

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LARECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE BLIDA 1

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention de Diplôme de Master en Génie Mécanique

Spécialité Énergétiques .

**Modélisation de comportement dynamique des Interactions
Fluide-Structure (FSI) avec la méthode numérique SPH**

Réalisé par :

- Zerkouk Oussama
- Seriri Abdelillah

Promoteur : Mr A.Mahallem

Co - Promoteur : Mr M.Roudane

2024/2025

Remerciment

Cette thèse n'aurait jamais vu le jour sans l'aide de Dieu, le Tout-Puissant, qui nous a accordé la santé, le courage, la patience, la détermination et la force nécessaires pour surmonter toutes les difficultés et obstacles rencontrés au cours de notre parcours universitaire.

La réalisation d'un projet de fin d'études est une tâche ardue, exigeant un investissement considérable, mais qui procure en retour un profond sentiment de satisfaction, fruit de l'accomplissement réussi de ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre estimé professeur, Monsieur **Abderrahmane Mahallem**, qui a eu l'honneur de diriger ce projet de fin d'études. Ses orientations précieuses, son soutien constant et ses grands sacrifices ont eu un impact déterminant dans l'achèvement de ce travail. Monsieur **Abderrahmane Mahallem** n'a ménagé aucun effort pour nous assister, lever les obstacles et répondre à nos interrogations, même au-delà de ses obligations d'encadrant. Son dévouement et son engagement exemplaires ont été pour nous une source de motivation et d'inspiration qui nous a poussés à donner le meilleur de nous-mêmes. Grâce à lui, nous avons pu surmonter les défis et mener à bien notre projet avec un haut niveau de qualité. Nous prions Dieu de le récompenser pour tout ce qu'il a fait pour nous.

Nous adressons également nos sincères remerciements à Monsieur **Mohamed Roudane**, qui nous a guidés et soutenus, ce qui nous a permis de mener à bien ce travail de la meilleure manière possible.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui nous ont aidés, de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre, dans la réalisation de ce travail

Dédicace

À mes chers parents, Pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien indéfectible qui ont éclairé mon chemin et rendu ce succès possible. À mes enseignants et encadrants, Monsieur MahaLlem Abderrahmane et Roudane Mohamed , Pour leur guidance précieuse, leur patience et les connaissances qu'ils m'ont transmises, sans lesquelles ce travail n'aurait pu voir le jour. À mes amis et à ma famille, Pour leurs encouragements constants et leur présence réconfortante tout au long de ce parcours. Enfin, à tous ceux qui ont cru en moi et m'ont aidé à atteindre cet objectif. C'est avec gratitude que je dédie ce travail.

Zerkouk *ET* Seriri

Résumé

Ce projet présente une étude approfondie de la modélisation et de la simulation numérique de l'Interaction Fluide-Structure (IFS) en utilisant la méthode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). L'accent est mis sur la modélisation de différents types de structures fixes, mobiles et constituées de matériaux granulaires en interaction avec un fluide. Une attention particulière est portée à la description des structures granulaires à l'aide du modèle rhéologique non newtonien de Bingham, permettant de capturer leur comportement viscoplastique.

Le travail débute par une revue de l'état de l'art sur la méthode SPH appliquée à la modélisation des fluides, des structures, et de leur interaction. Une contribution majeure de ce projet réside dans l'implémentation de formulations SPH adaptées pour surmonter les discontinuités numériques souvent rencontrées dans les lois constitutives classiques utilisées pour modéliser les différents types de structures, notamment les matériaux granulaires. Cette implémentation est intégrée aux équations gouvernantes de la méthode SPH, améliorant ainsi la stabilité et la précision des simulations.

Le cadre numérique développé permet de traiter différents cas d'interaction fluide-structure : fluide-structure fixe, fluide-structure mobile et fluide-structure granulaire. Pour chaque cas, des scénarios de simulation sont réalisés, et les résultats obtenus sont confrontés à des données expérimentales ou à des résultats issus d'autres approches numériques. Une analyse de sensibilité est également menée sur les paramètres clés de la méthode SPH afin d'évaluer leur influence sur la qualité des résultats.

Les résultats démontrent que la méthode SPH, combinée à une modélisation rhéologique adaptée, constitue une approche efficace et robuste pour simuler de manière unifiée les différentes formes d'interactions fluide-structure. Cette recherche offre ainsi des perspectives prometteuses pour la modélisation de systèmes complexes impliquant des matériaux granulaires et des structures en interaction avec des fluides.

Abstract

This project presents an in-depth study of the modeling and numerical simulation of Fluid-Structure Interaction (FSI) using the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method.

The focus is placed on the modeling of various types of structures—fixed, mobile, and granular—interacting with a fluid. Particular attention is given to the representation of granular structures through the non-Newtonian Bingham rheological model, which enables the capture of their viscoplastic behavior.

The work begins with a comprehensive review of the state of the art on the SPH method applied to the modeling of fluids, structures, and their interactions. A major contribution of this project lies in the implementation of tailored SPH formulations designed to overcome the numerical discontinuities often encountered in classical constitutive laws used to model different types of structures, particularly granular materials. This implementation is embedded within the governing equations of the SPH method, thereby enhancing the stability and accuracy of the simulations.

The developed numerical framework allows for the analysis of various fluid-structure interaction scenarios: fixed fluid-structure, mobile fluid-structure, and granular fluid-structure interactions. For each case, simulation scenarios are performed, and the obtained results are compared with experimental data or outcomes from other numerical approaches. A sensitivity analysis is also conducted on key SPH parameters to assess their influence on the accuracy and quality of the results.

The findings demonstrate that the SPH method, when combined with an appropriate rheological modeling approach, provides an efficient and robust framework for the unified simulation of various forms of fluid-structure interactions. This research thus offers promising perspectives for the modeling of complex systems involving granular materials and structures interacting with fluids.

Souhaites-tu que je te reformule cette traduction dans un style académique encore plus soutenu (par exemple pour un mémoire ou un article scientifique) ?

Sommaire

1	État de l’art et introduction de la méthode SPH	4
1.1	Introduction	4
1.2	Les interactions fluide-structure (IFS)	4
1.2.1	Définition, description et importance de l’IFS	4
1.2.2	Aperçu des différentes méthodes de modélisation et de simulation pour l’IFS	5
1.3	La méthode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)	8
1.3.1	Description de la méthode SPH	8
1.3.2	Fondements de la méthode SPH	8
1.3.3	Fonctions noyau de lissage	9
1.3.4	Logiciels Utilisant la méthode SPH	14
1.4	Applications de la méthode SPH	15
1.4.1	Applications pour les fluides	16
1.4.2	Applications pour les Structures	17
1.4.3	Interactions fluide-structure	20
2	Modélisation des interactions fluide-structure avec une approche SPH	27
2.1	Modèles mathématiques	28
2.1.1	Équations gouvernantes	28
2.1.2	Interactions fluide-matériau granulaire	30
2.1.3	Interaction fluide-corps rigide	35
2.1.4	Stratégies de couplage fluide-structure	35
2.2	Formes d’approximation SPH des équations gouvernantes	36
2.2.1	Discretisation SPH	37
2.2.2	Conditions aux limites et techniques d’intégration temporelle	41

3 Validation du modèle SPH pour l'interaction fluide-structure : Applications, Résultats et Discussion	42
3.1 Cas test: rupture de barrage	43
3.2 Effondrement de matériau granulaire	44
3.3 Interaction eau-matériau granulaire	49
3.4 Interaction fluide-structure fixe"	52
References	58

Liste des figures

1.1	Représentation schématique des méthodes basées sur le maillage : (a) la méthode des éléments finis (MEF), et (b) la méthode des volumes finis (MVF).	6
1.2	Représentation schématique de la méthode SPH : croquis en 2D des domaines de calcul du fluide et du solide.	7
1.3	Description du domaine physique en utilisant une fonction de lissage dans le cadre de la méthode SPH	10
1.4	Instantanés de l'évolution de l'écoulement consécutif à la rupture de digue contre un mur vertical, d'après les travaux de Marrone et a.	16
1.5	Écoulement consécutif à une rupture de digue contre un mur vertical — comparaison entre les charges de pression mesurées expérimentalement par Buchner et celles prédites par le modèle numérique aux sondes P_1 (partie supérieure) et P_2 (partie inférieure). Les résultats sont présentés pour trois résolutions spatiales différentes	17
1.6	Simulation WCSPH d'un écoulement non visqueux autour d'un cylindre circulaire pour un nombre de Reynolds $Re = 2400$ — comparaison du champ de vorticité obtenu par la méthode SPH (à gauche) et par un solveur de Navier-Stokes aux différences finies (à droite) . . .	18
1.7	Écoulement diphasique (huile-eau) dans un séparateur fermé simplifié — champs de densité présentés à différents instants.	18
1.8	Instantanés SPH de la coalescence oblique à différents instants caractéristiques (en haut) ; instantanés expérimentaux issus de Brereton et Korotney (au centre) ; champ de vitesse autour des bulles (en bas).	19
1.9	Instants successifs $t = 2,2; 3,2; 10$ [s] de la simulation de l'interaction d'une vague de grande amplitude avec une plateforme pétrolière offshore, réalisée avec 10^9 particules	19

1.10 Séquences de simulation de l'oscillation d'une plaque élastique	20
1.11 Séquences de simulation de la collision entre deux anneaux élastiques.	21
1.12 Étude de convergence du cas test de la plaque oscillante, réalisée avec trois résolutions en particules : $n = 10, 20, 30$ particules selon l'épaisseur de la plaque.	22
1.13 Comparaison de la simulation de la rupture de digue de sédiments entre : (a) les données expérimentales de Bui et al. (b) les résultats obtenus par Fourtakas et Rogers à l'aide du modèle viscoplastique, (c) la superposition du profil expérimental et de la surface plastifiée du sédiment, comparant les données de Bui et al. et le modèle de Fourtakas et Rogers à l'état d'équilibre ($t = 0,64$ s).	22
1.14 État d'équilibre de l'effondrement d'une colonne cylindrique de sable. Les particules sont colorées en fonction de la déformation plastique équivalente accumulée : (a) vue latérale ; (b) vue isométrique.	23
1.15 Rupture en compression uniaxiale d'un échantillon de gypse contenant un défaut incliné. La figure supérieure montre l'état initial de l'échantillon, tandis que les figures inférieures présentent la simulation de la fissuration à l'aide de la méthode SPH, pour différents angles d'inclinaison du défaut.	23
1.16 Comparaison entre les images issues de l'expérience et les positions des particules SPH , à intervalles de 0,04 s, depuis $t = 0$ s (a) jusqu'à $t = 0,4$ s (k).	24
1.17 Déplacements horizontal et vertical de l'extrémité libre de la plaque.	24
1.18 Comparaison entre les résultats de la méthode des éléments finis particuliers (PFEM) et les simulations SPH pour la rupture de digue sur une cloison hypoélastique.	25
1.19 Simulation d'un glissement sous-marin : l'image de gauche représente la position initiale des particules de sol et d'eau ($t = 0$ s), tandis que celle de droite correspond à l'instant $t = 0,8$ s	25
1.20 Élévation de la surface libre de l'eau à l'instant $t = 0,8$ s : comparaison entre les résultats SPH et les données expérimentales de Rzadkiewicz et al.	26

1.21	Simulation de l'impact d'une vague violente sur le terminal à conteneurs du port de Sines aux instants $t = 0, 14, 18, 60$ s.	26
2.1	Contrainte de cisaillement par rapport au taux de cisaillement pour les fluides newtoniens, les modèles rhéologiques de Bingham et Casson. Figure basée sur celle présentée par Mitsoulis	31
3.1	Détails géométriques et description de la configuration expérimentale de la rupture de barrage	43
3.2	Problème de rupture de barrage : comparaison entre nos résultats numériques (colonne de gauche) et les résultats expérimentaux de Lobovskỳ et al. (colonne de droite).	45
3.3	Problème de rupture de barrage : comparaison entre l'évolution du front de l'onde d'eau obtenue par nos résultats numériques (points bleus), les résultats numériques de Vaucorbeil et al. (cercles pointillés rouges) et les résultats expérimentaux de Lobovskỳ et al. (ligne noire).	46
3.4	Problème de rupture de barrage : Instantanés des résultats numériques présentant les champs de pression (côté gauche) et de vitesse (côté droit)	46
3.5	Effondrement de matériau granulaire : Détails géométriques de la configuration expérimentale	47
3.6	Effondrement de matériau granulaire : comparaison entre les résultats numériques du modèle rhéologique de Bingham (colonne de gauche), le modèle SPH et les résultats expérimentaux de Nguyen et al (colonne de droite), à t : (A)=0 s, (B)=0.12 s, (C)=0.18 s, (D)=0.25 s, et (E)=0.41 s.	48
3.7	Description de la configuration initiale du glissement de terrain sous-marin le long d'un plan incliné	50
3.8	Glissement de terrain sous-marin : comparaison entre les séquences expérimentales (colonne de gauche) et les résultats numériques obtenus en utilisant le modèle rhéologique de Bingham généralisé de l'étude actuelle, avec $\tau_y = 1000$ pa (colonne de gauche), à $t=0.4$ s et $t=0.8$ s.	51
3.9	Glissement de terrain sous-marin : Evolution de vecteurs de vitesse dans divers instants	52
3.10	Géométrie initiale de la colonne d'eau avec un obstacle rigide	52
3.11	Interaction fluide structure-fixe; à gauche : résultats expérimentaux ; à droite : résultats numériques obtenus par notre modèle numérique SPH. at t : (A)=0 s, (B)=0.1 s, (C)=0.2 s, (D)=0.3 s, (E)=0.5 s et (F)=1 s.	53

3.12	Interaction fluide-structure fixe: Résultats numériques présentant les champs de pression (côté gauche) et de vitesse (côté droit)	54
3.13	Entrée d'eau dans une enveloppe de cylindre : description du problème. . .	55
3.14	Interaction fluide structure-mobile: Comparaison entre la forme de la surface de l'eau à différents instants: (à droite) les résultats expérimentals et (à gauche) les résultats par notre modèle SPH	56

Introduction

L'interaction fluide-structure (IFS) est un domaine complexe et multidisciplinaire d'une grande importance dans diverses applications d'ingénierie et scientifiques [1, 2]. Comprendre la dynamique de l'interaction fluide-structure est essentiel pour la conception et l'optimisation de divers systèmes, tels que les structures navales, les aéronefs et les processus industriels [3]. L'un des exemples les plus significatifs de l'IFS est l'interaction entre les fluides et les matériaux granulaires, qui revêt une grande importance dans de nombreux processus naturels et industriels [4].

Un exemple d'interaction fluide-matériau granulaire est celui des glissements de terrain sous-marins, qui se produisent lorsqu'une masse de sédiments glisse le long de la pente du fond marin et dans l'océan [5]. Ces glissements de terrain peuvent avoir un impact significatif sur l'environnement océanique, car ils peuvent générer des tsunamis, perturber les voies maritimes et endommager les structures navales. Par exemple, le glissement de terrain sous-marin de Taan Fjord en 2015, survenu en Alaska, a provoqué un tsunami qui a endommagé un village de pêcheurs voisin. Un autre exemple concerne les glissements de terrain subaériens, qui se produisent lorsqu'une masse de roche, de sol ou de débris glisse le long d'une pente d'une montagne, d'une colline ou d'une autre zone en hauteur et dans une vallée ou une autre zone basse en eau. Les glissements de terrain subaériens peuvent avoir un impact dévastateur sur les vies humaines et les infrastructures. Par exemple, le glissement de terrain subaérien de Mindanao en 2019, survenu aux Philippines, a tué au moins 82 personnes et a causé des dommages importants aux habitations et autres structures. De plus, une illustration significative de l'interaction fluide-matériau granulaire concerne le comportement des matériaux granulaires dans les processus industriels, tels que l'exploitation minière, la production de pétrole et de gaz, et le traitement des sols. Les matériaux granulaires dans ces processus présentent une large gamme de comportements mécaniques et rhéologiques, et la représentation précise des matériaux granulaires est cruciale pour simuler les problèmes d'interaction fluide-structure [6].

L'objectif principal de ce projet est de modéliser et de simuler l'interaction entre les fluides et les structures, en se concentrant spécifiquement sur les interactions entre des

fluides et des structures de natures différentes. L'approche sans maillage Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) est utilisée pour modéliser des particules physiques individuelles dans le fluide et dans la structure, où leurs interactions sont régies par divers modèles SPH [7].

Ainsi, les structures constituées de matériaux granulaires sont modélisées comme des fluides non newtoniens, en utilisant des lois constitutives telles que le modèle de Bingham pour caractériser leur comportement viscoplastique [8]. En raison de la capacité de ces modèles à capturer la contrainte seuil et la viscosité des matériaux granulaires, une large gamme d'applications peut être simulée pour répondre aux besoins de divers domaines de recherche et d'ingénierie [9].

En intégrant ces techniques de modélisation et de simulation, la présente recherche contribue à une meilleure compréhension de la méthode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) et de son application à la modélisation de l'interaction fluide-structure (IFS), notamment en ce qui concerne les interactions entre les fluides et les matériaux granulaires. Ces éléments de compréhension peuvent être résumés comme suit :

- **Les algorithmes d'amélioration de la méthode SPH :** Ce travail présente un aperçu des avancées historiques et récentes dans les algorithmes d'amélioration de la méthode SPH, fournissant des informations précieuses sur l'évolution de cette technique numérique.
- **Variété d'algorithmes SPH pour la discrétisation des équations gouvernantes:** L'étude aborde divers algorithmes SPH utilisés pour la discrétisation des équations gouvernantes, offrant une compréhension globale des options disponibles pour les simulations SPH.
- **L'utilisation d'un code SPH faiblement compressible :** Un code numérique utilisant la méthode SPH faiblement compressibles (WCSPH) a été exploité. Ce code est adapté pour modéliser des scénarios complexes impliquant des IFS, améliorant la capacité à traiter des problèmes du monde réel.
- **Implémentation des lois constitutives pour des dynamiques couplées:** Le projet introduit des lois constitutives conçues pour aborder simultanément le comportement des structures granulaires et la dynamique des fluides. Ces lois établissent un couplage robuste et naturel entre les deux phases physiques, permettant des simulations plus précises.
- **Validation et vérification :** Le modèle SPH utilisé est rigoureusement validé à travers son application à une variété de cas d'essai complexes impliquant des fluides, des

structure, des écoulements granulaires et leurs interactions. Des études de validation expérimentale et numérique sont présentées pour démontrer l'applicabilité et la précision du modèle SPH développé.

Cette recherche est organisée en quatre parties principales. La première partie sert d'introduction, offrant des informations de base sur l'interaction fluide-structure. Elle propose également un aperçu des principaux objectifs et des questions de recherche de ce projet. Dans le premier chapitre suivant, une revue de littérature exhaustive est présentée, mettant l'accent sur l'état actuel de l'art dans la modélisation et la simulation de l'interaction fluide-structure, avec une emphase sur la méthode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) et ses applications. Le deuxième chapitre aborde spécifiquement l'implémentation des lois constitutives de Bingham et les équations gouvernantes de la méthode SPH, fournissant un compte rendu détaillé du processus, y compris les équations utilisées et les méthodes numériques appliquées. Passant au troisième chapitre, il examine la validité des modèles implémentés, en les soumettant à une série de simulations numériques impliquant des interactions fluide-structure. Ces résultats de simulation sont ensuite minutieusement comparés à des données expérimentales et des résultats d'autres méthodes numériques, facilitant une discussion approfondie des avantages et des limites de la méthode SPH. Enfin, le projet se conclut par un les principales conclusions et une discussion des pistes potentielles pour de futures recherches dans ce domaine.

Chapiter 1

Généraliste sur L'interaction fluide-strecteur avec la méthode SPH

1.1 Introduction

Ce chapitre fournira un aperçu de l'état actuel de l'art dans la modélisation et la simulation de l'interaction fluide-structure (IFS) en utilisant la méthode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). Nous couvrirons les principes fondamentaux du SPH, ses forces et ses faiblesses, ainsi que ses applications dans divers domaines. À la fin de ce chapitre, les lecteurs auront une compréhension solide de l'état actuel de la modélisation de l'IFS en utilisant le SPH et des opportunités pour des recherches futures dans ce domaine.

1.2 Les interactions fluide-structure (IFS)

1.2.1 Définition, description et importance de l'IFS

L'interaction fluide-structure (IFS) est un domaine multidisciplinaire qui étudie les interactions entre les écoulements de fluides et les structures solides [10]. Ces interactions peuvent se présenter sous diverses formes, telles que l'écoulement d'air ou d'eau sur un objet solide [11], ou le déplacement d'une structure à travers un fluide [12]. En IFS, le mouvement du fluide est régi par les lois de la dynamique des fluides, tandis que le mouvement de la structure est régi par les lois de la mécanique des solides . Les interactions entre le fluide et la structure sont déterminées par les conditions limites à l'interface fluide-structure. Ces conditions limites peuvent inclure le transfert de quantité de mouvement, d'énergie et de masse entre le fluide et la structure [13].

L'étude de l'IFS est importante dans divers domaines, notamment l'ingénierie, la physique, la biologie, la géophysique et bien d'autres. En ingénierie, l'IFS est utilisée pour étudier le comportement des systèmes fluide-structure, tels que les avions [14], les navires [15] et les structures marines [16]. En physique, l'IFS est utilisée pour étudier le comportement des systèmes naturels, tels que l'écoulement de l'eau dans une rivière ou le déplacement d'un oiseau dans l'air [17]. En biologie, l'IFS est utilisée pour étudier le comportement des organismes vivants, tels que les poissons et les baleines, lorsqu'ils se déplacent dans l'eau. En géophysique, l'IFS est utilisée pour étudier le comportement des systèmes fluide-structure et comprendre les interactions entre les fluides et les structures solides dans les systèmes géophysiques. Par exemple, elle est utilisée pour étudier les géo-désastres, tels que les tsunamis survenus après des glissements de terrain subaériens et sous-marins [18].

1.2.2 Aperçu des différentes méthodes de modélisation et de simulation pour l'IFS

Les méthodes de modélisation et de simulation pour l'interaction fluide-structure (IFS) peuvent être largement classées en deux catégories : les méthodes basées sur le maillage et les méthodes sans maillage [19].

Méthodes basées sur le maillage

Les méthodes basées sur le maillage impliquent la discrétisation des domaines fluides et structurels par l'utilisation d'un maillage. Les méthodes basées sur le maillage les plus largement utilisées pour l'IFS sont la méthode des éléments finis (MEF) et la méthode des volumes finis (MVF).

La MEF est une technique robuste pour simuler l'IFS, offrant une polyvalence dans le traitement de diverses géométries et conditions limites. Elle trouve une application étendue dans l'analyse de structures solides telles que les ponts, les bâtiments et les composants d'avions [20]. La méthode consiste à subdiviser la structure en petits éléments pour résoudre ensuite les équations du mouvement pour chaque élément.

En revanche, la MVF excelle dans la simulation des écoulements de fluides, démontrant son efficacité sur un large spectre de dynamique des fluides et de géométries. Elle est couramment utilisée dans l'analyse de phénomènes tels que l'écoulement de l'eau dans les rivières, l'écoulement de l'air sur les avions et l'écoulement de pétrole dans les pipelines. Cette méthode repose sur la partition du domaine fluide en petits volumes de contrôle, suivie de la résolution des équations du mouvement pour chaque volume de contrôle.

Lors de la simulation de l'IFS à l'aide de la MEF et de la MVF, les équations du mouvement pour le fluide et la structure sont couplées à l'aide d'une approche de couplage bidirectionnel ou monolithique . L'approche de couplage bidirectionnel consiste à résoudre séparément les équations du mouvement pour le fluide et la structure, puis à échanger des informations entre les deux solutions à chaque pas de temps . En revanche, l'approche monolithique implique la résolution simultanée des équations du mouvement pour le fluide et la structure .

Le principal inconvénient de ces méthodes réside dans leurs exigences computationnelles substantielles et la nécessité d'une expertise dans l'utilisation de logiciels spécialisés . De plus, les approches basées sur le maillage présentent des limites lorsqu'elles sont appliquées à des simulations impliquant des déformations importantes, des interfaces matérielles mobiles, des inhomogénéités significatives, des frontières déformables ou des surfaces libres . Ces méthodes peuvent avoir du mal à représenter avec précision de tels scénarios complexes. Sur la Figure 1.1, nous fournissons une illustration schématique de la discrétisation à l'aide des méthodes basées sur le maillage de la MEF et de la MVF.

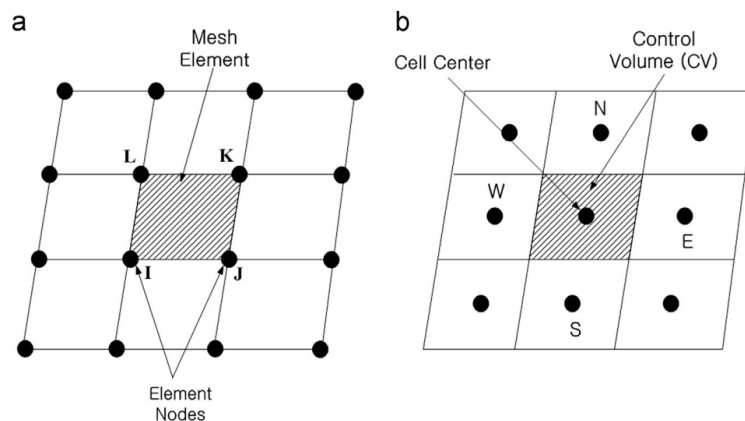


Fig. 1.1 Représentation schématique des méthodes basées sur le maillage : (a) la méthode des éléments finis (MEF), et (b) la méthode des volumes finis (MVF). (image de [21])

Méthodes sans maillage

Pour contourner les problèmes liés à la connectivité des nœuds, une classe distincte de techniques numériques, connue sous le nom de méthodes sans maillage, a été développée [22, 23]. Ces méthodes révolutionnent le processus de discrétisation traditionnel en permettant de représenter le continuum comme un ensemble de particules indépendantes

. Cette caractéristique simplifie considérablement le traitement des problèmes

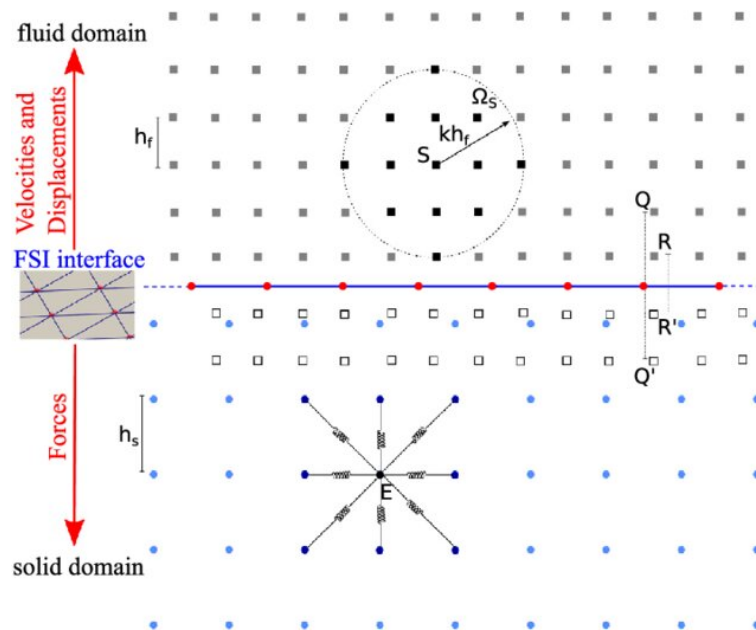


Fig. 1.2 Représentation schématique de la méthode SPH : croquis en 2D des domaines de calcul du fluide et du solide (image de [24])

de grandes déformations et facilite une représentation précise des interfaces mobiles, tout en maintenant un niveau raisonnable d'efficacité computationnelle [22].

Lorsque ces nœuds sont conçus comme des éléments substantiels, simulant efficacement des particules dans le domaine matériel et portant ses propriétés physiques, l'approche est justement appelée "méthodes de particules sans maillage (MPM)" [25]. Ce paradigme adopte généralement un cadre lagrangien [26].

Les méthodes de particules sans maillage (MPM) englobent un éventail de techniques, dont la Méthode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) [27], et diverses autres méthodes de particules sans maillage. Chacune de ces méthodes a ses propres forces et faiblesses, et le choix de la méthode dépend du problème spécifique étudié, ainsi que des ressources computationnelles disponibles.

1.3 La méthode (SPH)

1.3.1 Description de la méthode SPH

Dans cette étude, nous accordons une importance particulière à la méthode SPH, une approche lagrangienne sans maillage reconnue pour son efficacité et sa robustesse. Cette technique représente le continuum à travers des particules discrètes, avec le suivi de leurs mouvements dans le temps. La méthode SPH utilise des fonctions d'interpolation et des noyaux pour estimer les propriétés physiques dans tout l'espace, facilitant une distribution uniforme des propriétés du fluide [28]. Dans le cadre de la SPH, des propriétés telles que la densité, la vitesse et la pression sont calculées pour chaque particule. Les interactions entre les particules sont déterminées à l'aide de noyaux de lissage, qui approximent les propriétés locales du fluide, assurant une représentation plus précise. Ces interactions sont calculées en agrégeant les contributions de toutes les particules à l'intérieur du noyau de lissage.

La polyvalence de la méthode SPH s'étend à la simulation d'une large gamme de scénarios, comprenant les écoulements de liquides et de gaz, ainsi que les interactions fluide-structure. Son applicabilité s'étend à des géométries complexes, comme celles rencontrées dans les milieux poreux et les écoulements multiphasiques. De plus, la méthode SPH trouve une utilité précieuse dans les études astrophysiques, océanographiques et météorologiques. Ainsi, elle peut être couplée à d'autres modèles physiques pour simuler une diversité de phénomènes, y compris la combustion, les explosions et les interactions solide-fluides.

Un avantage notable de la méthode SPH réside dans sa capacité à gérer les changements topologiques et les frontières mobiles sans nécessiter un remaillage ou un raffinement fastidieux, ce qui peut représenter un fardeau computationnel important dans les méthodes basées sur le maillage. De plus, la méthode SPH se prête bien au calcul parallèle, permettant des simulations à grande échelle sur des supercalculateurs. Cependant, il est important de noter que la méthode SPH peut engendrer des coûts computationnels, nécessitant une considération judicieuse des ressources lors de son application .

1.3.2 Fondements de la méthode SPH

En 1977, la méthode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) a émergé, initialement élaborée par les chercheurs Lucy [28] et Monaghan [29] pour la simulation de phénomènes astrophysiques. Au fil du temps, ses applications se sont étendues aux domaines de la mécanique des solides et des fluides, trouvant une utilité dans une gamme diversifiée de scénarios. Cela est dû à sa capacité à adresser efficacement les complexités inhérentes à divers problèmes physiques. Fondamentalement, cette technique lagrangienne implique de

discrétiser le domaine continu en un ensemble fini de particules. Ces particules acquièrent les attributs physiques pertinents grâce à des interpolations pondérées des particules voisines. Il est important de noter que seules les particules se trouvant dans le domaine d'influence (délimité par une distance maximale de (kh) de la particule focalisée en cours d'étude) influencent le comportement des propriétés physiques de ladite particule focale.

La méthode SPH repose sur une identité mathématique valable pour une fonction f bien définie et continue, comme illustré dans l'équation suivante :

$$f(r_i) = \int_{\Omega} \delta(r_i - r_j) f(r_j) dr_j^n \quad (1.1)$$

Ici, dr_j^n représente le volume élémentaire situé à la position r_j , et $\delta(r_i - r_j)$ représente la fonction de Dirac ou delta. Cependant, en raison du manque de continuité et de différentiabilité de la fonction delta, en substituant la fonction delta de Dirac par un noyau ou une fonction de lissage W , nous dérivons une approximation de la fonction f à la position r_i conduisant à :

$$f(r_i) \approx \int_{\Omega(kh)} W(r_i - r_j, h) f(r_j) dr_j^n \quad (1.2)$$

Ici, h représente la longueur de lissage, communément définie comme une constante par rapport à la distance initiale entre les particules Δx_0 [30]. Il est important de souligner que h peut être adapté pour des particules individuelles, augmentant ainsi la précision de la méthode SPH.

La fonction noyau opère dans un support compact de rayon kh , où une particule à la position r_i interagit uniquement avec les particules voisines r_j . Cela limite le domaine global Ω au domaine à support compact $\Omega(kh)$, réduisant ainsi le temps de calcul. La constante k dépend du choix de la fonction noyau de lissage. La figure 1.3 donne une représentation visuelle des particules lagrangiennes positionnées dans le domaine d'influence, délimité par une circonférence avec une longueur de lissage équivalente à (h) .

1.3.3 Fonctions noyau de lissage

Dans la méthode SPH, une fonction noyau de lissage est utilisée pour calculer les dérivées spatiales des propriétés du continuum, telles que la densité et la vitesse. La fonction noyau de lissage est une fonction qui est utilisée pour lisser les propriétés du fluide sur une petite région autour de chaque particule. Plusieurs fonctions noyaux de lissage peuvent être utilisées dans la méthode SPH, chacune ayant ses propres avantages et inconvénients. La fonction noyau de lissage peut être représentée sous une forme générale comme suit :

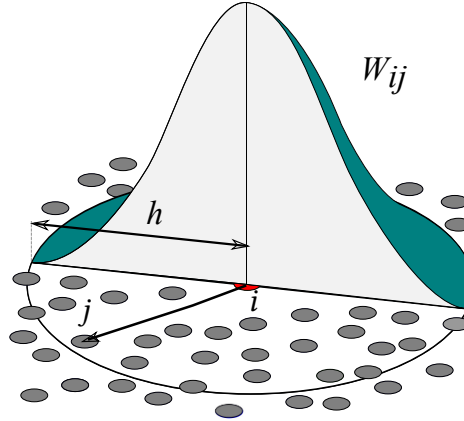


Fig. 1.3 Description du domaine physique en utilisant une fonction de lissage dans le cadre de la méthode SPH

$$W(r_{ij}, h) = W(r, h) = \frac{\eta_n}{h^n} Q\left(\frac{r}{h}\right) = \frac{\eta_n}{h^n} Q(q) \quad (1.3)$$

Où n est le nombre de dimensions de l'espace, Q est une fonction de la distance adimensionnelle $q = \frac{r}{h}$, et η_n est une constante dépendant du choix de la fonction noyau et de la dimension de l'espace n . La lettre r désigne la distance variable entre deux points ($r = r_{ij} = \|r_i - r_j\|$).

L'une des fonctions noyaux de lissage les plus couramment utilisées est la fonction noyau cubique spline. La forme mathématique de cette fonction est donnée par :

$$Q(q) = \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3 & 0 \leq q < 1 \\ \frac{1}{4}(2-q)^3 & 1 \leq q < 2 \\ 0 & q \geq 2 \end{cases} \quad (1.4)$$

Où les constantes $\eta_1 = \frac{2}{3}$, $\eta_2 = \frac{10}{7\pi}$ et $\eta_3 = \frac{10}{\pi}$ sont utilisées pour 1, 2 et 3 dimensions, respectivement.

Le choix de la fonction de noyau de lissage dépend de l'application spéciale que et peut affecter la précision et la stabilité de la méthode SPH. Par exemple, le noyau spline cubique est un bon choix pour de nombreuses simulations SPH en raison de sa simplicité, tandis que le noyau spline quintique est souvent utilisé pour des simulations haute résolution [70]. De plus, dans le contexte de la méthode SPH, la fonction de noyau de lissage W garantit une influence plus importante des particules voisines les plus proches sur la valeur de la propriété physique dans la particule de référence.

Approximation du noyau de lissage d'une fonction

Dans la méthode SPH, la fonction noyau de lissage est utilisée pour approximer une fonction en interpolant les valeurs de la fonction au niveau des particules voisines. L'idée de base

est d'utiliser la fonction noyau pour pondérer la contribution de chaque particule voisine à la valeur de la fonction en un point donné. L'interpolation d'une fonction à un point i peut s'écrire comme suit :

$$f(r_i) \approx \sum_j^{n_b} f(r_j) W_{ij} V_j \quad (1.10)$$

Où, n_b est le nombre de particules j dans le voisinage de la particule i , le volume V_j de la particule j est défini comme $V_j = \frac{m_j}{\rho_j}$, avec m_j et ρ_j la masse et la densité de la particule j , respectivement. La notation W_{ij} désigne $W_{ij} = W(r_{ij}, h) = W(r_i - r_j, h)$.

Approximation du noyau de lissage des dérivées d'une fonction

Dans la méthode SPH, la fonction noyau de lissage est également utilisée pour approximer les dérivées d'une fonction. L'idée de base est d'utiliser la fonction noyau pour pondérer la contribution de chaque particule voisine à la valeur de la dérivée de la fonction en un point donné.

Le gradient d'une fonction f en un point i peut s'écrire comme suit :

$$\nabla f(r_i) \approx \sum_j^{n_b} f(r_j) \nabla W_{ij} V_j \quad (1.11)$$

Où $f(r_i)$ est la valeur de la fonction au point i , $f(r_j)$ est la valeur de la fonction au point voisin j , m_j est la masse du point voisin j , r_{ij} est le vecteur pointant du point i vers j , h est la longueur de lissage et $W(r_{ij}, h)$ est la fonction noyau de lissage.

De même, la divergence d'une fonction vectorielle en un point i peut s'écrire comme suit :

$$\nabla \cdot \mathbf{F}_i = \sum_{j=1}^N m_j \frac{\mathbf{F}_j - \mathbf{F}_i}{\|r_{ij}\|} \cdot \mathbf{r}_{ij} W(r_{ij}, h) \quad (1.12)$$

Où $\mathbf{F}_i$ est la fonction vectorielle au point i , $\mathbf{F}_j$ est la fonction vectorielle au point voisin j , m_j est la masse du point voisin j , $\mathbf{r}_{ij}$ est le vecteur pointant du point i vers j , h est la longueur de lissage et $W(r_{ij}, h)$ est la fonction noyau de lissage.

Comme discuté précédemment, le choix de la fonction noyau de lissage affecte la précision de l'approximation. Tout comme pour l'approximation de la fonction, des fonctions noyaux telles que le noyau en spline cubique et le noyau gaussien sont couramment utilisées, mais le noyau gaussien est généralement plus précis pour approximer les dérivées en raison de sa différentiabilité infinie.

Il est important de noter que la précision des approximations des dérivées dépend également du choix de la longueur de lissage h et du nombre de particules dans la simulation. À mesure que le nombre de particules augmente et que h diminue, la précision des approximations des dérivées s'améliore.

Approximation du noyau de lissage des dérivées secondes d'une fonction

L'approximation du noyau de lissage des dérivées secondes de la fonction implique l'approximation du Laplacien d'une fonction, noté $\nabla^2 f(r_i)$, en un point i dans un espace continu à l'aide d'un ensemble de points discrets [30]. Le Laplacien est une mesure de la vitesse de changement de courbure de la fonction et est défini comme la divergence du gradient de la fonction, représenté mathématiquement comme suit :

$$\Delta f(r_i) = \nabla^2 f(r_i) = \nabla \cdot \nabla f(r_i) \approx \sum_j^{n_b} f(r_j) \nabla^2 W_{ij} V_j \quad (1.13)$$

Où ∇ est l'opérateur de gradient, et le point $(.)$ représente le produit scalaire.

L'approche d'approximation du noyau repose sur une convolution de la fonction avec un noyau de lissage, $W(r_{ij})$, où r_{ij} est la distance entre le point d'intérêt j et le point où la valeur est connue i . Le noyau est utilisé comme facteur de pondération pour estimer la fonction Laplacienne.

Une expression alternative pour l'approximation des dérivées secondes d'une fonction a est exprimée comme suit :

$$\Delta f(r_i) \approx 2 \sum_j^{n_b} \frac{f(r_i) - f(r_j)}{\|r_i - r_j\|^2} (r_i - r_j) \cdot \nabla W_{ij} V_j \quad (1.14)$$

L'équation 1.14 permet l'approximation efficace du Laplacien d'une fonction dans un espace continu en utilisant un ensemble de points discrets, offrant un équilibre entre efficacité computationnelle et précision .

1.3.4 Logiciels Utilisant la méthode SPH

Il existe différents logiciels qui implémentent la méthode SPH pour différentes applications. Ces logiciels fournissent des outils et des algorithmes pour simuler et analyser la dynamique des fluides, y compris les interactions fluide-structure, les écoulements diphasiques, voire même les phénomènes astrophysiques. Voici quelques logiciels populaires utilisant la méthode SPH :

DualSPHysics : C'est un logiciel open-source qui se concentre sur la simulation des écoulements à surface libre, comme les vagues d'eau et les problèmes d'ingénierie côtière. Il fournit une interface conviviale et prend en charge le calcul parallèle pour des simulations efficaces [31].

SPHysics : Il s'agit d'un autre logiciel open-source conçu pour simuler une large gamme de problèmes d'écoulement de fluides, y compris les écoulements diphasiques, les écoulements compressibles et les interactions fluide-structure. Il propose différents algorithmes numériques et des conditions aux limites pour gérer des scénarios complexes de dynamique des fluides [32].

Ces logiciels offrent généralement des outils de pré-traitement pour créer la distribution initiale de particules, définir les conditions aux limites et spécifier les propriétés physiques. Ils proposent également des capacités de post-traitement pour visualiser et analyser les résultats des simulations, y compris la génération d'animations et l'extraction des statistiques de l'écoulement [33]. Bien que ces logiciels offrent un moyen pratique de simuler les écoulements de fluides en utilisant la méthode SPH, il est important de noter que la validation et le calibrage adéquats par rapport aux données expérimentales sont cruciaux pour des résultats précis et fiables. De plus, la compréhension des algorithmes numériques sous-jacents et des limitations de la méthode SPH est essentielle pour assurer une utilisation et une interprétation appropriées des simulations .

1.4 Applications de la méthode SPH

Actuellement, les méthodes SPH suscitent un vif intérêt tant dans le domaine de la recherche que dans celui de l'ingénierie, en raison de leur capacité à modéliser une grande variété de

phénomènes. Elles sont notamment utilisées pour simuler les écoulements de fluides, le comportement des structures, ainsi que leurs interactions complexes.

1.4.1 Applications pour les fluides

La simulation de l'écoulement induit par une rupture de digue constitue l'un des cas tests les plus emblématiques et largement utilisés dans le cadre de la méthode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) [34]. Ce benchmark est particulièrement représentatif des défis numériques que SPH permet de relever, notamment la présence d'une surface libre, ses déplacements importants et les phénomènes de rupture violente.

La figure 1.4 illustre les séquences de simulation réalisées par Marrone et al. [3] en utilisant le schéma diffusif δ -SPH, montrant la capacité de cette approche à capturer la dynamique complexe de l'écoulement.

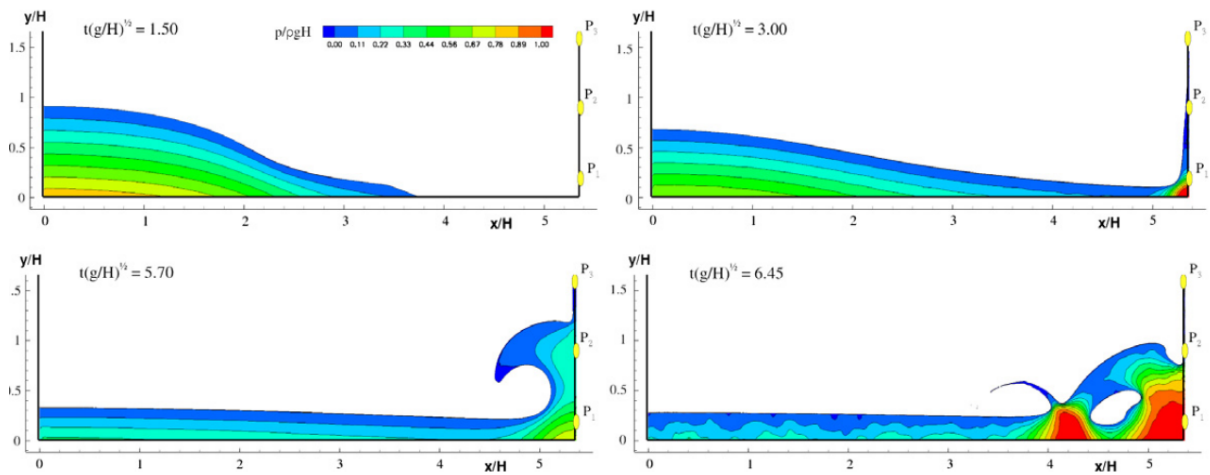


Fig. 1.4 Instantanés de l'évolution de l'écoulement consécutif à la rupture de digue contre un mur vertical, d'après les travaux de Marrone et al. [35].

De nombreuses autres applications peuvent également être citées, notamment en aérodynamique [36], dans les écoulements diphasiques avec bulles et phénomènes de coalescence dans le cadre de la méthode interfaciale multiphase SPH [37], ou encore dans des simulations à très haute résolution (plus de 10^9 particules) pour modéliser l'interaction de vagues de grande ampleur avec une plateforme pétrolière offshore [33], entre autres.

1.4.2 Applications pour les Structures

La méthode SPH peut être appliquée avec succès à une variété de comportements mécaniques, tels que les comportements élastiques, plastiques et élasto-plastiques.

Parmi les tests de référence utilisés pour la simulation de la déformation élastique des structures, on peut citer la plaque oscillante [41] et la collision de deux anneaux en caoutchouc [41]. Les figures 1.10 et 1.11 illustrent respectivement les séquences de simulation de la plaque oscillante et de la collision des deux anneaux.

La convergence du modèle élastique SPH est démontrée à travers la figure 1.12, qui présente l'évolution temporelle de la position verticale d'un point situé à l'extrémité de la plaque, pour différentes résolutions spatiales. L'ensemble de ces résultats est issu des travaux de Gray et Monaghan [41].

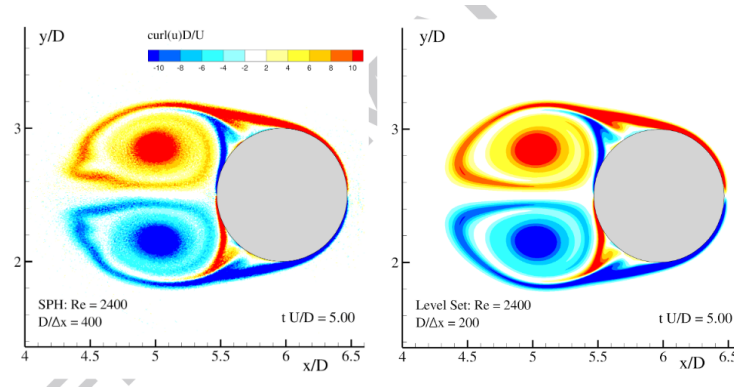


Fig. 1.6 Simulation WCSPH d'un écoulement non visqueux autour d'un cylindre circulaire pour un nombre de Reynolds $Re = 2400$ — comparaison du champ de vorticité obtenu par la méthode SPH (à gauche) et par un solveur de Navier-Stokes aux différences finies (à droite) (Marrone et al. [36])

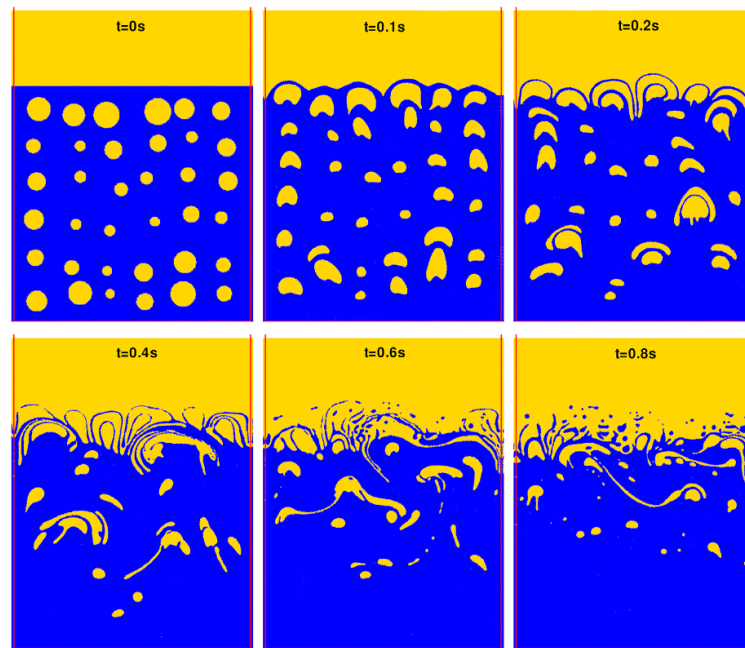


Fig. 1.7 Écoulement diphasique (huile-eau) dans un séparateur fermé simplifié — champs de densité présentés à différents instants. (Grenier et al [37])

Les géomatériaux peuvent être considérés comme des matériaux purement plastiques. La méthode SPH offre un avantage notable pour la simulation de ce type de comportement, en les représentant à l'aide d'un modèle de fluide non newtonien présentant un écoulement lorsqu'un certain critère de rupture est atteint — tels que les critères de Mohr-Coulomb

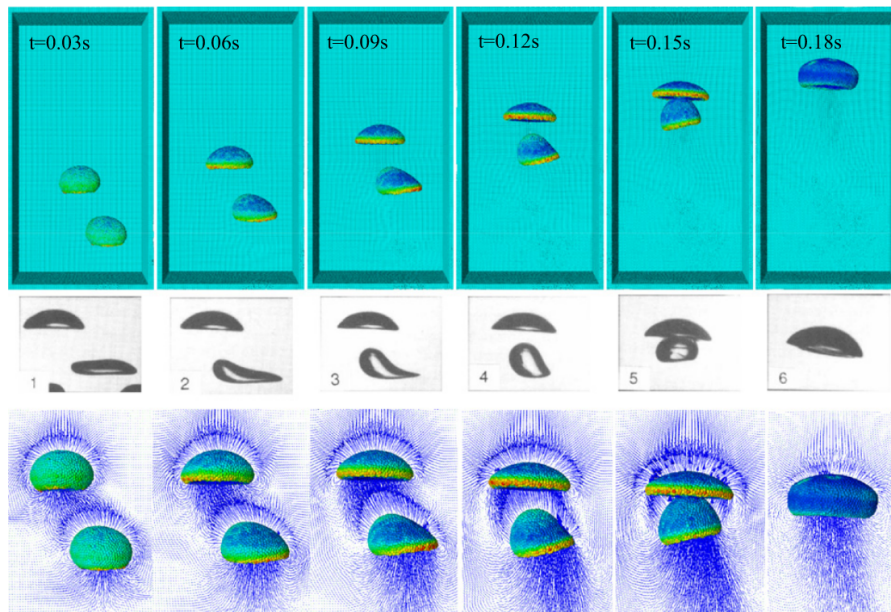


Fig. 1.8 Instantanés SPH de la coalescence oblique à différents instants caractéristiques (en haut) ; instantanés expérimentaux issus de Brereton et Korotney (au centre) ; champ de vitesse autour des bulles (en bas). (Zhang et al [39])

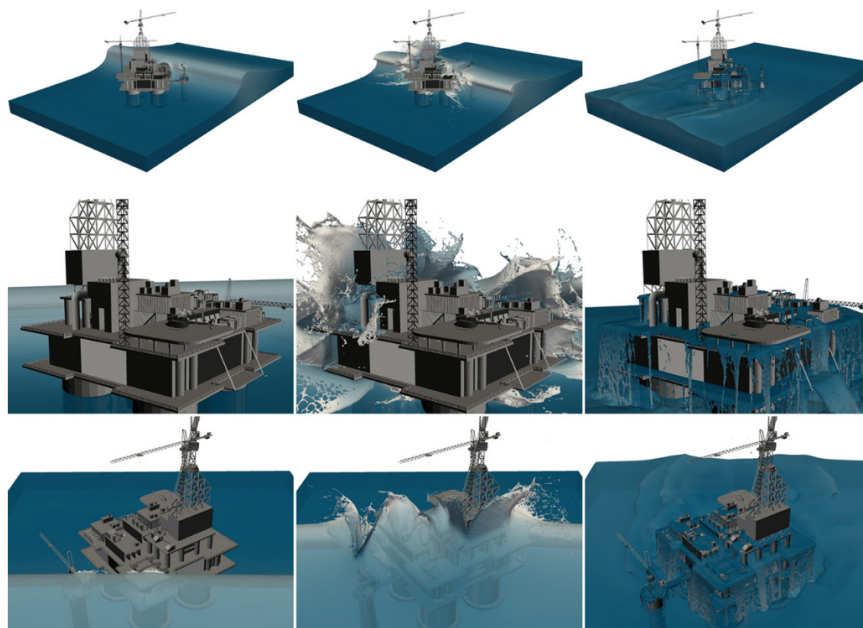


Fig. 1.9 Instants successifs $t = 2,2; 3,2; 10$ [s] de la simulation de l'interaction d'une vague de grande amplitude avec une plateforme pétrolière offshore, réalisée avec 10^9 particules (Dominguez et al. [40])

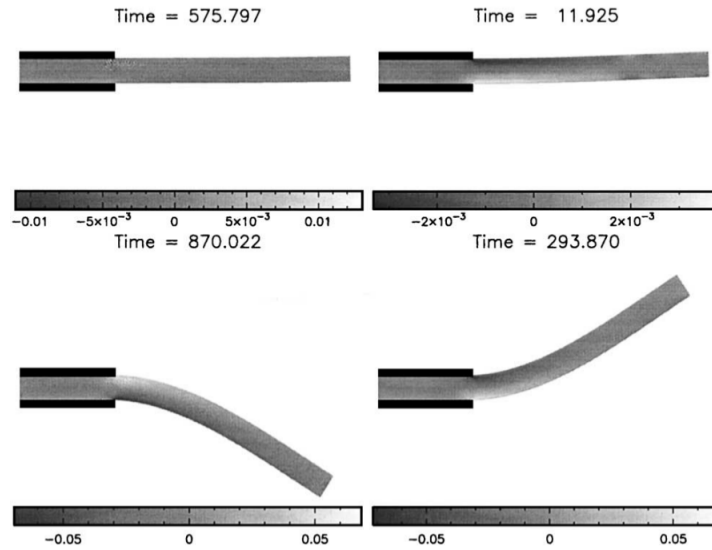


Fig. 1.10 Séquences de simulation de l'oscillation d'une plaque élastique (Gray et Monaghan [41])

Ce type de modélisation est couramment désigné sous le nom de modèle viscoplastique.

De nombreuses applications de ce modèle à la simulation du comportement d'écoulement des matériaux granulaires sont rapportées dans la littérature. En parallèle, les modèles constitutifs élasto-plastiques se sont également révélés adaptés à la modélisation des matériaux granulaires [42].

Les figures 1.13 et 1.14 illustrent respectivement l'état d'équilibre d'une rupture de digue de sédiments en 2D simulée avec un modèle viscoplastique, et l'effondrement d'une colonne cylindrique de sable modélisé avec un modèle élasto-plastique.

Par ailleurs, Douillet-Grellier et al. [44] ont utilisé les critères de Drucker-Prager et de Grady-Kipp, dans le cadre d'un modèle SPH élasto-plastique, afin de simuler la rupture en compression uniaxiale d'échantillons de gypse contenant un défaut incliné (voir figure 1.15).

1.4.3 Interactions fluide-structure

La déformation d'une plaque élastique soumise à une pression d'eau dépendante du temps constitue un cas test de référence bien connu, proposé par Antoci et al. [46], pour la validation des codes de simulation d'interaction fluide-structure impliquant des structures élastiques [45].

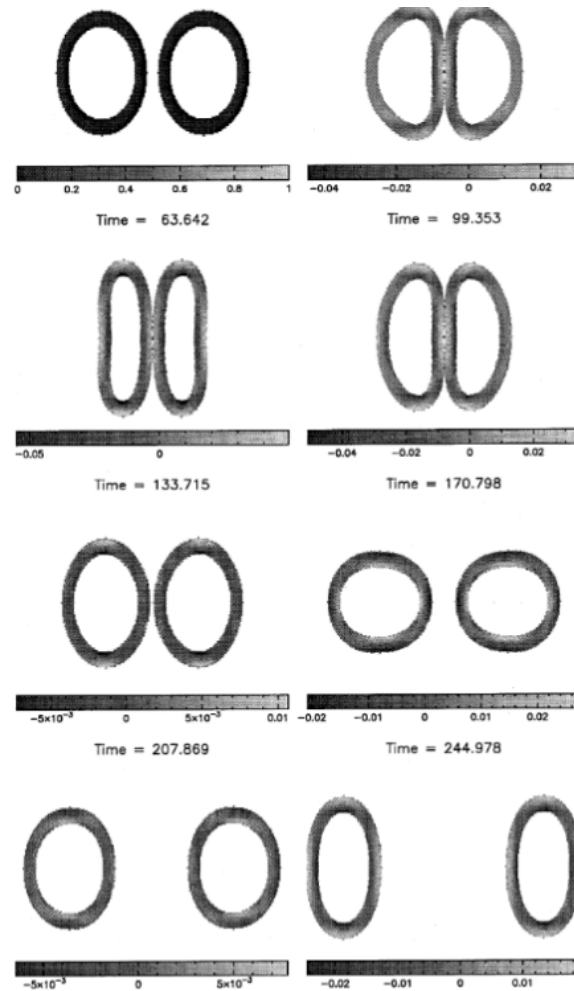


Fig. 1.11 Séquences de simulation de la collision entre deux anneaux élastiques (Gray et Monaghan [41])

Les figures 1.16 et 1.17 présentent une comparaison entre les résultats obtenus par la méthode SPH et les essais expérimentaux, en termes de séquences de déformation simulée ainsi que de l'évolution temporelle des déplacements horizontal et vertical de l'extrémité libre de la plaque.

Un autre cas test concerne la modélisation de la rupture de digue sur une cloison hypoélastique, proposé par Rafiee et al. [46], et comparé à la méthode des éléments finis particuliers (PFEM) . Ce benchmark est également utilisé pour la validation des codes d'interaction fluide-structure impliquant des structures élastiques.

La figure 1.18 présente une comparaison des séquences de simulation de l'interaction entre l'écoulement de rupture de digue et une cloison hypoélastique, obtenues à l'aide des méthodes numériques PFEM et SPH .

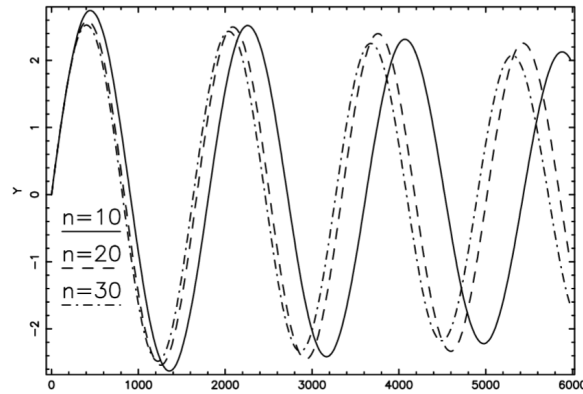


Fig. 1.12 Étude de convergence du cas test de la plaque oscillante, réalisée avec trois résolutions en particules : $n = 10, 20, 30$ particules selon l'épaisseur de la plaque. (Gray and Monaghan [41])

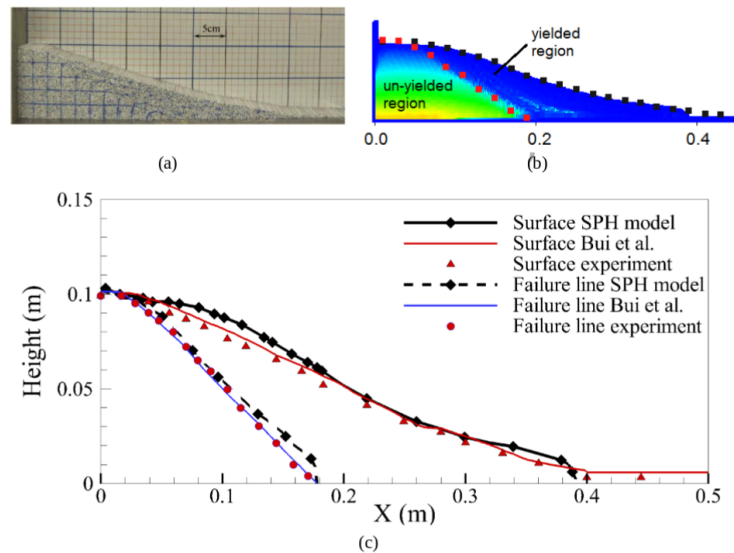


Fig. 1.13 Comparaison de la simulation de la rupture de digue de sédiments entre : (a) les données expérimentales de Bui et al. [42], (b) les résultats obtenus par Fourtakas et Rogers [43] à l'aide du modèle viscoplastique, (c) la superposition du profil expérimental et de la surface plastifiée du sédiment, comparant les données de Bui et al. [42] et le modèle de Fourtakas et Rogers [43] à l'état d'équilibre ($t = 0,64$ s). (Fourtakas and Rogers [43])

Dans le cadre des interactions fluide-sol, un exemple classique et relativement simple de modélisation numérique concerne la génération de vagues par un glissement sous-marin . Ce cas test est couramment utilisé pour la validation des codes SPH, notamment en raison de la disponibilité de données expérimentales fournies par Rzedkiewicz et al. [50].

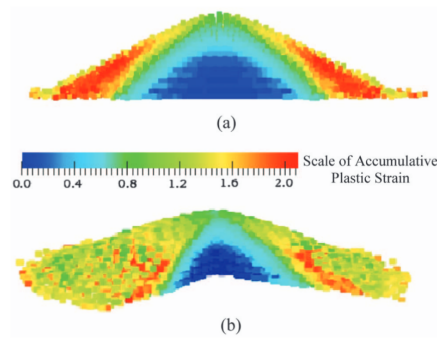


Fig. 1.14 État d'équilibre de l'effondrement d'une colonne cylindrique de sable. Les particules sont colorées en fonction de la déformation plastique équivalente accumulée : (a) vue latérale ; (b) vue isométrique (Chen et Qiu [44]).

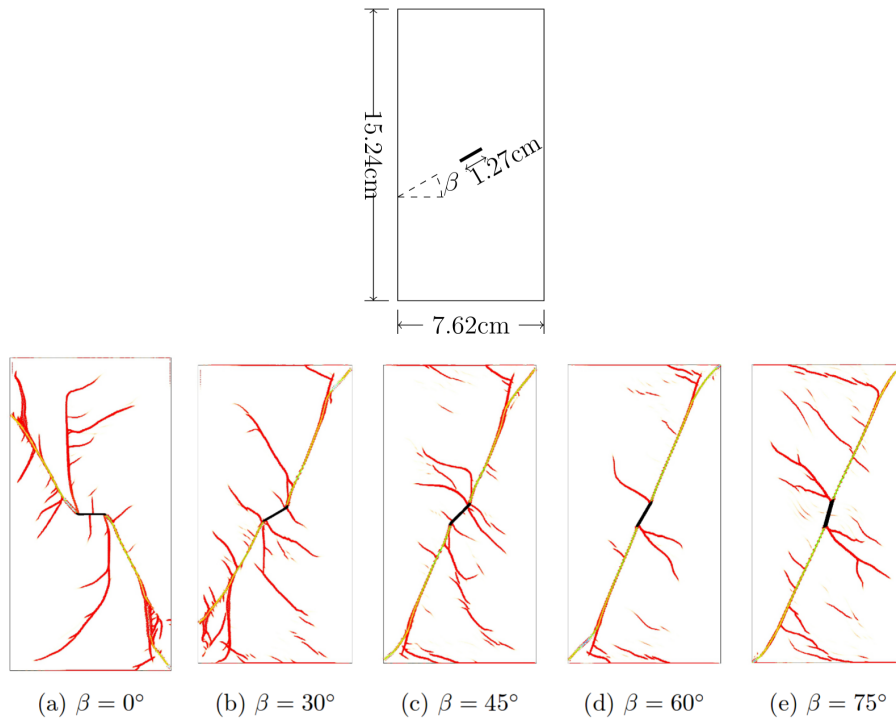


Fig. 1.15 Rupture en compression uniaxiale d'un échantillon de gypse contenant un défaut incliné. La figure supérieure montre l'état initial de l'échantillon, tandis que les figures inférieures présentent la simulation de la fissuration à l'aide de la méthode SPH, pour différents angles d'inclinaison du défaut. (Douillet-Grellier et al [45])

La figure 1.19 illustre la position des particules de fluide et de sol aux instants $t = 0$ s et $t = 0,8$ s, de gauche à droite respectivement (Capone et al. [49]). La figure 1.20 présente une

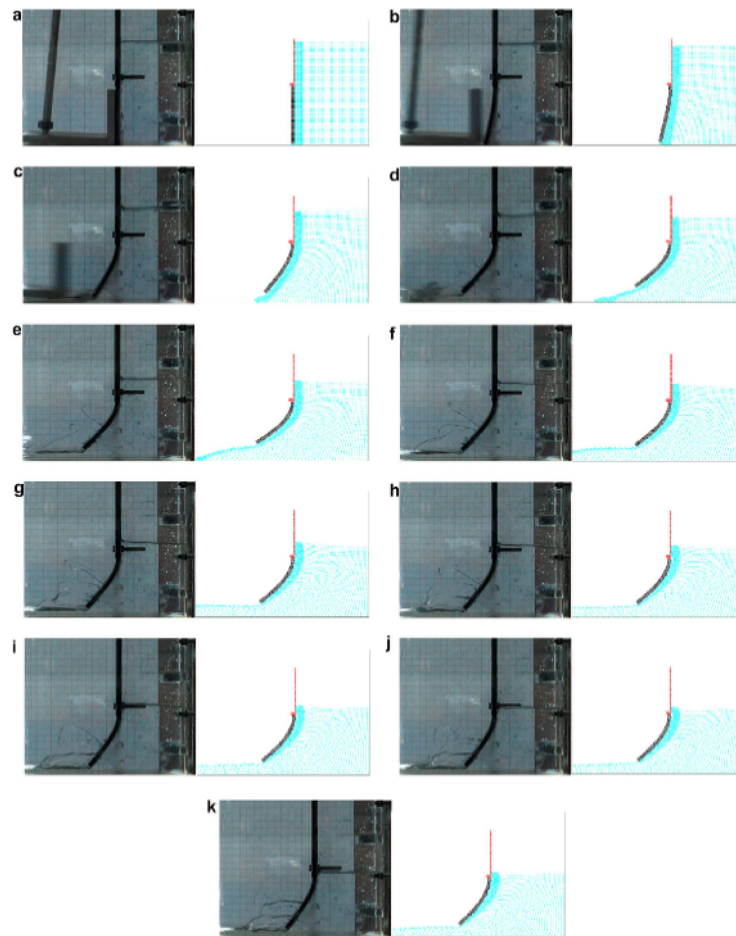


Fig. 1.16 Comparaison entre les images issues de l'expérience et les positions des particules SPH [46], à intervalles de 0,04 s, depuis $t = 0$ s (a) jusqu'à $t = 0,4$ s (k). (Antoci et al [46])

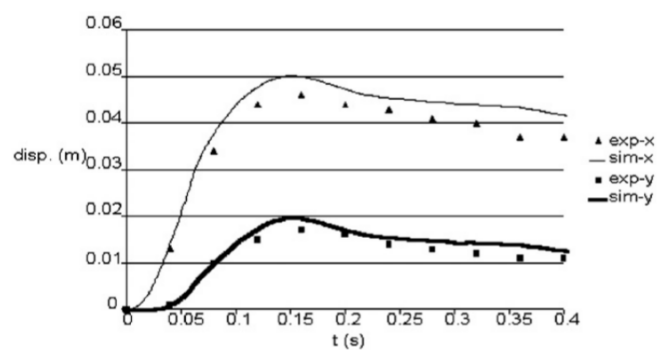


Fig. 1.17 Déplacements horizontal et vertical de l'extrémité libre de la plaque. (Antoci et al [46])

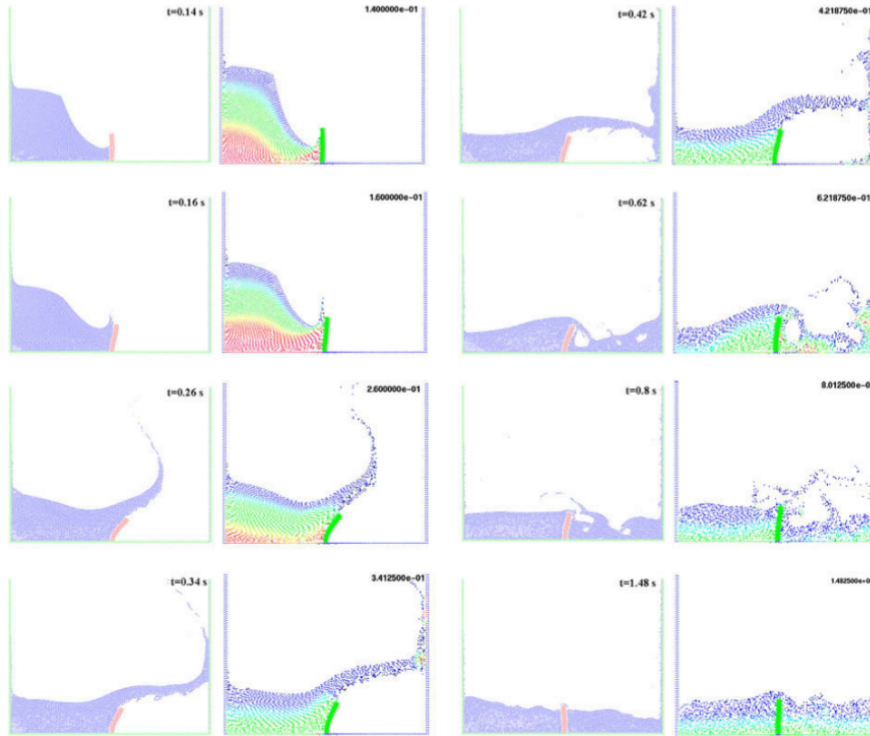


Fig. 1.18 Comparaison entre les résultats de la méthode des éléments finis particuliers (PFEM) [47] et les simulations SPH [48] pour la rupture de digue sur une cloison hypoélastique. (Rafiee and Thiagarajan [48])

comparaison des courbes de la surface libre de l'eau obtenues par la méthode SPH [49] avec les résultats expérimentaux de Rzadkiewicz et al. [50].

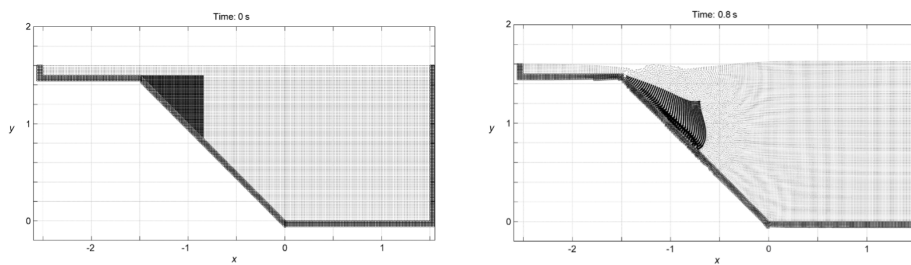


Fig. 1.19 Simulation d'un glissement sous-marin : l'image de gauche représente la position initiale des particules de sol et d'eau ($t = 0$ s), tandis que celle de droite correspond à l'instant $t = 0,8$ s (Capone et al. [49]).

Dans le cadre des interactions fluide-corps rigide, un cas test synthétique particulièrement pertinent a été proposé par Canelas et al. [51] pour simuler l'impact d'une vague violente sur la géométrie réelle d'un terminal à conteneurs du port de Sines — une infrastructure

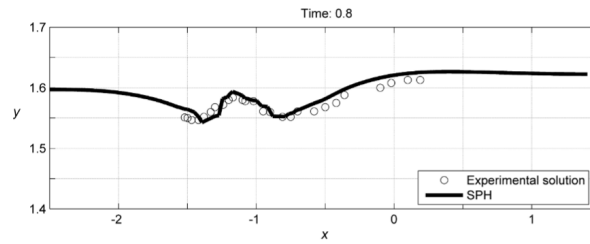


Fig. 1.20 Élévation de la surface libre de l'eau à l'instant $t = 0,8$ s : comparaison entre les résultats SPH et les données expérimentales de Rzadkiewicz et al. [50]. (Capone et al [49])

portuaire de grande envergure située sur la côte portugaise. Ce cas d'étude permet d'explorer les capacités de la méthode SPH pour des configurations complexes à l'échelle industrielle.

La figure 1.21 présente quatre séquences sélectionnées de cette application.

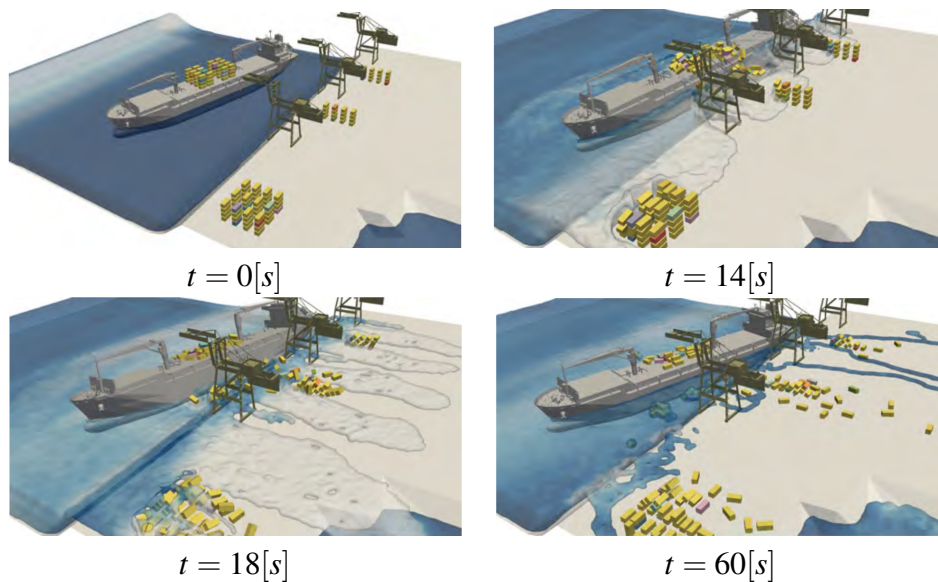


Fig. 1.21 Simulation de l'impact d'une vague violente sur le terminal à conteneurs du port de Sines aux instants $t = 0, 14, 18, 60$ s. (Canelas et al [51])

Chapiter 2

Modélisation des interactions fluide-struture avec une approche SPH

Dans les dernières décennies, la modélisation des interactions fluide-structure a attiré l'attention de nombreux chercheurs, scientifiques et ingénieurs, car ces phénomènes se produisent dans de nombreux domaines naturels et industriels réalistes .

L'interaction entre les fluides et les matériaux granulaires est un exemple important d'interaction fluide-structure et est essentielle dans une grande variété de processus, allant des dangers géophysiques aux opérations industrielles. En raison des nombreuses manières dont les fluides et les matériaux granulaires peuvent interagir, de nombreuses études numériques utilisant à la fois des méthodes basées sur le maillage et des méthodes sans maillage pour modéliser, prédire et atténuer leurs dommages attendus .

Dans le cadre des méthodes sans maillage, la méthode SPH s'est imposée comme une approche prometteuse pour modéliser les interactions fluide-structure, y compris celles impliquant des interactions entre fluides et matériaux granulaires. Pour modéliser un phénomène physique, la méthode SPH divise le domaine de calcul en un ensemble de particules indépendantes, puis attribue à chacune séparément ses propriétés physiques (densité, masse, pression, etc.), selon les équations de mouvement. Mathématiquement, cela repose sur des approximations numériques des intégrales et des dérivées de fonctions continues en termes de leurs valeurs reproduites sous une forme discrète. L'un des principaux avantages de l'approche SPH dans la modélisation des IFS est sa capacité inhérente à suivre naturellement l'interface entre les phases, sans nécessiter d'algorithmes ou de traitements spécifiques. Cela est obtenu grâce à la nature lagrangienne des particules, en utilisant les différences de densités et de viscosités entre chaque phase. Par conséquent, la méthode SPH a prouvé son succès dans une variété d'applications [52].

En ce qui concerne le comportement dynamique et la nature complexe de l'interaction entre l'eau et les matériaux granulaires, des recherches approfondies ont été menées pour modéliser ce type de phénomène d'interaction fluide-structure (FSI) en tant que problème d'écoulement multiphasique à l'aide de la méthode SPH.

Ce travail vise à étudier de manière approfondie l'impact du modèle de Bingham largement utilisé, sur la simulation du comportement dynamique de l'eau, du matériau granulaire et de leur interaction en utilisant la méthode de l'hydrodynamique particulaire lissée faiblement compressible (WCSPH).

2.1 Modèles mathématiques

2.1.1 Équations gouvernantes

Dans cette étude, nous utilisons une approche SPH faiblement compressible (WCSPH), qui convient spécifiquement aux scénarios impliquant des déformations significatives dans les IFS. Pour modéliser efficacement l'interaction entre la structure et le fluide, nous considérons le matériau granulaire comme une masse de type fluide non Newtonien dans un problème d'écoulement multiphasique. Le mouvement des phases matériau granulaire et fluide est régi par les équations de continuité, de Navier-Stokes et de déplacement. Nous supposons que l'écoulement multiphasique est un seul continuum avec des densités et des viscosités multiples, faiblement compressible et s'écoulant dans des conditions isothermes. En incorporant ces hypothèses, nous pouvons exprimer le système d'équations gouvernantes pour chaque particule i dans un cadre lagrangien comme suit :

$$\begin{cases} \frac{d\rho_i}{dt} = -\rho_i \nabla \cdot \mathbf{v}_i \\ \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \frac{-\nabla p_i}{\rho_i} + \frac{\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_i}{\rho_i} + \mathbf{g}_i \\ \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{v}_i \end{cases} \quad (2.1)$$

où $\rho_i, p_i, \rho_{0i}, \mathbf{v}_i, \mathbf{r}_i$ et $\mathbf{g}_i$ représentent respectivement la densité, la pression, la densité de référence au repos, le vecteur de vitesse, le vecteur de position et le vecteur d'accélération gravitationnelle. $\boldsymbol{\tau}_i$ est la partie déviatorique du tenseur des contraintes de Cauchy, également connu sous le nom de tenseur visqueux pour les fluides. L'indice " i " dans les variables fait référence aux particules du domaine lagrangien, qui peuvent appartenir soit à la phase fluide soit à la phase solide.

Pour clôturer le système d'équations ci-dessus (Eq. (2.1)), selon la théorie SPH faiblement compressible, il est nécessaire d'ajouter une équation d'état qui calcule la pression en fonction de la densité au lieu de résoudre l'équation de Poisson comme dans le cas des schémas ISPH [53]. Dans ce travail, nous utilisons une équation d'état qui est exprimée dans le domaine pression-densité sous la forme :

$$p_i = p_r \left\{ \left(\frac{\rho_i}{\rho_{0i}} \right) - 1 \right\} \quad (2.2)$$

où ρ_{0i} et p_r représentent respectivement la densité de référence et la pression de référence. Dans ce cas de simulation, la pression de référence est évaluée en fonction de la densité de référence et de la vitesse du son de référence c_0 à l'aide de l'équation suivante :

$$p_r = \rho_{0i} c_{0i}^2 \quad (2.3)$$

2.1.2 Interactions fluide-matériau granulaire

Pour modéliser les interactions fluide-matériau granulaire, il convient de noter que le domaine computationnel est composé de deux phases, chacune avec sa propre rhéologie et donc son comportement dynamique spécifique. Dans des conditions réelles, la phase fluide (l'eau dans notre cas) peut s'écarter considérablement d'un fluide idéal (eau pure avec une viscosité négligeable) en raison de la présence de divers constituants tels que le limon et les fines particules [54]. Cependant, pour des raisons de simplicité et pour faciliter la modélisation mathématique, nous supposons que l'eau dans notre étude se comporte comme un fluide newtonien avec une viscosité constante, ce qui est une approximation raisonnable. Dans ce cas, la contrainte de cisaillement est directement proportionnelle au taux de cisaillement, et le paramètre unique qui les relie est la viscosité constante du fluide. Le matériau granulaire, en revanche, présente un comportement dynamique plus complexe car il possède les propriétés physiques d'un solide mais s'écoule comme un liquide dans certaines conditions. La contrainte de cisaillement est liée au taux de cisaillement via un paramètre non constant, qui est la viscosité apparente (voir Fig. 2.1). Par conséquent, les rhéologies non newtoniennes sont généralement adoptées pour modéliser les écoulements de matériaux granulaires.

La contrainte de cisaillement (tenseur déviateur) pour les fluides newtoniens peut être exprimée comme suit :

$$\tau = \mu D \quad (2.7)$$

où D représente le taux de cisaillement et est défini comme $D = \nabla v + (\nabla v)^T$, avec ∇v désignant le tenseur du gradient de vitesse, et le symbole de superposition T est le symbole du tenseur transposé. Tous les matériaux qui ne respectent pas l'équation (2.7) sont catégorisés comme des fluides non newtoniens.

Plusieurs lois constitutives viscoplastiques peuvent être utilisées pour décrire la rhéologie non newtonienne des matériaux granulaires.

Le modèle plastique de Bingham est l'un des modèles viscoplastiques les plus simples et les plus largement utilisés. Dans ce modèle linéaire à deux paramètres, le matériau granulaire

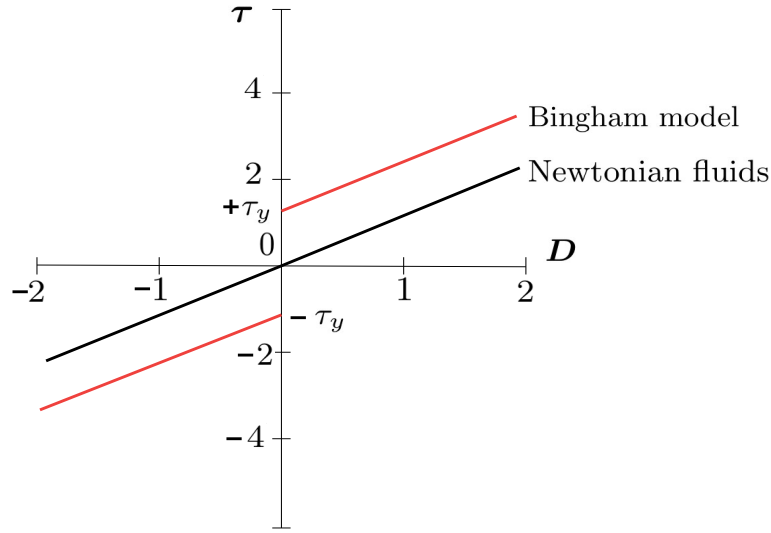


Fig. 2.1 Contrainte de cisaillement par rapport au taux de cisaillement pour les fluides newtoniens, les modèles rhéologiques de Bingham . Figure basée sur celle présentée par Mitsoulis [55]

se comporte comme un fluide newtonien au-dessus d'une valeur de contrainte limite appelée la contrainte seuil (τ_y). Sinon, il présente un comportement de corps rigide. Autrement dit, lorsque τ_y est dépassé, la structure subit des déformations et se comporte comme un fluide ; sinon, elle conserve une structure de corps rigide (voir Fig. 2.1). Mathématiquement, il peut être représenté comme suit :

$$\begin{cases} \tau = \left\{ \frac{\tau_y}{\|D\|_F} + \mu \right\} D & \|\tau\|_F \geq \tau_y \\ D = 0 & \|\tau\|_F < \tau_y \end{cases} \quad (2.8)$$

La notation $\|\cdot\|_F$ fait référence à la norme de Frobenius, ainsi :

$$\|D\|_F = \left(\frac{1}{2} D : D \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

$$\|\tau\|_F = \left(\frac{1}{2} \tau : \tau \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

Bien que la formulation (Eq. 2.8) soit couramment utilisée comme loi constitutive pour décrire la rhéologie des matériaux granulaires, le modèle souffre de discontinuités mathématiques, les rendant peu pratique pour les simulations numériques. Pour résoudre ce problème dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser le modèle de Bercovier et Engelman

Calculs de la contrainte seuil

Pour finaliser notre modèle, nous devons identifier la valeur de la contrainte seuil τ_y , car il s'agit d'un critère rhéologique crucial pour caractériser le comportement dynamique du matériau granulaire, généralement spécifié par l'utilisation de critères de rupture dépendant de la pression. Les critères de rupture de Mohr-Coulomb et de Drucker-Prager sont des modèles dépendant de la pression qui sont couramment adoptés pour déterminer la limite d'élasticité. Il convient de noter que les critères de Mohr-Coulomb et de Drucker-Prager sont identiques dans l'espace en 2D. Comme indiqué par Domnik et al. [56], le critère de Mohr-Coulomb dépendant de la pression pour le calcul de la contrainte seuil est un bon modèle rhéologique pour les écoulements granulaires car il inclut la nature frictionnelle du matériau granulaire, basée d'une part sur l'angle de repos (ϕ) (également connu sous le nom d'angle de frottement interne) et d'autre part, il garantit l'ajout d'une contrainte de traction constante pour inclure la cohésion (c) du matériau. Dans l'ensemble, le critère de Mohr-Coulomb utilise une enveloppe de rupture linéaire et les propriétés du matériau (condition de rupture) pour associer les contraintes de cisaillement et normales (τ, σ) comme suit :

$$\tau = c - \sigma \tan \phi \quad (2.15)$$

Par conséquent, la contrainte seuil τ_y d'un matériau qui cède sous le critère de Mohr-Coulomb peut être exprimée comme :

$$\tau_y = p \sin \phi + c \cos \phi \quad (2.16)$$

la contrainte seuil d'un écoulement granulaire est déterminée par la cohésion (c) et l'angle de frottement interne (ϕ) entre les grains, comme décrit dans l'équation (2.16). Cette équation, qui inclut l'effet de la cohésion, a été initialement proposée par Domnik et al. et a depuis été largement adoptée dans de nombreuses études sur les écoulements granulaires, notamment celles de Krimi et al. [57].

2.1.3 Interaction fluide–corps rigide

On considère un système fluide contenant un corps rigide flottant dont le centre de masse est noté R , avec une vitesse associée V . L'équation du mouvement du centre de masse du corps rigide discrétisé s'exprime comme suit :

$$M \frac{dV}{dt} = \sum_{k=1}^{n_k} m_k f_k \quad (2.19)$$

où k désigne la $k^{\text{ème}}$ particule rigide constituant le corps rigide global. f_k représente la force hydrodynamique par unité de masse exercée sur la particule frontière k , m_k est la masse de la particule rigide k , et n_k est le nombre total de particules constituant le corps rigide. La force f_k est donnée par :

$$f_k = \sum_{l=1}^{n_{FPs}} f_{kl} \quad (2.20)$$

où f_{kl} est la force par unité de masse exercée par la particule fluide l sur la particule frontière k [58].

L'équation de rotation du corps rigide s'écrit :

$$I \frac{d\Omega}{dt} = \sum_{k=1}^{n_k} m_k (r_k - R) \times f_k \quad (2.21)$$

où Ω désigne la vitesse angulaire, I est le moment d'inertie, et r_k est la position de la particule rigide k . Le symbole $\times$ représente le produit vectoriel.

Les valeurs de V et Ω sont obtenues par intégration des équations (2.19) et (2.21). Les particules frontières se déplacent en cohérence avec le mouvement du corps rigide. Ainsi, la vitesse d'une particule k s'exprime comme suit :

$$\frac{dr_k}{dt} = v_k = V + \Omega \times (r_k - R) \quad (2.22)$$

La méthode décrite ci-dessus assure la conservation de la quantité de mouvement linéaire et angulaire. Hashemi et al. [59] ont proposé une autre approche, basée sur l'intégration des forces de pression et de viscosité appliquées sur les éléments de surface du corps rigide.

2.1.4 Stratégies de couplage fluide–structure

Dans la méthode SPH, deux types de stratégies de couplage entre le fluide et la structure sont possibles : le couplage faible (aussi appelé partitionné) et le couplage fort (aussi appelé monolithique).

Dans une stratégie de couplage faible, le fluide et la structure sont résolus séparément, chacun étant considéré comme indépendant de l'autre dans un premier temps. Par exemple, dans le travail de Shi et al. [60], l'écoulement est résolu en premier avec un solveur de Navier–Stokes, en considérant la structure comme une paroi rigide mobile. Ensuite, la structure est analysée à l'aide d'une loi de comportement appropriée en tenant compte des forces transmises par le fluide. L'inconvénient majeur de cette méthode réside dans le risque d'interpénétration entre les particules des deux milieux, ce qui impose souvent l'utilisation de pas de temps très faibles.

Cette approche est largement utilisée dans les simulations impliquant des corps rigides, où le fluide traite le corps rigide comme une frontière dynamique. Le mouvement du corps rigide est alors déterminé à partir des équations décrites dans la section 2.1.3. Les algorithmes de couplage basés sur l'imposition explicite des conditions de continuité à l'interface (continuité de la contrainte normale et de la vitesse) peuvent conduire à un couplage faible, en raison de l'alternance de résolution entre les deux domaines.

Dans une stratégie de couplage fort, le fluide et la structure sont résolus simultanément. La nature lagrangienne de la méthode SPH permet de mettre en œuvre cette approche de manière simple et robuste. Tous les types de particules, qu'elles soient fluides ou solides, sont pris en compte dans les sommes de discrétisation SPH, sans distinction. Les conditions de couplage à l'interface sont ainsi naturellement satisfaites.

Les stratégies présentées ci-dessus concernent uniquement les cas où fluide et structure sont modélisés par la méthode SPH (SPH–SPH). Cependant, d'autres approches hybrides existent, comme le couplage SPH–FEM, dans lequel le fluide est modélisé par SPH et la structure par la méthode des éléments finis (FEM) [61]. Ces approches hybrides sont généralement classées dans la catégorie des couplages faibles, en raison de la différence fondamentale entre les méthodes et les solveurs utilisés.

2.2 Formes d'approximation SPH des équations gouvernantes

Pour calculer les propriétés physiques d'une particule i dans le cadre SPH, une fonction noyau de lissage W est définie pour approximer la fonction continue de cette particule et ses dérivées de manière discrète. En d'autres termes, cette fonction noyau W détermine précisément toutes les particules voisines j qui influent sur la particule i et évalue la contribution de chaque particule en fonction de la distance r entre la particule i et les autres particules j dans le domaine de support de la fonction noyau, en fonction d'une longueur de lissage h .

Ainsi, toute fonction $f(r_i)$, définie dans la distance entre deux particules $r = r_i - r_j$, est approximée par interpolation intégrale lagrangienne comme suit :

$$f(r_i) \approx \int_{\Omega(kh)} W(r_i - r_j, h) f(r_j) dr_j^n \quad (2.23)$$

où r_i et r_j désignent la position des particules i et j , respectivement, et $\Omega(kh)$ est le domaine de support compact.

La fonction noyau de lissage utilisée dans cette étude est le spline quintique (éq. (2.24)), car elle satisfait la condition de normalisation, la symétrie sphérique et la compacité de son support . De plus, elle est suffisamment lisse et ne permet pas un désordre élevé dans la distribution des particules :

$$W(r, h) = \alpha_d \begin{cases} (3 - \frac{r}{h})^5 - 6(2 - \frac{r}{h})^5 + 15(1 - \frac{r}{h})^5 & 0 \leq \frac{r}{h} < 1 \\ (3 - \frac{r}{h})^5 - 6(2 - \frac{r}{h})^5 & 1 \leq \frac{r}{h} < 2 \\ (3 - \frac{r}{h})^5 & 2 \leq \frac{r}{h} < 3 \\ 0 & \frac{r}{h} \geq 3 \end{cases} \quad (2.24)$$

où $\alpha_d = \frac{1}{120h}$, $\alpha_d = \frac{7}{478h^2\pi}$ et $\alpha_d = \frac{3}{359h^3\pi}$ pour les cas en 1D, 2D et 3D, respectivement. Dans ce travail, nous choisissons la longueur de lissage h comme une constante relative à l'espacement initial inter-particulaire ($h = 1.33\delta x$), et la constante α_d est utilisée pour le cas en 2D.

2.2.1 Discrétisation SPH

Les formes discrétisées des équations fondamentales dans le cadre de l'approche SPH sont principalement basées sur les approximations des équations de conservation de la masse et de la conservation de la quantité de mouvement.

Conservation de la masse (équation de continuité)

La forme discrétisée de l'équation de continuité est donnée par :

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \rho_i \sum_j^{n_b} \frac{m_j}{\rho_j} v_{ij} \nabla W_{ij} \quad (2.25)$$

où ρ_i et ρ_j sont les densités des particules i et j , respectivement. m_j est la masse de la particule j . $W_{ij} = W(r_{ij}, h)$ est la fonction noyau et $r_{ij} = r_i - r_j$ est la distance entre la particule i et ses voisines j . Le nombre de particules dans le voisinage de la particule i est

indiqué par n_b . Le terme $\nabla W_{ij} = \frac{\partial W}{\partial r_{ij}} e_{ij}$ est le gradient de la fonction noyau, et $e_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}} = \frac{r_i - r_j}{r_{ij}}$ est le vecteur inter-particulaire unitaire. $v_{ij} = v_i - v_j$ est la vitesse relative entre la particule i et j .

Pour les formulations WCSPH, le champ de pression présente généralement des instabilités et des oscillations numériques parasites en raison de l'approximation de la densité. En particulier, ces problèmes peuvent être critiques dans le cas présent en raison de l'utilisation d'un critère de Mohr-Coulomb à travers lequel la viscosité effective du matériau et la pression sont explicitement couplées (Eq. (2.18)). Pour traiter ce problème, Molteni et Colagrossi [62] ont développé la méthode δ -SPH où un terme de diffusion est ajouté à l'équation de continuité dans l'équation (2.25). Malheureusement, l'utilisation de la méthode δ -SPH est seulement valable pour les écoulements de fluides monophasés. Pour les écoulements multiphasiques, incluant les interactions eau-matériau granulaire, le terme δ -SPH peut causer d'importantes difficultés numériques, surtout à l'interface entre le matériau granulaire et l'eau. Ces problèmes sont principalement générés par les forces répulsives exercées entre les particules de chaque matériau et d'autres en raison des différences de densités et de viscosités entre les différentes phases. Afin d'atténuer ces problèmes, ont proposé d'utiliser la formulation $\mathcal{D}_i^{\delta-MSPH}$ qui est capable de gérer à la fois les applications d'écoulements monophasiques et multiphasiques.

2.2.2 Conditions aux limites et techniques d'intégration temporelle

Dans notre algorithme, la technique des "trois couches de particules factices pour les écoulements multiphasiques" validée par Krimi et al. est implémentée en tant que conditions aux limites murales. Cette technique peut être appliquée aux écoulements multiphasiques en général, et elle est particulièrement adaptée pour les interactions eau-matériau granulaire sous des conditions de glissement libre ou sans glissement.

Enfin, le schéma Prédicteur-Correcteur du second ordre est adopté dans notre code pour intégrer les équations gouvernantes dans le temps. Selon Monaghan [63], le pas de temps est choisi pour satisfaire l'équation suivante :

$$\delta t \leq \left\{ 0.25 \frac{h}{\max\{c_{0i} + \|v_i\|\}}, 0.25 \left(\frac{h}{\|g\|} \right)^{1/2}, CFL \frac{\rho h^2}{\max\{\mu_{eff}\}} \right\} \quad (2.39)$$

Le nombre de Courant ($CFL = 0.2$) est choisi pour ce travail car il fournit un pas de temps δt deux fois plus grand que celui utilisé dans la formulation précédente . Dans l'équation 2.39, le choix de la bonne valeur de la viscosité effective maximale $\max\{\mu_{eff}\}$ reste un grand défi car cela peut affecter le pas de temps δt , qui est important pour la stabilité et l'efficacité numériques.

En conclusion, ce chapitre a contribué de manière significative à notre compréhension de la modélisation de l'interaction entre les fluides et les solides à l'aide de l'approche SPH. En intégrant avec succès la loi constitutive de Bingham dans le cadre SPH, nous avons amélioré nos capacités à simuler et analyser des phénomènes complexes dans divers domaines, des processus géophysiques aux applications industrielles. Les idées acquises dans ce chapitre non seulement étendent nos connaissances sur le SPH en tant qu'outil numérique polyvalent, mais ouvrent également des portes pour explorer de nouvelles voies de recherche dans l'interaction fluide-structure impliquant ainsi les matériaux granulaires.

Chapiter 3

Validation du modèle SPH pour l'interaction fluide-structure : Applications, Résultats et Discussion

Dans ce chapitre, nous évaluons rigoureusement les performances et l'exactitude de notre modèle SPH proposé dans le contexte des écoulements de fluides, des structures, des écoulements de matériaux granulaires et de leur interaction dynamique. La validité du modèle est évaluée à travers une série complète de simulations englobant une gamme diversifiée de scénarios, nous permettant d'examiner ses capacités à travers divers phénomènes physiques.

Pour établir la robustesse de notre modèle SPH, nous entreprenons une comparaison méticuleuse de nos résultats de simulation avec à la fois des données expérimentales et des résultats obtenus à partir d'autres modèles numériques. Ce processus de référence constitue une étape cruciale dans le processus de validation, garantissant que notre modèle SPH reproduit fidèlement les observations du monde réel.

De plus, ce chapitre réalise une analyse approfondie de modèle rhéologique pivot intégré dans notre cadre SPH : le modèle généralisé de Bingham. À travers cet examen méticuleux, nous cherchons à discerner les forces et les limites de ce modèle et à déterminer son aptitude à simuler avec précision les interactions fluides-matériaux granulaires.

Les sections suivantes de ce chapitre présenteront les applications spécifiques, exposeront les résultats obtenus et proposeront une analyse approfondie des implications ainsi que des enseignements tirés de nos efforts de validation. En abordant ces aspects clés, notre objectif est d'offrir une évaluation nuancée de l'applicabilité et de l'efficacité du modèle SPH dans la modélisation des dynamiques complexes des interactions entre fluides et différentes natures de structures.



Fig. 3.1 Détails géométriques et description de la configuration expérimentale de la rupture de barrage [64].

3.1 Interaction Fluide (Eau)

Le célèbre cas test de la rupture de barrage, également connu sous le nom d'effondrement de colonne d'eau, a été largement testé dans des études expérimentales et numériques SPH [23], entre autres. Par conséquent, ce cas test est adopté dans cette étude pour évaluer la manière dont notre modèle SPH traite de tels écoulements monophasiques complexes impliquant des déformations significatives du profil de la surface libre où l'eau est considérée comme un fluide newtonien. Ici, nous reproduisons l'expérience de Lobovskỳ et al. [23] car elle fournit beaucoup de données claires et exploitables, y compris des instantanés détaillés montrant le comportement de l'eau au fil du temps.

La configuration expérimentale a été conçue comme illustré dans la Fig. 3.1. En résumé, une rupture de colonne d'eau a été réalisée avec une hauteur d'eau initiale $H_0 = 300$ mm. Une porte mobile, obstruant initialement l'écoulement de l'eau, a été placée à 600 mm du bord inférieur gauche d'un réservoir prismatique aux dimensions internes de $1610 \times 600 \times 150$ mm. Après avoir retiré la porte, l'eau commence à s'écouler vers l'aval sous l'effet de la gravité. Le temps de départ $t = 0$ a été fixé au moment de la libération de la porte. Le niveau d'eau a été mesuré à quatre emplacements spécifiques (300 mm, 865 mm, 1114 mm et 1362.5 mm du côté gauche du réservoir, respectivement), tandis que le signal de pression a été capturé à l'aide de capteurs de pression (voir Fig. 3.1). Toute la scène a été enregistrée à l'aide d'une caméra numérique.

La simulation actuelle est réalisée avec une distance inter-particules de $\delta x = 0.005$, ce qui donne 1704 particules frontières SPH et 14400 particules d'eau SPH. La vitesse pseudo-sonore est sélectionnée pour satisfaire $c_0 = 10\sqrt{2gH}$. En se basant sur l'expérience

de Lobovskỳ et al. [64], notre simulation suppose que l'eau est un fluide newtonien avec une densité de $\rho_w = 997 \text{ kg/m}^3$ et une viscosité dynamique constante $\mu_w = 8.9 \times 10^{-4} \text{ pa.s.}$ Par conséquent, les valeurs spécifiques de cohésion ($c = 0$) et d'angle de frottement interne ($\phi = 0$) sont choisies pour aligner le modèle rhéologique sur un comportement newtonien.

Dans la Fig. 3.2, les scènes enregistrées de l'expérience pour la profondeur d'eau initiale $H_0 = 300 \text{ mm}$ (colonne de droite) et les scènes simulées en utilisant notre code SPH (colonne de gauche) sont données à des instants différents. Après la levée de la porte, l'eau est advectée dans la direction x (direction de l'expansion) par son énergie cinétique, et la surface libre évolue progressivement vers le bas, créant une vague frontale. Ensuite, l'eau heurte le côté droit interne du réservoir où de grandes déformations et un écoulement complexe se produisent. Le comportement global de l'écoulement de la rupture de barrage dans l'expérience et celui obtenu par le modèle numérique SPH actuel, décrivant l'eau avec une rhéologie newtonienne, sont qualitativement très similaires. Malgré cela, l'expérience révèle un taux quelque peu plus lent par rapport aux résultats numériques.

Pour une évaluation quantitative de cette divergence, l'évolution de la frontière de la vague d'eau est examinée dans la Fig 3.3, où nos résultats sont comparés aux données expérimentales obtenues par Lobovskỳ et al. [64] et aux résultats numériques obtenus par Vaucorbeil et al. [65] en utilisant la Méthode des Points Matériels (MPM). Pour obtenir le même ajustement que dans les travaux précédents, les paramètres adimensionnels $X(T) = x(t)/H_0$ et $T = t\sqrt{g/H_0}$ pour la position et le temps, respectivement, sont attribués. De toute évidence, les deux modèles numériques concordent avec les données expérimentales. Le léger décalage vers l'avant qui s'est produit dans les résultats numériques peut être dû à l'influence du retrait de la porte, qui n'est pas pris en compte dans cette simulation, ainsi qu'à la rugosité du fond du réservoir.

La Fig 3.4 représente les champs de vitesse et de pression obtenus avec notre code SPH. Il convient de noter que la mise en œuvre du terme diffusif numérique multiphase $\mathcal{D}_i^{\delta-MSPH}$ contribue à stabiliser la pression en réduisant la fréquence des oscillations héritées des hypothèses faiblement compressibles et des approximations de densité.

3.2 Interaction matériau granulaire (Sable)

De nombreuses études expérimentales et numériques ont été menées pour étudier les processus dynamiques des matériaux granulaires. Le test d'effondrement de colonne granulaire a été proposé comme un benchmark relativement simple pour étudier numériquement la rhéologie non newtonienne du matériau granulaire. Pour vérifier l'efficacité des modèles proposés dans la reproduction du comportement dynamique des matériaux

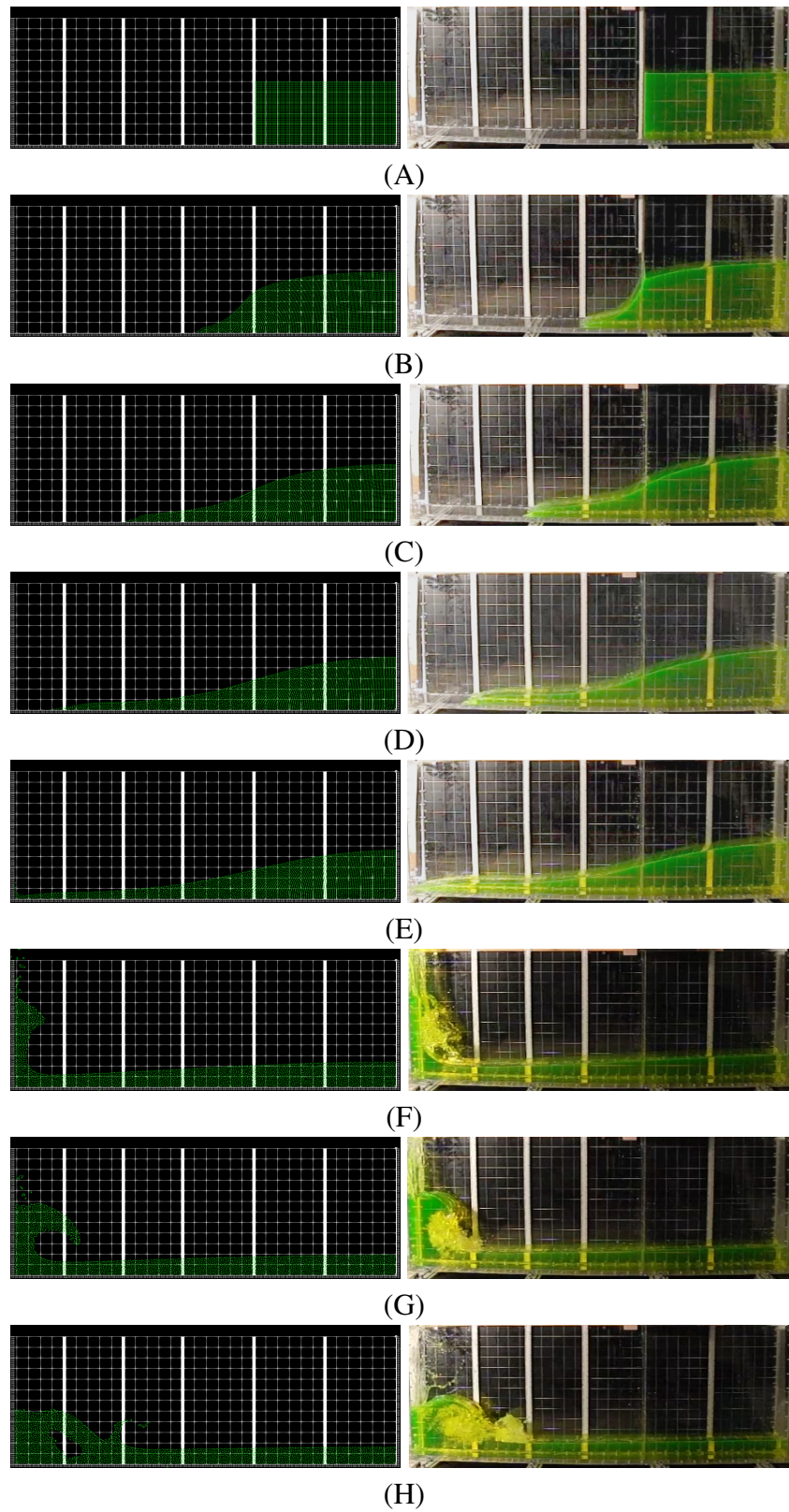


Fig. 3.2 Problème de rupture de barrage : comparaison entre nos résultats numériques (colonne de gauche) et les résultats expérimentaux de Lobovskỳ et al. [64] (colonne de droite).

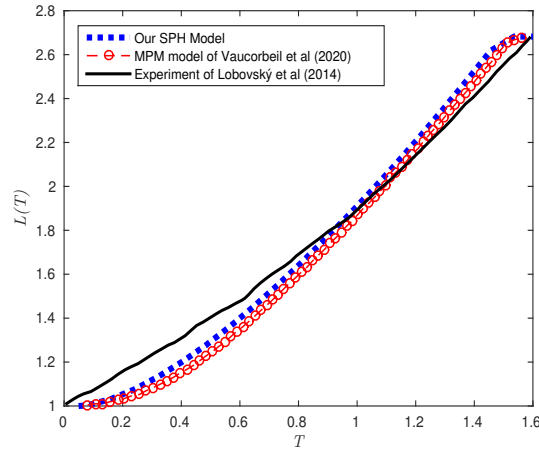


Fig. 3.3 Problème de rupture de barrage : comparaison entre l'évolution du front de l'onde d'eau obtenue par nos résultats numériques (points bleus), les résultats numériques de Vaucorbeil et al. [65] (cercles pointillés rouges) et les résultats expérimentaux de Lobovský et al. [64] (ligne noire).

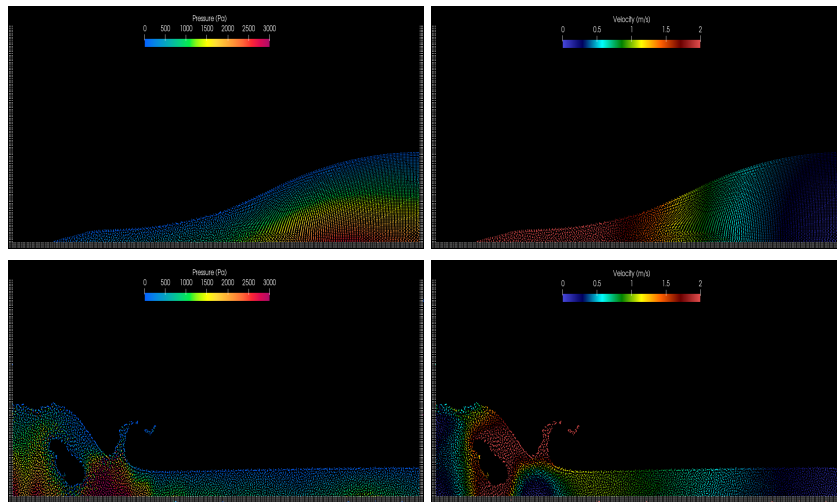


Fig. 3.4 Problème de rupture de barrage : Instantanés des résultats numériques présentant les champs de pression (côté gauche) et de vitesse (côté droit)

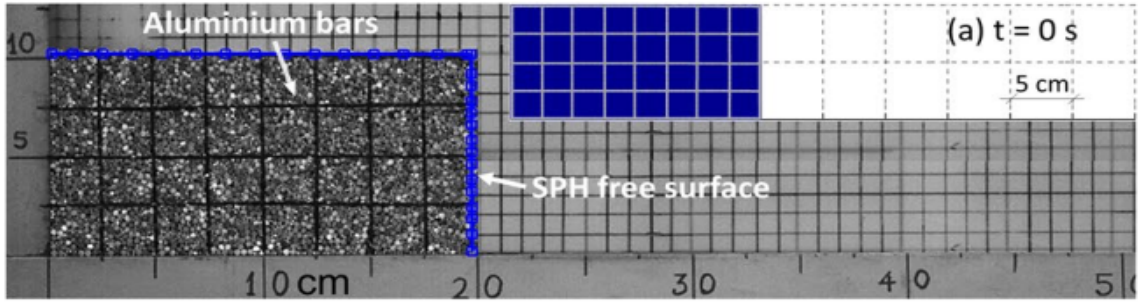


Fig. 3.5 Effondrement de matériau granulaire : Détails géométriques de la configuration expérimentale [66]

granulaires, l'expérience d'effondrement de colonne granulaire rectangulaire menée par Nguyen et al [66] est consacrée à ce travail. Ce benchmark consiste en une masse granulaire (billes d'aluminium) confinée à l'intérieur d'un réservoir en verre transparent. Dans cette configuration expérimentale, une fois que la colonne de matériau granulaire est libérée, elle s'effondre soudainement et se propage dans le plan horizontal jusqu'à ce qu'elle atteigne finalement un dépôt figé.

La configuration expérimentale est représentée dans la Fig. 3.5. Elle est similaire à un écoulement de rupture de barrage rectangulaire qui se propage sur un côté avec une hauteur initiale de $H_i = 100$ mm et une longueur de $L_i = 200$ mm, donnant un rapport d'aspect de $a = H_i/L_i = 0.5$. Le matériau granulaire avait une densité de grains de $\rho_g = 2080$ kg/m³ (densité apparente), et un angle de repos $\phi = 21.9^\circ$. L'ensemble du processus dynamique de la configuration a été enregistré à l'aide d'une caméra numérique.

La simulation est effectuée en 2-D avec un espacement inter-particules de $\delta x = 0.002$, ce qui conduit à 1582 particules granulaires SPH. La pseudo-vitesse du son $c_0 = 10\sqrt{2gH_i}$ est sélectionnée. La viscosité dynamique $\mu = 10^{-2}$ pa.s et la viscosité maximale efficace $\max\{\mu_{eff}\} = 10$ pa.s sont attribuées au matériau granulaire.

Dans la Fig. 3.6, une comparaison entre les résultats de laboratoire et nos résultats numériques à différents moments est présentée. Globalement, le modèle rhéologique de Bingham peuvent relativement prédire comment la forme de l'effondrement de colonne granulaire rectangulaire évolue à mesure que le matériau accélère, puis ralentit dans la direction x jusqu'à atteindre un point où il n'y a plus d'énergie cinétique et où un dépôt stable se forme. Ce résultat était attendu car le modèle proposé est une extension de la loi constitutive originale de Bingham, ce qui suggère un changement plus progressif de l'écoulement newtonien à la zone de limite dans les conditions des tenseurs de déformation à grand et faible taux de contrainte. Néanmoins, on observe clairement que la distance parcourue par le matériau granulaire dans la simulation numérique utilisant le modèle SPH

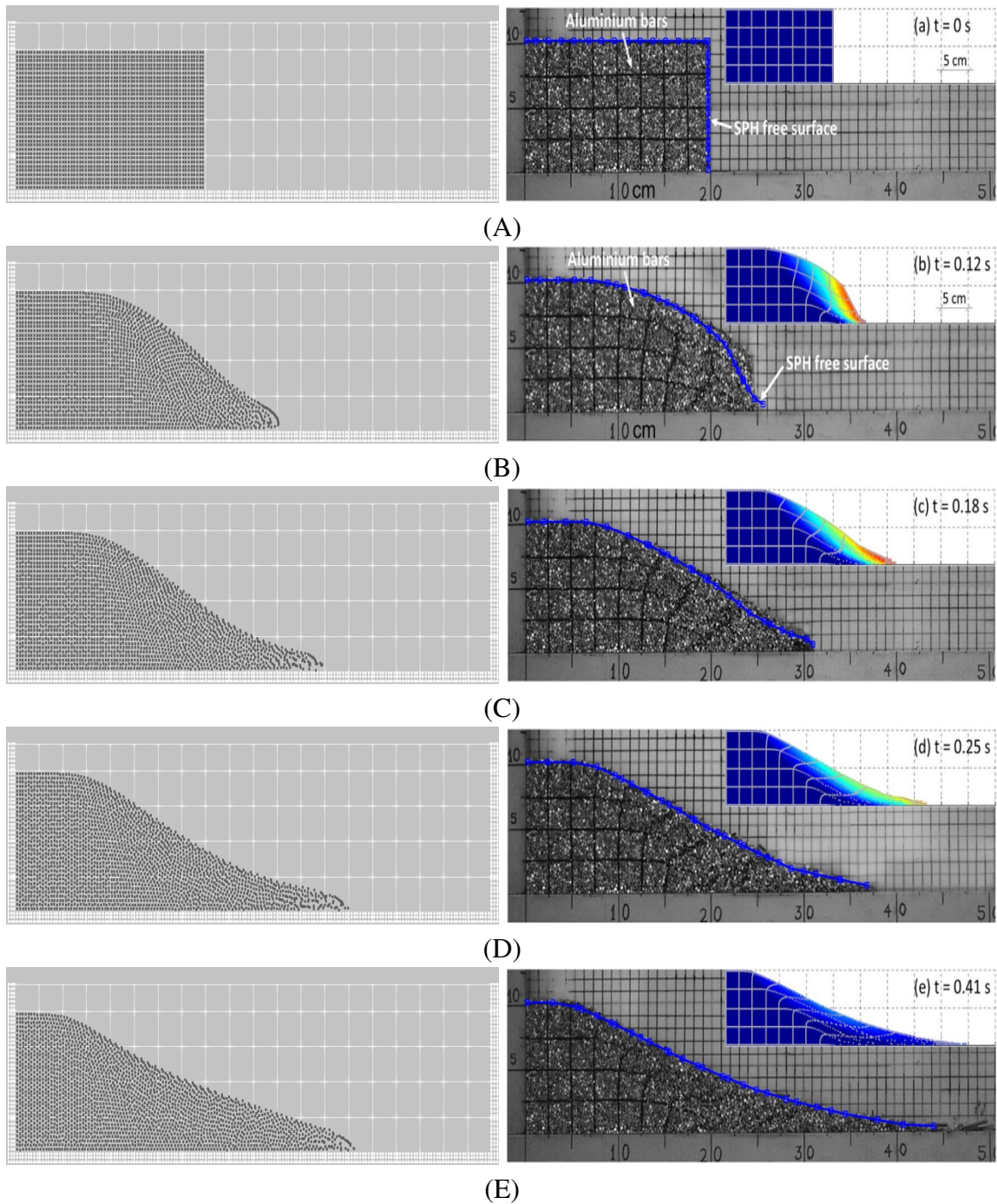


Fig. 3.6 Effondrement de matériau granulaire : comparaison entre les résultats numériques du modèle rhéologique de Bingham (colonne de gauche), le modèle SPH et les résultats expérimentaux de Nguyen et al [66] (colonne de droite), à t : (A)=0 s, (B)=0.12 s, (C)=0.18 s, (D)=0.25 s, et (E)=0.41 s.

de Nguyen et al [66] est plus proche de l'expérience que les résultats du notre modèle, où le front de l'écoulement a parcouru une distance plus courte. La disparité dans le moment d'arrêt de la masse entre les résultats expérimentaux et notre simulation numérique peut être attribuée à deux facteurs principaux : la différence de dimensionnalité (3D dans l'expérience vs 2D dans la simulation) et les effets de friction supplémentaires sur la plaque horizontale dus à l'utilisation de la condition de paroi adhérente dans notre modèle SPH.

3.3 Interaction eau-matériau granulaire

Caractérisé par son comportement dynamique complexe, le phénomène d'Interaction Fluide-Structure (FSI) comprend les relations de couplage entre deux corps avec des états physiques différents où une structure mobile ou déformable interagit à l'intérieur ou autour de l'écoulement de fluide . En raison de sa nature multiphysique, les glissements de terrain interagissant avec les masses d'eau font partie intégrante des problèmes de FSI. Les glissements de terrain peuvent se produire au-dessus de l'eau (subaériens) ou sous l'eau (submarins). En conséquence, l'énergie potentielle qui découle des interactions entre glissements de terrain et eau peut générer des ondes d'impulsion et est également susceptible de provoquer des catastrophes importantes. Par exemple, les tsunamis survenus dans la baie de Lituya en Alaska en juillet 1958 et en Papouasie-Nouvelle-Guinée en 1998 [67] ont été le résultat d'un glissement de terrain subaérien et d'un glissement de terrain subaquatique, respectivement. En effet, ces désastres ont illustré la grande mortalité, les dommages importants et la destruction massive de ces phénomènes naturels. Par conséquent, des études théoriques, expérimentales et numériques se sont concentrées sur les problèmes d'interaction glissement de terrain-eau pour prédire efficacement les tsunamis, évaluer leurs dangers et proposer des mesures de prévention. Le but de l'exemple suivant est d'étudier et de démontrer la capacité du modèle SPH proposé à simuler des problèmes multiphasiques liés aux interactions glissement de terrain-eau.

Le cas test de validation suivant est un glissement de terrain déformable sous-marin. Ici, nous reproduisons l'expérience de de Rzedkiewicz et al., où notre approche numérique, en utilisant le modèle SPH avec loi de Bingham, est appliquée pour modéliser l'effondrement d'un matériau granulaire entièrement immergé.

L'étude à l'échelle du laboratoire établie par Rzedkiewicz et al. demeure l'une des expériences les plus renommées sur les glissements de terrain sous-marins, largement recréée numériquement en raison de sa capacité à illustrer de manière vivide les processus dynamiques inhérents à ces phénomènes d'écoulement.

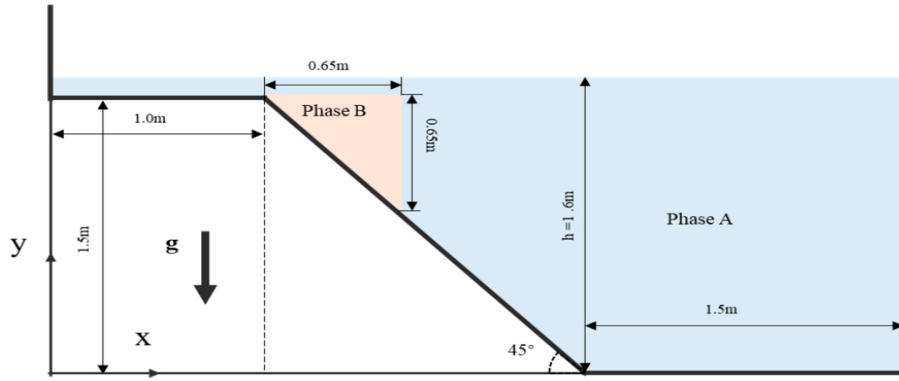


Fig. 3.7 Description de la configuration initiale du glissement de terrain sous-marin le long d'un plan incliné

Dans ce cas test, de l'eau a été introduite dans un réservoir de dimensions 0,3 m en largeur, 4 m en longueur et 2 m en hauteur, atteignant un niveau initial de 1,6 m. Positionnée sur un plan incliné incliné à 45° et soutenu par une porte rétractable, une masse de sable de forme triangulaire, avec des dimensions de 0,65 m en longueur et en largeur, a été positionnée. Le sable, avec un volume de 63 dm^3 , a été initialement positionné à 10 cm en dessous de la surface horizontale de l'eau (illustré dans la figure 3.7). Alors que la densité de l'eau est de 1000 kg/m^3 , la densité apparente moyenne du sable s'élève à 1950 kg/m^3 .

Le modèle numérique utilise un schéma de discrétisation, où le domaine physique est divisé en une séparation inter-particules de $\delta x = 0,001$, ce qui donne un total de 35 680 particules pour le fluide et 2 145 particules pour le matériau granulaire. Le comportement de l'eau est modélisé en utilisant une rhéologie de fluide newtonien, avec une viscosité dynamique constante de $\mu_w = 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, tandis que le sable est initialement considéré un fluide non newtonien obéissant à la loi constitutive de Bingham généralisée. Cette approche est effectuée pour évaluer l'efficacité du modèle rhéologique proposé. Dans ce cas, les paramètres rhéologiques utilisés correspondent à ceux choisis, spécifiquement $\tau_y = 1000 \text{ Pa}$.

Dans la Fig. 3.8, nous comparons les comportements dynamiques de l'écoulement granulaire en utilisant trois ensembles de paramètres rhéologiques différents : un modèle de fluide non newtonien avec un loi de Bingham généralisée avec $\tau_y = 1000$. Ces simulations sont comparées aux résultats expérimentaux, qui ont initialement capturé les positions de la masse granulaire à deux moments différents, $t = 0.4$ et 0.8 s . Nous observons qu'après le soulèvement du portail, la masse de sable descend librement dans l'eau, générant des vagues. Cependant, la simulation présente des déformations d'écoulement granulaire distinctes, entraînant des ondes avec des amplitudes variables et des profils de surface libre différents.

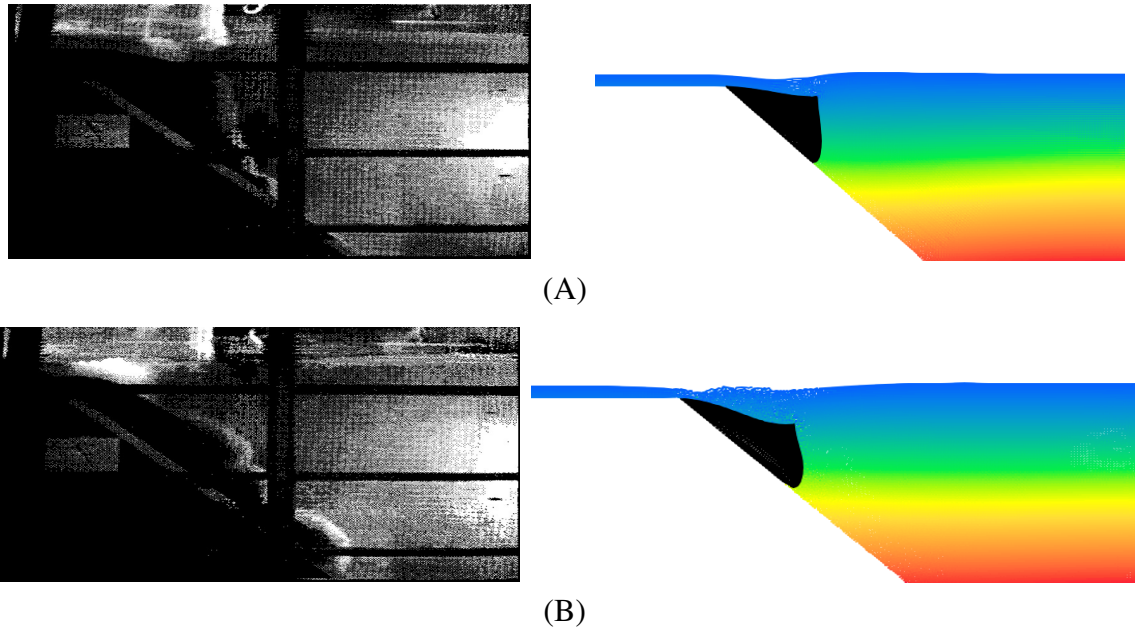


Fig. 3.8 Glissement de terrain sous-marin : comparaison entre les séquences expérimentales (colonne de gauche) et les résultats numériques obtenus en utilisant le modèle rhéologique de Bingham généralisé de l'étude actuelle, avec $\tau_y = 1000$ pa (colonne de gauche), à $t=0.4$ s et $t=0.8$ s.

Le modèle non newtonien indique que le matériau granulaire à l'interface s'érode et se disperse considérablement dans l'eau au fil du temps. La précision de ce modèle est limitée en raison de son manque de caractéristiques mécaniques pour représenter adéquatement l'écoulement granulaire, avec sa déformation proportionnelle au critère de contrainte seuil τ_y . Comme le montrent les Figs. 3.8(A) et 3.8(B), l'écoulement granulaire présente une déformation par cisaillement moins importante avec une contrainte seuil de $\tau_y = 1000$ Pa. On souligne que les scènes trouvées par notre modèle sont colorées avec leurs pressions ou elles représentent un champ régulier et continu grâce à l'implémentation de terme de diffusion multiphasique.

Comme illustré dans la figure 3.9, des vagues de surpression ont été générées par l'écoulement sous-marin de la masse granulaire. Les séquences montrent qu'une couche de cisaillement s'est formée à l'interface entre l'avant de la masse de matériau granulaire et l'eau, tandis qu'un vortex s'est développé au sommet de la masse granulaire au fur et à mesure de sa glissade le long de la pente.

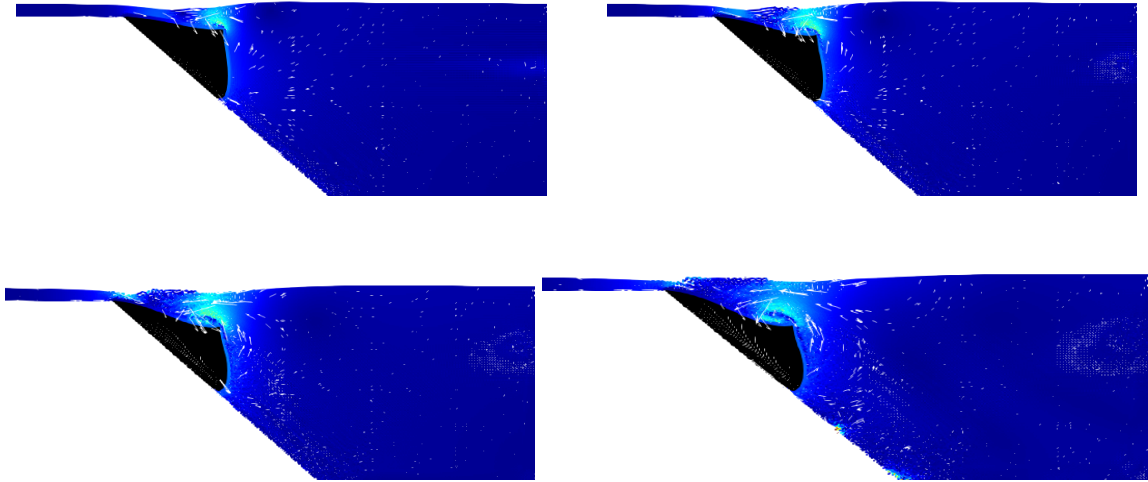


Fig. 3.9 Glissement de terrain sous-marin : Evolution de vecteurs de vitesse dans divers instants

3.4 Interaction fluide-structure fixe

L'effondrement de la colonne d'eau sur un obstacle fixe, un problème typique d'interaction fluide-structure, est étudié dans cette section à l'aide du modèle SPH. Pour cet exemple bien connu, la géométrie initiale de la colonne d'eau avec l'obstacle est définie conformément à la référence [68]. La largeur et la hauteur de la colonne d'eau sont respectivement $W = 0,146$ m et $H = 2W$, comme le montre la figure 3.10.

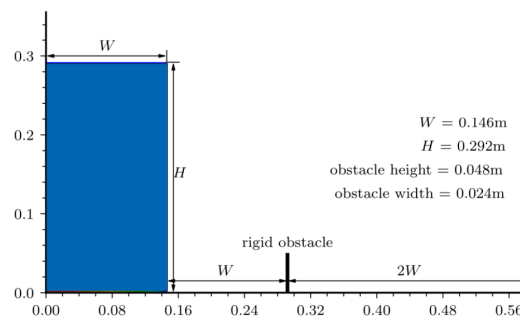


Fig. 3.10 Géométrie initiale de la colonne d'eau avec un obstacle rigide

Le domaine de calcul est une boîte rigide de 0,356 m de haut et $4W$ de long. L'obstacle est placé sur la paroi inférieure, à une distance $2W$ à droite de la colonne d'eau. La hauteur et la largeur de l'obstacle sont respectivement 0,048 m et 0,024 m. La masse volumique de l'eau est fixée à $\rho = 1\,000\text{kg/m}^3$ pour une pression de référence $P_0 = 0$ Pa et à $c_0 = 10$

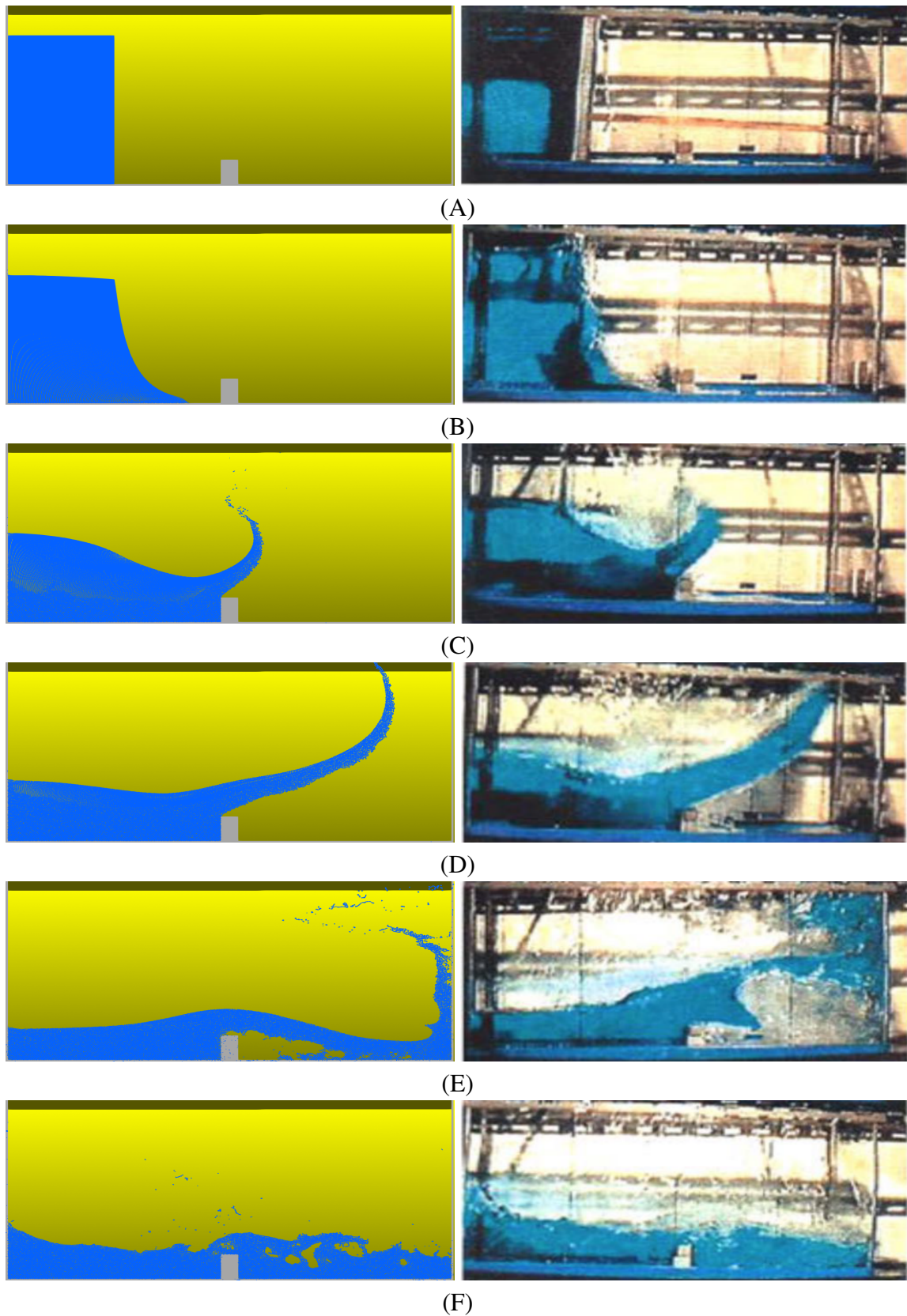


Fig. 3.11 Interaction fluide structure-fixe; à gauche : résultats expérimentaux [68] ; à droite : résultats numériques obtenus par notre modèle numérique SPH. at t : (A)=0 s, (B)=0.1 s, (C)=0.2 s, (D)=0.3 s, (E)=0.5 s et (F)=1 s.

m/s pour une vitesse du son artificiel. Lors du calcul, l'espacement des particules pour la structure et le fluide est fixé à $\delta x = 0.0012$. Le nombre de particules SPH de structures et de fluides sont 5154 et 42630, respectivement..

Les résultats de la simulation en comparaison avec les séquences expérimentales sont illustrés dans la figure 3.11. On constate que la forme de la surface libre obtenue par la présente méthode numérique SPH concorde bien avec les résultats expérimentaux, et qu'aucune pénétration non physique n'est observée à l'interface fluide-structure.

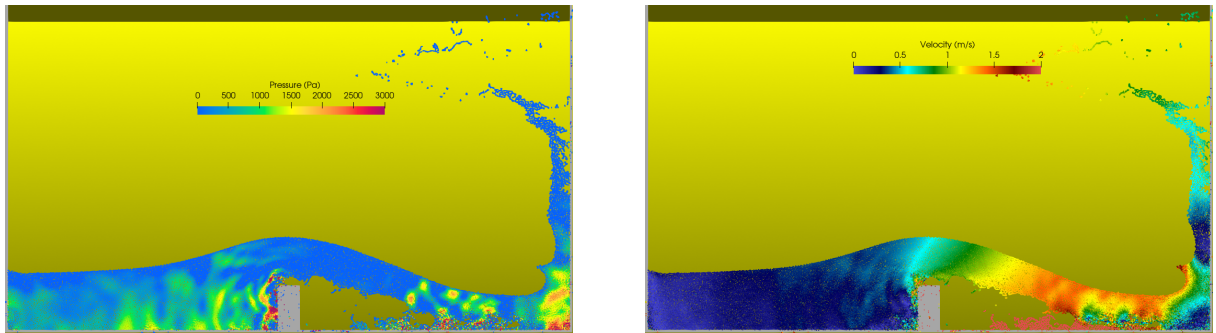


Fig. 3.12 Interaction fluide-structure fixe: Résultats numériques présentant les champs de pression (côté gauche) et de vitesse (côté droit)

La pression représente une force exercée par le fluide sur son environnement tandis que la vitesse décrit le mouvement des particules fluides. Ces deux grandeurs sont liées par les équations de Navier-Stokes, mais elles expriment des phénomènes physiques différents : la pression est souvent maximale là où la vitesse est minimale (et inversement), comme le montre bien la figure 3.12.

Interaction fluide-structure mobile

Cette section est consacrée à l'analyse de la pénétration d'une coque cylindrique dans l'eau, inspirée des essais expérimentales de chute réalisés par [69]. Dans cette expérience, le cylindre est lâché d'une hauteur $H_c = 0,5\text{ m}$, correspondant à la distance verticale entre le centre du cylindre et la surface libre de l'eau. Le diamètre de la coque cylindrique est $D = 0,11\text{ m}$. La vitesse initiale d'impact peut alors être estimée par la relation $v_y = \sqrt{2gH_c} = 2,955\text{ m/s}$. Dans la simulation, le cylindre est libéré à $H_c = \frac{1}{2}D$ à Pour réduire les coûts de calcul, et pour une vitesse initiale du cylindre fixée à $2,955\text{ m/s}$. la configuration initiale est illustrée à la figure 3.13. Dans la présente étude, la flottabilité neutre est adoptée. La masse volumique du cylindre est donc calculée comme suit :

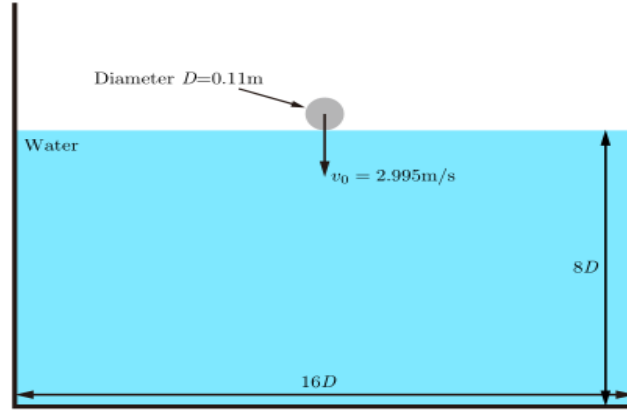


Fig. 3.13 Entrée d'eau dans une enveloppe de cylindre : description du problème.

$$\rho_s = \frac{\rho^f \pi \cdot D^2 / 4}{\pi D b} \quad (3.1)$$

Où ρ_s et ρ_f désignent respectivement la masse volumique de la structure et du fluide, et b la hauteur de la poutre. Dans le calcul, la masse volumique du fluide $\rho_f = 1\,000\text{kg/m}^3$ et la masse volumique de la poutre sont fixées à $\rho_s = 10\,000\text{kg/m}^3$, la hauteur de la cylindre étant alors $b = 0,00275\text{ m}$. Dans la simulation numérique, la région fluide, d'une aire de $16D \times 8D$, est modélisée. En adoptant une distribution uniforme des particules, l'espacement des particules pour la structure et le fluide est de $\delta x = 0,0075\text{m}$.

Dans la simulation, la déformation de la cylindre n'est pas prise en compte. La forme de la surface de l'eau à quatre instants typiques est comparée aux résultats expérimentaux [69] dans la figure 3.14. On constate que la forme de la surface de l'eau obtenue par le modèle SPH actuel correspond bien aux résultats expérimentaux. Le modèle SPH utilisé reproduit d'une manière très fidèle le comportement dynamique de l'eau et capte l'interface et les déformations importantes avec une grande précision.

Le modèle SPH proposé dans le cadre de ce projet permet de reproduire fidèlement les différents cas d'interaction fluide-structure étudiés, qu'il s'agisse de structures fixes, mobiles ou constituées de matériaux granulaires. Grâce à sa formulation lagrangienne sans maillage et à l'intégration de lois de comportement adaptées, ce modèle offre une représentation précise et cohérente des phénomènes physiques en jeu.

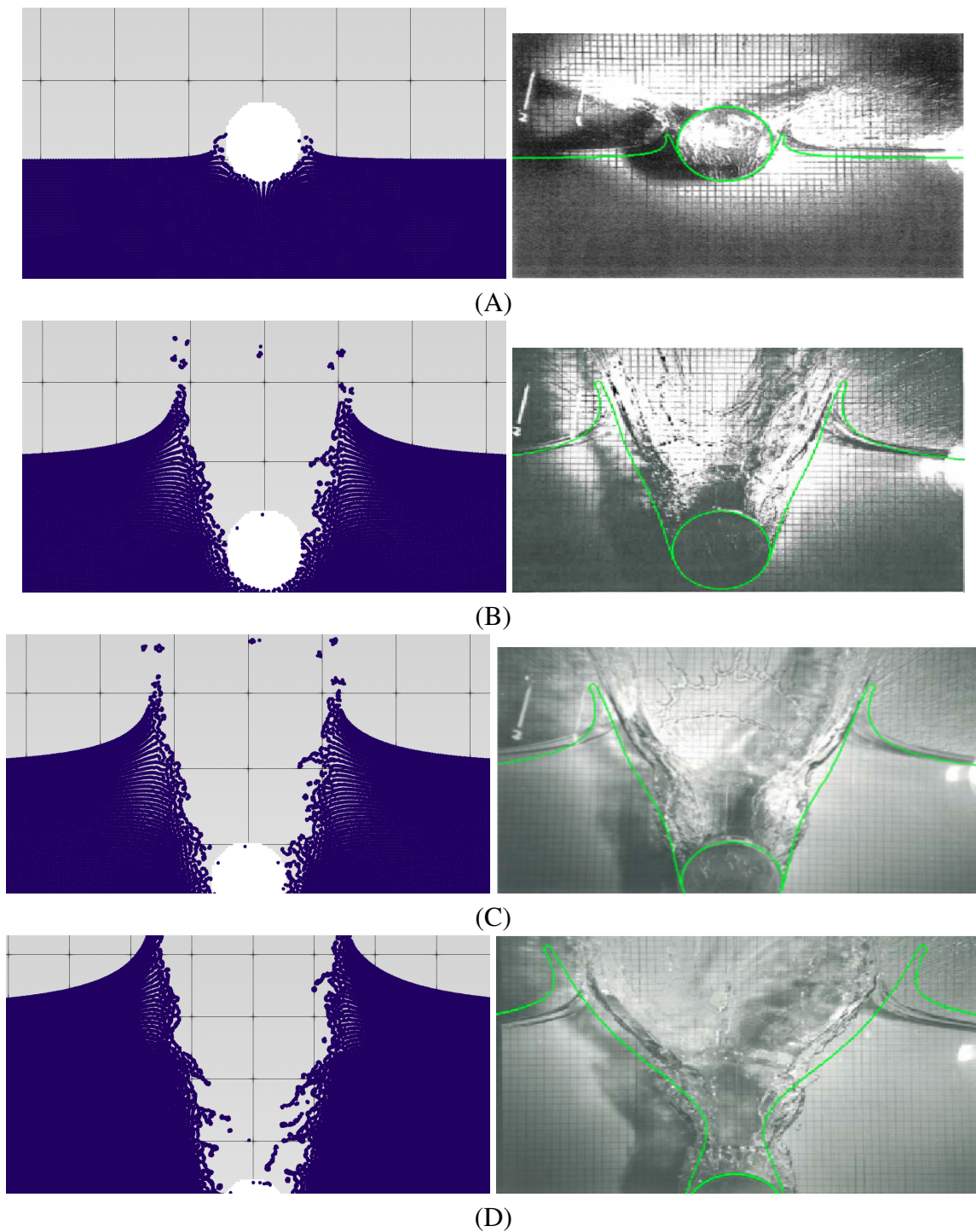


Fig. 3.14 Interaction fluide structure-mobile: Comparaison entre la forme de la surface de l'eau à différents instants: (à droite) les résultats expérimentaux [69] et (à gauche) les résultats par notre modèle SPH

Conclusions et Perspectives

Ce projet a permis de concevoir et de mettre en œuvre un cadre complet de simulation numérique basé sur la méthode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), dans le but de modéliser avec un haut niveau de précision les phénomènes complexes d'interaction fluide-structure (IFS) dans diverses configurations.

L'étude s'est articulée autour de trois scénarios principaux : les structures fixes, les structures mobiles et celles constituées de matériaux granulaires. Les résultats obtenus ont démontré la robustesse, la stabilité numérique et la fiabilité physique de l'approche proposée. En particulier, la méthode SPH s'est révélée capable de capturer fidèlement les effets hydrodynamiques et mécaniques associés à ces interactions, tout en offrant une flexibilité remarquable dans la représentation des géométries complexes et des comportements non linéaires des matériaux.

Au-delà des travaux réalisés, plusieurs axes d'amélioration et de développement futurs peuvent être envisagés. Parmi eux :

L'intégration de l'interaction fluide-structure élastique, permettant de modéliser le couplage entre les écoulements fluides et les déformations de structures souples ou flexibles .

La modélisation des structures flottantes et partiellement immergées, applicable notamment aux domaines de l'ingénierie maritime, côtière et énergétique (offshore, hydroliennes, etc.).

La prise en compte des déformations et ruptures des structures rigides, afin d'élargir le cadre d'analyse aux phénomènes d'impact, d'érosion et de fragmentation.

, L'optimisation numérique et parallèle de l'algorithme SPH, dans le but d'améliorer les performances de calcul et de permettre la simulation de systèmes de grande échelle.

Ces perspectives ouvrent la voie à une utilisation plus étendue et plus réaliste de la méthode SPH pour la modélisation de systèmes complexes, combinant fluides, structures et matériaux granulaires. À terme, elles permettront de répondre de manière plus efficace aux besoins croissants des applications industrielles, environnementales et scientifiques, où la compréhension fine des interactions fluide-structure constitue un enjeu majeur.

References

- [1] Edwin Kreuzer. IUTAM Symposium on Fluid-Structure Interaction in Ocean Engineering: Proceedings of the IUTAM Symposium Held in Hamburg, Germany, July 23-26, 2007, volume 8. Springer Science & Business Media, 2008.
- [2] H-J. Bungartz and M. Schäfer. Fluid-structure interaction modelling, simulation, optimisation, volume 53. Springer Science & Business Media, 2006.
- [3] Wen-Jie Xu, Xue-Yang Dong, and Wen-Tao Ding. Analysis of fluid-particle interaction in granular materials using coupled sph-dem method. *Powder Technology*, 353:459–472, 2019.
- [4] Abderrahmane Mahalle, Mohamed Roudane, Abdelkader Krimi, and Sid Ahmed Gouri. Smoothed particle hydrodynamics for modelling landslide–water interaction problems. *Landslides*, 19(5):1249–1263, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01807-1>.
- [5] et al. Higman, B. The 2015 landslide and tsunami in taan fiord, alaska. *Scientific reports*, 8:12993, 2018.
- [6] Cheng-Hsien Lee and Zhenhua Huang. Multi-phase flow simulation of impulsive waves generated by a sub-aerial granular landslide on an erodible slope. *Landslides*, 18(3):881–895, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01527-y>.
- [7] Nikhil Prakash, Andrea Manconi, and Simon Loew. A new strategy to map landslides with a generalized convolutional neural network. *Scientific reports*, 11(1):9722, 2021.
- [8] Antonios M Xenakis, Steven J Lind, Peter K Stansby, and Benedict D Rogers. An incompressible smoothed particle hydrodynamics scheme for newtonian/non-newtonian multiphase flows including semi-analytical solutions for two-phase inelastic poiseuille flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 92(7):703–726, 2020. <https://doi.org/10.1002/fld.4802>.
- [9] Yuri Bazilevs, Kenji Takizawa, and Tayfun E Tezduyar. Computational fluid-structure interaction: methods and applications. John Wiley & Sons, 2013.
- [10] Xia Wu, Shuhao Niu, and Changjun Li. The study of the dynamic response of the natural gas pipeline aerial crossing during pigging process: A review. *Journal of Fluids and Structures*, 105:103339, 2021.
- [11] Yuri Bazilevs and Kenji Takizawa. Advances in computational fluid-structure interaction and flow simulation. Springer, 2017.
- [12] Alessandro Franci. Unified Lagrangian formulation for fluid and solid mechanics, fluid-structure interaction and coupled thermal problems using the PFEM. Springer, 2016.
- [13] Rajeev K Jaiman and Vaibhav Joshi. Computational Mechanics of Fluid-Structure Interaction. Springer, 2022.
- [14] Thuan Lieu, Charbel Farhat, and Michel Lesoinne. Reduced-order fluid/structure modeling of a complete aircraft configuration. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 195(41-43):5730–5742, 2006.
- [15] You-sheng Wu, Ming-song Zou, TIAN Chao, SIMA Can, Li-bo Qi, DING Jun, Zhi-wei Li, and LU Ye. Theory and applications of coupled fluid-structure interactions of ships in waves and ocean acoustic environment. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 28(6):923–936, 2016.

- [16] Zhe Tian, Fushun Liu, Lin Zhou, and Changfeng Yuan. Fluid-structure interaction analysis of offshore structures based on separation of transferred responses. *Ocean Engineering*, 195:106598, 2020.
- [17] Mhamed Souli and Jonathan Gabrys. Fluid structure interaction for bird impact problem: experimental and numerical investigation. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 85(2):177, 2012.
- [18] Alejandro Cornejo, Alessandro Franci, Francisco Zárata, and Eugenio Oñate. A fully lagrangian formulation for fluid-structure interaction problems with free-surface flows and fracturing solids. *Computers & Structures*, 250:106532, 2021.
- [19] Abdelkader Krimi. Modélisation des écoulements fluide multiphasiques avec une approche SPH. PhD thesis, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM, 2018.
- [20] Olek C Zienkiewicz and Robert L Taylor. The finite element method for solid and structural mechanics. Butterworth-heinemann, 2005.
- [21] Woowon Jeong and Jaehoon Seong. Comparison of effects on technical variances of computational fluid dynamics (cf) software based on knite element and knite volume methods. *International Journal of Mechanical Sciences*, 78:19–26, 2014. vii,
- [22] Gui-Rong Liu and Yuan-Tong Gu. An introduction to meshfree methods and their programming. Springer Science & Business Media, 2005.
- [23] Jiun-Shyan Chen, Michael Hillman, and Sheng-Wei Chi. Meshfree methods: progress made after 20 years. *Journal of Engineering Mechanics*, 143(4):04017001, 2017.
- [24] Alessandra Monteleone, Guido Borino, Enrico Napoli, and Gaetano Burriesci. Fluid–structure interaction approach with smoothed particle hydrodynamics and particle–spring systems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 392:114728, 2022. vii,
- [25] Gui-Rong Liu and Moubin B Liu. Smoothed particle hydrodynamics: a meshfree particle method. World Scientific, 2003.
- [26] GR3543275 Liu. An overview on meshfree methods: for computational solid mechanics. *International Journal of Computational Methods*, 13(05):1630001, 2016.
- [27] Seiichi Koshizuka, Atsushi Nobe, and Yoshiaki Oka. Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 26(7):751–769, 1998.
- [28] Leon B Lucy. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *The astronomical journal*, 82:1013–1024, 1977. <https://doi.org/10.1086/112164>.
- [29] Robert A Gingold and Joseph J Monaghan. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly notices of the royal astronomical society*, 181(3):375–389, 1977. <https://doi.org/10.1093/mnras/181.3.375>.
- [30] L Brookshaw. A method of calculating radiative heat diffusion in particle simulations. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 6(2):207–210, 1985.
- [31] Alejandro JC Crespo, José M Domínguez, Benedict D Rogers, Moncho Gómez-Gesteira, S Longshaw, R Canelas, Renato Vacondio, A Barreiro, and O García- Feal. Dualsphysics: Open-source parallel cfd solver based on smoothed particle hydrodynamics (sph). *Computer Physics Communications*, 187:204–216, 2015.
- [32] Alejandro Jacobo Cabrera Crespo. Application of the smoothed particle hydrodynamics model SPHysics to free-surface hydrodynamics. PhD thesis, PhD Thesis, Departamento De Fisica Aplicada, Universidade De Vigo, 2008.
- [33] José M Domínguez, Alejandro JC Crespo, Daniel Valdez-Balderas, Benedict D Rogers, and Moncho Gómez-Gesteira. New multi-gpu implementation for smoothed particle hydrodynamics on heterogeneous clusters. *Computer Physics Communications*, 184(8):1848–1860, 2013.
- [34] Joe J Monaghan. Simulating free surface flows with sph. *Journal of computational physics*, 110(2):399–406, 1994.
- [35] Salvatore Marrone, M Antuono, A Colagrossi, G Colicchio, D Le Touzé, and G Graziani. δ -sph model for simulating violent impact 526–1542, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2010.12.016>.

- [36] Salvatore Marrone, Andrea Colagrossi, Matteo Antuono, G Colicchio, and Giorgio Graziani. An accurate sph modeling of viscous flows around bodies at low and moderate reynolds numbers. *Journal of Computational Physics*, 245:456–475, 2013.
- [37] N Grenier, D Le Touzé, A Colagrossi, M Antuono, and G Colicchio. Viscous bubbly flows simulation with an interface sph model. *Ocean Engineering*, 69:88–102, 2013.
- [38] G Brereton and D Korotney. Coaxial and oblique coalescence of two rising bubbles. *Dynamics of bubbles and vortices near a free surface*, AMD, 119, 1991.
- [39] Aman Zhang, Pengnan Sun, and Furen Ming. An sph modeling of bubble rising and coalescing in three dimensions. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 294:189–209, 2015.
- [40] Bastiaan Buchner. Green water on ship-type offshore structures. PhD thesis, Delft University of Technology Delft, The Netherlands, 2002.
- [41] JP Gray, JJ Monaghan, and RP Swift. Sph elastic dynamics. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 190(49):6641–6662, 2001.
- [42] Ha H Bui, Ryoichi Fukagawa, Kazunari Sako, and Shintaro Ohno. Lagrangian meshfree particles method (sph) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic-plastic soil constitutive model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 32(12):1537–1570, 2008. <https://doi.org/10.1002/nag.688>.
- [43] G Fountakas and BD Rogers. Modelling multi-phase liquid-sediment scour and resuspension induced by rapid flows using smoothed particle hydrodynamics (sph) accelerated with a graphics processing unit (gpu). *Advances in Water Resources*, 92:186–199, 2016.
- [44] Wei Chen and Tong Qiu. Numerical simulations for large deformation of granular materials using smoothed particle hydrodynamics method. *International Journal of Geomechanics*, 12(2):127–135, 2011.
- [45] Thomas Douillet-Grellier, Bruce D Jones, Ranjan Pramanik, Kai Pan, Abdulaziz Albaiz, and John R Williams. Mixed-mode fracture modeling with smoothed particle hydrodynamics. *Computers and Geotechnics*, 79:73–85, 2016.
- [46] Carla Antoci, Mario Gallati, and Stefano Sibilla. Numerical simulation of fluid-structure interaction by sph. *Computers & structures*, 85(11-14):879–890, 2007.
- [47] Sergio R Idelsohn, Julio Marti, A Limache, and Eugenio Oñate. Unified lagrangian formulation for elastic solids and incompressible fluids: application to fluid-structure interaction problems via the pfem. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 197(19):1762–1776, 2008.
- [48] Ashkan Rafiee and Krish P Thiagarajan. An sph projection method for simulating fluid-hypoelastic structure interaction. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 198(33):2785–2795, 2009.
- [49] Tatiana Capone, Andrea Panizzo, and Joe J Monaghan. Sph modelling of water waves generated by submarine landslides. *Journal of Hydraulic Research*, 48(S1):80–84, 2010.
- [50] S Assier Rzedkiewicz, C Mariotti, and Philippe Heinrich. Numerical simulation of submarine landslides and their hydraulic effects. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 123(4):149–157, July, August 1997. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1997\)123:4\(149\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1997)123:4(149)).
- [51] R Canelas, RML Ferreira, JM Domínguez, and AJC Crespo. Modelling of wave impacts on harbour structures and objects with sph and dem. *Proceedings of the 9th SPHERIC*, pages 313–320, 2–5 June 2014. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1217.7045>.

- [52] Z. Dai, Y. Huang, H. Cheng, and Q. Xu. SPH model for fluid-structure interaction and its application to debris flow impact estimation. *Landslides*, 14(3):917–928, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0777-4>.
- [53] Charles Augustin Coulomb. Essai sur une application des regles de maximis & minimis a quelques problemes de statique: Relatifs a l’architecture. publisher not identified, 1773.
- [54] Shiva P Pudasaini and Martin Mergili. A multi-phase mass flow model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(12):2920–2942, 2019. <https://doi.org/10.1029/2019JF005204>.
- [55] E. Mitsoulis. Flows of viscoplastic materials: models and computations. *Rheology*
- [56] Birte Domnik, Shiva P Pudasaini, Rolf Katzenbach, and Stephen A Miller. Coupling of full two-dimensional and depth-averaged models for granular flows. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 201:56–68, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2013.07.005>.
- [57] Abdelkader Krimi, Mehdi Rezoug, Sofiane Khelladi, Xesús Nogueira, Michael Deligant, and Luis Ramírez. Smoothed particle hydrodynamics: a consistent model for interfacial multiphase fluid flow simulations. *Journal of Computational Physics*, 358:53–87, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.12.006>.
- [58] Pengnan Sun, Furen Ming, and Aman Zhang. Numerical simulation of interactions between free surface and rigid body using a robust sph method. *Ocean Engineering*, 98:32–49, 2015.
- [59] MR Hashemi, R Fatehi, and MT Manzari. A modified sph method for simulating motion of rigid bodies in newtonian fluid flows. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 47(6):626–638, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2011.10.007>.
- [60] Chuanqi Shi, Yi An, Qiang Wu, Qingquan Liu, and Zhixian Cao. Numerical simulation of landslide-generated waves using a soil–water coupling smoothed particle hydrodynamics model. *Advances in Water Resources*, 92:130–141, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.04.002>. 36
- [61] G Fourey, G Oger, D Le Touzé, and B Alessandrini. Violent fluid-structure interaction simulations using a coupled sph/fem method. In *IOP conference series: materials science and engineering*, volume 10, page 012041. IOP Publishing, 2010. 36
- [62] Diego Molteni and Andrea Colagrossi. A simple procedure to improve the pressure evaluation in hydrodynamic context using the sph. *Computer Physics Communications*, 180(6):861–872, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2008.12.004>. 38
- [63] Joe J Monaghan. Smoothed particle hydrodynamics. *Reports on progress in physics*, 68(8):1703, 2005. 41
- [64] Libor Lobovsky, Elkin Botia-Vera, Filippo Castellana, Jordi Mas-Soler, and Antonio Souto-Iglesias. Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break. *Journal of Fluids and Structures*, 48:407–434, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.juidstructs.2014.03.009>.

- [65] Alban de Vaucorbeil, Vinh Phu Nguyen, and Chi Nguyen-Thanh. Karamelo: an open source parallel C++ package for the material point method. *Computational Particle Mechanics*, 8(4):767–789, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40571-020-00369-8>.
- [66] Ha H Bui and Giang D Nguyen. Smoothed particle hydrodynamics (sph) and its applications in geomechanics: From solid fracture to granular behaviour and multiphase flows in porous media. *Computers and Geotechnics*, 138:104315, 2021.
- [67] D. R. Tappin, P. Watts, and S. T. Grilli. The Papua New Guinea tsunami of 17 July 1998: anatomy of a catastrophic event. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(2):243–266, 2008. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-243-2008>.
- [68] Yu-Xiang Peng, A-Man Zhang, and Shi-Ping Wang. Coupling of wcsph and rkpm for the simulation of incompressible uid–structure interactions. *Journal of Fluids and Structures*, 102:103254, 2021.
- [69] Martin Greenhow and Woei-Min Lin. *Nonlinear-free surface effects: experiments and theory*. 1983.