

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A. MIRA-BEJAIA  
Faculté Technologie  
Département d'Hydraulique  
Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement (LRHAE).



# THÈSE En Cotutelle



**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE A. MIRA BEJAIA (ALGERIE)**

**Domaine : Sciences et Technologies      Filière : Hydraulique**  
**Spécialité : Ouvrages Hydrauliques**

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE CAEN NORMANDIE (FRANCE)**

**Spécialité : Mécanique des Fluides, Énergétique, Thermique, Combustion, Acoustique**

**Présentée par**  
**Mme. Fatiha GHOUINI**

**Thème**

**Dynamique de déformation d'un réservoir de liquide servant à la  
stabilisation d'une structure flottante en mouvement Complexe**

**Soutenue le : 02/06/2025**

**Devant le Jury composé de :**

**Prénom et Nom**

**Grade**

|                                  |                 |   |              |
|----------------------------------|-----------------|---|--------------|
| <b>Mr. Djamal SADAoui</b>        | Professeur      | Univ. Bejaia, Algérie                             | Président    |
| <b>Mr. Abdelghani SEGHIR</b>     | Professeur      | Univ. Bejaia, Algérie                             | Rapporteur   |
| <b>Mr. Sylvain GUILLOU</b>       | Professeur      | Univ. Caen Normandie, France                      | Rapporteur   |
| <b>Mr. Erwan LIBERGE</b>         | MCF - HDR       | Univ. La Rochelle, France                         | Examinateur  |
| <b>Mme. Elisabeth LACAZEDIEU</b> | Professeur      | UPHF – France                                     | Examinatrice |
| <b>Mr. Mokhtar TOUATI</b>        | Professeur      | USTHB-Alger, Algérie                              | Examinateur  |
| <b>Mr. Lyes AMARA</b>            | MCA             | Univ. Jijel, Algérie                              | Invité       |
| <b>M. Mustapha BENAOUICHA</b>    | Dr- RR&I<br>HDR | Segula Technologies<br>Université de Caen, France | Invité       |

**Année Universitaire : 2024/2025**

Ce travail est dirigé par :

M. Abdelghani SEGHIR, directeur de la thèse, Université de Bejaia, Algérie.

M. Sylvain GUILLOU, directeur de la thèse, Université de Caen Normandie, France.

M. Mustapha BENAOUICHA, co-encadrant de la thèse, SEGULA Technologies et Université de Caen Normandie, France.

M. Kim Quoc Nguyen KHA, co-encadrant de la thèse, SEGULA Technologies, France.

Mme Alina SANTA CRUZ, Co-encadrante de la thèse, Université de Caen, France.

à Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet CUVE mené conjointement à :

L'université de Bejaia (Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement)



L'université de Caen Normandie (Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg)



Et l'entreprise SEGULA Technologies



Ce travail a bénéficié des moyens de calcul local du LUSAC à Cherbourg (**kturbulent**).

## Remerciements :

Je remercie **M. A. Seghir** et **M. S. Guillou**, mes directeurs de thèse, de l'opportunité qu'ils m'ont offerte de réaliser deux de mes rêves d'enfance, ainsi que pour leur accompagnement.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à mes encadrants **M. Benaouicha** et **Mme. A. Santa Cruz** pour leur soutien, leurs précieux conseils et tous les échanges et les conversations qu'on a pu avoir tout au long de mes années de thèse. Grâce à vous, j'ai pu évoluer, développer de nouvelles compétences et surmonter des défis que je n'aurais peut-être pas affrontés seule. Je remercie également **M. K.Q.N. Kha** pour son aide précieuse à maîtriser les outils de calcul.

Je remercie le Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et environnement (**LRHAE**) de l'opportunité de réaliser mon doctorat via un concours national. Ainsi le Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg (**LUSAC**) de l'Université de Caen Normandie et l'école doctorale **PSIME** de m'avoir permis de mettre en place la cotutelle internationale. Je tiens à remercier l'entreprise Segula Technologies et l'Université de Caen Normandie pour avoir financé ma thèse.

Je remercie **Mme. E. Lacazedieu** et **M. E. Liberge** pour avoir accepté de rapporter mon travail de thèse et pour leurs commentaires pertinents.

J'adresse tous mes remerciements à **M. D. Sadaoui**, d'avoir accepté de présider le jury de soutenance, ainsi que **M. M. Touati** et **M. L. Amara** de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce travail et de leurs remarques constructives.

Enfin, j'ai une pensée particulière pour mes collègues du laboratoire **LRHAE** sur lesquelles j'ai pu compter concernant les inscriptions et autres ... durant mon absence. Je remercie aussi mes collègues du laboratoire **LUSAC** (Anju, Laurie, Israa, Jérôme, Manel, Hamza, Kabir, et tous les autres) pour leur bonne humeur et surtout les pauses gourmandes qu'on a pu partager ensemble.

Je remercie également **Alina** et **Frédérique** pour leur chaleureux accueil chez elles.

Et Adeline, notre adorable secrétaire, merci pour ton aide et ta gentillesse.

Un merci tout particulier à **Wissem Tighidet** et **Nesrine Abdelli**, pour leur aide précieuse et leur soutien tout au long de la préparation de ma soutenance. Votre présence m'a beaucoup apporté, et je vous en suis profondément reconnaissante. Merci du fond du cœur.

Finalement, je tiens à remercier **Mr. Claude Fustin** et **Mr. Jean-Pierre Belin** de la mise en place du dispositif expérimental et leurs interventions durant toute la période des manipulations.

Merci à toutes personnes, de près ou de loin, qui ont contribué d'une façon ou d'une autre à la réalisation de ce travail.


## Dédicaces :

D'abord et avant tout, je rends grâce au Dieu tout puissant qui m'a permis d'achever ce travail de thèse. Je le remercie également pour toutes les bénédictions qu'il m'a offertes, surtout la famille et la santé, au delà des difficultés traversées.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes parents, pour leur amour constant, leurs sacrifices silencieux, et leur soutien tout au long de mon parcours.

À mon fiancé **Nedjmo**, merci de m'aimer malgré mes nuits blanches, mon stress chronique. Merci pour ton amour inépuisable, ta patience et ton soutien indéfectible, qui ont été ma lumière dans les jours les plus sombres. Tu as su croire en moi même quand je doutais. Je suis reconnaissante de t'avoir à mes côtés, aujourd'hui et pour demain.

Aux piliers de mon cœur, mes frangins et mes frangines, merci d'avoir toujours été à mes côtés. Votre présence, vos encouragements et vos mots rassurants m'ont donné la force d'avancer.

**Alina**, tu n'étais pas née pour être ma mère, mais tu l'as été par cœur, par tes gestes, par ta tendresse silencieuse qui soigne sans bruit. Je te dois une partie de ce que je suis .

---

## Table des matières

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction générale</b>   | <b>17</b> |
| 1.1      | Mise en contexte et problématique . . . . .  | 18        |
| 1.2      | Phénomène de ballonnement des liquides . . . . .   | 19        |
| 1.3      | Flottabilité des corps et des réservoirs . . . . .   | 22        |
| 1.4      | C'est quoi une houle ? . . . . .   | 22        |
| 1.5      | Interaction fluide-structure (IFS) . . . . .   | 24        |
| 1.5.1    | Industrie aéronautique . . . . .   | 24        |
| 1.5.2    | Génie civile et architecture . . . . .   | 25        |
| 1.5.3    | Systèmes énergétiques et maritimes . . . . .   | 26        |
| 1.5.4    | Biomécanique . . . . .   | 26        |
| 1.6      | Revue de littérature . . . . .   | 28        |
| 1.6.1    | Les différentes approches pour l'étude du ballonnement de fluide . . . . .   | 28        |
| 1.6.2    | Dynamique des corps et réservoirs flottants . . . . .  | 32        |
| 1.6.3    | Modélisation de la Houle . . . . .   | 34        |
| 1.6.4    | Évolution des études en interaction fluide-structure . . . . .   | 35        |
| 1.7      | IFS et ballonnement à l'intérieur des réservoirs flottants dans le domaine<br>des énergies marines renouvelables . . . . . | 37        |
| 1.8      | Objectif de la thèse . . . . .   | 38        |
| <b>2</b> | <b>Modélisation mathématique et numérique du problème couplé fluide-<br/>structure</b>                                     | <b>40</b> |
| 2.1      | Modélisation des écoulements diphasiques . . . . .   | 41        |
| 2.2      | Modélisation de la dynamique de la structure . . . . .   | 42        |
| 2.3      | Formulation Arbitraire Lagrangienne-Eulérienne (ALE) . . . . .   | 42        |
| 2.4      | Théories d'une houle régulière . . . . .   | 43        |
| 2.5      | Stratégies de résolution . . . . .   | 46        |
| 2.5.1    | Méthode des volumes finis . . . . .  | 46        |
| 2.5.2    | Méthode des éléments finis . . . . .   | 48        |
| 2.6      | Traitement de l'écoulement diphasique . . . . .  | 50        |
| 2.6.1    | La méthode VOF (Volume Of Fluid) . . . . .   | 50        |
| 2.7      | Techniques de résolution numérique du problèmes d'IFS . . . . .  | 51        |
| 2.7.1    | Couplage faible (One-way coupling) . . . . .   | 52        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.7.2    | Couplage fort (Two-way coupling) . . . . .  | 52        |
| 2.8      | Algorithmes de couplage pour l'approche partitionnée . . . . .  | 54        |
| 2.8.1    | Couplage chaîné (ou explicite) . . . . .  | 54        |
| 2.8.2    | Couplage itéré (ou implicite) . . . . .   | 55        |
| 2.9      | Outils de modélisation sélectionnés . . . . .   | 56        |
| 2.10     | Bilan . . . . .   | 59        |
| <b>3</b> | <b>Mise en place d'un dispositif expérimental du ballottement dans une cuve soumise à une excitation de tangage</b>   | <b>60</b> |
| 3.1      | Dispositif expérimental . . . . .   | 61        |
| 3.1.1    | Description du dispositif expérimental et mise en mouvement de la cuve . . . . .  | 61        |
| 3.1.2    | Description analytique du mouvement . . . . .   | 63        |
| 3.2      | Méthodes et matériel de mesure . . . . .  | 67        |
| 3.2.1    | Suivi des paramètres temporels de la chaîne cinématique . . . . .   | 67        |
| 3.2.2    | Validation de l'évolution temporelle de l'angle d'inclinaison et de la position du point $B$ . . . . .  | 68        |
| 3.2.3    | Visualisation de la surface libre . . . . .   | 69        |
| 3.2.4    | Traitement des images et évolution temporelle de la surface libre . . . . .   | 71        |
| 3.3      | Plan des expériences . . . . .  | 74        |
| 3.3.1    | Configuration expérimentale . . . . .   | 74        |
| 3.3.2    | Procédure des essais . . . . .  | 74        |
| 3.4      | Bilan . . . . .   | 76        |
| <b>4</b> | <b>Modèle numérique du ballottement avec IFS et validation</b>  | <b>77</b> |
| 4.1      | Présentation du modèle numérique . . . . .  | 78        |
| 4.1.1    | Mise en équation . . . . .  | 78        |
| 4.1.2    | Couplage CFD-CSD . . . . .  | 79        |
| 4.2      | Modélisation numérique d'un réservoir soumis à une excitation horizontale harmonique . . . . .  | 79        |
| 4.2.1    | Cas du ballottement linéaire . . . . .  | 80        |
| 4.2.2    | Cas du ballottement non linéaire . . . . .  | 81        |
| 4.3      | Modélisation du ballottement dans un réservoir soumis à un mouvement de tangage . . . . .   | 81        |
| 4.3.1    | Confrontation expérience-modèle numérique . . . . .   | 83        |
| 4.3.2    | Comparaison entre le cas d'un réservoir soumis à une force d'entraînement due au mouvement de tangage et aux effets gravitationnels et le cas d'un réservoir soumis aux effets gravitationnels uniquement . . . . . | 92        |
| 4.4      | Bilan . . . . .   | 94        |
| <b>5</b> | <b>Modèle simplifié du ballottement soumis aux effets d'une houle longue régulière</b>  | <b>95</b> |
| 5.1      | Présentation du modèle simplifié . . . . .  | 95        |
| 5.2      | Formulation mathématique du modèle . . . . .  | 99        |
| 5.2.1    | Équations de la dynamique du fluide . . . . .   | 99        |
| 5.2.2    | Équation de la dynamique de la structure . . . . .  | 99        |
| 5.2.3    | Implémentation . . . . .  | 100       |
| 5.3      | Ballottement sous effets dus à la houle . . . . .   | 101       |
| 5.3.1    | Réservoir partiellement rempli de liquide sans excitation externe . . . . .   | 101       |
| 5.3.2    | Réservoir soumis aux effets de la houle . . . . .   | 102       |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.4      | Bilan . . . . .  | 104        |
| <b>6</b> | <b>Modélisation du ballonnement dans un réservoir soumis aux excitations de tangage et de pilonnement</b>                                  | <b>105</b> |
| 6.1      | Développement d'un modèle simplifié en intégrant l'effet de tangage et de pilonnement . . . . .  | 105        |
| 6.2      | Dynamique de ballonnement des liquides dans un réservoir flexible . . . . .  | 107        |
| 6.3      | Bilan . . . . .  | 117        |
| <b>7</b> | <b>Conclusion générale</b>   | <b>118</b> |
| <b>A</b> | <b>Les FFT appliquées sur les évolutions temporelles des élévation de la surface libre (cas expérimentale)</b>                             | <b>130</b> |
| <b>B</b> | <b>Contours de fraction volumique instantanés expérimentaux et numériques dans le cas d'un réservoir soumis aux mouvements de tangage</b>  | <b>132</b> |
| <b>C</b> | <b>Contours de fraction volumique instantanés numériques dans le cas d'un réservoir soumis aux mouvements de tangage et de pilonnement</b> | <b>136</b> |
| <b>D</b> | <b>Les FFT appliquées sur les évolutions temporelles des élévation de la surface libre et les déplacements des parois flexibles</b>        | <b>139</b> |

---

## Table des figures

---

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Éolienne flottante offshore . . . . .  | 18 |
| 1.2  | Exemples de réservoirs renfermant des liquides susceptibles de subir un ballottement . . . . .   | 20 |
| 1.3  | Ballottement dans une piscine sur le toit d'un gratte-ciel lors d'un séisme [29]   | 20 |
| 1.4  | Déferlement de vague dans un réservoir en ballottement [140] . . . . .   | 21 |
| 1.5  | Principe de la poussée d'Archimède . . . . .   | 23 |
| 1.6  | Schéma descriptif des paramètres de la houle . . . . .   | 23 |
| 1.7  | Schéma du cycle d'interaction fluide-structure . . . . .   | 24 |
| 1.8  | Simulation du champ de pression autour d'un profil d'aile (à gauche, le profil initial, à droite le profil optimal) [14] . . . . .   | 25 |
| 1.9  | Catastrophe du pont <i>Tay bridge</i> en Écosse, le 28 décembre 1879 [118] . . . . .   | 26 |
| 1.10 | Rupture du pont du <i>Détroit de Tacoma</i> , le 07 Novembre 1940, États-Unis . . . . .  | 26 |
| 1.11 | Structures sous-marins et offshore dans les systèmes énergétiques et maritimes   | 27 |
| 1.12 | Navires et plateforme pétrolier [115] . . . . .  | 27 |
| 1.13 | Modèle FEM tridimensionnel de la valve cardiaque aortique : (a) partie de la valve utilisée pour le calcul, (b) maille FEM de la structure et (c) maille FEM du fluide [57] . . . . .  | 27 |
| 1.14 | Schéma du ballottement dans un réservoir cubique avec chicanes horizontales et chicanes verticales à orifice [80] . . . . .  | 31 |
| 1.15 | (a) La position et (b) les configurations de l'écran à lattes dans le réservoir rectangulaire [67] . . . . .   | 32 |
| 1.16 | Captures des résultats numérique du ballottement (a) en eau peu profonde et (b) en profondeur intermédiaire [82] . . . . .   | 32 |
| 1.17 | Vues en plan et en coupe de l'installation flottante de stockage des hydrocarbures (FHSBF) [56] . . . . .  | 34 |
| 2.1  | Comparaison entre les maillages et les mouvements des particules en fonction des différentes formulations (Lagrangienne, Eulérienne et ALE) en 1D [58]                                 | 44 |
| 2.2  | Domaine de validité de diverses théories de houle, en fonction de la profondeur $h$ , hauteur de la vague $H$ , période temporelle de la vague $\tau$ et pesanteur $g$ [125] . . . . . | 45 |
| 2.3  | Étapes générales de la méthodes des éléments finis . . . . .   | 49 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.4  | mécanisme de couplage fluide-structure . . . . .  | 52 |
| 2.5  | Schéma générale du couplage faible . . . . .  | 52 |
| 2.6  | Schéma du couplage fort . . . . .   | 53 |
| 2.7  | Schéma de couplage fluide structure : (a) monolithique, (b) partitionné . . . . .   | 54 |
| 2.8  | Schématisation de l'algorithme de couplage temporel explicite . . . . .   | 55 |
| 2.9  | Schématisation de l'algorithme de couplage temporel implicite . . . . .   | 55 |
| 2.10 | Organigramme des stratégies de couplage (en rouge les techniques de couplage utilisées dans ce travail) . . . . .   | 56 |
| 2.11 | Aperçu des fonctionnalités de preCICE [99] . . . . .  | 58 |
|      |   |    |
| 3.1  | Dispositif expérimental . . . . .   | 61 |
| 3.2  | Schéma simple présentant l'angle de rotation $\alpha(t)$ et le débattement maximal . . . . .  | 62 |
| 3.3  | Dispositif expérimental du système mécanique : (a) Représentation isométrique, (b) Représentation plane) . . . . .  | 63 |
| 3.4  | Différentes liaisons entre les composantes du système . . . . .   | 64 |
| 3.5  | (a) Schématisation des mouvements des bras pour le cas de l'angle $\theta_1$ quelconque, (b) Cas où $\theta_1 = -\pi/2$ , (c) Cas où $\theta_1 = -3\pi/2$ . . . . .   | 65 |
| 3.6  | Position des trois points suivis : (a) Bras, (b) Plateau, (c) Positions des points à l'instant 0 et t . . . . .   | 68 |
| 3.7  | Comparaison entre les données expérimentales et théoriques : Déplacement du bras et Angle d'inclinaison du plateau . . . . .  | 69 |
| 3.8  | (a) Caméra 'Basler acA1300-200um' et Objectif 'Basler C125-1218-5M-P' utilisés, (b) les caractéristique de la caméra [20] et son l'objectif [93] . . . . .  | 70 |
| 3.9  | Image de la mire de calibration. La croix encadrée correspond au centre de la cuve. La flèche correspond à la distance en millimètre entre les deux croix rouge, permettant la détermination du facteur d'échelle . . . . . | 71 |
| 3.10 | Cuve remplie avec de l'eau claire : (a) Image brute acquise, (b) Image traitée sur Scilab, (c) Méthode d'extraction : profil d'intensité lumineuse pour une abscisse x donnée. . . . .                                      | 72 |
| 3.11 | Cuve remplie avec de l'eau colorée avec du riz : (a) Image brute acquise, (b) Image traitée sur Scilab, (c) Méthode d'extraction : profil d'intensité lumineuse pour une abscisse x donnée. . . . .                         | 73 |
| 3.12 | Processus du ballonnement de l'eau : (a) Profil de la surface libre à l'instant 4s, (b) Évolution temporelle du ballonnement à $x = 25mm$ de la paroi droite. . . . .   | 73 |
| 3.13 | Processus du ballonnement de l'eau colorée : (a) Profil de la surface libre à l'instant 4.3s, (b) Évolution temporelle du ballonnement à $x = 25mm$ de la paroi droite. . . . .   | 74 |
|      |   |    |
| 4.1  | Schéma représentant le cas du ballonnement dans un réservoir soumis à une excitation harmonique . . . . .   | 80 |
| 4.2  | Oscillations linéaires de la surface libre pour $\omega_e = 0,95 \omega_1$ et $b = 0,4 mm$ . Comparaison entre le modèle numérique actuel, le modèle numérique antérieur [64] et la solution analytique [89] . . . . .      | 81 |
| 4.3  | Oscillations non linéaire de la surface libre $\omega_e = \omega_1$ et $b = 5 mm$ . . . . .   | 82 |
| 4.4  | Schéma général du réservoir avec les notations utilisées pour les domaines et les frontières . . . . .  | 82 |
| 4.5  | Comparaison de contours de fraction volumique instantanés ( $T_p/4$ , $T_p/2$ et $3T_p/4$ ) expérimentaux et numériques du ballonnement à l'intérieur de la cuve ( $B = 133,5 mm$ ) . . . . .                               | 85 |

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 4.6  | Les cas particuliers des contours de fraction volumique instantanés numériques du ballonnement à l'intérieur de la cuve (cas d'absence de liquide dans la base de la cuve) . . . . .                                   | 86  |
| 4.7  | Vibrations des contours de fraction volumique instantanés numériques du ballonnement à l'intérieur de la cuve à l'instant $t = \frac{T_p}{2}$ : à gauche à 30% de remplissage, à droite à 50% de remplissage . . . . . | 87  |
| 4.8  | Évolution temporelle de la surface libre à 25 mm de la paroi droite. Comparaison entre les données expérimentales et numériques pour $\tau_r = 30\%$ . . . . .   | 89  |
| 4.9  | Évolution temporelle de la surface libre à 25 mm de la paroi droite. Comparaison entre les données expérimentales et numériques pour $\tau_r = 50\%$ . . . . .   | 90  |
| 4.10 | Évolution temporelle de la surface libre à 25 mm de la paroi droite. Comparaison entre les résultats numériques à 30% et 50% de remplissage . . . . .  | 91  |
| 4.11 | Évolution temporelle de la surface libre à 25 mm de la paroi droite. Comparaison entre les résultats numériques à 30% et 50% de remplissage . . . . .  | 93  |
| 4.12 | Comparaison de l'élévation de la surface libre du liquide entre le cas des effets gravitationnels seulement et le cas des effets gravitationnels et à la fois le mouvement de tangage . . . . .                        | 94  |
| 5.1  | Mouvement de réservoir dans une voie maritime . . . . .  | 96  |
| 5.2  | Schéma présentant le réservoir étudié . . . . .  | 98  |
| 5.3  | Évolution des composantes de l'accélération de la pesanteur et de l'accélération d'entraînement . . . . .  | 98  |
| 5.4  | Maillage du domaine fluide (gauche) et de la structure (droite) . . . . .  | 100 |
| 5.5  | L'état initiale ( $t=0$ ) et l'état d'équilibre du réservoir sous pression hydrostatique . . . . .   | 101 |
| 5.6  | (a) Déformation des parois gauche et droite supérieures du réservoir, (b) Élévation de la surface libre du liquide . . . . .   | 102 |
| 5.7  | Comparaison de l'élévation de surface libre entre les cas de parois flexibles et rigides . . . . .   | 103 |
| 5.8  | Déplacement de la paroi gauche du réservoir . . . . .  | 103 |
| 5.9  | FFT appliquée à l'évolution de la surface libre des deux cas (rigide et flexible) et au déplacements des parois flexibles . . . . .  | 104 |
| 6.1  | Déviation des parois du réservoir sous pression hydrostatique . . . . .  | 107 |
| 6.2  | (a) Déformation des parois gauche et droite supérieures du réservoir, (b) Élévation de la surface libre du liquide . . . . .   | 108 |
| 6.3  | Vibrations des contours de fraction volumique instantanés numériques du ballonnement à l'intérieur de la cuve à 50% de remplissage : à gauche le cas flexible, à droite le cas rigide . . . . .                        | 109 |
| 6.4  | Élévation de la surface libre à 20 mm de la paroi droite . . . . .   | 111 |
| 6.5  | Élévation de la surface libre à 20 mm de la paroi droite . . . . .   | 112 |
| 6.6  | Vibrations des contours de fraction volumique instantanés numériques du ballonnement à l'intérieur de la cuve à 50% de remplissage : à gauche cas flexible, à droite cas rigide . . . . .                              | 113 |
| 6.7  | Déplacements des parois droite et gauche supérieures du réservoir . . . . .  | 114 |
| 6.8  | Déplacements des parois droite et gauche supérieures du réservoir . . . . .  | 115 |
| 6.9  | FFT appliquée sur l'évolution temporelle de l'élévation de la surface libre et sur les déplacements des parois flexible . . . . .  | 117 |

---

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| A.1 | FFT appliquée sur l'évolution temporelle de l'élévation de la surface libre expérimentale . . . . .   | 131 |
| B.1 | Comparaison de contours de fraction volumique instantanés ( $T_p/4, T_p/2$ et $3T_p/4$ ) expérimentaux et numériques du ballottement à l'intérieur de la cuve ( $B = 128, 2 mm$ ) . . . . . | 133 |
| B.2 | Comparaison de contours de fraction volumique instantanés ( $T_p/4, T_p/2$ et $3T_p/4$ ) expérimentaux et numériques du ballottement à l'intérieur de la cuve ( $B = 89, 3 mm$ ) . . . . .  | 134 |
| B.3 | Comparaison de contours de fraction volumique instantanés ( $T_p/4, T_p/2$ et $3T_p/4$ ) expérimentaux et numériques du ballottement à l'intérieur de la cuve ( $B = 32, 1 mm$ ) . . . . .  | 135 |
| C.1 | Evolutions des contours de fraction volumique instantanés numériques du ballottement à l'intérieur de la cuve à 50% de remplissage : à gauche cas flexible, à droite cas rigide . . . . .   | 137 |
| C.2 | Evolutions des contours de fraction volumique instantanés numériques du ballottement à l'intérieur de la cuve à 50% de remplissage : à gauche cas flexible, à droite cas rigide . . . . .   | 138 |
| D.1 | FFT appliquée sur l'évolution temporelle de l'élévation de la surface libre et sur les déplacements des parois flexible . . . . .   | 140 |
| D.2 | FFT appliquée sur l'évolution temporelle de l'élévation de la surface libre et sur les déplacements des parois flexible . . . . .   | 141 |

---

## Liste des tableaux

---

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 3.1 | Tableau récapitulatif des essais réalisés en fonction de type de mouvement (bras/plateau) dans le cadre de la validation expérimentale-théorique : avec (i) est la référence de la position du bras (1) sur la roue par rapport à son centre . . . . .                                | 68  |
| 3.2 | Paramètres de réglage du dispositif expérimental et grandeurs caractéristiques de la houle correspondantes. La distance $a_i$ est la distance entre le centre de la roue et le point de montage du bras (2) $A_i$ ; le débattement $B_i$ dépend également du choix de $A_i$ . . . . . | 75  |
| 3.3 | Tableau récapitulatif des essais effectués pour chaque configuration : avec $\tau_r$ est le taux de remplissage, $\omega_{mi}$ est la vitesse de rotation du moteur mesurée, $U$ la tension d'alimentation et $N$ le nombre d'essais effectués . . . . .                              | 76  |
| 4.1 | Paramètres utilisés pour la validation sous une excitation horizontale . . . . .  | 79  |
| 4.2 | Caractérisation de chaque cas étudié . . . . .  | 84  |
| 6.1 | Représentation des différentes configurations d'excitation étudiées . . . . .   | 107 |
| 6.2 | Amplitude maximale des cas flexible et rigide pour chaque configuration . . . . .   | 110 |
| 6.3 | Déplacement maximale des parois de chaque configuration . . . . .   | 116 |
| D.1 | Comparaison entre les fréquences numériques et analytiquement . . . . .   | 139 |



---

## Liste des symboles

---

### Lettres romaines

|                            |  |
|----------------------------|--|
| $\omega_i$                 | Vitesse de rotation de la roue                       |
| $\vec{P}$                  | Poids du corps                                       |
| $\vec{S}_f$ et $\vec{S}_s$ | Vecteurs des forces volumiques                       |
| $\vec{u}_r$                | Vitesse artificielle à l'interface gaz/liquide       |
| $A_e$                      | Accélération harmonique externe                      |
| $A_i$                      | Points de montage du bras (2)                        |
| $h_{cc}$                   | Hauteur crête à creux                                |
| $T_p$                      | Période caractéristique de la houle                  |
| $\vec{P}_A$                | Poussée d'Archimède                                  |
| $\vec{u}$                  | Vitesse du fluide                                    |
| $\vec{w}$                  | Vitesse de la grille de maillage                     |
| a                          | Amplitude de la houle                                |
| c                          | Vitesse de propagation de l'onde                     |
| d                          | Profondeur de la mer                                 |
| E                          | Module de Young                                      |
| g                          | Composante verticale de l'accélération de la gravité |
| k                          | Nombre d'onde  |
| P                          | Pression   |

### Symboles grecs

|             |                                |
|-------------|--------------------------------|
| $\alpha(t)$ | Angle d'inclinaison de la cuve |
|-------------|--------------------------------|

|                        |  |
|------------------------|--|
| $\bar{\bar{\epsilon}}$ | Tenseur des déformations                                   |
| $\bar{\bar{\sigma}}$   | Champs de contraintes                                      |
| $\bar{\bar{\tau}}$     | Tenseur des contraintes visqueuses                         |
| $\bar{\bar{I}}$        | Tenseur d'identité   |
| $\ddot{\alpha}(t)$     | Accélération angulaire de la cuve                          |
| $\dot{\alpha}(t)$      | Vitesse angulaire de la cuve                               |
| $\eta$                 | Élévation de la surface libre par rapport à l'état initial |
| $\lambda$              | Longueur d'onde  |
| $\mu$                  | Viscosité dynamique  |
| $\mu_f$                | Viscosité dynamique du fluide                              |
| $\mu_g$                | Viscosité dynamique de la phase gazeuse                    |
| $\mu_l$                | Viscosité dynamique de la phase liquide                    |
| $\mu_s$ et $\lambda_s$ | Coefficient de Lamé  |
| $\nu_s$                | Coefficient de Poisson                                     |
| $\omega_n$             | $n^{\text{ème}}$ pulsation propre                          |
| $\omega$               | Fréquence angulaire  |
| $\Omega_f$             | Domaine fluide   |
| $\Omega_s$             | Domaine solide   |
| $\vec{\xi}$            | Champs de déplacement                                      |
| $\psi$                 | Fraction volumique   |
| $\rho_f$               | Masse volumique fluide                                     |
| $\rho_g$               | Masse volumique de la phase gazeuse                        |
| $\rho_l$               | Masse volumique de la phase liquide                        |
| $\rho_s$               | Masse volumique solide                                     |

### Acronymes

|     |  |
|-----|--|
| ALE | Arbitraire Lagrangienne-Eulérienne                             |
| CFD | Dynamique des Fluides Numérique (Computational Fluid Dynamics) |
| EDP | Équations aux Dérivées partielles                              |
| EMR | Energies Marines Renouvelables                                 |
| FFT | Fast Fourier Transform   |
| GNL | Gaz Naturel Liquéfié   |
| IFS | Interaction Fluide-Structure                                   |
| MBS | Méthodes des Systèmes Multicorps                               |

MEF Méthodes des Éléments Finis

MVF Méthodes des Volumes Finis

NCEX Nearshore Canyon Experiment

OpenFOAM Open Field Operation And Manipulation

preCICE precise Code Interaction Coupling Environment

SLA Système d'équations Algébriques Linéaires

SPH Smooth Particule Hydrodynamic

SWAN Simulating WAVes Nearshore

VOF Volume Of Fluide

WAM WAve Modelà revoir

WLO water-landing object

WW3 WaveWatch III

### **Opérateurs**

$\nabla \cdot$  Divergence

$\nabla^2$  ou  $\Delta$  Laplacien

$\nabla$  Gradient

### Résumé

Dans ce chapitre, nous abordons le contexte et les différents phénomènes qui constituent cette thèse. Ainsi une revue de littérature sur les phénomènes du ballonnement, de houle, d'IFS. Il se termine par la description de l'objectif de la thèse et son plan.

### Sommaire

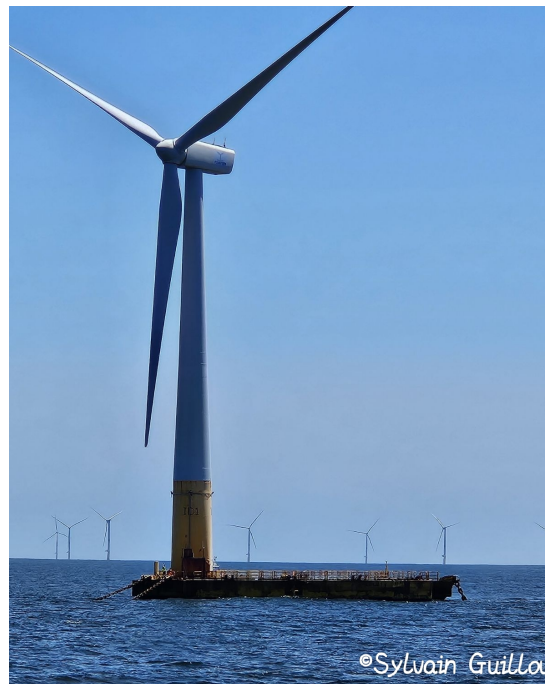
---

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1.1</b> | <b>Mise en contexte et problématique . . . . .</b>   | <b>18</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Phénomène de ballonnement des liquides . . . . .</b>  | <b>19</b> |
| <b>1.3</b> | <b>Flottabilité des corps et des réservoirs . . . . .</b>  | <b>22</b> |
| <b>1.4</b> | <b>C'est quoi une houle ? . . . . .</b>  | <b>22</b> |
| <b>1.5</b> | <b>Interaction fluide-structure (IFS) . . . . .</b>  | <b>24</b> |
| 1.5.1      | Industrie aéronautique . . . . .   | 24        |
| 1.5.2      | Génie civile et architecture . . . . .   | 25        |
| 1.5.3      | Systèmes énergétiques et maritimes . . . . .   | 26        |
| 1.5.4      | Biomécanique . . . . .   | 26        |
| <b>1.6</b> | <b>Revue de littérature . . . . .</b>  | <b>28</b> |
| 1.6.1      | Les différentes approches pour l'étude du ballonnement de fluide   | 28        |
| 1.6.2      | Dynamique des corps et réservoirs flottants . . . . .  | 32        |
| 1.6.3      | Modélisation de la Houle . . . . .   | 34        |
| 1.6.4      | Évolution des études en interaction fluide-structure . . . . .   | 35        |
| <b>1.7</b> | <b>IFS et ballonnement à l'intérieur des réservoirs flottants dans<br/>le domaine des énergies marines renouvelables . . . . .</b> | <b>37</b> |
| <b>1.8</b> | <b>Objectif de la thèse . . . . .</b>  | <b>38</b> |

---

## 1.1 Mise en contexte et problématique

L'étude du ballottage dans les réservoirs partiellement remplis est une problématique importante dans de nombreux domaines. La dynamique de liquide à l'intérieur des réservoirs partiellement remplis peut entraîner des détériorations indésirables de celui-ci. Dans le contexte des énergies marines renouvelables, où des réservoirs flottants sont utilisés pour maintenir la stabilisation des équipements tels que les hydroliennes et les éoliennes, la maîtrise du ballottage devient fondamentale pour assurer leur stabilité et leur durabilité. C'est le principe utilisé dans les technologies comme le flotteur **IDEOL** (figure 1.1), où le ballottage à l'intérieur du réservoir est utilisé pour contrer les mouvements externes de la houle et assurer la stabilité de la structure.



**Figure 1.1** – Éolienne flottante offshore

Cependant, la conception et la mise en œuvre de ces réservoirs nécessitent une analyse approfondie des forces en jeu, ainsi que des simulations et des tests pour garantir que le mouvement du liquide interne se coordonne efficacement avec les conditions extérieures. Cela implique également de s'assurer que le réservoir lui-même est capable de supporter ces mouvements sans subir de dommages structurels.

En somme, la gestion du ballottage dans les réservoirs partiellement remplis est un défi technique qui nécessite une approche intégrée, combinant la conception de réservoirs adaptés, des modèles de simulation précis, et une compréhension approfondie des forces environnementales pour assurer la stabilité et la sécurité des structures flottantes dans des environnements marins difficiles.

Dans ce travail, nous nous intéressons à la dynamique du liquide à l'intérieur d'un réservoir souple partiellement rempli, soumis à la houle, qui sert à la stabilisation des systèmes flottants. Pour ce faire, nous avons fait une analyse sur les différents phénomènes qui interviennent dans ce problème. Dans les sections suivantes, nous analysons les phénomènes de ballottage, flottabilité, la houle et l'interaction fluide-structure.

## 1.2 Phénomène de ballottement des liquides

Le ballottement (en anglais *sloshing*) est un phénomène où la surface libre d'un liquide à l'intérieur d'un réservoir partiellement rempli se déplace de manière non contrôlée en réponse à des forces externes telles que la houle, les tremblements de terre, les mouvements de la structure porteuse ou le transport des liquides. Lors du ballottement, la surface du liquide se déplace de manière chaotique, générant des vagues qui se propagent à sa surface. Ces mouvements peuvent provoquer des oscillations indésirables qui peuvent endommager le réservoir ou compromettre la stabilité de la structure à laquelle il est attaché.

Le concept de ballottement des liquides est observé dans plusieurs secteurs industriels (figure 1.2), on peut mentionner :

- **Industrie pétrolière et gazière** : Dans l'industrie pétrolière et gazière, le ballottement des liquides est important pour la conception et l'exploitation des réservoirs de stockage et des installations offshore (comme les plateformes pétrolières flottantes ou les éoliennes flottantes ...).
- **Ingénierie maritime et construction navale** : Dans ce domaine, le ballottement peut être utilisé pour la stabilité et la sécurité des navires et de plate-formes offshore en mer agitée.
- **Hydraulique et génie civil** : En ingénierie hydraulique et en génie civil, l'étude du ballottement sert à évaluer les mouvements d'eau à l'intérieur des barrages, des canaux et des réservoirs et à concevoir des structures résistant aux séismes, aux vents forts ou aux autres forces naturelles. Les effets du ballottement des liquides sont aussi étudiés pour concevoir des systèmes de stabilisation des bâtiments, des barrages, et d'autres infrastructures.
- **Aérospatiale** : Dans la conception des réservoirs de carburant des véhicules spatiaux, le ballottement des liquides est un phénomène important à prendre en compte pour assurer la stabilité et le contrôle du véhicule lors des phases de vol.

La figure 1.2 montre quelques exemples d'application de ballottement des liquides.

Par définition, le ballottement induit des ondes à la surface libre du liquide à l'intérieur du réservoir, leur amplitude dépendant de l'intensité du mouvement externe. Dans certains cas, cela peut entraîner des perturbations diverses dans le réservoir, lorsqu'il s'agit de stocker ou de transporter des liquides, en particulier les liquides qui possèdent des propriétés dangereuses (la radioactivité, l'inflammabilité ou la toxicité). Établir des marges de sécurité appropriées est essentiel pour anticiper les incidents et réduire les risques pour la santé humaine et l'écosystème.

À titre d'exemple, en avril 2019, les Philippines ont été secouées par un séisme d'une magnitude de 6.3, provoquant des mouvements sismiques qui ont mis en danger les structures construites et ont poussé les habitants à se précipiter vers un lieu sûr. Parmi les images les plus surprenantes de cet événement, il y a celle de l'eau déferlant d'un gratte-ciel résidentiel dans le quartier de Binondo à Manille (figure 1.3) [29].



**Figure 1.2** – Exemples de réservoirs renfermant des liquides susceptibles de subir un ballotement



**Figure 1.3** – Ballotement dans une piscine sur le toit d'un gratte-ciel lors d'un séisme [29]

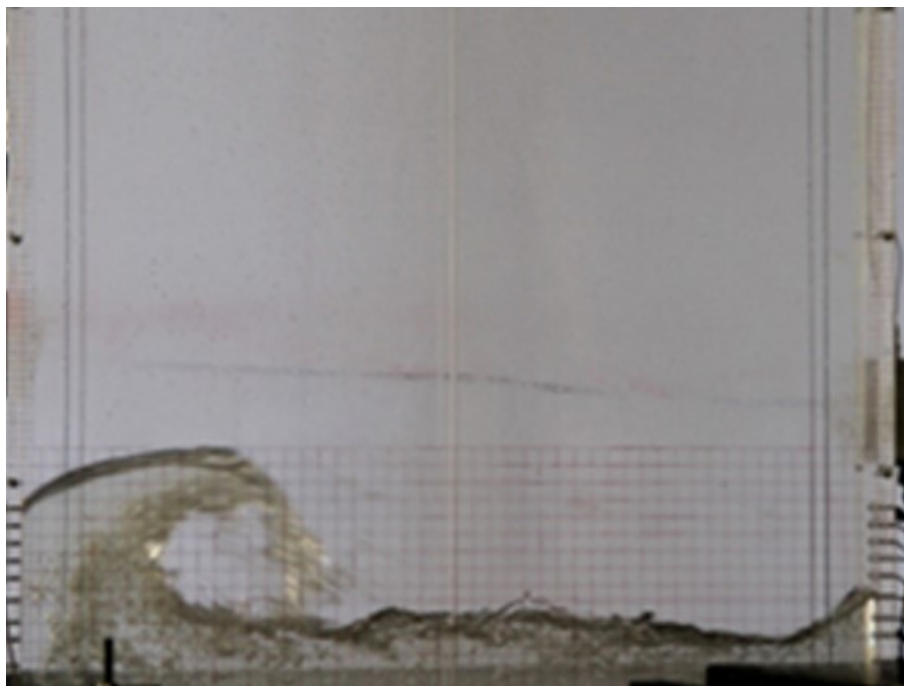
Le comportement dynamique d'une surface libre d'un liquide dépend de divers facteurs, parmi lesquels on peut mentionner :

- **L'excitation externe appliquée au réservoir** : En particulier, le type de l'excitation, sa fréquence et son amplitude. Lorsque la fréquence de l'excitation externe est proche de la fréquence propre de ballotement, les fluctuations de la

surface libre du réservoir atteignent leur amplitude maximale. Cela est dû au phénomène de résonance.

- **Les propriétés et géométrie du réservoir :** Un liquide dans un réservoir rectangulaire aura tendance à ballotter différemment d'un liquide dans un réservoir cylindrique [23]. De plus, les dimensions du réservoir ont un impact direct sur la fréquence propre de ballottage du liquide et du réservoir solide. Ainsi, le matériau constituant le réservoir a un impact sur le ballottage du liquide.
- **La hauteur de remplissage :** Le ballottage à faible remplissage d'eau a un effet plus important sur les parois du réservoir [22, 63].
- **La viscosité du liquide :** Une augmentation de la viscosité entraîne une résistance accrue aux mouvements du liquide, le rendant plus enclin à adhérer aux parois, ce qui modifie la dynamique du ballottage [133].

À de faibles amplitudes relatives, les déplacements du liquide restent petits pour que le ballottage soit considéré comme un phénomène linéaire, c'est à dire que la réponse du liquide est directement proportionnelle à l'excitation. Cependant, à des amplitudes plus élevées, des effets non linéaires deviennent importants. Cela signifie que la réponse du liquide devient plus complexe et peut être plus difficile à prévoir. Par exemple, on peut observer des phénomènes de déferlement des vagues (figure 1.4) et de formation de jets à la surface du liquide [9].



**Figure 1.4** – Déferlement de vague dans un réservoir en ballottage [140]

Dans le domaine spécifique des réservoirs de stockage de liquides (les réservoirs d'eau ou de carburant), le ballottage peut avoir des conséquences sur la stabilité du réservoir, et sur la sécurité des installations. C'est pourquoi les ingénieurs conçoivent souvent ces réservoirs en prenant en compte les effets du ballottage et en les renforçant ou en ajoutant des dispositifs pour minimiser ces effets.

Pour réduire les effets pouvant être causés par le ballottage, plusieurs techniques peuvent être employées comme :

- **Modélisation numérique** : Développement des modèles numériques basés sur la mécanique des fluides (CFD) pour prédire le comportement du liquide en ballonnement et qui permet d'optimiser la géométrie des réservoirs et les conditions d'écoulement pour réduire le ballonnement [1].
- **Changement de forme du conteneur** : Des formes de conteneurs non circulaires, comme des rectangles, peuvent présenter des amplitudes du ballonnement différentes que les conteneurs cylindriques.
- **Utilisation des chicanes** : Des chicanes, ou déflecteurs, installés à l'intérieur du conteneur peuvent perturber les ondes de surface et amortir le mouvement du liquide [1].
- **Systèmes d'amortissement** : Des dispositifs passifs, comme des mousses ou des matériaux poreux, peuvent être placés dans le conteneur pour absorber l'énergie des ondes de surface et dissiper le mouvement du liquide. Des systèmes de contrôle actifs [1], utilisant des capteurs et des actionneurs, sont utilisés pour ajuster dynamiquement la position ou la forme du conteneur pour contrer le ballonnement en temps réel.

Dans notre travail, nous intéressons au ballonnement dans un réservoir flottant.

### 1.3 Flottabilité des corps et des réservoirs

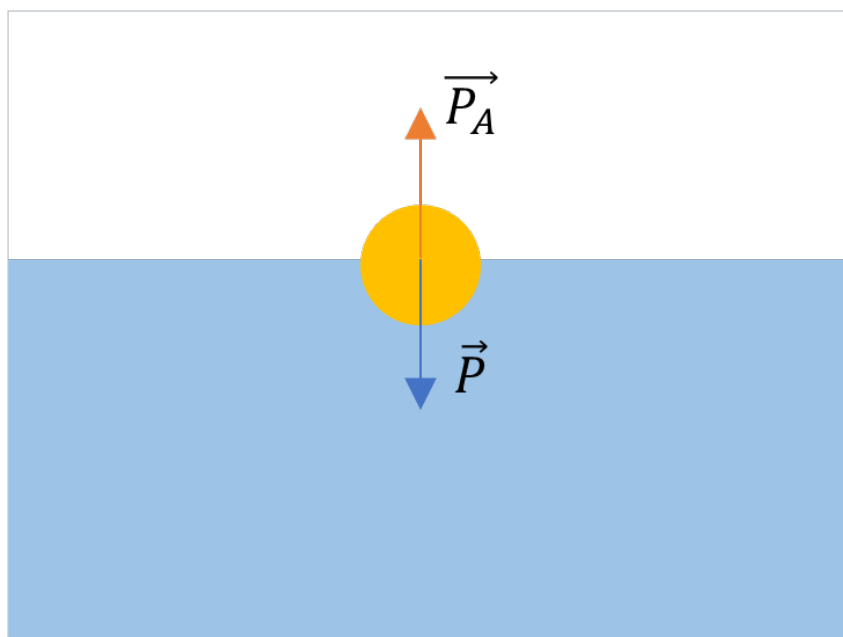
Un corps flottant est un objet, un réservoir ou une autre structure partiellement ou complètement immergé qui a la capacité de rester en état d'équilibre dans un liquide sans couler. Cela peut être appelé "flottaison". La théorie de flottaison consiste principalement à déterminer les positions d'équilibres d'un corps immergé dans un liquide et à vérifier les conditions de stabilité pour cet équilibre. Dans un état d'équilibre, le corps flottant exerce une pression sur le fluide en tous points de contact. En retour, le fluide exerce une pression sur tous les points de la surface du corps en contact avec le fluide, selon la troisième loi de Newton. Sachant que cette pression est de plus en plus grande au fur et à mesure que la profondeur augmente.

Selon le principe d'Archimède, un objet immergé dans un fluide subit une force de poussée vers le haut égale au poids du fluide déplacé par l'objet. Si la force de poussée est supérieure au poids de l'objet, celui-ci flotte. Sinon, il coule [32] (voir figure 1.5). Les corps flottants peuvent être utilisés comme systèmes de capteurs pour la récupération de l'énergie des vagues [61] ou pour la stabilisation des systèmes en mer (comme les éoliennes).

Le but principale de notre travail, est d'étudier le ballonnement dans un réservoir flottant dans des conditions maritime (réservoir soumis à la houle).

### 1.4 C'est quoi une houle ?

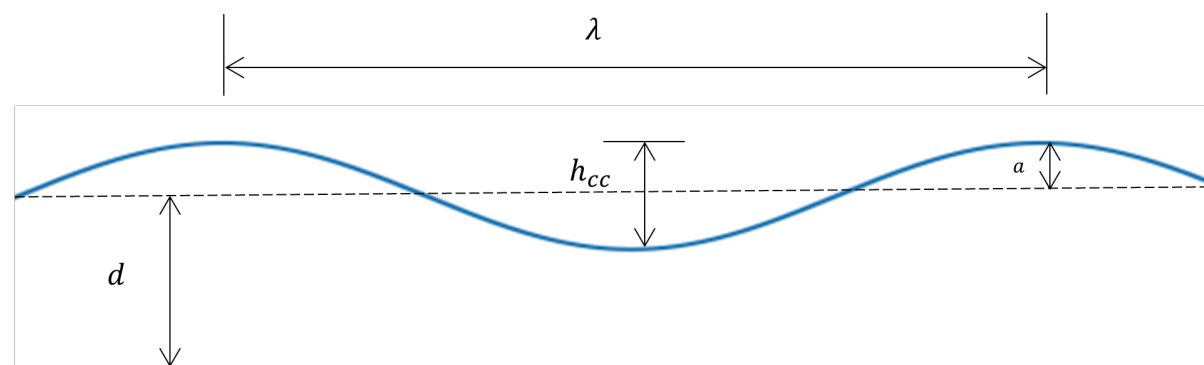
La houle est un phénomène océanographique caractérisé par un mouvement ondulatoire de la surface de la mer, généré par des vents soufflant à une grande distance de la zone d'observation (vents lointains). Contrairement aux vagues créées par les vents locaux, la houle présente une régularité relative, bien qu'elle ne soit pas strictement périodique comme les vagues régulières. Elle se distingue par une variation lente de son amplitude. Plus précisément, la houle est définie comme la partie de l'état de la mer qui n'a pas de lien direct avec les vents présents dans la zone d'observation. En anglais, le terme



**Figure 1.5** – Principe de la poussée d'Archimède

correspondant est "swell", en opposition à "wind sea" qui désigne la mer agitée par les vents locaux.

Une houle se caractérise principalement par sa hauteur de crête à creux ( $h_{cc}$ ), qui est le double de l'amplitude ( $a$ ). Cette hauteur varie généralement de quelques décimètres à plusieurs mètres. En réalité, il s'agit d'un phénomène qui n'est pas périodique et qui peut s'interpréter comme une somme d'une infinité de composantes sinusoïdales infiniment petites. La période moyenne des crêtes ( $T_p$ ) augmente avec la distance de propagation car les composantes à courte période s'atténuent plus rapidement. Elle est souvent de l'ordre de plusieurs secondes. Une longueur d'onde ( $\lambda$ ) qui est la distance entre deux crêtes successives. On distingue généralement la houle courte ( $\lambda$  est inférieure à 100 m), la houle moyenne ( $\lambda$  est entre 100 et 300 m) et la houle longue ( $\lambda$  est supérieure à 300 m). La profondeur de la mer ( $d$ ), qui correspond à la hauteur entre le fond et la surface libre de la mer au repos [114]. La figure (1.6) présente les différents paramètres de la houle.



**Figure 1.6** – Schéma descriptif des paramètres de la houle

En pleine mer, la houle est souvent à peine perceptible. Cependant, elle peut voyager sur de longues distances, parfois des dizaines de milliers de kilomètres, en conservant ses

caractéristiques principales. En s’approchant des côtes, la houle s’amplifie à mesure que la profondeur de l’eau diminue, particulièrement sur les hauts-fonds. Cette amplification peut mener à des vagues déferlantes de plusieurs mètres de hauteur.

## 1.5 Interaction fluide-structure (IFS)

L’interaction fluide-structure (IFS), ou Fluid-Structure Interaction (FSI) en anglais, est un domaine scientifique complexe. Elle concerne l’étude du comportement des structures mobiles ou déformables immergées dans un fluide en mouvement ou en contact avec celui-ci, dont la réponse peut être fortement affectée par l’action du fluide et inversement. Elle examine notamment comment le fluide et la structure interagissent et influencent mutuellement leurs comportements respectifs. Les forces exercées par le fluide en mouvement, peuvent déformer, déplacer ou même endommager les structures solides. La dynamique des structures immergées, est fortement influencée par les forces hydrodynamiques. Par ailleurs, les mouvements de la structure modifient le champ d’écoulement du fluide autour d’elle, entraînant des changements dans les profils de vitesse, la création de tourbillons et des variations de pression.

Ces interactions peuvent être stables ou oscillatoires. Dans le cas des interactions stables, la structure atteint un nouvel équilibre avec le fluide environnant. En revanche, les interactions oscillatoires surviennent lorsque la déformation induite dans la structure la fait bouger de telle sorte que la source de déformation est réduite, puis la structure revient à son état antérieur, et le processus se répète. La figure ci-après (figure 1.7) illustre le cycle de l’interaction fluide-structure.

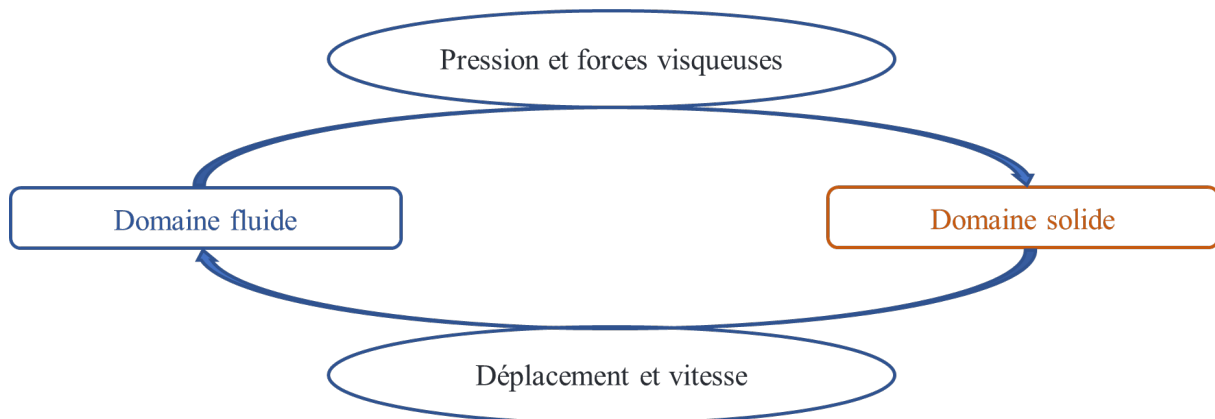


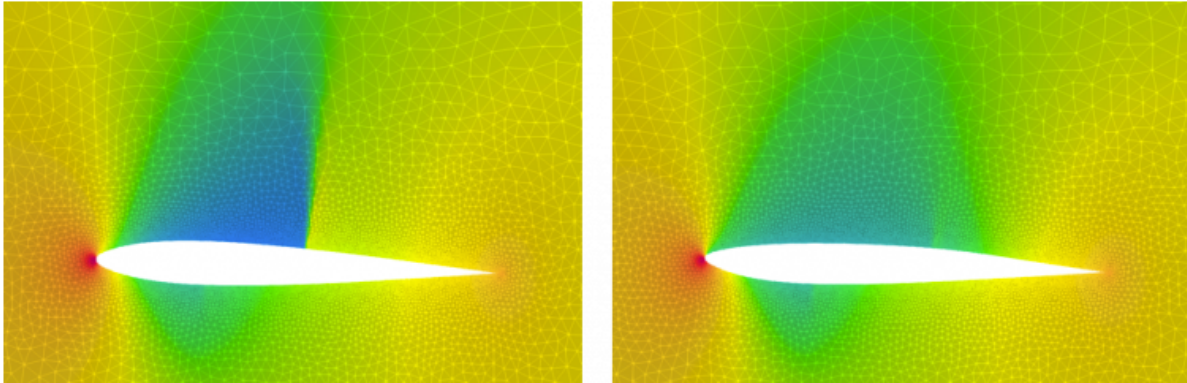
Figure 1.7 – Schéma du cycle d’interaction fluide-structure

L’IFS est un domaine d’étude essentiel dans de nombreuses applications industrielles et technologiques. Ci-après quelques exemples du phénomène de l’interaction fluide-structure selon les domaines d’application.

### 1.5.1 Industrie aéronautique

En industrie aéronautique, l’IFS joue un rôle essentielle pour comprendre le comportement des ailes d’avions et des pales d’hélicoptères soumises à des charges aérodynamiques. Elle permet d’améliorer la sécurité en prévenant les instabilités structurelles, d’optimiser les performances en augmentant l’efficacité aérodynamique et en réduisant la consommation

de carburant, de réduire les coûts en limitant le besoin de prototypes physiques grâce aux simulations précises et d'accroître le confort en minimisant les vibrations et les déformations. Les simulations en IFS permettent également d'optimiser la forme des ailes (voir figure 1.8) pour maximiser la portance et minimiser la traînée.



**Figure 1.8** – Simulation du champ de pression autour d'un profil d'aile (à gauche, le profil initial, à droite le profil optimal) [14]

## 1.5.2 Génie civil et architecture

Dans le domaine du génie civil, les simulations numériques et expérimentales d'IFS ont joué un rôle crucial depuis leurs débuts jusqu'à aujourd'hui pour la conception de ponts, de bâtiments et autres infrastructures capables de résister aux charges dues au vent et aux séismes. Elles permettent de garantir la sécurité et la durabilité de ces ouvrages en tenant compte des forces fluides. En effet, lorsque la fréquence naturelle d'une structure est proche de la fréquence de l'excitation extérieure, la réponse dynamique de la structure peut devenir instable, ce qui accroît les risques de dommages importants.

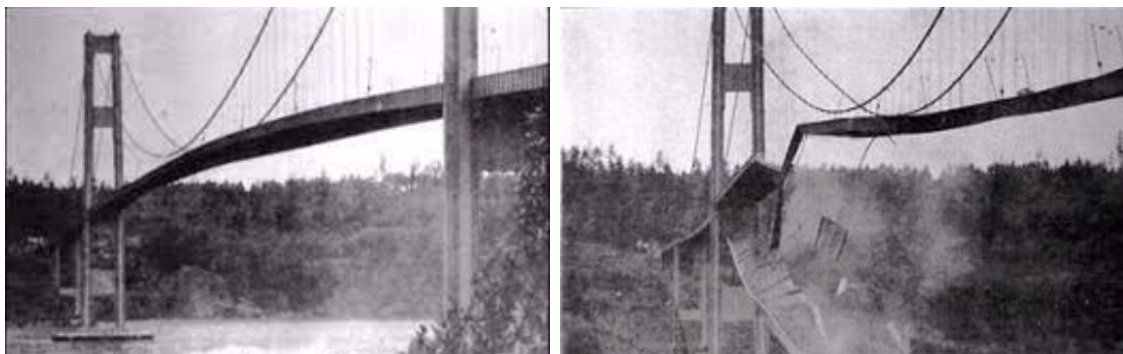
Cette situation est due au phénomène de résonance, où l'énergie de l'excitation extérieure est amplifiée par la structure, entraînant des déformations et des forces internes potentiellement destructrices. Dans de tels cas, l'ingénieur doit envisager plusieurs stratégies pour atténuer les effets néfastes de la résonance, car il est généralement impossible de réduire l'amplitude de l'excitation ou de modifier sa fréquence, comme c'est le cas par exemple pour les séismes. Par conséquent, le contrôle de la dynamique de la structure elle-même devient la solution la plus fiable pour assurer la sécurité et l'intégrité de la structure face à ces excitations.

Le 28 décembre 1879, le grand pont *Tay Bridge* s'est effondré (figure 1.9) à cause d'une violente tornade avec des vents de force 11 (sur l'échelle de Beaufort) et des rafales de 112 km/h. Cette catastrophe qui a entraîné la mort de 75 personnes, a profondément interpellé les chercheurs et les ingénieurs [21].

Lorsqu'on parle d'interaction entre les forces aérodynamiques et les déformations d'une structure qui modifient à leur tour l'écoulement de l'air et les forces aérodynamiques résultantes, il s'agit du phénomène d'aéroélasticité. Parmi les exemples classiques, on mentionne la rupture du pont du *détroit de Tacoma* (figure 1.10) [30]. Dès le matin, des oscillations en torsion de grande amplitude ont commencé à affecter le pont, résultant de l'interaction complexe entre les forces aérodynamiques du vent et la flexibilité de la structure. Ces oscillations dépassent les capacités de la structure à les absorber et à maintenir son intégrité. Après moins d'une heure le pont s'est effondré de manière dramatique.



**Figure 1.9** – Catastrophe du pont *Tay bridge* en Écosse, le 28 décembre 1879 [118]



(a) Torsion du pont [120]

(b) Effondrement du pont [33]

**Figure 1.10** – Rupture du pont du *Détroit de Tacoma*, le 07 Novembre 1940, États-Unis

Cet événement catastrophique a souligné l'importance cruciale de considérer même les effets dynamiques de l'aéroélasticité lors de la conception des ponts et d'autres structures exposées aux vents.

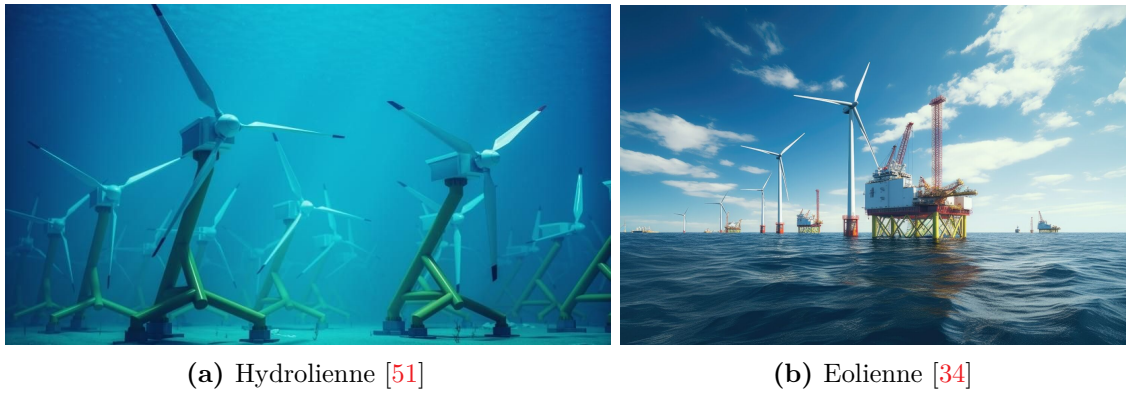
### 1.5.3 Systèmes énergétiques et maritimes

Dans le contexte maritime et énergétique, l'IFS revêt une importance capitale. Que ce soit pour l'optimisation des éoliennes et des hydroliennes ou pour la conception de navires et de plate-forme offshore, l'IFS est exploitée pour concevoir des structures capables de résister aux forces des vagues, des courant marins et des vents (voir figures 1.11 et 1.12).

### 1.5.4 Biomécanique

La modélisation des IFS en biomécanique et bio-ingénierie permet de comprendre et de prédire le comportement des systèmes biologiques complexes, où les fluides comme le sang ou l'air interagissent avec des structures solides comme les vaisseaux sanguins ou les tissus pulmonaires. Elle permet d'améliorer les traitements médicaux, et développer des dispositifs biomédicaux innovants.

Les simulations numériques jouent un rôle essentiel dans ce domaine, complétant les

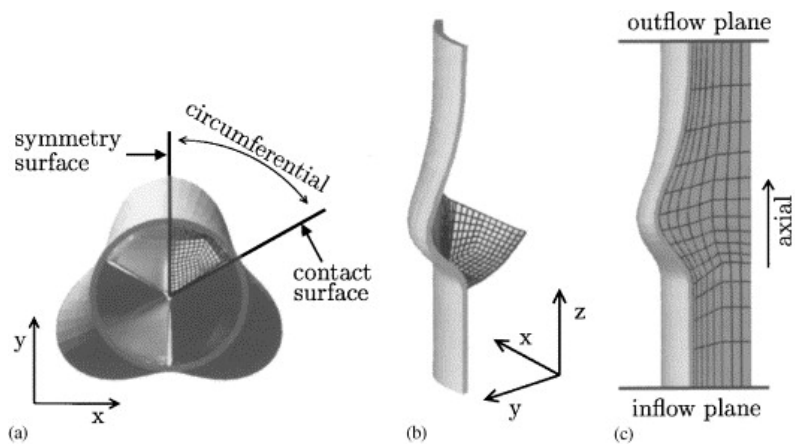


**Figure 1.11** – Structures sous-marines et offshore dans les systèmes énergétiques et maritimes



**Figure 1.12** – Navires et plateforme pétrolier [115]

expériences et permettant une analyse plus approfondie et moins invasive des phénomènes biologiques. La figure (1.13) montre un modèle 3D d'une étude des IFS dans une valve aortique.



**Figure 1.13** – Modèle FEM tridimensionnel de la valve cardiaque aortique : (a) partie de la valve utilisée pour le calcul, (b) maille FEM de la structure et (c) maille FEM du fluide [57]

## 1.6 Revue de littérature

### 1.6.1 Les différentes approches pour l'étude du ballottement de fluide

Le ballottement des liquides dans les réservoirs partiellement remplis peut entraîner des dommages considérables. En raison des forces d'inertie générées lors des mouvements du liquide, ce phénomène peut provoquer des déformations structurelles, des fuites ou même des ruptures des réservoirs. Afin de réduire ces risques, des recherches approfondies sont menées depuis plusieurs années. Les analyses théoriques développent des modèles mathématiques pour prédire le comportement du liquide et les contraintes structurelles résultantes. Les études expérimentales, quant à elles, consistent à réaliser des tests réels visant à valider ces modèles et à mieux comprendre les phénomènes physiques en jeu. Enfin, les approches numériques s'appuient sur des simulations informatiques pour modéliser le comportement des liquides dans les réservoirs et évaluer précisément les forces exercées.

#### Approches analytiques

*Moiseev* [86] a initié l'étude théorique des oscillations non linéaires d'un liquide dans un réservoir rigide à surface libre. En se basant sur des approximations modales et la théorie de l'écoulement potentiel, il a résolu les équations différentielles non linéaires décrivant ces phénomènes. Dans cette analyse, l'examen des modes de vibration et de leurs fréquences naturelles révèle que l'amplitude du ballottement dépend de la fréquence. Des solutions périodiques sont obtenues par des approximations successives. Par ailleurs, les vibrations forcées causées par des forces externes sont également étudiées, notamment en conditions de résonance [86].

S'appuyant sur cette recherche, *Faltinsen* [88] a approfondi la compréhension du phénomène de ballottement dans un réservoir rigide rectangulaire bidimensionnel. Dans cette étude, le réservoir est soumis à de petites oscillations harmoniques en roulis (roll) ou en embardée (sway), permettant de développer une théorie non linéaire de troisième ordre en régime permanent. *Faltinsen* a ainsi formulé un problème aux limites pour un écoulement potentiel non visqueux et a obtenu une solution en régime permanent sous forme de série de puissances. Les résultats théoriques ont montré un accord raisonnable avec les résultats expérimentaux [88].

*Ikeda et Nakagawa* [116] ont ensuite étudié les vibrations non linéaires d'une structure induites par le mouvement de ballottement dans un réservoir rectangulaire rigide soumis à une excitation sinusoïdale, en utilisant la théorie de l'écoulement potentiel. Leurs résultats théoriques ont été validés par des comparaisons avec des observations expérimentales, confirmant la fiabilité de leur modèle et de leurs hypothèses. Les résultats montrent que la fréquence d'excitation affecte l'amplitude du ballottement ainsi que celle du déplacement de la structure [116].

Dans le prolongement des travaux sur le ballottement, une étude analytique a été réalisée pour examiner le ballottement non linéaire d'un liquide dans un réservoir rigide rectangulaire bidimensionnel de profondeur d'eau finie par une approche modale. Cette étude s'appuie sur un système infini d'équations différentielles ordinaires non linéaires, pour formuler un système modal de dimension infinie décrivant le ballottement non linéaire d'un fluide incompressible en écoulement irrotationnel. La représentation du mouvement de la surface libre et du potentiel de vitesse en séries de Fourier généralisées a permis de valider

théoriquement les résultats par des expériences réalisées lors d'oscillations forcées dans un réservoir rectangulaire. Les observations expérimentales montrent que les mouvements transitoires du fluide prennent beaucoup de temps à se stabiliser, avec des phénomènes de ballonnement clairement identifiés [92, 90].

Face à la complexité des phénomènes physiques, l'analyse théorique peut s'avérer utile, mais elle présente aussi certaines limites. En particulier, l'hypothèse couramment employée de l'écoulement potentiel souvent adoptée dans les analyses théoriques, peut être invalide dans certains cas, surtout lorsqu'il s'agit de phénomènes non linéaires ou turbulents. La non-linéarité des équations, ou encore la nécessité d'inclure des phénomènes complexes comme la turbulence ou le déferlement des vagues, rend la résolution analytique difficile, voire impossible. Dans ces situations, des approches numériques ou expérimentales deviennent indispensables pour obtenir une modélisation plus précise. Ces méthodes incluent des simulations numériques avancées, telles que la CFD ou des expériences en laboratoire à grande échelle (échelle réduite mais avec grande dimensions) permettant d'observer et de mesurer ces phénomènes dans des conditions contrôlées.

### Approches expérimentales

Les expériences physiques restent des approches fondamentales pour étudier des phénomènes. Elles ont été largement utilisées dans l'étude du ballonnement des liquide, avec un accent particulier sur la prédiction de la pression. Dans ce cas, le mouvement du liquide dans un réservoir ou un conteneur est influencé par des forces externes. Les expériences physiques offrent la possibilité de mesurer directement la pression et d'étudier ses effets sur la structure. L'observation directe du comportement du liquide dans des conditions réelles ou contrôlées en laboratoire permet une compréhension approfondie des mécanismes sous-jacents en mesurant des grandeurs clés.

Pour ce faire, un dispositif expérimental a été conçu par *Akyildiz and Ünal* [44, 45] pour étudier le comportement non linéaire et les caractéristiques d'amortissement du ballonnement du liquide dans un réservoir rectangulaire tridimensionnel partiellement rempli soumis à des oscillations de tangage [44, 45]. Plusieurs configurations des réservoirs avec ou sans chicanes ont été étudiées. Les variations de pression ont été mesurées à différents endroits à l'aide de transducteurs de pression piézorésistifs placés à divers emplacements. Les pressions de ballonnement sont influencées par la géométrie du réservoir, la profondeur du liquide, l'amplitude et la nature des mouvements du réservoir. Les effets de la viscosité du fluide sont également présents, influençant principalement l'amplitude des vagues de ballonnement à la fréquence de résonance. Cette étude a montré que l'amplitude d'excitation affecte significativement les charges de ballonnement, confirmant que la configuration du réservoir et les paramètres de mouvement doivent être soigneusement considérés dans les applications pratiques pour assurer la sécurité et l'efficacité des systèmes de transport de liquides [44, 45].

Une autre étude expérimentale a été réalisée pour comprendre le comportement des réservoirs de Gaz Naturel Liquéfié (GNL) à bord de navires marins [37]. L'expérience utilise un modèle de réservoir bidimensionnel fermé pour mesurer les pressions causées par le mouvement du liquide à divers endroits le long des parois du réservoir. Elle a été menée avec une caméra à acquisition rapide pour capturer les images de l'écoulement et les pressions sont mesurées à plusieurs endroits. Les résultats montrent une corrélation entre les pressions oscillantes mesurées sur le côté du réservoir et celles lors de l'impact du fluide, ainsi qu'entre les hautes pressions mesurées aux coins du couvercle du réservoir et

les impacts des gouttes et jets projetés par l'écoulement [37].

*Myrillas et al.* [62] ont mené une étude expérimentale pour examiner l'influence des propriétés du liquide sur le comportement du ballonnement en comparant le mercure et l'eau dans un réservoir cylindrique soumis à une excitation latérale sinusoïdale, en utilisant des techniques optiques sur la table vibrante "SHAKESPEARE" de l'Institut von Karman. La configuration est présentée dans la figure [62].

D'autres travaux expérimentaux ont été menés pour évaluer le ballonnement des liquides dans des réservoirs soumis à des différentes excitations [68, 128, 23, 109].

Cependant, les expériences physiques présentent des limitations. Leur coût élevé, notamment pour des essais à grande échelle, et les défis liés à la mise en œuvre dans des environnements complexes, comme en mer ou dans des installations industrielles, en limitent parfois l'accessibilité. De plus, le problème de l'échelle pose la question de la représentativité des résultats obtenus dans des modèles réduits par rapport aux systèmes réels. Ces contraintes soulignent l'importance de compléter les approches expérimentales par des simulations numériques avancées, qui permettent d'explorer une gamme plus large de paramètres et de conditions sans les contraintes physiques des expériences en laboratoire.

### Approches numériques

L'utilisation des simulations numériques pour l'étude du ballonnement des liquides dans des réservoirs partiellement remplis, a connu une croissance ces dernières années. Cette croissance est principalement attribuable aux avancées technologiques dans le domaine du calcul scientifique et des moyens informatiques. Les méthodes numériques avec maillage peuvent être basées sur la méthode des différences finies [131], des éléments finis [42] et des volumes finis. En revanche, des méthodes dites sans maillage ont été développées à partir des années 1970, telles que la méthode SPH (Smooth Particle Hydrodynamic) [81, 10] ou les méthodes intégrales.

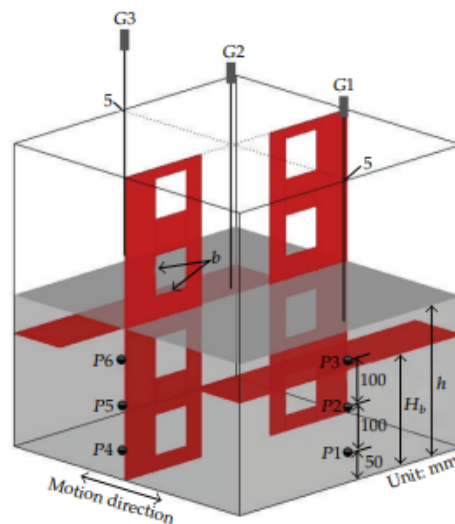
Une étude numérique du ballonnement dans le réservoir de GNL soumis à une excitation de roulis a été réalisée en utilisant FLOW3D pour la modélisation numérique d'un écoulement visqueux, en évaluant les effets sur la pression d'impact de la turbulence du liquide, de la viscosité, du rapport de densité, de la pression et de la compressibilité. Les résultats numériques sont validés avec des résultats expérimentaux, et montrent que les effets de la viscosité et du rapport de densité n'ont pas une influence significative sur les pressions enregistrées lors des impacts [27].

Dans le même contexte des réservoirs de GNL, *Zhao et al.* [26] ont développé un code numérique pour explorer les phénomènes de ballonnement non linéaires dans les réservoirs rectangulaires de GNL, en utilisant la théorie de l'écoulement potentiel. L'étude s'est concentrée sur la réponse du ballonnement du liquide à l'intérieur d'un réservoir partiellement rempli soumis à des excitations translation et de rotation. L'efficacité et la précision du code a été déterminée en comparant les résultats des calculs du cas étudié avec des résultats de références [134]. Les résultats mettent en évidence la complexité de la dynamique de ballonnement dans les réservoirs partiellement remplis et l'importance de prendre en compte divers facteurs tels que l'emplacement du centre de rotation. L'étude souligne également le potentiel des modèles d'amortissement artificiels pour simuler de manière précise les phénomènes de ballonnement dans différentes conditions [26]. D'autres simulations numériques en 2D et en 3D ont été réalisées pour étudier le comportement

de la surface libre d'un liquide dans des réservoirs soumis à différents types de forces, amplitudes et fréquences d'excitations [82, 109, 59, 124, 4, 112, 25, 139, 74].

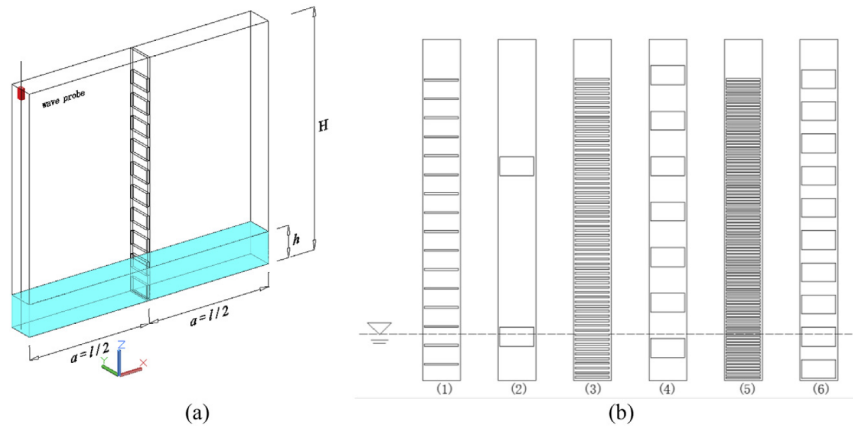
L'aspect diphasique du ballonnement nécessite l'utilisation de méthodes permettant de capturer et de suivre la surface libre du liquide afin de résoudre ce problème complexe. Pour ce faire, plusieurs techniques ont été employées, parmi lesquelles on trouve la méthode VOF (Volume Of Fluid). En utilisant la méthode VOF, les ingénieurs et les chercheurs peuvent étudier en détail les phénomènes d'écoulement diphasique, y compris le ballonnement, et comprendre comment ces phénomènes affectent le comportement global du système. La méthode VOF repose sur le suivi de la fraction volumique de chaque phase dans le domaine de simulation (voir la section 2.6.1), ce qui permet de capturer avec précision les interfaces entre les phases et de modéliser leur évolution au fil du temps [45, 82]. *Liu et al.* [135] ont établi un modèle numérique pour étudier les caractéristiques de la dynamique du ballonnement dans un réservoir d'oxygène liquide soumis à une excitation sinusoïdale. Ce modèle incorpore des éléments tels que les effets de la force et le moment d'écoulement, la variation de la pression du fluide et la réponse dynamique de l'interface libre à l'aide de la méthode VOF [135].

Le ballonnement peut causer des dégâts structurels graves. Afin de réduire ses effets indésirables, plusieurs techniques ont été utilisées. La technique la plus populaire consiste à utiliser des chicanes (baffles) ou des écrans à lamelles (slatted screens) (voir figure 1.14 et 1.15).

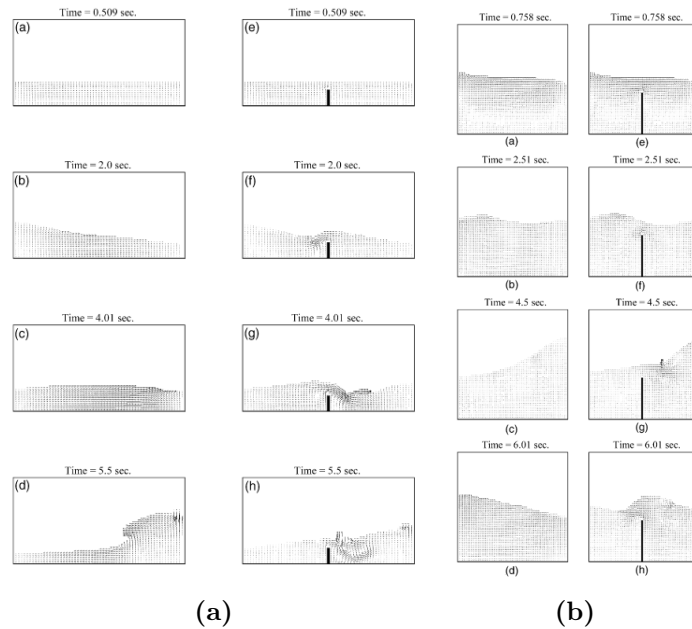


**Figure 1.14** – Schéma du ballonnement dans un réservoir cubique avec chicanes horizontales et chicanes verticales à orifice [80]

Pour ce faire, plusieurs travaux ont été menés. *Celebi and Akyildiz* [82] ont étudié l'écoulement de liquide dans des réservoirs rectangulaires partiellement remplis avec et sans chicanes, sous l'effet d'un mouvement harmonique vertical et d'un mouvement de roulis. Les résultats obtenus montrent qu'en eau peu profonde, l'effet des chicanes verticales était plus marqué. C'est la raison pour laquelle le moment de déferlement a été fortement réduit (voir figure 1.16) [82].



**Figure 1.15** – (a) La position et (b) les configurations de l'écran à lattes dans le réservoir rectangulaire [67]



**Figure 1.16** – Captures des résultats numérique du ballotement (a) en eau peu profonde et (b) en profondeur intermédiaire [82]

### 1.6.2 Dynamique des corps et réservoirs flottants

Les structures offshore pour les énergies marines renouvelables sont des installations construites en mer. Les recherches actuelles en hydrodynamique et les avancées technologiques continueront de jouer un rôle crucial dans l'optimisation et l'intégration de ces systèmes innovants. Les processus de dynamique des fluides associés aux structures flottantes ont fait l'objet de nombreuses recherches en raison de leur pertinence dans divers domaines.

*Yeung and Ananthakrishnan* [106] ont présenté une nouvelle méthode pour résoudre avec précision les problèmes d'interaction entre les vagues et un corps cylindrique flottant bidimensionnel dans un fluide visqueux en mouvement de pilonnement (heave). La méthode développée est robuste et particulièrement adaptée à la gestion des grandes amplitudes d'oscillation du corps. Les résultats obtenus montrent l'importance des effets visqueux

dans le comportement des corps flottants oscillants, particulièrement en ce qui concerne les amplitudes élevées et les basses fréquences [106].

Une formule simple pour l'amortissement des vagues dans la dérive d'un corps flottant a été proposée [60]. Cette formule est basée sur l'écoulement potentiel. L'analyse est limitée à un problème bidimensionnel, bien que l'extension à trois dimensions semble possible [60].

Afin de simuler les mouvements des corps flottants sous l'effet des vagues et des courants, deux modélisations numériques ont été menées, en utilisant deux approches différentes. La première approche [52] utilise une méthode de CFD couplée pour prédire le mouvement des corps rigides dans des fluides visqueux en utilisant la méthode overset. Elle repose sur une méthode itérative combinant les équations de mouvement d'un corps rigide possédant jusqu'à six degrés de liberté avec les équations de Navier-Stokes moyennées selon Reynolds, qui modélise l'écoulement du fluide en 2D ou 3D. Cette méthode montre une bonne concordance avec les données expérimentales pour des scénarios 2D [52]. La deuxième approche [110] explore l'utilisation de la méthode SPH pour simuler l'interaction complexe entre le fluide et les structures, en particulier pour les brise-lames flottants dans des environnements côtiers. Le modèle SPH surmonte les limitations des techniques numériques traditionnelles grâce à son approche lagrangienne et sans maillage, permettant une meilleure adaptation aux conditions dynamiques et aux déformations élevées. Les résultats obtenus ont été analysés et comparés à des mesures expérimentales [110].

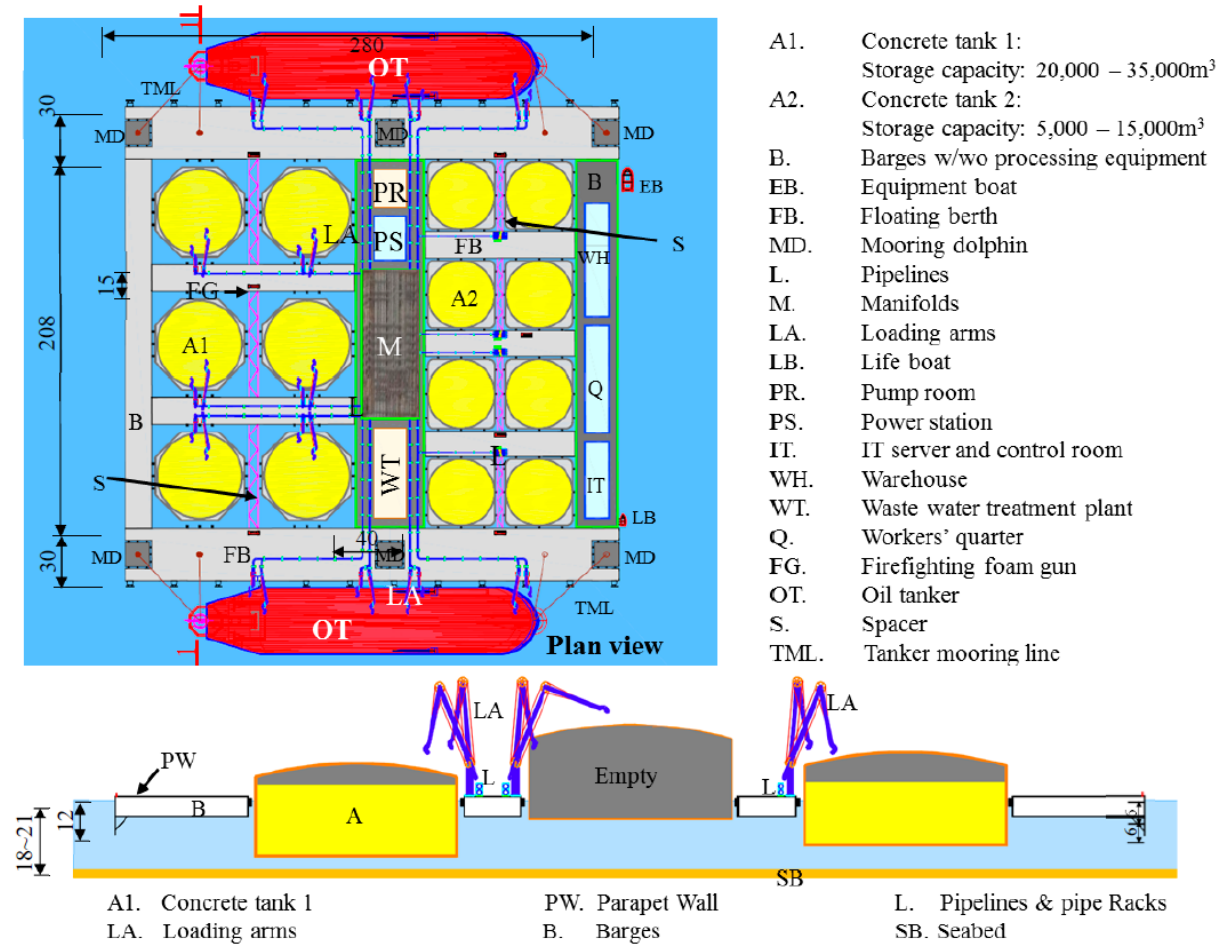
*Challa et al.* [101] ont traité de la dynamique d'impact à l'entrée dans l'eau d'un objet rigide lors de l'amerrissage (WLO), en utilisant les méthodes Arbitraire Eulérien-Lagrangien (ALE) et SPH. Les résultats numériques obtenus ont montré une excellente correspondance avec des résultats expérimentaux menés à une échelle réduite [101].

D'autres recherches sont concentrées sur les réponses dynamiques des structures flottantes et des réservoirs partiellement remplis auto-stabilisants dans diverses conditions marines. *Feng et al.* [3] ont examiné les mouvements des corps flottants induits par les vagues et les courants dans des conditions d'eaux profondes. L'analyse se concentre sur l'importance de l'effet de la profondeur du fond marin sur les réponses de mouvement des structures flottantes. Pour ce faire, une combinaison de méthodes expérimentales et de simulations numériques révèle que les caractéristiques du fond marin ont une importante influence sur le mouvement des corps flottants [3].

*Koo and kim* [121] ont décrit une simulation de corps flottant libre utilisant un canal à houle bidimensionnel, basé sur la théorie du potentiel. L'équation de Laplace est résolue en utilisant la méthode des éléments aux frontières (BEM). L'évolution de la surface libre est capturée à l'aide d'un algorithme mixte Eulérien-Lagrangien (MEL). Cette méthodologie permet de modéliser de manière précise les interactions complexes entre les corps flottants et les vagues. Les simulations, qui prennent en compte les non-linéarités des vagues et des mouvements des corps, sont comparées avec des données expérimentales. Les résultats montrent une bonne concordance, validant le modèle numérique comme une méthode fiable pour prédire les comportements dynamiques des corps flottants sous l'effet des vagues [121].

Dans le cadre du stockage des hydrocarbures, des réservoirs auto-stabilisants flottants libres destinés au stockage des hydrocarbures ont été installés sur une structure flottante de grande taille (figure 1.17) [56]. Cette recherche se concentre sur la conception innovante de ces réservoirs, qui sont capables de maintenir leur stabilité sans ancrage fixe. Les performances de la structure et des réservoirs sont évaluées à travers des modélisations

et des essais expérimentaux, démontrant que cette approche offre une solution efficace et flexible pour le stockage des hydrocarbures en mer [56].



**Figure 1.17** – Vues en plan et en coupe de l'installation flottante de stockage des hydrocarbures (FHSBF) [56]

Dans le cadre de l'étude de la flottabilité, de nombreuses autres recherches ont été menées, que ce soit expérimentale, numérique, ou analytique. Ces études ont exploré divers aspects tels que la flottaison en écoulement monophasique et diphasique, la chute d'un corps dans l'eau [46], ainsi que le comportement de corps flottants, qu'ils soient libres ou amarrés. En outre, certains travaux ont examiné les réponses des corps flottants dans différentes conditions.

### 1.6.3 Modélisation de la Houle

La modélisation de la houle a connu des avancées scientifiques et technologiques significatives, partant des premières observations empiriques pour arriver aux modèles numériques sophistiqués que nous utilisons aujourd'hui. Cette progression a été guidée par le besoin crucial de comprendre et de prédire les vagues océaniques pour assurer la sécurité maritime, faciliter le développement côtier et soutenir l'exploration des ressources marines. La modélisation de la houle a commencé par des observations empiriques des vagues et des phénomènes marins. Les premières études systématiques sur les vagues de surface de l'océan a été débuté avec des observations empiriques par des navigateurs et des scientifiques,

tendant de comprendre et de classifier les vagues, posant ainsi les bases pour les recherches futures.

Au 19<sup>ème</sup> siècle, *George Airy* [12] a développé la première théorie mathématique des vagues, connue sous le nom de théorie linéaire des vagues ou théorie d'*Airy* [12]. Cette théorie suppose que les vagues sont petites par rapport à la profondeur de l'eau et ignore les effets non linéaires, fournissant une base pour les études futures.

Au cours du 20<sup>e</sup> siècle, les théories mathématiques et les observations s'affinent. Entre les années 1920 et 1930, des scientifiques ont développé des théories plus complexes en intégrant les effets non linéaires et la dispersion des vagues. Dans la seconde moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, les progrès majeurs incluent l'introduction des modèles spectraux (modèle SWAN et modèle WAM), qui permettent de représenter la distribution de l'énergie des vagues en fonction de la fréquence et de la direction. Cela a marqué une avancée significative dans la modélisation des vagues.

En 1952, *Longuet-Higgins* [84] a examiné la distribution statistique des hauteurs des vagues marines, en se basant sur l'hypothèse d'un spectre de vagues avec une seule bande de fréquences étroite et des contributions énergétiques aléatoires. En appliquant les théories de *Rayleigh (1880)* [38], il a établi des relations théoriques entre différentes mesures de la hauteur des vagues et valide ces relations par des observations empiriques. Les résultats montrent que la distribution des amplitudes suit une distribution de type "marche aléatoire", ce qui permet de décrire efficacement les vagues marines et de fournir des outils utiles pour l'analyse et la prévision de l'état de la mer [84].

Les premiers modèles numériques de vagues ont été développés dans les années 1970. Ces modèles utilisent des équations aux dérivées partielles pour simuler la propagation et l'évolution des vagues sur des échelles globales, apportant une précision accrue dans les prévisions [43]. Dans les années 1980, le modèle SWAN (Simulating WAVes Nearshore) a été introduit pour les zones côtières. Ce modèle prend en compte des phénomènes complexes tels que la réfraction, la diffraction et la dissipation des vagues, ce qui améliore considérablement les prévisions dans les environnements côtiers. Les dernières décennies ont vu une intégration accrue des données et des modèles.

Les années 1990 ont vu une amélioration des technologies de surveillance, comme les bouées, les satellites et les radars, permettant de collecter des données plus précises et en temps réel, enrichissant les modèles numériques et rendant les prévisions océanographiques plus fiables. Dans les années 2000, l'intégration des données météorologiques et océaniques dans des modèles couplés a permis des prévisions encore plus précises. Des modèles comme WW3 (WaveWatch III) sont devenus des standards dans le domaine, permettant de meilleures prévisions des vagues à différentes échelles. Depuis les années 2010, les avancées en informatique et en intelligence artificielle permettent de traiter des volumes massifs de données et de développer des modèles prédictifs plus sophistiqués. Les simulations sont désormais plus précises et peuvent être réalisées à des résolutions spatiales et temporelles plus fines ([117, 113, 127, 75, 97].

#### 1.6.4 Évolution des études en interaction fluide-structure

L'étude de l'interaction fluide-structure est un domaine interdisciplinaire qui explore les phénomènes résultant des interactions entre un fluide en mouvement et une structure solide et/ou déformable. Ce domaine a connu une évolution significative au fil des années, en se basant sur des avancées théoriques, numériques et expérimentales.

Au 19<sup>ème</sup> siècle, les scientifiques *Henri Navier* et *George Gabriel Stokes* ont établi les fondements de la dynamique des fluides en utilisant les équations de Navier-Stokes pour décrire le mouvement des fluides. Parallèlement, *Augustin Louis Cauchy* et *Robert Hooke* ont examiné l'élasticité et la résistance des matériaux [40]. Les premières études formelles sur les interactions entre fluides et structures ont commencé au début du 20<sup>ème</sup> siècle, avec une attention particulière portée à l'aérodynamique et à l'hydrodynamique [122]. Des recherches intensives en aérodynamique ont été stimulées, conduisant à des avancées dans la compréhension des effets de la turbulence et des forces aéroélastiques sur les avions [130]. Au cours des années, l'augmentation de la capacité de calcul et l'essor des ordinateurs puissants et des logiciels de simulation ont permis de résoudre les équations complexes de Navier-Stokes et d'élasticité de manière plus précise.

L'introduction des méthodes numériques, telles que la méthode des différences finies (MDF), des éléments finis (MEF) et des volumes finis (MVF), ont été intégrées pour résoudre des problèmes d'IFS complexes [17]. Des approches partitionnées (où les équations du fluide et de la structure sont résolues séparément) et monolithiques (où elles sont résolues simultanément) [47] ont été développées pour mieux capturer les interactions dynamiques entre les fluides et les structures. Depuis les années 2000, les applications de l'IFS se sont diversifiées, englobant divers domaines, en étudiant l'interaction des vagues avec les plates-formes pétrolières (ingénierie offshore), l'interaction du flux sanguin avec les parois artérielles (ingénierie biomédicale) et l'interaction entre les pales de turbine et le vent (énergie éolienne).

Dans la conception des systèmes d'Énergies Marines Renouvelables (EMR), l'IFS est un domaine clé, où des forces hydrodynamiques agissent sur des structures immergées ou flottantes. La complexité des interactions entre les écoulements marins (vagues, courants) et les structures (turbines, flotteurs) nécessite une modélisation avancée pour optimiser les performances et garantir la durabilité des dispositifs. Lorsqu'il s'agit de dispositifs composés des réservoirs partiellement remplis flottants, le ballottement est important dans la stabilité et le fonctionnement de ces dispositifs.

Dans le contexte du ballottement, l'interaction est plus complexe en raison des mouvements oscillatoires du fluide qui peuvent fortement influencer la réponse dynamique de la structure rigide ou flexible. Pour cela, des études exhaustives sur l'analyse de la dynamique des systèmes en ballottement ont été faites pour réduire les effets indésirables. Parmi les premières études, on peut mentionner les études de *Veletsos* [11]. La méthode proposée repose sur l'hypothèse que le réservoir flexible se comporte comme un système à un seul degré de liberté, vibrant selon un mode prédéterminé, et conservant sa forme circulaire durant les vibrations [11].

Un modèle numérique bidimensionnel a été proposé par *Seghir et al.* [8] qui couple la méthode des éléments finis pour la structure du réservoir avec une nouvelle formulation des éléments de frontière symétriques pour le champ de pression hydrodynamique du liquide. Le modèle développé permet de calculer une matrice de rigidité de frontière symétrique et positive grâce à une représentation intégrale indirecte pour exprimer les valeurs de pression et leurs dérivées normales sur la frontière du fluide. Les simulations démontrent que le modèle maintient une précision élevée et une robustesse dans les calculs des interactions fluide-structure [8].

*Ozdemir et al.* [136] ont traité les effets du ballottement dans les réservoirs de stockage de liquides lors de secousses sismiques. L'étude souligne les limites des méthodes analytiques aux mouvements de faible amplitude et présente une méthode numérique basée sur la

formulation ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian). Les résultats numériques montrent une forte concordance avec les données expérimentales et analytiques, validant ainsi l'efficacité de l'approche ALE pour analyser les IFS et prédire les forces hydrodynamiques générées par les impacts des vagues dus au déferlement de liquide sur les réservoirs pendant les séismes [136].

*Khouf et al.* [64] ont développé un modèle numérique basé sur un solveur d'écoulement diphasique et un solveur de solide élastique dans le code OpenFOAM pour analyser le comportement du ballottement d'un liquide dans un réservoir flexible sous une excitation externe, en tenant compte des phénomènes d'IFS. La méthode des volumes finis a été appliquée pour résoudre les équations du fluide et de la structure. Cette méthode n'a pas permis d'obtenir une solution précise pour l'équation de la structure [64].

Un nouveau modèle de couplage numérique a été développé par *Kha et al.* [63] pour analyser la dynamique du ballottement dans un réservoir rectangulaire flexible 2D dans des conditions d'excitation complexes. Cette approche intègre les codes OpenFOAM et FEniCS via la bibliothèque de couplage preCICE, permettant l'exploration de la façon dont les niveaux de liquide changeants affectent le comportement d'un réservoir flexible sous excitation sismique. Cette approche a été validée avec des données analytiques et expérimentales [63].

L'étude de l'IFS couvre un large éventail de phénomènes et de domaines d'application. En plus de l'analyse du ballottement, elle inclut également l'étude de l'effet des vagues d'océan sur les structures flottantes [79, 5] pour la conception et l'opération de diverses structures marines telles que les plate-formes pétrolières, les éoliennes offshore et navire en mer [132].

Une étude approfondie sur la modélisation non linéaire de l'interaction entre les vagues et une structure flottante flexible a été présentée dans le travail de *Jiang et al.* [18]. Les équations aux dérivées partielles sont utilisées pour décrire le comportement dynamique de la structure sous l'influence des vagues. Des méthodes numériques avancées comme la méthode des éléments finis sont employées pour résoudre ces équations. L'étude souligne l'importance de considérer les effets non linéaires dans la modélisation des interactions vagues-structure. Les résultats montrent que les approches linéaires traditionnelles peuvent sous-estimer les forces et les déformations subies par la structure. Des expériences en bassin ont été réalisées pour valider le modèle numérique. Les résultats expérimentaux sont en bon accord avec les prédictions du modèle, confirmant ainsi sa validité [18]. D'autres études en IFS ont été faites, on peut citer ceux de *Feichtner et al.* [2] et *Higuera et al.* [94, 95].

## 1.7 IFS et ballottement à l'intérieur des réservoirs flottants dans le domaine des énergies marines renouvelables

L'utilisation des réservoirs flottants dans le domaine des énergies marines renouvelables présente des avantages significatifs, notamment pour le stockage de gaz naturel liquéfié (GNL) ou d'autres hydrocarbures. Ainsi que pour des installations de production d'énergie, telles que les éoliennes flottantes, où des réservoirs partiellement remplis en liquide sont déployés pour opposer le mouvement de la houle et stabiliser la structure flottante.

Cependant, deux défis techniques majeurs peuvent entraîner des problèmes d'instabilité structurelle et de performance énergétique, sont le ballottement à l'intérieur des réservoirs, l'interaction fluide structure interne (entre les parois de réservoirs et le ballottement), et externe (entre les vagues et les réservoirs).

Le ballottement peut entraîner des mouvements importants du réservoir flottant dans une direction horizontale, ce qui peut être un avantage pour l'exploitation des dispositifs EMR et la stabilisation des structures flottantes. Les recherches actuelles ont pris en compte différents phénomènes liés aux EMR, elles se concentrent sur la réponse des réservoirs flottants soumis à des excitations externes telles que les vagues [78], les vents [105] et les séismes en mers induisent des vagues et c'est ça qui va induire un chargement sur le réservoir flottant. Une étude menée par *Zhang et al.* [138] a exploré la dynamique du ballottement au sein d'un réservoir partiellement rempli soumis aux vagues régulières à la fois expérimentalement et numériquement [138].

Ces phénomènes peuvent engendrer des réactions structurelles différentes selon la nature des excitations. Les travaux de *Liu et al.* [65] ont abordé l'effet des chargements dus au vent sur la réponse dynamique des toits flottants à un ou deux étages, en tenant compte du ballottement dans les réservoirs de stockage. Dans cette étude, la réponse des toits flottants a été évaluée en fonction du niveau du liquide à l'intérieure du réservoir [65]. Les travaux de modélisation numérique et expérimentale cherchent à comprendre et à contrôler le ballottement à l'intérieur des réservoirs. Ces simulations permettent d'optimiser les structures pour réduire les mouvements indésirables.

La recherche sur l'IFS et le ballottement des réservoirs flottants est en cours afin de développer des conceptions plus efficaces et performantes pour les dispositifs EMR.

## 1.8 Objectif de la thèse

Cette thèse a pour objectif de modéliser et simuler numériquement le ballottement des liquides dans des réservoirs flottants soumis à la houle, qui sert à la stabilisation des structures flottantes. En raison des mouvements océaniques, ces réservoirs font face à des phénomènes de ballottement pouvant affecter la sécurité et l'intégrité des structures [65]. Cependant, malgré les avancées significatives, la recherche actuelle n'a pas encore pleinement exploré tous les phénomènes liés aux EMR de manière approfondie, tels que les effets de l'interaction entre le ballottement et les parois du réservoir, et entre les vagues et les parois du réservoir. Ces effets complexes nécessitent une modélisation fine pour améliorer la compréhension des comportements instables sous des conditions maritimes variées. L'objectif de cette thèse est de mettre en œuvre un modèle complet, en rassemblant la houle, le ballottement et la flottabilité, et intégrant l'IFS. Ce problème constitue donc un point essentiel dans cette thèse, qui s'articule autour de sept chapitres.

Le premier chapitre pose le contexte et la problématique de cette thèse. Ainsi, il revient sur les phénomènes de houle, de ballottement, d'IFS avant de faire une analyse de la bibliographie. Il se termine par une description des objectifs de la thèse.

Le deuxième chapitre présente les équations régissant le ballottement des liquides, le comportement élastique des réservoirs et la houle. Nous détaillons également leur formulation et les méthodes de discrétisation en espace et en temps. En fin de chapitre, une brève description du dispositif expérimental est fournie.

Le chapitre 3 présente les travaux expérimentaux réalisés dans le cadre de cette thèse,

axés sur l'étude du ballonnement des liquides dans un réservoir soumis à une excitation complexe de tangage pour valider l'approche numérique développée.

Le chapitre quatre vise à valider le modèle numérique de ballonnement développé pour les réservoirs flottants soumis aux vagues, en comparant les résultats de simulation avec les données issues de tests expérimentaux. Il permet de démontrer la fiabilité du modèle en conditions réelles et de vérifier sa capacité à reproduire les effets de ballonnement et l'interaction avec les parois du réservoir.

Le cinquième chapitre est consacré au développement d'un modèle simplifié et réduit du ballonnement soumis aux effets de la houle, tenant compte de l'interaction entre le fluide et la structure. Ce modèle simplifié vise à analyser les impacts de la flexibilité des parois du réservoir sur l'élévation de la surface libre. De plus, l'influence du ballonnement du liquide sur la réponse des parois du réservoir, notamment en termes de déplacement local et de moment fléchissant.

Le sixième chapitre, explore l'effet de la flexibilité des parois sur le ballonnement dans le cas où le réservoir est soumis aux mouvements de tangage et de pilonnement.

Enfin, le dernier chapitre donne les conclusions générales de la thèse ainsi que les perspectives.

---

Modélisation mathématique et numérique du problème couplé  
fluide-structure

---

## Résumé

Dans ce chapitre, nous abordons les équations gouvernant le ballonnement des liquides, le comportement élastique des réservoirs et la houle. Nous détaillons également leur formulation mathématique ainsi que les méthodes de discrétisation spatiale et temporelle. Le ballonnement des liquides implique une surface libre dont la position doit être déterminée à chaque pas de temps de la simulation numérique. Pour ce faire, des techniques de suivi ou de capture d'interface sont utilisées.

L'interaction entre un fluide et une structure peut être classée selon les applications. Numériquement, elle est classée selon les techniques de calcul reliant les équations du fluide, de la structure et les conditions de couplage à l'interface. Cette classification numérique est discutée dans ce chapitre. Enfin, un aperçu général sur les outils numériques utilisés pour les simulations effectuées dans ce travail est ainsi présenté.

## Sommaire

---

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>2.1</b> | <b>Modélisation des écoulements diphasiques</b>              | <b>41</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Modélisation de la dynamique de la structure</b>          | <b>42</b> |
| <b>2.3</b> | <b>Formulation Arbitraire Lagrangienne-Eulérienne (ALE)</b>  | <b>42</b> |
| <b>2.4</b> | <b>Théories d'une houle régulière</b>                        | <b>43</b> |
| <b>2.5</b> | <b>Stratégies de résolution</b>                              | <b>46</b> |
| 2.5.1      | Méthode des volumes finis                                    | 46        |
| 2.5.2      | Méthode des éléments finis                                   | 48        |
| <b>2.6</b> | <b>Traitement de l'écoulement diphasique</b>                 | <b>50</b> |
| 2.6.1      | La méthode VOF (Volume Of Fluid)                             | 50        |
| <b>2.7</b> | <b>Techniques de résolution numérique du problèmes d'IFS</b> | <b>51</b> |
| 2.7.1      | Couplage faible (One-way coupling)                           | 52        |

|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| 2.7.2       | Couplage fort (Two-way coupling) . . . . .                            | 52        |
| <b>2.8</b>  | <b>Algorithmes de couplage pour l'approche partitionnée . . . . .</b> | <b>54</b> |
| 2.8.1       | Couplage chaîné (ou explicite) . . . . .                              | 54        |
| 2.8.2       | Couplage itéré (ou implicite) . . . . .                               | 55        |
| <b>2.9</b>  | <b>Outils de modélisation sélectionnés . . . . .</b>                  | <b>56</b> |
| <b>2.10</b> | <b>Bilan . . . . .</b>  | <b>59</b> |

## 2.1 Modélisation des écoulements diphasiques

Les écoulements diphasiques d'un fluide newtonien incompressible sont régis par les équations de Navier-Stokes. Elles sont basées sur les principes de conservation de la masse et de la quantité de mouvement.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.1)$$

$$\rho_f \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} \right) = -\vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot \bar{\tau} + \vec{S}_f \quad (2.2)$$

Où  $\rho_f$  est la masse volumique du fluide,  $\vec{u}$  est la vitesse du fluide,  $P$  est la pression et  $\vec{S}_f$  est le vecteur des forces volumiques (comme la gravité).

Afin de fermer le système d'équations de Navier-Stokes et de pouvoir les résoudre, il est nécessaire d'exprimer les contraintes de viscosité. Dans un fluide newtonien, le tenseur des contraintes visqueuses  $\bar{\tau}$  est symétrique et est obtenu à partir de la loi de viscosité de Newton [50] comme suit :

$$\bar{\tau} = \mu \left( \vec{\nabla} \vec{u} + \vec{\nabla}^T \vec{u} \right) - \frac{2}{3} \mu \left( \vec{\nabla} \cdot \vec{u} \right) \bar{I} \quad (2.3)$$

Où :  $\bar{I}$  est le tenseur identité donné par :

$$\bar{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Pour un fluide incompressible, la divergence de la vitesse  $\vec{\nabla} \cdot \vec{u}$  est nulle, ce qui annule le terme  $\left( -\frac{2}{3} \mu \left( \vec{\nabla} \cdot \vec{u} \right) \bar{I} \right)$ . Les équations de Navier-Stokes s'écrivent alors comme suit :

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{u} = 0 \\ \rho_f \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} \right) = -\vec{\nabla} P + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{u} + \vec{S}_f \end{cases} \quad (2.5)$$

## 2.2 Modélisation de la dynamique de la structure

La déformation d'une structure de masse volumique  $\rho_s$  soumise à une force volumique  $\vec{S}_s$  est régie par les équations de Navier-Cauchy (équation 2.6), où le champ de déplacement  $\vec{\xi}$  et le champ de contraintes  $\bar{\sigma}_s$  décrivent le comportement mécanique du solide.

$$\rho_s \frac{\partial^2 \vec{\xi}}{\partial t^2} = \vec{\nabla} \cdot \bar{\sigma}_s + \vec{S}_s \quad (2.6)$$

Pour un matériau élastique linéaire isotrope, les relations entre les contraintes et les déformations sont définies par la loi de *Hooke généralisées* (équation 2.7) :

$$\bar{\sigma}_s = \lambda_s \text{tr}(\epsilon) \bar{I} + 2 \mu_s \bar{\epsilon} \quad (2.7)$$

Où  $\mu_s$  et  $\lambda_s$  sont les constantes de Lamé décrivant les propriétés élastiques d'un matériau.

Le tenseur des déformations  $\bar{\epsilon}$  sont liées au vecteur des déplacements  $\vec{\xi}$  comme suit :

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{2} (\vec{\nabla} \vec{\xi} + \vec{\nabla}^T \vec{\xi}) \quad (2.8)$$

Les constantes de Lamé  $\lambda_s$  et  $\mu_s$  peuvent être exprimées en fonction du module de Young ( $E$ ) et du coefficient de Poisson ( $\nu_s$ ) par les formules suivantes (équations 2.9) :

$$\begin{cases} \lambda_s = \frac{\nu_s E}{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)} \\ \mu_s = \frac{E}{2(1+\nu_s)} \end{cases} \quad (2.9)$$

## 2.3 Formulation Arbitraire Lagrangienne-Eulérienne (ALE)

En mécanique, l'analyse et la description de la dynamique d'un système physique sont fondamentalement effectuées de deux manières : la formulation Lagrangienne et la formulation Eulérienne. Dans la formulation Lagrangienne (ou la description matérielle), on s'intéresse principalement à suivre chaque particule individuelle d'un système au cours du temps au fur et à mesure de leur mouvement. Elle s'avère particulièrement utile pour traiter des systèmes complexes soumis à des contraintes. Elle est particulièrement adaptée à l'étude des solides et des systèmes où les déformations sont importantes [98]. En revanche, dans la formulation Eulérienne (ou description spatiale), au lieu de suivre les particules individuelles, on s'intéresse à des points fixes dans l'espace et on observe comment les particules de matière se déplacent à travers ces points au cours du temps. Les variables de la formulation Eulérienne sont exprimées en fonction des coordonnées spatiales actuelles et du temps. Cette méthode est particulièrement utile pour les fluides et les écoulements, où l'intérêt se porte sur les champs de vitesse et de pression à des points spécifiques de l'espace. Les deux formulations sont complémentaires et leur utilisation dépend du type de problème à résoudre. La formulation Lagrangienne est précieuse pour des analyses détaillées des mouvements et déformations des solides, tandis que la formulation Eulérienne est plus adaptée à l'étude des comportements globaux des fluides en écoulement. Dans

certains cas, il est même possible de combiner les deux approches pour tirer parti des avantages de chacune.

Dans la littérature, on peut trouver l'approche combinée ou intermédiaire appelée ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) [137, 83, 77, 71, 6, 108, 73]. La formulation ALE combine les avantages de la description Lagrangienne et ceux de la description Eulérienne, offrant un cadre flexible pour le mouvement et la déformation du maillage. Elle est la méthode la plus utilisée pour modéliser les problèmes d'interaction fluide-structure et les processus de grandes déformations impliquant des fluides et des solides.

En ajoutant la vitesse du maillage  $\vec{w}$ , les équations de Navier-Stokes sont exprimées en formulation ALE comme suit (équation 2.10) :

$$\rho_f \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_f ((\vec{u} - \vec{w}) \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} = -\vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot (\mu \vec{\nabla} \vec{u}) + \vec{S}_f \quad (2.10)$$

## 2.4 Théories d'une houle régulière

La houle en mer se divise en deux grandes catégories : la houle régulière (ou houle sinusoïdale) et la houle irrégulière. Ces termes décrivent la nature et la constance des vagues, influençant ainsi la navigation et les activités nautiques. La houle régulière se caractérise par des vagues uniformes en hauteur, longueur, en période et en direction. En revanche, la houle irrégulière est marquée par des vagues de hauteurs, de périodes et de directions variables. Cette variabilité est souvent due à des vents changeants ou à la rencontre de plusieurs systèmes de houle différents. La figure (2.2) représente les limites de validité des théories de houle fréquemment utilisées.

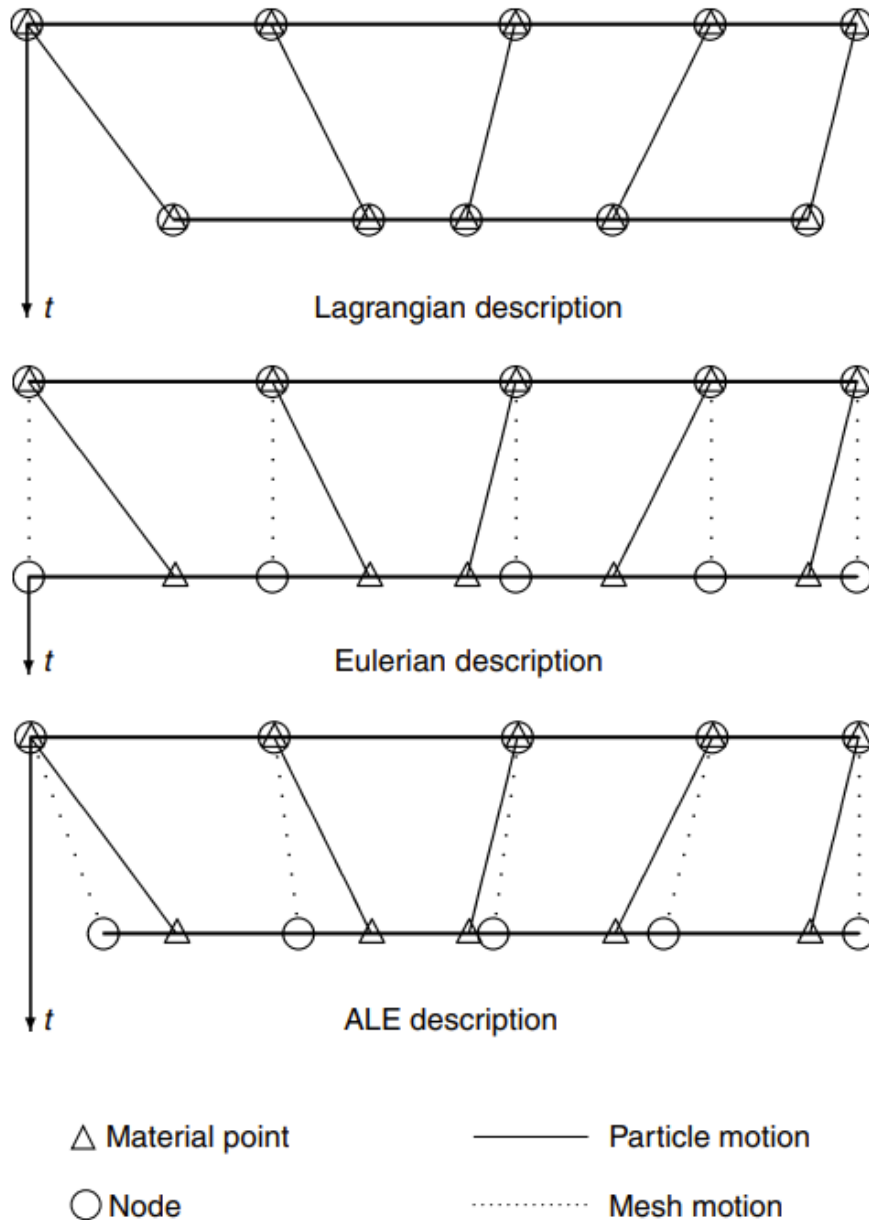
La modélisation de la houle régulière repose sur des équations mathématiques complexes qui décrivent la propagation des vagues en mer. Il existe plusieurs théories pour décrire et prévoir une houle régulière. On peut citer :

- **Théorie linéaire d'Airy** : La théorie linéaire d'Airy, est la plus simple et la plus utilisée pour modéliser les vagues en eau profonde et en eau peu profonde.
- **Théorie de Stokes** : Cette théorie est une extension de la théorie linéaire d'Airy pour des vagues de plus grande amplitude. Elle inclut des termes non linéaires pour prendre en compte les déformations des vagues.
- **Théorie de Korteweg-de Vries (ou théorie cnoïdale)** : Elle est utilisée pour décrire les vagues longues en eau peu profonde où la longueur d'onde est grande par rapport à la profondeur.
- **Théorie de Gerstner** : La théorie de Gerstner est unique en ce qu'elle permet une solution exacte pour les vagues de grande amplitude tout en restant purement non linéaire.

Nous décrivant plus en détail la houle régulière car c'est celle qui sera utilisée par la suite.

### Théorie linéaire d'Airy

La théorie linéaire de la houle est une approche simplifiée pour modéliser et décrire la propagation des ondes de surface dans les océans. Cette théorie a été développée par *George Airy* au 19<sup>ème</sup> siècle et reste largement utilisée aujourd'hui dans le domaine de l'océanographie et de l'ingénierie maritime.

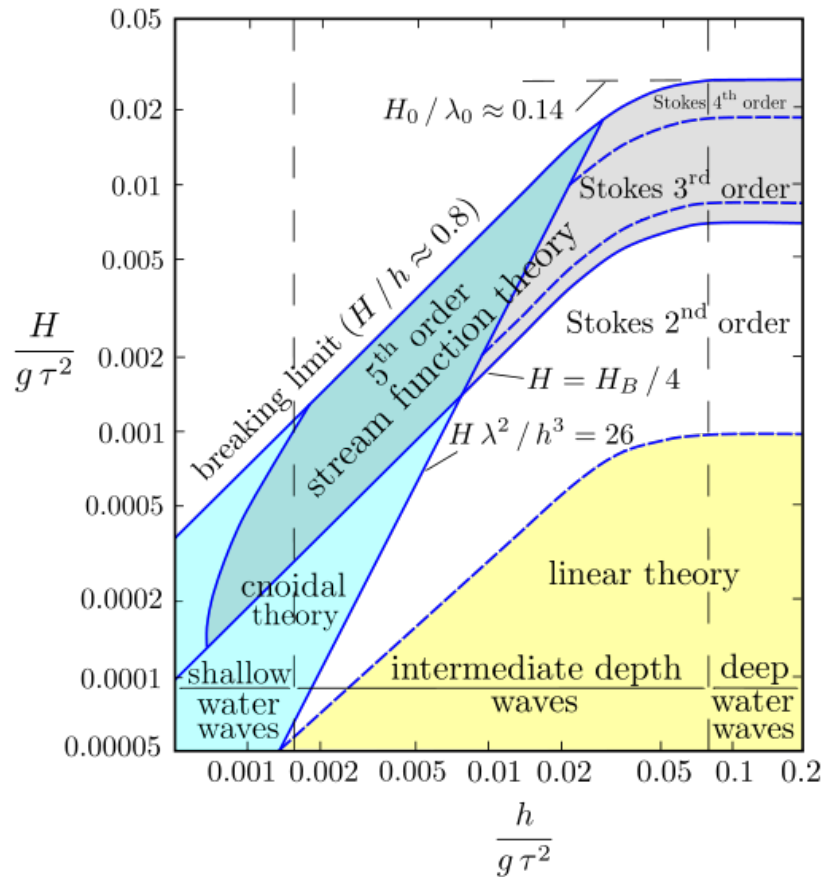


**Figure 2.1** – Comparaison entre les maillages et les mouvements des particules en fonction des différentes formulations (Lagrangienne, Eulérienne et ALE) en 1D [58]

### Hypothèses de base

La théorie d'*Airy* repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices fondamentales qui permettent de décrire le comportement des vagues de manière rigoureuse tout en facilitant les calculs et les applications pratiques. Les hypothèses sont les suivantes :

1. Les vagues sont considérées comme ayant une amplitude relativement petite par rapport à leur longueur d'onde et à la profondeur de l'eau. Cette hypothèse d'amplitude faible permet de négliger les termes non linéaires dans les équations du mouvement.
2. L'eau est modélisée comme un fluide incompressible et non visqueux. En d'autres termes, la densité de l'eau reste constante et il n'y a pas de dissipation d'énergie due à la viscosité.
3. Le mouvement des particules d'eau est supposé être sans rotation (irrotationnel).



**Figure 2.2** – Domaine de validité de diverses théories de houle, en fonction de la profondeur  $h$ , hauteur de la vague  $H$ , période temporelle de la vague  $\tau$  et pesanteur  $g$  [125]

Cela signifie que le fluide est en écoulement potentiel, où le vecteur de vorticité est nul.

4. La profondeur de l'eau  $d$  est supposée être constante et uniforme dans la zone d'étude. Ce qui permet de modéliser les variations de la surface libre des vagues sans tenir compte des variations de la bathymétrie.
5. La pression atmosphérique au-dessus de la surface libre est constante.

### Formulation mathématique

Sous les hypothèses mentionnées ci-dessus, la théorie d'*Airy* permet de décrire les vagues à la surface de l'eau en utilisant des équations mathématiques simples.

#### 1.  quations de dispersion

La relation de dispersion est un élément fondamental de la théorie des vagues, car elle relie la fréquence angulaire (exprimée par  $\omega = \frac{2\pi}{T_p}$ ) au nombre d'onde  $k$ . Cette relation diffère selon la profondeur de l'eau  $d$  et permet de caractériser la vitesse de propagation des vagues  $c$  [114].

Dans le cas d'**eau profonde** ( $d > \frac{\lambda}{2}$ ), la dispersion et la vitesse de propagation sont exprimées par l'équation (2.11) et l'équation (2.12) respectivement.

$$\omega^2 = g k \quad (2.11)$$

$$c = \sqrt{\frac{g}{k}} \quad (2.12)$$

Dans ce cas, la profondeur de l'eau est suffisante pour que l'effet du fond soit négligeable.

En **eau peu profonde**, définie pour  $d < \frac{\lambda}{25}$ , la relation de dispersion prend en compte l'effet du fond. Elle est alors exprimée par :

$$\omega^2 = g k \tanh(dk) \quad (2.13)$$

Dans cette situation, l'expression de la vitesse de propagation est :

$$c = \sqrt{gd} \quad (2.14)$$

Pour des **profondeurs intermédiaires** (où  $\frac{\lambda}{25} < d < \frac{\lambda}{2}$ ), la relation de dispersion générale doit être utilisée. La relation générale est alors définie par l'équation (2.13) et la vitesse est exprimé par l'équation (2.15) suivante :

$$c = \frac{\omega}{k} \quad (2.15)$$

## 2. Équation de la surface libre des vagues

dans le cadre de la théorie d'*Airy*, l'équation de la surface libre est un élément fondamental pour décrire le mouvement des vagues à la surface de l'eau. Cette équation permet de modéliser la forme et le comportement des vagues en fonction de ces caractéristiques principales. La variation de la surface libre des vagues  $\eta(x, t)$ , est donnée par une fonction sinusoïdale qui dépend à la fois de la position horizontale  $x$  et du temps  $t$ . Elle est modélisée par l'équation (2.16) :

$$\eta(x, t) = a \sin(xk - \omega t) \quad (2.16)$$

Où,  $a$  est l'amplitude de la vague ( $a = \frac{h_{cc}}{2}$ ) et  $k$  est le nombre d'onde donné par  $k = \frac{1}{\lambda}$ .

## 2.5 Stratégies de résolution

### 2.5.1 Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis (MVF) est une technique de discrétisation couramment utilisée pour résoudre les équations aux dérivées partielles (EDP) représentant des lois de conservation. Elle appartient à la famille des méthodes des résidus pondérés, se distinguant par l'utilisation de fonctions de projection égales à l'unité. Cette méthode est particulièrement adaptée aux simulations numériques de divers problèmes [102], trouvant

des applications dans divers domaines de l'ingénierie comme la mécanique des fluides, et le transfert de chaleur et de masse.

La MVF se distingue des méthodes des différences finies et des éléments finis par son domaine d'application spécifique et ses caractéristiques uniques. Par exemple, elle est particulièrement bien adaptée aux problèmes où la conservation de grandeurs physiques est essentielle, tels que les écoulements de fluides et la diffusion de chaleur. Une de ses forces réside dans sa capacité à être appliquée sur des géométries arbitraires en utilisant des maillages structurés ou non structurés, et à produire des schémas robustes et précis.

La formulation intégrale des flux sur les limites de ces volumes est obtenue via la formule de divergence. Les flux à la frontière sont ensuite discrétisés en fonction des inconnues discrètes. Cette approche garantit la conservativité locale des flux numériques, c'est-à-dire que le flux numérique d'une cellule de discrétisation à sa voisine est conservé, ce qui est crucial pour des simulations précises et fiables [102].

- **Avantages :** Les MVF garantissent la conservation des grandeurs physiques. Elles peuvent être facilement adaptées à des géométries complexes grâce à la flexibilité du maillage et utilisées pour résoudre une large gamme de problèmes d'EDP, notamment la mécanique des fluides, la diffusion de chaleur, et le transfert de masse. Les MVF sont robustes vis-à-vis de la qualité du maillage et peuvent traiter des problèmes avec des gradients élevés.
- **Inconvénients :** La résolution des MVF peut être coûteuse en termes de calcul, en particulier pour les problèmes 3D complexes. La mise en œuvre des MVF peut être complexe, en particulier pour les problèmes multidimensionnels et couplés. La précision des MVF dépend de la qualité du maillage.

### Principe de la méthode des volumes finis

Le principe de base de la MVF consiste à diviser le domaine physique en un nombre fini de volumes (maillage). On applique ensuite les équations gouvernantes à chaque cellule, en intégrant les équations sur le volume de la cellule et en approchant les dérivées spatiales par des approximations numériques. Voici les étapes générales de cette méthode [129, 126] :

- **Discrétisation du domaine :** Le domaine de calcul continu est divisé en un certain nombre de petits volumes appelés volumes de contrôle (ou cellules) entourant les nœuds du maillage qui peuvent être des segments en 1D, des surfaces en 2D, ou des volumes en 3D dont la réunion constitue le domaine d'étude. La taille et la forme des volumes de contrôle peuvent varier en fonction de la géométrie du problème et des besoins de la simulation.
- **Intégration des équations gouvernantes :** Les équations aux dérivées partielles sont alors intégrées sur chaque volume de contrôle pour obtenir des bilans de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie). Cette intégration permet de transformer les équations différentielles en équations intégrales, ce qui est plus adapté pour les calculs numériques. L'intégration des termes de divergence s'effectue en utilisant le théorème de Green, transformant ces termes en intégrales de surface sur les faces des volumes de contrôle.
- **Approximation des Flux :** Les flux aux interfaces entre volumes de contrôle sont discrétisés en utilisant des approximations appropriées, en fonction du type

de problème et du schéma numérique choisi. Ces flux représentent les échanges de quantité de mouvement, d'énergie, etc., entre les volumes adjacents. Les schémas numériques doivent être choisis pour garantir la conservation des quantités physiques et la stabilité de la solution.

- **Assemblage des Équations** : Les équations obtenues pour chaque volume de contrôle sont assemblées pour former un système global d'équations algébriques. Ce système représente l'ensemble des bilans de conservation pour tout le domaine d'étude.
- **Résolution du système d'équations** : Les équations intégrales discrétisées pour chaque volume de contrôle forment un grand système d'équations algébriques qui doit être résolu pour trouver les valeurs des variables aux centres des volumes. Ce système est résolu numériquement par des méthodes itératives ou des méthodes directes.

En mécanique des fluides, la conservation de la masse et la quantité de mouvement doit être assurée. Dans notre étude, la MVF a été choisie pour la résolution des équations de Navier-Stokes en raison de sa capacité à conserver strictement les quantités physiques au sein de chaque volume de contrôle. Grâce à cette formulation conservatrice, la MVF gère efficacement les phénomènes caractéristiques des écoulements fluides tels que des chocs, des couches limites etc ... Ainsi, la MVF traite les discontinuités. Elle est compatible avec une variété de schémas numériques, ce qui offre la possibilité de traiter la non-linéarité des équations de Navier-Stokes.

### 2.5.2 Méthode des éléments finis

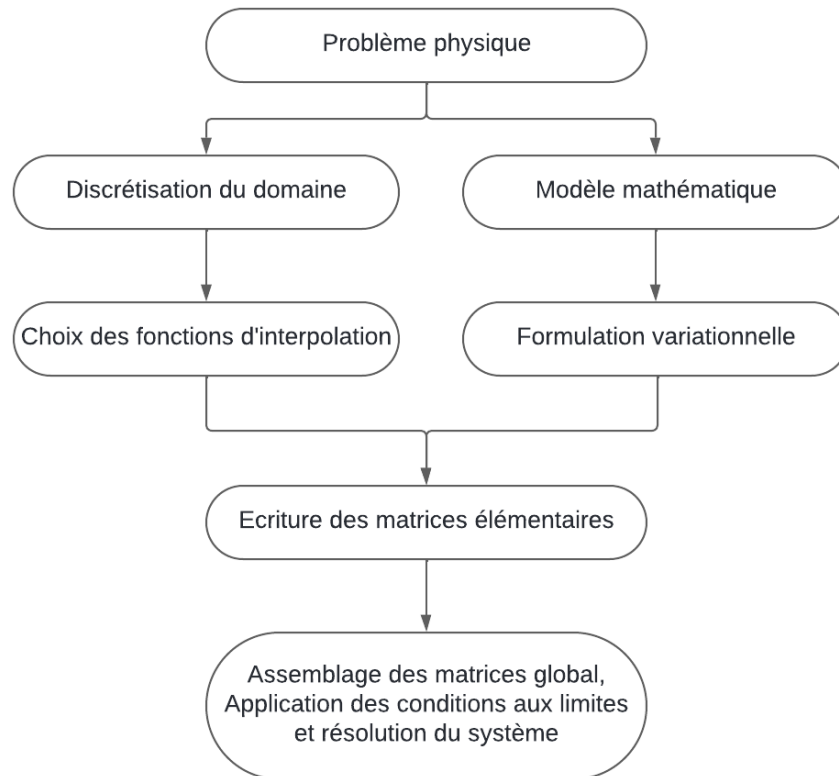
La méthode des éléments finis (MEF ou FEM en anglais) est une technique numérique puissante utilisée pour trouver des solutions approximatives aux problèmes aux dérivées partielles ainsi qu'aux équations intégrales décrivant des systèmes physiques complexes. Elle consiste à approcher, dans un sous-espace de dimension finie, un problème écrit sous forme variationnelle dans un espace de dimension infinie [36]. Elle est la méthode la plus utilisée pour les études des structures à trois dimensions, car elle étend les possibilités des méthodes matricielles à un très vaste domaine d'application et permet donc l'analyse des structures complexes.

La MEF consiste à remplacer un problème continu par un problème discret équivalent. La discrétisation se fait sur deux fronts. D'une part, le domaine est basé sur la subdivision du domaine continu en sous-domaine de forme géométrique simple que l'on appellera "éléments finis" interconnectés en des points appelés "nœuds", d'autres part, les EDP sont remplacés par des équations algébriques à l'aide de calcul variationnel ou des méthodes de minimisation de l'erreur comme les méthodes des résidus pondérés.

- **Avantages** : Traitement possible de géométries complexes, détermination plus naturelle des conditions aux limites, possibilité de démonstrations mathématiques de convergence et de majoration d'erreurs.
- **Inconvénients** : Complexité de mise en œuvre, et coût en temps de calcul et en mémoire.

### Démarche de la méthode des éléments finis

La MEF fonctionne en discrétisant un domaine continu en un maillage d'éléments finis plus petits. Les équations gouvernantes du problème sont ensuite appliquées à chaque élément, ce qui conduit à un système d'équations linéaires algébriques (SLA). Ce système d'équations est résolu numériquement pour obtenir une solution approchée du problème d'origine. La figure (2.3) présente les étapes générales de la méthode des éléments finis [7].



**Figure 2.3** – Étapes générales de la méthodes des éléments finis

Voici les principales démarches de la MEF :

- **Formulation des équations gouvernantes et des conditions aux limites :** Les équations gouvernantes sont généralement des EDP associées à des conditions aux limites définies sur un domaine et son contour, qui décrivent le comportement physique du système étudié. Les équations de la formulation faible sont ensuite discrétisées en appliquant des fonctions de base sur un maillage d'éléments finis, ce qui conduit à un système d'équations algébriques linéaires (SLA) pouvant être résolu numériquement.
- **Discretisation du domaine :** Le domaine d'étude est divisé en un nombre fini de petits sous-domaines appelés "éléments finis" (triangles, quadrilatères, etc. en 2D ou tétraèdres, hexaèdres, etc. en 3D). Les points de jonction de ces éléments sont appelés nœuds.
- **Formulation des équations élémentaires :** Des équations locales sont définies pour chaque élément fini en utilisant les fonctions d'interpolation, qui approximativement représentent la solution à l'intérieur de chaque élément. Ces fonctions sont

généralement des polynômes.

- **Assemblage des équations** : Les équations locales sont assemblées pour former un système global d'équations qui représente le comportement du système complet. Puis, les conditions aux limites et les conditions initiales sont appliquées pour modifier le système d'équations global afin qu'il reflète correctement le problème physique réel.
- **Résolution du système d'équations global** : Le système d'équations linéaires ou non linéaires obtenu est résolu en utilisant des techniques numériques pour obtenir une solution approximative du problème.

Dans notre étude, nous nous intéressons aux solides déformables. La MEF est conçue pour capturer avec précision les contraintes et les déformations au sein des matériaux solides. Elle minimise l'énergie potentielle totale. La MEF permet une gestion précise des diverses conditions aux limites essentielles pour la modélisation correcte de l'interaction fluide-structure.

## 2.6 Traitement de l'écoulement diphasique

Dans la simulation du ballottement, la capture précise de l'interface entre les fluides est d'une importance capitale pour une modélisation correcte des phénomènes physiques impliqués. Les méthodes permettant de localiser la surface libre peuvent être classées en deux catégories. Premièrement, les méthodes de suivi d'interface (Lagrangiennes) s'appuient sur le suivi explicite de l'interface en mouvement à l'aide de marqueurs ou de particules répartis sur sa surface. Cette approche offre une grande précision dans la représentation de l'interface et le traitement des conditions aux limites [96]. Cependant, elle peut s'avérer complexe et coûteuse en calcul, en particulier pour les écoulements avec des topologies d'interface complexes [72].

Deuxièmement, les méthodes de capture d'interface (Eulériennes), en revanche, elles adoptent une description implicite de l'interface via des fonctions scalaires. La fonction indicatrice, définie comme une fonction valant 1 dans une phase et 0 dans l'autre, est advectée au cours du temps par le champ de vitesse de l'écoulement. Cette approche offre une simplicité d'implémentation et une flexibilité accrue pour les écoulements 3D, mais peut présenter des limitations en termes de précision et de conservation de la masse [72].

Dans ce travail, la méthode de capture de l'interface choisie est la méthode VOF en raison de sa capacité à conserver la masse, de sa simplicité d'implémentation, et de son efficacité dans le suivi des interfaces complexes. L'ajout d'un terme de compression à l'équation de transport permet de limiter la diffusion numérique de l'interface, améliorant ainsi la précision des simulations.

### 2.6.1 La méthode VOF (Volume Of Fluid)

La méthode VOF (Volume of Fluid) est une technique largement utilisée pour simuler le ballottement de liquide. Il implique deux phases distinctes, liquide et air. La méthode VOF est particulièrement prisée pour sa capacité à suivre et capturer la dynamique d'interface entre ces deux phases. Elle a été introduite en 1976 par *Noh and Woodward* [123]. La première publication dans un journal a été faite en 1981 par *Hirt and Nichols* [19].

Dans le contexte d'un milieu diphasique sans échanges entre phases, la méthode VOF est utilisée pour suivre la distribution de l'une des phases à travers la fraction volumique notée  $\psi$ . La fraction volumique  $\psi$  varie entre 0 et 1, où  $\psi = 0$  représente la présence exclusive de la deuxième phase,  $\psi = 1$  représente la présence exclusive de la première phase, et les valeurs intermédiaires ( $0 < \psi < 1$ ) indiquent la présence des deux phases dans une même cellule de calcul. La fraction volumique  $\psi$  est une variable advectée par le champ de vitesse  $\vec{u}$  selon l'équation (2.17).

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \psi = 0 \quad (2.17)$$

Cette équation exprime que l'évolution de  $\psi$  dans le temps et dans l'espace est dû au transport de  $\psi$  par le champ de vitesse  $\vec{u}$ . La masse volumique du fluide et sa viscosité dynamique sont données par les équations (2.18 et 2.19) respectivement, en fonction de la masse volumique de la phase liquide  $\rho_l$ , la masse volumique de la phase gazeuse  $\rho_g$ , la viscosité dynamique dans la phase liquide  $\mu_l$  et la viscosité dynamique dans la phase gazeuse  $\mu_g$  [111].

$$\rho_f = \rho_l \psi + \rho_g(1 - \psi) \quad (2.18)$$

$$\mu_f = \mu_l \psi + \mu_g(1 - \psi) \quad (2.19)$$

L'intégration d'un terme de compression dans l'équation de transport (2.17) de la méthode VOF améliore significativement la précision du suivi de l'interface liquide-gaz en réduisant la diffusion numérique et en préservant les détails fins de l'interface. Cette approche permet ainsi de mieux capturer les dynamiques complexes des interfaces dans les simulations de fluides.

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{u} \psi + \vec{\nabla} \cdot \vec{u}_r (\psi(1 - \psi)) = 0 \quad (2.20)$$

Où  $\vec{u}_r = \vec{u}_l - \vec{u}_g$  est la vitesse relative du liquide par rapport à l'air.  $\vec{u}_l$  et  $\vec{u}_g$  sont les vitesses du liquide et du gaz respectivement. Ce terme artificiel sert à limiter la diffusion de l'interface air-liquide.

## 2.7 Techniques de résolution numérique du problèmes d'IFS

La prédiction des phénomènes d'instabilité provoqués par le couplage entre le fluide et la structure est d'une importance capitale car ceux-ci rendent compte dans de nombreux cas la plage de fonctionnement des systèmes. Dans le passé, fluides et solides étaient traités séparément et seule l'action du fluide sur le solide était par exemple prise en compte. Ce type de prédiction s'est révélé être dans de nombreux cas insuffisant, et à l'heure actuelle, on cherche à modéliser la boucle complète d'interaction entre les deux milieux. Les simulations numériques effectuées reposent la plupart du temps sur une modélisation simplifiée de l'un des deux milieux, ou font appel à des procédures de couplage spécifiques qui permettent de faire fonctionner ensemble les codes de calcul spécialement développés pour le fluide d'un côté et la structure de l'autre. Le fluide caractérisé par son champ de

vitesse et de pression, exerce de forces de pression sur la surface du solide en contact avec le fluide, qui se déplace et/ou se déforme sous leur action (voir la figure 2.4).

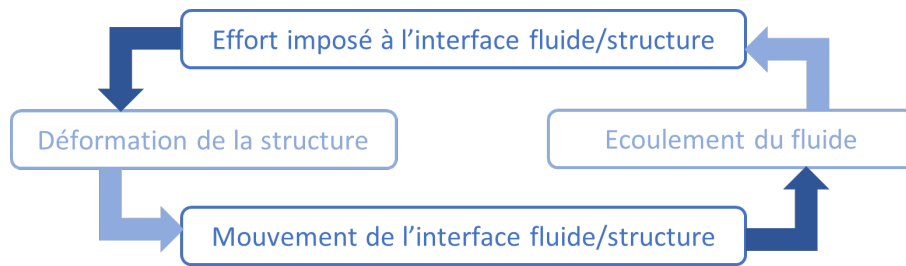


Figure 2.4 – mécanisme de couplage fluide-structure

Ce cycle des interactions entre le fluide et le solide est caractéristique du couplage entre les deux milieux. La nature de ce couplage dépend des systèmes, et dans certains cas, on peut ne considérer que l'action du fluide sur le solide (ou inversement). Dans ce cas, on parle de couplage faible. En revanche, si le couplage a un effet significatif sur le système, on parle alors de couplage fort. Chacun de ces couplage a un impact direct sur le coût de calcul et à ses performances.

### 2.7.1 Couplage faible (One-way coupling)

Un couplage faible ou couplage unilatéral, se réfère à une situation où deux systèmes ou composants interagissent de manière unidirectionnelle. En d'autres termes, le système influencé ne réagit pas en retour sur le système qui l'influence (voir figure 2.5). Cela signifie que le champ de pression ou de vitesse du fluide est calculé en premier, puis utilisé comme charge appliquée sur la structure. Cette méthode est valable lorsqu'on peut supposer que les déformations de la structure n'ont pas d'impact significatif sur l'écoulement du fluide ou l'inverse.

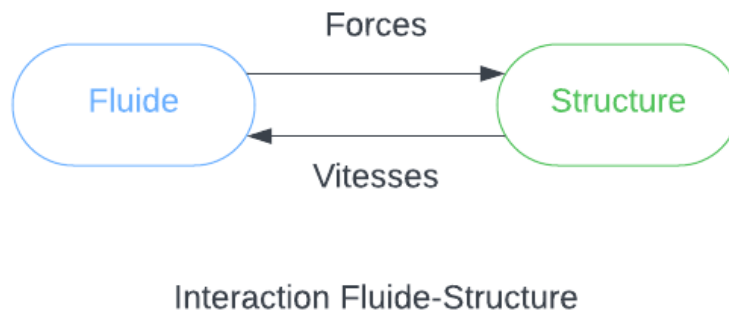
Dans certains cas, le couplage faible peut être préférable au couplage fort, car il n'est pas nécessaire de résoudre simultanément les équations des deux systèmes. Cependant, il ne peut pas modéliser les interactions bidirectionnelles entre les systèmes.

### 2.7.2 Couplage fort (Two-way coupling)

Le couplage fort, également connu sous le nom de couplage bidirectionnel, est une relation entre deux systèmes ou modules dans laquelle les modifications de l'un affectent directement l'autre et vice versa. Il est utilisé dans différentes disciplines scientifiques et techniques pour décrire l'interaction dynamique entre deux systèmes ou sous-systèmes où les influences sont réciproques (figure 2.6).



Figure 2.5 – Schéma générale du couplage faible



**Figure 2.6** – Schéma du couplage fort

Le couplage fort peut conduire à des simulations ou à des modèles plus précis, car il prend en compte les interactions mutuelles entre les systèmes. Il existe deux approches principales pour le couplage fort : monolithique et partitionnée.

### Approche monolithique

Dans les approches monolithiques, les équations gouvernantes du fluide et de la structure sont résolues simultanément dans un seul solveur [47]. Cela signifie que les deux systèmes sont traités comme un système unique et couplé. Cela nécessite un système de résolution intégré qui prend en compte toutes les variables d'état simultanément. Les équations différentielles et les conditions aux limites sont combinées en un grand système d'équations algébriques. Cela conduit à des matrices de grande taille et potentiellement très complexes à résoudre [66], nécessitant des méthodes numériques robustes.

L'approche monolithique offre une méthode puissante pour traiter les systèmes couplés de manière intégrée et précise. Cependant, elle nécessite des ressources computationnelles importantes et des techniques de résolution avancées pour gérer la complexité des équations résultantes. Cette approche est souvent choisie dans les domaines où la précision et la stabilité des interactions couplées sont essentielles.

### Approche partitionnée

Dans les approches partitionnées, deux solveurs distincts sont utilisés pour le fluide et la structure. Les solveurs échangent des informations nécessaires (déplacements, vitesses, efforts) entre eux à chaque itération du processus de simulation. On résout séparément les équations régissant l'écoulement fluide et la déformation de la structure solide [15, 13], en utilisant des solveurs spécialisés et optimisés pour chaque physique, couplés via une interface commune.

Cette approche est généralement plus simple à implémenter que l'approches monolithique, mais elle peut être moins précise. Elle permet d'utiliser les formulations, discrétisations (éléments finis, volumes finis, etc.) et pas de temps les mieux adaptés pour chaque physique et d'utiliser des solveurs existants et performants. Cependant, cette approche nécessite des techniques de couplage pour assurer le transfert correct des quantités aux interfaces et la convergence de la solution couplée, ce qui peut augmenter les temps de calcul. Malgré ces

inconvenients, l'approche partitionnée reste attrayante grâce à sa modularité permettant d'utiliser des solveurs existants optimisés pour chaque physique. La figure (2.7) présente les deux schémas principaux de couplage fort : monolithique (2.7a) et partitionnée (2.7b).

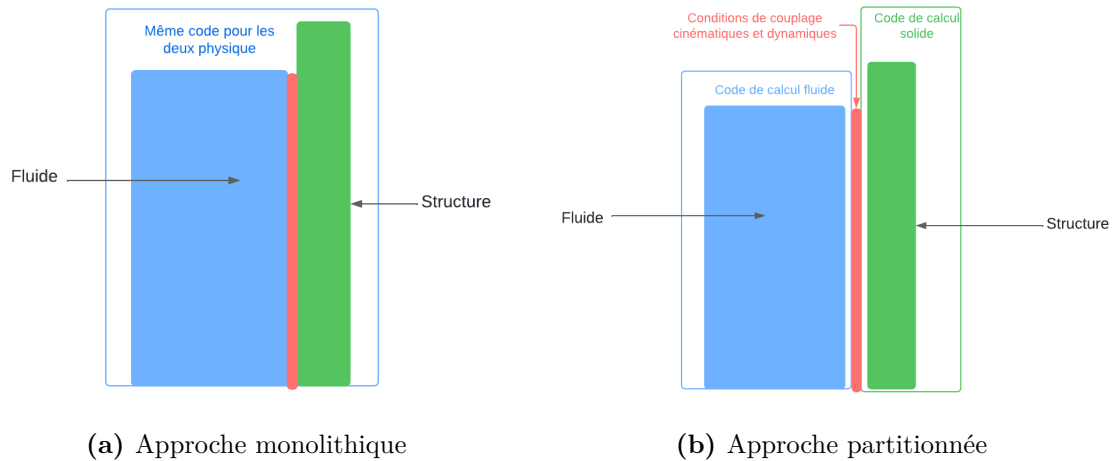


Figure 2.7 – Schéma de couplage fluide structure : (a) monolithique, (b) partitionné

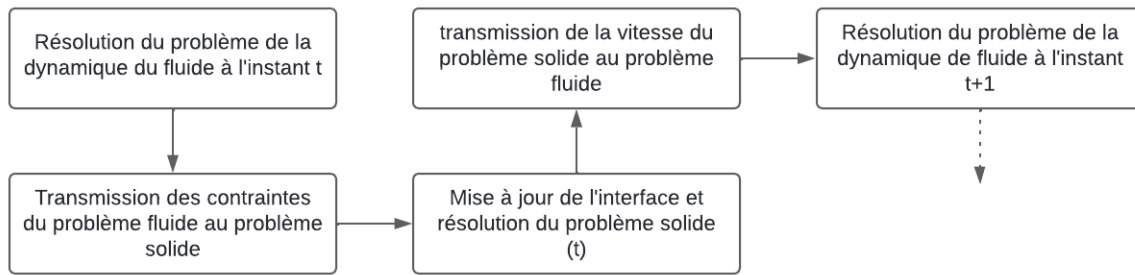
## 2.8 Algorithmes de couplage pour l'approche partitionnée

Pour les algorithmes d'interaction fluide-structure partitionnés, les méthodes de couplage en temps sont essentielles pour assurer une interaction correcte entre les dynamiques des fluides et des structures. Une approche partitionnée consiste à décomposer un problème complexe en sous-problèmes plus simples, souvent correspondant à différents domaines physiques, qui peuvent être résolus séparément puis couplés pour obtenir la solution globale. Le choix de l'algorithme de couplage est crucial pour la précision, l'efficacité et la stabilité de la simulation. Les algorithmes de couplage en temps pour l'approche partitionnée peuvent être classés en deux catégories principales telles qu'elles sont introduites par *E. Longatte et al.* [31] : couplage chaîné et itéré.

### 2.8.1 Couplage chaîné (ou explicite)

Les méthodes de couplage explicite sont couramment utilisées dans les simulations d'interaction fluide-structure partitionnées en raison de leur simplicité de mise en œuvre et de leur rapidité. Elles consistent à résoudre successivement les sous-problèmes de fluide et de structure à chaque pas de temps, en utilisant les résultats de l'un comme conditions aux limites pour l'autre, sans itération supplémentaire au sein du même pas de temps. La figure (2.8) montre les étapes du schéma de couplage explicite.

Selon l'instant où les calculs du fluide et de solide sont effectués, on distingue deux variantes : l'algorithme explicite synchrone où les deux milieux avancent au même pas de temps et l'algorithme explicite asynchrone où les pas de temps des deux milieux sont décalés.

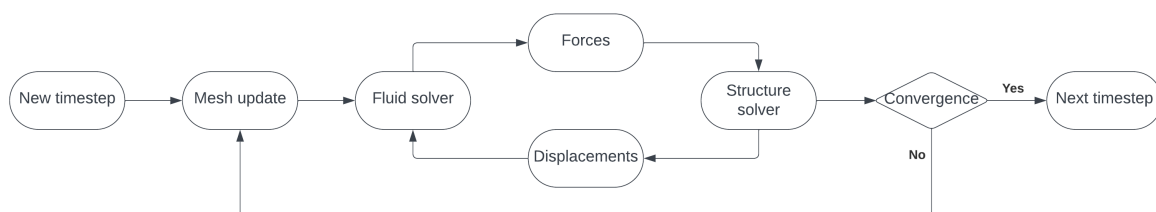


**Figure 2.8** – Schématisation de l'algorithme de couplage temporel explicite

### 2.8.2 Couplage itéré (ou implicite)

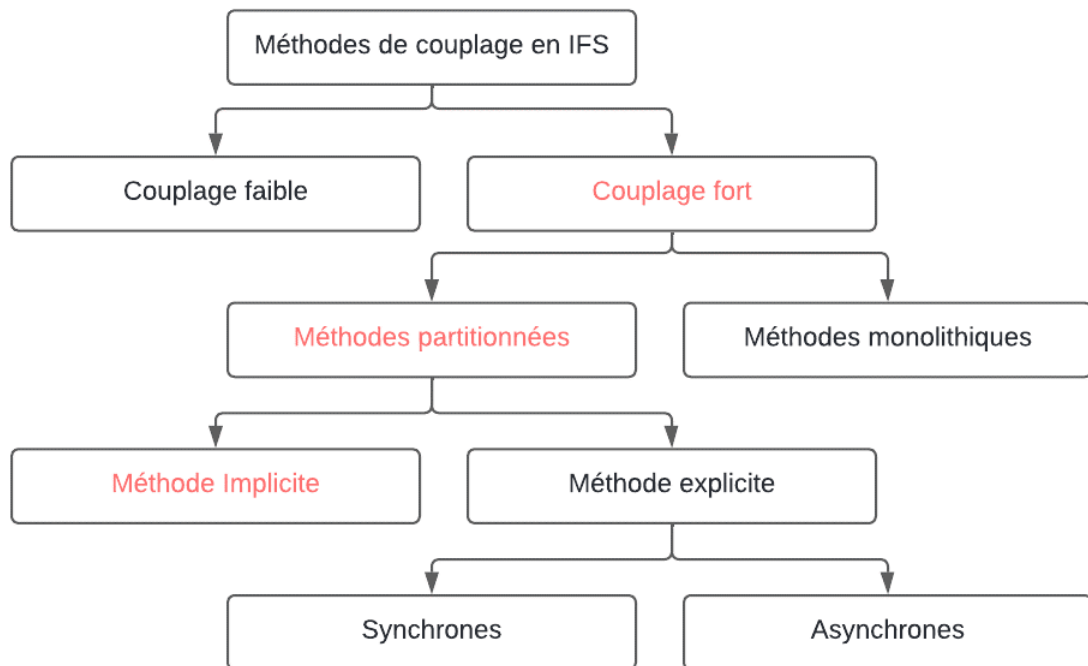
Les méthodes implicites dans la modélisation du couplage fluide-structure présentent effectivement plusieurs avantages par rapport aux méthodes explicites. Elles résolvent les sous-problèmes simultanément ou de manière itérative à chaque pas de temps. Contrairement aux méthodes explicites qui peuvent être limitées par des contraintes de stabilité liées à la taille des pas de temps, les méthodes implicites sont souvent plus stables et peuvent donc utiliser des pas de temps plus grands. Cela les rend particulièrement bénéfiques pour les simulations de longue durée ou les systèmes avec des interactions fortement non linéaires.

Un autre avantage majeur des méthodes implicites réside dans leur capacité à gérer des conditions de couplage complexes. Les solveurs pour le fluide et la structure échangent des informations telles que les vitesses et les contraintes à chaque itération du processus de simulation. Cette communication itérative permet une meilleure convergence. Les méthodes implicites sont donc essentielles pour les applications où la précision et la stabilité sont primordiales, telles que la modélisation du couplage fluide-structure dans des environnements complexes [49]. La figure 2.9 présente les principales étapes de l'algorithme de couplage implicite



**Figure 2.9** – Schématisation de l'algorithme de couplage temporel implicite

La modélisation numérique du couplage fluide-structure est un domaine complexe qui nécessite l'utilisation de diverses méthodes et techniques pour représenter fidèlement les interactions entre un fluide et une structure solide. Voici une synthèse des principales méthodes et techniques utilisées dans ce domaine, illustrée par la figure (2.10).



**Figure 2.10** – Organigramme des stratégies de couplage (en rouge les techniques de couplage utilisées dans ce travail)

## 2.9 Outils de modélisation sélectionnés

Dans le cadre de notre travail portant sur l'interaction fluide-structure, il est crucial de choisir des outils qui adoptent des méthodes numériques capables de résoudre simultanément les équations gouvernant la dynamique des fluides et celles décrivant la déformation de la structure. Le choix des méthodes des volumes finis pour le fluide et des éléments finis pour la structure s'est imposé comme une approche adaptée à la complexité de l'IFS.

Parmi les divers outils disponibles, nous avons retenu OpenFOAM pour la dynamique des fluides basé sur la MVF, FEniCS pour la dynamique de la structure basé sur la MEF et preCICE pour le couplage de ces deux solveurs. Chacun de ces outils sera décrit brièvement dans cette section.

### OpenFOAM et OlaFlow

Le code de calcul OpenFOAM (abréviation de Open Field Operation and Manipulation) est une boîte à outils de simulation multi-physiques principalement axée sur la résolution des équations de la dynamique des fluides. Il a été créé par *Henry Weller* en 1989 sous le nom "FOAM" et a été distribué depuis décembre 2004 en licence libre sous le nom "OpenFOAM" [76]. Son développement, en C++, a été amorcé par l'Imperial College London, qui souhaitait un code de calcul basé sur la méthode des volumes finis et bénéficiant des dernières innovations en termes de langage informatique.

OpenFOAM offre une variété d'applications de solveur pour résoudre différents types de problèmes en CFD. Cette diversité d'outils permet aux utilisateurs de sélectionner le solveur le plus adapté à leur problématique spécifique, qu'il s'agisse d'un écoulement

monophasique incompressible en régime permanent, d'un écoulement diphasique, d'un flux supersonique, d'optimisation adjointe ou autre.

La réalisation d'études avec des vagues nécessite l'ajout d'un module complémentaire. Ainsi, le module OlaFlow est rajouté aux bibliothèques OpenFOAM. OlaFlow est un ensemble de solveurs et de conditions limites pour OpenFOAM qui est spécifiquement conçu pour la simulation des vagues en eau libre et de leur interaction avec les structures côtières. Il offre des fonctionnalités spécialisées pour la génération et l'absorption des vagues, la modélisation des brise-lames et d'autres structures poreuses, et la simulation des écoulements non linéaires et turbulents. OlaFlow vise à rendre la puissance d'OpenFOAM plus accessible aux utilisateurs qui ne possèdent pas une expertise approfondie en CFD.

## FEniCS

FEniCS est une plate-forme informatique open source populaire lancé en 2003 vise à résoudre des équations aux dérivées partielles à l'aide de la méthode des éléments finis. Il permet aux utilisateurs de traduire rapidement des modèles scientifiques en code d'éléments finis efficace via des interfaces Python et C++ de haut niveau qui facilitent la prise en main, même pour les utilisateurs n'ayant aucune expérience préalable dans les méthodes d'éléments finis.

FEniCS est largement utilisé en calcul scientifique et en ingénierie pour diverses applications, notamment la dynamique des fluides, la mécanique des solides, l'électromagnétique, etc. Sa flexibilité et sa facilité d'utilisation le rendent populaire parmi les chercheurs et ingénieurs travaillant dans le domaine du calcul numérique.

## preCICE et preCICE-FEniCS-OpenFOAM adaptors

preCICE (Precise Code Interaction Coupling Environment) est une bibliothèque de couplage open source essentielle conçue pour les simulations multiphysiques partitionnées. Cela inclut, sans s'y limiter, les simulations d'interaction fluide-structure et de transfert de chaleur conjugué. preCICE permet de coupler des programmes ou solveurs existants, chacun étant spécialisé dans la simulation d'une sous-partie de la physique complète impliquée dans une simulation. Cela permet une grande flexibilité et permet de conserver des temps de résolution raisonnables pour des scénarios multiphysiques complexes, tout en réutilisant des composants existants.

La bibliothèque preCICE offre une gamme de fonctionnalités essentielles pour les simulations multiphysiques. Elle comprend des moyens de communication parallèles pour permettre une exécution efficace pour faciliter l'échange entre différents solveurs, ainsi que des méthodes de couplage d'équations transitoires pour synchroniser les simulations dans le temps. preCICE est écrit en C++ et propose des liaisons supplémentaires pour C, Fortran, Python et Matlab.

Le couplage de solveur est très simple, grâce à l'approche mini-invasive de preCICE. Une fois ajouté les appels à la bibliothèque preCICE dans le code, on peut le coupler avec n'importe quel autre code au moment de l'exécution. Pour les solveurs bien connus tels que OpenFOAM, deal.II, FEniCS, Nutils, CalculiX ou SU2, on utilise l'un des adaptateurs officiels (voir figure 2.11) [99].

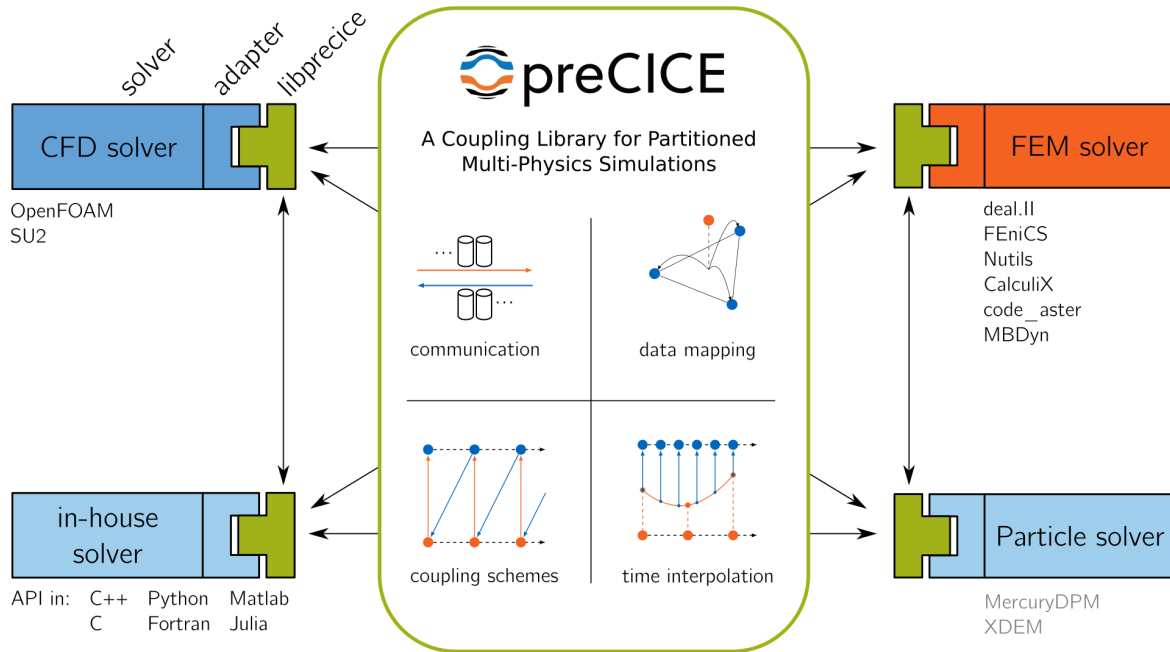


Figure 2.11 – Aperçu des fonctionnalités de preCICE [99]

Dans le contexte de résolution des problèmes liés aux IFS, deux outils sont choisis pour modéliser la dynamique de fluide et de la structure : OpenFOAM pour la modélisation de la dynamique du fluide, et FEniCS pour la modélisation de la structure. Pour intégrer preCICE avec OpenFOAM et FEniCS, des adaptateurs spécifiques sont disponibles pour être utilisés conjointement avec preCICE. Les adaptateurs OpenFOAM-preCICE et FEniCS-preCICE simplifient le processus de couplage en fournissant une interface entre les fonctionnalités de pré et poste-traitement de preCICE et les capacités de simulation utilisant OpenFOAM et FEniCS. Ces adaptateurs simplifient grandement le processus de couplage entre les simulations fluides et structures, facilitant ainsi la réalisation d'études multiphysiques complexes.

Le choix des outils de simulation dans ce travail a été effectué en fonction de critères spécifiques. En se basant sur les stratégies de résolution des EDP, OpenFOAM a été sélectionné pour la modélisation de la dynamique des fluides en raison de sa nature open source, de sa flexibilité, de sa large gamme de fonctionnalités, de sa compatibilité avec preCICE, et de sa capacité de résoudre les EDP à l'aide de la MVF. D'autre part, FEniCS a été retenu pour la modélisation de la dynamique de la structure en raison de sa nature open source conçue spécifiquement pour la modélisation et la simulation de problèmes mathématiques complexes basée sur la MEF, de sa facilité d'utilisation, de sa compatibilité avec preCICE, et de son large soutien de la communauté preCICE.

En combinant OpenFOAM et FEniCS, on peut bénéficier des avantages distincts de chaque outil. Cette combinaison permet une approche intégrée et efficace pour la modélisation et la simulation de systèmes multiphysiques complexes. En utilisant ces deux outils ensemble, on peut tirer parti de leurs forces respectives pour obtenir des résultats précis et complets dans la modélisation de systèmes où interagissent la dynamique des fluides et des structures.

## 2.10 Bilan

Dans ce chapitre, nous avons présenté les équations régissant le problème traité. A savoir les équations de Navier-Stokes pour les écoulements diphasiques, les équations d'élasticité pour la dynamique de la structure et les équations de la houle. Nous avons présenté en détail leur formulation mathématique ainsi que les méthodes de discrétisation spatiale employées. Le ballottement des liquides, en particulier, nécessite la détermination de la position de la surface libre à chaque instant de la simulation numérique. L'interaction entre un fluide et une structure est catégorisée selon les applications spécifiques. Du point de vue numérique, elle est classée selon les méthodes de calcul qui relient les équations du fluide et de la structure, ainsi que les conditions de couplage à l'interface. Cette classification numérique a été analysée dans ce chapitre. Enfin, nous avons fourni également un aperçu général des outils numériques choisis pour les simulations réalisées dans le cadre de ce travail.

---

## Mise en place d'un dispositif expérimental du ballottement dans une cuve soumise à une excitation de tangage

---

### Résumé

Ce chapitre présente la mise en place d'un dispositif expérimental réalisé sur le ballottement du liquide dans une cuve en mouvement. Il contient une description du système mécanique et une analyse analytique du mouvement de la cuve. Ce mouvement est ensuite validé expérimentalement. La surface libre est visualisée pour observer l'effet de ce mouvement sur le ballottement. Les images acquises sont traitées et les observations sont ensuite utilisées pour analyser l'évolution temporelle de la surface libre. Ce chapitre se termine par le plan des expériences et les essais effectués.

### Sommaire

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>3.1 Dispositif expérimental</b> . . . . .   | <b>61</b> |
| 3.1.1 Description du dispositif expérimental et mise en mouvement de la cuve . . . . .                       | 61        |
| 3.1.2 Description analytique du mouvement . . . . .  | 63        |
| <b>3.2 Méthodes et matériel de mesure</b> . . . . .  | <b>67</b> |
| 3.2.1 Suivi des paramètres temporels de la chaîne cinématique . . . . .                                      | 67        |
| 3.2.2 Validation de l'évolution temporelle de l'angle d'inclinaison et de la position du point $B$ . . . . . | 68        |
| 3.2.3 Visualisation de la surface libre . . . . .  | 69        |
| 3.2.4 Traitement des images et évolution temporelle de la surface libre                                      | 71        |
| <b>3.3 Plan des expériences</b> . . . . .  | <b>74</b> |
| 3.3.1 Configuration expérimentale . . . . .  | 74        |
| 3.3.2 Procédure des essais . . . . .   | 74        |
| <b>3.4 Bilan</b> . . . . .   | <b>76</b> |

---

## 3.1 Dispositif expérimental

### 3.1.1 Description du dispositif expérimental et mise en mouvement de la cuve

Nous avons mis en œuvre un dispositif expérimental pour évaluer le ballonnement de l'eau dans une cuve rectangulaire rigide. La cuve est soumise à une excitation de tangage : le cas d'une houle artificielle (cf. figure 3.1). Ce dispositif peut servir comme une première approche pour étudier et comprendre l'effet de la dynamique de l'eau à l'intérieur de la cuve sur la stabilité d'un système flottant. Nous nous intéressons à l'influence du débattement de la cuve, la période caractéristique de la houle  $T_p$  et l'angle d'inclinaison de la cuve au fil du temps  $\alpha(t)$  sur le ballonnement (figure 3.2).

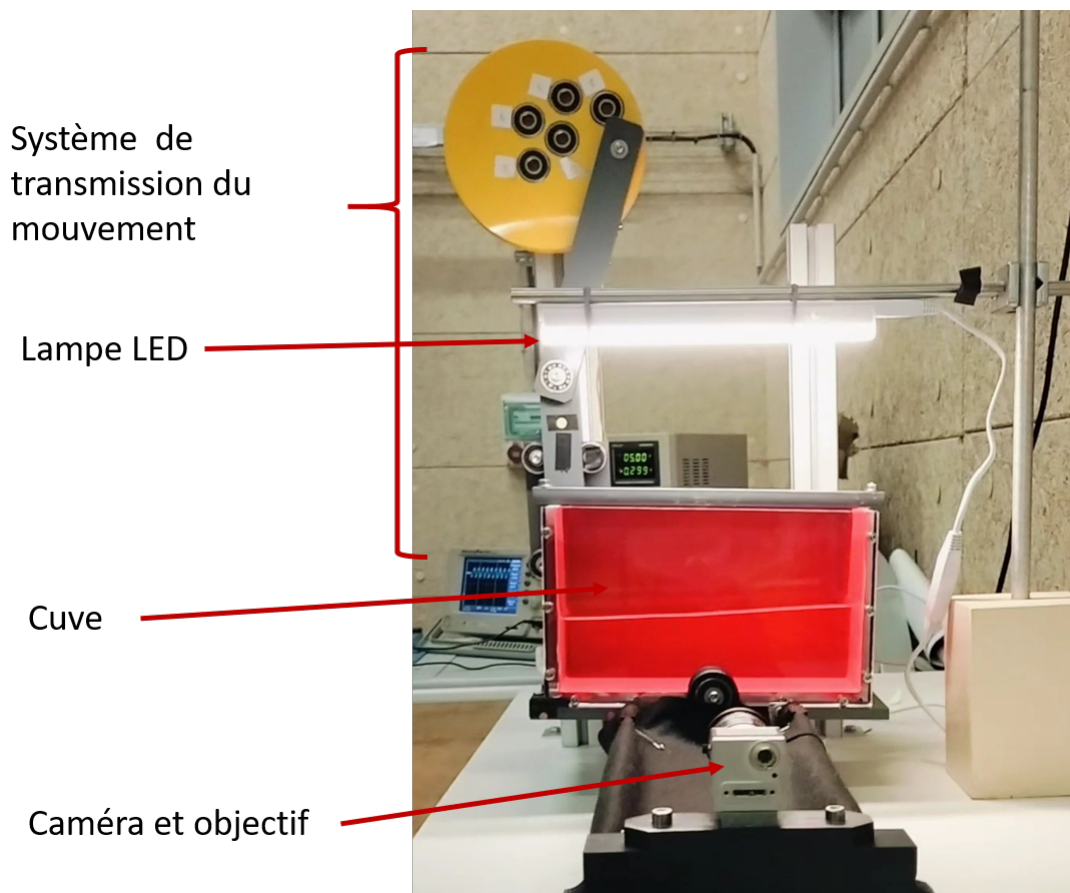
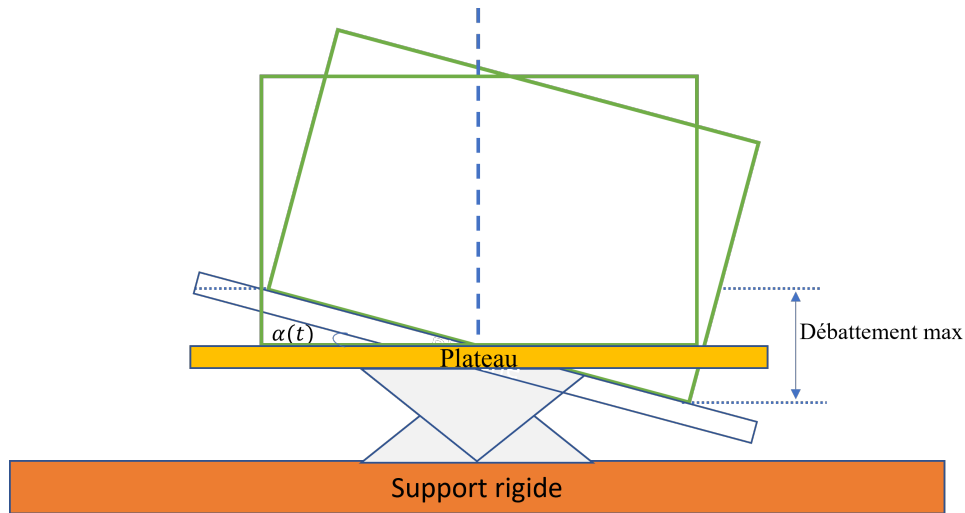


Figure 3.1 – Dispositif expérimental

La cuve utilisée est de petite taille (250 mm de long, 160 mm de large et 150 mm de haut). Le matériau constituant cette cuve est du polyméthacrylate de méthyle (PMMA, usuellement connu sous le nom de la marque déposée Plexiglas). La cuve est mise en mouvement de rotation harmonique grâce à un système mécanique. Ce système transforme la vitesse de rotation constante d'un Moteur, en mouvement de basculement du plateau portant la cuve, induisant une rotation autour de l'axe horizontal ( $z$ ) au milieu de la base de la cuve (voir figure 3.3). Ce mouvement de basculement exprime l'excitation de tangage souhaitée. En imposant une vitesse de rotation du moteur électrique qui peut être réglé entre  $0,630 \text{ rad/s}$  ( $T_p = 10 \text{ s}$ ) et  $1,256 \text{ rad/s}$  ( $T_p = 5 \text{ s}$ ) et un débattement maximal compris entre 32,1 mm et 133,9 mm, nous avons pu contrôler l'excitation de tangage appliquée.



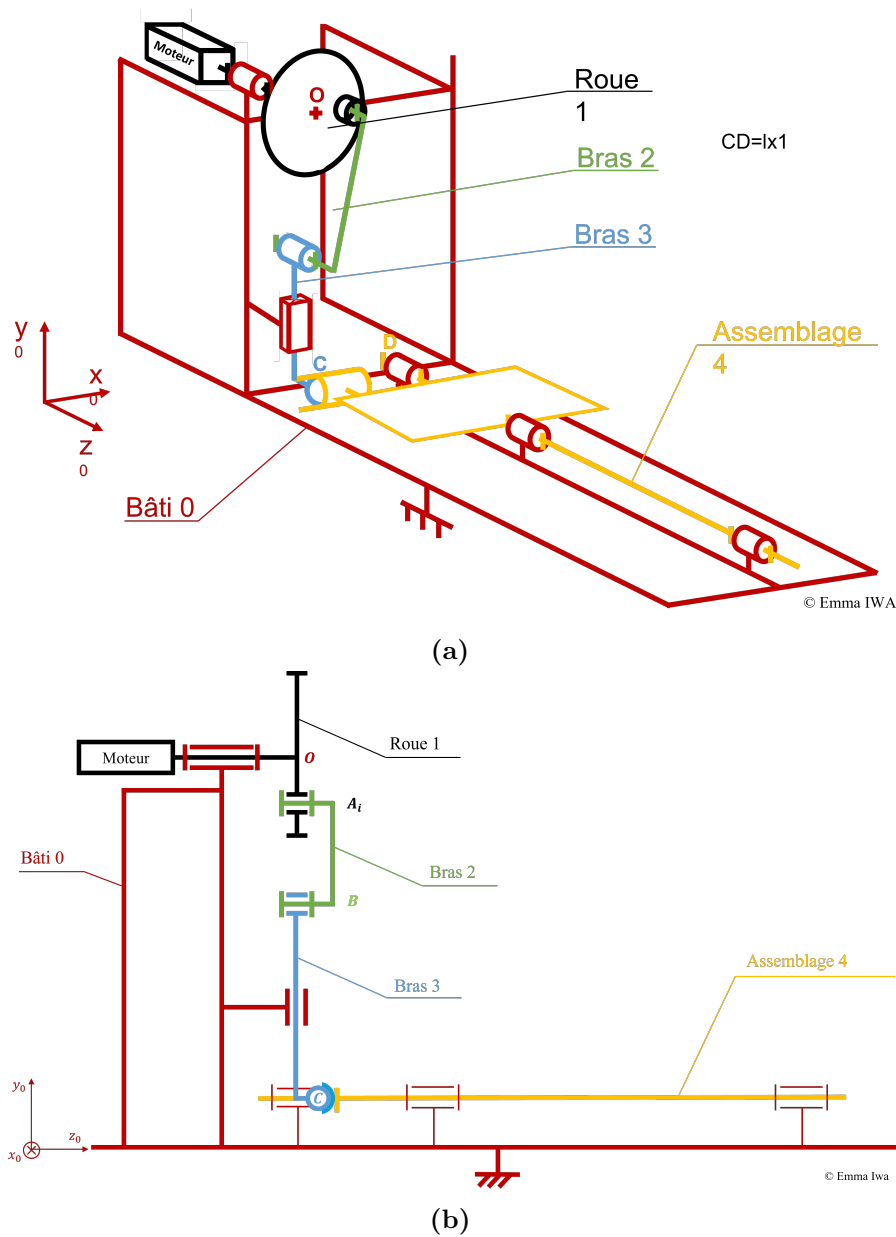
**Figure 3.2** – Schéma simple présentant l'angle de rotation  $\alpha(t)$  et le débattement maximal

Le système mécanique (figure 3.3) est composé de cinq solides, les liaisons entre ses éléments sont montrées dans la figure 3.4 :

1. **Le Bâti (0)** est une structure en aluminium qui supporte l'ensemble du système mécanique. Il est ancré sur une planche en bois. Le repère galiléen  $R_0 (O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  est lié au bâti (centre  $O$  et base  $(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ ).
2. **La Roue (1)** est liée au bâti par une liaison pivot, d'axe  $(O, \vec{z}_0)$  et d'angle de rotation  $\theta_1(t)$ . Le repère lié à la roue est  $R_1 (O, \vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_0)$ . La mise en mouvement de la roue est provoquée par le Moteur (connecté à une alimentation électrique), précédemment mentionné, qui est monté sur le bâti (0), et tourne à vitesse constante. La roue a 6 points de montage  $A_i$  ( $i = 1 \dots 6$ ), excentrée d'une distance  $a_i$  du centre  $O$  (ce qui correspond au vecteur  $\vec{OA}_i = a_i \vec{x}_1$ ). Ces points serviront à l'entraînement du bras (2).
3. **Le Bras(2)** est relié à la roue (1) par une liaison pivot d'axe  $(A, \vec{z}_0)$  et d'angle de rotation  $\theta_2(t)$ . Le repère lié au bras est  $R_2 (A, \vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_0)$ . Le choix du point de montage ( $A$ ) du bras (2) conditionne le débattement maximal de la cuve. La distance entre les points  $A$  et  $B$  (le point de connexion entre les deux bras (2) et (3)) correspond à  $\vec{AB} = L_2 \vec{x}_2$ , la distance  $\vec{OB} = -y_0(t) \vec{y}_0$ ,  $y_0(t)$  variant en fonction du temps.
4. **Le Bras(3)** tourne par rapport au bras (2) grâce à une liaison pivot d'axe  $(B, \vec{z}_0)$  et angle de rotation  $\theta_3(t)$ . Par ailleurs, il glisse par rapport au bâti (0) suivant l'axe vertical. Le repère lié au bras est  $R_3 (B, \vec{y}_3, \vec{x}_3, \vec{z}_0)$ , qui correspond au repère  $(B, \vec{x}_0, -\vec{y}_0, \vec{z}_0)$ . La distance entre les points  $B$  et  $C$  (le point de connexion entre le plateau le bras (3)) correspond à  $\vec{BC} = L_3 \vec{x}_3 = -L_3 \vec{y}_0$ .
5. **L'Assemblage (4)** est constitué de plusieurs éléments solidaires. Un Plateau porte la Cuve et est prolongé par un Rail sur lequel est installée une caméra de visualisation. Ainsi la caméra suit la cuve dans son mouvement. L'assemblage est relié au bras (3) par une liaison linéaire annulaire.

Enfin, l'assemblage est lié au bâti (0) par une liaison pivot d'axe  $(D, \vec{z}_0)$  et d'angle de rotation  $\alpha(t)$ , qui est un paramètre temporel d'orientation. Le repère lié à l'assemblage est  $R_4 (D, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_0)$ . Lorsque la cuve est à l'horizontal la distance entre les points  $C$  et  $D$  (voir figure 3.5) est égale à  $L_4$  et varie en fonction

de  $\alpha(t)$ .

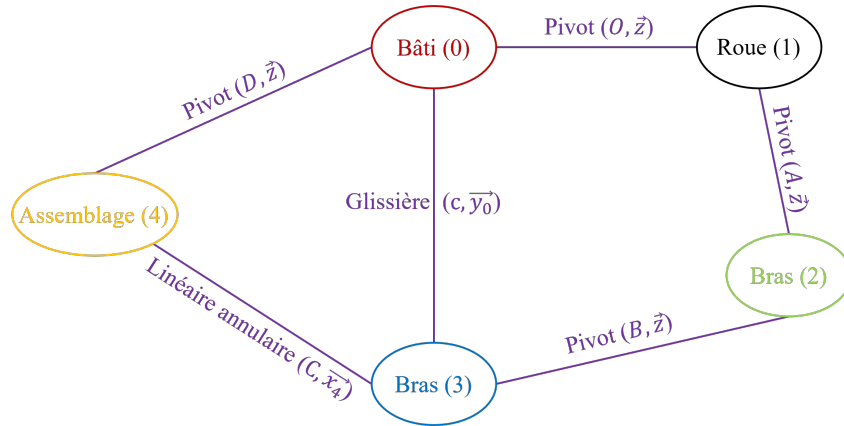


**Figure 3.3** – Dispositif expérimental du système mécanique : (a) Représentation isométrique, (b) Représentation plane)

La conception et la réalisation du dispositif ont été assurées avec l'aide des ateliers mécanique et électronique du laboratoire LUSAC.

### 3.1.2 Description analytique du mouvement

Dans cette section, nous examinons l'impact du mouvement rotatif de la roue sur le mouvement de tangage/roulis de la cuve. Ceci conduit à la relation entre ces mouvements et l'angle de rotation  $\alpha(t)$ . Cette analyse est basée essentiellement sur un système bielle manivelle. En utilisant la construction graphique du système mécanique montrée dans la figure 3.5, nous calculons l'évolution temporelle de la distance  $y_0(t)$  entre les points  $O$  et  $B$ . Cette distance dépend de l'angle de rotation de la roue  $\theta_1(t)$ . Ensuite, nous effectuons une dérivation première puis deuxième de  $y_0(t)$  par rapport au temps, elles correspondent à la



**Figure 3.4** – Différentes liaisons entre les composantes du système

vitesse  $\dot{y}_0(t)$  et à l'accélération  $\ddot{y}_0(t)$ . La rotation du moteur et l'angle de rotation  $\theta_1$  sont représentés dans le sens des aiguilles d'une montre. L'angle  $\theta_3$  est représenté dans le sens opposé de rotation du moteur.

On note :

$$\overrightarrow{OB} = -y_0(t)\overrightarrow{y}_0 = \overrightarrow{OH} + \overrightarrow{HB} \quad (3.1)$$

Où,  $\overrightarrow{OH}$  et  $\overrightarrow{HB}$  peuvent être exprimés par les relations 3.2 et 3.3 respectivement.

$$\overrightarrow{OH} = a_i \sin \theta_1 \overrightarrow{y}_0 \quad (3.2)$$

$$\overrightarrow{HB} = -L_2 \cos \theta_3 \overrightarrow{y}_0 \quad (3.3)$$

Comme  $\cos^2 \theta_3 + \sin^2 \theta_3 = 1$ , on a :

$$\cos \theta_3 = \pm \sqrt{1 - \sin^2 \theta_3} \quad (3.4)$$

Compte tenu de la racine carrée et à partir des équations 3.2, 3.3 et 3.4, nous avons deux valeurs possibles d' $\overrightarrow{OB}$ . On peut donc réécrire l'équation 3.1 sous la forme suivante :

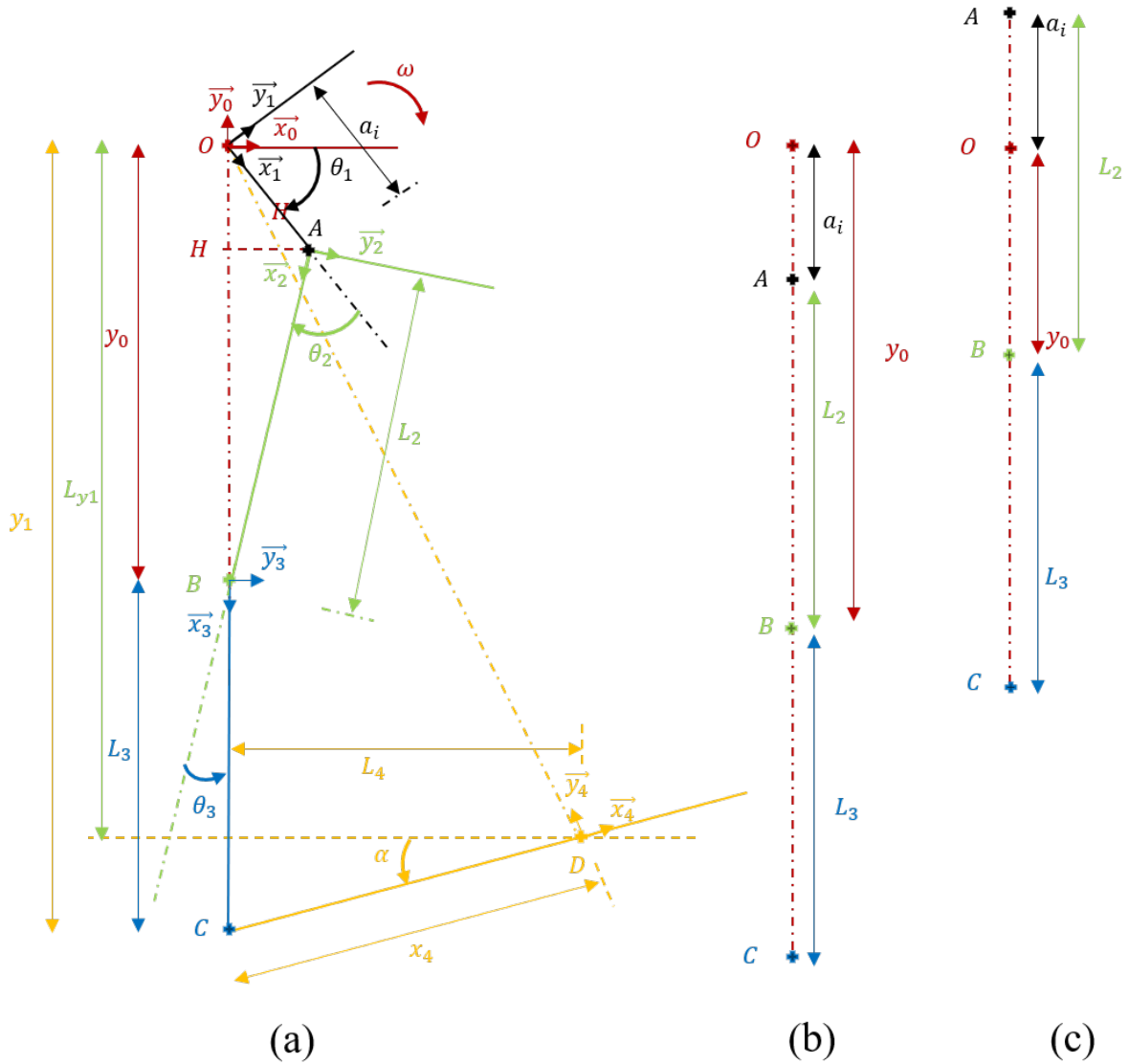
$$\overrightarrow{OB} = \left( a_i \sin \theta_1 \pm \sqrt{L_2^2 - a_i^2 \cos^2 \theta_1} \right) \overrightarrow{y}_0 \quad (3.5)$$

On distingue deux cas particuliers de l'angle  $\theta_1$  (voir figure 3.5), qui permettent de vérifier l'expression finale de  $y_0$ .

- Pour une valeur comprise entre 0 et  $-\pi$ , on prend une valeur de  $\theta_1 = -\pi/2$ . Le point  $A$  est donc placé entre les points  $O$  et  $B$ ,  $\cos \theta_1 = 0$  et  $\sin \theta_1 = -1$

$$\overrightarrow{OB} = (-a_i \pm L_2) \overrightarrow{y}_0 \quad (3.6)$$

Dans ce cas on a  $\|\overrightarrow{OB}\| = a_i + L_2$ , on aura donc :  $\overrightarrow{OB} = -(a_i + L_2) \overrightarrow{y}_0$  et  $y_0(t) = a_i + L_2$ .



**Figure 3.5** – (a) Schématisation des mouvements des bras pour le cas de l'angle  $\theta_1$  quelconque, (b) Cas où  $\theta_1 = -\pi/2$ , (c) Cas où  $\theta_1 = -3\pi/2$

- Pour une valeur comprise entre  $-\pi$  et  $-2\pi$ , on prend une valeur de  $\theta_1 = -3\pi/2$ . On aura le point  $A$  au dessus du point  $O$ ,  $\cos \theta_1 = 0$  et  $\sin \theta_1 = 1$ .

$$\vec{OB} = (a_i \pm L_2) \vec{y}_0 \quad (3.7)$$

Dans ce cas,  $\|\vec{OB}\| = -a_i + L_2$ , ce qui donne  $\vec{OB} = (a_i - L_2) \vec{y}_0$  et  $y_0(t) = -a_i + L_2$ .

On retient donc l'expression 3.8 suivante :

$$y_0(t) = -a_i \sin \theta_1 + \sqrt{L_2^2 - a_i^2 \cos^2 \theta_1} \quad (3.8)$$

La dérivée première et seconde par rapport au temps de l'équation 3.8 sont données par les équations 3.9 et 3.10 respectivement.

$$\dot{y}_0(t) = \left( -a_i \cos \theta_1 + \frac{a_i^2 \cos \theta_1 \sin \theta_1}{\sqrt{L_2^2 - a_i^2 \cos^2 \theta_1}} \right) \dot{\theta}_1 \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_0(t) = & \left[ a_i \sin \theta_1 + \frac{a_i^2}{\sqrt{L_2^2 - a_i^2 \cos^2 \theta_1}} \left( \cos^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_1 - \frac{a_i^2 \cos^2 \theta_1 \sin^2 \theta_1}{L_2^2 - a_i^2 \cos^2 \theta_1} \right) \right] \dot{\theta}_1^2 \\ & + \left( \frac{a_i \sin \theta_1 \cos \theta_1}{\sqrt{L_2^2 - a_i^2 \cos^2 \theta_1}} - a_i \cos \theta_1 \right) \ddot{\theta}_1 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Vu que la vitesse de rotation  $\dot{\theta}_1$  est constante, l'accélération  $\ddot{\theta}_1$  est nulle. L'équation 3.10 devient l'équation 3.11 :

$$\ddot{y}_0(t) = \left[ a_i \sin \theta_1 + \frac{a_i^2}{\sqrt{L_2^2 - a_i^2 \cos^2 \theta_1}} \left( \cos^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_1 - \frac{a_i^2 \cos^2 \theta_1 \sin^2 \theta_1}{L_2^2 - a_i^2 \cos^2 \theta_1} \right) \right] \dot{\theta}_1^2 \quad (3.11)$$

Concentrons nous sur la construction graphique du système et les liaisons présentées sur la figure 3.5 et la figure 3.4, on a :

$$\overrightarrow{OD} = \overrightarrow{OC} + \overrightarrow{CD} \quad (3.12)$$

$$\overrightarrow{OD} = -y_1 \overrightarrow{y}_0 + x_4 \overrightarrow{x}_4 \quad (3.13)$$

Projetons  $\overrightarrow{x}_4$  sur les axes ( $\overrightarrow{x}_0$ ,  $\overrightarrow{y}_0$ ) :

$$\overrightarrow{x}_4 = \cos \alpha \overrightarrow{x}_0 + \sin \alpha \overrightarrow{y}_0 \quad (3.14)$$

On remplace l'équation 3.14 dans 3.13 et avec  $x_4 = L_4 / \cos \alpha$ , on obtient donc la relation (équation 3.15) :

$$\overrightarrow{OD} = L_4 \overrightarrow{x}_0 + (L_4 \tan \alpha - y_1) \overrightarrow{y}_0 \quad (3.15)$$

Où :  $L_4 \tan \alpha - y_1 = -L_{y1}$ .

On peut donc déduire l'expression de l'angle d'inclinaison  $\alpha(t)$  sous la forme de l'équation 3.16 suivante :

$$\alpha(t) = \arctan \left( \frac{y_1 - L_{y1}}{L_4} \right) \quad (3.16)$$

Considérons le cas où la cuve est à l'horizontal  $\theta_1 = 0$ , les distances  $L_{y1}$  et  $y_1$  sont données avec les équations 3.17 et 3.18 données ci-après respectivement :

$$L_{y1} = \sqrt{L_2^2 - a_i^2} + L_3 \quad (3.17)$$

$$y_1 = y_0 + L_3 \quad (3.18)$$

La dérivée première et la dérivée seconde de  $\alpha$  sont exprimées avec les équations 3.19 et 3.20 respectivement :

$$\dot{\alpha} = \frac{\dot{y}_1}{L_4 \left( 1 + \left( \frac{y_1 - L_{y1}}{L_4} \right)^2 \right)} \quad (3.19)$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{2(y_1 - L_{y1})\dot{y}_1^2}{L_4^3 \left( 1 + \left( \frac{y_1 - L_{y1}}{L_4} \right)^2 \right)^2} + \frac{\ddot{y}_1}{L_4 \left( 1 + \left( \frac{y_1 - L_{y1}}{L_4} \right)^2 \right)} \quad (3.20)$$

## 3.2 Méthodes et matériel de mesure

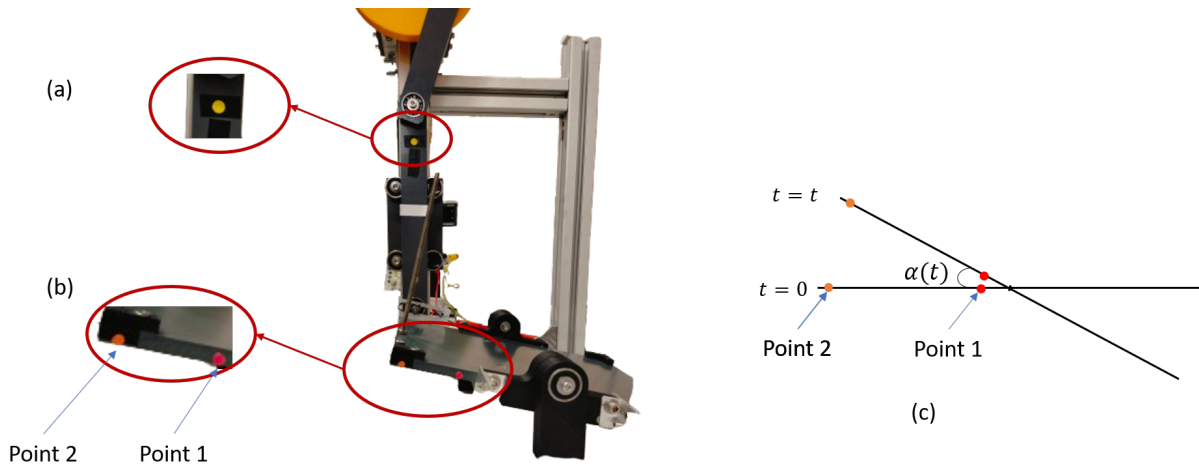
### 3.2.1 Suivi des paramètres temporels de la chaîne cinématique

Dans le but de caractériser le mouvement de la cuve, nous avons fait un suivi de l'évolution temporelle de la position du point  $B$  (le mouvement vertical du bras (2)  $y_0$ ) et l'angle d'inclinaison  $\alpha(t)$  du plateau portant la cuve. L'évolution temporelle de  $y_0$  est extraite d'un enregistrement vidéo de son mouvement vertical, en utilisant le logiciel d'analyse et modélisation open source Tracker [69]. Ce logiciel permet de numériser les trajectoires de points mobiles à partir d'enregistrements vidéo, en déduisant des tableaux et des graphes pour l'évolution de leur positions, leur vitesses et leurs accélérations [85]. Il est basé sur un système de pointage automatique.

Sur Tracker, nous avons choisi l'origine et l'orientation du référentiel, et nous avons fait une calibration pour convertir les pixels en  $m$ . Ensuite, nous avons sélectionné un point sur le bras (2), et nous avons extrait le mouvement vertical par le suivi automatique (autoTracker). Le tableau de données (positions successives du point) est donc enregistré sous un fichier au format "csv" afin de les comparer avec les calculs théoriques.

De même, nous nous intéressons au mouvement de rotation de la cuve et de son plateau, qui correspond à l'évolution temporelle de l'angle ( $\alpha(t)$ ). Nous faisons donc le suivi de deux points positionnés l'un à l'extrémité et l'autre proche du centre du plateau et dont les positions sont liées à l'angle ( $\alpha$ ). On extrait les positions successives des deux points. Les deux coordonnées ( $x, y$ ) de chaque point sont nécessaires afin de déterminer l'angle d'inclinaison  $\alpha(t)$  (équation 3.21). En revanche nous n'avons pas besoin de faire une calibration. La figure 3.6 montre la position des trois points suivis sur le bras et le plateau.

$$\arctan \alpha = \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \quad (3.21)$$



**Figure 3.6** – Position des trois points suivis : (a) Bras, (b) Plateau, (c) Positions des points à l'instant 0 et  $t$

### 3.2.2 Validation de l'évolution temporelle de l'angle d'inclinaison et de la position du point $B$

Cette section vise à valider les expressions théoriques par comparaison avec des données expérimentales obtenues dans différentes conditions. Pour ce faire, nous avons réalisé des expériences à petite et à grande vitesse de rotation. Nous avons appliqué la démarche décrite dans la section 3.2.1 (figure 3.6). Le tableau 3.1 les essais réalisés. Différentes fréquences d'acquisition ( $25\text{fps}$ ,  $30\text{fps}$  et  $50\text{fps}$ ) ont été utilisées. Les expériences sont faites sans la cuve afin d'éviter sa charge qui n'est pas considérée dans l'approche analytique.

TABLE 3.1 – Tableau récapitulatif des essais réalisés en fonction de type de mouvement (bras/plateau) dans le cadre de la validation expérimentale-théorique : avec (i) est la référence de la position du bras (1) sur la roue par rapport à son centre

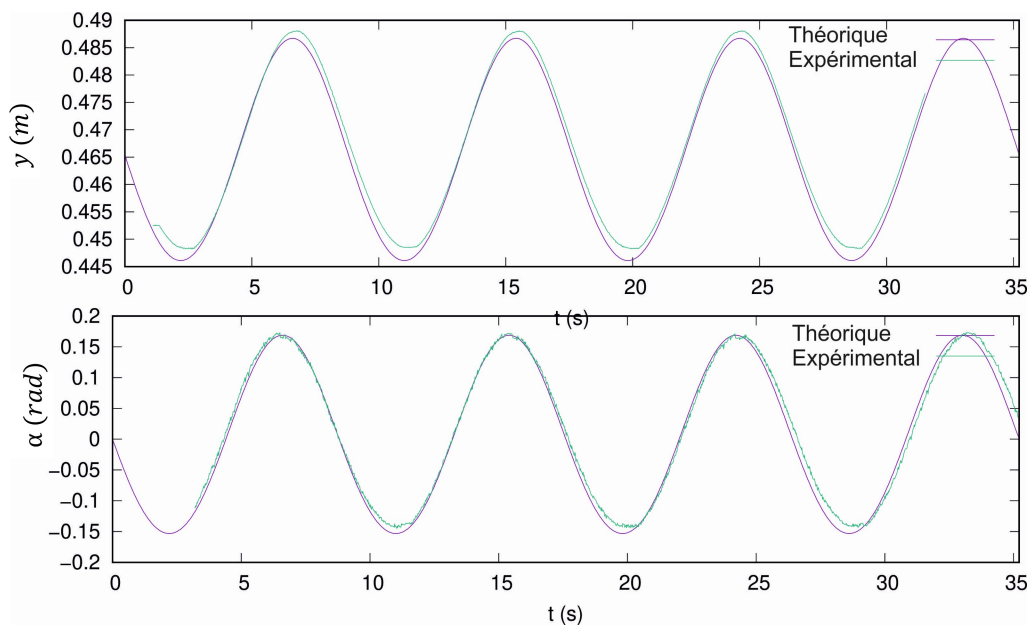
| Cas-Point du montage du bras ( $A_i$ ) | Vitesse | Type de mouvement       | Nombre d'essais |
|--|---------|-------------------------|-----------------|
| $A_1$                                  | 1.047   | Bras ( $y_0(t)$ )       | 8               |
|  |         | Plateau ( $\alpha(t)$ ) | 9               |
| $A_5$                                  | 0.700   | Bras ( $y_0(t)$ )       | 9               |
|  |         | Plateau ( $\alpha(t)$ ) | 11              |

Après la collecte des données expérimentales, nous avons tracé les courbes du déplacement du bras  $y_0$  et l'évolution de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  obtenues à partir du système bielle manivelle (cf. section 3.1.2) en fonction du temps tels que prédits par les équations théoriques 3.8 et 3.16 respectivement. Ces courbes présentent des allures pseudo-sinusoidales. Nous les avons superposées avec les courbes expérimentales.

La figure 3.7 présente la comparaison entre les données théoriques et les données expérimentales du mouvement vertical du bras de la bielle manivelle et de l'évolution temporelle du mouvement de va-et-vient du plateau. Des légers écarts de moins de 1% se manifestent dès le début entre les courbes du mouvement vertical, ils sont devenus plus légers, par exemple à la moitié de chaque cycle d'oscillation on a 0.4% d'écart. Sur les courbes de mouvement de basculement du plateau, on observe des écarts mineurs ; par exemple, autour des instants  $t = 20\text{ s}$  et  $t = 30\text{ s}$ , on a un écart de 5%.

Ces écarts peuvent être attribués à un manque de précision dans la mesure de la vitesse de rotation de la roue, réalisée avec le Tachymètre. En effet, la résolution du Tachymètre est limitée au dixième après la virgule. D'ailleurs, ces écarts peuvent être dus aux caractéristiques du petit moteur utilisé pour entraîner le mouvement du système. En effet, le moteur est de faible puissance et peut présenter des légères fluctuations de vitesse, dues à la variation de couple, des vibrations ou encore des pertes d'énergie. Tous ces phénomènes peuvent affecter la régularité du mouvement attendu.

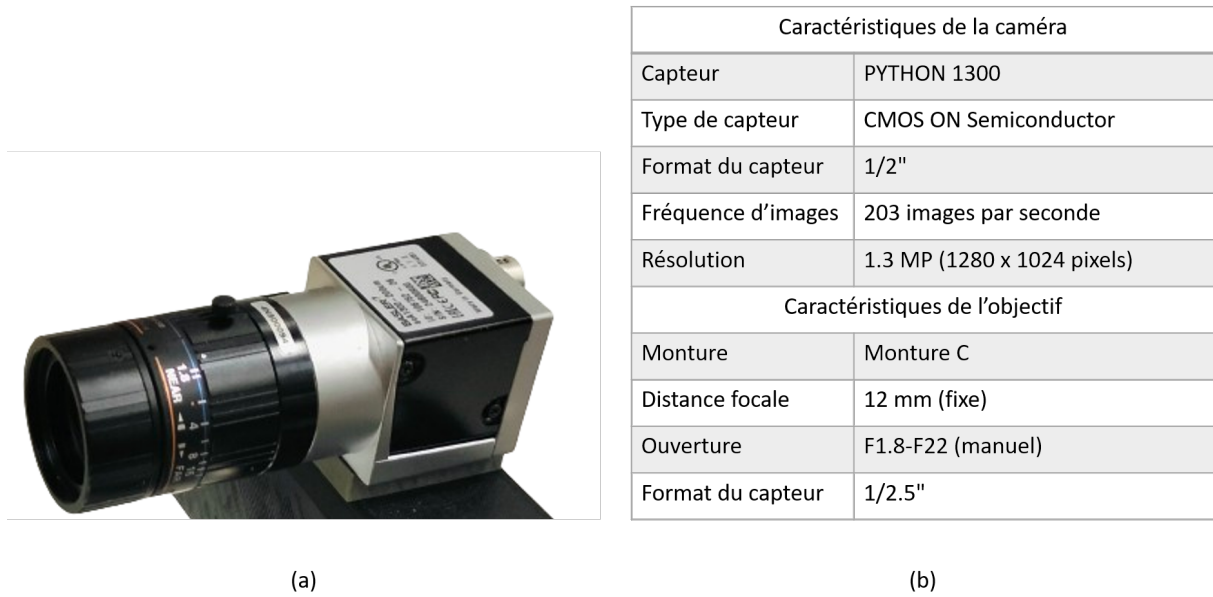
Les courbes expérimentales restent proches des courbes théoriques, malgré ces légers écarts. Le mouvement reste périodique et cohérent, ce qui confirme la validité générale des données expérimentales.



**Figure 3.7** – Comparaison entre les données expérimentales et théoriques : Déplacement du bras et Angle d'inclinaison du plateau

### 3.2.3 Visualisation de la surface libre

Les enregistrements vidéo et les séries d'images ont été pris afin de suivre la surface libre de l'eau. Une caméra USB 3.0 Basler acA1300-200um de vision industrielle avec un objectif Basler C125-1218-5M-P, sont placés à 533 mm de la face avant de la cuve et à une hauteur adaptée au taux de remplissage de la cuve (hauteur de l'eau). La caméra et son objectif suivent le mouvement de basculement de la cuve afin de capturer le comportement de la surface libre du liquide. Les caractéristiques de la caméra et son objectif sont données dans la figure 3.8.



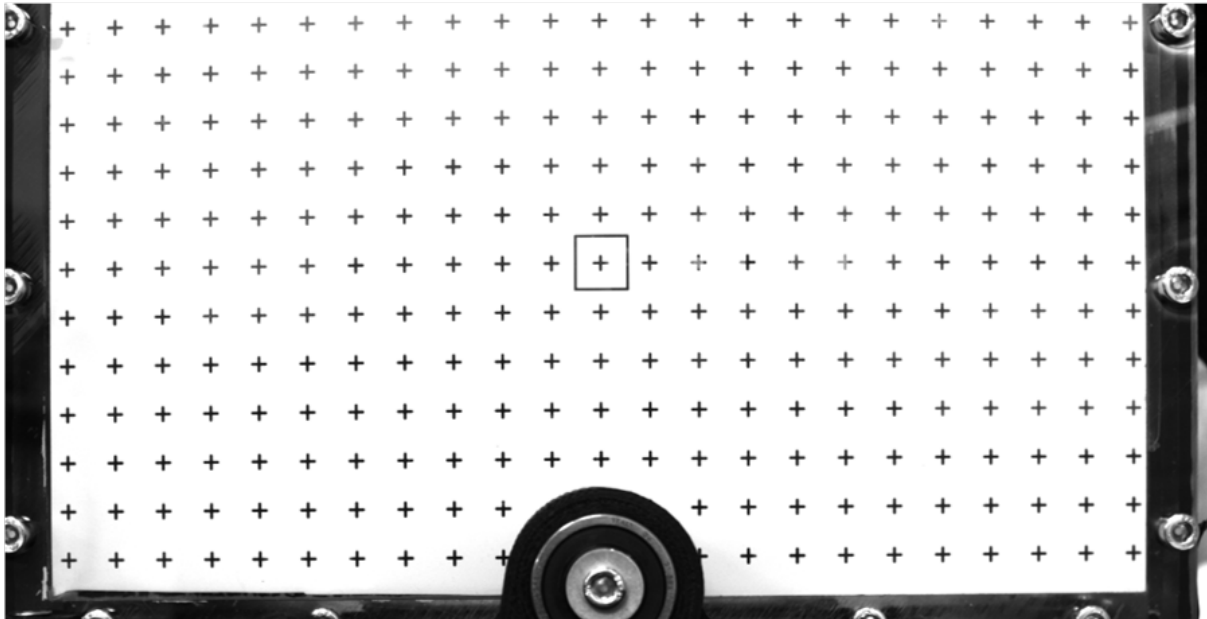
**Figure 3.8** – (a) Caméra 'Basler acA1300-200um' et Objectif 'Basler C125-1218-5M-P' utilisés, (b) les caractéristiques de la caméra [20] et son l'objectif [93]

Le fonctionnement de la caméra et l'enregistrement des images et des vidéos ont été pilotés via l'outil de configuration 'Pylon viewer' dans un environnement Windows [100]. La fréquence d'acquisition des images a été ajustée à 25 *fps*. Pour assurer une illumination uniforme et minimiser les ombres et les reflets, une source lumineuse de type LED 4 W produisant 500 lumen (280 x 28 x 30 mm) a été placée au dessus de la cuve. Les parois internes de la cuve (mis à part la paroi avant) ont été recouvertes par un film opaque, ce qui limite les reflets. La LED illumine toute la surface libre.

Afin de déterminer le facteur d'échelle [*mm/pixels*] entre la zone visualisée et l'image acquise, et de pouvoir par la suite convertir les distances exprimées en pixels en distances exprimées en millimètres, nous procédons à une calibration. Nous utilisons une mire de calibration d'une hauteur de 150 mm et d'une longueur de 240 mm. Sa surface est couverte de croix équidistantes dans le sens de la longueur et la hauteur. Nous avons placé la mire à l'intérieur de la cuve, et l'avons collé sur la paroi avant de la cuve. Cela permettra de visualiser la mire comme arrière plan dans le champ de la caméra. Avant de commencer chaque séquence d'acquisition, nous avons fait une calibration. Nous avons pris des images de la mire dans la cuve vide, et dans le cas où elle est remplie à 30% et 50% (cf. 3.9).

Notons que la paroi est en plexiglass, elle peut générer une distorsion de l'image. Grace au logiciel DaVis<sup>1</sup> de LaVision [28], nous avons mesuré la valeur de la distorsion de l'image de la mire. Elle est de 0.07 *pixels*, ce qui traduit une très faible distorsion. Désormais, une correction de la distorsion d'image n'est pas nécessaire. Sur l'image de la mire, nous mesurons la distance entre les croix en pixels. Le facteur d'échelle est alors calculé en divisant la distance réelle, en mm, par la distance mesurée en *pixels*. Il est de l'ordre de 0.21 *mm/pixel*.

1. Le logiciel DaVis sert à traiter des images de vélocimétrie par images de particules et dispose d'un module de calibration et correction de la distorsion.



**Figure 3.9** – Image de la mire de calibration. La croix encadrée correspond au centre de la cuve. La flèche correspond à la distance en millimètre entre les deux croix rouge, permettant la détermination du facteur d'échelle

### 3.2.4 Traitement des images et évolution temporelle de la surface libre

Dans cette étude, le traitement des images et l'extraction des données instantanées ont été effectuées via le logiciel libre de calcul numérique 'Scilab Software V2023.1.0' [70]. Nous avons utilisé le module IPCV toolbox (Image Processing and Computer Vision) [54] pour le traitement des images, cette toolbox permet la lecture et filtrage des images, l'extraction des données et visualisation de celles-ci. Dans notre cas, les données sont traitées avec deux algorithmes différents adaptés aux liquides utilisés, à savoir l'eau claire et l'eau colorée avec du riz.

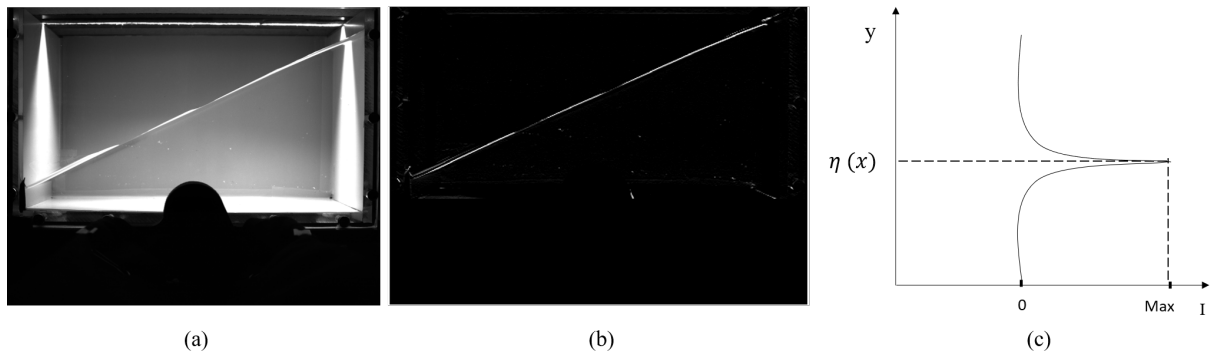
#### — L'eau claire

Nous avons suivi les étapes suivantes :

Conversion des pixels en millimètres : La définition du facteur d'échelle des images est une étape préalable faite avant le traitement des images. Elle se fait sur les images de référence acquises avec la Mire de calibration 3.9.

Application de filtres sur les images : Des filtres sont appliqués sur les images afin d'améliorer leur qualité et de faciliter l'extraction des données. Les filtres 'Gaussien' et 'Sobel' facilitent la détection des contours. Ceci éclaircit les bords et les transitions dans les images. La figure (3.10) montre la différence entre une image acquise avant et après l'application des filtres.

Rognage de la zone étudiée : Après avoir amélioré leur qualité, nous avons gardé uniquement la zone de visualisation interne de la cuve pour chaque image.



**Figure 3.10** – Cuve remplie avec de l'eau claire : (a) Image brute acquise, (b) Image traitée sur Scilab, (c) Méthode d'extraction : profil d'intensité lumineuse pour une abscisse  $x$  donnée.

### — L'eau colorée avec du riz

On constate sur la figure 3.10 que la surface libre de l'eau claire n'est pas complètement illuminée. Cela a un effet sur l'extraction du profil de la surface libre. Après plusieurs essais avec divers fluides et/ ou colorants, nous avons utilisé l'eau colorée avec du riz. Par ailleurs, nous avons modifié le traitement d'images appliqué avant l'extraction de l'élévation de la surface libre. Nous avons suivi les étapes suivantes :

Conversion des pixels en millimètres

Application de filtres sur les images : Nous avons appliqué le filtre 'Gaussien' afin d'améliorer la détection de contours et l'augmentation du contraste.

Conversion des images : Par la suite, les images qui étaient en niveaux de gris ont été converties en format noir et blanc (format binaire) avec un seuil de conversion qu'on fixe entre 0,4 et 0.75 en fonction de niveau d'illumination des images.

Inversion des couleurs noir et blanc des images.

Rognage de la zone étudiée.

Application d'un masque : Nous identifions les coordonnées du fond, des parois latérales et des parties du support visibles sur l'image (notamment le support de l'axe de rotation, visible au niveau du fond de la cuve) Aussi ces zones qui apparaissent en noir sur l'image, ne seront pas prises en compte lors de l'identification de la surface libre.

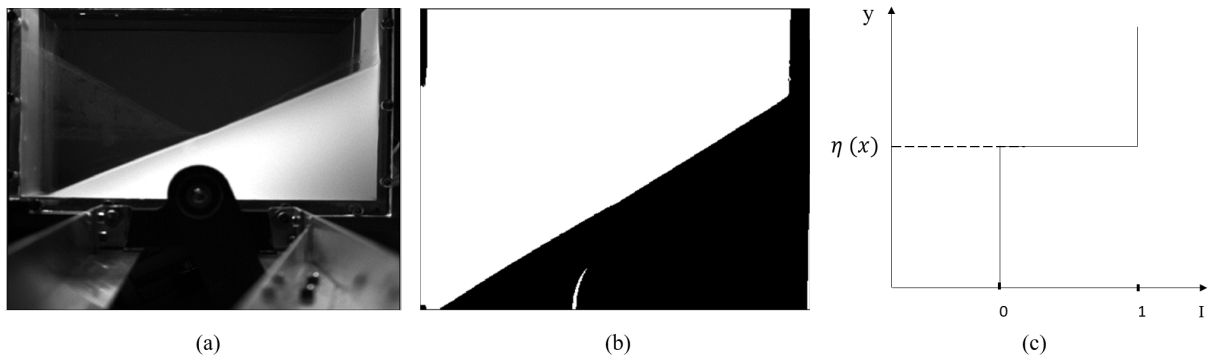
La figure 3.11 montre la différence entre une image acquise, en utilisant l'eau colorée avec du riz, avant et après le traitement complet.

### — L'identification de la surface libre

L'identification de la surface libre se fait une fois les images traitées et la conversion des pixels en millimètres ayant été réalisées grâce au facteur d'échelle. Pour un instant  $t$  donné, l'élévation de la surface libre ( $\eta(x, t)$ ) à une abscisse  $x$  correspond :

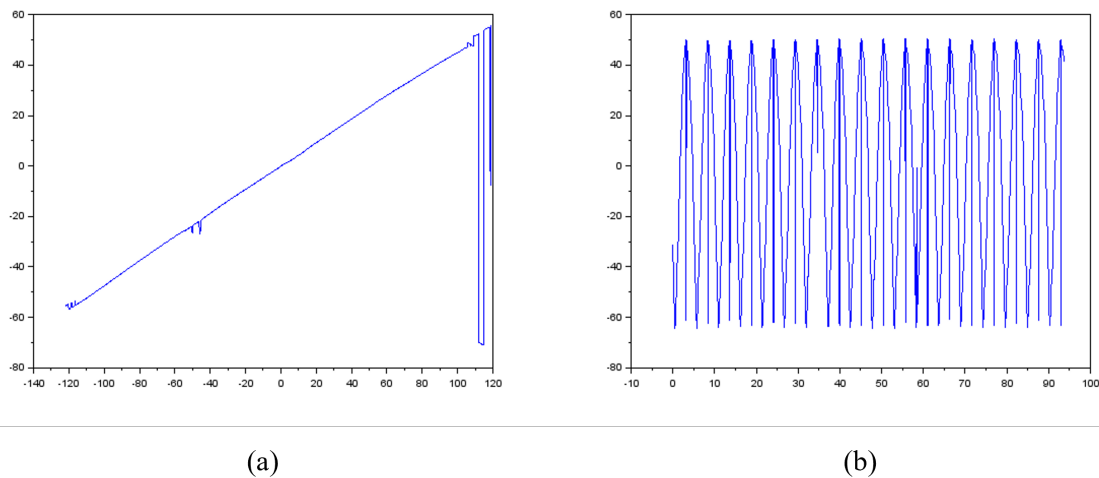
- À l'ordonnée  $y$  présentant une intensité lumineuse maximale (figure 3.10), lorsqu'on utilise de l'eau claire ;
- À l'ordonnée  $y$  du passage brusque de l'intensité lumineuse de 0 à 1 (figure 3.11), lorsqu'on en utilise de l'eau colorée.

Le suivi temporel de  $\eta$  pour un  $x$  donnée est obtenu en balayant les séquences d'images. Les figures 3.12 et 3.13 présentent le profil de la surface libre (eau claire et eau colorée



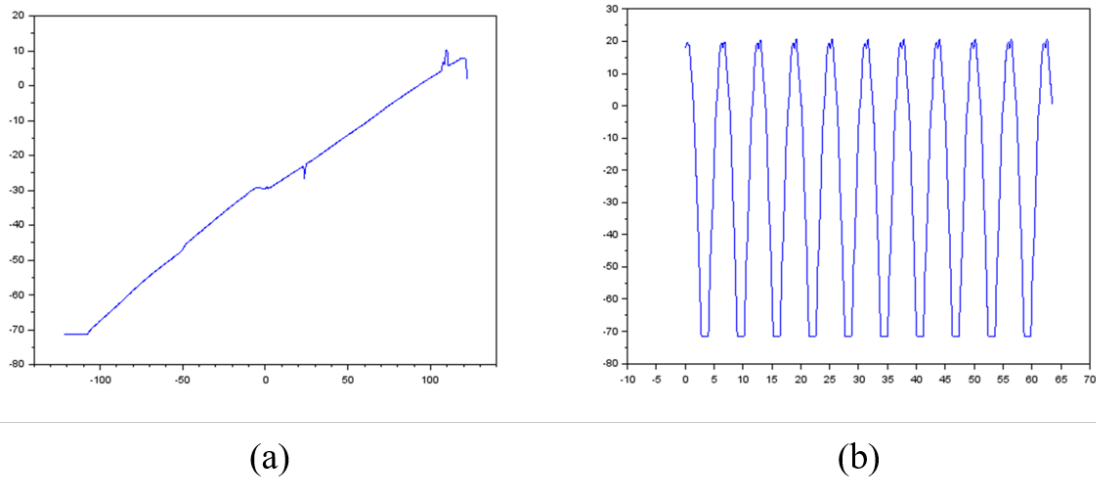
**Figure 3.11** – Cuve remplie avec de l’eau colorée avec du riz : (a) Image brute acquise, (b) Image traitée sur Scilab, (c) Méthode d’extraction : profil d’intensité lumineuse pour une abscisse  $x$  donnée.

respectivement)  $\eta(x)$  à un instant donné ( $t = 4s$ ) et l’évolution temporelle de la surface libre  $\eta(t)$  à une abscisse donnée ( $x = 25mm$  de la paroi droite). La courbe du profil  $\eta(x)$  montre une variation de l’amplitude, avec une pente régulière. Cependant, cette linéarité est ponctuée par des discontinuités marquées à certaines positions, traduisant les parties mal illuminées lors de l’acquisition des images.



**Figure 3.12** – Processus du ballotement de l’eau : (a) Profil de la surface libre à l’instant 4s, (b) Évolution temporelle du ballotement à  $x = 25mm$  de la paroi droite.

Par ailleurs, la courbe de l’évolution temporelle  $\eta(t)$  met en évidence un comportement oscillatoire caractérisé par des variations régulières et périodiques. Elles mettent en évidence la dynamique des vagues avec précision. L’amplitude des oscillations reste constante, mais leur forme présente des pointes abruptes et des descentes rapides. Ces courbes présentent du bruit au niveau de la surface libre. Néanmoins, ce bruit est moindre lorsqu’on utilise de l’eau colorée avec du riz. Les courbes d’évolution temporelle  $\eta(t)$  ont été extraites à 25, 50, 75 et 100 mm de la paroi droite et de la paroi gauche, dans ce manuscrit nous présenterons essentiellement celles extraites à 25 mm de la paroi droite.



**Figure 3.13** – Processus du ballottage de l'eau colorée : (a) Profil de la surface libre à l'instant 4.3s, (b) Évolution temporelle du ballottage à  $x = 25mm$  de la paroi droite.

### 3.3 Plan des expériences

Dans cette section, nous avons décrit le plan d'expériences suivi pour étudier le phénomène de ballottage dans une cuve soumise au mouvement de tangage. L'objectif de cette expérience est de constituer une base de données expérimentales et les comparer avec les résultats de simulations numériques, qui étudient l'influence des paramètres clés sur le comportement dynamiques de la surface libre.

Les expériences réalisées visent à analyser l'influence des caractéristiques de tangage et le taux de remplissage de la cuve (30% et 50%) sur l'amplitude et la fréquence des oscillations du fluide en réponse à l'excitation.

#### 3.3.1 Configuration expérimentale

Les paramètres de réglage du dispositif expérimental sont le débattement  $B_i$  (relation 3.22 et ) et la fréquence angulaire  $\omega_i$  (vitesse de rotation du moteur) (relation 3.23). On les choisit en fonction des grandeurs caractéristiques de la houle que nous souhaitons simuler, à savoir,  $h_{cc}$  la hauteur crête à creux,  $\lambda$  la longueur d'onde,  $T_p$  et  $f$  la période et la fréquence caractéristiques de la houle. Le tableau 3.2 montre les paramètres qui influencent sur la vitesse de rotation du moteur.

$$B_i = \frac{2 h_{cc} L_f}{\lambda} \tag{3.22}$$

$$\omega_i = \frac{2 \pi}{T_p} \tag{3.23}$$

#### 3.3.2 Procédure des essais

La procédure pour préparer les essais suit les étapes suivantes :

TABLE 3.2 – Paramètres de réglage du dispositif expérimental et grandeurs caractéristiques de la houle correspondantes. La distance  $a_i$  est la distance entre le centre de la roue et le point de montage du bras (2)  $A_i$ ; le débattement  $B_i$  dépend également du choix de  $A_i$ .

| Point de montage ( $A_i$ ) | $h_{cc}[m]$ | $\lambda[m]$ | $T_p[s]$ | $f [Hz]$ | $\omega_i [rad/s]$ | $B_i [mm]$ | $a_i [mm]$ |
|----------------------------|-------------|--------------|----------|----------|--------------------|------------|------------|
| $A_1$                      | 15          | 56           | 6        | 0,167    | 1,047              | 133,9      | 6,7        |
| $A_2$                      | 10          | 39           | 5        | 0,200    | 1,256              | 128,2      | 6,41       |
| $A_3$                      | 10          | 56           | 6        | 0,167    | 1,047              | 89,3       | 4,46       |
| $A_4$                      | 10          | 100          | 8        | 0,125    | 0,785              | 50,0       | 2,5        |
| $A_5$                      | 10          | 123          | 9        | 0,111    | 0,707              | 40,7       | 2,03       |
| $A_6$                      | 10          | 156          | 10       | 0,091    | 0,630              | 32,1       | 1,6        |

Remplissage de la cuve : La cuve est remplie avec de l'eau claire / l'eau de riz, jusqu'un niveau spécifique (30% soit un volume de 1.8L ou 50 % soit 3 L). La variation du taux de remplissage de la cuve permettra d'examiner son influence sur le comportement du fluide. Une fois la cuve remplie, nous vérifions que le fluide est exempt de bulles d'air.

Mise en place et réglage de la caméra : La caméra est positionnée face à la cuve, embarquée sur le rail relié au plateau supportant la cuve. Pour mieux suivre l'évolution de la surface libre du liquide, son positionnement vertical est aligné avec le remplissage de la cuve, de manière à offrir une vue optimale sur la surface libre. La caméra (pilotée par le logiciel Pylon est reliée au PC d'acquisition. L'ouverture et la netteté de l'objectif doivent-être réglés.

Prise des images de calibration : Pour un taux de remplissage donné, nous avons enregistré des images avec la mire (grille de calibration) afin de faire la calibration ultérieurement.

Réglage de la tension d'alimentation du moteur : Le mouvement d'excitation est généré grâce au moteur électrique, dont la vitesse de rotation varie en fonction du réglage de la tension d'alimentation. Cette vitesse de rotation est régulièrement contrôlée à l'aide d'un Tachymètre.

Paramétrage du logiciel d'acquisition d'images : La fréquence d'acquisition des images peut être réglée entre 25 et 60 *images/seconde*.

Une fois tous les réglages effectués et le système d'excitation allumé, les essais peuvent commencer. Le moteur fait tourner la roue, en produisant un mouvement de va-et-vient de la cuve. En parallèle, la caméra enregistre les mouvements oscillatoires de la surface libre du liquide. La durée de chaque essai peut varier entre 5 et 20 minutes, en prenant en compte la mise en place des conditions expérimentales (changement de la position, réajustement de la tension d'alimentation du moteur et le contrôle avec le tachymètre) et l'acquisition d'une séquence d'images. Nous avons réalisé des séquences courtes, par exemple une acquisition de 60 secondes présentant six cycles. Des séquences longues de 5 minutes ont également été faites. En parallèle nous avons fait un suivi, de contrôle, de déplacement vertical du bras (2). Nous avons ainsi vérifié la synchronisation entre le mouvement du système mécanique et la réponse physique de la surface libre. La configuration d'étude nommée  $A_2$  présente la période la plus courte, soit  $T_p = 5s$ . Sur une durée de 5 minutes on a 60 cycles. Avec 25 images par seconde on a aux alentours de 125 images par cycle. Sur ce type de signal nous appliquerons une transformée de Fourier afin de déterminer la fréquence de  $\eta(t)$  pour les divers points  $x$  d'extraction de données.

Chaque configuration est répétée plusieurs fois assurer la fiabilité des résultats. Le tableau 3.3 montre les différents configurations et les essais effectués pour chacune.

TABLE 3.3 – Tableau récapitulatif des essais effectués pour chaque configuration : avec  $\tau_r$  est le taux de remplissage,  $\omega_{mi}$  est la vitesse de rotation du moteur mesurée,  $U$  la tension d'alimentation et  $N$  le nombre d'essais effectués

| Point de montage ( $A_i$ ) | Fluide      | $\tau_r$ | $\omega_i[rad/s]$ | $\omega_{mi}[rad/s]$ | U [V]     | N |
|----------------------------|-------------|----------|-------------------|----------------------|-----------|---|
| ( $A_1$ )                  | Eau claire  | 50%      | 1.047             | 1.037-1.047          | 13.1-13.5 | 3 |
| ( $A_2$ )                  |             |          | 1.256             | 1.256-1.267          | 15.3-15.9 | 4 |
| ( $A_3$ )                  |             |          | 1.047             | 1.026-1.057          | 12.6-13.5 | 3 |
| ( $A_4$ )                  |             |          | 0.785             | 0.785-0.796          | 9.6-10.5  | 3 |
| ( $A_5$ )                  |             |          | 0.707             | 0.670-0.712          | 8.5-9.8   | 5 |
| ( $A_6$ )                  |             |          | 0.630             | 0.628-0.639          | 7.5-8.1   | 3 |
| ( $A_1$ )                  | Eau claire  | 30%      | 1.047             | 1.037-1.047          | 13.1-13.5 | 3 |
| ( $A_2$ )                  |             |          | 1.256             | 1.256-1.267          | 15.3-15.9 | 2 |
| ( $A_3$ )                  |             |          | 1.047             | 1.026-1.057          | 12.6-13.5 | 4 |
| ( $A_4$ )                  |             |          | 0.785             | 0.785-0.796          | 9.6-10.5  | 2 |
| ( $A_5$ )                  |             |          | 0.707             | 0.670-0.712          | 8.5-9.8   | 3 |
| ( $A_6$ )                  |             |          | 0.630             | 0.628-0.639          | 7.5-8.1   | 2 |
| ( $A_1$ )                  | Eau colorée | 50%      | 1.047             | 1.037-1.047          | 13.1-13.5 | 6 |
| ( $A_2$ )                  |             |          | 1.256             | 1.256-1.267          | 15.3-15.9 | 6 |
| ( $A_3$ )                  |             |          | 1.047             | 1.026-1.057          | 12.6-13.5 | 6 |
| ( $A_4$ )                  |             |          | 0.785             | 0.785-0.796          | 9.6-10.5  | 6 |
| ( $A_5$ )                  |             |          | 0.707             | 0.670-0.712          | 8.5-9.8   | 6 |
| ( $A_6$ )                  |             |          | 0.630             | 0.628-0.639          | 7.5-8.1   | 6 |
| ( $A_1$ )                  | Eau colorée | 30%      | 1.047             | 1.037-1.047          | 13.1-13.5 | 3 |
| ( $A_2$ )                  |             |          | 1.256             | 1.256-1.267          | 15.3-15.9 | 2 |
| ( $A_3$ )                  |             |          | 1.047             | 1.026-1.057          | 12.6-13.5 | 2 |
| ( $A_4$ )                  |             |          | 0.785             | 0.785-0.796          | 9.6-10.5  | 2 |
| ( $A_5$ )                  |             |          | 0.707             | 0.670-0.712          | 8.5-9.8   | 3 |
| ( $A_6$ )                  |             |          | 0.630             | 0.628-0.639          | 7.5-8.1   | 2 |

Après chaque série d'essais, les images collectées sont traitées et analysées pour extraire l'évolution temporelle des oscillations du fluide. Les résultats obtenus seront ensuite comparés aux résultats issus des simulations numériques pour vérifier leurs cohérence. Ils seront présentés dans le chapitre 4.

### 3.4 Bilan

Dans ce chapitre, nous avons mis en place un dispositif expérimental sur le ballonnement dans une cuve en tangage. Nous avons fourni une description du dispositif expérimental, celle de la mise en mouvement du système mécanique ainsi qu'une description analytique du mouvement. Une validation du mouvement du bras du système bielle manivelle et l'évolution de l'angle d'inclinaison est ainsi faite. Ensuite, nous avons expliqué comment les images acquises sont traitées et les données expérimentales du mouvement et de la surface libre sont extraites. À la fin du chapitre, nous avons détaillé le plan des expériences, les paramètres essentiels qui influencent la fréquence d'excitation et la procédure des essais effectués.

---

Modèle numérique du ballottement avec IFS et validation

---

## Résumé

Ce chapitre est consacré à la présentation et la validation d'un modèle numérique pour la simulation du ballottement dans un réservoir positionné sur un flotteur sollicité par une houle régulière. Le modèle est associé au référentiel du flotteur et prend en compte les déformations des parois de la cuve. Le premier cas concerne une excitation harmonique horizontal documenté dans la littérature, tandis que le second concerne l'excitation en tangage décrite dans l'expérience du chapitre 3.

## Sommaire

---

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>4.1</b> | <b>Présentation du modèle numérique</b>   | <b>78</b> |
| 4.1.1      | Mise en équation  | 78        |
| 4.1.2      | Couplage CFD-CSD  | 79        |
| <b>4.2</b> | <b>Modélisation numérique d'un réservoir soumis à une excitation horizontale harmonique</b>   | <b>79</b> |
| 4.2.1      | Cas du ballottement linéaire  | 80        |
| 4.2.2      | Cas du ballottement non linéaire  | 81        |
| <b>4.3</b> | <b>Modélisation du ballottement dans un réservoir soumis à un mouvement de tangage</b>  | <b>81</b> |
| 4.3.1      | Confrontation expérience-modèle numérique   | 83        |
| 4.3.2      | Comparaison entre le cas d'un réservoir soumis à une force d'entraînement due au mouvement de tangage et aux effets gravitationnels et le cas d'un réservoir soumis aux effets gravitationnels uniquement | 92        |
| <b>4.4</b> | <b>Bilan</b>  | <b>94</b> |

---

## 4.1 Présentation du modèle numérique

### 4.1.1 Mise en équation

Cette approche utilise les équations de Navier-Stokes pour un écoulement diphasique en formulation ALE (équation 4.1) [77, 137] et l'équation d'élasticité pour décrire la déformation de la structure (équation 4.2). On se place dans le référentiel associé au réservoir. Ainsi, l'excitation est intégrée aux équations par un terme source générique  $\vec{S}$  (force volumique).

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{u} &= 0 \\ \rho_f \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_f ((\vec{u} - \vec{w}) \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} &= -\vec{\nabla} P + \mu_f \Delta \vec{u} + \vec{S}_f \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\rho_s \frac{\partial^2 \vec{\xi}}{\partial t^2} = \vec{\nabla} \cdot \vec{\sigma}_s + \vec{S}_s \quad (4.2)$$

Où  $\rho_f$  et  $\rho_s$  sont la masse volumique du fluide et du solide,  $\vec{u}$  et  $\vec{w}$  sont respectivement les composantes de la vitesse du fluide et du maillage,  $P$  est la pression du fluide,  $\mu_f$  est la viscosité cinématique des deux phases (air et liquide),  $\sigma_s$  est le tenseur des contraintes dans le solide, et  $\vec{\xi}$  est la vitesse de déplacement des solides de la structure.

La méthode 'Volume Of Fluide' (VOF) est utilisée pour modéliser l'interface air-liquide. La fraction volumique  $\psi$  est utilisée pour indiquer la proportion de volume occupé par le fluide dans une cellule spécifique. Elle varie entre 0 et 1 ( $0 < \psi < 1$ ). Elle est advectée par le champs de vitesse  $\vec{u}_r$ , selon l'équation 4.3. Cela permet de limiter la diffusion de la surface libre.

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{u} \psi + \vec{\nabla} \cdot \vec{u}_r (\psi (1 - \psi)) = 0 \quad (4.3)$$

$\vec{u}_r = \vec{u}_l - \vec{u}_g$  est la vitesse relative entre le liquide et le gaz.  $\vec{u}_l$  et  $\vec{u}_g$  sont respectivement les vitesses du liquide et du gaz. Ce terme est introduit pour limiter la diffusion de l'interface air-liquide.

Les conditions initiales et aux limites du fluide et de la structure sont fournies par les relations données par l'équation (4.4), où  $\vec{n}$  est le vecteur normal orienté vers l'extérieur, à l'interface  $\Gamma_{fs}$ .

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\partial \vec{u}}{\partial \vec{n}} = 0 & \text{sur } \Gamma_{atm} \\ \vec{u} = 0 & \text{sur } \Gamma_b \\ \vec{u}(0) = 0 & \text{sur } \Omega_f \\ \vec{\xi} = 0 & \text{sur } \Gamma_{bw} \\ \vec{\xi}(0) = 0 & \text{sur } \Omega_s \end{array} \right. \quad (4.4)$$

### 4.1.2 Couplage CFD-CSD

Afin de coupler l'écoulement et les parois déformables nous appliquons les conditions de continuité des vitesses et de la contrainte aux interfaces. Ceci se traduit par les équations 4.5 et 4.6 ci-après :

1. Condition cinématique (continuité des vitesses)

$$\vec{u} = \vec{\xi} \quad \text{sur} \quad \Gamma_{fs} \quad (4.5)$$

2. Condition dynamique (Continuité des contraintes)

$$\sigma_s \cdot \vec{n} = \sigma_f \cdot \vec{n} \quad \text{sur} \quad \Gamma_{fs} \quad (4.6)$$

Le couplage est basé sur la méthode partitionnée itérative. Le code OpenFOAM est utilisé pour résoudre les mouvements du fluide et le code FEniCS est utilisé pour résoudre le mouvement des parois du réservoir. Le mouvement du fluide induit des pressions et des déplacements sur les parois et vice-versa. Au sein d'un même pas de temps, plusieurs itérations sont réalisées jusqu'à atteindre le critère de convergence. L'interface preCICE assure l'échange de données entre les deux codes et assure le processus itératif.

## 4.2 Modélisation numérique d'un réservoir soumis à une excitation horizontale harmonique

Ici, nous avons considéré un réservoir 2D rigide, soumis à une excitation harmonique horizontale (sinusoïdale)  $A_e$  (cf. figure 4.1). Les valeurs caractéristiques du liquide, du réservoir et les dimensions utilisées sont regroupées dans le tableau 4.1.

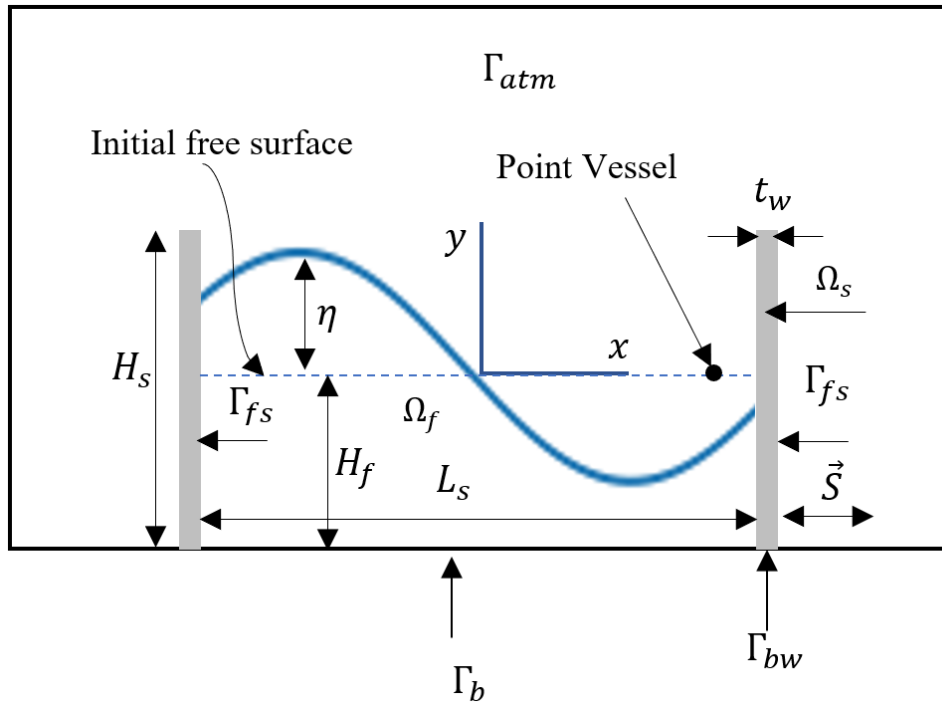
TABLE 4.1 – Paramètres utilisés pour la validation sous une excitation horizontale

| Grandeur                    | Symbole  | Valeur                         |
|-----------------------------|----------|--------------------------------|
| <b>Fluide</b>               |          |                                |
| Masse volumique du fluide   | $\rho_f$ | 1000 $kg/m^3$                  |
| Viscosité cinématique       | $\nu_f$  | 1,003.10 <sup>-6</sup> $m^2/s$ |
| Hauteur de remplissage      | $H_f$    | 150 $mm$                       |
| <b>Solide</b>               |          |                                |
| Masse volumique du matériau | $\rho_s$ | 1420 $kg/m^3$                  |
| Module de Young             | $E$      | 15.10 <sup>20</sup> $MPa$      |
| Longueur du réservoir       | $L_s$    | 570 $mm$                       |
| Hauteur de la paroi         | $H_s$    | 300 $mm$                       |
| Épaisseur de la paroi       | $t_w$    | 20 $mm$                        |

Cette excitation est intégrée aux termes sources des équations pour le fluide et la structure par les relations 4.7 et 4.8.

$$\vec{S}_f = \rho_f (A_e \vec{x} - g \vec{y}) \quad (4.7)$$

$$\vec{S}_s = \rho_s (A_e \vec{x} - g \vec{y}) \quad (4.8)$$



**Figure 4.1** – Schéma représentant le cas du ballonnement dans un réservoir soumis à une excitation harmonique

L'accélération de l'excitation  $A_e$  est donnée par l'équation 4.9, où  $\omega_e$  est la fréquence angulaire du signal, et  $b$  est l'amplitude de l'excitation.

$$A_e = b\omega_e^2 \sin(\omega_e t) \quad (4.9)$$

La  $n^{\text{ème}}$  fréquence propre du liquide est déterminée par l'équation (4.10), donnée par *Faltisen and Timokha* [91].

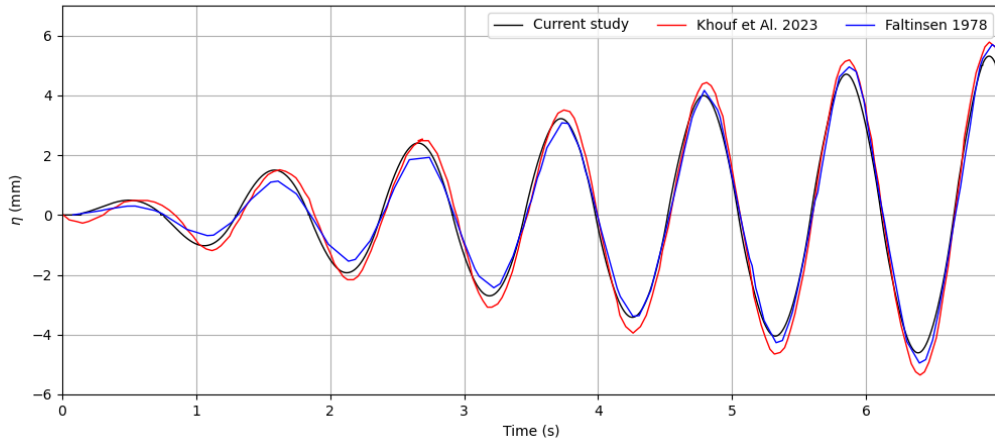
$$\omega_n = \sqrt{g \frac{n\pi}{L_s} \tanh\left(\frac{n\pi}{L_s} H_f\right)} \quad (4.10)$$

Dans ce chapitre, la plus basse fréquence propre est  $\omega_1 = 6,0578 \text{ rad/s}$  ( $f_1 = 0,964 \text{ Hz}$ ). Elle est calculée en remplaçant  $n = 1$  dans l'équation 4.10 et en prenant  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

### 4.2.1 Cas du ballonnement linéaire

Dans un premier temps le cas du ballonnement linéaire est considéré. Un ballonnement linéaire implique une faible amplitude d'oscillation du fluide. Une simulation numérique est réalisée pour le cas d'un réservoir soumis à une excitation harmonique de fréquence  $\omega_e = 0,95\omega_1 = 5,755 \text{ rad/s}$  ( $f_e = 0,916 \text{ Hz}$ ) et d'amplitude de déplacement  $b = 0,4 \text{ mm}$  (équation 4.9).

La figure 4.2 montre l'évolution temporelle de la surface libre pendant quelques secondes, à  $20 \text{ mm}$  de la paroi droite. Le résultat obtenu avec le modèle actuel est comparé à la solution analytique issue de *Faltinsen* [89] et les résultats numériques issus de *Khouf et al.* [64]. Il est en bon accord avec les résultats cités précédemment.



**Figure 4.2** – Oscillations linéaires de la surface libre pour  $\omega_e = 0,95 \omega_1$  et  $b = 0,4 \text{ mm}$ . Comparaison entre le modèle numérique actuel, le modèle numérique antérieur [64] et la solution analytique [89]

#### 4.2.2 Cas du ballottement non linéaire

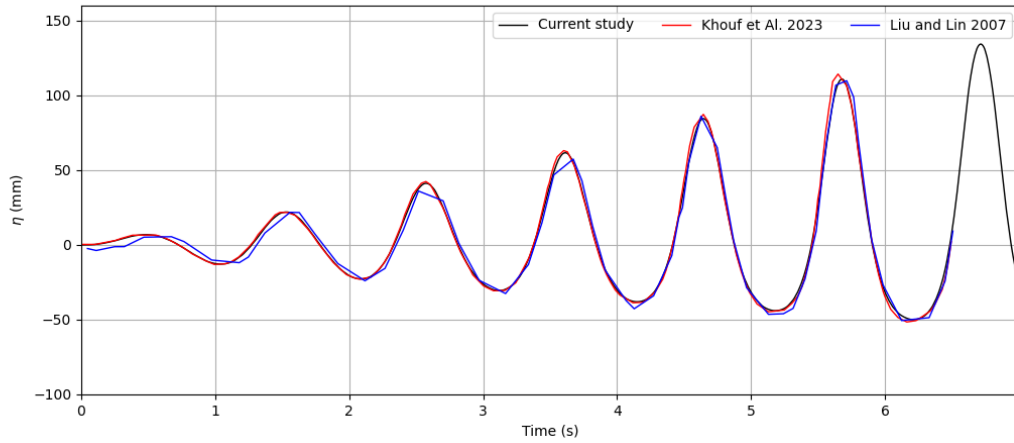
On considère le cas du ballottement non linéaire, avec les paramètres utilisés dans la section 4.2.1 (cf. tableau 4.1). La fréquence de l'excitation et l'amplitude de l'excitation sont respectivement  $\omega_e = \omega_1 = 6,0578 \text{ rad/s}$  et  $b = 5 \text{ mm}$ . Celles-ci sont issues de *Liu and Lin* [24].

L'évolution temporelle de la surface libre  $\eta$ , à un point situé à  $20 \text{ mm}$  de la paroi de droite, est présentée dans la figure (4.3). A l'instant initial ( $t = 0 \text{ s}$ ), cette variable est nulle ( $\eta = 0$ ). La figure présente une comparaison des élévations de la surface libre entre les résultats numériques (modèle actuel), ceux de *Khouf et al.* [64] et les données expérimentales issues de *Liu and Lin* [24]. Nos résultats sont en bon accord avec les résultats de *Khouf et al.* [64] et ceux de *Liu and Lin* [24].

La même approche est utilisée par *Kim et al.* [63] pour examiner le cas d'un réservoir flexible avec un coefficient de Young  $E = 15 \text{ MPa}$ . Les résultats ont été comparés aux résultats numériques de *Khouf et al.*, en montrant un bon accord.

### 4.3 Modélisation du ballottement dans un réservoir soumis à un mouvement de tangage

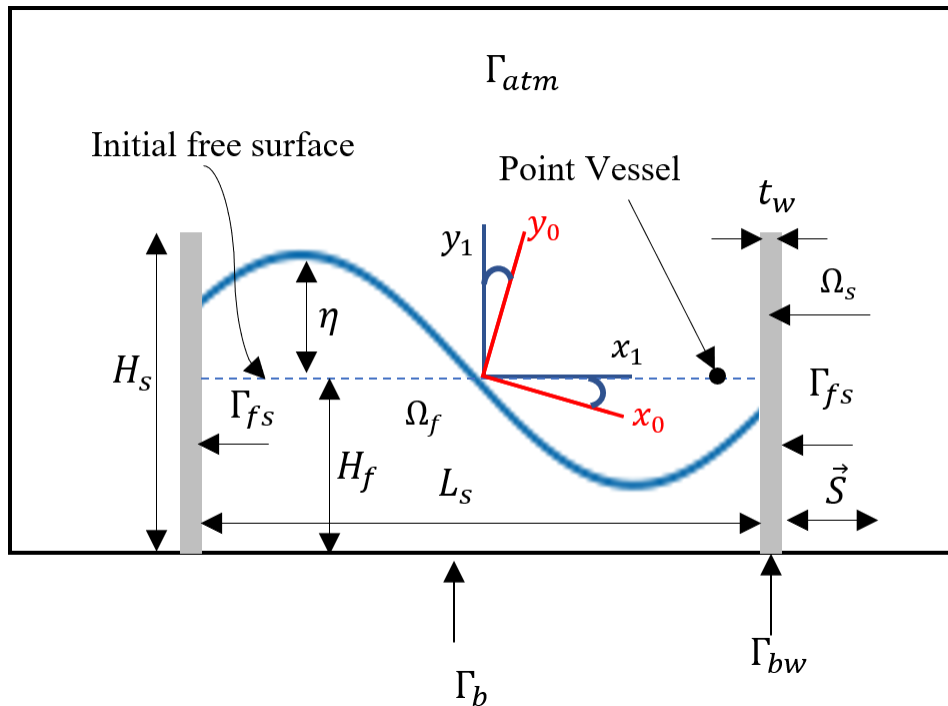
Lorsque le réservoir flotte à la surface d'un liquide soumis à la houle, le ballottement à l'intérieur du réservoir devient plus complexe sous l'interaction entre les oscillations du fluide et les mouvements du réservoir lui-même, en plus des effets gravitationnels et les effets des vagues. Cette interaction est particulièrement importante dans les réservoirs flottants, où le mouvement du fluide dans le réservoir influence de manière directe la stabilité du flotteur. Pour analyser la combinaison des phénomènes de ballottement et de flottaison, un modèle simplifié est considéré. Le modèle considéré repose sur les effets gravitationnel et rotationnel sur le réservoir et sur le liquide contenu à l'intérieur de celui-ci. Pour ce faire, un réservoir bidimensionnel rectangulaire rigide est considéré. Il est caractérisé par une longueur  $L_s = 250 \text{ mm}$ , une hauteur  $H_s = 150 \text{ mm}$  et une épaisseur de



**Figure 4.3** – Oscillations non linéaire de la surface libre  $\omega_e = \omega_1$  et  $b = 5 \text{ mm}$

paroi  $t_w = 10 \text{ mm}$ . Sa masse volumique vaut  $\rho_s = 1200 \text{ kg/m}^3$ , et il possède un module de Young de  $E = 3300 \text{ MPa}$ .

Le schéma du problème présenté dans ce chapitre est illustré dans la figure 4.4 avec toutes les notations. Les frontières  $\Gamma_{atm}$ ,  $\Gamma_{fs}$ ,  $\Gamma_b$  et  $\Gamma_{bw}$  représentent respectivement : l'atmosphère, l'interface fluide-structure, le fond du réservoir, et le fond des parois supposé fixé à son support mobile dans le repère  $R_0$  et fixe dans le repère  $R_1$  associé à la cuve.  $H_r$ ,  $\Omega_s$ ,  $\Omega_f$  et  $\eta$  sont respectivement la hauteur de remplissage, le domaine solide, le domaine fluide et l'élévation du liquide par rapport à la hauteur initiale. Sur le schéma 4.4, le repère 1 est lié au réservoir. Le repère 0 est lié au référentiel Galiléen.



**Figure 4.4** – Schéma général du réservoir avec les notations utilisées pour les domaines et les frontières

Le réservoir ici est soumis à un mouvement de tangage défini en tant qu'une force volumique  $\vec{S}$  donnée par les équations 4.11 et 4.12. Dans notre étude, les équations sont écrites dans le référentiel du réservoir ( $R_1$ ), ce qui nous a conduit à intégrer la gravité modifiée notée  $\vec{g}_s$ .  $\vec{\gamma}_e$  est l'accélération d'entraînement due à la rotation induite par la houle. Elle est donnée par l'équation 4.13.

$$\vec{S}_f = \rho_f (\vec{\gamma}_e + \vec{g}_s) \quad (4.11)$$

$$\vec{S}_s = \rho_s (\vec{\gamma}_e + \vec{g}_s) \quad (4.12)$$

$$\vec{\gamma}_e = \vec{\gamma}_{o(R_1/R_0)} + \frac{d\vec{\Omega}_{(R_1/R_0)}}{dt} \wedge \vec{OM} + \vec{\Omega}_{(R_1/R_0)} \wedge (\vec{\Omega}_{(R_1/R_0)} \wedge \vec{OM}) \quad (4.13)$$

La gravité modifiée  $\vec{g}_s$  peut être écrite comme suit :

$$\vec{g}_s = -(g \sin(\alpha) \vec{x}_1 + g \cos(\alpha) \vec{y}_1) = -g \vec{y}_0 \quad (4.14)$$

Le mouvement de pilonnement n'est pas considéré dans ce cas, aussi  $\vec{\gamma}_{o(R_1/R_0)} = \vec{0}$ .  $\vec{\Omega}_{(R_1/R_0)} = \dot{\alpha} \vec{z}$  est la rotation du repère ( $O \vec{x}_0 \vec{y}_0$ ) vers le référentiel ( $O \vec{x}_1 \vec{y}_1$ ) et  $\vec{OM}$  est le vecteur position entre l'origine  $O$  et le point  $M$  ( $\vec{OM} = x \vec{x}_1 + y \vec{y}_1$ ). Le point  $M$  est fixe dans le référentiel ( $O \vec{x}_1 \vec{y}_1$ ).

Le terme source  $\vec{S}$  s'écrit en fonction de la gravité modifiée  $\vec{g}_s$  et l'effet de la rotation  $\gamma_e$  pour le fluide (équation 4.15) et la structure (équation 4.16) comme suit :

$$\vec{S}_f = \rho_f \left( -(\ddot{\alpha} y + \dot{\alpha}^2 x + g \sin(\alpha)) \vec{x}_1 + (\ddot{\alpha} x - \dot{\alpha}^2 y - g \cos(\alpha)) \vec{y}_1 \right) \quad (4.15)$$

$$\vec{S}_s = \rho_s \left( -(\ddot{\alpha} y + \dot{\alpha}^2 x + g \sin(\alpha)) \vec{x}_1 + (\ddot{\alpha} x - \dot{\alpha}^2 y - g \cos(\alpha)) \vec{y}_1 \right) \quad (4.16)$$

L'angle de rotation  $\alpha$ , la vitesse angulaire  $\dot{\alpha}$  et l'accélération angulaire  $\ddot{\alpha}$  sont présentés dans le chapitre 3 dans la section 3.1.2 (cf. équations 3.16, 3.19 et 3.20).

### 4.3.1 Confrontation expérience-modèle numérique

Dans cette section, nous effectuons une comparaison du modèle numérique développé pour étudier le comportement dynamique d'un réservoir soumis à une excitation de tangage. La validation est faite, en comparant les résultats numériques obtenus avec les données expérimentales. L'objectif est de vérifier la fiabilité et la précision de ce modèle par rapport aux conditions expérimentales contrôlées.

Les tests expérimentaux ont été réalisés sur un modèle de réservoir réduit (cf Chapitre 3). Le réservoir conçu est partiellement rempli d'un fluide ayant une masse volumique de  $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$ . Le système mécanique est alimenté par un moteur électrique qui impose une vitesse de rotation contrôlée qui génère ainsi une oscillation périodique de l'angle d'inclinaison  $\alpha(t)$  du réservoir. Cette oscillation est caractérisée par une période  $T_p$  et une

fréquence d'oscillation  $f$ , qui sont ajustées en fonction des conditions et des paramètres (cf. table 4.2 et 3.2). Les données expérimentales ont été enregistrées via une caméra pour mesurer l'amplitude des oscillations de la surface libre.

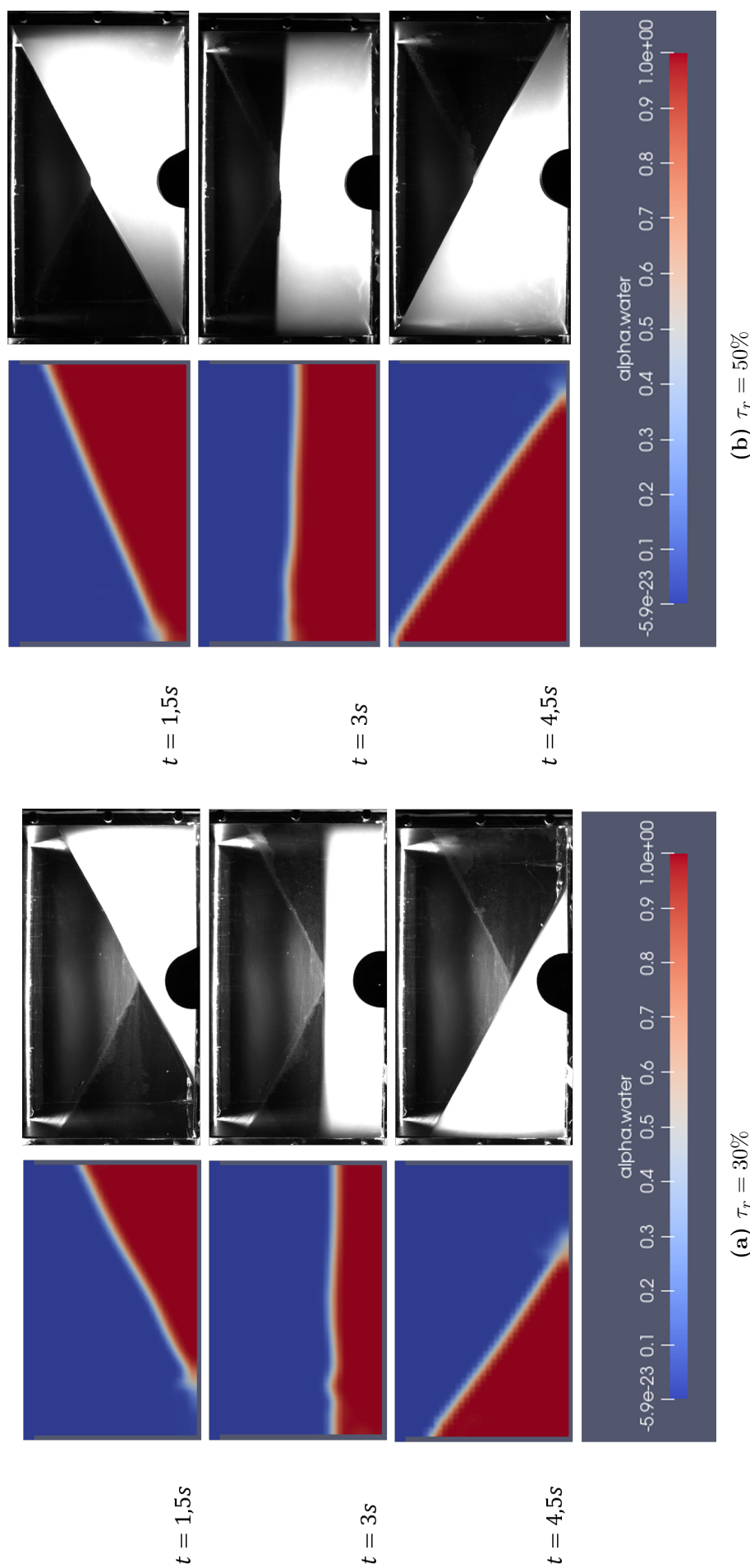
TABLE 4.2 – Caractérisation de chaque cas étudié

| Point de montage (i) | $T_p$ [s] | $\omega_i$ [rad/s] | $f$ [Hz] |
|----------------------|-----------|--------------------|----------|
| 1                    | 6         | 1.047              | 0.167    |
| 2                    | 5         | 1.256              | 0.200    |
| 3                    | 6         | 1.047              | 0.167    |
| 4                    | 8         | 0.785              | 0.125    |
| 5                    | 9         | 0.707              | 0.111    |
| 6                    | 10        | 0.630              | 0.091    |

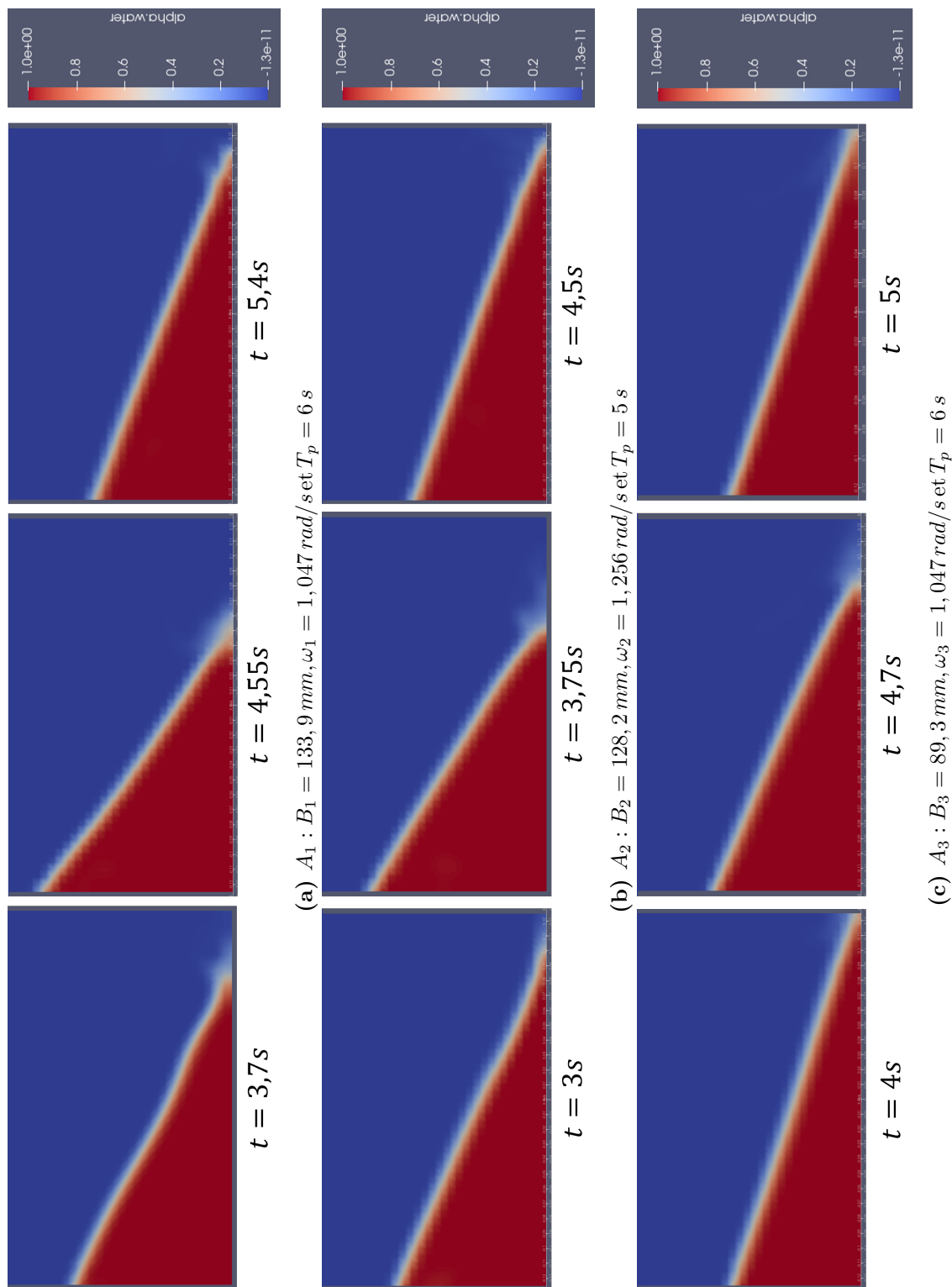
Dans cette section, nous avons choisi quatre configurations sur les six présentées en chapitre 3 pour réaliser la comparaison entre les données expérimentales et les résultats numériques. La première configuration concerne le plus grand débattement  $B_1 = 133,5 \text{ mm}$ , avec une vitesse de rotation du moteur de  $\omega_1 = 1,047 \text{ rad/s}$ . La deuxième configuration concerne une vitesse de rotation la plus élevée  $\omega_2 = 1,256 \text{ rad/s}$ , avec un débattement moins grand  $B_1 = 128,2 \text{ mm}$ . La troisième configuration concerne la même vitesse que la première configuration  $\omega_3 = \omega_1 = 1,047 \text{ rad/s}$ , avec un débattement différent  $B_3 = 89,3 \text{ mm}$ . La dernière configuration concerne une vitesse de rotation la plus basse  $\omega_6 = 0,53 \text{ rad/s}$  pour le plus petit débattement  $B_6 = 32,1 \text{ mm}$ .

Des simulations numériques sont réalisées pour les cas de configurations  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ , et  $A_6$  avec deux taux de remplissage de 30% (soit  $H_f = 45 \text{ mm}$ ) et 50% (soit  $H_f = 75 \text{ mm}$ ), durant 60 s pour chaque cas. La figure 4.5 montre les positions de la surface libre à l'intérieur de la cuve dans l'expérience et dans les simulations numériques pour le cas du plus grand débattement  $A_1$  (soit  $B_1 = 133,5 \text{ mm}$ ). Dans ce cas et les autres cas (voir l'annexe B), la vague à l'intérieur de la cuve est générée à partir du milieu de la cuve au niveau de la surface libre, jusqu'à atteindre une amplitude maximale à droite et une amplitude minimale à gauche, à l'instant  $t = \frac{T_p}{4}$ . Puis, elle revient à son état initial à l'instant  $t = \frac{T_p}{2}$  et repart vers la gauche jusqu'à atteindre à nouveau une amplitude maximale à gauche et minimale à droite vers l'instant  $t = \frac{3T_p}{4}$ .

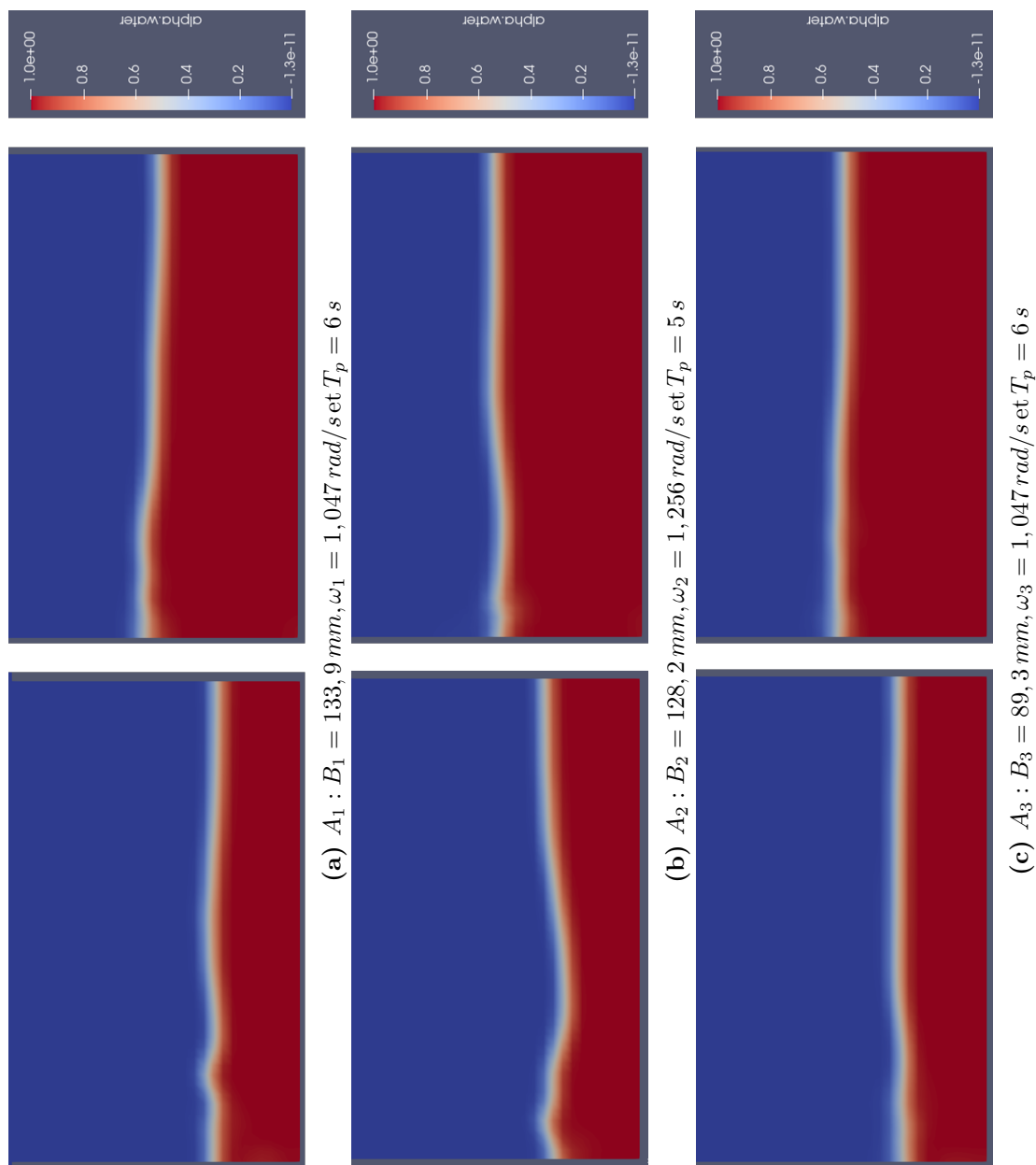
Le comportement de la surface libre est similaire entre les résultats expérimentaux et numériques dans chaque cas d'étude. Dans les deux premiers cas où le taux de remplissage  $\tau_r$  est de 30%, nous observons l'absence de l'eau au fond de la cuve autour des instants  $t = \frac{3T_p}{5}$  et  $t = \frac{9T_p}{10}$ . Ainsi dans le troisième cas ( $A_3$ ) avec le même taux remplissage, autour des instants  $t = \frac{4T_p}{6}$  et  $t = \frac{5T_p}{6}$ . La figure 4.6 montre cette absence d'eau dans les différents cas à 30% de remplissage, à différents instants. Nous observons aussi des perturbations au niveau de la surface libre dans les cas de configurations avec les grands débattements ( $A_1$ ,  $A_2$  et  $A_3$ ). Ces perturbations sont dues aux retours de vagues, comme illustre sur la figure 4.7. Elles se manifestent vers l'instant  $t = \frac{T_p}{2}$  pour chaque cas. Les perturbations deviennent moins importantes, en diminuant le débattement de la cuve.



**Figure 4.5** – Comparaison de contours de fraction volumique instantanés ( $T_p/4$ ,  $T_p/2$  et  $3T_p/4$ ) expérimentaux et numériques du ballotement à l'intérieur de la cuve ( $B = 133,5\text{ mm}$ )



**Figure 4.6** – Les cas particuliers des contours de fraction volumique instantanés numériques du ballotement à l'intérieur de la cuve (cas d'absence de liquide dans la base de la cuve)



**Figure 4.7** – Vibrations des contours de fraction volumique instantanés numériques du ballonnement à l’intérieur de la cuve à l’instant  $t = \frac{T_p}{2}$  : à gauche à 30% de remplissage, à droite à 50% de remplissage

L'évolution temporelle de la surface libre du liquide à  $25\text{ mm}$  de la paroi droite est présentée sur les figures 4.8 et 4.9. Les figures montrent la comparaison entre les données expérimentales et les résultats numériques dans chaque cas d'étude durant  $60\text{ s}$ . Les résultats sont en bon accord ; nous observons une fréquence et une amplitude presque identique entre la simulation et l'expérience pour chaque cas d'étude. Dans le cas de la configuration  $A_1$  à 30% de remplissage (figure 4.8a), nous observons un léger déphasage à partir de l'instant  $t = 41,5\text{ s}$ , impliquant une différence de 3,33%. Ainsi à 50% de remplissage, nous observons un déphasage au début pendant une période et demie ( $9\text{ s}$ ), et vers la fin à partir de l'instant  $t = 4,5\%$ . Nous observons aussi des plateaux au niveau des creux dans les cas de configurations  $A_1$ ,  $A_2$  et  $A_3$  à 30% de remplissage. Cela est révélateur de l'absence de liquide au fond de la cuve durant ces instants. Ceci est également observé expérimentalement (voir figure 4.6). Cela induit des dentelures au niveau des pics.

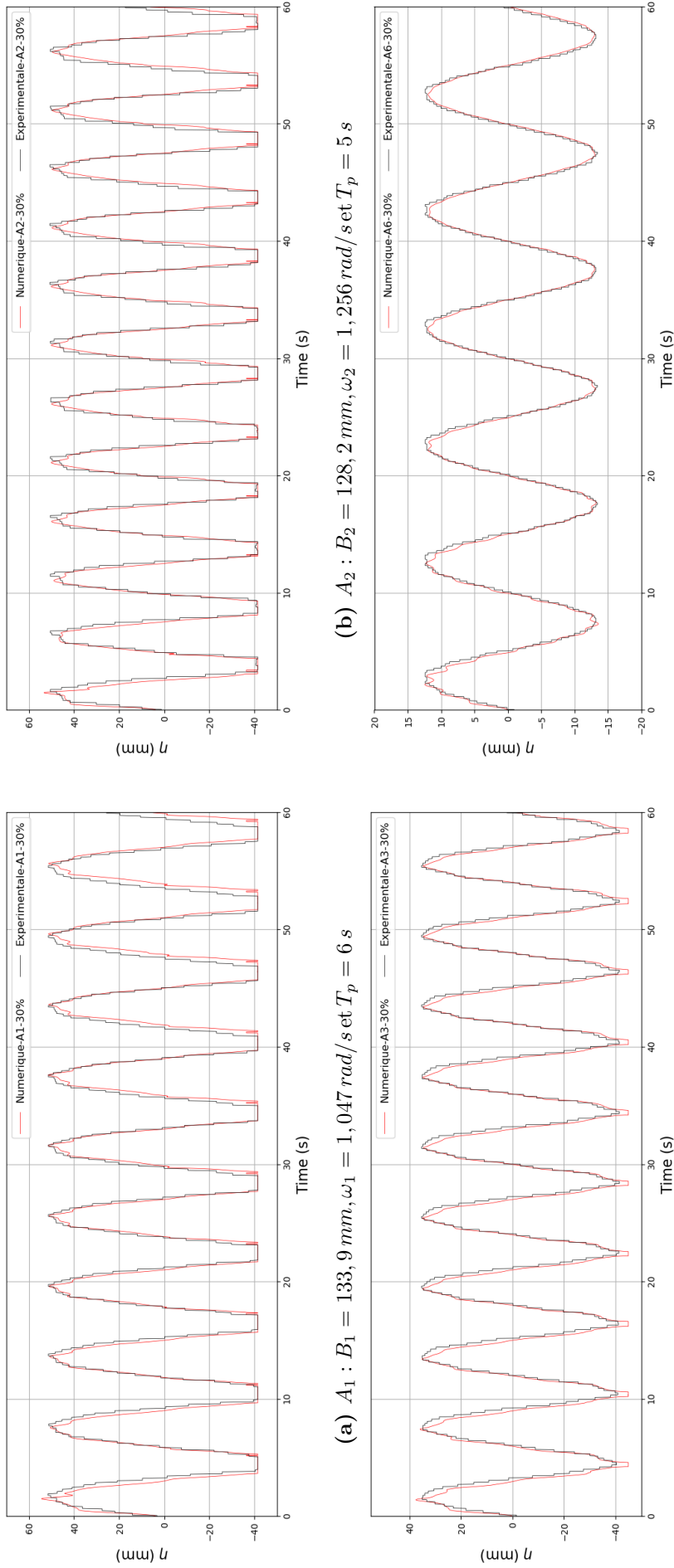
Afin d'étudier l'influence du taux de remplissage et de la vitesse de rotation sur le ballottement, nous avons comparé les résultats numériques de la même configuration avec les différents taux de remplissage, en variant la vitesse de rotation. Pour chaque vitesse de rotation  $\omega_1 = 1,047\text{ rad/s}$  ( $T_p = 6\text{ s}$ ),  $\omega_2 = 1,256\text{ rad/s}$  ( $T_p = 5\text{ s}$ ),  $\omega_3 = 1,047\text{ rad/s}$  ( $T_p = 6\text{ s}$ ) et  $\omega_6 = 0,63\text{ rad/s}$  ( $T_p = 10\text{ s}$ ), les simulations sont réalisées à deux différents taux de remplissage 30% et 50%. La figure 4.10 montre la comparaison des élévations de la surface libre des cas étudiés. Les courbes sont superposées, on observe les mêmes amplitudes tout le long des simulations malgré la variation de remplissage. L'amplitude maximale pour le cas  $A_1$  est de  $52,9\text{ mm}$  à partir du deuxième pic. Pour le deuxième cas  $A_2$ , elle est de  $48\text{ mm}$ . Pour les deux autres cas  $A_3$  et  $A_6$ , l'amplitude maximale est de  $32,9\text{ mm}$  et  $12,2\text{ mm}$  respectivement. On constate que pour un cas rigide la variation de remplissage du réservoir n'a pas d'influence directe sur le ballottement.

En fixant le taux de remplissage de la cuve (30% ou 50%), nous avons comparé les élévations de la surface libre, en variant la vitesse de rotation du moteur ou/et le débattement de la cuve 4.11. Pour les deux premiers cas  $A_1$  et  $A_2$ , où la vitesse est plus élevée dans le cas  $A_2$  ( $\omega_2 = 1,256\text{ rad/s}$  et  $B_2 = 128\text{ mm}$ ) et le débattement est plus grand dans le cas  $A_1$  ( $B_1 = 133,9\text{ mm}$  et  $\omega_1 = 1,047\text{ rad/s}$ ), nous observons sur la figure 4.11a, un déphasage dû à la différence entre les périodes respectives ( $T_p = 6\text{ s}$  avec  $T_p = 5\text{ s}$ ), ainsi qu'une différence en amplitude. Cette différence est attribuée à la différence de vitesse de rotation et de la fréquence d'excitation.

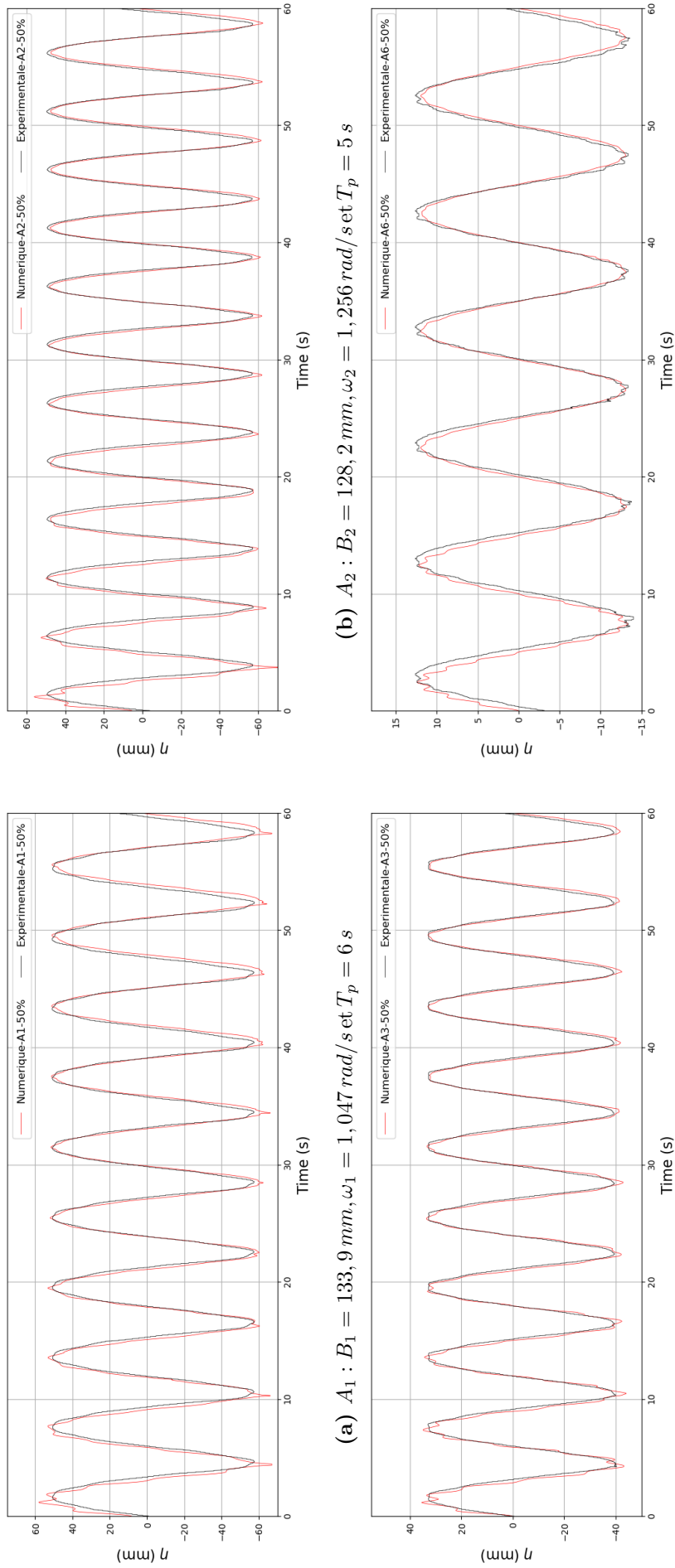
Pour le cas  $A_1$  où la vitesse est moins élevée ( $\omega_1 = 1,047\text{ rad/s}$ ) et le débattement est plus grand ( $B_1 = 133,9\text{ mm}$ ), on observe une amplitude de  $52,9\text{ mm}$ . Cependant, pour le cas  $A_2$ , on observe une amplitude de  $48\text{ mm}$ . Malgré que la vitesse de rotation du moteur est plus élevée ( $\omega_2 = 1,256\text{ rad/s}$ ), la diminution du débattement ( $B_2 = 128,2\text{ mm}$ ) entraîne la diminution de l'amplitude.

En fixant la vitesse de rotation du moteur, et en variant le débattement, nous avons comparé le cas  $A_1$  ( $\omega_1 = 1,047\text{ rad/s}$  et  $B_1 = 133,9\text{ mm}$ ) et le cas  $A_3$  ( $\omega_3 = 1,047\text{ rad/s}$  et  $B_3 = 89,3\text{ mm}$ ). Sur la figure 4.11b, nous observons une grande variation en amplitude ( $52,9\text{ mm}$  pour le cas  $A_1$  et  $32,9\text{ mm}$  pour le cas  $A_3$ ) entre les deux cas. Cela signifie que l'amplitude a augmenté d'environ 60,8% en passant du petit débattement de la cuve au grand.

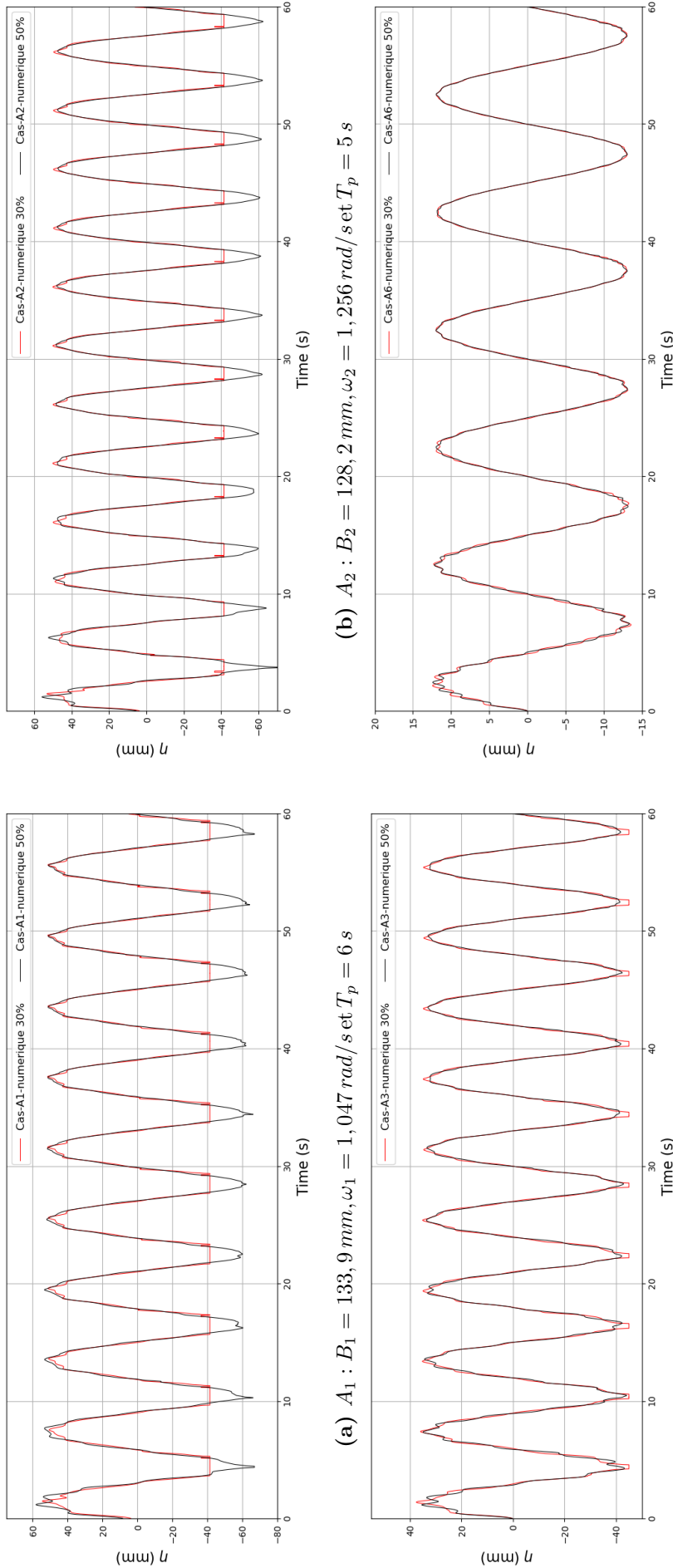
Comparant le cas du plus grand débattement  $A_1$  ( $B_1 = 133,9\text{ mm}$ ) à celui du plus petit débattement  $A_6$  ( $B_6 = 32,1\text{ mm}$ ), ainsi que le cas de la vitesse la plus élevée  $A_2$  ( $\omega_2 = 1,256\text{ rad/s}$ ) à celui de la vitesse la plus basse  $A_6$  ( $\omega_6 = 0,63\text{ rad/s}$ ), nous obtenons les figures 4.11c et 4.11d.



**Figure 4.8** – Évolution temporelle de la surface libre à  $25 \text{ mm}$  de la paroi droite. Comparaison entre les données expérimentales et numériques pour  $\tau_r = 30\%$



**Figure 4.9** – Évolution temporelle de la surface libre à 25 mm de la paroi droite. Comparaison entre les données expérimentales et numériques pour  $\tau_r = 50\%$



**Figure 4.10** – Évolution temporelle de la surface libre à 25 mm de la paroi droite. Comparaison entre les résultats numériques à 30% et 50% de remplissage

Entre chaque comparaison, nous observons un déphasage temporel dû à la différence en période.

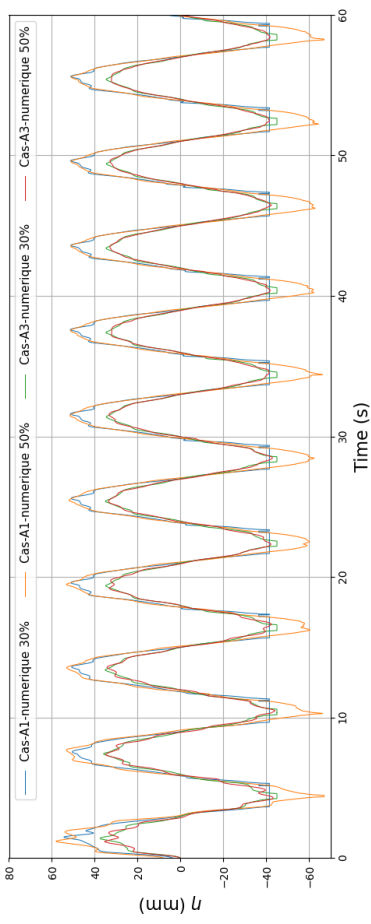
En passant de la vitesse la plus basse à celle la plus élevée, nous observons une augmentation d'amplitude d'environ 293,5%, passant de 12,2 mm à 48 mm. En passant du plus grand débattement à celui le plus petit, nous observons une plus grande variation de l'amplitude (12,2 mm pour le cas  $A_6$  et 52,9 mm pour le cas  $A_1$ ), impliquant une augmentation d'amplitude du cas de configuration  $A_1$  de 333,61% par rapport à le cas de configuration  $A_6$ .

Nous avons choisi ces comparaisons ( $A_1$  et  $A_2$ ,  $A_1$  et  $A_3$ ,  $A_1$  et  $A_6$ , et  $A_2$  et  $A_6$ ), afin d'étudier l'influence des différents paramètres sur le l'amplitude du ballotement à l'intérieur du réservoir. On constate que l'amplitude de ballotement est influencée de manière directe par la vitesse de rotation et les paramètres de la houle, notamment la hauteur crête à creux  $h_{cc}$ .

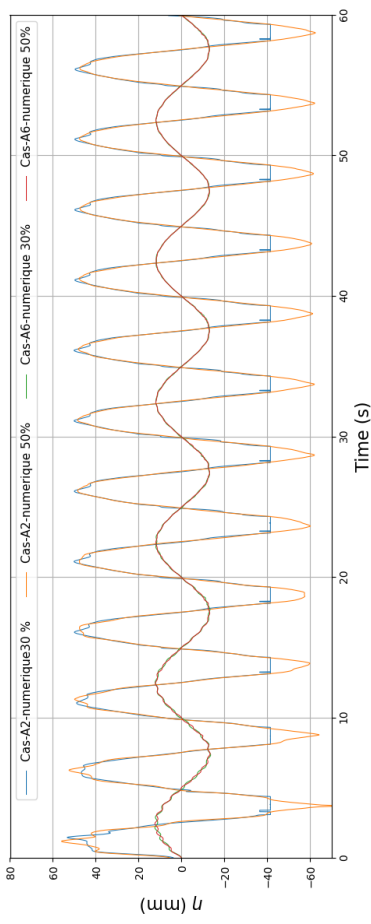
Afin de vérifier la fréquence d'excitation expérimentale, nous avons appliqué une FFT sur l'évolution temporelle de l'élévation de la surface libre. L'annexe A représente deux différents cas avec une faible et une grande fréquence d'excitation.

### 4.3.2 Comparaison entre le cas d'un réservoir soumis à une force d'entraînement due au mouvement de tangage et aux effets gravitationnels et le cas d'un réservoir soumis aux effets gravitationnels uniquement

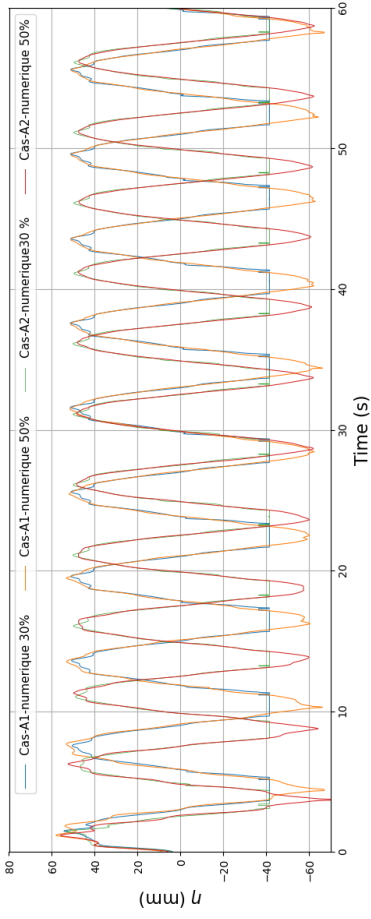
Afin d'étudier l'influence des forces d'entraînement dues au mouvement de tangage et les effets gravitationnels sur le ballotement (équation 4.11), nous avons comparé le cas du réservoir soumis à une excitation due à la force d'entraînement induite par le tangage en plus de la gravité avec le cas du réservoir soumis seulement aux effets gravitationnels. La figure 4.12 montre une comparaison de l'évolution de la surface libre à 25mm de la paroi droite, entre deux cas de mouvement : d'une part, un réservoir soumis uniquement aux effets gravitationnels, et d'autre part, un réservoir soumis à la fois aux effets gravitationnels et à la force d'entraînement. Pour chaque cas de configuration ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  et  $A_4$ ), nous observons une superposition parfaite avec et sans force d'entraînement. Cela, veut dire que l'effet de tangage est négligeable devant les effets gravitationnels. Cette comparaison nous a permis de réaliser un cas simplifié où la force d'entraînement est négligée (chapitre 5).



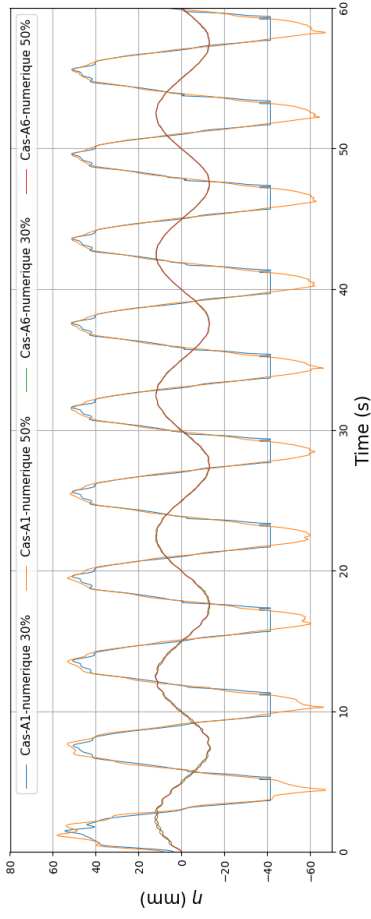
(a)  $A_1 : B_1 = 133,9 \text{ mm}, \omega_1 = 1,047 \text{ rad/s}$  et  $T_p = 6 \text{ s}$  et  $A_3 : B_3 = 89,3 \text{ mm}, \omega_3 = 1,047 \text{ rad/s}$  et  $T_p = 6 \text{ s}$



(b)  $A_2 : B_2 = 128,2 \text{ mm}, \omega_2 = 1,256 \text{ rad/s}$  et  $T_p = 5 \text{ s}$  et  $A_6 : B_6 = 32,1 \text{ mm}, \omega_6 = 0,63 \text{ rad/s}$  et  $T_p = 10 \text{ s}$

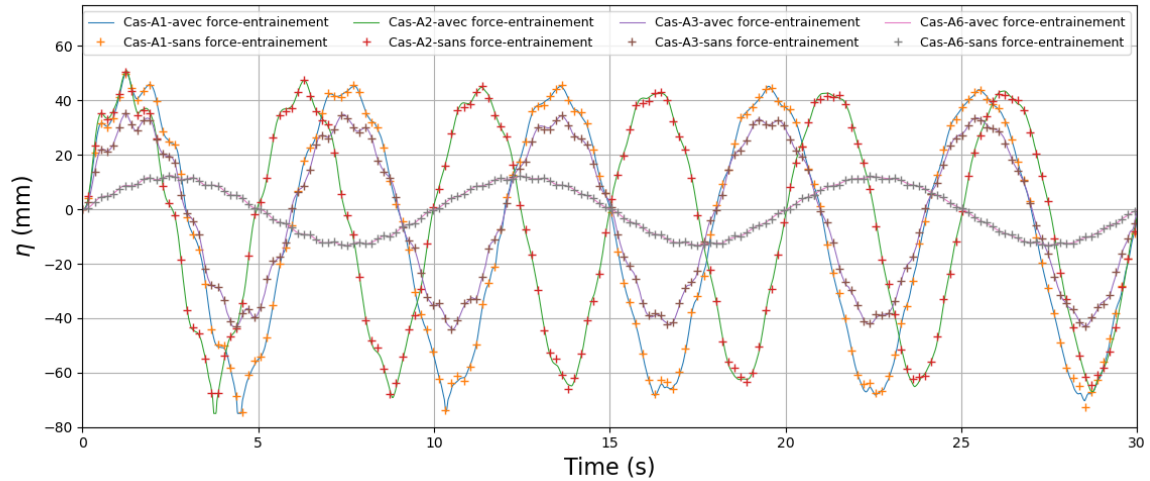


(c)  $A_1 : B_1 = 133,9 \text{ mm}, \omega_1 = 1,047 \text{ rad/s}$  et  $T_p = 6 \text{ s}$  et  $A_2 : B_2 = 128,2 \text{ mm}, \omega_2 = 1,256 \text{ rad/s}$  et  $T_p = 5 \text{ s}$



(d)  $A_1 : B_1 = 133,9 \text{ mm}, \omega_1 = 1,047 \text{ rad/s}$  et  $T_p = 6 \text{ s}$  et  $A_6 : B_6 = 32,1 \text{ mm}, \omega_6 = 0,63 \text{ rad/s}$  et  $T_p = 10 \text{ s}$

**Figure 4.11** – Évolution temporelle de la surface libre à 25 mm de la paroi libre à 30% et 50% de remplissage



**Figure 4.12** – Comparaison de l'élévation de la surface libre du liquide entre le cas des effets gravitationnels seulement et le cas des effets gravitationnels et à la fois le mouvement de tangage

## 4.4 Bilan

Dans ce chapitre, nous avons développé un modèle numérique en couplant un solveur d'écoulement diphasique avec un solveur de dynamique des structure élastique en utilisant la bibliothèque de couplage preCICE pour modéliser les problèmes d'interaction de structure fluide. Le modèle numérique a été d'abord validé par une comparaison avec des données analytiques et expérimentales issues de la littérature pour un réservoir rigide sous une excitation horizontale harmonique.

Puis le modèle a été adapté au cas d'un réservoir soumis à une excitation de tangage. Les résultats ont été confrontés aux résultats expérimentaux réalisés issus de l'expérience décrite au chapitre 3. Les résultats obtenus sont globalement très proches en amplitude et phase. Nous avons fait aussi d'autres comparaisons, permettant d'évaluer l'effet du débattement et de la vitesse de rotation du moteur sur l'amplitude du ballotement où nous constatons que le débattement affecte de manière directe l'amplitude du ballotement.

---

## Modèle simplifié du ballonnement soumis aux effets d'une houle longue régulière

---

### Résumé

Ce chapitre explore un modèle simplifié et réduit du phénomène de ballonnement, influencé par une excitation provoquée par une houle longue régulière. Il a fait l'objet d'un article de revue [35].

### Sommaire

---

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>5.1</b> | <b>Présentation du modèle simplifié</b>                           | <b>95</b>  |
| <b>5.2</b> | <b>Formulation mathématique du modèle</b>                         | <b>99</b>  |
| 5.2.1      | Équations de la dynamique du fluide                               | 99         |
| 5.2.2      | Équation de la dynamique de la structure                          | 99         |
| 5.2.3      | Implémentation  | 100        |
| <b>5.3</b> | <b>Ballonnement sous effets dus à la houle</b>                    | <b>101</b> |
| 5.3.1      | Réservoir partiellement rempli de liquide sans excitation externe | 101        |
| 5.3.2      | Réservoir soumis aux effets de la houle                           | 102        |
| <b>5.4</b> | <b>Bilan</b>  | <b>104</b> |

---

## 5.1 Présentation du modèle simplifié

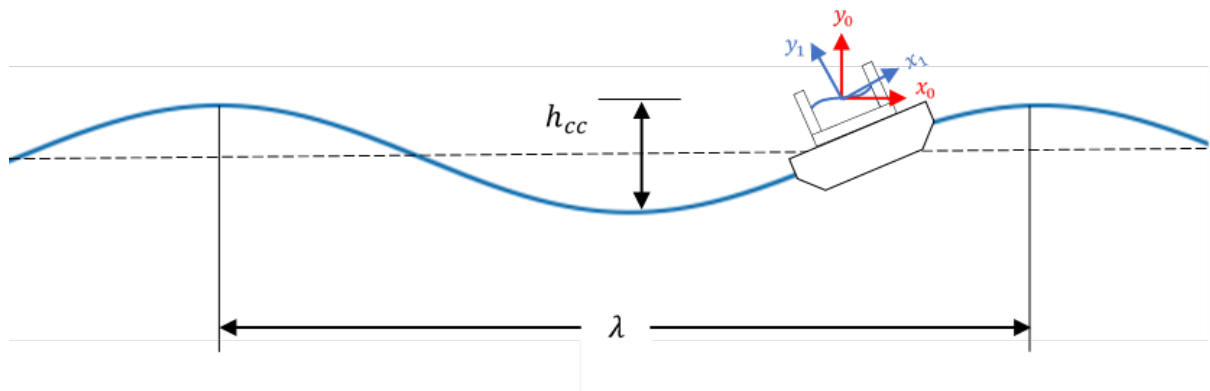
Plusieurs réservoirs servent à stocker ou à transporter des liquides. Cela va des réservoirs de transport de liquides énergétiques comme le carburant d'un véhicule, aux réservoirs de produits non énergétiques comme l'eau potable. Dans le cas où le réservoir n'est pas complètement rempli et soumis aux forces extérieures, le phénomène de ballonnement se produit, impliquant le mouvement oscillatoire du liquide à l'intérieur [103]. Conjugué avec les déformations et les déplacements du réservoir, le ballonnement peut entraîner des détériorations de celui-ci. Les travaux de recherche de *Dodge* [39] soulignent l'importance de l'analyse de la dynamique de liquide à l'intérieur des réservoirs pour atténuer ces

effets [39]. La forme et le design appropriés aux réservoirs, le choix des matériaux et les pratiques de maintenance sont essentiels lors de l'analyse du ballonnement pour garantir la durabilité des réservoirs [48]. Dans le cadre des énergies marines renouvelables, l'utilisation des réservoirs partiellement remplis peuvent offrir la possibilité d'améliorer la stabilité des systèmes flottants, en particulier les éoliennes flottantes. Des recherches approfondies ont été menées pour étudier et analyser le ballonnement.

Les travaux de *Faltisen and Timokha* ont fourni une base théorique solide en décrivant les effets non linéaires des vagues dans les réservoirs sous divers conditions d'excitation [91]. Ces études mettent en évidence l'importance d'analyser les effets non linéaires du ballonnement. Cependant, dans le cas où il s'agit d'un réservoir flottant, le phénomène devient encore plus complexe.

Dans tels cas, les mouvements naturels de la structure flottante ajoutent une autre dimension au problème, en plus des excitations externes. Les chercheurs ont exploré différents types d'excitations, notamment les excitations harmoniques, sismiques et autres. Cependant, ces travaux n'intègrent souvent pas explicitement l'effet gravitationnel dans les modèles où les réservoirs sont flottants. Afin de développer des approches plus complètes et prédictives, il est nécessaire de quantifier et intégrer ce paramètre. Une telle avancée est essentiel pour améliorer la stabilité et la sécurité des systèmes flottants dans des applications marines.

Dans ce travail, nous nous intéressons aux réservoirs de stockages situés sur flotteur en mer soumis à la houle au travers induisant du roulis, en intégrant l'effet gravitationnel (voir figure 5.1). Plus précisément, un réservoir rectangulaire 2D avec une longueur  $L_s$  de  $0,57\text{ m}$  et une hauteur  $H_s$  de  $0,3\text{ m}$  ayant une masse volumique de  $\rho_s = 1420\text{ kg/m}^3$ , est considéré. Le réservoir est rempli à 50% de sa capacité ( $H_f = 0,15\text{ m}$ ) avec de l'eau et soumis à des mouvements entraînés par des vagues. L'épaisseur  $t_w$  des parois du réservoir est de  $0,02\text{ m}$ . Toutes les dimensions du réservoir sont réduites avec une échelle de  $1/40$ , pour limiter les erreurs numériques liées aux grandes échelles et mieux contrôler les paramètres physiques et les modéliser. Le liquide considéré est de l'eau, ayant une masse volumique de  $\rho_f = 1000\text{ kg/m}^3$  et une viscosité cinématique de  $\nu_f = 1,003\text{ m}^2/\text{s}$ .



**Figure 5.1** – Mouvement de réservoir dans une voie maritime

La houle est traitée comme une vague régulière caractérisée par une hauteur crête à creux  $h_{cc}$  de  $0,15\text{ m}$ . Elle est modélisée comme un mouvement oscillatoire périodique de la surface de l'eau, avec une période  $T_p$  de  $12\text{ s}$ , obtenue à partir de l'équation 5.1. Cette période représente l'intervalle de temps entre deux pics de vagues consécutifs ou

deux creux de vagues successives à une position horizontale donnée. La longueur d'onde ( $\lambda = 5,7 m$ ) représente la distance horizontale entre deux points correspondants à deux crêtes d'onde successifs ou creux d'onde, obtenue avec le rapport  $\lambda = 10 L_s$ , en supposant que le réservoir se comporte comme un point par rapport à la houle. Elle correspond à la valeur réelle de  $\lambda = 228 m$  et la vitesse de la vague de  $V_v = 68,4 km/h$  (correspond à la vitesse réduite de  $V_v = 1,7 km/h$ ). La période  $T_p$  joue un rôle crucial dans la détermination de la morphologie des vagues océaniques et a un impact significatif sur leur longueur et leur fréquence, comme indiqué dans [16]. La période  $T_p$  est donnée par l'équation 5.1. Nous pouvons dériver la relation pour obtenir la longueur d'onde (équation 5.2).

$$T_p = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}} \quad (5.1)$$

$$\lambda = 1.56T_p^2 \quad (5.2)$$

Ici, la houle d'intérêt est prise en compte par un effet de gravité. Nous considérons que le réservoir flottant suit le mouvement de la vague. Le repère absolu est  $R_0 (O, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$  situé au centre du réservoir et à la surface libre du liquide dans le réservoir au repos ( $\eta = 0$ ). L'inclinaison du réservoir est représenté par l'angle  $\alpha$  (équation 5.3) entre le repère absolu  $R_0 (O, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$  et le repère de référence  $R_1 (O, \vec{x}_1, \vec{y}_1)$ .

$$\alpha = \alpha_{max} \cos(\omega t) \quad (5.3)$$

La présentation de la pesanteur dans le référentiel  $R_1$  est évolutive dans le temps. Elle est notée  $\vec{g}_s$  et s'écrit comme par la relation 5.4. Où :  $\alpha_{max}$  est l'angle d'inclinaison maximal donné par l'équation 5.5,  $\omega$  est la fréquence angulaire (équation 5.6),  $t$  est le temps, et  $\vec{x}_1$  et  $\vec{y}_1$  sont les vecteurs unitaires en termes de directions positives des axes ( $x_1$ ) et ( $y_1$ ) respectivement.

$$\vec{g}_s = - (g \sin(\alpha) \vec{x}_1 + g \cos(\alpha) \vec{y}_1) \quad (5.4)$$

$$\alpha_{max} = \arctan\left(\frac{2h_{cc}}{\lambda}\right) \quad (5.5)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T_p} \quad (5.6)$$

En plus du changement de la gravité, une accélération d'entraînement notée  $\vec{\gamma}_e$  peut être considérée. Elle représente les effets d'inertie dus au changement de référentiel (cf. chapitre 4). Ici le pilonnement n'est pas considéré. La figure 5.2 présente le schéma d'un réservoir partiellement remplie avec les notations utilisées pour la description mathématique [35].

La figure 5.3 présente l'évolution des composantes de l'accélération de la pesanteur dans le repère du réservoir ainsi que l'accélération d'entraînement. Depuis ces courbes, on peut remarquer que les composantes de  $\vec{\gamma}_e$  sont très faible en comparaison des composantes de l'accélération de la pesanteur sur les deux axes du repère. C'est une conséquence des paramètres choisis et permet de justifier le droit de supposer le réservoir comme un point matériel. Ceci est rendu possible à condition que la longueur d'onde soit beaucoup plus grande que la taille du réservoir, la pratique ici  $\lambda = 10L_s$ . La figure 5.3 illustre ceci.

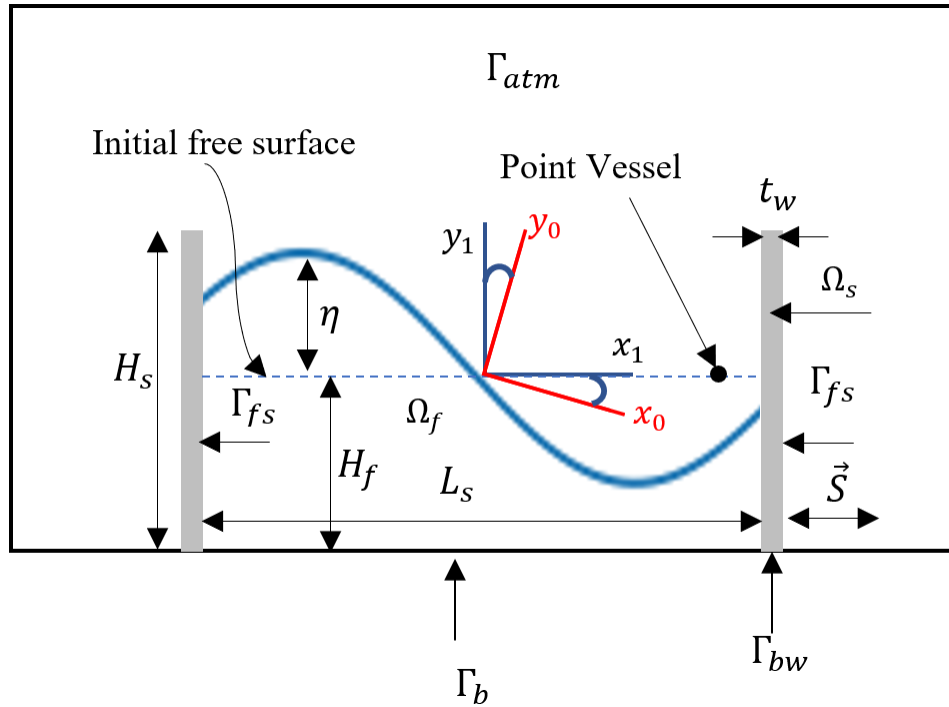


Figure 5.2 – Schéma présentant le réservoir étudié

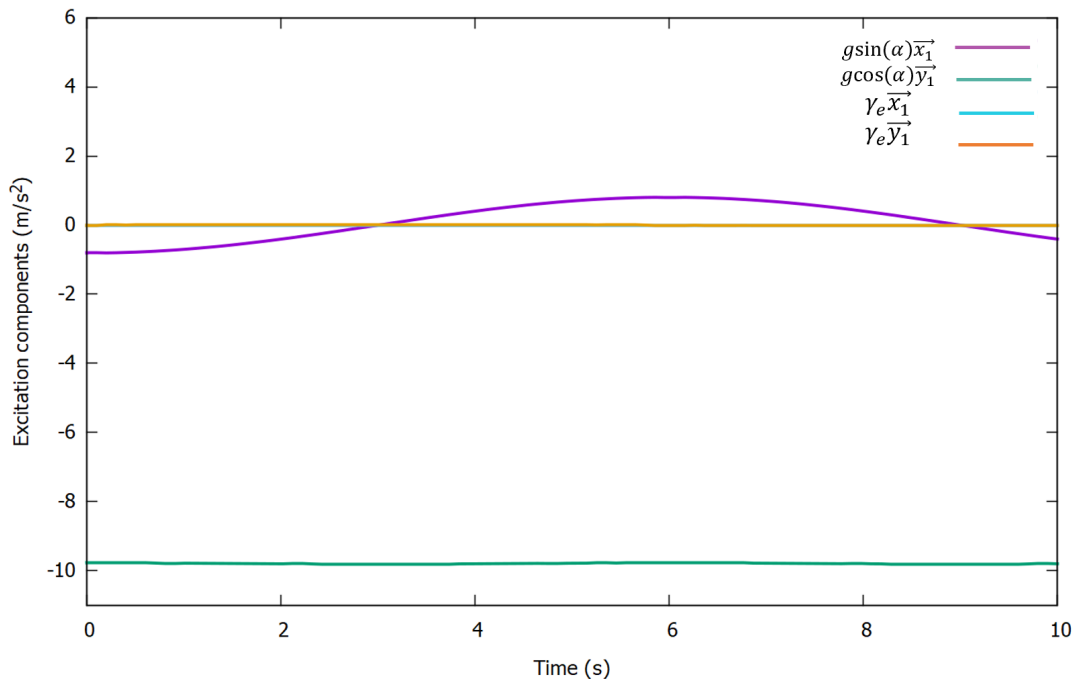


Figure 5.3 – Évolution des composantes de l'accélération de la pesanteur et de l'accélération d'entraînement

Dans la suite de cette étude nous ne considérons que l'effet de la gravité évolutive dans le référentiel  $R_1$ , l'effet de pilonnement est également négligé ici. Cet effet de la gravité est implémenté dans les équations du fluide et de la structure (équations 5.8 et 5.10) respectivement. Tous les calculs sont effectués dans le cadre du référentiel du réservoir.

## 5.2 Formulation mathématique du modèle

### 5.2.1 Équations de la dynamique du fluide

L'analyse de la dynamique des fluides dans le réservoir implique la résolution des équations de Navier-Stokes pour un fluide biphasique incompressible. Étant donné que le fluide se déplace le long d'un conteneur en mouvement, des ajustements de l'équation de mouvement sont nécessaires pour incorporer le déplacement du domaine. L'expression des équations de Navier-Stokes dans le domaine mobile est facilitée par l'utilisation de la formulation Lagrangienne-Eulérienne Arbitraire (ALE) [137]. La dérivation de ces équations implique une combinaison de l'équation de continuité (équation 5.7) et de l'équation de quantité de mouvement (équation 5.8) :

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (5.7)$$

$$\rho_f \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_f ((\vec{u} - \vec{w}) \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} = -\vec{\nabla} P + \mu_f \Delta \vec{u} + \rho_f \vec{g}_s \quad (5.8)$$

Où :  $\rho_f$  est la densité de la masse du fluide,  $\vec{u}$  est la vitesse d'écoulement,  $\vec{w}$  est la vitesse des déplacements de domaine,  $P$  est la pression du fluide, et  $\mu_f$  est la viscosité cinématique des deux phases (liquide et air). Dans cette étude, l'écoulement est considéré laminaire, aucun modèle de turbulence n'a été employé.

L'équation 5.9 donne les conditions aux limites et initiales du problème de fluide. Dans cette équation,  $\vec{\xi}$  est la vitesse structurelle,  $\vec{n}$  est le vecteur unitaire normal à la limite supérieure ouverte  $\Gamma_{atm}$ ,  $\Gamma_b$  est la limite inférieure,  $\Gamma_{fs}$  est l'interface fluide-structure, et  $\Omega_f$  est le domaine fluide.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{\partial \vec{u}}{\partial n} = 0 & \text{sur } \Gamma_{atm} \\ \vec{u} = 0 & \text{sur } \Gamma_b \\ \vec{u} = \vec{\xi} & \text{sur } \Gamma_{fs} \\ \vec{u}(0) = 0 & \text{sur } \Omega_f \end{array} \right. \quad (5.9)$$

### 5.2.2 Équation de la dynamique de la structure

Les déformations de la structure sont déterminées par l'équation d'élasticité linéaire (équation 5.10), dans laquelle  $\vec{\xi}$  représente le champ de déplacement local,  $\overline{\sigma}_s$  est le tenseur de contrainte (équation 2.7) dans la structure,  $\rho_s$  est la densité de masse de la structure et le vecteur de gravité  $\vec{g}_s$ , défini par l'équation 5.4, est également un facteur contributif.

$$\rho_s \frac{\partial^2 \vec{\xi}}{\partial t^2} = \vec{\nabla} \cdot \overline{\sigma}_s + \rho_s \vec{g}_s \quad (5.10)$$

Les conditions initiales et aux limites de la structure sont fournies par les relations données par l'équation 5.11, où  $\Gamma_{bw}$  est la limite inférieure des parois,  $\Omega_s$  est le domaine solide,  $\sigma_f$  est le tenseur de contrainte dans le fluide et  $\vec{n}$  est le vecteur normale vers l'extérieur à l'interface  $\Gamma_{fs}$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \vec{\xi} = 0 & \text{sur } \Gamma_{bw} \\ \sigma_s \cdot \vec{n} = \sigma_f \cdot \vec{n} & \text{sur } \Gamma_{fs} \\ \vec{\xi}(0) = 0 & \text{sur } \Omega_s \end{array} \right. \quad (5.11)$$

### 5.2.3 Implémentation

#### Maillage des domaines fluide et solide

Les méthodes des volumes finis et éléments finis consistent à diviser les domaines en petits volumes de contrôle ou petits éléments finis (mailles). Ensuite, on applique les équations algébriques gouvernantes du problème fluide ou solide à chaque maille. La Figure 5.4 présente les maillages des domaines fluide et solide. Le domaine fluide comprend l'intérieur et l'extérieur du réservoir, à l'exception des parois. Le fluide considéré dans ce cas est diphasique, constitué du liquide à l'intérieur du réservoir et de l'air environnant. Le maillage utilisé pour le domaine fluide à l'intérieur du réservoir, ainsi que le domaine situé au-dessus et à l'extérieur de celui-ci, est plus raffiné que pour les autres parties du domaine fluide. La raison est que l'essentiel de l'écoulement se produit dans la zone raffinée. La taille du maillage à l'intérieur du réservoir est  $\Delta x = 5 \text{ mm}$ ,  $\Delta y = 7,5 \text{ mm}$ . La taille de maillage de la structure est  $\Delta x = 4 \text{ mm}$ ,  $\Delta y = 7,5 \text{ mm}$ . Un maillage non-structuré est utilisé pour la structure pour une meilleure résolution dans le FEniCS.

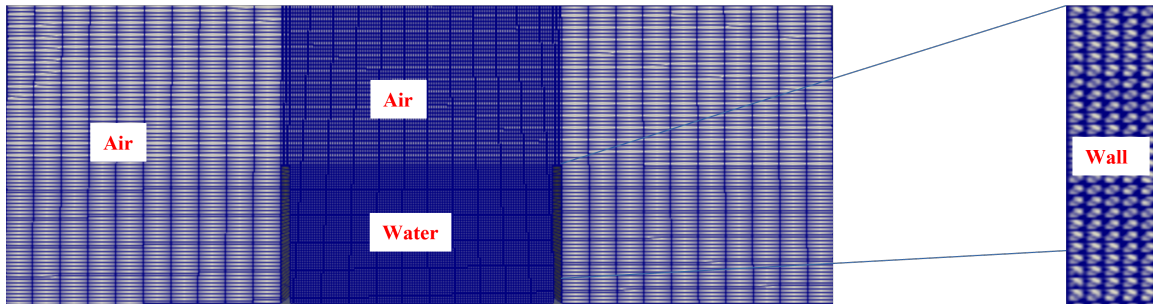


Figure 5.4 – Maillage du domaine fluide (gauche) et de la structure (droite)

#### Implémentation

Le mouvement du fluide est calculé avec la méthode des volumes finis avec OpenFOAM. Les déplacements et les déformations de la structure sont calculés avec la méthode des éléments finis dans le code de calcul FEniCS.

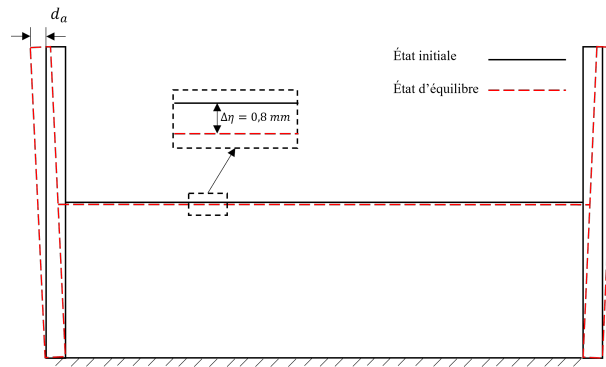
Afin de garantir la robustesse et la stabilité du modèle, l'algorithme 'PIMPLE' est utilisé pour résoudre le couplage pression-vitesse dans les équations de Navier-Stokes. Cet algorithme combine la pression implicite avec le fractionnement de l'opérateur (PISO) et la méthode semi-itérative pour les équations liées à la pression (SIMPLE). Le couplage implique le respect de la continuité des vitesses et des contraintes au passage des interfaces entre le fluide et le solide.

## 5.3 Ballotement sous effets dus à la houle

À ce stade, le modèle numérique a été validé pour les cas de ballotement linéaire et le non-linéaire. Cette partie vise à examiner les effets de la flexibilité sur le ballotement ainsi que l'impact du ballotement sur les parois du réservoir.

### 5.3.1 Réservoir partiellement rempli de liquide sans excitation externe

Afin de mieux étudier les effets que la flexibilité des parois du réservoir peut avoir sur le ballotement du liquide à l'intérieur du réservoir, un cas test inspiré d'un cas traité par *Fourey et al.* [41] est proposé. Pour cela, un réservoir partiellement rempli du ( $H_f = 150 \text{ mm}$ ) avec des parois flexibles et un fond rigide est considéré sans excitation extérieure. La seule force qui est appliquée au fluide et au solide, est donc celle de la gravité. La pression hydrostatique déterminée par  $p = \rho_f g H_f$ , entraîne la déformation des parois flexibles (figure 5.5) jusqu'à ce qu'il approche d'une valeur stable.

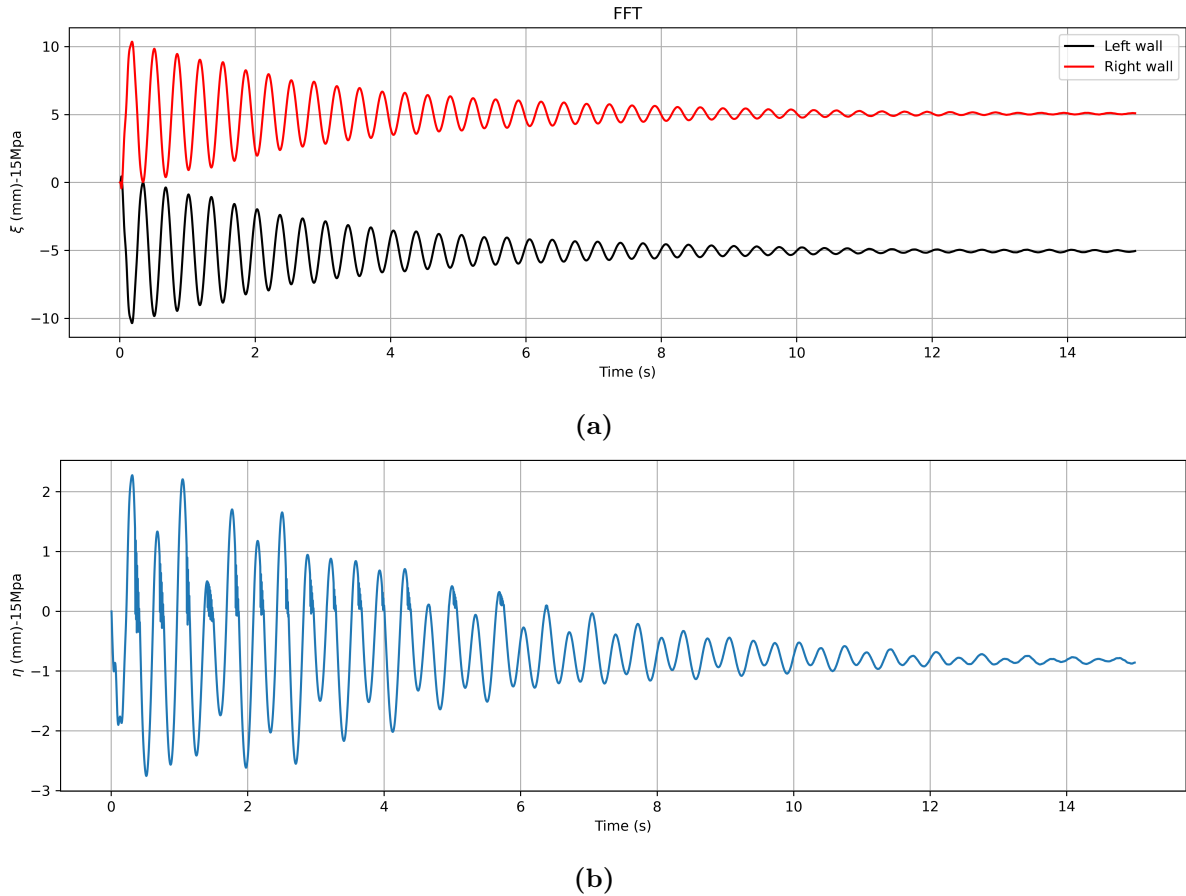


**Figure 5.5** – L'état initiale ( $t=0$ ) et l'état d'équilibre du réservoir sous pression hydrostatique

La figure 5.6a montre les oscillations des parois gauche et droite du réservoir sous pression hydrostatique, elles atteignent l'état d'équilibre après environ 10 s. La valeur maximale numérique est de 5,1 mm, qui correspond approximativement à la valeur analytique  $d_a = 5,59 \text{ mm}$  calculée selon la formule (équation 5.12) de la théorie des poutres où  $H_f$  est le niveau de remplissage du fluide,  $H_s$  est la hauteur des parois,  $E$  est le module de Young, et  $I$  est le moment quadratique d'inertie de la section transversale de la paroi. Cela correspond à une erreur relative d'environ 8,77%.

$$d_a = \frac{\rho_f g H_f^4}{120EI} (5H_s - H_f) \quad (5.12)$$

L'élévation de la surface libre à une sonde située à 20 mm de la paroi droite illustrée dans la figure 5.6b, montre les fluctuations de la surface libre du liquide sous l'effet de la pression hydrostatique. Après quelques secondes, la surface libre du liquide diminue d'environ 0,8 mm par rapport à son niveau initial en raison des déviations des deux parois dans des directions opposées comme le montre la figure 5.5. Pour initier le cas d'excitation appliqué, la condition initiale sera définie en fonction de cet état stable, afin d'éviter les fluctuations au début de la simulation.



**Figure 5.6** – (a) Déformation des parois gauche et droite supérieures du réservoir, (b) Élévation de la surface libre du liquide

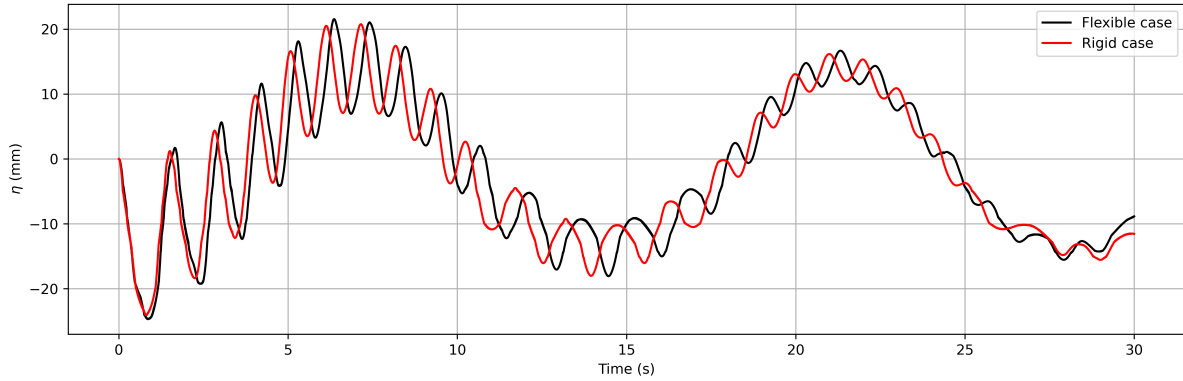
### 5.3.2 Réservoir soumis aux effets de la houle

Afin d'étudier l'effet de la flexibilité sur le ballonnement, deux cas de matériaux différents sont analysés. Un matériau rigide avec un module de Young de  $E = 15 \cdot 10^{20} \text{ MPa}$  et un autre flexible avec un module de Young de  $E = 15 \text{ MPa}$  sont considérés. Le même réservoir est soumis à une excitation due aux effets de la houle, avec une période  $T_p = 12 \text{ s}$ , une longueur d'onde  $\lambda = 5,7 \text{ m}$  et une hauteur crête à creux  $h_{cc} = 0,15 \text{ m}$ .

La figure 5.7 illustre les variations de l'élévation de la surface libre du liquide les réservoir à parois flexibles et rigides au cours du temps à  $20 \text{ mm}$  de la paroi droite. Les données ont été recueillies à chaque  $1 \text{ s}$ , et le graphique qui en résulte offre des informations sur le comportement de la surface libre du liquide. La tendance générale du graphique montre que les fluctuations de l'élévation de la surface libre des parois flexibles et rigides ont presque les mêmes pics.

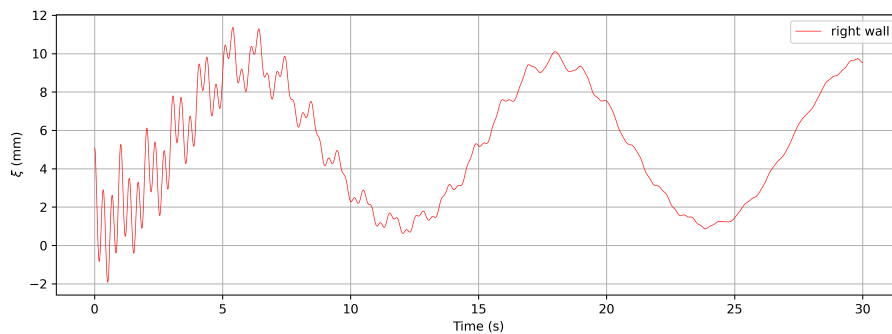
Plusieurs pics importants peuvent être observés dans les résultats. Ces pics représentent le cas où l'élévation de la surface libre atteint sa hauteur maximale. En plus des sommets, il y a des creux identifiables où l'élévation de la surface libre atteint ses points les plus bas. Ces creux peuvent indiquer des périodes de diminution de l'élévation du liquide. Les amplitudes du ballonnement maximales sont de  $20,85 \text{ mm}$  à  $t = 6,31 \text{ s}$  pour le réservoir flexible et de  $20,49 \text{ mm}$  à  $t = 6,13 \text{ s}$  pour le réservoir rigide, ce qui indique une différence de près de  $1,73\%$  entre les deux cas. Un déphasage est d'ailleurs clairement observé entre les deux cas puisque le cas flexible est plus conforme que le cas rigide. Cela signifie que

le réservoir flexible peut se déformer plus facilement en réponse aux ondes générées par l'excitation. La période de l'enveloppe d'ondes modulées  $T_f = 10,73s$  est plus longue dans le cas du réservoir flexible que dans le cas du réservoir rigide  $T_r = 10,41s$  ce qui correspond à 2,98% de différence.



**Figure 5.7** – Comparaison de l'élévation de surface libre entre les cas de parois flexibles et rigides

La figure 5.8 représente les déformations des parois de réservoir extraites des points situés au sommet de la paroi gauche du réservoir au cours du temps, mesurées à intervalles réguliers. Cette analyse vise à comprendre le comportement dynamique du réservoir en réponse à l'effet de vague et au ballotement de liquide. Ces déformations montrent une augmentation progressive puis une diminution des déplacements des parois au cours de la période de houle. Cela suggère un effet continu et cumulatif sur l'intégrité structurelle des parois. Ainsi, elles montrent que les deux parois se déplacent dans le même sens. Pendant la tendance graduelle, il y a des pics dans les déplacements des parois. Ces pics indiquent le cas du déplacement maximal.

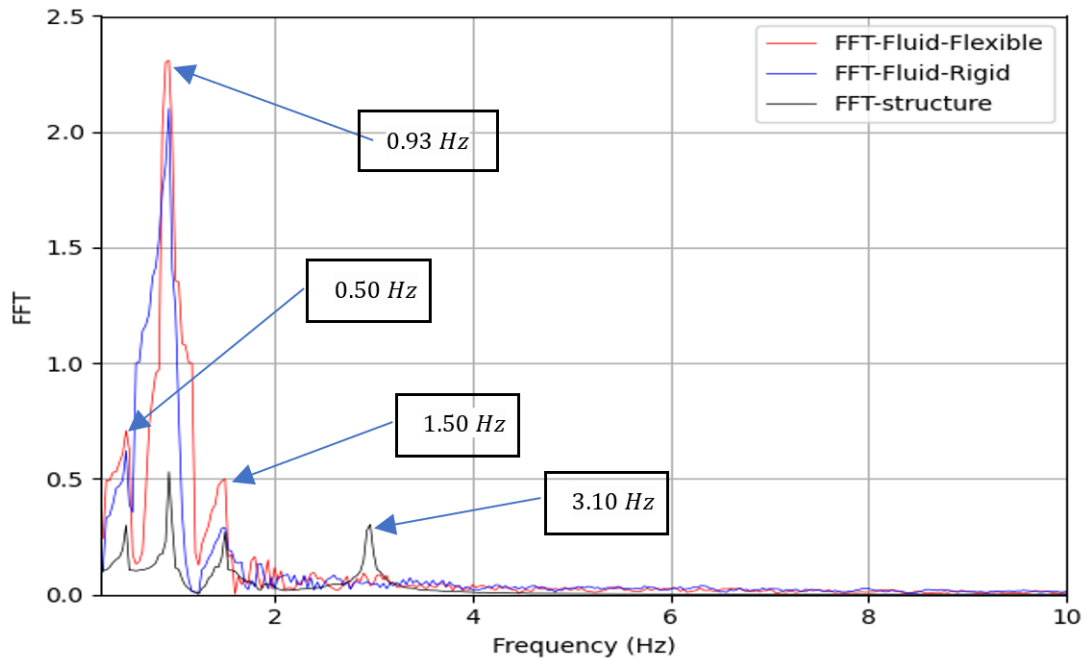


**Figure 5.8** – Déplacement de la paroi gauche du réservoir

Afin d'estimer les fréquences naturelles d'un fluide et d'une structure, l'analyse de la transformation rapide de Fourier (FFT) est effectuée sur les réponses temporelles des élévations de surface libre et des déplacements des parois flexibles. La figure 5.9 affiche les courbes FFT qui ont été acquises. Ainsi, la valeur calculée de la fréquence d'excitation ( $f_{e,c} = 0,50 Hz$ ) présente le premier pic pour les cas à paroi rigide et flexible qui est proche de la valeur donnée ( $f_e = 0,52 Hz$ ) avec une différence relative de 3,84%. Le deuxième pic  $f_{1,c} = 0,93 Hz$  présente la valeur calculée de la fréquence naturelle du ballotement qui est proche de la valeur analytique  $f_1 = 0,96 Hz$  calculée à partir de [91] avec une différence

de 3,12%. Le dernier pic ( $f_{s,c} = 1,50 \text{ Hz}$ ) est la valeur calculée de la fréquence propre de la structure, qui est comparable à la valeur analytique  $f_s = 1,55 \text{ Hz}$  calculée à partir de [55], avec une différence de 3,22%.

La FFT a généré beaucoup d'autres fréquences. Parmi ces fréquences il y a la fréquence  $3,10 \text{ Hz}$  qui correspond à  $2 f_s$ . Dans l'ensemble, l'analyse FFT semble avoir réussi à estimer les fréquences naturelles du fluide et de la structure. Les valeurs calculées sont proches des valeurs analytiques, avec des différences de moins de 4%.



**Figure 5.9** – FFT appliquée à l'évolution de la surface libre des deux cas (rigide et flexible) et au déplacements des parois flexibles

## 5.4 Bilan

Une étude numérique sur le comportement du liquide dans un réservoir rectangulaire flexible bidimensionnel soumis aux effets d'une houle régulière a été envisagée. Dans le cas étudié, l'analyse des effets de la vague régulière sur le réservoir flexible a montré que l'effet de la flexibilité des parois n'est pas très significative, ce qui pourrait être attribué au fait que la houle appliquée est beaucoup plus longue que la taille du réservoir.

En outre, la flexibilité a provoqué un déphasage dans la réponse de la surface libre entre les deux cas qui montre une modification importante du ballonnement dans le réservoir avec des parois flexibles. L'étude de la FFT a montré que les résultats obtenus sont en bon accord avec la solution analytique pour les deux cas flexible et rigide.

---

## Modélisation du ballonnement dans un réservoir soumis aux excitations de tangage et de pilonnement

---

### Résumé

Ce chapitre explore un modèle simplifié et réduit du ballonnement dans un réservoir porté par un flotteur et soumis à une excitation combinée de tangage et de pilonnement. Le modèle étudie l'effet de la flexibilité des parois du réservoir sur le comportement de ballonnement.

### Sommaire

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>6.1 Développement d'un modèle simplifié en intégrant l'effet de tangage et de pilonnement . . . . .</b> | <b>105</b> |
| <b>6.2 Dynamique de ballonnement des liquides dans un réservoir flexible . . . . .</b>                     | <b>107</b> |
| <b>6.3 Bilan . . . . .</b>   | <b>117</b> |

---

## 6.1 Développement d'un modèle simplifié en intégrant l'effet de tangage et de pilonnement

Ce chapitre propose un modèle simplifié d'un réservoir bidimensionnel, qui intègre les effets combinés de la houle et de l'inertie du changement de référentiel du réservoir, considérant ainsi le mouvement de pilonnement. On considère le même dispositif présenté précédemment dans le chapitre 5, partie 4.1 (570 mm x 300 mm). Le réservoir est supposé soumis aux excitations de tangage et de pilonnement.

Le comportement du fluide à l'intérieur du réservoir et de la structure sont données par les équations 6.1 et 6.2.  $\vec{S}_f$  et  $\vec{S}_s$  représentent respectivement l'excitation intégrée à l'équation du fluide et à celle du solide.

$$\rho_f \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_f ((\vec{u} - \vec{w}) \cdot \nabla) \vec{u} = \mu_f \Delta \vec{u} - \nabla P + \rho_f \vec{S}_f \quad (6.1)$$

$$\rho_s \frac{\partial^2 \vec{\xi}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \sigma_s + \rho_s \vec{S}_s \quad (6.2)$$

Le mouvement de tangage et de pilonnement sont intégrés aux équations du fluide et du solide sous forme d'un terme source, comme une force volumique comme illustré dans les équations 6.3 et 6.4.

$$\vec{S}_f = \rho_f (\vec{g}_s + \vec{\gamma}_e + \vec{\gamma}_c) \quad (6.3)$$

$$\vec{S}_s = \rho_s (\vec{g}_s + \vec{\gamma}_e + \vec{\gamma}_c) \quad (6.4)$$

Où :  $\vec{g}_s$  est l'effet gravitationnel exprimé dans le repère  $R_1$  associé au mouvement de la cuve (équation 4.14),  $\vec{\gamma}_e$  est l'accélération d'entraînement due à la rotation générée par les effets de la houle (équation 4.13) et  $\vec{\gamma}_c$  est l'accélération de Coriolis (équation 6.5). Ici le pilonnement est considéré, il est donné par l'équation 6.6.

$$\vec{\gamma}_c = 2\vec{\Omega}_{(R_1/R_0)} \wedge \vec{V}_r \quad (6.5)$$

$$\vec{\gamma}_{0(R_1/R_0)} = \frac{H_{cc}}{2} \omega^2 \sin(\omega t) \sin(\alpha) \vec{x}_1 + \frac{H_{cc}}{2} \omega^2 \sin(\omega t) \cos(\alpha) \vec{y}_1 \quad (6.6)$$

$\vec{OM}$  est le vecteur position entre l'origine  $O$  et le point  $M$  ( $\vec{OM} = x \vec{x}_1 + y \vec{y}_1$ ). Le point  $M$  est fixe dans le référentiel ( $O \vec{x}_1 \vec{y}_1$ ), et l'accélération de Coriolis est nulle ( $\vec{\gamma}_c = \vec{0}$ ).

À partir des équations 4.13, 4.14, et 6.6, les équations 6.3 et 6.4 peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{aligned} \vec{S}_f = \rho_f \left( - \left( \frac{H_{cc}}{2} \omega^2 \sin(\omega t) \sin(\alpha) - (\ddot{\alpha} y + \dot{\alpha}^2 x + g \sin(\alpha)) \vec{x}_1 \right) \right. \\ \left. + \left( \frac{H_{cc}}{2} \omega^2 \sin(\omega t) \cos(\alpha) + (\ddot{\alpha} x - \dot{\alpha}^2 y - g \cos(\alpha)) \vec{y}_1 \right) \right) \end{aligned} \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} \vec{S}_s = \rho_s \left( - \left( \frac{H_{cc}}{2} \omega^2 \sin(\omega t) \sin(\alpha) - (\ddot{\alpha} y + \dot{\alpha}^2 x + g \sin(\alpha)) \vec{x}_1 \right) \right. \\ \left. + \left( \frac{H_{cc}}{2} \omega^2 \sin(\omega t) \cos(\alpha) + (\ddot{\alpha} x - \dot{\alpha}^2 y - g \cos(\alpha)) \vec{y}_1 \right) \right) \end{aligned} \quad (6.8)$$

Avec  $g$  est l'accélération gravitationnelle ( $g = 9.81m/s^2$ ),  $\omega$  est la fréquence angulaire de l'excitation exprimée par l'équation 5.6,  $t$  est le temps. L'angle de rotation  $\alpha$ , la vitesse angulaire  $\dot{\alpha}$  et l'accélération angulaire  $\ddot{\alpha}$  sont présentés dans le chapitre 3, dans la section 3.1.2 (cf. équations 3.16, 3.19 et 3.20).

## 6.2 Dynamique de ballonnement des liquides dans un réservoir flexible

Pour analyser l'effet de la flexibilité des parois sur le ballonnement, deux matériaux sont considérés. Un matériau rigide de module de Young de  $E = 3300$  MPa et un matériau flexible de Module de Young de  $E = 15$  MPa. Le réservoir considéré est rempli à 50% de sa capacité ( $H_f = 150$  mm) avec de l'eau, ayant une masse volumique de  $\rho_f = 1000$  kg/m<sup>3</sup> et une viscosité cinématique de  $\nu_f = 1,003$  m<sup>2</sup>/s. Il est soumis à la fois au mouvement de tangage et au mouvement de pilonnement dus à la houle avec six différentes configurations d'excitation. Nous avons réalisé des simulations, en couplant OpenFOAM (pour modéliser le fluide) et FEniCS (pour modéliser le solide) via preCICE. Les détails de ce couplage sont illustrés dans les chapitres 2 et 4.

Les six configurations d'excitation sont définies en fonction de la période de l'excitation  $T_p$  (période de la houle), la hauteur crête à creux  $h_{cc}$  et une longueur d'onde  $\lambda$ . Le tableau 6.1 présente les six configurations d'excitation étudiées et leurs caractéristiques spécifiques.

TABLE 6.1 – Représentation des différentes configurations d'excitation étudiées

| Configurations étudiées | $T_p$ [s] | $h_{cc}$ [m] | $\lambda$ [m] |
|-------------------------|-----------|--------------|---------------|
| $A_1$                   | 6         | 0,375        | 1,4           |
| $A_2$                   | 5         | 0,25         | 0,975         |
| $A_3$                   | 6         | 0,25         | 1,4           |
| $A_4$                   | 8         | 0,25         | 2,5           |
| $A_5$                   | 9         | 0,25         | 3,075         |
| $A_6$                   | 10        | 0,25         | 3,9           |

Pour le cas d'un réservoir flexible, un cas test inspiré d'un cas proposé par *Fourey et al.* [41], est considéré comme déjà fait dans le chapitre 5. En considérant le réservoir sans excitation externe, la pression hydrostatique entraîne la déviation des deux parois flexibles dans les directions opposées comme montré sur la figure 6.1. On atteint une valeur stable du déplacement des parois.

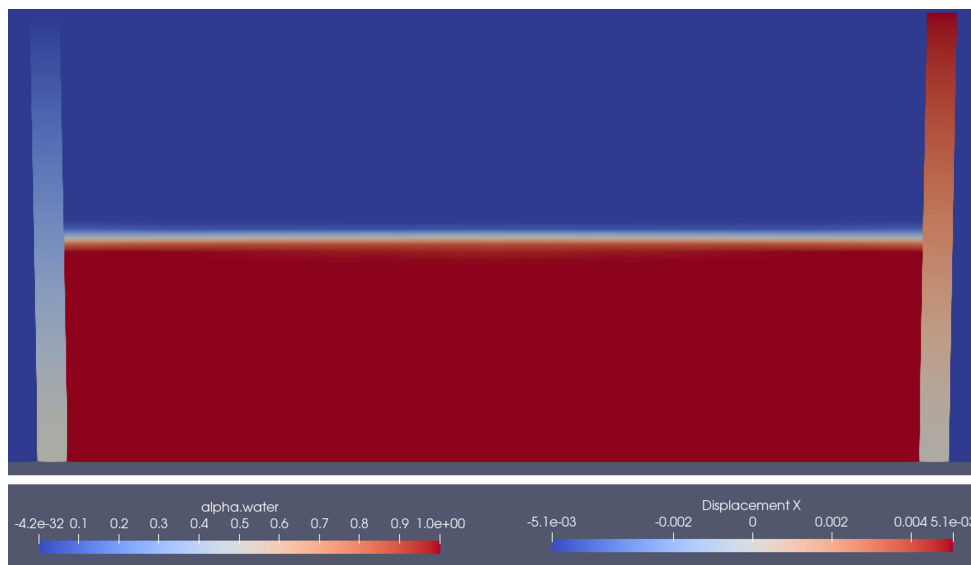
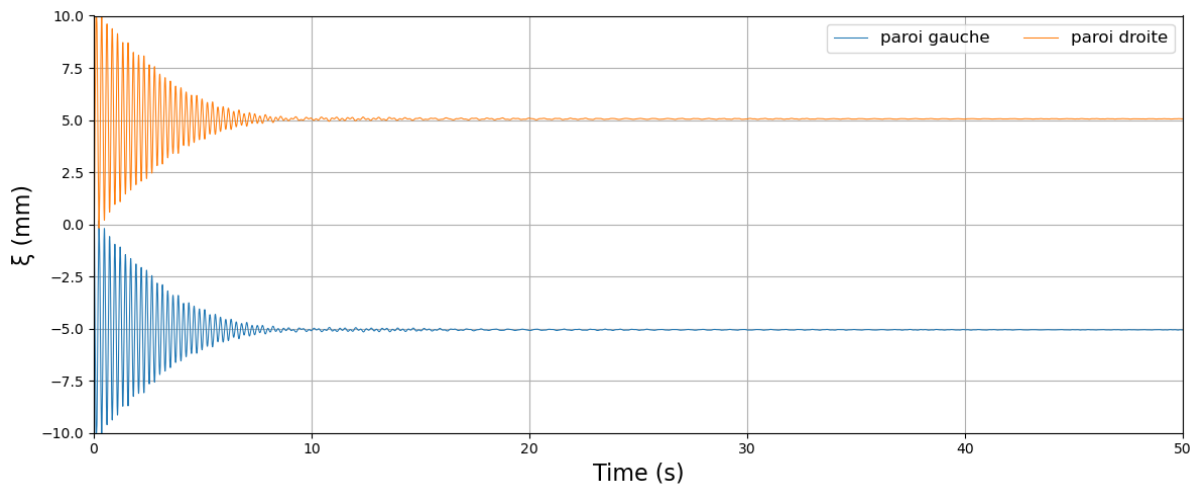


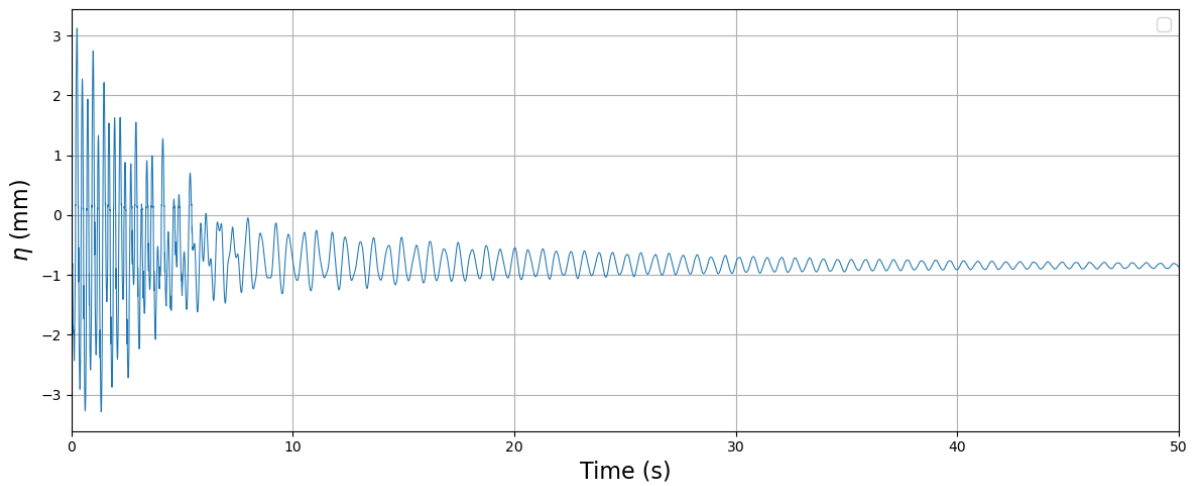
Figure 6.1 – Déviations des parois du réservoir sous pression hydrostatique

La figure 6.2a montre les vibrations des parois gauche et droite du réservoir sous pression hydrostatique. Elles atteignent l'état d'équilibre après environ 30s avec une valeur numérique maximale de 5,02 mm, qui correspond approximativement à la valeur analytique  $d_a = 5,59 mm$ , calculée selon la formule 5.12.

L'élévation de la surface libre extraite à 25 mm de la paroi droite illustrée sur la figure 6.2b, montre les fluctuations de la surface libre du liquide sous l'effet de la pression hydrostatique. Après quelques secondes, de la déviation des deux parois résulte une diminution de niveau de la surface libre du liquide d'environ 0,84 mm par rapport à son niveau initiale. En fonction de cet état stable, nous définissons la condition initiale pour initier le cas d'excitation, afin d'éviter les fluctuations au début de la simulation.



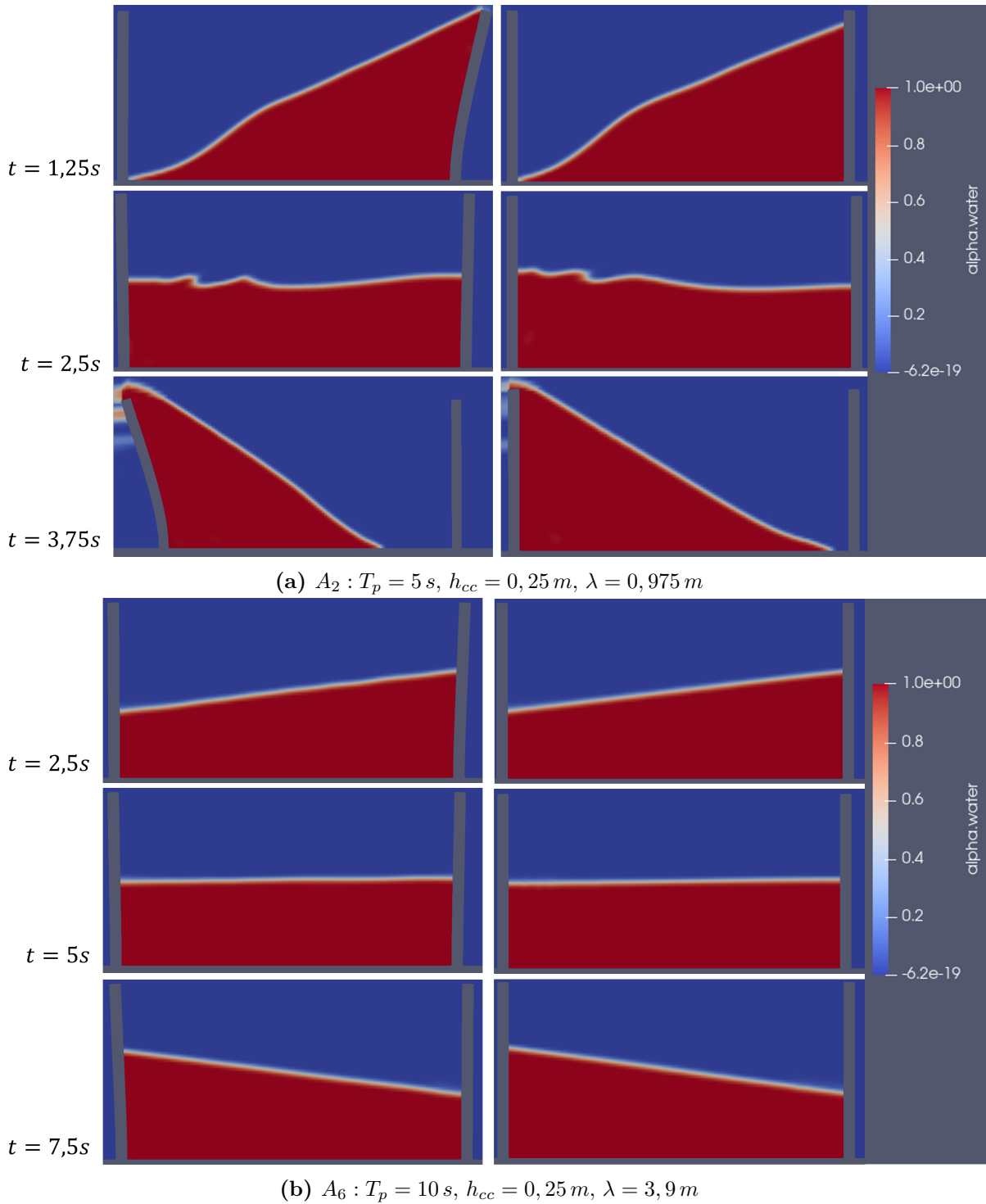
(a)



(b)

**Figure 6.2** – (a) Déformation des parois gauche et droite supérieures du réservoir, (b) Élévation de la surface libre du liquide

La figure 6.3 montre le comportement du ballonnement à l'intérieur du réservoir rempli à 50 % de sa capacité, à gauche le cas du réservoir flexible et à droite le cas rigide (voir annexe C pour les autres configurations). On observe que le liquide à l'intérieur monte progressivement au fil du temps vers la droite, jusqu'à atteindre une amplitude maximale à l'instant  $\frac{T_p}{4}$ . Puis, il redescend progressivement jusqu'à retrouver une surface plane,



**Figure 6.3** – Vibrations des contours de fraction volumique instantanés numériques du ballonnement à l’intérieur de la cuve à 50% de remplissage : à gauche le cas flexible, à droite le cas rigide

horizontale et parfois perturbée vers l’instant  $\frac{T_p}{2}$ . Dans la deuxième moitié de la période caractéristique de la houle ( $\frac{T_p}{2} < t < T_p$ ), le fluide remonte vers la gauche où il atteint une amplitude maximale à gauche et minimale à droite. Le comportement de la surface libre est similaire entre les cas des réservoir rigide et flexible. Pour les configurations  $A_1$  et  $A_2$ , nous observons un débordement à gauche autour de l’instant  $t = \frac{3T_p}{4}$ , il est plus intense

dans le cas flexible. Dans le cas flexible, nous remarquons que les parois du réservoir sont inclinées vers l'extérieur. Dans les configurations  $A_1, A_2$  et  $A_3$ , les parois sont plus inclinées que dans les configurations  $A_4, A_5$  et  $A_6$ , où les déformations sont moins importantes.

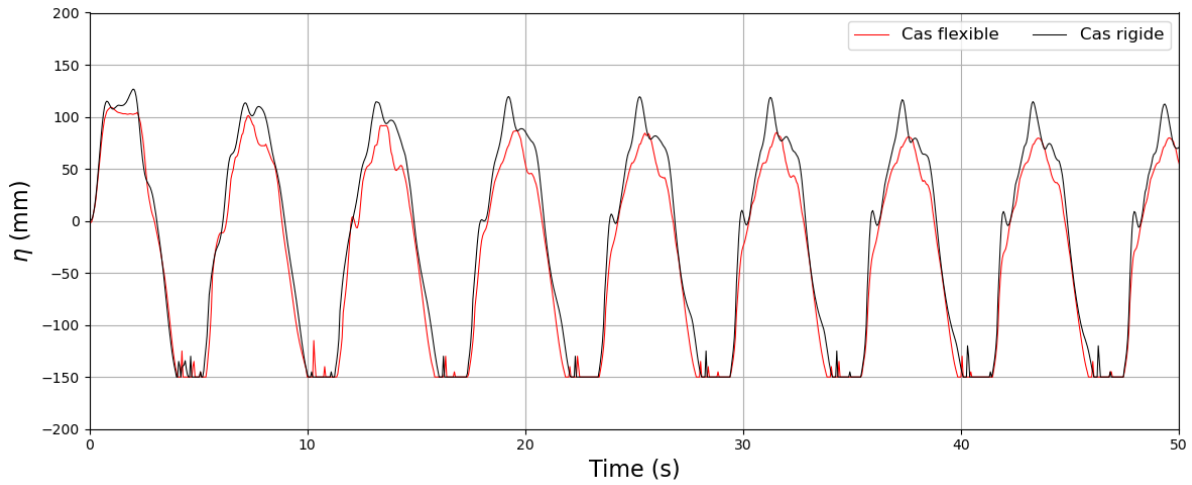
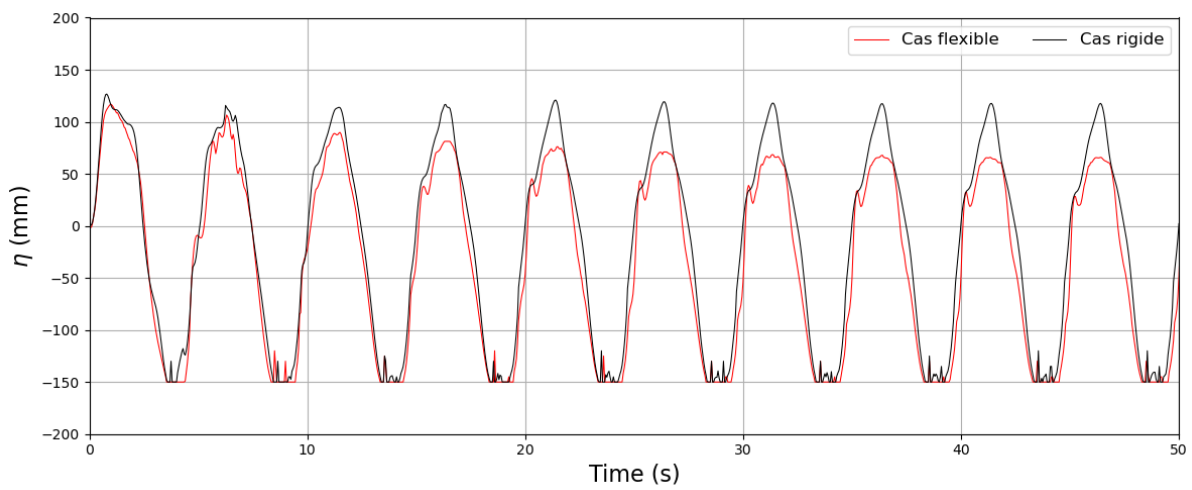
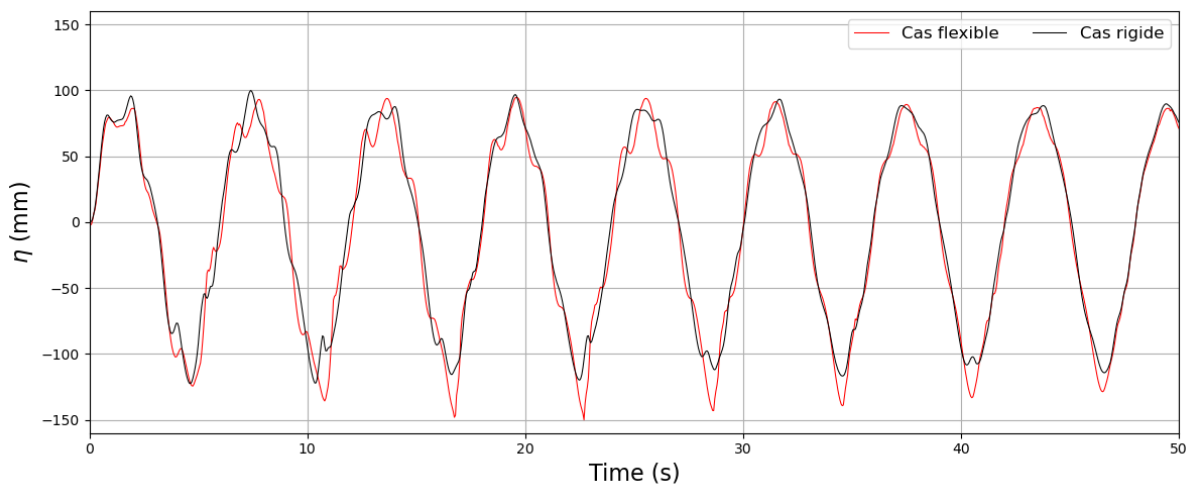
Les figures 6.4 et 6.5 représentent l'évolution temporelle de la surface libre à 25 mm de la paroi droite en fonction du temps dans les cas du réservoir flexible et rigide pour toutes les configurations. Les courbes présentent une évolution périodique avec des pics et des creux bien marqués, indiquant des phases successives d'élévation et d'abaissement. On observe que chaque cycle commence par une montée rapide jusqu'à son maximum, suivie par une descente vers un minimum, avant de remonter de nouveau. Pour chaque configuration, ce comportement se répète sur toute la durée de la simulation, ce qui indique une fréquence stable des oscillations. En général, en comparant les deux cas, les courbes pour le cas flexible de chaque configuration présentent des irrégularités et des oscillations secondaires plus visible autour des maxima et des minima. Ces oscillations sont dues aux effets de flexibilité des parois.

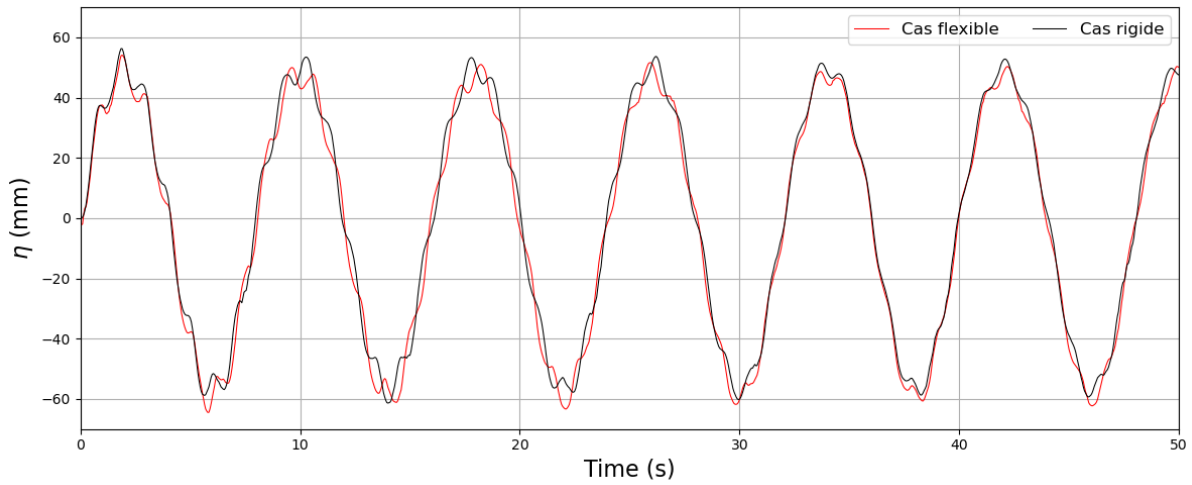
Nous observons aussi que pour les deux premières configurations  $A_1$  et  $A_2$ , l'amplitude dans le cas rigide est stable et d'environ 121,43 mm et 117,86 mm pour la première et la deuxième configuration respectivement. En revanche, dans le cas flexible, nous observons une diminution d'amplitude et on atteint une stabilisation au 6<sup>ème</sup> cycle pour la première configuration et au 7<sup>ème</sup> cycle pour la deuxième configuration. On atteint une amplitude de 78,57 mm et 64,29 mm pour la première et la deuxième configuration respectivement. Cette diminution est due au débordement du liquide vu précédemment, qui résulte en une perte de volume du liquide. Cette perte a une influence sur la hauteur de remplissage du liquide à l'intérieur du réservoir et qui implique la diminution en amplitude. Pour les mêmes configurations, nous observons ainsi des plateaux au niveau des creux où l'amplitude atteint un minima de 150 mm. Ces plateaux durent 1,3s pour le cas rigide et 1,55s pour le cas flexible dans la première configuration, et 1,03s pour le cas rigide et 1,38s pour le cas flexible dans la deuxième configuration.

Pour les autres cas ( $A_3, A_4, A_5$  et  $A_6$ ), nous observons que pour les deux cas flexible et rigide de chaque configuration, les pics ont presque la même amplitude ( $\pm 2$  mm entre eux). Le tableau 6.2 montre l'amplitude maximale des cas flexible et rigide pour chaque configuration avec la différence entre elles en %. Nous observons que la différence d'amplitudes entre les deux cas diminue avec l'augmentation de la période de la houle. Ceci implique que **la flexibilité des parois entraîne la réduction de l'amplitude du ballottement**. Elle entraîne aussi un léger déphasage en période par rapport au cas rigide, à partir de la fin du premier cycle.

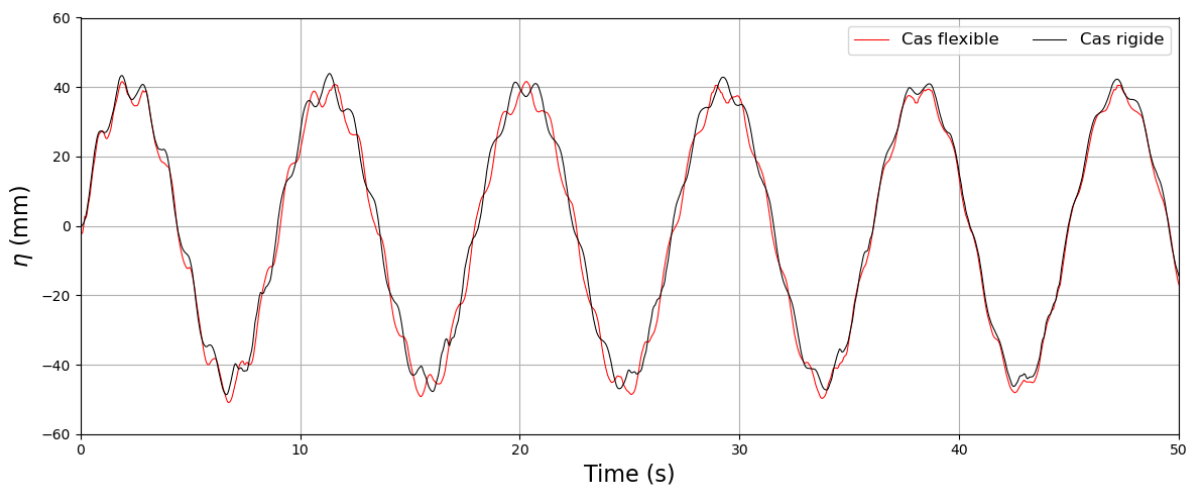
TABLE 6.2 – Amplitude maximale des cas flexible et rigide pour chaque configuration

| Configuration $A_i$ | Cas rigide [mm] | Cas flexible [mm] | Différence [%] |
|---------------------|-----------------|-------------------|----------------|
| $A_1$               | 121,43          | 78,57             | 35,3           |
| $A_2$               | 117,86          | 64,29             | 45,45          |
| $A_3$               | 91,67           | 88,89             | 3,03           |
| $A_4$               | 52,7            | 51,25             | 2,75           |
| $A_5$               | 41,03           | 40                | 2,51           |
| $A_6$               | 30,76           | 30                | 2,47           |

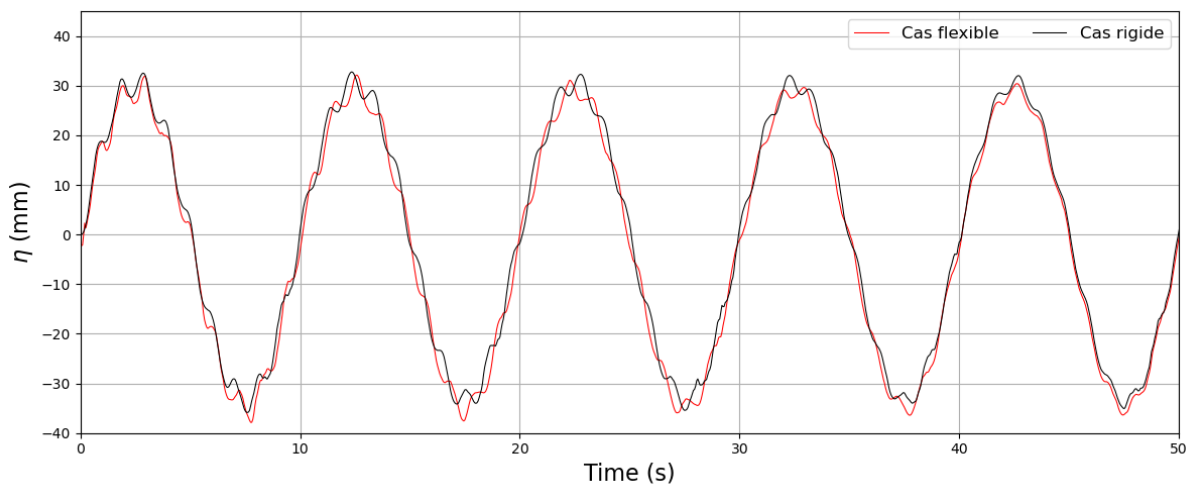
(a)  $A_1 : T_p = 6 \text{ s}, h_{cc} = 0,375 \text{ m}, \lambda = 1,4 \text{ m}$ (b)  $A_2 : T_p = 5 \text{ s}, h_{cc} = 0,25 \text{ m}, \lambda = 0,975 \text{ m}$ (c)  $A_3 : T_p = 6 \text{ s}, h_{cc} = 0,25 \text{ m}, \lambda = 1,4 \text{ m}$ **Figure 6.4** – Élévation de la surface libre à 20 mm de la paroi droite



(a)  $A_4 : T_p = 8 \text{ s}, h_{cc} = 0,25 \text{ m}, \lambda = 2,5 \text{ m}$



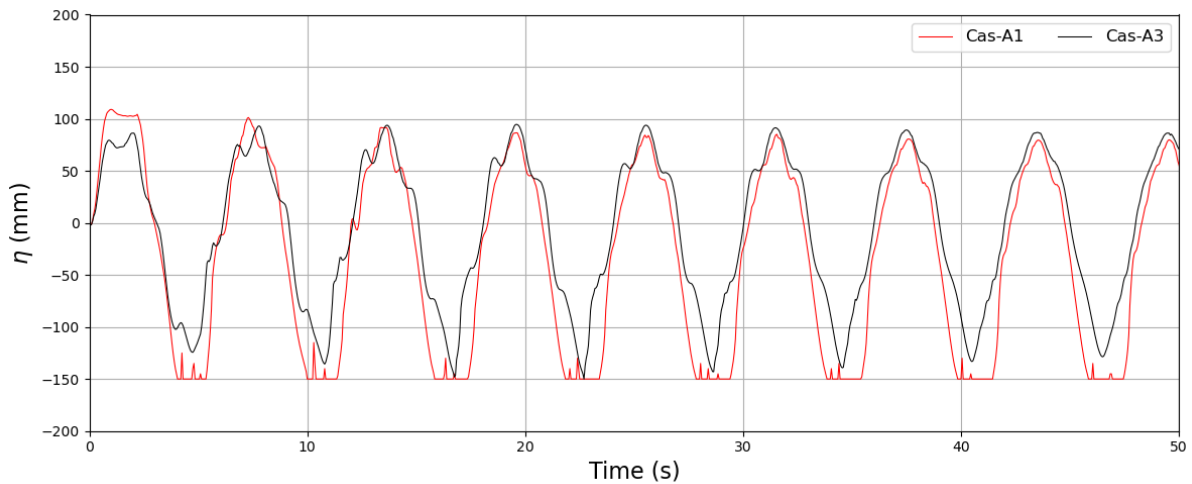
(b)  $A_5 : T_p = 9 \text{ s}, h_{cc} = 0,25 \text{ m}, \lambda = 3,075 \text{ m}$



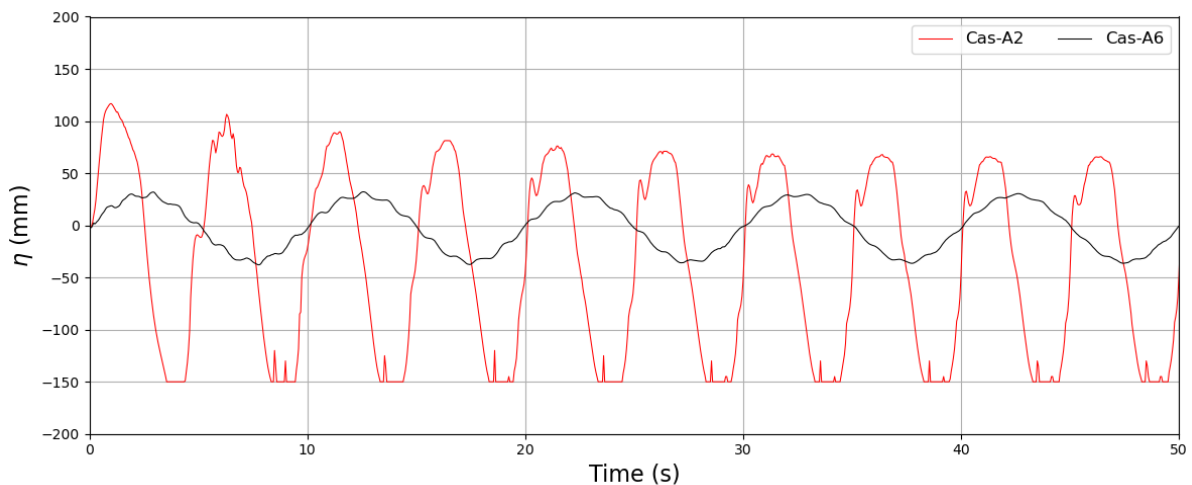
(c)  $A_6 : T_p = 10 \text{ s}, h_{cc} = 0,25 \text{ m}, \lambda = 3,9 \text{ m}$

**Figure 6.5** – Élévation de la surface libre à 20 mm de la paroi droite

Afin de vérifier d'une part l'influence de la hauteur crête à creux de la houle, et d'autre part l'effet de la période et de la longueur d'onde sur le ballonnement, nous avons fait plusieurs comparaisons. Les configurations  $A_1$  et  $A_3$  ont la même période et la même longueur d'onde, et des hauteurs crête à creux de la houle différentes. La figure 6.6a montre la comparaison des résultats de ces deux configurations. Nous observons que au niveau des pics la différence en amplitude entre les deux configurations est moindre. Au niveau des creux, on observe des plateaux pour la configuration  $A_1$ . Les configurations  $A_2$  et  $A_6$  ont la même crête à creux de la houle, et des périodes-longueurs d'ondes différentes. La figure 6.6b montre la comparaison des résultats des configurations précédemment présentées. Dans ce cas, la différence entre les résultats est notoire. Nous observons que l'influence de la période de la houle et la longueur d'onde sur le ballonnement est plus significative que l'effet de la hauteur crête à creux. En conclusion, l'augmentation de l'une des périodes ou de l'amplitude entraîne la réduction de l'autre.

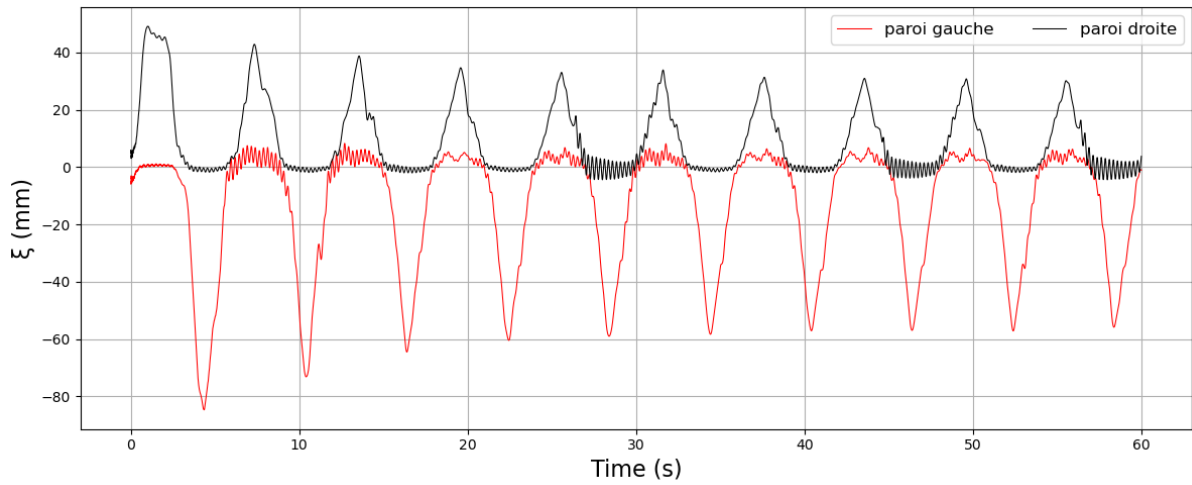


(a)  $A_1 : T_p = 6 \text{ s}$ ,  $h_{cc} = 0,375 \text{ m}$ ,  $\lambda = 1,4 \text{ m}$  et  $A_3 : T_p = 6 \text{ s}$ ,  $h_{cc} = 0,25 \text{ m}$ ,  $\lambda = 1,4 \text{ m}$

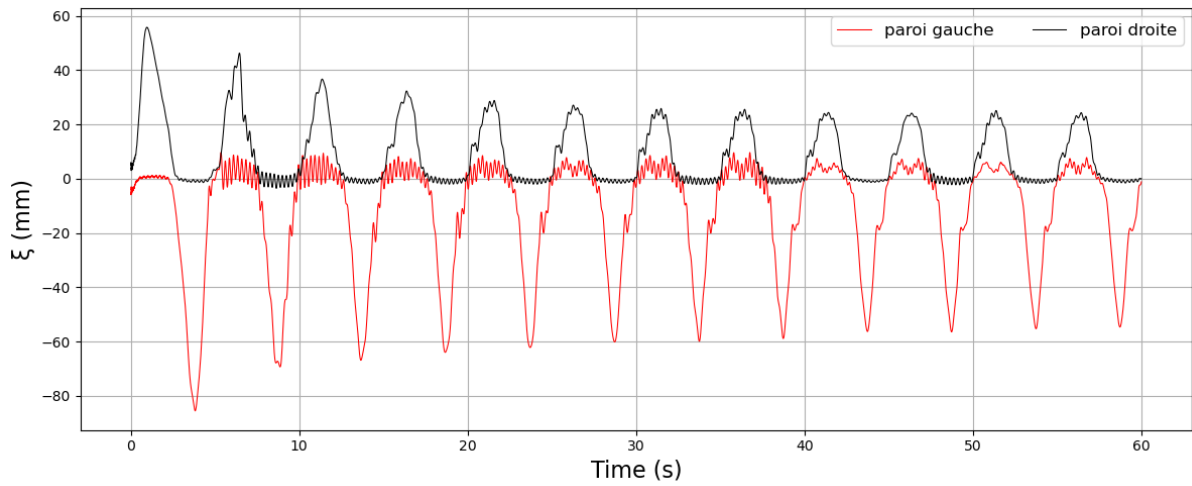


(b)  $A_2 : T_p = 5 \text{ s}$ ,  $h_{cc} = 0,25 \text{ m}$ ,  $\lambda = 0,975 \text{ m}$  et  $A_6 : T_p = 10 \text{ s}$ ,  $h_{cc} = 0,25 \text{ m}$ ,  $\lambda = 3,9 \text{ m}$

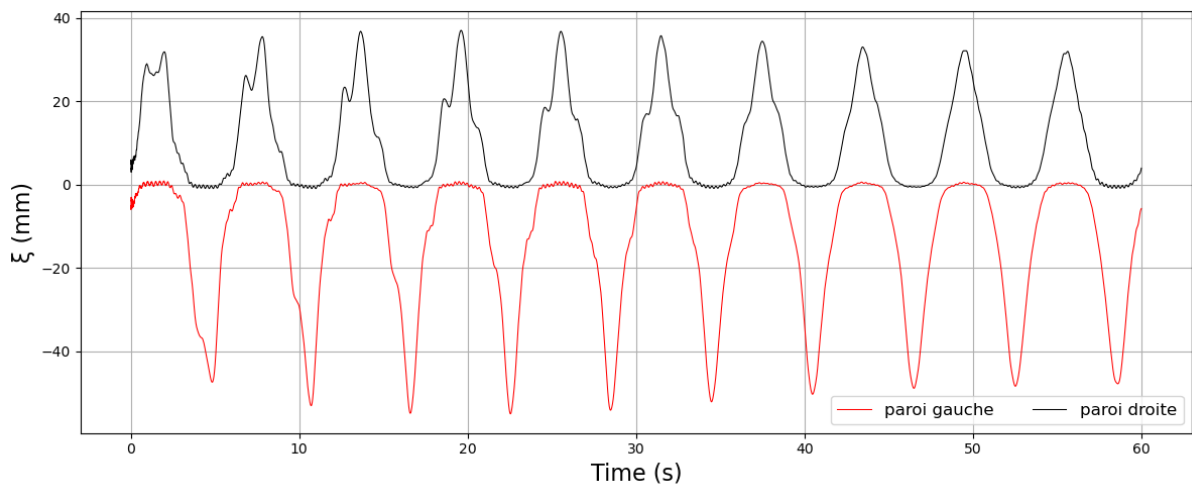
**Figure 6.6** – Vibrations des contours de fraction volumique instantanés numériques du ballonnement à l'intérieur de la cuve à 50% de remplissage : à gauche cas flexible, à droite cas rigide



(a)  $A_1 : T_p = 6 \text{ s}, h_{cc} = 0,375 \text{ m}, \lambda = 1,4 \text{ m}$

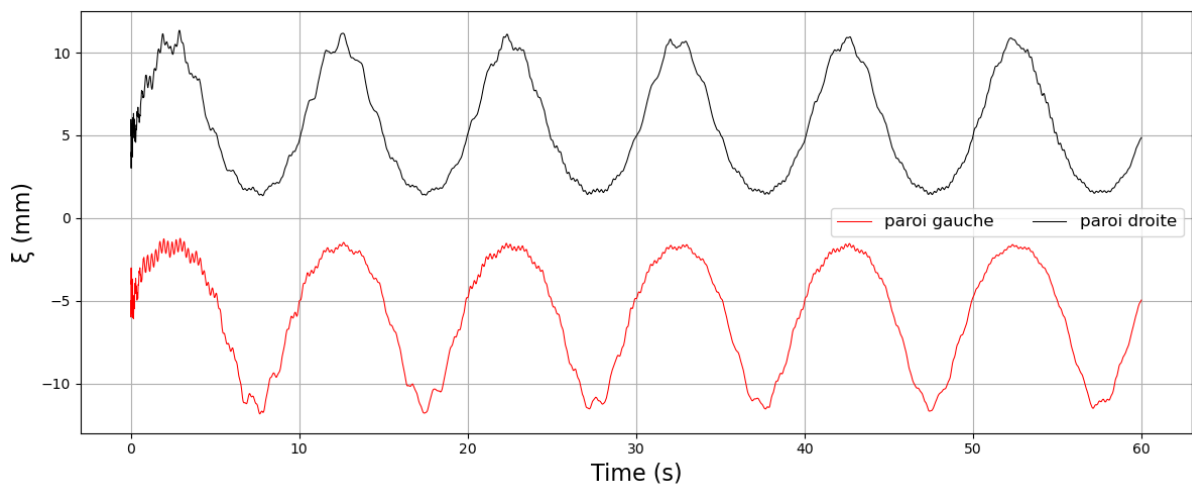
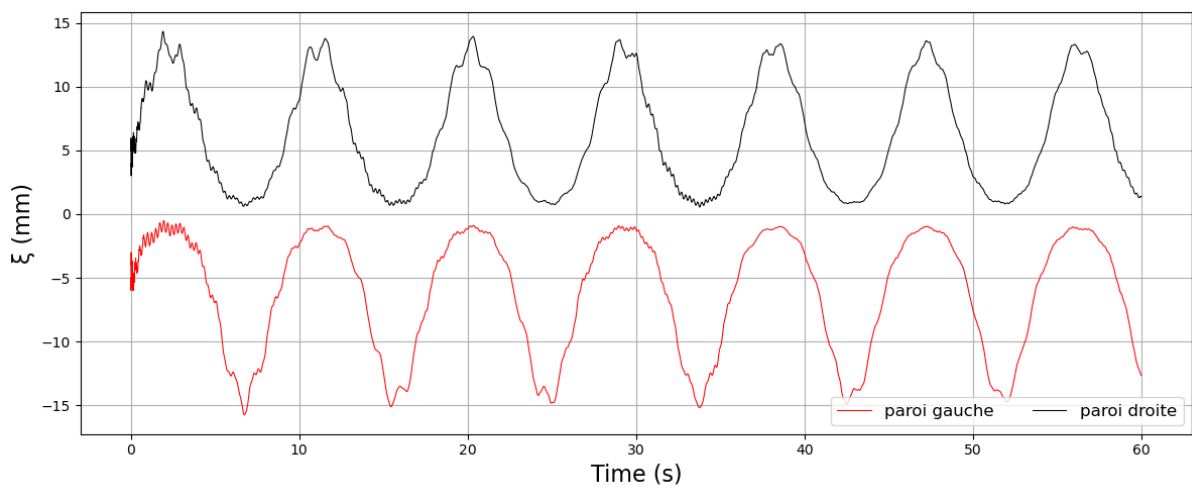
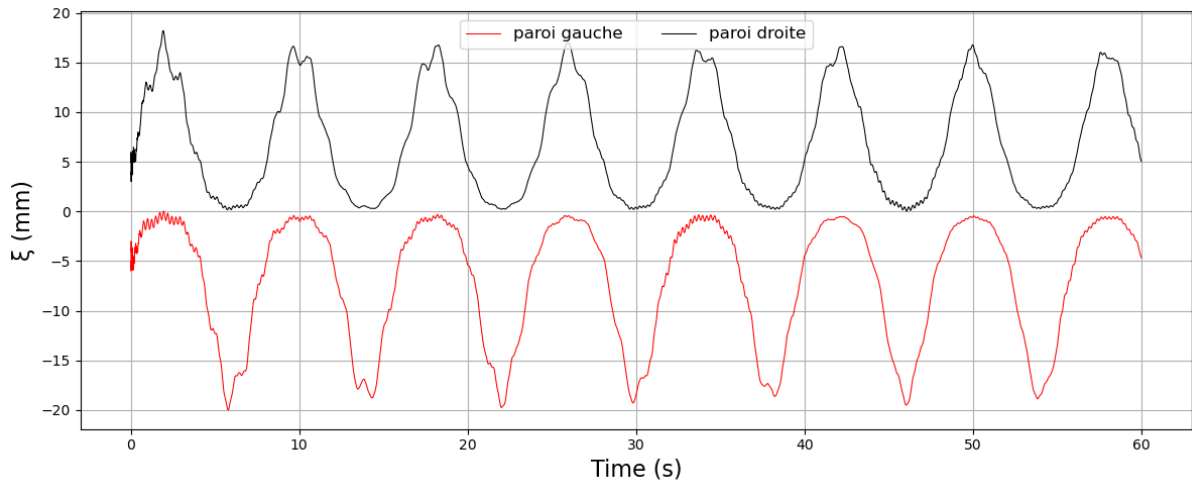


(b)  $A_2 : T_p = 5 \text{ s}, h_{cc} = 0,25 \text{ m}, \lambda = 0,975 \text{ m}$



(c)  $A_3 : T_p = 6 \text{ s}, h_{cc} = 0,25 \text{ m}, \lambda = 1,4 \text{ m}$

Figure 6.7 – Déplacements des parois droite et gauche supérieures du réservoir



**Figure 6.8** – Déplacements des parois droite et gauche supérieures du réservoir

L'évolution temporelle du déplacement des parois de chaque configuration est illustrée sur les figures 6.7 et 6.8. En général, le comportement des parois est le même dans chaque configuration, où les parois oscillent alternativement. Lorsque l'une des parois oscille, nous observons que l'autre paroi vibre. Cela est plus visible dans les deux premières configurations. Le déplacement maximal des parois (pics) diminue au fil du temps. Il atteint une valeur stable après quelques cycles. Par exemple dans la figure 6.4a, on observe la stabilisation à partir du 7<sup>ème</sup> cycle ( $\xi = 30\text{ mm}$ ). Il s'agit de la valeur du déplacement maximal final. Les déplacements maximaux premiers et finaux des parois de chaque configuration sont présentés dans le tableau 6.3.

TABLE 6.3 – Déplacement maximale des parois de chaque configuration

| Configuration | Déplacement de la paroi droite [mm] |           | Déplacement de la paroi gauche [mm] |           |
|---------------|-------------------------------------|-----------|-------------------------------------|-----------|
|               | Premier pic                         | Pic final | Premier pic                         | Pic final |
| $A_1$         | 45                                  | 30m       | -85                                 | -45       |
| $A_2$         | 54, 29                              | 25, 71    | -85, 71                             | -55, 72   |
| $A_3$         | 34, 55                              | 31, 82    | -52, 73                             | -47, 27   |
| $A_4$         | 18, 75                              | 16, 04    | -20                                 | -15       |
| $A_5$         | 14, 38                              | 13, 75    | -15, 63                             | -15, 44   |
| $A_6$         | 11, 36                              | 10, 91    | -11, 82                             | -11, 36   |

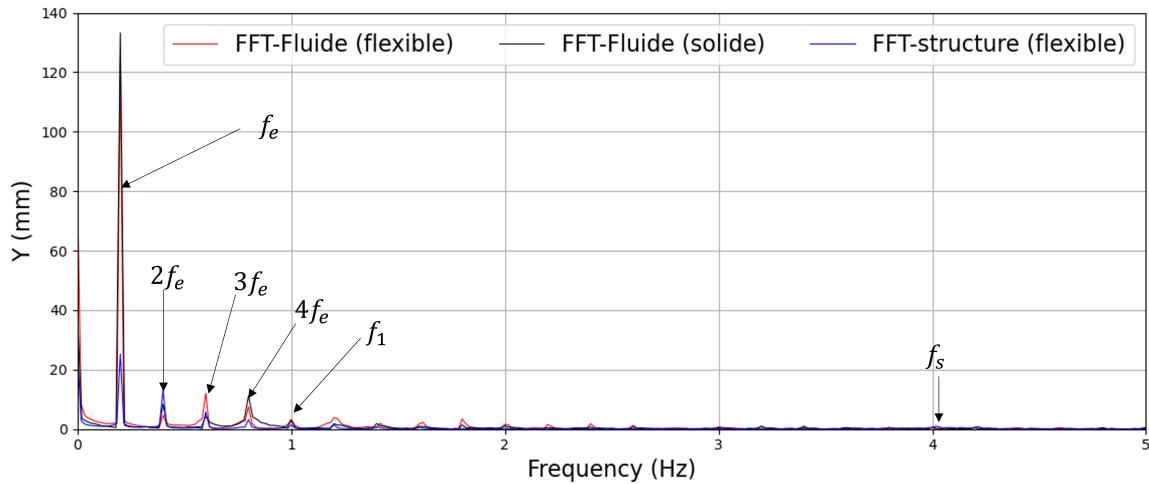
À partir du tableau 6.3, nous observons que l'amplitude du déplacement des parois diminue en augmentant la période de la houle  $hcc$  et la longueur d'onde  $\lambda$ . Entre la paroi gauche et la paroi droite, on trouve que l'amplitude du déplacement de la paroi gauche est plus grande que celle de la paroi droite. Ceci est l'effet du mouvement appliqué (voir section 3.2.2).

Nous avons appliqué une FFT (Transformée Rapide de Fourier) sur les réponses temporelles des élévations de la surface libre et des déplacements des parois du cas d'un réservoir flexible des configurations  $A_2$  et  $A_6$ . La figure 6.9 affiche les amplitudes des modes  $\Upsilon$  en fonction de la fréquence pour les configurations  $A_2$  et  $A_6$ . Dans la configuration  $A_2$  (figure 6.9a), le premier pic de fréquence de  $f_e = 0, 19\text{ Hz}$  correspond approximativement la fréquence d'excitation calculée  $f_{e,a} = 0, 2\text{ Hz}$  (5%). La fréquence propre du ballotement est de  $f_1 = 0, 98\text{ Hz}$ , elle est comparable avec la fréquence propre analytique  $f_{1,a} = 0, 96\text{ Hz}$  avec une différence relative de 2,08%. Avec la relation 6.9 [104], nous avons calculé analytiquement la fréquence propre de la structure  $f_{s,a} = 4, 02\text{ Hz}$ . Elle correspond au dernier petit pic observé dans la FFT  $f_s = 4, 03\text{ Hz}$  avec une différence de 0,25%. Cette fréquence est calculé. La FFT génère ainsi d'autres fréquences 0,35 Hz, 0,64 Hz et 0,83 Hz qui se rapprochent des multiples de la fréquence propre du ballotement ( $2f_e$ ,  $3f_e$  et  $4f_e$ ).

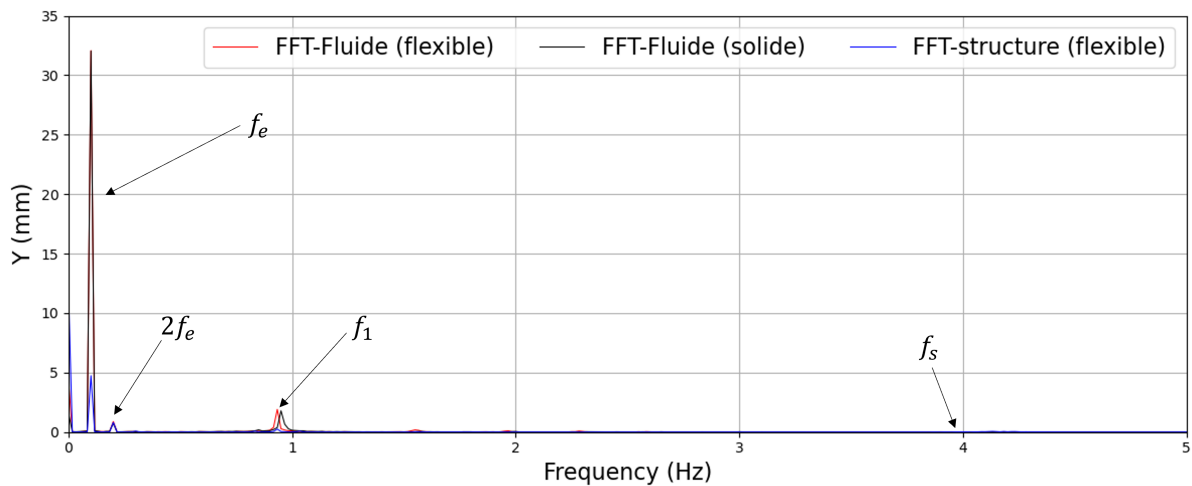
$$f_{s_a} = \frac{1,875^2}{2\pi H_s} \sqrt{\frac{EI}{\rho_s A_s}} \quad (6.9)$$

Dans la configuration  $A_6$  (figure 6.9b), le pic de fréquence 0,1 Hz correspond exactement à la fréquence d'excitation calculé analytiquement  $f_{e,a} = 0, 1\text{ Hz}$ . Le pic suivant  $f = 0, 2\text{ Hz}$  correspond à  $2f_e$ . Le troisième pic (0,93 Hz pour le cas flexible et 0,96 Hz pour le cas rigide) correspond à la fréquence propre de ballotement calculée analytiquement  $f_{1,a} = 0, 96\text{ Hz}$ , avec une différence de 3,13% pour le cas flexible. La FFT de la fréquence de la structure est trop petite, elle est égale à 4,01 Hz, correspond à une différence de 0,25% par rapport

à la fréquence analytique  $f_{s,a} = 4,02 \text{ Hz}$ . Nous observons que le pic (l'amplitude du mode) correspond à la fréquence d'excitation dans la configuration  $A_2$  est plus grande que celui dans la configuration  $A_6$ . Ceci correspond au grand écart en amplitude vu dans la figure 6.6b entre les deux configurations  $A_2$  et  $A_6$ . L'application de la FFT des autres configurations sont présentées dans l'annexe D



(a)  $A_2 : T_p = 5 \text{ s}, h_{cc} = 0,25 \text{ m}, \lambda = 0,975 \text{ m}$



(b)  $A_6 : T_p = 10 \text{ s}, h_{cc} = 0,25 \text{ m}, \lambda = 3,9 \text{ m}$

**Figure 6.9** – FFT appliquée sur l'évolution temporelle de l'élévation de la surface libre et sur les déplacements des parois flexible

## 6.3 Bilan

Une étude par modélisation numérique de l'interaction entre les parois du réservoir et le ballonnement est réalisée dans le cas des effets combinés du tangage et du pilonnement dus à la houle. Il ressort de cette étude, que la flexibilité des parois a une influence sur l'amplitude du ballonnement. En effet, l'amplitude de déplacement de la surface libre est réduite dans le cas avec des parois rigides par rapport au cas avec des parois souples. Les fréquences obtenues numériquement sont en bon accord avec la solution analytique pour le cas flexible et le cas rigide.

---

## Conclusion générale

---

### Les conclusions

Certains systèmes de récupération des énergies marines renouvelables sont montés sur des flotteurs. C'est le cas des éoliennes offshores flottantes et des hydroliennes offshores flottantes. En mer, ces machines sont soumises à l'action de la houle qui peut impacter la stabilité de celles-ci et induire des déformations de la structure. L'utilisation des réservoirs partiellement remplis d'eau peut être faite, de manière à ce qu'un ballonnement apparaisse. Ce dernier s'établit en opposition de phase avec la houle, ce qui peut permettre de réduire les impacts de la houle sur le mouvement du flotteur porteur. L'objectif principal de cette thèse était de modéliser la dynamique de ballonnement des liquides dans des réservoirs flexibles déformables flottants en mouvement de tangage ou de roulis. Dans la littérature, il y a peu de travaux sur le mouvement de tangage induisant un ballonnement dans les réservoirs, où il est reproduit que par une plateforme à 6 degrés de liberté (6DOF).

Dans cette thèse, un dispositif expérimental a été mis en œuvre pour étudier et analyser le phénomène de ballonnement dans une cuve soumise au mouvement de tangage. Ce type de dispositif permet de recréer dans un environnement contrôlé, des conditions similaires à celles rencontrées en mer, avec des oscillations régulières et mesurables. Le dispositif est mis en mouvement de rotation grâce à un système mécanique. Ce système transforme la vitesse de rotation constante d'un moteur, en mouvement angulaire de va-et-vient de la cuve. Cette expérience, nous a permis de constituer une base de données expérimentales. Ainsi, six configurations qui dépendent de types de houles ont été explorées. Les trois premières configurations correspondent à une houle courte  $\lambda = 56 m$  ( $h_{cc} = 15 m$ ),  $\lambda = 56 m$  ( $h_{cc} = 10 m$ ) et  $\lambda = 39 m$  ( $h_{cc} = 10 m$ ), la dernière correspond à une houle longue  $\lambda = 156 m$  ( $h_{cc} = 10 m$ ). Les deux autres configurations correspondent à une moyenne houle  $\lambda = 100 m$  ( $h_{cc} = 10 m$ ) et  $\lambda = 123 m$  ( $h_{cc} = 10 m$ ). Chaque configuration correspond à une période caractéristique de la houle et une vitesse de rotation du moteur.

Un modèle numérique a été mis en place pour étudier le ballonnement dans une cuve soumise à une excitation externe ainsi que les déformations des parois induites par celui-ci. Pour ce faire, un couplage a été réalisé entre un code CFD (OpenFOAM) basé sur la

méthode des volumes finis et un code CSD (FEniCS) basé sur la méthode des éléments finis via le module de couplage preCICE. Ce modèle numérique a été soumis à plusieurs cas tests. Une première confrontation a été réalisée avec des données expérimentales, théoriques et numériques issues de la littérature pour le cas d'un réservoir rigide soumis à une excitation horizontale harmonique (sinusoïdale), et a confirmé le bon comportement du code.

De plus, une confrontation avec l'expérience mise en place dans la thèse a permis d'évaluer le comportement du modèle dans le cas d'une excitation oscillatoire alternative de type tangage. Les résultats sont en bon accord avec les résultats issus du dispositif expérimental.

Par la suite, le modèle, dans une approche simplifiée de la prise en compte des efforts d'entraînement, a été appliqué pour évaluer les déformations induites par les effets des vagues sur la déformation des parois flexibles du réservoir. L'approche fluide-structure a permis de mettre en évidence les déformations induites. Ainsi, cette étude a permis de mettre en évidence l'effet de la flexibilité sur l'amplitude du ballonnement ainsi que la période des fluctuations de la surface libre d'un côté, et l'effet du ballonnement sur la déformation des parois, d'un autre côté. Ceci a fait l'objet d'un article de revue [35].

Enfin, une application du modèle a été faite en intégrant les effets du pilonnement en plus de l'effet de tangage dus aux vagues. La configuration est celle du chapitre 5. Il met en évidence une réduction de l'amplitude du ballonnement qui varie entre 2,47% et 45,45% selon la configuration. À noter, que dans ce cas la souplesse du matériau est assez forte.

### Les perspectives

Le modèle développé ne prend pas en compte les interactions réciproques entre le flotteur et la houle. Cette limitation restreint en partie l'applicabilité du modèle dans des conditions réelles. Aussi, nous souhaitons mettre en place une modélisation plus complète intégrant le mouvement de la houle, son interaction avec le flotteur avec une procédure de type trois degrés de liberté. Par ailleurs, une attention particulière sera portée au mouvement de l'eau dans le réservoir et son interaction avec les parois du réservoir. Pour cela, nous mettons en place un modèle numérique avec un maillage associé au canal et un maillage associé à l'ensemble flotteur, cuve et fluide contenu. La génération et la propagation de la houle pourraient être simulées via un outil comme OlaFlow.

---

## Bibliographie

---

- [1] Brandely A. “Étude Du Ballotement De Fluide Dans Les Réservoirs À Carburant : Approches Numérique Et Expérimentale”. Thèse de doct. Université De Technologie De Compiègne, 2016.
- [2] Feichtner A. et al. “Modelling Wave Interaction Within Porous Structures Using OpenFOAM”. en. In : *Conference Track : Wave Hydrodynamic Modelling* (2019).
- [3] Feng A., Cai H. et You Y. “Freely Floating Body Motion Responses Induced By Wave And Current In Seabed Conditions”. en. In : *Ocean Engineering* 172 (jan. 2019), p. 396-406. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2018.12.002](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.12.002). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801818321188>.
- [4] Kamath A., Grotle E.L. et Bihs H. “Numerical Investigation Of Sloshing Under Roll Excitation At Shallow Liquid Depths And The Effect Of Baffles”. In : *J. Marine. Sci. Appl.* 20.2 (2021), p. 185-200. ISSN : 1671-9433, 1993-5048. DOI : [10.1007/s11804-021-00198-y](https://doi.org/10.1007/s11804-021-00198-y).
- [5] Karola A. et al. “The Influence Of Wave Modelling On The Motions Of Floating Bodies”. In : *Ocean Engineering* 306 (2024-08), p. 118067. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2024.118067](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118067). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801824014057>.
- [6] Rodriguez-Ferran A., Pérez-Foguet A. et Huerta A. “Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) Formulation For Hyperelastoplasticity”. en. In : *International Journal For Numerical Methods In Engineering* (2002).
- [7] Seghir A. *Cours Des Éléments Finis*. 2014.
- [8] Seghir A., Bonnet G. et Tahakourt A. “Liquid Filled Tectangular Reservoir Analysis Using A Coupled FEM/BEM Model”. In : *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURODDYN 2011* (2011).
- [9] Souto-Iglesias A. et al. “Liquid Moment Amplitude Assessment if Sloshing Type Problems With Smooth Particle Hydrodynamics”. In : *Ocean Engineering* 33.11 (2006), p. 1462-1484. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2005.10.011](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2005.10.011).
- [10] Trimulyono A., Samuel S. et Iqbal M. “Sloshing Simulation Of Single-Phase And Two-Phase SPH Using DualSPHysics”. In : *Kapal : Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan* 17.2 (2020), p. 50-57. ISSN : 2301-9069, 1829-8370. DOI : [10.14710/kapal.v17i2.27892](https://doi.org/10.14710/kapal.v17i2.27892). URL : <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/kapal/article/view/27892>.

- [11] Veletsos A. “Seismic Effects In Flexible Liquid Storage Tanks”. In : *Proceedings of The International Association For Earthquake Engineering Fifth World Conference* (1974), p. 630-639.
- [12] Craik A.D.D. “The Origins Of Water Wave Theory”. en. In : *Annual Review Of Fluid Mechanics* 36. Volume 36, 2004 (jan. 2004). Publisher : Annual Reviews, p. 1-28. ISSN : 0066-4189, 1545-4479. DOI : [10.1146/annurev.fluid.36.050802.122118](https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122118). URL : <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122118>.
- [13] Mouronval A.S. et al. “Couplage Fluide-Structure Pour l’Étude Des Interactions Choc/Obstacles”. In : *13e Colloque National En Calcul Des Structures*. Université Paris-Saclay, 2017, p. 1-8.
- [14] *La Forme Idéale D’une Aile*. URL : <https://interstices.info/la-forme-ideale-dune-aile/>.
- [15] Doulchet B. “Simulations des Interactions Fluide-Structure par une Formulation Bilaterale Fortement Couplée Sous OpenFOAM”. Thèse de doct. Polytechnique Montréal, 2019.
- [16] Molin B. *Hydrodynamique Des Structures Offshore*. Editions TECHNIP, 2002.
- [17] Ted B. “Fluid-Structure Interaction”. In : *Computers Bi Structures* 12 (1980), p. 459-469.
- [18] Jiang C., El Moctar O. et Zhang G. “Nonlinear Modeling Of Wave–Structure Interaction For A Flexible Floating Structure”. In : *Ocean Engineering* 300 (2024), p. 117489. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2024.117489](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117489). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801824008266>.
- [19] Hirt C.W. et Nichols B.D. “Volume Of Fluid (VOF) Method For The Dynamics Of Free Boundaries”. In : *Journal Of Computational Physics* 39.1 (1981), p. 201-225. ISSN : 00219991. DOI : [10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5).
- [20] *Basler ace 1300-200um Camera*. URL : <https://www.baslerweb.com/en/shop/aca1300-200um/>.
- [21] *La Catastrophe Du Pont De La Tay*. URL : [https://www.timbresponts.fr/articles\\_et\\_publications/la\\_catastrophe\\_du\\_pont\\_de\\_la\\_tay.htm](https://www.timbresponts.fr/articles_et_publications/la_catastrophe_du_pont_de_la_tay.htm).
- [22] Yichao CH. et Mi-An X. “Numerical Simulation Of Liquid Sloshing With Different Filling Levels Using OpenFOAM And Experimental Validation”. In : *Water* 10.12 (2018), p. 1752. ISSN : 2073-4441. DOI : [10.3390/w10121752](https://doi.org/10.3390/w10121752).
- [23] Hernandez-Hernandez D. et al. “Experimental Findings Of The Suppression Of Rotary Sloshing On The Dynamic Response Of A Liquid Storage Tank”. In : *Journal Of Fluids And Structures* 96 (juill. 2020), p. 103007. ISSN : 08899746. DOI : [10.1016/j.jfluidstructs.2020.103007](https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2020.103007). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0889974620300426> (visité le 11/06/2024).
- [24] Liu D. et Lin P. “A Numerical Study Of Three-Dimensional Liquid Sloshing In Tanks”. en. In : *Journal of Computational Physics* 227.8 (2008), p. 3921-3939. ISSN : 00219991. DOI : [10.1016/j.jcp.2007.12.006](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.12.006). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021999107005414>.
- [25] Luo D. et al. “Sloshing Effect Analysis Of Liquid Storage Tank Under Seismic Excitation”. In : *Structures* 43 (2022), p. 40-58. ISSN : 23520124. DOI : [10.1016/j.istruc.2022.06.030](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.06.030).
- [26] Zhao D. et al. “Nonlinear Sloshing In Rectangular Tanks Under Forced Excitation”. In : *International Journal Of Naval Architecture And Ocean Engineering* 10.5 (2018), p. 545-565. ISSN : 20926782. DOI : [10.1016/j.ijnaoe.2017.10.005](https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2017.10.005).

- [27] Lee D.H. et al. "A Parametric Sensitivity Study On LNG Tank Sloshing Loads By Numerical Simulations". en. In : *Ocean Engineering* 34.1 (jan. 2007), p. 3-9. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2006.03.014](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2006.03.014). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801806001077> (visité le 11/06/2024).
- [28] *DaVis*. URL : <https://www.lavision.de/fr/products/davis-software/>.
- [29] *Skyscraper's Rooftop Pool Spills Everywhere As Earthquake Hits*. URL : <https://gizmodo.com/skyscrapers-rooftop-pool-spills-everywhere-as-earthquake-1834215176>.
- [30] *Détroit de Tacoma*. URL : <http://www.off-ladhyx.polytechnique.fr/people/pascal/pdf/Poster-tacoma-2010.pdf>.
- [31] Longatte E. et al. "Explicit And Implicit Code Coupling Schemes In Fluid Structure Interaction". In : *Volume 4 : Fluid Structure Interaction*. Denver, Colorado, USA : ASMEDC, 2005, p. 241-250. ISBN : 978-0-7918-4189-1. DOI : [10.1115/PVP2005-71647](https://doi.org/10.1115/PVP2005-71647). URL : <https://asmedigitalcollection.asme.org/PVP/proceedings/PVP2005/41898/241/311018> (visité le 29/05/2024).
- [32] Paiva E.D. "A simplified Description Of Bodies Floating In The Water". In : *Revista Brasileira de Ensino de Física* 41.4 (2019), e20190066. ISSN : 1806-9126, 1806-1117. DOI : [10.1590/1806-9126-rbef-2019-0066](https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2019-0066).
- [33] URL : [https://files.structurae.net/files/350high/prelinger/tacoma\\_old6.jpg](https://files.structurae.net/files/350high/prelinger/tacoma_old6.jpg).
- [34] *Parc Éolien En Mer : Principe, État Des Lieux Et Défis*. URL : <https://www.decarbonation2030.fr/parc-eolien-mer-principe-etat-lieux-defis/>.
- [35] Ghouini F. et al. "FSI Modeling Of Fluid Liquid Sloshing In A Flexible Floating Tank Under Regular Wave Effect". In : *Larhyss Journal* (2024).
- [36] Hartmann F. et Katz C. *Structural Analysis With Finite Elements*. 2nd ed. Berlin ; New York : Springer, 2007. 597 p. ISBN : 978-3-540-49698-4.
- [37] Pistani F. et Thiagarajan K. "Experimental Measurements And Data Analysis Of The Impact Pressures In A Sloshing Experiment". In : *Ocean Engineering* 52 (2012), p. 60-74. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2012.06.002](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.06.002). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801812001990>.
- [38] Lord Rayleigh F.R.S. "On The Resultant Of A Large Number Of Vibrations Of The Same Pitch And Of Arbitrary Phase". EN. In : *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* (août 1880). Publisher : Taylor & Francis Group. DOI : [10.1080/14786448008626893](https://doi.org/10.1080/14786448008626893). URL : <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786448008626893>.
- [39] Dodge F.T. *The New "dynamic Behavior of Liquids In Moving Containers"*. Southwest Research Inst., 2000. URL : <https://books.google.fr/books?id=RltitwAACAAJ>.
- [40] Hehl F.W. et Itin Y. "The Cauchy Relations In Linear Elasticity Theory". In : *Journal of Elasticity* (2002).
- [41] Fourey G. et al. "An Efficient FSI Coupling Strategy Between Smoothed Particle Hydrodynamics And Finite Element Methods". en. In : *Computer Physics Communications* 217 (août 2017), p. 66-81. ISSN : 00104655. DOI : [10.1016/j.cpc.2017.04.005](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2017.04.005). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010465517301194>.
- [42] Wu G.X., Ma Q.W. et Eatock Taylor R. "Numerical Simulation Of Sloshing Waves In A 3D Tank Based On A Finite Element Method". In : *Applied Ocean Research* 20.6 (1998), p. 337-355. ISSN : 01411187. DOI : [10.1016/S0141-1187\(98\)00030-3](https://doi.org/10.1016/S0141-1187(98)00030-3). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141118798000303>.

- [43] The Wamdi GROUP. “The WAM Model—A Third Generation Ocean Wave Prediction Model”. In : *Journal of Physical Oceanography* (1988). Section : Journal of Physical Oceanography. ISSN : 1520-0485. URL : [https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/18/12/1520-0485\\_1988\\_018\\_1775\\_twmtgo\\_2\\_0\\_co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/phoc/18/12/1520-0485_1988_018_1775_twmtgo_2_0_co_2.xml).
- [44] Akyildiz H. et Ünal E. “Experimental Investigation Of Pressure Distribution On A Rectangular Tank Due To The Liquid Sloshing”. In : *Ocean Engineering* 32.11 (2005), p. 1503-1516. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2004.11.006](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2004.11.006).
- [45] Akyildiz H. et Ünal E. “Sloshing In A Three-Dimensional Rectangular Tank : Numerical Simulation And Experimental Validation”. In : *Ocean Engineering* 33.16 (2006), p. 2135-2149. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2005.11.001](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2005.11.001).
- [46] Bihs H. et Kamath A. “A combined Level Set/Ghost Cell Immersed Boundary Representation For Floating Body Simulations”. In : *International Journal For Numerical Methods IN Fluids* (2017). DOI : [10.1002/flid.4333](https://doi.org/10.1002/flid.4333). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/flid.4333>.
- [47] Björn H., Elmar W. et Dieter D. “A Monolithic Approach To Fluid–Structure Interaction Using Space–Time Finite Elements”. In : *Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering* 193.23 (2004), p. 2087-2104. ISSN : 00457825. DOI : [10.1016/j.cma.2004.01.024](https://doi.org/10.1016/j.cma.2004.01.024).
- [48] Lamb H. *Hydrodynamics*. eng. New York, : Dover publications, 1945. (Visité le 05/12/2024).
- [49] Bungartz H.-J. et Schäfer M., éd. *Fluid-Structure Interaction : Modelling, Simulation, Optimisation*. en. Lecture notes in computational science and engineering 53. Berlin ; New York : Springer-Verlag, 2006. ISBN : 978-3-540-34595-4.
- [50] Versteeg H.K. et Malalasekera W. *An Introduction To Computational Fluid Dynamics : The Finite Volume Method*. en. 2nd ed. OCLC : ocm76821177. Harlow, England ; New York : Pearson Education Ltd, 2007. ISBN : 978-0-13-127498-3.
- [51] *Avantages et Inconvénients Des Fermes Éoliennes Offshore Et Des Énergies Marines Renouvelables*. URL : <https://www.lumo-france.com/blog/2023/05/17/avantages-et-inconvenients-des-fermes-eoliennes-offshore-et-des-energies-marines-renouvelables>.
- [52] Hadžić I. et al. “Computation Of Fow-Induced Motion Of Floating Bodies”. In : *Applied Mathematical Modelling* 29 (2005), p. 1196-1210.
- [53] *Image Représentant Le Stockage*. URL : <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQxPlWXr09IQR0rPvR0JJxAA-Kyxh20uy7NQw&s>.
- [54] *Lien de téléchargement : IPCV*.
- [55] Blevins J. *Nhanda : An Aboriginal Language Of Western Australia*. en. University of Hawaii Press, juill. 2001. ISBN : 978-0-8248-2375-7.
- [56] Dai J. et al. “Large Floating Structure with Free-Floating, Self-Stabilizing Tanks For Hydrocarbon Storage”. en. In : *Energies* 12.18 (2019), p. 3487. ISSN : 1996-1073. DOI : [10.3390/en12183487](https://doi.org/10.3390/en12183487). URL : <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/18/3487>.
- [57] De Hart J. et al. “A three-Dimensional Computational Analysis Of Fluid–Structure Interaction In The Aortic Valve”. en. In : *Journal Of Biomechanics* 36.1 (jan. 2003), p. 103-112. ISSN : 00219290. DOI : [10.1016/S0021-9290\(02\)00244-0](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(02)00244-0). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021929002002440>.
- [58] Donea J. et al. “Arbitrary Lagrangian–Eulerian Methods”. en. In : *Encyclopedia Of Computational Mechanics*. Section : 14. John Wiley & Sons, Ltd, 2004, p. 413-437. ISBN : 978-0-470-09135-7. DOI : [10.1002/0470091355.ecm009](https://doi.org/10.1002/0470091355.ecm009).
- [59] Zheng J. et al. “Numerical Study Of The Interfacial Sloshing Wave Interaction With A Porous Bottom Layer In A Partially Filled Rectangular Tank”. In : *Ocean*

- Engineering* 217 (2020), p. 107990. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2020.107990](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107990). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801820309392>.
- [60] Aranha J.A.P. “A Formula For ‘Wave Damping’ In The Drift Of A Floating Body”. In : *Journal of Fluid Mechanics* 275 (1994), p. 147-155. ISSN : 0022-1120, 1469-7645. DOI : [10.1017/S0022112094002314](https://doi.org/10.1017/S0022112094002314).
- [61] Gilloteaux J.C. “Mouvements De Grande Amplitude D’un Corps Flottant En Fluide Parfait. Application À La Récupération De L’Énergie Des Vagues.” en. Thèse de doct. Ecole Centrale de Nantes (ECN), Université de Nantes, 2007.
- [62] Myrillas K. et al. “CFD And experimental investigation Of Sloshing Parameters For The Safety Assessment Of HLM Reactors”. In : *Nuclear Engineering And Design* 312 (2017), p. 317-326. ISSN : 00295493. DOI : [10.1016/j.nucengdes.2016.06.042](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.06.042).
- [63] Kha K.Q.N. et al. “Numerical Investigation Of Liquid Sloshing In 2D Flexible Tanks Subjected to Complex External Loading”. en. In : *Journal of Fluid Structure* (2024).
- [64] Khouf L. et al. “Numerical Modeling Of Liquid Sloshing In Flexible Tank With FSI Approach”. In : *World Journal of Engineering* (2023).
- [65] Liu L. et al. “Wind-Induced Response Of The Flexible Floating Roofs Of Large Storage Tanks Considering Liquid Sloshing”. en. In : *Structures* 64 (2024), p. 106506. ISSN : 23520124. DOI : [10.1016/j.istruc.2024.106506](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106506). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352012424006581>.
- [66] Monasse L. “Analysis Of A Discrete Element Method And Coupling With A Compressible Fluid Flow Method”. Thèse de doct. Université Paris-Est, 2011.
- [67] Yu L., Xue M.A. et Zheng J. “Experimental Study Of vertical Slat Screens Effects On Reducing Shallow Water Sloshing In A Tank Under Horizontal Excitation With A Wide Frequency Range”. In : *Ocean Engineering* 173 (2019), p. 131-141. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2018.12.063](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.12.063).
- [68] Yu L., Xue M.A. et Jiang Z. “Experimental Investigation Of Parametric Sloshing In A Tank With Vertical Baffles”. In : *Ocean Engineering* 213 (2020), p. 107783. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2020.107783](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107783).
- [69] *Tracker*. URL : <https://physlets.org/tracker/>.
- [70] *Lien de téléchargement : Scilab*. URL : <https://www.scilab.org/download/scilab-2023.1.0>.
- [71] Bellet M. et Fachinotti V.D. “ALE Method For Solidification Modelling”. en. In : *Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering* 193.39-41 (2004), p. 4355-4381. ISSN : 00457825. DOI : [10.1016/j.cma.2003.11.016](https://doi.org/10.1016/j.cma.2003.11.016).
- [72] Capuano M. “Simulations Numériques d’Écoulements Diphasiques Compressibles, Visqueux et Conductifs à l’Aide De Schémas aux Différences Finies Centrées d’Ordre Élevé”. Thèse de doct. Ecole Centrale Lyon, 2018.
- [73] Houillon M. et al. “Formulation ALE Et Remaillage Adaptatif : Application À La Modélisation Du Fluotournage”. In : *Colloque National En Calcul Des Structures*. 2007, p. 1-6.
- [74] Luo M. et al. “Three-Dimensional Sloshing In A Scaled Membrane LNG Tank Under Combined Roll And Pitch Excitations”. en. In : *Ocean Engineering* 211 (sept. 2020), p. 107578. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2020.107578](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107578). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801820305862>.
- [75] Malej M. “Modeling The Optical Signature Induced By Surfzone Bubbles Using The Boussinesq-Type Wave Model FUNWAVE-TVD”. In : *Ocean Engineering* (2024).

- [76] Sajkowski M. *What Is OpenFOAM?* en-us. 2023. URL : <https://sim-flow.com/what-is-openfoam/> (visité le 30/05/2024).
- [77] Souli M., Ouahsine A. et Lewin L. “ALE Formulation For Fluid-Structure Interaction Problems”. en. In : *Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering* (2000).
- [78] Xue M. et al. “Experimental Study Of Liquid Sloshing In Rectangular Tank Excited By Sea-Wave spectrum”. In : *Dalian Ligong Daxue Xuebao/Journal of Dalian University of Technology* 58 (2018), p. 261-268. DOI : [10.7511/dllgxb201803006](https://doi.org/10.7511/dllgxb201803006).
- [79] Zhang M. et Schreier S. “Review Of Wave Interaction With Continuous Flexible Floating Structures”. In : *Ocean Engineering* 264 (2022), p. 112404. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2022.112404](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112404). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801822016870>.
- [80] Xue M.A., Zheng J. et Lin P. “Numerical Simulation Of Sloshing Phenomena In Cubic Tank With Multiple Baffles”. In : *Journal of Applied Mathematics* 2012.1 (2012). Sous la dir. de Carl M. LARSEN, p. 245702. ISSN : 1110-757X, 1687-0042. DOI : [10.1155/2012/245702](https://doi.org/10.1155/2012/245702). URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2012/245702>.
- [81] Green M.D. et Peiró J. “Long Duration SPH Simulations Of Sloshing In Tanks With A Low Fill Ratio And High Stretching”. en. In : *Computers & Fluids* 174 (2018), p. 179-199. ISSN : 00457930. DOI : [10.1016/j.compfluid.2018.07.006](https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2018.07.006). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045793018303979>.
- [82] Celebi M.S. et Akyildiz H. “Nonlinear Modeling Of Liquid Sloshing In A Moving Rectangular Tank”. In : *Ocean Engineering* 29.12 (2002-09), p. 1527-1553. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/S0029-8018\(01\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(01)00085-3).
- [83] Gadala M.S. et Wang J. “ALE Formulation And Its Application In Solid Mechanics”. en. In : *Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering* (1998).
- [84] Longuet-Higgins M.S. *On The Statistical Distribution Of The Heights Of Sea Waves*. en. Sears Foundation For Marine Research Bingham Oceanographic Laboratory, Yale University, 1952.
- [85] *Tracker Manual*. URL : [https://chamilo.univ-grenoble-alpes.fr/courses/UGA002797/document/Instructions/ManuelTracker-2020.pdf?cidReq=UGA002797&id\\_session=0&gidReq=0&gradebook=0&origin=](https://chamilo.univ-grenoble-alpes.fr/courses/UGA002797/document/Instructions/ManuelTracker-2020.pdf?cidReq=UGA002797&id_session=0&gidReq=0&gradebook=0&origin=).
- [86] Moiseev N.N. “On The Theory Of Nonlinear Vibrations Of A Liquid Of Finite Volume”. In : *Journal Of Applied Mathematics And Mechanics* 22.5 (1958), p. 860-872. ISSN : 00218928. DOI : [10.1016/0021-8928\(58\)90126-6](https://doi.org/10.1016/0021-8928(58)90126-6).
- [87] *Un Navire-Citerne À Hydrogène Liquide Qui Peut Révolutionner Le Marché Des Énergies*. URL : <https://www.energiesdelamer.eu/2022/05/09/un-navire-citerne-a-hydrogene-liquide-qui-peut-revolutionner-le-marche-des-energies/>.
- [88] Faltinsen O.M. “A Nonlinear Theory Of Sloshing In Rectangular Tanks”. In : *Journal of Ship Research* 18.4 (1974), p. 224-241. ISSN : 0022-4502. DOI : [10.5957/jsr.1974.18.4.224](https://doi.org/10.5957/jsr.1974.18.4.224).
- [89] Faltinsen O.M. “A Numerical Nonlinear Method Of Sloshing In Tanks With Two-Dimensional Flow”. In : *Journal of Ship Research* 22.3 (1978), p. 193-202. ISSN : 0022-4502, 1542-0604. DOI : [10.5957/jsr.1978.22.3.193](https://doi.org/10.5957/jsr.1978.22.3.193). URL : <https://onepetro.org/JSR/article/22/03/193/175500/A-Numerical-Nonlinear-Method-of-Sloshing-in-Tanks>.

- [90] Faltinsen O.M. et Timokha A.N. “An adaptive Multimodal Approach To Nonlinear Sloshing In A Rectangular Tank”. In : *J. Fluid Mech.* 432 (2001), p. 167-200. ISSN : 0022-1120, 1469-7645. DOI : [10.1017/S0022112000003311](https://doi.org/10.1017/S0022112000003311).
- [91] Faltinsen O.M. et Timokha A.N. *Sloshing*. Anglais. 1er édition. Cambridge : Cambridge University Press, 2009. ISBN : 978-0-521-88111-1.
- [92] Faltinsen O.M. et al. “Multidimensional Modal Analysis Of Nonlinear Sloshing In A Rectangular Tank With Finite Water Depth”. In : *J. Fluid Mech.* 407 (2000), p. 201-234. ISSN : 0022-1120, 1469-7645. DOI : [10.1017/S0022112099007569](https://doi.org/10.1017/S0022112099007569). (Visité le 29/11/2023).
- [93] *Basler Lens C125-1218-5M-P F12mm*. URL : <https://www.baslerweb.com/en/shop/lens-c125-1218-5m-p-f12mm/>.
- [94] Higuera P., Lara J.L. et Losada I.J. “Three-Dimensional Interaction Of Waves And Porous Coastal Structures Using OpenFOAM®. Part I : Formulation And validation”. en. In : *Coastal Engineering* 83 (2014), p. 243-258. ISSN : 03783839. DOI : [10.1016/j.coastaleng.2013.08.010](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.08.010). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378383913001452>.
- [95] Higuera P., Lara J.L. et Losada I.J. “Three-Dimensional Interaction Of Waves And pProus Coastal Structures Using OpenFOAM®. Part II : Application”. en. In : *Coastal Engineering* 83 (jan. 2014), p. 259-270. ISSN : 03783839. DOI : [10.1016/j.coastaleng.2013.09.002](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.09.002). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378383913001464>.
- [96] Trontin P. “Développement D’une Approche De Type LES pour La Simulation d’Écoulements Diphasiques Avec Interface : Application à L’Atomisation Primaire”. Thèse de doct. Université de Toulouse, 2009.
- [97] Vasarmidis P. “A Study Of The Non-Linear Properties And Wave Generation Of The Multi-Layer Non-Hydrostatic Wave Model SWASH”. In : *Ocean Engineering* (2024).
- [98] Persson P.O. et Peraire J. “Curved Mesh Generation And Mesh Refinement Using Lagrangian Solid Mechanics”. In : *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. Orlando, Florida : American Institute of Aeronautics et Astronautics, 2009, p. 1-11. ISBN : 978-1-60086-973-0. DOI : [10.2514/6.2009-949](https://doi.org/10.2514/6.2009-949). URL : <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2009-949>.
- [99] *PrecICE Documentation*. URL : <https://precice.org/docs.html>.
- [100] *Basler Pylon Software Suite*. URL : <https://www.baslerweb.fr/fr/acquisition-d-images/85-basler-pylon.html>.
- [101] Challa R. et al. “Rigid-Object Water-Entry Impact Dynamics : Finite-Element / Smoothed Particle Hydrodynamics Modeling And Experimental Validation”. en. In : *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 136.3 (août 2014), p. 031102. ISSN : 0892-7219, 1528-896X. DOI : [10.1115/1.4027454](https://doi.org/10.1115/1.4027454). URL : <https://asmigitalcollection.asme.org/offshoremechanics/article/doi/10.1115/1.4027454/376938/RigidObject-WaterEntry-Impact-Dynamics>.
- [102] Eymard R., Gallouët T. et Herbin R. *Finite Volume Methods*. Handbook Of Numerical Analysis, 2019.
- [103] Ibrahim R.A. *Liquid Sloshing Dynamics : Theory And Applications*. Cambridge University Press, 2005.
- [104] Blevins R.D. *Formulas For Natural Frequency And Mode Shape*. eng. New York : Van Nostrand Reinhold Co., 1979. ISBN : 978-0-442-20710-6. URL : <http://archive.org/details/formulasfornatur0000blev>.

- [105] Bhavithra R.S. et Sannasiraj S.A. “Wind Field And Model Resolution Optimization And Testing Source Terms For The Prediction Of Cyclone Induced Waves In The Bay Of Bengal”. en. In : *Ocean Engineering* 290 (2023), p. 116326. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2023.116326](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116326). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801823027105> (visité le 28/10/2024).
- [106] Yeung R.W. et Ananthakrishnan P. “Oscillation Of A Floating Body In A Viscous Fluid”. In : *Journal of Engineering Mathematics* 26 (1992), p. 211-230.
- [107] *Produit ASCO Carbon Dioxide Sur DirectIndustry*. URL : <https://www.directindustry.fr/prod/asco-carbon-dioxide/product-38377-1636872.html>.
- [108] Fortin S. “Étude De Bistabilité Des Bulles Ellipsoïdales Par Une Méthode ALE De Résolution Des Écoulements Diphasiques”. Mém. de mast. Polytechnique Montréal, Université de Montréal, 2019.
- [109] Gurusamy S. et Kumar D. “Experimental Study On Nonlinear Sloshing Frequency In Shallow Water Tanks Under The Effects Of Excitation Amplitude And Dispersion Parameter”. en. In : *Ocean Engineering* 213 (oct. 2020), p. 107761. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2020.107761](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107761). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801820307411> (visité le 11/06/2024).
- [110] Manenti S. et Panizzo A. “SPH Simulation Of A Floating Body Forced By Regular Waves”. In : *3rd ERCOFTAC SPHERIC Workshop On SPH Applications*. Lausanne, Switzerland, 2008, p. 38-41.
- [111] Mauriet S. “Simulation D’un Écoulement De Jet De Rive Par Une Méthode VOF”. Thèse de doct. Université de Pau et des Pays de l’Adour, 2009.
- [112] Jiang S.C., Bai W. et Lan J.J. “Influence Of A Vertical Baffle On Suppressing Sway Motion Response Of A Tank Coupled With Sloshing Actions In Waves”. In : *Ocean Engineering* 260 (2022), p. 111999. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2022.111999](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111999). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S002980182201304X> (visité le 12/06/2024).
- [113] Siadatmousavi S.M., Yaghoobi Kalourazi M. et Khosh Kholgh A. “Improving The WAVEWATCH-III Wave Model Results Using Data Assimilation In The Persian Gulf”. In : *Ocean Engineering* 300 (2024), p. 117460. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2024.117460](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117460). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801824007972>.
- [114] Neill S.P. et Hashemi M.R. *Fundamentals of Ocean Renewable Energy : Generating Electricity From The Sea*. Anglais. London : Academic Press, 2018. ISBN : 978-0-12-810448-4.
- [115] *Plateformes Pétrolières : Quelles Exigences Pour Les Métiers Off-shore ?* URL : <https://vetsecurite.com/blog/plateformes-petrolieres-queelles-exigences-pour-les-metiers-off-shore--n309>.
- [116] Ikeda T. et Nakagawa N. “Non-Linear Vibrations Of A Structure Caused By Water Sloshing In A Rectangular Tank”. In : *Journal of Sound and Vibration* (1997).
- [117] Thomas T.J. “Numerical Wave Modelling – A Review”. In : *Aquatic Procedia* (2015).
- [118] *Catastrophe Ferroviaire Du Pont Sur Le Tay — Wikipédia*. URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Catastrophe\\_ferroviaire\\_du\\_pont\\_sur\\_le\\_Tay](https://fr.wikipedia.org/wiki/Catastrophe_ferroviaire_du_pont_sur_le_Tay).
- [119] *Tuned Mass Damper*. URL : <https://www.techeblog.com/tuned-mass-damper/>.
- [120] URL : [https://files.structurae.net/files/350high/prelinger/tacoma\\_old5.jpg](https://files.structurae.net/files/350high/prelinger/tacoma_old5.jpg).
- [121] Koo W. et Kim M.H. “Freely Floating-Body Simulation By A 2D Fully Nonlinear Numerical Wave Tank”. en. In : *Ocean Engineering* 31.16 (2004), p. 2011-2046.

- ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2004.05.003](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2004.05.003). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801804000976>.
- [122] Durand W.F. *Aerodynamic Theory Vol 2*. Julius Springer, 1935. URL : <http://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.20039>.
- [123] Noh W.F. et Woodward P. “SLIC (Simple Line Interface Calculation)”. In : *Proceedings Of The Fifth International Conference On Numerical Methods In Fluid Dynamics June 28 – July 2, 1976 Twente University, Enschede*. T. 59. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1976, p. 330-340. ISBN : 978-3-540-08004-6 978-3-540-37548-7. DOI : [10.1007/3-540-08004-X\\_336](https://doi.org/10.1007/3-540-08004-X_336).
- [124] Cao W.Y., Ming F.R. et Zhang A.M. “Sloshing In A Rectangular Tank Based On SPH Simulation”. en. In : *Applied Ocean Research* 47 (2014), p. 241-254. ISSN : 01411187. DOI : [10.1016/j.apor.2014.06.006](https://doi.org/10.1016/j.apor.2014.06.006).
- [125] *Water Wave Theories (SVG Image) — Wikipedia*. URL : [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Water\\_wave\\_theories.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Water_wave_theories.svg).
- [126] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. *Méthode Des Volumes Finis — Wikipédia*. 2024. URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode\\_des\\_volumes\\_finis](https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode_des_volumes_finis).
- [127] Hu X. “Simplified Models Of Wind-Wave Relationships In China’s Shallow-Water Coasts Based On SWAN+ADCIRC Simulations”. In : *Ocean Engineering* (2024).
- [128] Jin X. et al. “Resonant Sloshing In A Rectangular Tank Under Coupled Heave And Surge Excitations”. In : *Applied Ocean Research* 121 (2022), p. 103076. ISSN : 01411187. DOI : [10.1016/j.apor.2022.103076](https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103076).
- [129] Berrahil Y. Kabar et F. *MVF*. URL : [https://elearning.centre-univ-mila.dz/a-2023/pluginfile.php/78515/mod\\_resource/content/1/Cours%20Volumes%20finis\\_f.pdf](https://elearning.centre-univ-mila.dz/a-2023/pluginfile.php/78515/mod_resource/content/1/Cours%20Volumes%20finis_f.pdf).
- [130] Fung Y. *An Introduction To The Theory Of Aeroelasticity*. Galcit aeronautical series. Wiley, 1955. URL : <https://books.google.fr/books?id=qxsIAQAIAAJ>.
- [131] Kim Y. “Numerical Simulation Of Sloshing Flows With Impact Load”. en. In : *Applied Ocean Research* (2001).
- [132] Tang Y. et al. “A Fully Nonlinear BEM-Beam Coupled Solver For Fluid–Structure Interactions Of Flexible Ships In Waves”. In : *Journal Of Fluids And Structures* 121 (2023), p. 103922. ISSN : 08899746. DOI : [10.1016/j.jfluidstructs.2023.103922](https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2023.103922). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0889974623000907>.
- [133] Chang-Fang Z. et al. “The Effect Of Liquid Viscosity On Sloshing Characteristics”. In : *Journal Of Marine Science And Technology* 20.4 (2015), p. 765-775. ISSN : 1437-8213. DOI : [10.1007/s00773-015-0329-y](https://doi.org/10.1007/s00773-015-0329-y).
- [134] Chen Z. et al. “An Investigation Into The Pressure On Solid Walls In 2D Sloshing Using SPH Method”. In : *Ocean Engineering* 59 (2013), p. 129-141. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2012.12.013](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.12.013). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801812004222> (visité le 11/06/2024).
- [135] Liu Z. et al. “Fluid Sloshing Dynamic Performance In A Fuel Storage Tank Under Sinusoidal Excitations”. In : *Applied Thermal Engineering* 168 (2020), p. 114814. ISSN : 13594311. DOI : [10.1016/j.applthermaleng.2019.114814](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114814).
- [136] Ozdemir Z., Souli M. et Fahjan Y.M. “FSI Methods For Seismic Analysis Of Sloshing Tank Problems”. en. In : *Mécanique & Industries* 11.2 (2010), p. 133-147. ISSN : 1296-2139, 1765-2960. DOI : [10.1051/meca/2010025](https://doi.org/10.1051/meca/2010025). URL : <http://www.mechanics-industry.org/10.1051/meca/2010025>.
- [137] Ozdemir Z. et al. “ALE And Fluid Structure Interaction For Sloshing Analysis”. In : *The International Journal Of Multiphysics* 3.3 (2009), p. 307-336. ISSN : 1750-9548. DOI : [10.1260/175095409788922257](https://doi.org/10.1260/175095409788922257).

- [138] Zhang Z. et al. “Experimental And Numerical Investigations On The Liquid Tank Sloshing In Regular Waves”. en. In : *Ocean Engineering* 271 (2023), p. 113668. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2023.113668](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113668). URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0029801823000525> (visité le 28/10/2024).
- [139] Wang Z.H. et al. “Liquid Sloshing In A Baffled Rectangular Tank Under Irregular Excitations”. In : *Ocean Engineering* 278 (2023), p. 114472. ISSN : 00298018. DOI : [10.1016/j.oceaneng.2023.114472](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114472).
- [140] Wei Z.J. et al. “Sloshing-Induced Slamming In Screen-Equipped Rectangular Tanks In Shallow-Water Conditions”. en. In : *Physics of Fluids* 27.3 (2015), p. 032104. ISSN : 1070-6631, 1089-7666. DOI : [10.1063/1.4913983](https://doi.org/10.1063/1.4913983).

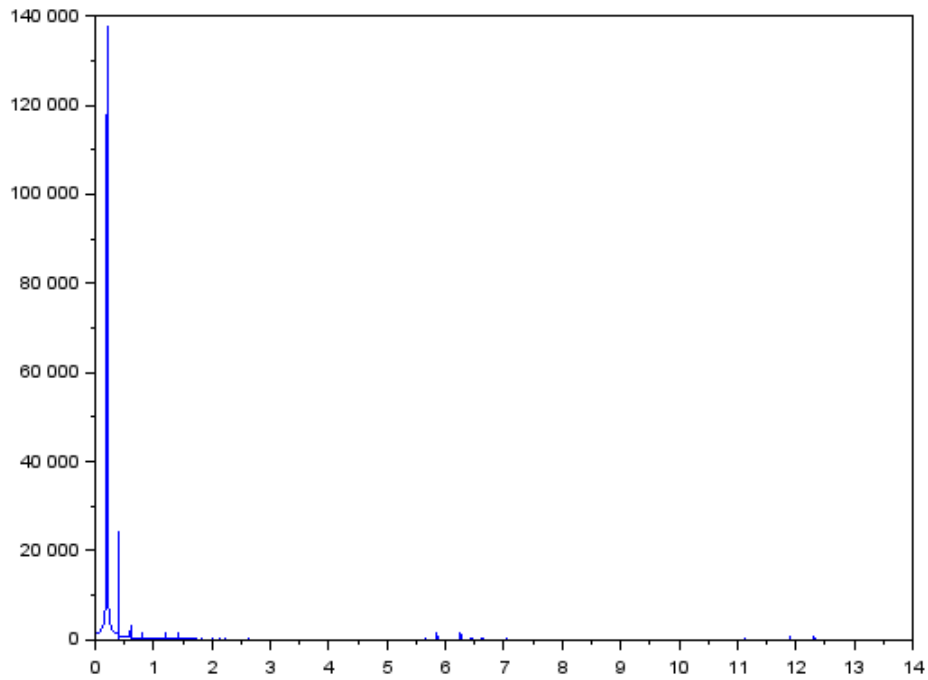
## ANNEXE A

---

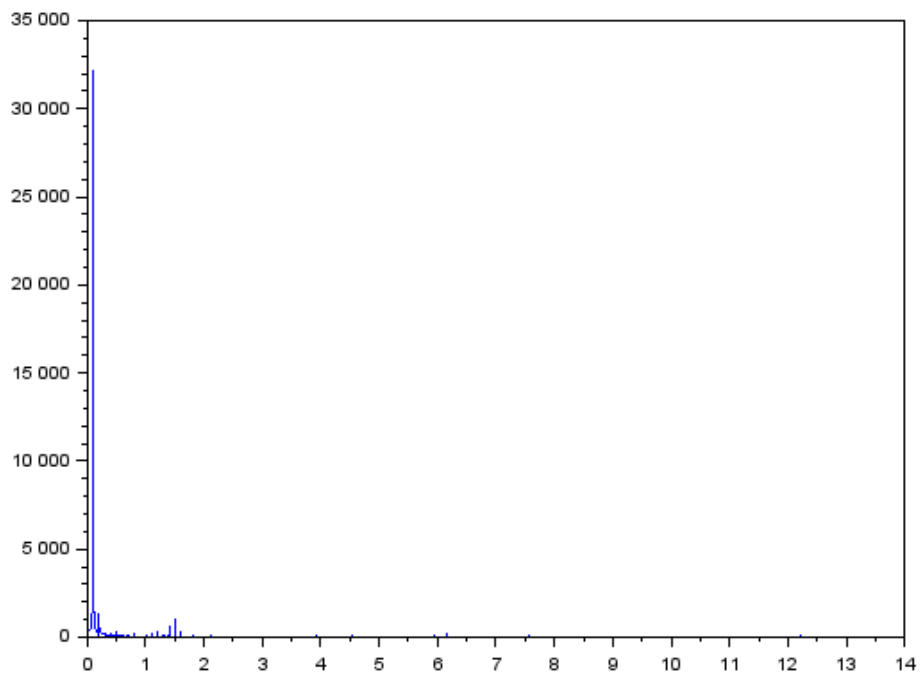
Les FFT appliquées sur les évolutions temporelles des élévations de la surface libre (cas expérimentale)

---

La figure [A.1](#) montre les courbes FFT appliquées sur l'évolution de la surface libre expérimentale dans les cas d'une basse fréquence ( $A_6$ ) et d'une fréquence élevée ( $A_2$ ). Les courbes FFT des cas  $A_2$  et  $A_6$  présentent des pics principaux à  $0,2 \text{ Hz}$  et à  $0,1 \text{ Hz}$  respectivement, correspondent aux fréquences d'excitation. On observe aussi des harmoniques en plus d'un faible niveau de bruit. Les pics principaux correspondent à des périodes d'environ  $4,92 \text{ s}$  pour le cas  $A_2$  et  $10 \text{ s}$  pour le cas  $A_6$ , ce qui est cohérent avec la durée caractéristique de la houle.



(a)  $A_2 : B_2 = 128,2 \text{ mm}, \omega_2 = 1,256 \text{ rad/s}$  et  $T_p = 5 \text{ s}$



(b)  $A_6 : B_6 = 32,1 \text{ mm}, \omega_6 = 0,63 \text{ rad/s}$  et  $T_p = 10 \text{ s}$

**Figure A.1** – FFT appliquée sur l'évolution temporelle de l'élévation de la surface libre expérimentale

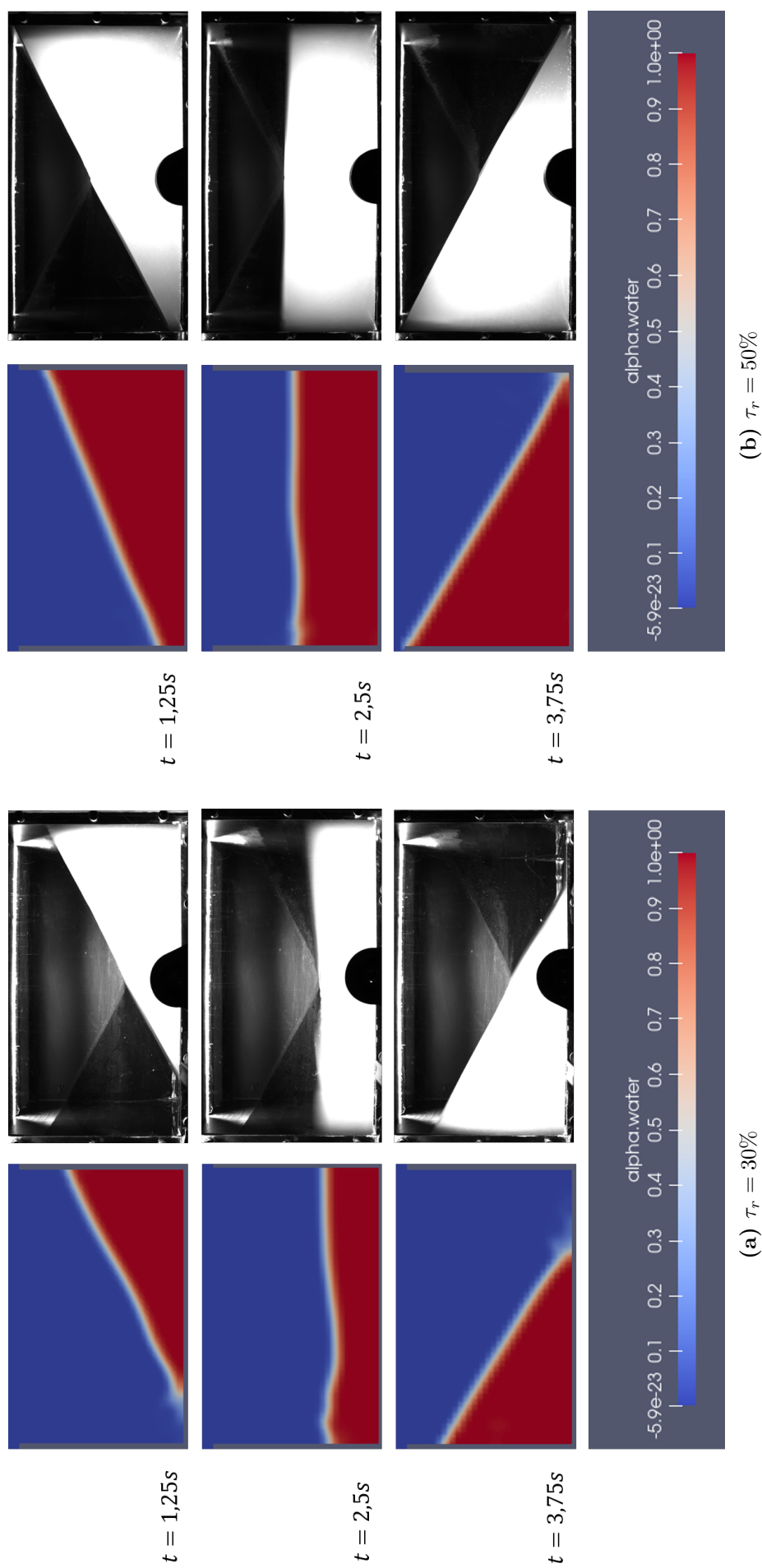
## ANNEXE B

---

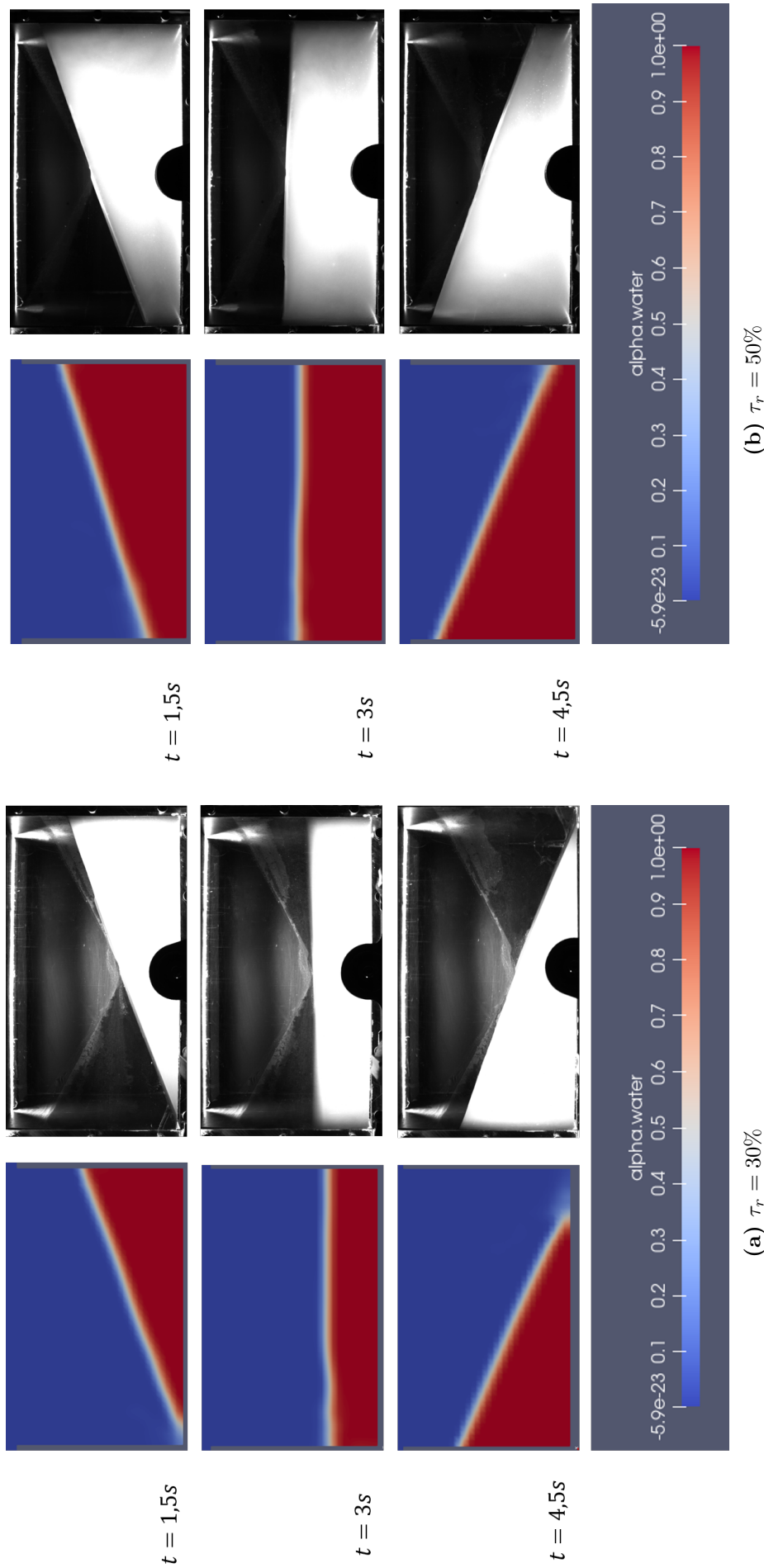
### Contours de fraction volumique instantanés expérimentaux et numériques dans le cas d'un réservoir soumis aux mouvements de tangage

---

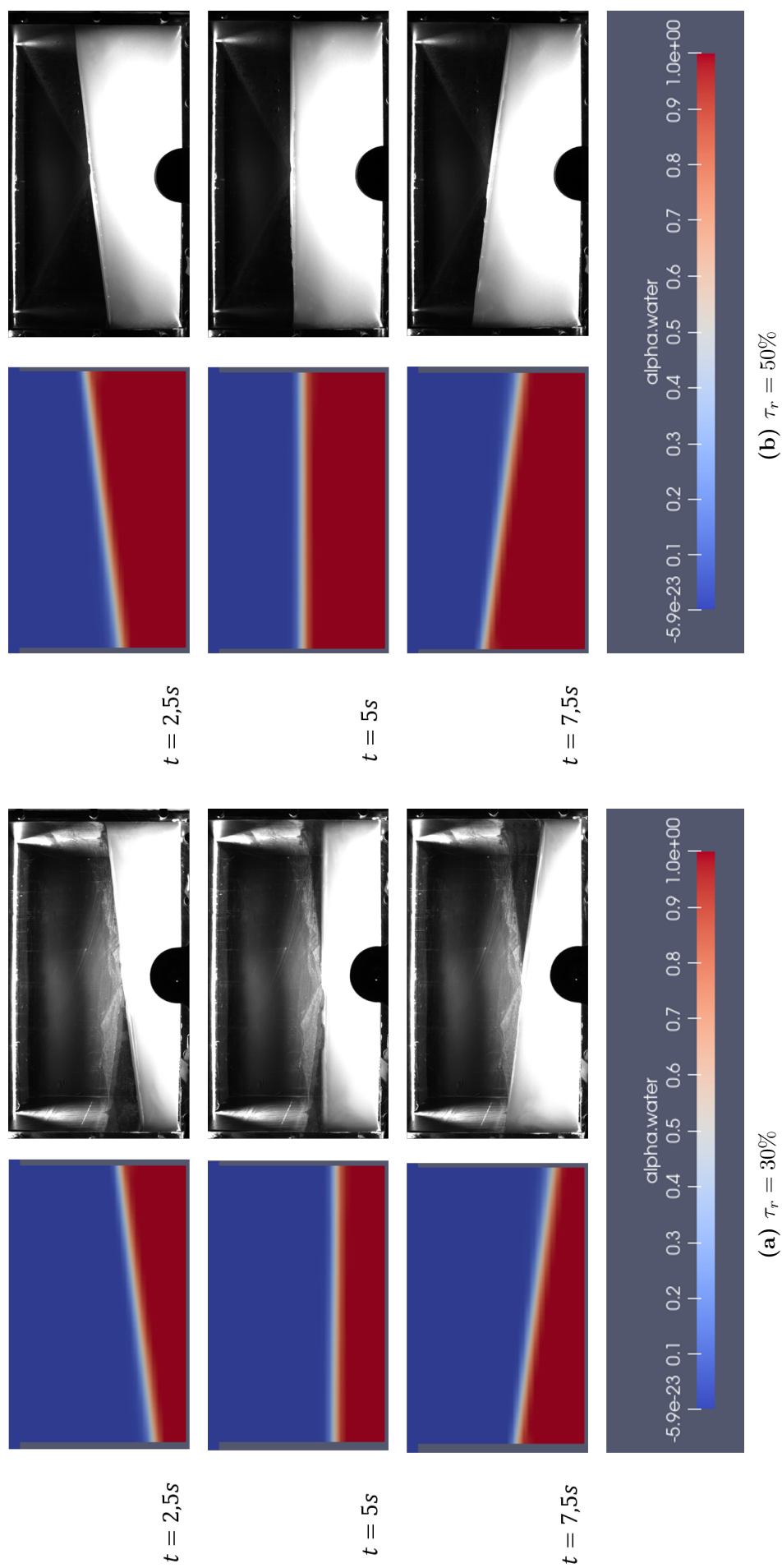
Le comportement de la surface libre dans les différents cas est similaire, où la vague à l'intérieur de la cuve commence à apparaître à partir du milieu de la cuve au niveau de la surface libre, jusqu'à atteindre une amplitude maximale à droite vers l'instant  $t = \frac{T_p}{4}$ . Puis, elle revient à sa position initiale vers l'instant  $t = \frac{T_p}{2}$ . La vague remonte à nouveau vers la gauche jusqu'à atteindre une amplitude maximale à gauche et une minimale à droite. Les figures [B.1](#), [B.2](#) et [B.3](#) montrent les différentes positions de la surface libre pour les cas  $A_2$ ,  $A_3$  et  $A_6$  respectivement à 30% et 50% de remplissage, aux instants  $t = \frac{T_p}{4}$ ,  $t = \frac{T_p}{2}$  et  $t = \frac{3T_p}{4}$ .



**Figure B.1** – Comparaison de contours de fraction volumique instantanés ( $T_p/4$ ,  $T_p/2$  et  $3T_p/4$ ) expérimentaux et numériques du ballonnement à l'intérieur de la cuve ( $B = 128, 2\text{ mm}$ )



**Figure B.2** – Comparaison de contours de fraction volumique instantanés ( $T_p/4$ ,  $T_p/2$  et  $3T_p/4$ ) expérimentaux et numériques du ballonnement à l'intérieur de la cuve ( $B = 89,3\text{ mm}$ )



**Figure B.3** – Comparaison de contours de fraction volumique instantanés ( $T_p/4, T_p/2$  et  $3T_p/4$ ) expérimentaux et numériques du ballonnement à l'intérieur de la cuve ( $B = 32, 1\text{ mm}$ )

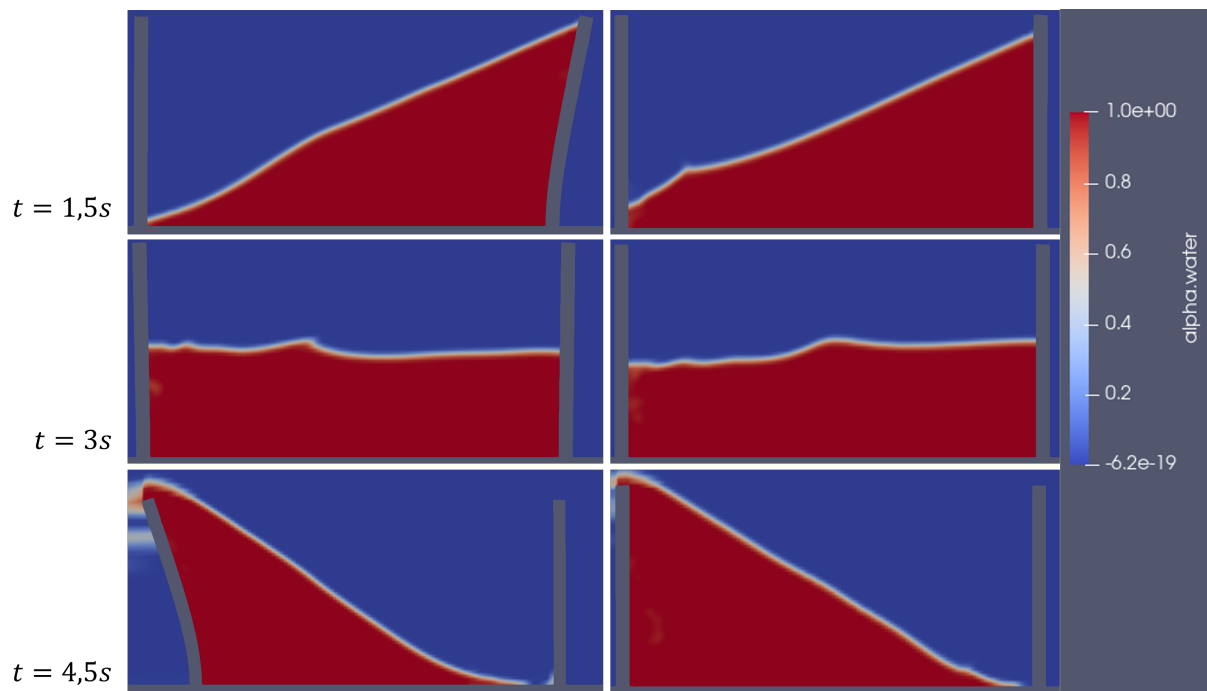
---

## Contours de fraction volumique instantanés numériques dans le cas d'un réservoir soumis aux mouvements de tangage et de pilonnement

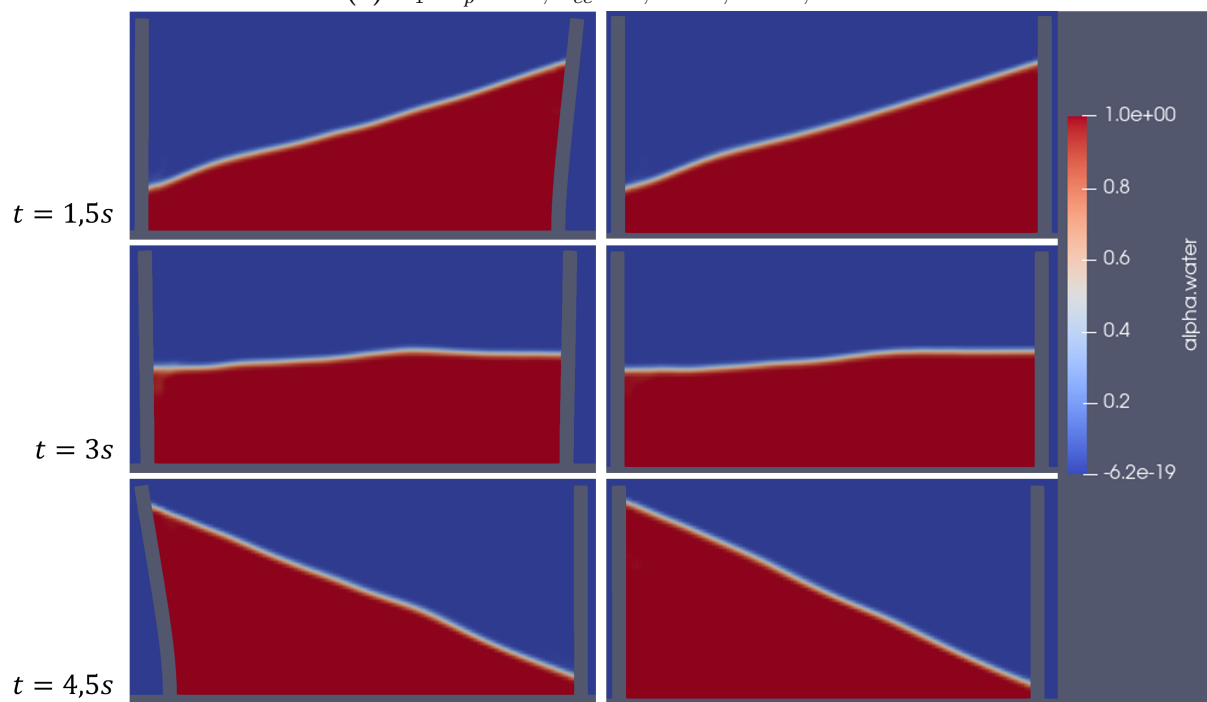
---

Les figures C.1 et C.2 montrent le comportement du ballonnement à l'intérieur du réservoir partiellement rempli de liquide (50 % de sa capacité), à gauche le cas du réservoir flexible et à droite le cas rigide, pour les configurations  $A_1$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  et  $A_5$ . On observe un comportement de liquide similaire entre les cas des réservoirs rigide et flexible dans chaque configuration. Le liquide à l'intérieur du réservoir monte progressivement au fil du temps vers la droite, jusqu'à atteindre une amplitude maximale à droite vers l'instant  $\frac{T_p}{4}$ . Puis, il redescend progressivement jusqu'à retrouver une surface horizontale plane et parfois perturbée vers l'instant  $\frac{T_p}{2}$ . Dans la deuxième moitié de la période caractéristique de la houle ( $\frac{T_p}{2} < t < T_p$ ), le fluide remonte vers la gauche où il atteint une amplitude maximale à gauche et minimale à droite.

Dans la configuration  $A_1$ , l'inclinaison des parois est plus visible que dans la configuration  $A_3$ . En revanche, dans les deux autres configurations ( $A_4$  et  $A_5$ ) l'inclinaison est moindre par rapport aux configurations  $A_1$  et  $A_3$ , et elle est plus faible dans la configuration  $A_5$  par rapport à la configuration  $A_4$ .

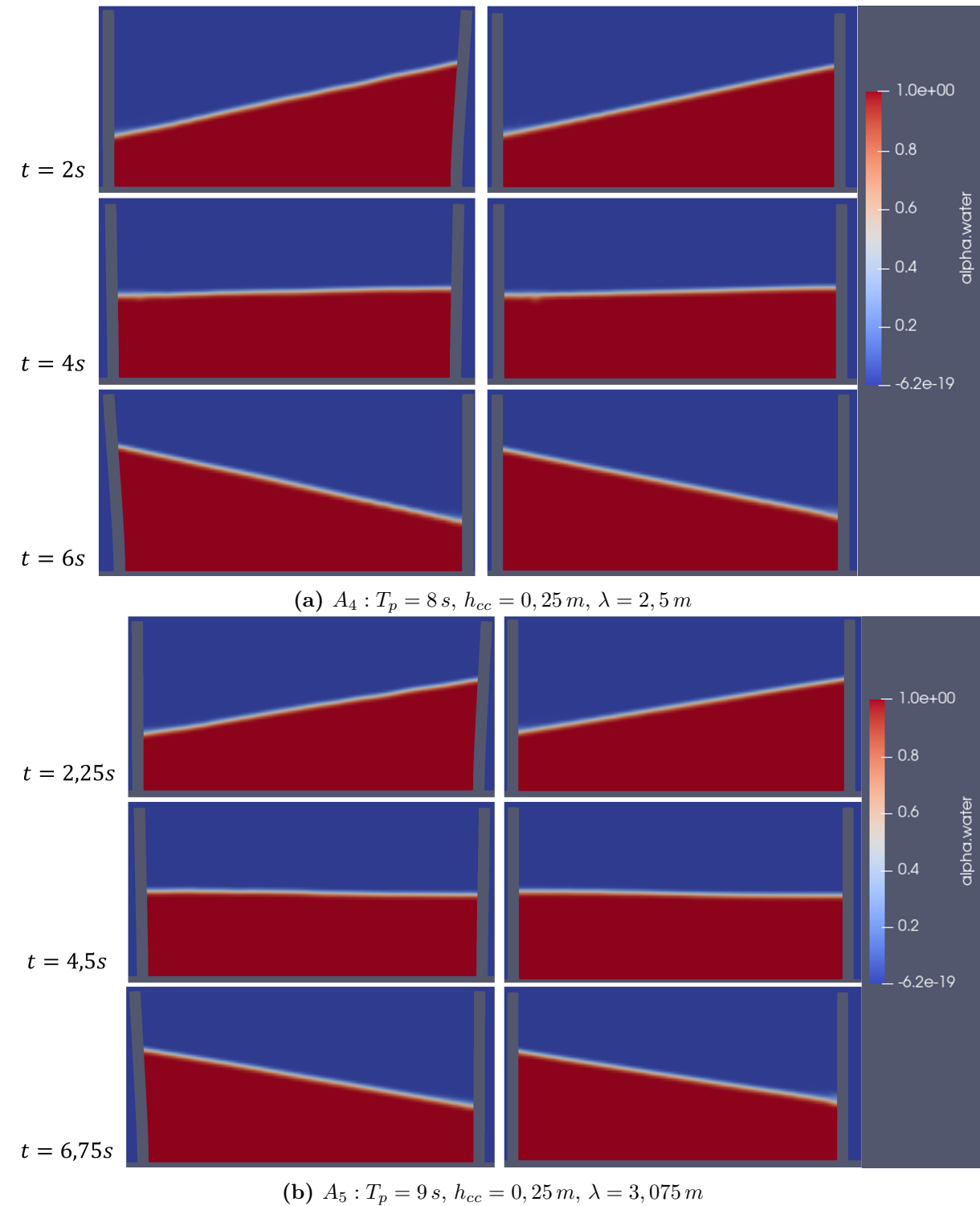


(a)  $A_1 : T_p = 6 s, h_{cc} = 0,375 m, \lambda = 1,4 m$



(b)  $A_3 : T_p = 6 s, h_{cc} = 0,25 m, \lambda = 1,4 m$

**Figure C.1** – Evolutions des contours de fraction volumique instantanés numériques du ballonnement à l'intérieur de la cuve à 50% de remplissage : à gauche cas flexible, à droite cas rigide



**Figure C.2** – Evolutions des contours de fraction volumique instantanés numériques du ballonnement à l'intérieur de la cuve à 50% de remplissage : à gauche cas flexible, à droite cas rigide

## ANNEXE D

---

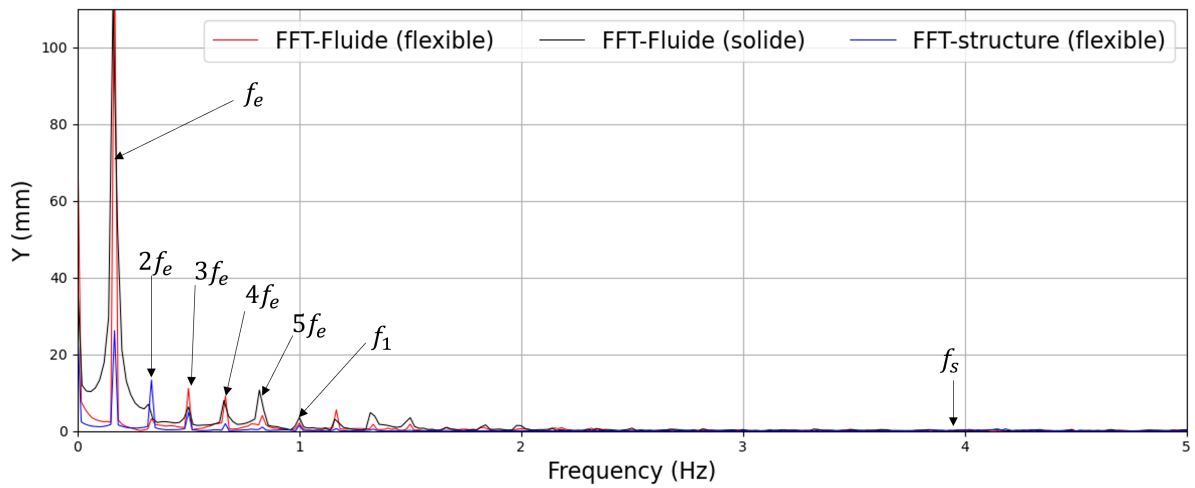
Les FFT appliquées sur les évolutions temporelles des élévations de  
la surface libre et les déplacements des parois flexibles

---

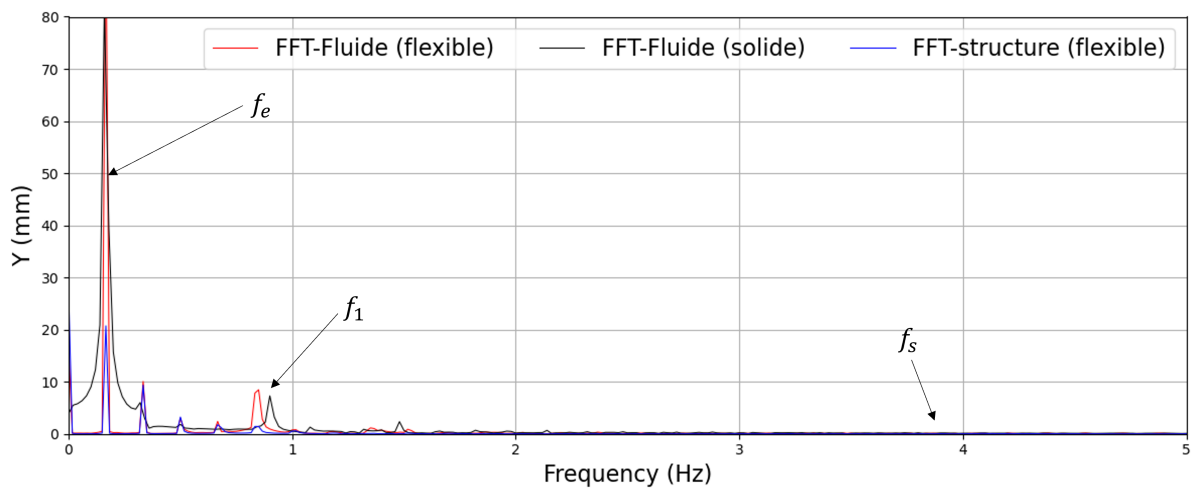
Nous avons appliqué une FFT ainsi sur les réponses temporelles des élévations de la surface libre et des déplacements des parois flexibles dans les autres configurations ( $A_1$ ,  $A_3$ ;  $A_4$  et  $A_5$ ). Les figures D.1 et D.2 affichent les courbes FFT acquises pour les configuration  $A_1$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  et  $A_5$ . Le tableau D.1 montre les différentes fréquences numériques mentionnées dans les figures D.1 et D.2, les fréquences calculées analytiquement, et la différence relative pour chaque configuration. Avec  $f_e$  et  $f_{e,a}$  sont les fréquences d'excitation numérique et analytique,  $f_1$  et  $f_{1,a}$  sont les fréquences propres du ballonnement numérique et analytique, et  $f_s$  et  $f_{s,a}$  sont les fréquences propres de la structure numérique et analytique.

TABLE D.1 – Comparaison entre les fréquences numériques et analytiquement

| $A_i$ | $f_e$ [Hz] | $f_1$ [Hz] | $f_s$ | $f_{e,a}$ [Hz] | $f_{1,a}$ [Hz] | $f_{s,a}$ [Hz] | $f_e$ [%] | $f_1$ [%] | $f_s$ [%] |
|-------|------------|------------|-------|----------------|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|
| $A_1$ | 0,17       | 1          | 3,97  | 0,167          | 0,96           | 4,02           | 1,8       | 4,17      | 1,24      |
| $A_3$ | 0,17       | 0,88       | 3,92  | 0,167          | 0,96           | 4,02           | 1,8       | 8,33      | 2,5       |
| $A_4$ | 0,12       | 0,93       | 3,95  | 0,125          | 0,96           | 4,02           | 4         | 3,13      | 1,74      |
| $A_5$ | 0,1        | 0,95       | 3,97  | 0,111          | 0,96           | 4,02           | 9,09      | 1,04      | 1,24      |

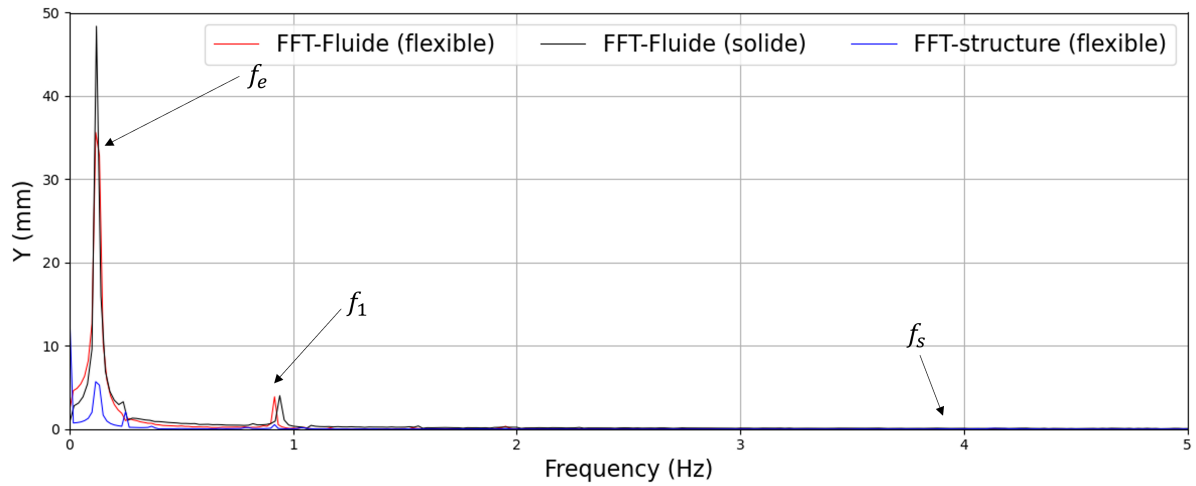


(a)  $A_1 : T_p = 6 \text{ s}, h_{cc} = 0,375 \text{ m}, \lambda = 1,4 \text{ m}$

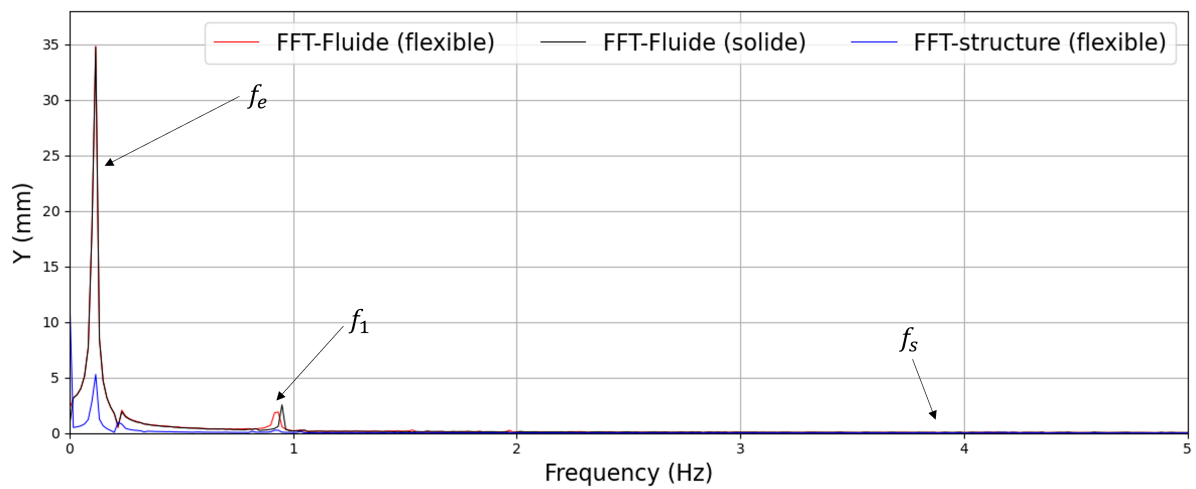


(b)  $A_3 : T_p = 6 \text{ s}, h_{cc} = 0,25 \text{ m}, \lambda = 1,4 \text{ m}$

**Figure D.1** – FFT appliquée sur l'évolution temporelle de l'élévation de la surface libre et sur les déplacements des parois flexible



(a)  $A_4 : T_p = 8 \text{ s}, h_{cc} = 0,25 \text{ m}, \lambda = 2,5 \text{ m}$



(b)  $A_5 : T_p = 9 \text{ s}, h_{cc} = 0,25 \text{ m}, \lambda = 3,075 \text{ m}$

**Figure D.2** – FFT appliquée sur l'évolution temporelle de l'élévation de la surface libre et sur les déplacements des parois flexible

## ديناميكيات تشوه خزان سائل يستخدم لتثبيت هيكل عائم متحرك

تأرجح هو ظاهرة تحدث داخل الخزانات المملوءة جزئياً، ويشير إلى الحركة التذبذبية للسطح الحر للسائل. عندما تكون هذه الخزانات مدعومة بأنظمة عائمة تعمل على استقرارها، يصبح التآرجح معقداً بشكل متزايد. الهدف من هذه الأطروحة هو نمذجة ديناميكيات انزلاق السائل في الخزانات العائمة ذات الجدران القابلة للتشوه مع الأخذ بالاعتبار التأثيرات المتبادلة بين السائل والخزان، تحت تأثير الإثارة في الميل أو التدحرج. تم إعداد تجريبي لبناء قاعدة بيانات تجريبية. وقد استخدم هذا الإعداد لدراسة وتحليل التآرجح تحت تأثير حركة الإهتزاز. تم استكشاف النتائج التي تم الحصول عليها للتحقق من صحة النموذج العددي الذي تم تطويره. تم تنفيذ النموذج العددي مع الأخذ في الاعتبار التأثيرات المتبادلة بين السائل والخزان يتم استخدام اقتران مجزأ ويتم التعامل مع تطور السطح الحر. يتم التحقق من صحة هذا النموذج في حالة الإثارة الأفقية، وفي حالة إثارة التدحرج. ثم يتم تطبيق النموذج بعد ذلك على دراسة الاهتزاز في خزان قابل للتشوه جزئياً، مرةً يتعرض لتأثيرات الجاذبية ومرةً أخرى يتعرض لحركات الميل والرجحان.

**الكلمات المفتاحية :** الخزانات المرنة، التآرجح، تفاعل سائل-هيكل، الجسم العائم، النمذجة العددية، النمذجة التجريبية

### **Dynamique de déformation d'un réservoir de liquide servant à la stabilisation d'une structure flottante en mouvement Complexe**

Le ballonnement est un phénomène qui apparaît à l'intérieur des réservoirs partiellement remplis, il désigne le mouvement oscillatoire de la surface libre du liquide. Lorsque ces réservoirs sont portés par des systèmes flottants, servant à leurs stabilisations, le ballonnement devient de plus en plus complexe. L'objectif de cette thèse est de modéliser la dynamique de ballonnement des liquides dans des réservoirs flottants à parois déformables en IFS, sous une excitation de tangage ou de roulis. Un dispositif expérimental a été mis en œuvre afin de constituer une base de données expérimentales. Ce dispositif a objet pour étudier et analyser le ballonnement sous l'effet de mouvement de tangage. Les résultats obtenus ont été explorés pour valider un modèle numérique développé. Le modèle numérique est mis en place en prenant compte les effets de l'IFS. Un couplage partitionné est utilisé et l'évolution de la surface libre est traité par la méthode VOF. Ce modèle est validé dans le cas d'une excitation harmonique horizontale, et dans le cas d'une excitation de tangage. Le modèle est ensuite appliqué à l'étude de ballonnement dans un réservoir déformable partiellement rempli, une fois soumis aux effets gravitationnels et une autre soumis aux mouvements de tangage et de pilonnement.

**Mots-clés :** Réservoirs souples, Ballonnement, Interaction Fluide-Structure, Corps flottant, modélisation numérique, Expérimentation

### **Deformation dynamics of a liquid tank used to stabilize a floating structure in motion**

The sloshing is a phenomenon appears inside partially filled tanks, it refers to the oscillatory movement of the free surface of the liquid. When these tanks are carried by floating systems, used for their stabilization, the sloshing becomes more complex. The objective of this thesis is to model the dynamics of liquid sloshing in floating tanks with a deformable wall into IFS, under pitch and heave motion. An experimental scheme has been implemented to build up an experimental database. The device is designed to study and analyze the sloshing under the effects of pitch motion. The obtained results were explored to validate a numerical model developed. The numerical model is implemented taking into account the FSI effects. A partitioned coupling is used and the evolution of the free surface is treated by the VOF method. This model is validated in the case of the horizontal harmonic excitation, and in the case of a pitch excitation. The model is then applied to studying sloshing in a partially filled deformable tank, once subjected to gravitational effects and another subject to pitch and heave motion.

**Keywords :** Flexible tank, Sloshing, Fluid-Structure Interaction, Floating body, numerical modeling, Experimentation