS-DYNA theory manual,” *Livermore software Technology corporation*, vol. 3, p. 25–31, 2006.

[51] E. Yreux, “Fluid flow modeling with SPH in LS-DYNA®,” dans *Proceedings of the 15th International LS_DYNA Users Conference, Dearborn, MI, USA*, 2018.

[52] J. J. Monaghan, “Simulating free surface flows with SPH,” *Journal of computational physics*, vol. 110, nº. 2, p. 399–406, 1994.

[53] A. Colagrossi et M. Landrini, “Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics,” *Journal of computational physics*, vol. 191, nº. 2, p. 448–475, 2003.

[54] A. Learning, “Time step in explicit dynamics - lesson 2,” https://www.youtube.com/watch?v=B4-MpbSVxyo&list=PLtt6-ZgUFmMLcci-98A4Ifk-VJZZyc0NT&index=4, 2022, [Accessed 03-09-2025].

[55] G. Xu, C. Cai et Y. Han, “Investigating the characteristics of the solitary wave-induced forces on coastal twin bridge decks,” *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 30, nº. 4, p. 04015076, 2016.

[56] S. Yang *et al.*, “Numerical study on characteristics of dam-break wave,” *Ocean Engineering*, vol. 159, p. 358–371, 2018.