

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA de Bejaia



Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique



*Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement
(LRHAE)*

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par :

ZOUAOUI Lina
DEBBOU Sylia

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER en Hydraulique**

Option : Ouvrages et Aménagements Hydrauliques.

Intitulé

Calcul sismique et modélisation numérique du comportement dynamique des réservoirs de stockage de liquides

Soutenu le 14 / 07 / 2022 devant le jury composé de :

Président : M. Allouche
Examineurs(s) : Z. Amoura
Promoteur(s) : A. Seghir

Année universitaire 2021/2022

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu tout-puissant de nous avoir donné la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien de notre famille, que nous remercions tout particulièrement. Un grand merci à nos parents, frères et sœurs qui nous ont soutenus tout au long de nos études.

Nous voudrions remercier infiniment Monsieur SEGHIR Abdelghani, professeur à l'université de Bejaia, pour son parfait encadrement, sa contribution, sa patience, son aide tout au long de ce travail et pour nous avoir consacré son temps malgré ses occupations.

Nos sincères remerciements aux professeurs du département d'hydraulique pour leur contribution à notre formation et à nos connaissances.

Nous remercions nos amis pour leur amitié, leur soutien et leurs encouragements dans les moments difficiles.

Un merci à nos collègues de la promotion 2021/2022.

Nous tenons également à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à rendre ce travail possible, que ce soit par des idées ou par des encouragements.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à mon père,
ma mère, mes sœurs,
mes frères et à toute
ma famille*

ZOUAOUI Lina

Dédicaces

*à ma chère mère, à mon cher père,
à mon cher fiancé, à mon cher frère,
à ma chère soeur.*

DEBBOU Sylia

Résumé :

Ce travail est composé de deux parties. Dans une première, on s'intéresse à la modélisation numérique du comportement dynamique des réservoirs de stockage de liquides avec prise en compte du ballottement et de l'interaction fluide-structure. A cet effet, le logiciel multi-physique ANSYS, version étudiant, a été utilisé. Ansys-Fluent dédié aux fluides et Ansys-Mechanical dédié aux solides sont mis à contribution via une interface de couplage dans Ansys Work Bench. La formulation Lagrangien-Eulérien Arbitraire (ALE) est adoptée pour résoudre avec la méthode des volumes finis, les équations de Navier-Stokes en diphasiques dans un domaine mobile. La méthode du Volume De Fluide (VOF) est appliquée pour le suivi de l'interface air-liquide. Cependant, les équations de la dynamique de la structure sont résolues avec la méthode des éléments finis en supposant un comportement élastique linéaire.

La deuxième partie de ce travail concerne le stage pratique durant lequel nous avons calculé et dimensionné un réservoir circulaire réel. Le règlement API a été appliqué pour le dimensionnement et le calcul sismique. Un second calcul sismique en appliquant le RPA avec adaptation de paramètres a été réalisé. Ce travail nous aussi permis de nous familiariser à la production de plans d'exécution et de réalisation avec un logiciel de CAO.

Mots clés : Modélisation numérique, comportement dynamique, ballottement, interaction fluide-structure, méthode VOF, ALE, dimensionnement, calcul sismique, règlements API et RPA.

Abstract :

This work is composed of two parts. In the first part, we are interested in the numerical modeling of the dynamic behavior of liquid storage tanks with consideration of the sloshing and the fluid-structure interaction. For this purpose, the multi-physics software ANSYS, student version, has been used. Ansys-Fluent dedicated to fluids and Ansys-Mechanical dedicated to solids are used via a coupling interface in Ansys Work Bench. The Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) formulation is adopted to solve with the finite volume method, the Navier-Stokes equations in two phases in a moving domain. The Volume Of Fluid (VOF) method is applied to follow the air-liquid interface. However, the equations of the dynamics of the structure are solved with the finite element method assuming a linear elastic behavior.

The second part of this work concerns the practical course during which we calculated and dimensioned a real circular tank. The API regulation was applied for the dimensioning and the seismic calculation. A second seismic calculation by applying the RPA with adaptation of parameters was carried out. This work also allowed us to familiarize ourselves with the production of execution and realization plans with a CAD software.

Keywords : Numerical modeling, dynamic behavior, sloshing, fluid-structure interaction, VOF method, ALE, dimensioning, seismic calculation, API and RPA regulations.

Table des matières

Résumé	i
Liste des figures	v
Liste des tableaux	viii
Liste des symboles utilisés	ix
Introduction générale	1
1 Recherche bibliographique	4
1.1 Introduction	4
1.2 Réservoirs	4
1.3 Ballottement	5
1.4 Comportement dynamique du réservoir	7
1.5 Modélisation	8
1.5.1 Modélisation de la surface libre	9
1.5.2 Volume de fluide VOF	12
1.5.3 Les équations de Navier-Stokes	13
1.5.4 Interaction fluide structure IFS	15
1.6 Calcul et dimensionnement des réservoirs	15
1.6.1 Dimensionnement d'un réservoir de stockage	15
1.6.2 Charges de calcul	17
1.6.3 Codes et normes de calcul des réservoirs	18
1.7 Conclusion	19
2 Modélisation numérique du ballottement dans un réservoir rigide	20
2.1 Introduction	20

2.2	Présentation du logiciel Ansys	20
2.3	Présentation du cas étudié	21
2.4	Modélisation de la dynamique du fluide	23
2.5	Méthode VOF	24
2.6	Solution analytique	25
2.7	Les étapes de la simulation	26
2.7.1	Géométrie	26
2.7.2	Maillage	27
2.7.3	Configuration (Solveur Fluent)	28
2.8	Validation des modèles	33
2.8.1	Cas du ballonnement linéaire	33
2.8.2	Cas du ballonnement non linéaire	35
2.9	Conclusion	37
3	Modélisation numérique du réservoir avec Interaction Fluide Structure	38
3.1	Introduction	38
3.2	Résolution numérique du problème couplé en interaction fluide-structure	38
3.2.1	Couplage faible (One Way Coupling)	39
3.2.2	Couplage fort (Two Way Coupling)	39
3.3	Présentation du modèle simplifié	41
3.4	Formulation des équations de conservation	43
3.5	Équations de la dynamique du fluide et de la structure	45
3.5.1	Équations de la dynamique du fluide	45
3.5.2	Équations de la dynamique de la structure	47
3.6	Algorithme partitionné pour le couplage en IFS	47
3.7	Validation des modèles	48
3.7.1	Géométrie	48
3.7.2	Maillage	49
3.7.3	Solveur Fluent	52
3.7.4	Solveur Mécanique	54
3.7.5	Couplage de systèmes	56
3.8	Résultats et discussions	58
3.8.1	Effet de la flexibilité du réservoir sur la réponse du liquide	58

3.8.2	Effet du ballonnement sur la déformation des parois du réservoir . . .	59
3.9	Conclusion	61
4	Dimensionnement et calcul sismique d'un réservoir	62
4.1	Introduction	62
4.2	Normes et règlement	62
4.2.1	API 650	62
4.2.2	RPA-99 version 2003	62
4.3	Présentation du réservoir	63
4.3.1	Présentation du réservoir avec AutoCAD	63
4.3.2	Caractéristiques	64
4.4	Dimensionnement du réservoir	64
4.4.1	Calcul des contraintes	65
4.4.2	Calcul de l'épaisseur des viroles	65
4.4.3	Calcul de rayon et épaisseur de toiture	67
4.5	Vérification sismique	68
4.5.1	Données	68
4.5.2	Zone sismique	68
4.5.3	Estimation en supposant la masse répartie	69
4.5.4	Calcul avec API 650	72
4.5.5	Commentaires sur les résultats	79
4.6	Conclusion	80
	Conclusion générale	81
	Bibliographie	83

Table des figures

1.1	(a) Ballottement linéaire, (b) Ballottement faiblement non-linéaire, (c) Ballottement fortement non-linéaire [5]	6
1.2	Modèle simplifié de Housner [5]	8
1.3	Représentation de l'interface [24]	9
1.4	Schéma de la méthode VOF [28]	12
2.1	Schéma 2D du ballottement d'un fluide dans un réservoir rectangulaire . .	21
2.2	Fenêtre principale de Fluent dans Ansys Workbench	26
2.3	Géométrie du réservoir rectangulaire sur Design Modeler -Ansys	27
2.4	Maillage du réservoir rectangulaire dans ANSYS Fluent	27
2.5	Les conditions aux limites de notre géométrie	28
2.6	Fenêtre de lancement de Fluent	28
2.7	Fenêtre du modèle multiphase	29
2.8	Fenêtre des phases	29
2.9	Fenêtre d'interface des phases	30
2.10	La région d'eau	31
2.11	Fenêtre de mouvement des mailles	31
2.12	Fenêtre des coordonnées de la ligne verticale	32
2.13	Fenêtre de patch	33
2.14	Contours avant et durant les calculs	34
2.15	Comparaison entre le modèle numérique et la solution analytique [9]	34
2.16	Comparaison entre la solution analytique [9] et le modèle numérique pour différentes tailles de maillage	35
2.17	Contour avant et durant les calculs pour ballottement non linéaire	36
2.18	Comparaison entre le modèle numérique, la solution analytique [9] et l'expérimentation [19]	37

3.1	Schéma d'un problème IFS général [16]	39
3.2	Schéma général d'un couplage One Way	39
3.3	Schéma général d'un couplage Two Way	40
3.4	Schémas de couplage fluide-structure : (a) monolithique ; (b) partitionné[16]	41
3.5	Schéma général du réservoir rectangulaire en 2D avec les notations utilisées pour les domaines et les frontières [16]	42
3.6	Comparaison des maillages et des mouvements de particules en fonction des différents formalismes (Lagrangien, Eulerien et ALE) en 1D [16]	44
3.7	Géométrie du réservoir rectangulaire en 2D avant l'extrusion	49
3.8	Géométrie du réservoir rectangulaire en 3D (parois et fluide)	49
3.9	Fenêtre de désactivation des corps solides	50
3.10	Maillage du fluide sur mécanique des fluide (Fluent)	50
3.11	Les conditions aux limites de notre géométrie du fluide	50
3.12	Fenêtre de désactivation du corps fluide	51
3.13	Maillage des parois sur structure transitoire	51
3.14	Contour des phases du fluide	52
3.15	La région du fluide	53
3.16	Fenêtre des coordonnées du plan vertical	53
3.17	Fenêtre de maillage dynamique	54
3.18	Les propriétés du matériau rigide 150 MPa	55
3.19	Les condition données pour la structure	55
3.20	Fenêtre de réglage de l'analyse sur structure transitoire	56
3.21	Schéma de couplage de systèmes	56
3.22	Fenêtre principale de couplage fort de Fluent et Structural	56
3.23	Fenêtre de réglage de l'analyse sur couplage de systèmes	57
3.24	Configuration du couplage de systèmes	58
3.25	Comparaison des réponses temporelles de l'élévation de la surface libre pour les réservoirs rigide et flexible	59
3.26	Déplacements en haut de la paroi gauche pour matériau $E = 50MPa$	60
3.27	Déplacements en haut de la paroi gauche pour matériau $E = 150MPa$	60
4.1	Présentation de dimensions et épaisseurs des viroles avec AutoCAD	63
4.2	Présentation de fond et toit avec AutoCAD	64
4.3	La carte de classification des zones sismique d'Algérie suivant RPA [2]	68

4.4 Coefficient C_i	72
---------------------------------	----

Liste des tableaux

2.1	Caractéristiques du cas de réservoir modélisé	22
2.2	Conditions aux limites	30
3.1	Conditions aux limites	52
4.1	Caractéristiques du réservoir	64
4.2	Caractéristiques du matériau	65
4.3	Les contraintes admissibles (MPa)	66
4.4	Les épaisseurs calculées et adoptées	67
4.5	Les épaisseurs adoptées	67
4.6	Rayon du toit	68
4.7	Épaisseur de toit adoptée	69
4.8	Résultats d'estimation avec la masse répartie	72
4.9	Epaisseur moyenne des viroles	73
4.10	Période impulsive T_i	73
4.11	Période convective	74
4.12	Coefficient d'accélération impulsive	75
4.13	Coefficient d'accélération convective	76
4.14	Poids effectif	76
4.15	Effort tranchant	77
4.16	Position des centres de poussées	78
4.17	Moment à la base	79
4.18	Récapitulation des calculs	79

Liste des symboles utilisés

Notations

A	Coefficient d'accélération de zone
A_c	Coefficient d'accélération convective
A_i	Coefficient d'accélération impulsive
CA	Sur-épaisseur de corrosion
C_i	Coefficient en fonction de H/D
D	Diamètre
E	Module d'élasticité du matériau
G	Densité du liquide
H	Hauteur du réservoir
H_f	Hauteur du liquide
H_H	Hauteur du liquide
H_s	Hauteur des parois du réservoir
H_t	Hauteur du toit
I	Facteur d'importance
K_s	Coefficient de période de ballottement
L_f	Largeur du réservoir
M	Moment à la base
M_{base}	Moment à la base
P	La pression statique du fluide
Q	Facteur de qualité
R	Coefficient de réduction
R_{wc}	Facteur de réduction convective
R_{wi}	Facteur de réduction impulsive
Sd	La contrainte admissible pour la condition de conception
S_{ac}	Action sismique convective
S_{ai}	Action sismique impulsive
St	La contrainte admissible pour la condition d'essai hydrostatique
t	Temps
T_c	Période convective
t_d	Épaisseur de la coque de conception
T_i	Période impulsive
t_t	Épaisseur de la coque pour l'essai hydrostatique
t_u	Épaisseur moyenne

t_w	Épaisseur des parois
V	Effort tranchant
V_c	Effort tranchant convectif
V_i	Effort tranchant impulsif
W_e	Poids effectif
W_c	Poids convectif
W_H	Poids du liquide
W_i	Poids impulsif
W_{silo}	Poids du solide
W_T	Poids totale effectif
X_c	Position des centre de poussée convective
X_i	Position des centre de poussée impulsive
X_s	Position des centre de poussée de la robe
X_t	Position des centre de poussée du toit
η	Élévations de la surface libre
Ω_f	Domaine du liquide
Γ_{fs}	L'interface fluide-structure
Γ_b	La limite du fond
Γ_{sl}	La surface libre initial
ν	Viscosité cinématique
ρ_f	masse volumique
ω_n	La pulsation propre du fluide qui correspond au mode de vibration n
μ	Viscosité dynamique
ω_e	La pulsation de l'excitation externe
σ	La constante de tension de surface
κ	Courbure
ψ	La fraction volumique du fluide
Γ_{atm}	La limite par la frontière ouverte
θ	Le coefficient de diffusivité
ξ	Le déplacement local de la structure
σ_s	La contrainte solide
σ_f	Le tenseur des contraintes fluides
Ω_s	Le domaine solide
Γ_{bw}	La base de la paroi
σ_{sd}	Limite d'élasticité
σ_{st}	Résistance à la traction
γ_H	Densité d'huile
γ_s	Densité du solide
ρ	Masse volumique du liquide
ξ	Amortissement totale
η	Correction d'amortissement
$\dot{\xi}$	La vitesse de la structure
\mathbf{A}_e	Accélération due à l'excitation externe
\mathbf{f}_σ	La force de tension superficielle

g	Vecteur de gravité
n	Le vecteur unitaire normal extérieur
u	La vitesse d'écoulement
w	La vitesse de déplacement du maillage

Abréviations

ALE	Arbitrary Lagrangian-Eulerian
API	American Petroleum Institute
BEM	Boundary Element Method (méthode des éléments de frontière)
CFD	Computational Fluid Dynamics (dynamique des fluides numérique)
CSM	Computational Mstructural Mechanics (mécanique structurelle numérique)
FDM	Finite Difference Method (méthode des différences finies)
FEM	Finite Element Method (méthode des éléments finis)
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
IFS	Interaction Fluide-Structure
RPA	Règlement Parasismique Algérien
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics
TLD	Tuned Liquid Dumpers
VOF	Volume Of Fluid

Introduction générale

Afin de concevoir une structure en toute sécurité, l'analyse de son comportement sous différents types et combinaisons de chargement est importante. Cette analyse se base sur un calcul dynamique qui peut être réalisé en utilisant différentes méthodes théoriques, numériques et expérimentales. Les réservoirs sont parmi les moyens de stockage les plus utilisés dans de nombreuses industries, notamment dans les industries hydrauliques, chimiques, gazières et pétrolières. Ils peuvent être de forme cylindrique, rectangulaire, ou autre. Ils sont aériens ou enterrés, horizontaux ou verticaux, en fonction de la nature du produit stockée, de leur positions et de leur utilisation [20]. Les réservoirs sont plus complexes en matière de dimensionnement, d'étude et de prise en charge du volet sécurité. Ces ouvrages sont des éléments clés des systèmes de maintien de la vie et de l'économie, tels que les installations d'approvisionnement en eau ou les installations pétrolières. La sécurité sismique des réservoirs de stockage de liquides a donc pris une importance considérable. Il est essentiel de maintenir les réservoirs de stockage de liquides en état de marche après un tremblement de terre pour garantir l'approvisionnement en eau et en carburant des zones touchées par le séisme et pour atténuer les effets néfastes du séisme, tels que les fuites de liquides hautement toxiques ou inflammables [14].

Dans de nombreuses applications industrielles, un réservoir contenant un liquide soumis à une excitation externe provoque des vibrations indésirables du liquide appelées "ballotement". Le ballotement est le résultat des forces induites par l'accélération et la décélération sur la structure. Ce phénomène est affecté par plusieurs paramètres, tels que le niveau de remplissage du liquide, l'amplitude et la fréquence de l'excitation externe, et la forme du réservoir. Le ballotement liquide peut entraîner des dommages structurels sévères et irréversibles au réservoir. Ce ballotement est encore plus dangereux à la résonance, où les oscillations de la surface libre sont considérablement amplifiées. Ainsi, ce phénomène est l'une des questions les plus cruciales pour de nombreuses applications de recherche, d'ingénierie et d'industrie. La modélisation du

ballotement peut être divisée en catégories, à savoir les approches expérimentales, analytiques et numériques. Ces dernières années, avec le développement rapide de la puissance de calcul, les approches numériques ont connu une avancée majeure, elles ont placé la simulation multi-physique à la pointe de la recherche scientifique [15].

L'analyse dynamique de ces structures par modélisation numérique nécessite une procédure capable de prendre en compte l'interaction fluide-structure (FSI), ainsi que le ballotement du fluide stocké. En effet, dans la littérature traitant du ballotement, on peut trouver plusieurs modèles numériques basés sur différentes formulations. Ces modèles numériques peuvent être classés en trois catégories [4] : les méthodes à maillage fixe, qui sont des méthodes eulériennes, les méthodes dynamiques ou à maillage mobile, qui sont basées sur des formulations lagrangiennes ou lagrangiennes-eulériennes, et les méthodes sans maillage, qui évitent le processus de maillage du domaine.

Dans le présent travail, nous nous intéressons à la modélisation du comportement dynamique et à la simulation numérique de la surface libre (ballotement) sans interaction fluide-structure, puis à la mise en œuvre d'un modèle numérique de couplage fluide-structure pour la simulation des fluctuations de la surface libre et des déformations des parois du réservoir, en utilisant le logiciel multi-physique ANSYS-Student. Le fluide est considéré diphasique en écoulement laminaire. Le suivi de l'interface air-liquide est assuré avec la méthode VOF et les déformations des parois du réservoir sont considérées à comportement élastique linéaire. D'autre part, ce mémoire contient une partie pratique dédiée au calcul et dimensionnement d'un réservoir réel selon les règlements API et RPA. Cette partie a été réalisée en collaboration avec un bureau d'étude, elle nous a permis de nous familiariser avec les calculs et la production de plans d'exécution et de réalisation en utilisant le logiciel AutoCAD.

Ce travail est structuré en quatre chapitres complétés par une introduction générale et une conclusion générale.

Le premier chapitre est dédié à des généralités sur le ballotement, l'interaction fluide-structure, la modélisation numérique ainsi que les calculs et la conception des réservoirs, avec codes et règlements utilisés.

Le deuxième chapitre traite de la modélisation 2D et biphasique sur ANSYS Fluent par la méthode du volume de fluide (VOF) utilisée en mécanique des fluides (Fluent) qui permet de suivre et de déterminer la hauteur de la surface libre du liquide au ballotement ainsi qu'une comparaison des solutions numériques avec les résultats expérimentaux et analytiques.

Le troisième chapitre expose la méthodologie de la simulation multiphysique de la dynamique d'un réservoir avec prise en compte de l'interaction fluide-structure (IFS) et du ballonnement du liquide stocké. A cet effet, les codes de calcul Ansys Fluent et Ansys Mechanical ont été utilisés comme deux participants pour réaliser les calculs en couplage partitionné implicite pour deux réservoirs rigide et flexible.

Dans Fluent, l'écoulement est considéré à deux phases non miscibles avec une interface eau-air, en utilisant la méthode VOF pour suivre cette interface et déterminer la surface libre.

En mécanique, la structure est considérée comme flexible et une autre rigide de différents modules d'Young.

Après avoir couplé ces deux systèmes, on obtient les effets de l'écoulement du fluide sur la déformation des parois ainsi que la flexibilité du réservoir sur le ballonnement du fluide.

Le quatrième chapitre consiste en un dimensionnement et un calcul sismique d'un réservoir cylindrique réel selon deux règlements API et RPA.

Recherche bibliographique

1.1 Introduction

Ce chapitre est dédié aux notions relatives à l'étude du comportement dynamique des réservoirs de stockage de liquides, à leur modélisation numérique avec prise en compte du ballonnement, ainsi qu'aux méthodes utilisées à cet effet. De plus, les charges de dimensionnement et de calcul sismique sont exposées avec les codes et normes de calculs.

1.2 Réservoirs

Les réservoirs de stockage sont des structures d'ingénierie essentielles qui sont très répandues au cours des dernières décennies. Ils sont utilisés pour le traitement des eaux usées et le stockage de l'eau, des produits pétroliers, de l'oxygène, de l'azote, des gaz à haute pression, du gaz naturel liquéfié (GNL), des gaz de pétrole liquéfiés (GPL), etc.

Il existe de nombreux types de réservoirs en fonction du matériau, de construction, de la structure, du contenu, du volume et de l'état de stockage. Les réservoirs de stockage de liquide peuvent être construits en acier ou en béton.

La durée de vie économique des réservoirs en béton ou en acier est habituellement comprise entre 40 et 75 ans. Les réservoirs en béton peuvent être construits enterrés ou semi-enterrés, posés sur le sol ou montés sur un socle ou sur une structure porteuse. En outre, les structures contenant des liquides sont classées selon les caractéristiques suivantes : la configuration générale, qui classe les réservoirs en rectangulaires, sphériques ou cylindriques ; le type de joint de paroi, qui peut être articulé ou flexible ; et enfin, la méthode de construction sous forme de réservoirs en béton armé ou précontraint [5].

La sécurité sismique des réservoirs de liquides est d'une importance considérable. Les réservoirs de stockage d'eau doivent rester fonctionnels dans la période post-séisme pour assurer l'approvisionnement en eau potable des régions touchées par le séisme. Les réservoirs de liquides industriels contenant des liquides hautement toxiques et

inflammables, ne doivent pas perdre leur contenu pendant le tremblement de terre pour cause environnementale, sans compter les préjudices économiques induits en cas de perte du liquide ou l'endommagement de l'ouvrage. Le comportement sismique des réservoirs de stockage de liquides est un problème très complexe dû à l'interaction fluide-structure. En conséquence, de nombreuses études se sont concentrées sur le comportement sismique, l'analyse et la conception de ces réservoirs, en particulier ceux posés sur le sol [18].

1.3 Ballottement

Le ballottement désigne les mouvements d'un liquide dans un réservoir soumis à une accélération et en présence d'une surface libre. Lorsque le réservoir est soumis à des vibrations extérieures, celles-ci donnent naissance à des vagues se propageant à la surface du liquide, ces vagues se réfléchissent sur les parois et forment des ondes, ce qui distingue le ballottement du mouvement général des vagues en milieu ouvert. On peut trouver le problème de ballottement hors le domaine de génie civil dans les réservoirs des avions, navires ou les camions transportant des liquides.

D'autre part, la dynamique de ballottement du liquide peut être exploitée en l'utilisant comme dispositifs de contrôle du mouvement, généralement connus sous le nom de "Tuned Liquid Dumpers" (TLD). Les TLD consistent en un conteneur partiellement rempli de liquide, généralement de l'eau, placé au sommet d'une structure, ils transmettent un déversement indirect au système primaire, réduisant ainsi la réponse. Les TLD ont été mis en uvre avec succès dans des structures pour supprimer leurs mouvements sous l'effet du vent, des vagues et des tremblements de terre. Les exemples de telles installations dans des structures incluent des gratte-ciel et tours de contrôle, etc.

Il existe trois modes de ce phénomène, ballottement linéaire, faiblement non-linéaire, fortement non-linéaire. Dans le cas de la figure 1.1(a), le liquide subit de très faibles oscillations et sa surface libre reste plane. Il s'agit d'un cas parfaitement linéaire qui peut être décrit par les équations d'oscillation d'un pendule linéaire. Dans le cas de la figure 1.1(b), le liquide subit des oscillations plus ou moins importantes et sa surface n'est plus plane. La surface du liquide est décrite par des équations différentielles. Dans le cas de la figure 1.1(c), la surface libre possède un mouvement fortement non-linéaire principalement due à des changements rapides des vitesses. Ce comportement du fluide très non-linéaire nécessite des méthodes de calcul élaborées [5].

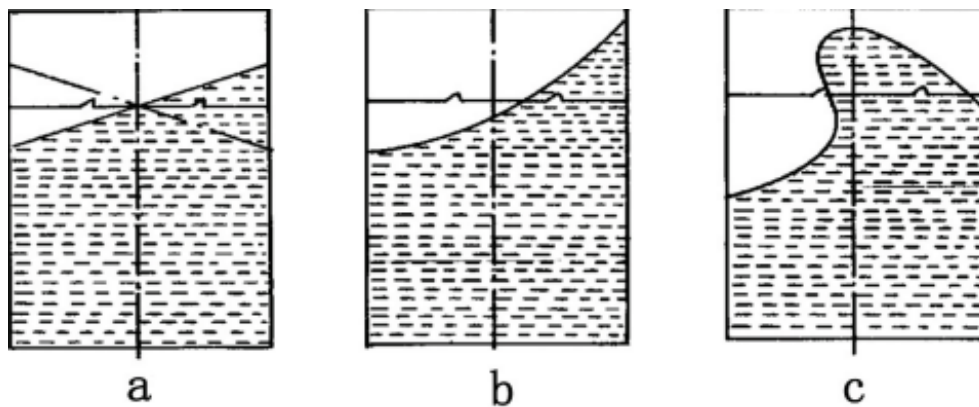


FIGURE 1.1 – (a) Ballottement linéaire, (b) Ballottement faiblement non-linéaire, (c) Ballottement fortement non-linéaire [5]

Le ballottement dans les réservoirs de confinement des liquides n'est généralement pas un phénomène négligeable, même en cas d'excitation sismique de très faible amplitude, en raison de la grande quantité de liquide contenue et de la faible rigidité de la coque du réservoir. Ce phénomène peut représenter un mouvement violent du fluide avec une manière fortement non linéaire impliquant des impacts à grande vitesse sur les parois et le toit du réservoir dans le sens oblique, des vagues de rupture et la formation de gouttelettes de liquide. L'amplitude du ballottement, en général, dépend de la nature, de l'amplitude et de la fréquence du mouvement sismique, du niveau de remplissage du liquide, des propriétés du liquide et de la géométrie du réservoir. Lorsque la fréquence du mouvement est proche de l'une des fréquences naturelles du ballottement liquide, on peut s'attendre à des vagues de ballottement de grandes amplitudes. Les forces hydrodynamiques élevées générées par les ondes de ballottement sur le réservoir affectent la réponse globale du réservoir et causent un problème compliqué d'interaction fluide-structure entre deux matériaux.

Le ballottement de liquide peut causer une défaillance imprévue du réservoir et entraîner d'énormes pertes en vies humaines, en ressources économiques et environnementales. Le déversement de mélanges toxiques stockés dans les industries de réservoirs peut être la cause de la contamination du sol et peut créer des effets néfastes sur l'environnement. Ainsi, la compréhension du comportement dynamique de la surface libre liquide est essentielle. Pour cette raison, de nombreux ingénieurs et chercheurs tentent de comprendre le comportement complexe du ballottement et de trouver les moyens de réduire son impact sur les structures et d'essayer de développer des structures pour résister à son effet.

L'observation du phénomène de ballonnement par des études expérimentales a été indispensable au développement des équations mathématiques le représentant. Bien que le ballonnement soit un problème mathématique difficile à résoudre de manière analytique, les premiers traitements de ce problème ont été réalisés avec des méthodes analytiques établies sur la théorie de l'écoulement potentiel en négligeant tous les effets visqueux.

1.4 Comportement dynamique du réservoir

Les études qui traitent le problème de dynamique des réservoirs, considèrent en général, le liquide stocké comme irrotationnel, inviscide et incompressible. Il est décrit par l'équation de Laplace. Étant donné que les méthodes analytiques sont limitées aux petits mouvements du fluide de ballonnement, les algorithmes de solution numérique qui prennent en compte avec précision toutes les sources de non-linéarité du problème de ballonnement ont été développés au fil des ans. Dans ces méthodes, le mouvement du fluide à l'intérieur du conteneur a été représenté par les équations de Laplace, d'Euler, des ondes ou de Navier-Stokes, qui ont été résolues en utilisant la méthode des éléments de frontière (BEM), la méthode des différences finies (FDM), la méthode des éléments finis (FEM) [21]. (Housner, 1957, 1963) a formulé une idéalisation utile, communément appliquée dans la pratique du génie civil, pour estimer la réponse sismique des réservoirs rectangulaires et cylindriques rigides, soumis à des mouvements de sol et totalement ancrés dans le sol. Le liquide a été supposé incompressible, non visqueux et ne subissant que de petits déplacements. Dans cette méthode, la pression hydrodynamique induite par les excitations sismiques est séparée en composantes impulsive et convective à l'aide d'une approche de masse concentrée.

La pression impulsive est provoquée par la partie de liquide accélérant avec le réservoir et est modélisée par une masse rigidement reliée aux parois du réservoir, la pression convective est provoquée par la portion de liquide oscillant dans le réservoir et est modélisée par une série de masses reliées aux parois du réservoir par des ressorts, avec des tailles décroissantes représentant les différents modes naturels de ballonnement.

La figure 1.2(a) montre la déformation de la surface libre du premier mode de ballonnement. La figure 1.2(b) montre la modélisation simplifiée utilisant des masses et des ressorts pour un mode de ballonnement donné. Cette méthode est probablement l'une des procédures les plus connues dans la littérature. Cependant, il convient de noter que l'effet de la flexibilité de la paroi réservoir n'est pas pris en compte dans cette technique simplifiée.

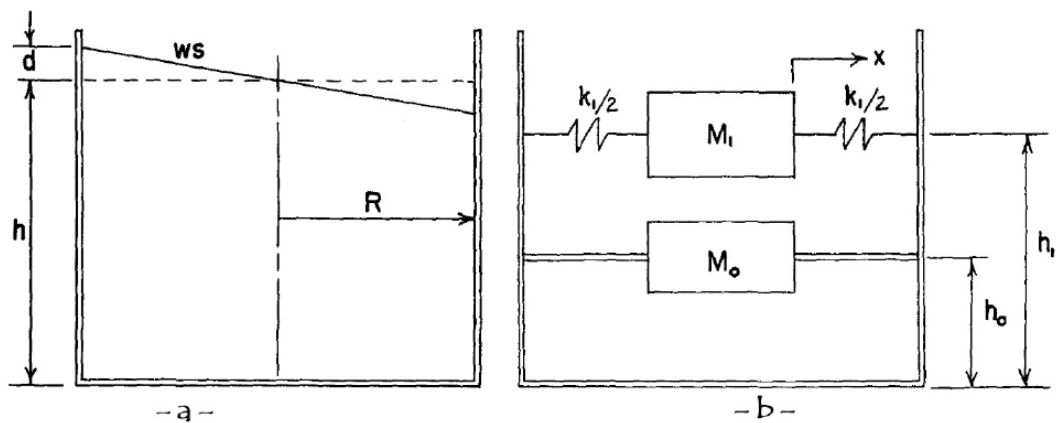


FIGURE 1.2 – Modèle simplifié de Housner [5]

De nombreuses normes et guides actuels ont adopté la méthode de Housner avec quelques modifications qui sont basées sur les résultats d'études ultérieures menées par d'autres chercheurs pour la conception sismique de réservoirs de stockage des liquides.

1.5 Modélisation

La modélisation est la représentation d'un système par un modèle. C'est aussi la construction du modèle, il permet d'étudier et de valider la conception des ouvrages complexes tel que les réservoirs de stockage, elle se compose en deux types : la modélisation physique, et la modélisation numérique.

La modélisation physique permet d'étudier et de valider la conception de différentes structures. La réalisation de ces modèles nécessite de grandes installations, une instrumentation coûteuse et prend beaucoup de temps, par conséquent, les chercheurs se sont penchés vers la modélisation numérique qui consiste à étudier les mouvements des fluides par la résolution numérique de leurs équations de mouvement. Cette discipline est connue sous le nom de la mécanique des fluides numérique désignée par CFD qui signifie en anglais Computational Fluid Dynamics. La CFD l'accès à toutes les informations instantanées du fluide et l'écoulement en tous points avec un coût négligeable par rapport à la réalisation des modèles physiques.

Il existe un large choix des logiciels de modélisation qui possèdent chacun leurs spécificités selon leur domaine d'utilisation, alors pour la réalisation de ce travail nous avons fait un aperçu sur ANSYS Workbench qu'on a l'utilisé dans notre modélisation numérique.

1.5.1 Modélisation de la surface libre

La surface libre d'un liquide contenu dans un récipient est la surface qui est en contact avec l'air, sa pression à l'interface est généralement égale à la pression atmosphérique. Quelle que soit la position du récipient, cette surface au repos est toujours plane et horizontale, et si le récipient est étroit, la surface libre n'est plus plane mais légèrement courbée vers le bas. La détermination de cette interface qui sépare la phase eau et la phase air est l'un des problèmes majeurs dans l'étude numérique. En général, la notion d'interface est utilisée pour évoquer la surface de séparation qui existe entre les deux phases, cette interface est une zone de faible épaisseur où les grandeurs physiques subiront une discontinuité ou un saut. Pour un mélange eau-air, la masse volumique peut varier d'un facteur 1000 entre

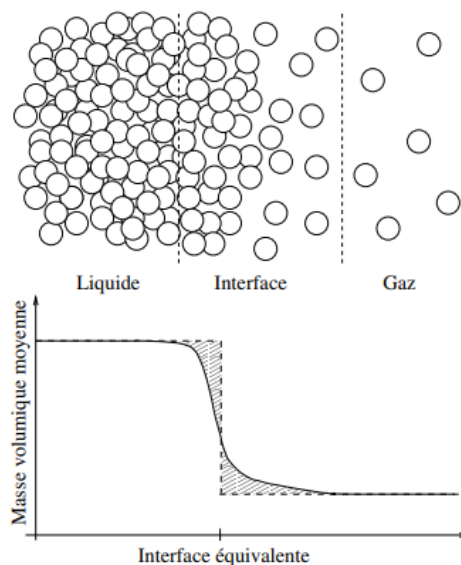


FIGURE 1.3 – Représentation de l'interface [24]

deux cellules de calcul adjacentes. Ce saut de densité, qui est près des bulles d'air et des gouttelettes d'eau, présente un défi de stabilité numérique lors de la résolution des équations dû à la présence de la masse volumique dans plusieurs termes des équations de Navier-Stokes. Différentes méthodes ont été développées pour résoudre ce problème, et le choix de la méthode appropriée dépend de l'application et de la précision souhaitée. Pour qu'un modèle numérique soit capable de simuler les écoulements aux interfaces, il doit répondre à un certain nombre de critères à savoir :

- la conservation de la masse et de la quantité de mouvement ;
- la précision et la stabilité ;
- la représentation de l'interface du fluide ;

- le mouvement de l'interface dans le temps ;
- le traitement des cellules de calcul partiellement remplies ;
- le couplage des conditions au niveau de l'interface avec les équations de mouvement ;

Selon le type de maillage adopté, les méthodes de traitement des modèles diphasiques peuvent se classer en trois catégories : les méthodes avec maillage fixe où la position de l'interface est reconstruite par le calcul sur un maillage immobile, les méthodes avec maillage mobile pouvant se déformer en même temps que l'interface, et enfin les méthodes sans maillage.

Méthodes à maillage mobile

Les méthodes de maillage mobile sont conceptuellement les plus intuitives puisqu'elles consistent à utiliser un maillage qui épouse la forme des interfaces. Comme la forme des inclusions évolue au cours du temps, le maillage change lui aussi. Avec une telle discrétisation, l'ensemble des conditions de saut aux interfaces peuvent être imposées naturellement et en respectant exactement la géométrie des surfaces. Ces méthodes sont donc très précises. Elles ont néanmoins l'inconvénient d'être difficiles à mettre en oeuvre. En particulier, il est pratiquement hors de portée de simuler plusieurs inclusions ou des changements de topologie avec de telles méthodes. Elles sont très efficaces lorsqu'on s'intéresse à des conditions d'écoulements où les bulles sont sphériques. Souvent, ces méthodes supposent que la phase gazeuse n'a pas d'effet sur la dynamique de l'écoulement. Elles ne résolvent alors l'équation de bilan de quantité de mouvement que dans la phase liquide et imposent une condition de glissement à l'interface. Cette condition à la limite est une bonne approximation, cependant, la condition de saut implique une discontinuité du gradient de vitesse dont on ne peut pas tenir compte sans résoudre la phase gazeuse. Parmi ces méthodes, on trouve les méthodes mixtes lagrangiennes-eulériennes, dites aussi ALE pour Arbitrary Lagrangian Eulerian. Cette dernière est une méthode précise, elle permet de modéliser les grandes déformations de surface libre tout en conservant une meilleure qualité du maillage et d'obtenir un suivi plus précis de la frontière du domaine. Par contre, elle est difficile à mettre en oeuvre pour des géométries tridimensionnelles [24].

Méthodes sans maillage

Dans les méthodes sans maillage aucun maillage n'est utilisé dans le domaine de calcul. La méthode la plus connue dans cette catégorie est la méthode dite SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) ou particules hydrodynamiques lissées en français. Cette méthode a été élaborée à l'origine pour la simulation de systèmes gravitaires en astrophysique et adaptée à la simulation des écoulements à surface libre. La SPH utilise des particules lagrangiennes qui possèdent les propriétés matérielles du milieu décrit, une masse, une vitesse propre, et se déplacent selon un système d'équations de conservation établi. Par sa nature lagrangienne et sans maillage, la méthode SPH est particulièrement adaptée aux simulations en domaine ouvert avec grande déformations que le traitement de détachements de gouttelettes ou de vagues déferlantes. Les conditions de surface libre n'ont pas à être imposées car elles sont satisfaites naturellement par la formulation donc la surface libre ne requiert a priori aucun traitement spécifique [24].

Méthodes avec maillage fixe

Dans le cas des méthodes à maillage fixe, seul un maillage eulérien discrétise l'ensemble du domaine physique considéré. Les équations d'évolution des fluides et celles des interfaces sont résolues sur ce maillage fixe. On distingue deux types de représentation et de suivi des interfaces suivant que l'on utilise :

- Une fonction de présence valant 0 dans une phase ou 1 dans l'autre, ce sont les méthodes VOF pour Volume Of Fluid.
- Une fonction s'annulant à l'interface, ce sont les méthodes level set.

Ces deux derniers types de méthode sont fondés sur le formalisme mono-fluide. Ceci peut apparaître comme une difficulté conceptuelle dans la mesure où ces méthodes étalent généralement l'interface sur plusieurs mailles alors que ce formalisme suppose que les interfaces sont infiniment fines. De ce point de vue, les méthodes à interfaces diffuses, qui ne reposent pas sur ce formalisme et qui sont des méthodes à maillage fixe, sont plus cohérentes. Un des avantages de l'ensemble des méthodes à maillage fixe est de permettre de simuler naturellement les phénomènes de rupture et de coalescence alors que les méthodes à maillage mixte nécessitent de complexes algorithmes et que les méthodes à maillage mobile ne permettent pas de simuler de tels phénomènes. Cet avantage algorithmique certain ne doit pas faire oublier que la vraie difficulté de la prise en compte des phénomènes de rupture et de coalescence est l'élaboration d'un critère physique.

1.5.2 Volume de fluide VOF

La méthode VOF est une technique numérique populaire utilisée pour détecter la surface libre du domaine de calcul. Il existe deux approches générales pour la modélisation de l'écoulement multiphasique, à savoir l'approche Euler-Lagrange et l'approche Euler-Euler. La première approche considère la phase fluide comme un continuum et résout l'équation de Navier Stokes, tandis que la phase dispersée est résolue en suivant les particules dans tout le champ d'écoulement. La dernière approche traite les différentes phases comme des continus interpénétrés et introduit un terme appelé fonction indicatrice de phase ou fraction volumique. Le modèle VOF appartient à l'approche d'Euler-Euler, qui permet de modéliser deux ou plusieurs fluides non miscibles en résolvant les équations d'écoulement à moyenne volumique et de suivre le volume de la fraction des fluides dans l'ensemble du domaine de calcul. Dans chaque volume de contrôle, la somme de la fraction volumique de toutes les phases est égale à un. Par exemple, si la fraction volumique de la phase 1 dans la cellule est donnée comme γ , alors les trois cas suivants sont possibles :

- $\gamma = 0$, cela montre que le volume de contrôle particulier ne contient pas ce fluide.
- $\gamma = 1$, cela montre que le volume de contrôle est entièrement occupé par ce fluide.
- $0 < \gamma < 1$, ce volume de contrôle contient l'interface entre les deux phases des fluides.

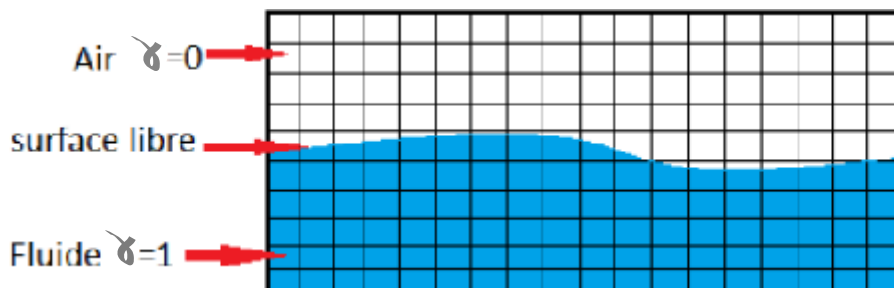


FIGURE 1.4 – Schéma de la méthode VOF [28]

En fonction de la valeur de la fraction volumique γ , les propriétés de la variable d'écoulement sont données dans les équations d'écoulement moyennées en volume. Par exemple, la masse volumique peut être donnée selon l'équation suivante :

$$\rho = \gamma\rho_1 + (1 - \gamma)\rho_2 \quad (1.1)$$

La solution de la fraction volumique peut être estimée en utilisant l'équation d'advection, puisqu'il s'agit de la propriété scalaire d'un fluide. L'équation de transport de la fraction

volumique γ sans transfert de masse peut être écrite comme suit :

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \frac{\partial u_i \gamma}{\partial x_i} = 0 \quad (1.2)$$

Généralement, la fraction volumique d'une phase primaire n'est pas résolue ; au lieu de cela, elle est évaluée en utilisant une expression $(1 - \gamma)$ parce que la somme de la fraction volumique de toutes les phases est égale à l'unité dans tous les volumes de contrôle. Dans Fluent, l'équation de fraction volumique peut être discrétisée par un ensemble de schémas de discrétisation temporelle tels que les schémas explicites et implicites. Les schémas explicites et implicites traitent les cellules avec des schémas d'interpolation standard qui sont occupées par une phase ou une autre. Mais, il existe des schémas de discrétisation qui sont appliqués aux cellules proches de l'interface entre deux phases. Les schémas utilisés dans Fluent sont le schéma de reconstruction géométrique, le schéma donneur-accepteur, le schéma de capture d'interface compressif pour les mailles arbitraires et le schéma de discrétisation compressif et zonal [22].

1.5.3 Les équations de Navier-Stokes

Les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non linéaires qui sont censées décrire le mouvement des fluides newtoniens (liquide et gaz visqueux ordinaires) dans l'approximation des milieux continus. La résolution de ces équations modélisant un fluide comme un milieu continu à une seule phase incompressible, si elle est possible, est ardue. La cohérence mathématique de ces équations non linéaires n'est pas démontrée. Mais elles permettent souvent par une résolution approchée de proposer une modélisation [28].

L'équation de continuité

Exprime la conservation de la masse liquide et de l'énergie d'une section à l'autre. Leur équation s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1.3)$$

Pour un fluide permanent et incompressible l'équation devient : $\text{div}(\mathbf{u}) = 0$

Conservation de la quantité de mouvement

Comme l'écoulement est un phénomène physique. La masse du liquide est conservée le long de l'écoulement, donc la quantité d'eau suit la deuxième loi de Newton.

$$\sum \vec{F} = m \vec{a} \quad (1.4)$$

Cette équation se traduit pour un fluide visqueux dans un champs de pesanteur par les équations de Naviers-Stokes suivantes :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho f v_x \quad (1.5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho f v_y$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho f v_z$$

Navier-Stokes (1820-1845) écrivait le système pour un fluide visqueux sous forme :

$$\nabla \mathbf{u} = 0 \quad (1.6)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} \right] = \mu \Delta \mathbf{u} - \nabla p + \rho \mathbf{g} \quad (1.7)$$

avec :

\mathbf{u} : Vecteur de vitesse du fluide

ρ : La masse volumique du fluide

$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$: Le changement de la vitesse dans le temps

$(\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u}$: Terme convectif de l'accélération

μ : La viscosité dynamique du fluide

∇p : Le gradient de la pression interne

$\rho \mathbf{g}$: La force de volume dans le cas de champs de pesanteur

1.5.4 Interaction fluide structure IFS

L'interaction fluide-structure (IFS) est un phénomène multi-physique qui se produit dans un système où l'écoulement d'un fluide provoque la déformation d'une structure solide, qui à son tour modifie les conditions aux limites d'un système fluide. Cela peut également se produire dans l'autre sens, lorsque la structure fait changer les propriétés d'écoulement du fluide. Ce type d'interaction se produit dans de nombreux phénomènes naturels et systèmes d'ingénierie créés par l'homme. Elle devient une considération cruciale dans la conception et l'analyse de divers systèmes d'ingénierie. Par exemple, des simulations de FSI sont réalisées pour éviter le flottement des avions et des turbomachines, pour évaluer les charges environnementales et la réponse dynamique des structures off-shore et dans de nombreuses applications biomédicales. Au cours des dix dernières années, les simulations de problèmes multi-physiques ont pris de l'importance dans le domaine des simulations et des analyses numériques. Afin de résoudre de tels problèmes d'interaction, les modèles de structure et de fluide, c'est-à-dire les équations qui décrivent la dynamique des fluides et la mécanique des structures, doivent être couplées. Bien que des solveurs de fluide et de solide puissent être utilisés pour résoudre les domaines respectifs, le couplage, c'est-à-dire l'échange de résultats, a été considéré comme l'une des tâches les plus difficiles en raison de la nature non linéaire de l'interface fluide-solide. Cependant, les progrès techniques dans les domaines de la dynamique des fluides numérique (CFD), de la mécanique structurelle numérique (CSM) et des algorithmes numériques ont rendu l'analyse numérique de l'interface fluide-solide plus réaliste et plus facile à réaliser dans un délai raisonnable. Ces derniers temps, de nombreux logiciels commerciaux ont été développés et mis en place pour simuler les problèmes de FSI. Certaines sociétés comme ANSYS [3], ADINA, COMSOL [6] et CD-adapco fournissent des logiciels multi-physiques efficaces avec des fonctions polyvalentes [22].

1.6 Calcul et dimensionnement des réservoirs

1.6.1 Dimensionnement d'un réservoir de stockage

Définition des hypothèses de calcul

La définition des hypothèses de calcul passe par :

- Géométrie du réservoir :

La description de la géométrie du réservoir se fait à partir du cahier des charges client ou à partir d'un besoin client bien exprimé qui contient un plan de détail du réservoir ou simplement à partir des données géométrique voulu.

- Conditions du site :

Selon l'emplacement du réservoir, il y a des normes de vent et de séisme relatif à chaque pays et à chaque région qui définissent la zone, la pression du vent et du séisme et la classe de l'ouvrage.

- Conditions de service :

Les conditions de service englobe la masse volumique du produit, la température, la pression, la dépression, la surpression qui émanent de l'exploitant final.

Choix de matériaux

Le matériau utilisé est généralement imposé par l'utilisateur final. Dans tous les cas, la confirmation du choix ou la proposition d'un nouveau matériau est indispensable suivant les normes en vigueur.

Définition des codes de calcul

C'est une étape importante du dimensionnement, parfois l'exploitant ou le constructeur à ses préférences par rapport au choix de la norme de calcul.

Calcul des épaisseurs des viroles

Pour calculer les épaisseurs des viroles il faut définir le nombre des viroles, les limites admissibles des viroles, les hauteurs du liquide et les épaisseurs de chaque virole.

Calcul de la charpente du toit

Dans cette partie il faut calculer le rayon de courbure du toit, le nombre de chevron du toit et entamer la vérification des déformations et la vérification de la résistance du toit.

Vérification Au séisme

Après avoir choisi la norme adéquate, les calculs à effectuer concernent le poids, le coefficient sismique d'accélération, le coefficient de comportement, l'effort sismique à la

base, et le moment de renversement. Cela permet de réaliser les vérifications nécessaires de stabilité et de résistance dynamique du réservoir. Ces efforts servent aussi au calcul et dimensionnement de la fondation [20].

1.6.2 Charges de calcul

Un réservoir est conçu pour résister à la plus sévère des combinaisons de charges.

Charges permanentes

Les charges permanentes sont issues du poids propre de toutes les parties du réservoir.

Charges de surexploitation

Une charge minimum de surexploitation est appliquée sur le toit du réservoir. Cette charge est plus communément appelée : charge de neige, mais en fait, elle représente aussi bien une charge de neige nominale que toute autre charge d'exploitation telle que des charges de maintenance qui pourraient être appliquées sur la toiture ou de dépression créée par un vide présent dans le réservoir. Cette charge est également applicable dans des régions où la neige n'est jamais tombée.

Contenu du réservoir

Le poids et la pression hydrostatique du contenu du réservoir jusqu'à sa capacité maximale, doit être pris en compte. La capacité maximale est habituellement déterminée par un trop-plein près du sommet du réservoir ; pour un réservoir dépourvu de trop plein, le contenu doit être calculé comme si on remplissait le réservoir jusqu'au ras du cylindre.

Pour les huiles et ses produits dérivés, la masse volumique relative du contenu est inférieure à 1, mais ces réservoirs sont en principe testés en les remplissant d'eau et une masse volumique de $1000\text{kg}/\text{m}^3$ doit donc être prise comme minimum.

Charges de vent

Les charges de vent sont déterminées sur la base d'une vitesse de calcul. La vitesse maximale du vent dépend de la région où le réservoir est construit. Dans la plupart des

cas, une valeur de 45 m/s est retenue. Elle représente la vitesse d'une rafale de trois secondes qui est dépassée en moyenne seulement une fois tous les 50 ans [7]. Des règlements permettent de calculer ces charges, comme le RNV (Règlement Neige et Vents Algérien) qui traite de la construction courante, en fournissant aux professionnels de la construction et aux concepteurs des méthodes d'évaluation des actions climatiques (neige et vent).

Charges sismiques

Dans certaines régions, un réservoir doit être prévu pour résister aux charges sismiques. Bien que quelques directives soient données dans les normes Eurocode [23] et API 650 [13] sur le calcul des réservoirs, des connaissances particulières de la zone sismique, du sol et du comportement dynamique de la structure doivent être appliquées en vue de déterminer les charges sismiques [7].

1.6.3 Codes et normes de calcul des réservoirs

L'étude et la construction des réservoirs de stockage sont régies par des normes et des codes qui regroupent un ensemble de dispositions considérées comme minimales pour la sécurité. Ces règles concernent la conception, le calcul, le choix des matériaux, la construction, la soudure, les contrôles et les essais de résistance. Elles sont élaborées conjointement par les utilisateurs et les constructeurs ; elles sont régulièrement mises à jour pour être complétées ou pour tenir compte des résultats de l'expérience acquise sur les structures en service. Les documents existants sont peu nombreux. Ce sont tous des documents nationaux, mais leur audience s'étend largement au-delà des frontières des pays émetteurs au profit des pays qui ne possèdent pas de réglementation propre. La conception et la construction des réservoirs de stockage sont limitées et réglementées selon différents codes et normes [1].

Le règlement parasismique algérien RPA [2] ne traite pas les méthodes de calcul des réservoirs en béton armé ni en acier. On trouve un manque de réglementation pour calcul des réservoirs en Algérie. Cependant, une variété d'autres codes est disponible, telle que L'Eurocode 8 [8] qui est constituée de dix parties, la partie quatre est dédiée à la conception et au dimensionnement des silos, réservoirs et canalisations. L'Eurocode 8 [8] mentionne le modèle mécanique de Veletsos et Yang, (1977) comme une procédure acceptable pour les réservoirs circulaires rigides. Pour les réservoirs circulaires flexibles, les modèles de Veletsos (1984) [25] et Haroun et Housner, (1981) [10] sont utilisés avec les modifications proposées dans Malhotra et al., (2000). L'ACI 350.3 (2006) est l'une

des normes de l'American Concrete Institute (ACI) qui concerne le dimensionnement parasismique des réservoirs rectangulaires et circulaires en béton armé, elle se base sur les modèles de Housner (1963) [11] avec la généralisation de Wozniak et Mitchell, (1978) [27]. Les paramètres des modes impulsifs et convectifs sont évalués à partir de modèles rigides. La New Zealand Society for Earthquake Engineering (NZSEE) a développé des recommandations pour le calcul sismique de réservoirs en béton armé et qui sont décrites dans le New Zealand Standard NZS 3106, qui utilise le modèle mécanique de Veletsos et Yang (1977) [26] pour les réservoirs circulaires rigides et celui de Haroun et Housner (1981) [10] pour les réservoirs flexibles. Pour les réservoirs rectangulaires rigides le modèle de réservoir circulaire rigide est utilisé dans lequel le rayon est remplacé par la demi-longueur de réservoir. L'American Water Works Association (AWWA) a publié de nombreuses normes sur le dimensionnement des réservoirs de stockage d'eau. L'AWWA D-100 (2011) traite des réservoirs soudés en acier, l'AWWA D-103 (2009) traite des réservoirs en acier boulonnés. L'AWWA D-110 (2013) traite des réservoirs en béton précontraint. Dans toutes ces normes, les réservoirs traités sont cylindriques seulement. L'American Petroleum Institute (API) possède deux normes populaires API 650 [13] et l'API 620 [12] qui fournissent des recommandations pour le dimensionnement et la construction des réservoirs cylindriques en acier. L'API 620 est orienté vers la conception et la fabrication de grands réservoirs de stockage en acier à basse pression, généralement plus de 300 pieds (91.44 mètres) de diamètre. En revanche, la norme API 650 est généralement utilisée pour les réservoirs en acier au carbone, inoxydable et aluminium situés dans les raffineries et les installations de traitement [5].

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre introductif, d'une part nous avons fait appel aux définitions de réservoir et de phénomène de ballonnement, ainsi nous avons fait une synthèse sur la modélisation numérique de la surface libre et de l'interaction fluide-structure, pour faciliter l'approche des modèles physiques que nous allons étudié dans le deuxième et troisième chapitre.

D'autre part, nous avons fait une référence bibliographique pour le dimensionnement et l'analyse sismique pour aborder le calcul en dernier chapitre.

Modélisation numérique du ballottement dans un réservoir rigide

2.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la modélisation numérique du fluide diphasique pour un réservoir rectangulaire avec l'hypothèse de parois rigides. Nous avons utilisé Ansys Fluent - Student version comme un logiciel de simulation. Il est basé sur la méthode des volumes finis (FVM) pour la résolution des équations de l'écoulement et la méthode VOF (Volume of Fluid) pour le suivi de la surface libre. Les fluctuations de la surface libre sont déterminées pour un cas de modèle simple en 2D avec ballottement linéaire et non linéaire. Ensuite, nous comparons les résultats de la simulation numérique avec la solution analytique de Faltinsen [9] et les résultats expérimentaux de Liu [19].

2.2 Présentation du logiciel Ansys

Ansys est un ensemble de logiciels de simulation numérique par éléments finis, volumes finis et méthode des particules sont utilisés pour simuler des modèles informatiques de structures, de composants électroniques ou de machines afin d'analyser la résistance, la ténacité, l'élasticité, la distribution de la température, l'électromagnétisme, l'écoulement des fluides et d'autres problèmes d'ingénierie.

Ces logiciel sont utilisés pour déterminer comment un produit se comportera avec différentes spécifications, sans avoir à construire des produits d'essai ou à effectuer des crash tests. Ils couvrent toutes les étapes nécessaires à une simulation : traitement géométrique, maillage, résolution, traitement des résultats et optimisation. Ansys est le premier éditeur mondial dans le domaine du calcul par éléments finis (MEF), les solutions logicielles proposées permettent de résoudre les problèmes de validation de produits de manière efficace et d'optimiser le processus de conception.

La plateforme ANSYS workbench encapsule les différentes applications de simulation : Mechanical, Fluent, ACP (Composite), DesignXplorer (Optimisation), SpaceClaim

(Modélisation), etc. Cette plateforme s'appuie sur une vue schématique du projet de simulation pour permettre à l'utilisateur d'organiser et de relier facilement ses différents calculs.

Pour notre modélisation, nous utilisons ANSYS Workbench version gratuite 2021 pour les étudiants avec des limitations sur l'utilisation des éléments de maillage [3].

2.3 Présentation du cas étudié

Pour notre étude on reprendra les dimensions déjà étudié pour un cas d'un réservoir rectangulaire en 2D publié dans un article en 2021 par Lydia Khouf, Mustapha Benaouicha, Abdelghani Seghir, Sylvain Guillou [17]. La géométrie du réservoir partiellement rempli est présentée sur la figure 2.1 ainsi que les notations des domaines et frontières utilisées pour les conditions aux limites.

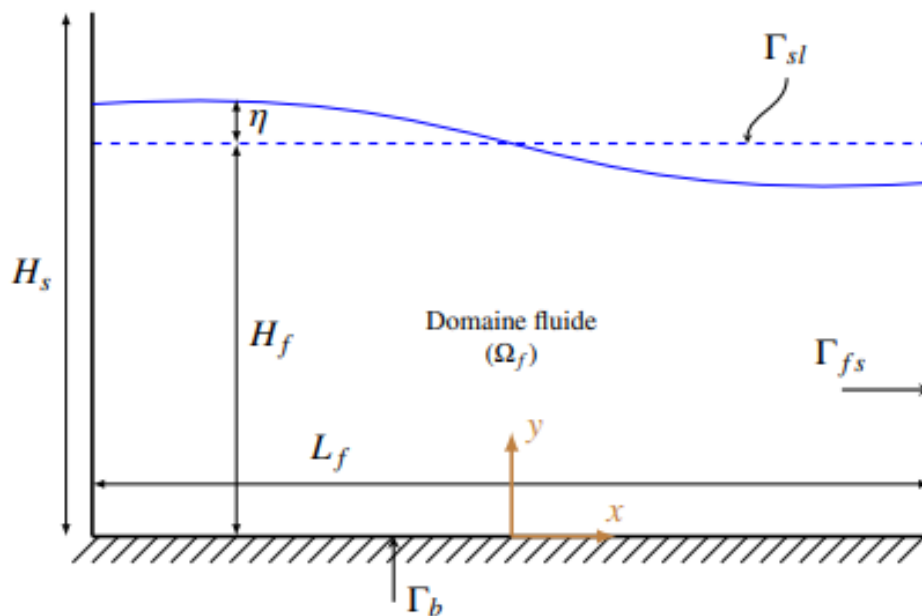


FIGURE 2.1 – Schéma 2D du ballonnement d'un fluide dans un réservoir rectangulaire

H_s : Hauteur des parois du réservoir

H_f : Hauteur du liquide

L_f : Largeur du réservoir

η : Élévation de la surface libre

Ω_f : Domaine du fluide

Γ_{fs} : L'interface liquide-paroi

Γ_b : La limite du fond

Γ_{sl} : La surface libre initiale (sans perturbation)

Caractéristiques du réservoir et propriétés physique du liquide

Hauteur du réservoir	H_s (mm)	300
Largeur du réservoir	L_f (mm)	570
Hauteur du liquide	H_f (mm)	150
Épaisseur des parois	t_w (cm)	2
Masse volumique du liquide(eau)	ρ_f (kg/m^3)	1000
Viscosité cinématique	ν (m^2/s)	$1.003 \cdot 10^{-6}$

TABLEAU 2.1 – Caractéristiques du cas de réservoir modélisé

La fréquence naturelle du fluide est calculée pour le n^{ieme} mode de ballonnement en appliquant l'équation 2.1 :

$$\omega_n = \sqrt{g \frac{n\pi}{L_f} \tanh\left(\frac{n\pi}{L_f} H_f\right)} \quad (2.1)$$

Pour $n = 1$ et $g = 9.81m/s$, on obtient la valeur de fréquence naturelle la plus basse

$$\omega_1 = 6.0578rad/s$$

L'accélération due à l'excitation externe est supposée harmonique avec une fréquence ω_e et une amplitude de déplacement b . Elle est appliquée comme une force volumique en ajoutant une composante d'accélération horizontale au vecteur gravité, donnée par l'équation suivante :

$$A_e = a \sin(\omega_e t) \quad (2.2)$$

a : amplitude de l'accélération imposée, donnée par :

$$a = b\omega_e^2 \quad (2.3)$$

2.4 Modélisation de la dynamique du fluide

L'écoulement d'un fluide newtonien est régi par les équations de Navier Stokes qui se composent de l'équation de conservation de la masse et des équations de conservation de la quantité de mouvement :

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial(\rho_f \mathbf{u})}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(\rho_f \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S \quad (2.5)$$

d'où :

ρ_f : Masse volumique du fluide

\mathbf{u} : La vitesse du fluide

t : Temps

p : La pression statique du fluide

S : Le terme source dans le fluide

Afin de parvenir à la fermeture de ce système d'équations, on doit trouver l'expression des contraintes de viscosité. Le tenseur des contraintes de viscosité dans un fluide newtonien est symétrique, il est obtenu par la loi de comportement de Newton.

τ sont les contraintes visqueuses, données comme suit :

$$\tau = \mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla^T \mathbf{u}) + \lambda(\nabla \cdot \mathbf{u})I \quad (2.6)$$

avec I : le tenseur identité donné par :

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

μ est la viscosité dynamique, λ est la viscosité seconde et \mathbf{u} est la vitesse du fluide.

Dans le cas des équations de Navier Stokes incompressibles, le terme de compressibilité $[\lambda(\nabla \cdot \mathbf{u})I]$ s'annule, celles-ci, s'écrivent alors comme suit (équation 2.8) :

$$\rho_f \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla (\rho_f \mathbf{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla^T \mathbf{u})) + S \quad (2.8)$$

Le terme source S permet d'appliquer les force de volumes dues aux accélérations comme celle de la gravité \mathbf{g} et celle du mouvement horizontal \mathbf{A}_e imposée aux réservoir. En 2D $\mathbf{g} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -9.81 \end{Bmatrix} m/s^2$ et $\mathbf{A}_e = \begin{Bmatrix} b\omega^2 \sin(\omega t) \\ 0 \end{Bmatrix} m/s^2$.

Remarque : Il est possible d'imposer un mouvement de vitesse $w_x - b\omega \cos(\omega t)$ selon x au maillage à la place de l'accélération injectée dans le terme source. Le deuxième terme la partie gauche de l'équation (2.8) doit dans ce cas être remplacé par $\rho_f(\mathbf{u} - \mathbf{w}) \cdot \nabla \mathbf{u}$ et le terme source se réduit à $S = \rho_f \mathbf{g}$. Le vecteur $\mathbf{w} = \begin{Bmatrix} w_x \\ 0 \end{Bmatrix} m/s$ est la vitesse imposée au maillage.

2.5 Méthode VOF

Initialement, la méthode VOF (Volume Of Fluid) est utilisée pour un écoulement diphasique constitué de deux fluides non miscibles sans transfert de masse entre les deux phases. La méthode VOF est basée sur l'utilisation de la fraction volumique notée γ , qui est un champ scalaire défini dans chaque maille. Cette fonction représente la fraction volumique occupée par l'un des fluides dans un volume de contrôle, et sa valeur varie de 0 à 1. À chaque pas de temps, γ est advecté par la vitesse du fluide grâce à l'équation de transport 2.9 [16].

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \gamma = 0 \quad (2.9)$$

La fonction γ vaut 1 lorsque la cellule est entièrement remplie de liquide et vaut 0 quand elle est remplie de gaz. Autrement, lorsque $0 < \gamma < 1$, le volume de contrôle contient un mélange des deux phases. Ceci indique la présence de l'interface liquide-gaz dans la cellule considérée. La masse volumique du fluide et la viscosité dynamique sont données respectivement par les équations 2.10 et 2.11, en fonction de la masse volumique de la phase liquide ρ_l , la masse volumique de la phase gazeuse ρ_g , la viscosité dynamique de la phase liquide μ_l et la viscosité dynamique de la phase gazeuse μ_g [16].

$$\rho_f = \rho_l \gamma + \rho_g (1 - \gamma) \quad (2.10)$$

$$\mu = \mu_l \gamma + \mu_g (1 - \gamma) \quad (2.11)$$

Afin de réaliser un suivi explicite de l'interface liquide-gaz, il faut procéder à sa reconstruction à partir de la fonction γ obtenue après la résolution de l'équation de transport. Pour cela, différentes méthodes ont été développées [16].

Afin de comprimer l'interface air/liquide en une couche mince, une équation de transport modifiée qui consiste à ajouter un terme de compression est utilisée [16] (équation 2.12)

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot u \gamma + \nabla \cdot \mathbf{u}_r (\gamma (1 - \gamma)) = 0 \quad (2.12)$$

Dans cette équation, $\mathbf{u}_r = \mathbf{u}_l - \mathbf{u}_g$ est une vitesse artificielle, dirigée vers la normale et vers l'interface, où u_l et u_g sont respectivement les vitesses du liquide et du gaz.

2.6 Solution analytique

La solution analytique de référence utilisée dans ce travail s'applique à la simulation du ballottement d'un liquide dans un réservoir rectangulaire de longueur L_f et de hauteur H_f , soumis à une excitation horizontale périodique. Le liquide est incompressible en écoulement irrotationnel, ce qui mène à résoudre l'équation de Laplace pour un potentiel de vitesse. Le potentiel de vitesse ϕ peut être converti en déplacement vertical η de la surface libre [17].

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=0} \quad (2.13)$$

$$\eta = \frac{1}{g} \sum_{n=0}^{\infty} \sin \left\{ \frac{(2n+1)\pi}{L_f} x \right\} \cosh \left\{ \frac{(2n+1)\pi}{L_f} H_f \right\} \quad (2.14)$$

avec :

$$\omega_n^2 = g \frac{(2n+1)\pi}{L_f} \tanh \left\{ \frac{(2n+1)\pi}{L_f} H_f \right\} \quad (2.15)$$

$$C_n = \frac{\omega_e K_n}{\omega_n^2 - \omega_e^2} \quad (2.16)$$

$$A_n = -C_n - \frac{K_n}{\omega_e} \quad (2.17)$$

$$K_n = \frac{\omega_e a}{\cosh \left\{ \frac{(2n+1)\pi}{L_f} H_f \right\}} \frac{4}{L_f} \left[\frac{L_f}{(2n+1)\pi} \right]^2 (-1)^n \quad (2.18)$$

ω_n : La pulsation propre du fluide qui correspond au mode de vibration numéro n

ω_e : La pulsation de l'excitation externe

a : Son amplitude

L'application de ce modèle se limite à des cas de ballonnement de faibles amplitudes.

2.7 Les étapes de la simulation

La modélisation du réservoir est réalisée sur logiciel ANSYS Workbench version étudiant 2021 avec mécanique des fluides Fluent, nous suivons ces étapes nécessaires pour la simulation : Géométrie, maillage, configuration, solution et résultats.

La figure 2.2 montre une capture d'écran de la fenêtre principale Ansys Workbench qui gère les étapes de la simulation.

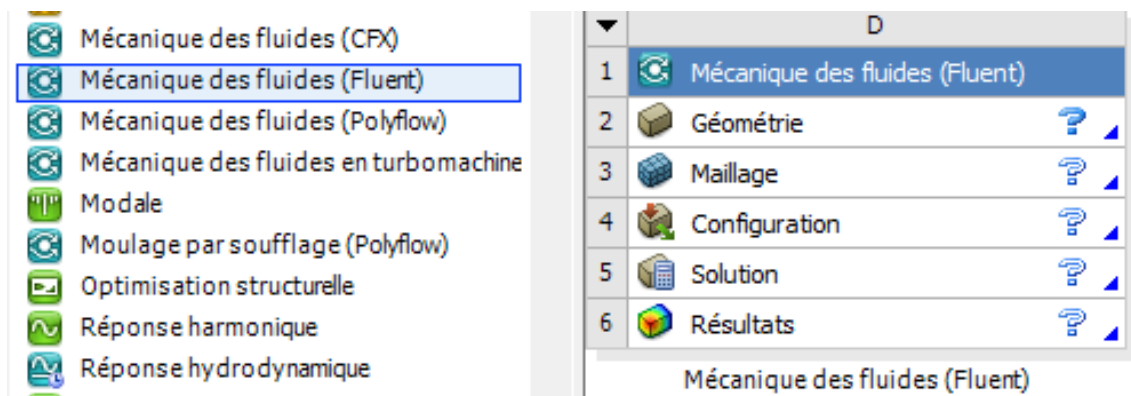


FIGURE 2.2 – Fenêtre principale de Fluent dans Ansys Workbench

2.7.1 Géométrie

La géométrie du réservoir est construite avec Design Modeler en 2D, nous avons dessiné un rectangle avec les dimensions : $H = 300mm$, $L = 570mm$, puis, créé un corps surfacique qui sera maillé à l'étape suivante.

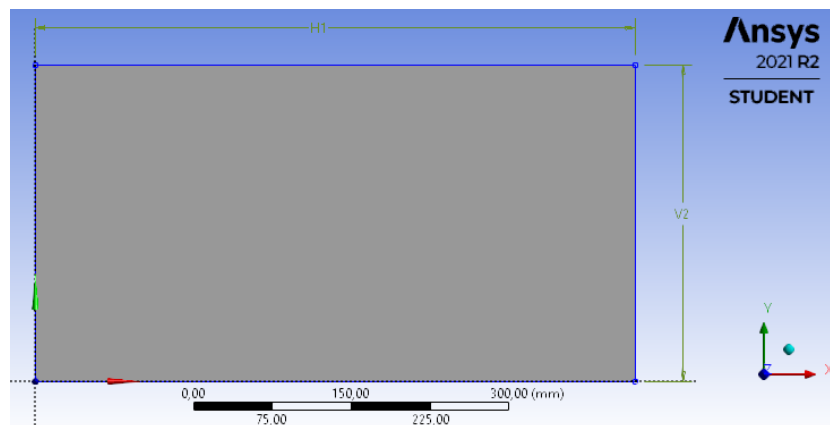


FIGURE 2.3 – Géométrie du réservoir rectangulaire sur Design Modeler -Ansys

2.7.2 Maillage

Le maillage subdivise le domaine physique en petites cellules reliées les unes aux autres, de sorte que la géométrie soit décrite avec un nombre et une taille d'éléments spécifiés avec différentes formes : maillage quadrilatère, triangulaire ou les deux.

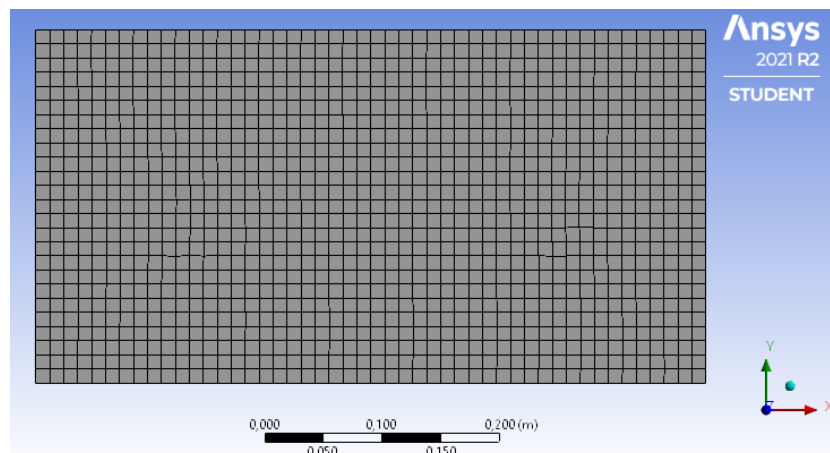


FIGURE 2.4 – Maillage du réservoir rectangulaire dans ANSYS Fluent

Nous prenons différentes valeurs de taille d'élément pour cette géométrie : 0.007 mm, 0.012 mm et 0.017 mm.

Afin de préparer les limites du domaine où seront définies les conditions aux limites, on nomme les bord du maillage comme suit :

Outlet : l'ouverture en haut du réservoir où sera appliquée la pression nulle

Bottom : le fond

Walls : les parois

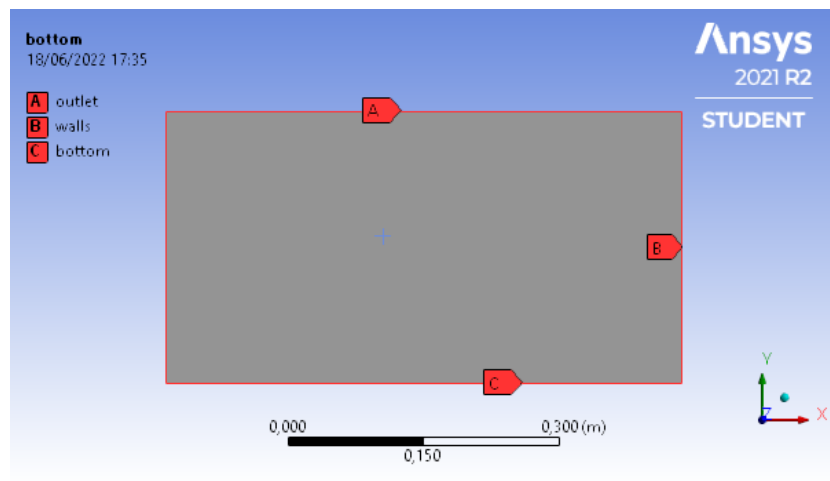


FIGURE 2.5 – Les conditions aux limites de notre géométrie

2.7.3 Configuration (Solveur Fluent)

Pour notre modélisation, nous avons choisi la dynamique des fluides numérique CFD comme physique de préférence et avons effectué les calculs avec le solveur Fluent.

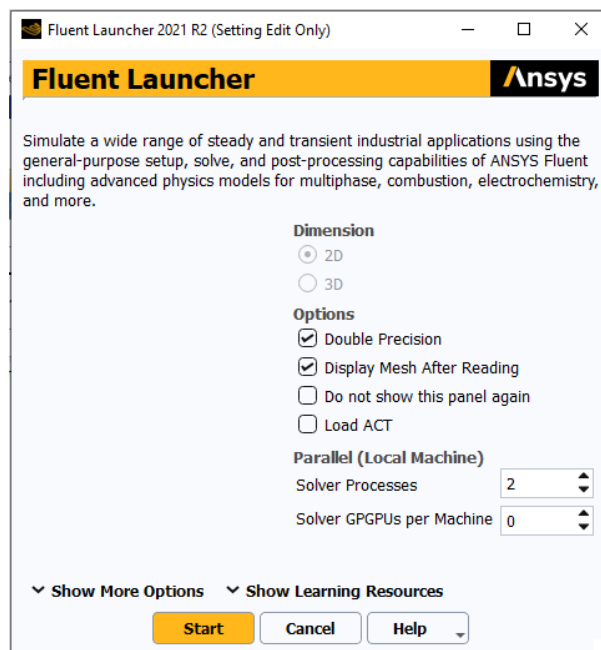


FIGURE 2.6 – Fenêtre de lancement de Fluent

Les calculs sont effectués en 2 Dimensions Double Précision 2DDP transitoire, la géométrie est discrétisée en utilisant la méthode des volumes finis en petits volumes élémentaires, l'ensemble des équations de Navier Stokes est transformé en systèmes algébriques que le

code de calcul applique pour chaque cellule.

Phases

Multiphase est le modèle utilisé pour ce cas avec la méthode Volume Of Fluid par un schéma explicite, et nous avons défini la modélisation de l'interface de type "Sharp", on choisit ce type lorsqu'une interface distincte est présentée entre les phases (figure 2.7).

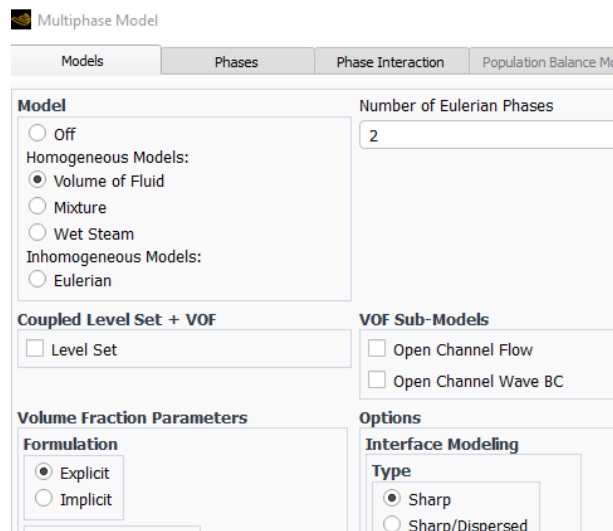


FIGURE 2.7 – Fenêtre du modèle multiphase

Nous avons défini deux fluides air et eau sur des phases.

L'air est considéré comme la première phase et l'eau liquide la seconde phase (figure 2.8).

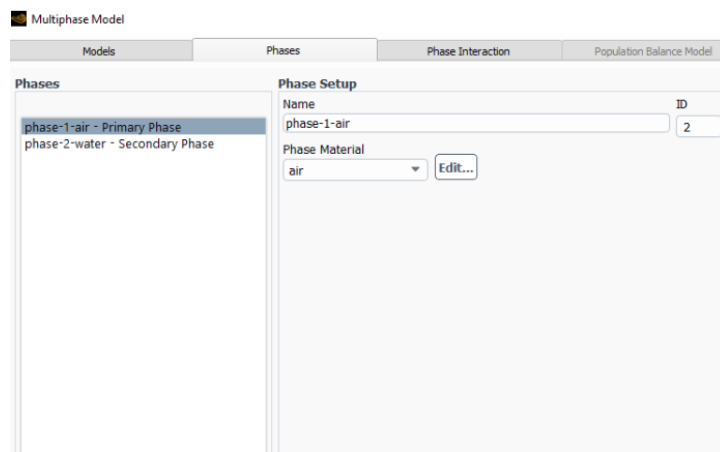


FIGURE 2.8 – Fenêtre des phases

Sur la figure 2.9, nous n'avons introduit aucune force de tension.

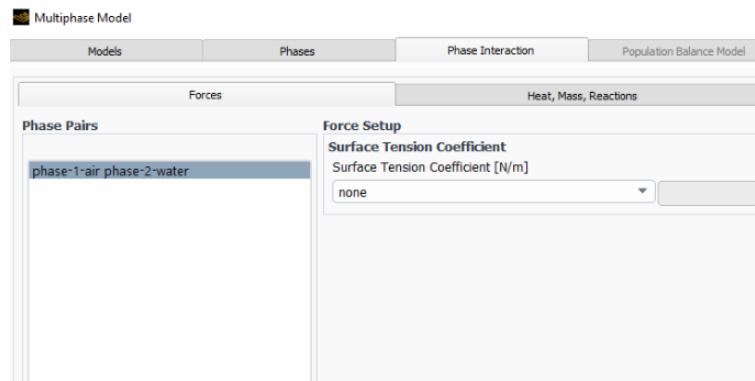


FIGURE 2.9 – Fenêtre d’interface des phases

Conditions aux limites

Suivant la figure 2.5, les conditions aux limites de notre géométrie sont données dans le tableau ci-dessous :

Sans modifier la valeur de la pression sur Outlet : $p(x, y = H) = 0$ ni de la vitesse sur le Bottom et Wall : $V = 0$

Zones	Type
Outlet	Pressure-outlet
Bottom	Wall
Walls	Wall

TABLEAU 2.2 – Conditions aux limites

Région

Pour appliquer le modèle multiphase, nous devons d’abord définir la hauteur d’eau et avoir la région d’eau sur le maillage de la géométrie comme suit : $H_w = 150$ mm. Pour cela en défini "Region Register" comme dans la figure 2.10 qui sera utilisée par la suite pour initialiser les phases. Cette région est un rectangle de longueur 0.57m et de hauteur de 0.15m.

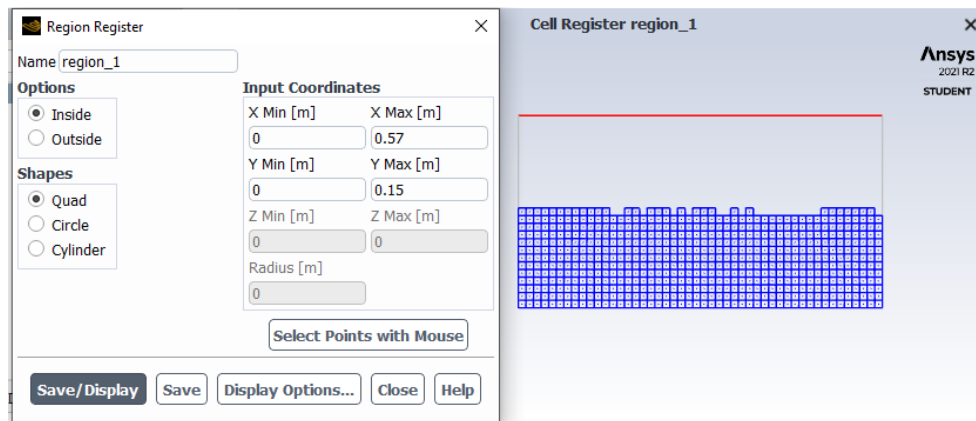


FIGURE 2.10 – La région d'eau

Les conditions de la zone cellulaire

Mouvement des mailles (Mesh Motion) :

Pour introduire la vitesse sur mesh motion figure 2.11, il faut d'abord créer une expression de vitesse sur Named Expression.

Notre cas consiste en l'étude de la surface libre linéaire et non linéaire, nous utilisons donc deux expressions différentes pour la vitesse (equation 2.20 pour ballonnement linéaire et 2.22 pour ballonnement non linéaire).

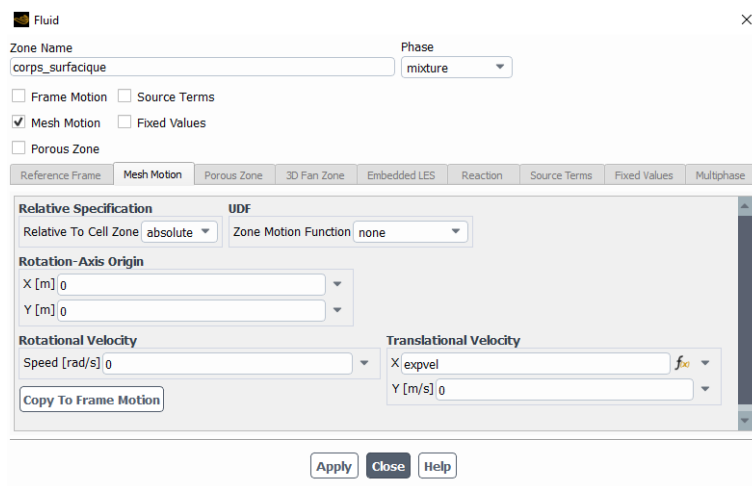


FIGURE 2.11 – Fenêtre de mouvement des mailles

Conditions d'opération :

Nous avons introduit la gravité sur l'axe Y : $g = -9.81 \text{ m/s}^2$

Une autre méthode pour avoir un mouvement horizontale est d'introduire l'équation

d'accélération 2.19 pour le ballonnement linéaire et l'équation 2.21 pour ballonnement non linéaire sur l'axe x de conditions d'opération.

Intégrale de surface

Pour obtenir les résultats de l'élévation de la surface libre, nous avons créé une ligne verticale sur la géométrie de notre réservoir avec les coordonnées indiquées dans la Figure 2.12. Cette ligne est positionnée à 2mm de la parois pour pouvoir comparer aux mesures expérimentales de Liu [19] enregistrée à cette position.

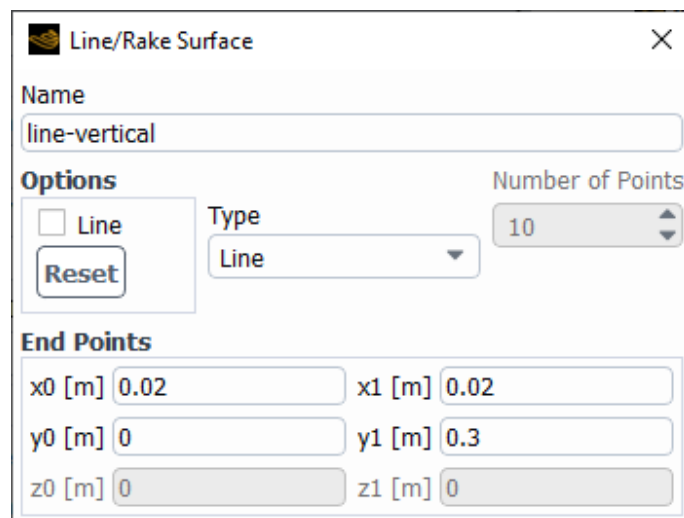


FIGURE 2.12 – Fenêtre des coordonnées de la ligne verticale

Initialisation et calcul

On initialise les calculs, puis Patch pour donner la valeur 1 à la fraction volumique de la phase liquide sur la région déjà créée (Figure 2.13).

Finalement, on lance les calculs pour :

Pas de temps : 1000

Taille du pas de temps : 0.01 s

Nombre d'itérations : 50 itérations par pas de temps

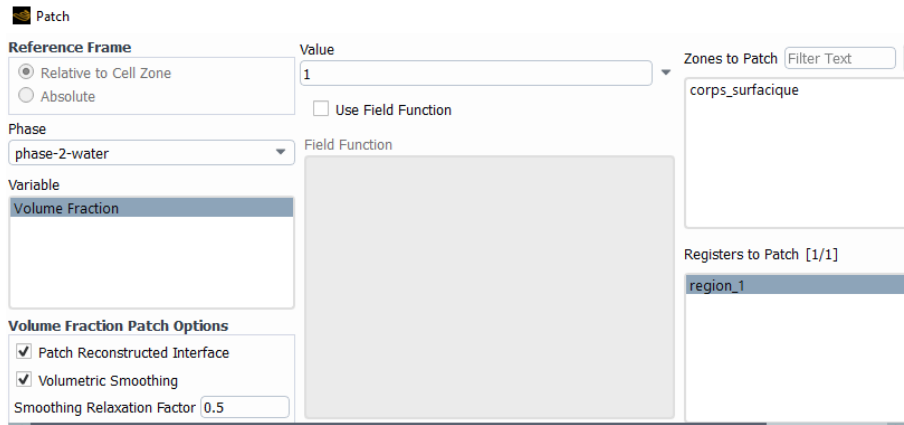


FIGURE 2.13 – Fenêtre de patch

2.8 Validation des modèles

La modélisation de ce réservoir rectangulaire est réalisée pour deux cas : ballonnement linéaire et non linéaire, en comparant les résultats numériques de cette simulation avec les résultats analytiques et expérimentaux.

2.8.1 Cas du ballonnement linéaire

Dans cette section, le modèle proposé est validé pour un cas de ballonnement linéaire. Les résultats sont obtenus avec différentes tailles de maillage et comparés à la solution analytique de Faltinsen [9].

Le réservoir soumis à une excitation avec :

Une fréquence : $\omega_e = 0.95\omega_1$

Une amplitude de déplacement : $b = 0.4mm$

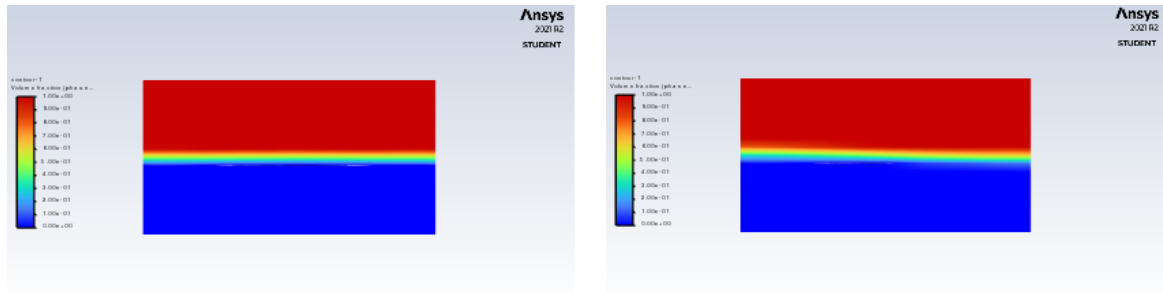
On remplace dans les équations 2.2 et 2.3, on obtient l'expression d'accélération suivante :

$$A_e = 0.4 * (0.95 * 6.0578)^2 * \sin(0.95 * 6.0578 * t) \quad (2.19)$$

Pour avoir l'expression de la vitesse que nous utilisons dans cette simulation, nous intégrons l'expression de l'accélération :

$$V_e = -0.4 * 0.95 * 6.0578 * \cos(0.95 * 6.0578 * t) \quad (2.20)$$

Dans ce cas, malgré que la fréquence de l'excitation imposée ω_e soit proche de la fréquence propre du ballonnement, celui-ci est linéaire, car l'amplitude de l'excitation est très petite. Lorsque l'on parle d'un ballonnement linéaire, cela signifie que le mouvement de la surface libre ne présente aucune discontinuité et reste toujours plat, comme le montrent les figures suivantes :



Avant les calculs

Durant les calculs $t = 4s$

FIGURE 2.14 – Contours avant et durant les calculs

La solution analytique donnée par Faltinsen [9] dont ces équations sont de 2.13 à 2.18, la résolution de ces équations est faite sur le logiciel MATLAB.

La figure 2.15 montre les variations de la surface libre η du liquide en fonction du temps, pendant les 10 premières secondes d'excitation.

La taille du maillage d'un domaine d'étude doit tenir compte de la qualité des résultats obtenus ainsi que du temps de la simulation.

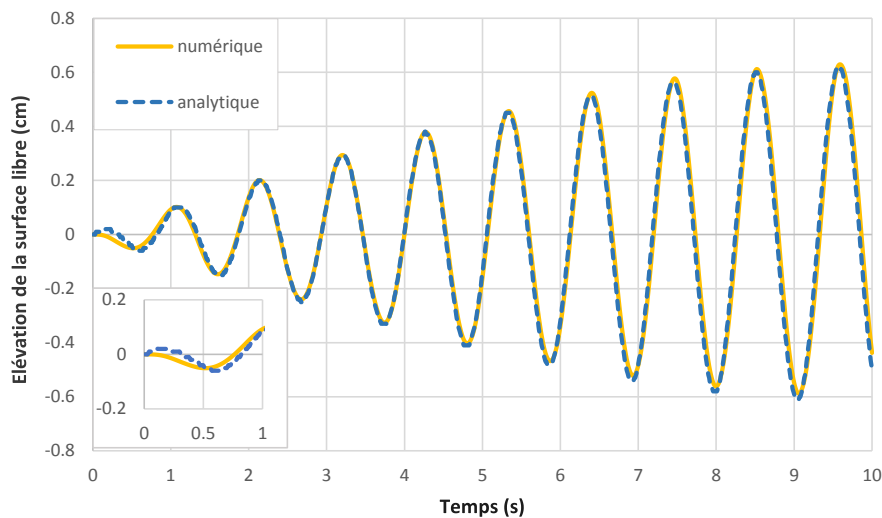


FIGURE 2.15 – Comparaison entre le modèle numérique et la solution analytique [9]

La figure 2.16 montre les résultats d'une comparaison d'élévation de la surface libre par rapport à la solution analytique pour différentes tailles de maillage.

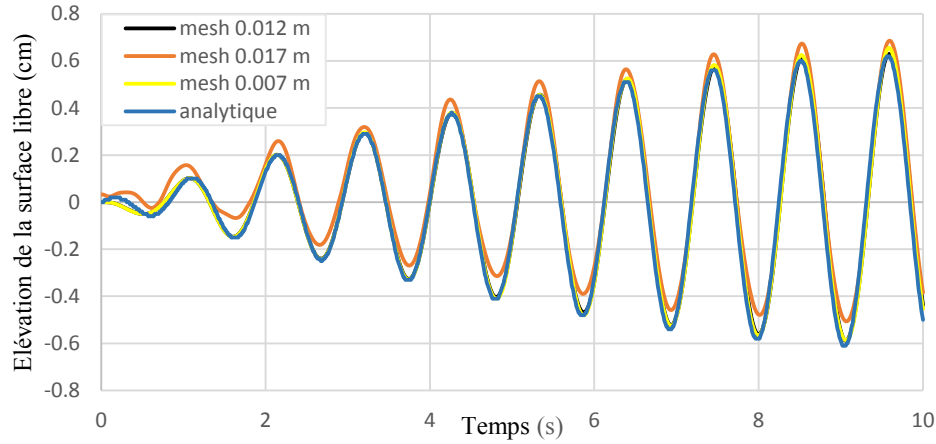


FIGURE 2.16 – Comparaison entre la solution analytique [9] et le modèle numérique pour différentes tailles de maillage

Commentaire

La courbe du résultat du modèle numérique présente sur l'ensemble de la simulation un comportement qui reproduit celui de la solution analytique, aussi la taille du maillage influence la précision des résultats numériques.

2.8.2 Cas du ballonnement non linéaire

Dans cette section, nous avons obtenu des résultats d'élévation de la surface libre en cas de ballonnement non linéaire avec :

Une fréquence : $\omega_e = \omega_1 = 6.0578 \text{ rad/s}$

Une amplitude de déplacement : $b = 5 \text{ mm}$

Selon 2.2 et 2.3, on obtient l'expression d'accélération suivante :

$$A_e = 5 * (6.0578 * 6.0578) * \sin(6.0578 * t) \quad (2.21)$$

Expression de la vitesse :

$$V_e = -5 * 6.0578 * \cos(6.0578 * t) \quad (2.22)$$

Pour ce cas de ballonnement non linéaire, l'amplitude de l'excitation est grande. Le mouvement de la surface libre de ballonnement non linéaire présente une discontinuité, un mouvement remarquable et visible, comme le montrent les figures suivantes :

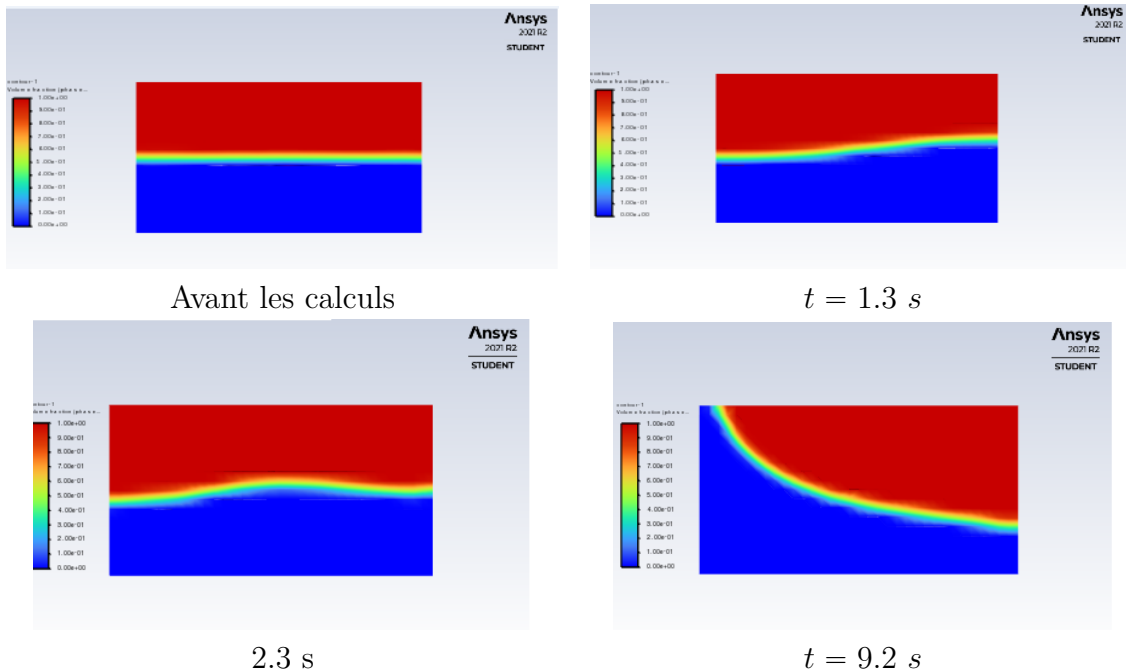


FIGURE 2.17 – Contour avant et durant les calculs pour ballonnement non linéaire

Les résultats expérimentaux sont reprises d'une étude expérimentale de Liu [19], ensuite, nous avons fait une comparaison de ces résultats expérimentaux et résultats de la solution analytique et numérique.

La figure 2.18 est une superposition des courbes issues des trois solutions.

La comparaison des fluctuations de la surface libre η est effectuée entre les résultats du modèle numérique proposé ici, la solution analytique et les résultats expérimentaux.

Commentaire

Nous remarquons que les résultats du modèle numérique pour le cas du ballonnement non linéaire sont très cohérents avec les résultats expérimentaux. De plus, contrairement à la solution analytique, cette dernière n'est plus valable pour le cas d'un ballonnement non linéaire comme le montre la figure 2.18.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué une comparaison des résultats numériques, analytiques et expérimentaux pour le ballonnement linéaire et non-linéaire. Dans le cas linéaire, nous avons remarqué une concordance entre la solution analytique et la simulation numérique, tandis que pour le ballonnement non linéaire, les résultats de la simulation numérique ne sont pas cohérents avec ceux de la solution analytique, contrairement aux résultats expérimentaux. En fait, la solution numérique n'est valable que pour le ballonnement linéaire.

Pour notre simulation numérique, nous avons effectué notre calcul uniquement sur Fluent avec l'hypothèse de parois rigides sans prendre en compte l'interaction fluide-structure, donc dans le prochain chapitre, nous nous intéresserons à la modélisation du fluide et de la structure rigide et flexible avec leur couplage pour avoir les effets de l'interaction fluide-structure.

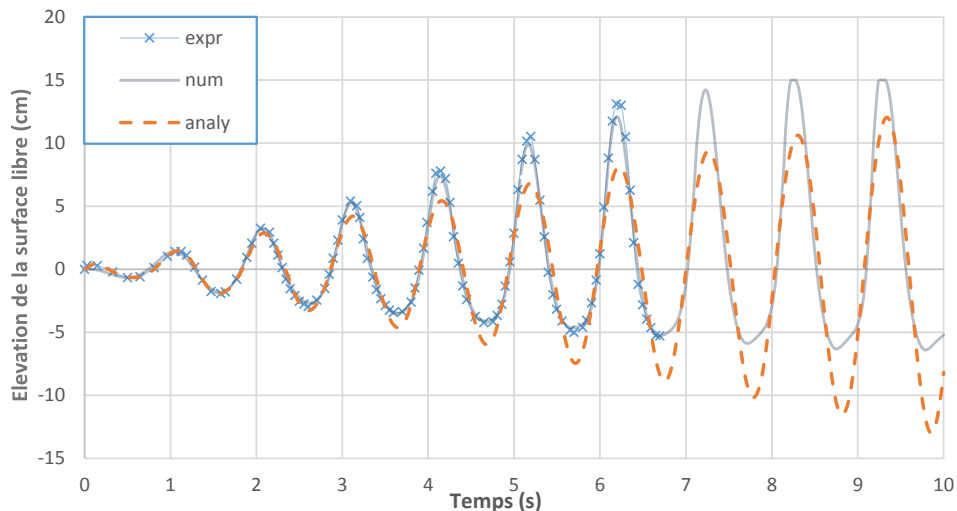


FIGURE 2.18 – Comparaison entre le modèle numérique, la solution analytique [9] et l'expérimentation [19]

Modélisation numérique du réservoir avec Interaction Fluide Structure

3.1 Introduction

Dans ce présent chapitre, un modèle numérique pour analyser le ballonnement avec une approche d'interaction fluide-structure est présenté. L'hypothèse du chapitre précédent d'un réservoir rigide est relâchée et les effets du ballonnement du fluide sur la réponse dynamique du réservoir ainsi que les effets de la flexibilité du réservoir sur le ballonnement du fluide sont analysés.

3.2 Résolution numérique du problème couplé en interaction fluide-structure

La modélisation numérique des problèmes d'interaction fluide-structure fait intervenir, les équations qui gouvernent la dynamique du fluide, les équations qui gouvernent la dynamique de la structure, et les conditions de couplage à l'interface fluide-structure. Au niveau de cette interface, les contraintes fluides sont transmises au solide, engendrant sa déformation ou son déplacement. Dans l'autre sens, le champ de vitesse du solide à l'interface fluide-structure est transmis au fluide engendrant ainsi une modification locale de l'écoulement (Figure 3.1). En plus de ces échanges à l'interface, le fluide aussi bien que le solide sont soumis à des forces de volumes induites par les mouvements d'accélération imposés à la base de réservoir.

D'un point de vue numérique, la simulation d'un problème d'IFS requiert, un solveur fluide, un solveur structure et le traitement de l'interface de couplage en temps et en espace. Les méthodes de couplage en IFS peuvent être réparties en deux groupes principaux : les méthodes de couplage faible et les méthodes de couplage fort. Chacune de ces approches est directement liée au coût de calcul et à ses performances [16].

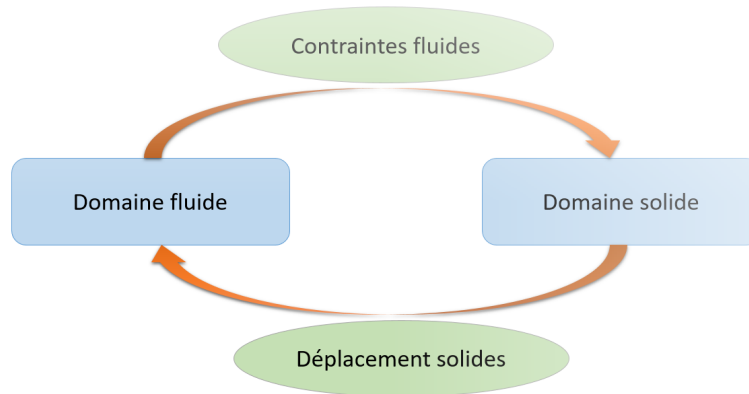


FIGURE 3.1 – Schéma d'un problème IFS général [16]

3.2.1 Couplage faible (One Way Coupling)

Un couplage fluide-structure est dit faible ou unidirectionnel, si le mouvement du fluide est affecté par les déformations de la structure ou le contraire (si la dynamique de la structure est affectée par le mouvement du fluide). Ceci est montré sur la figure 3.2 ci-dessous.

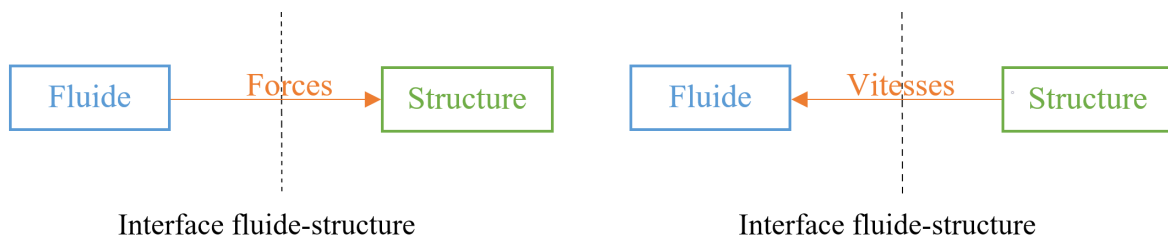
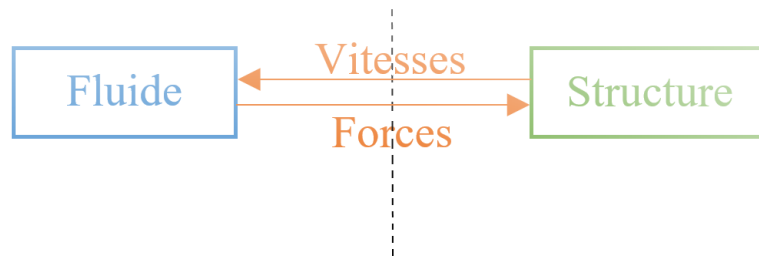


FIGURE 3.2 – Schéma général d'un couplage One Way

Dans ce cas (de couplage faible), le calcul de l'un des deux sous-systèmes fluide et structure est réalisé, puis le résultat est utilisé comme condition d'entrée au second sous-système. Les calculs du fluide et de la structure sont réalisés sans la prise en compte des conditions de couplage de l'un des sous-systèmes à l'interface, d'un côté, ni la prise en compte de l'évolution temporelle de l'un des sous-systèmes, d'un autre côté. Ceci constitue le cas le plus simple dans la mise en œuvre de la résolution.

3.2.2 Couplage fort (Two Way Coupling)

Le couplage fort est plus complexe que le couplage faible, car le fluide et la structure s'influencent mutuellement. En effet, l'écoulement du fluide est affecté par la déformation de la structure et en même temps ces déformations sont affectés par le mouvement du fluide (Figure 3.3).



Interface fluide-structure

FIGURE 3.3 – Schéma général d'un couplage Two Way

Pour cette raison, les résultats sont échangés à chaque pas de temps entre les deux solveurs et dans les deux sens. Il existe principalement deux approches de couplage : monolithique et partitionnée.

Approche monolithique

L'approche monolithique consiste à utiliser un seul solveur pour la résolution du problème d'interaction fluide structure, ainsi l'évolution du fluide et de la structure est simultanée à chaque pas de temps. Dans ce cas, les équations du fluide, de la structure et les conditions de couplage sont regroupées dans un système d'équations unique. Cela nécessite en général l'inversion d'une matrice fluide-structure globale. Les conditions de couplage sont alors naturellement satisfaites [16].

L'approche monolithique permet de mettre en œuvre des couplages forts. Mais celui-ci peut s'avérer être très lourd et à un certain niveau de complexité. Ce qui rend cette approche plus difficile, c'est la discrétisation numérique au niveau de l'interface fluide-structure, l'utilisation de la même discrétisation à l'interface peut causer un manque de précision dans les résultats ou un surcoût de calcul. En effet, le raffinement requis pour la partie fluide est plus important que pour la partie solide.

Approche partitionnée

Dans cette approche, chacune des physiques mises en jeu est traitée par un solveur distinct, et les deux codes communiquent entre eux, grâce à des conditions aux limites à l'interface fluide-structure, dites des conditions de couplage. Cette approche peut être affinée en fonction du niveau et de la fréquence des échanges de la force de couplage entre les codes fluide et structure (dans notre cas Fluent et Mechanical).

L'approche partitionnée est plus simple à mettre en oeuvre que l'approche monolithique. En effet, les deux systèmes d'équations du fluide et de la structure ne sont pas unifiés, ce qui permet d'utiliser des codes de calcul déjà existants. En contrepartie, l'approche partitionnée présente certains inconvénients, par exemple, des instabilités numériques peuvent être induites par une mauvaise conservation de l'énergie à l'interface fluide-structure qui est imputable au décalage en temps qu'elle impose pour le calcul du système couplé [16].

Sur la figure 3.4 sont représentés les schémas des deux approches monolithique 3.4a et partitionnée 3.4b.

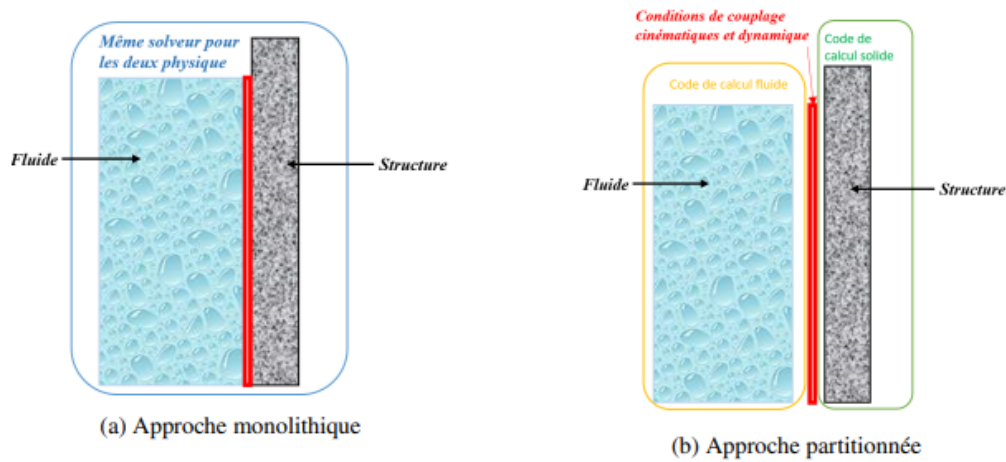


FIGURE 3.4 – Schémas de couplage fluide-structure : (a) monolithique ; (b) partitionné[16]

3.3 Présentation du modèle simplifié

La figure 3.5 montre le schéma de la problématique présentée dans ce chapitre avec les notations des domaines et frontières utilisées pour les conditions aux limites.

Le ballonnement linéaire est un comportement vibratoire qui représente les petites fluctuations d'un liquide autour d'un état d'équilibre. Cet état d'équilibre est la surface libre plane avant perturbation.

Le liquide est contenu dans un réservoir rectangulaire bidimensionnel à parois flexibles et soumis à des excitations externes. Le domaine fluide est discrétisé en volumes finis quadrangulaires linéaires.

Ce modèle numérique permettant d'analyser le ballonnement avec une approche

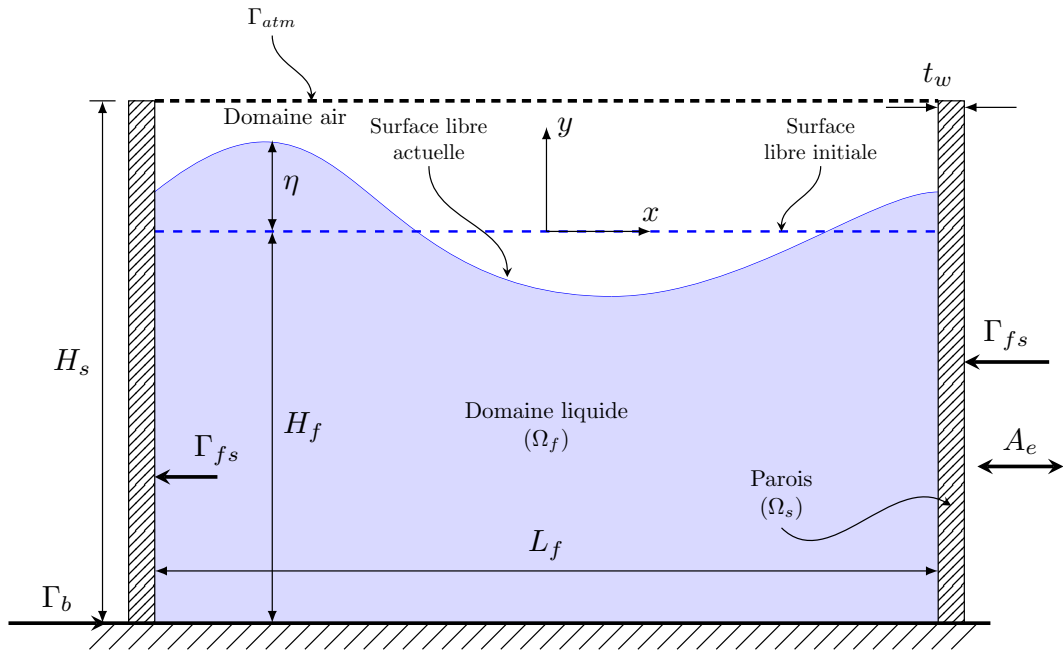


FIGURE 3.5 – Schéma général du réservoir rectangulaire en 2D avec les notations utilisées pour les domaines et les frontières [16]

d'interaction fluide-structure, le couplage utilisé est basé sur un schéma partitionné. Ce type de couplage permet d'allouer à chacun des milieux modélisés, fluide et solide, un solveur différent avec un système d'échanges régulier entre les deux codes. À chaque pas de temps les calculs sont faits d'abord pour le solide ensuite pour le fluide avec des inter-échanges d'informations au niveau de l'interface fluide-structure. D'une part, le solveur fluide est basé sur les équations de Navier-Stokes incompressibles en diphasique, et d'autre part le solveur solide est basé sur les équations de l'élasticité linéaire. La discrétisation de ces équations est réalisée par la méthode des éléments finis. Les équations de Navier-Stokes sont en formulation Arbitraire Lagrangienne-Eulérienne (ALE) et la méthode VOF est adoptée pour le suivi de l'interface air-liquide.

L'hypothèse du réservoir rigide du chapitre précédent est relâchée et les effets du ballottement du liquide sur la réponse dynamique du réservoir ainsi que les effets de la flexibilité du réservoir sur le ballottement du liquide sont analysés, alors la résolution est faite par deux solveurs Fluent pour le fluide et Mechanical pour la structure.

3.4 Formulation des équations de conservation

Dans le domaine de la mécanique, on distingue deux types de description du mouvement, à savoir la description Lagrangienne et la description Eulérienne. La caractérisation du mouvement du maillage avec l'approche Lagrangienne consiste à suivre les particules le long de leurs trajectoires à partir d'une référence donnée. Cela signifie numériquement que les nœuds du maillage sont intégrés aux nœuds matériels, et les deux grilles sont superposées le long du mouvement. Cette formulation est largement adoptée en mécanique des solides [16]. Chaque nœud reste en coïncidence avec la même phase tout au long du processus de déformation. En particulier, les nœuds situés à l'interface du solide y restent pendant toute la simulation, ce qui facilite le suivi d'une interface en mouvement. Cependant, en présence de déformations importantes, une adaptation du maillage est requise, cela constitue l'inconvénient de cette approche.

Dans l'approche Eulérienne, la grille de calcul est fixe, tandis que les nœuds matériels sont libres de se déplacer. Elle est le plus souvent utilisée dans la modélisation dynamique des fluides. En d'autres termes, les propriétés du fluide sont décrites comme des fonctions du temps et de l'espace avec l'approche Eulerienne, tandis qu'elles ne dépendent que du temps avec l'approche Lagrangienne. Chacune de ces deux formulations présentent des faiblesses, en effet la présence des déformations en approche Lagrangienne cause la dégradation de la qualité des mailles. Le remaillage devient alors nécessaire, ceci est une opération qui peut s'avérer coûteuse. De son côté, l'approche Eulerienne fait apparaître des difficultés de prise en compte des conditions aux limites matérielles lors de l'étude de problèmes à frontières variables. De plus, une faible précision de la définition des frontières matérielles lorsque celles-ci évoluent au cours du temps [16]. On peut trouver dans la littérature une approche intermédiaire appelée ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian). La formulation ALE vient combiner les avantages des descriptions Eulerienne et Lagrangienne, elle compte parmi les approches les plus utilisées dans la modélisation de l'interaction fluide-structure. En effet, elle permet une meilleure précision des frontières déformables (Lagrangienne) et un meilleur traitement de la distorsion des éléments (Eulérienne), et limite ainsi au maximum leurs inconvénients [16].

Pour la mise en place de la méthode ALE, un troisième domaine appelé domaine de référence est défini (en plus des domaines spatial et matériel). On note X le système de référence matériel, x le système de référence spatial et χ le système de référence de la grille de maillage. Afin de passer d'un système à un autre, trois applications sont définies, à savoir, ϕ , ϕ^* et ψ^* . Les systèmes sont reliés comme suit :

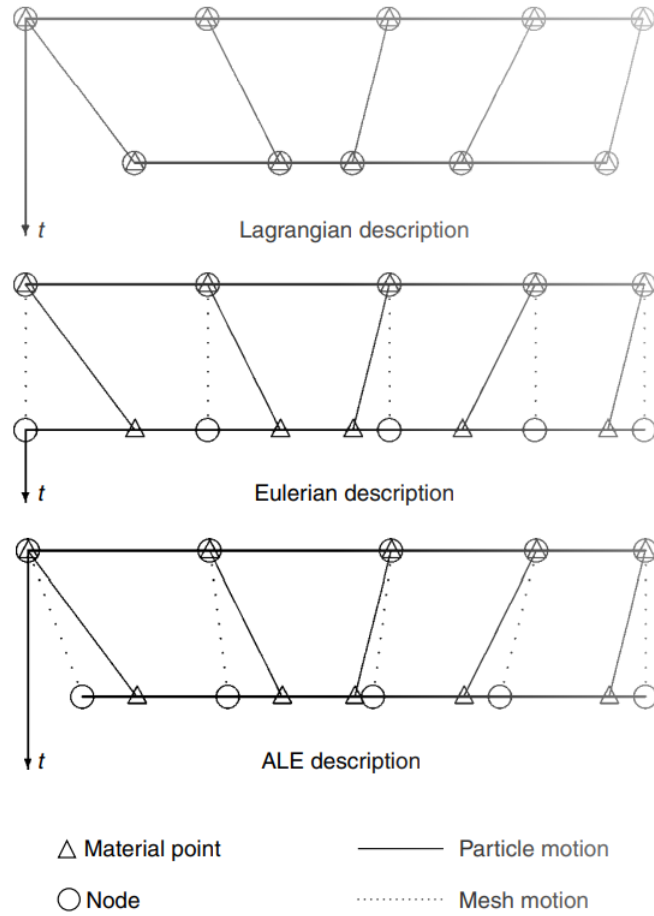


FIGURE 3.6 – Comparaison des maillages et des mouvements de particules en fonction des différents formalismes (Lagrangien, Eulerien et ALE) en 1D [16]

$$\chi = \phi^{*-1}(x, t) = \phi^{*-1}(\phi(X, t), t) = \psi^*(X, t) \quad (3.1)$$

La dérivée par rapport au temps de la position courante x , représente la vitesse du système de référence de la grille de maillage qu'on va noter w , elle est exprimée par l'équation 3.2 :

$$w(\chi, t) = \left. \frac{dx(\chi, t)}{dt} \right|_x = \left. \frac{d\phi^*(\chi, t)}{dt} \right|_x \quad (3.2)$$

De manière plus générale, les dérivées temporelles d'une grandeur physique arbitraire f peuvent être exprimées dans les systèmes de référence matérielle et de la grille de maillage 3.3, et on peut appliquer les règles de dérivation d'une fonction composée.

$$\left. \frac{df(x, t)}{dt} \right|_x = \left. \frac{df(\phi(X, t), t)}{dt} \right|_x = \left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_\phi + \left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_x + \frac{\partial f}{\partial \phi} = \left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_x + \mathbf{u} \cdot \nabla f \quad (3.3)$$

\mathbf{u} est la vitesse matérielle.

Enfin dans l'équation 3.4, on a la relation fondamentale du formalisme ALE.

$$\frac{df(x,t)}{dt}|_X = \frac{\partial f(x,t)}{\partial t}|_x + ((\mathbf{u} - \mathbf{w}) \cdot \nabla)f \quad (3.4)$$

À partir de ceci, et en introduisant la vitesse du maillage w , les équations de Navier-Stokes sont exprimées en formulation ALE comme suit 3.5 :

$$\rho_f \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho_f ((\mathbf{u} - \mathbf{w}) \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) + S \quad (3.5)$$

3.5 Équations de la dynamique du fluide et de la structure

3.5.1 Équations de la dynamique du fluide

Le comportement du fluide à l'intérieur du réservoir est décrit par les équations de Navier-Stokes en formulation Lagrangienne-Eulérienne Arbitraire (ALE). Ces équations sont dérivées en combinant les équations de continuité 3.6 et de quantité de mouvement 3.7 :

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3.6)$$

$$\rho_f \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho_f ((\mathbf{u} - \mathbf{w}) \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{u} + \rho_f (\mathbf{g} + \mathbf{A}_e) + \mathbf{f}_\sigma \quad (3.7)$$

d'où :

ρ_f : Masse volumique du fluide

\mathbf{u} : La vitesse d'écoulement

t : Temps

\mathbf{w} : La vitesse de déplacement du maillage

∇p : Le gradient de la pression interne

μ : Viscosité dynamique

\mathbf{g} : Vecteur de gravité

A_e : Accélération due à l'excitation externe

\mathbf{f}_σ : La force de tension superficielle

La force de la tension superficielle est obtenue à l'aide du modèle CSF (Continuum Surface Force) proposé par Brackbill. Cette force est localisée à l'interface liquide-gaz et donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{f}_\sigma = \sigma \kappa \nabla \psi \quad (3.8)$$

σ : La constante de tension de surface

κ : Sa courbure

ψ : La fraction volumique du fluide

Pour notre cas de ce modèle, nous avons pris : $\mathbf{f}_\sigma = 0$

Les conditions aux limites et les conditions initiales sur le fluide sont rassemblées dans l'équation 3.9.

$$\left\{ \begin{array}{ll} P = 0 & \text{sur } \Gamma_{atm} \\ \mathbf{u} = 0 & \text{sur } \Gamma_b \\ \mathbf{u} = \dot{\xi} & \text{sur } \Gamma_{fs} \\ \mathbf{u}(0) = 0 & \text{sur } \Omega_f \end{array} \right. \quad (3.9)$$

$\dot{\xi}$ étant la vitesse de la structure. Le domaine fluide Ω_f est délimité par la frontière ouverte Γ_{atm} , la frontière de fond Γ_b et l'interface fluide-structure Γ_{fs} au niveau des parois du réservoir (figure 3.5). $\mathbf{u}(0)$ est la valeur de la vitesse initiale (à $t = 0$) du fluide et n est le vecteur unitaire normal extérieur à Γ_{atm} .

La vitesse des déplacements du domaine de maillage w est obtenue par la résolution de l'équation de diffusion (équation 3.10).

$$\nabla \cdot (\theta \nabla \mathbf{w}) = 0 \quad (3.10)$$

Les conditions aux limites pour l'équation de la vitesse du maillage (3.10) sont données comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \mathbf{w} = 0 & \text{sur } \Gamma_b \cup \Gamma_{atm} \\ \mathbf{w} = \dot{\xi} & \text{sur } \Gamma_{fs} \end{array} \right. \quad (3.11)$$

Le coefficient de diffusivité θ est une fonction de la distance d entre le centre de la cellule et l'interface Γ_{fs} . Il est donné par la relation 3.12.

$$\theta = \frac{1}{d^2} \quad (3.12)$$

3.5.2 Équations de la dynamique de la structure

De son côté, le réservoir est gouverné par les équations de la dynamique des structures déformables considérées dans le cadre de la théorie de l'élasticité linéaire. Elles sont données, pour des petites déformations, par l'équation 3.13.

$$\rho_s \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -\nabla \cdot \sigma_s + \rho_s (\mathbf{g} + \mathbf{A}_e) \quad (3.13)$$

où ρ_s est la masse volumique du solide, ξ est le déplacement local de la structure et σ_s est la contrainte solide.

Les conditions aux limites et les conditions initiales sur la structure sont données par les relations suivantes (équations 3.14).

$$\begin{cases} \xi = 0 & \text{sur } \Gamma_{bw} \\ \sigma_s \cdot n = \sigma_f \cdot n & \text{sur } \Gamma_{fs} \\ \xi(0) = 0 & \text{sur } \Omega_s \end{cases} \quad (3.14)$$

Où : $\xi(0)$ la valeur initiale du déplacement, Ω_s le domaine solide, Γ_{bw} la base de la paroi, σ_f le tenseur des contraintes fluides, σ_s le tenseur des contraintes solides et n le vecteur unitaire normal extérieur à l'interface Γ_{fs} .

3.6 Algorithme partitionné pour le couplage en IFS

Lors de l'étude du ballonnement en réservoirs flexibles, il est essentiel de prendre en compte l'interaction fluide-structure. Ce phénomène peut être traité par différentes techniques de couplage. Dans la présente étude, l'algorithme de couplage est réalisé avec le code de calcul ANSYS. A priori, ANSYS ne dispose pas d'un code en Interaction fluide-Structure (IFS) monolithique permettant de modéliser un problème faisant intervenir une surface libre. Un solveur fluide diphasique avec un solveur solide basé sur l'élasticité linéaire sont

alors couplés. Cela permet de modéliser le phénomène de ballonnement avec une approche d'interaction fluide-structure par un couplage partitionné implicite.

À l'interface fluide-structure, la continuité des vitesses (équation 3.15) ainsi que celle des contraintes (équation 3.16) doivent être respectées.

1. Condition cinématique (continuité des vitesses) (équation 3.9)

$$\mathbf{u} = \dot{\xi} \quad \text{sur } \Gamma_{fs} \quad (3.15)$$

2. Condition dynamique (Continuité des contraintes) (équation 3.14)

$$\sigma_s \cdot \mathbf{n} = \sigma_f \cdot \mathbf{n} \quad \text{sur } \Gamma_{fs} \quad (3.16)$$

3.7 Validation des modèles

Notre modélisation consiste à analyser le comportement du réservoir rectangulaire avec un modèle réduit en 2D mais modélisé en 3D pour des raisons propres au logiciel Ansys qui ne permet pas de définir l'interface fluide-structure que sur une surface 3D. Le comportement en 2D est reproduit avec des conditions aux limites appropriées. Conditions de symétrie sur les parois latérales fluide et sur l'épaisseur des parois solides, ces dernières ne travaillent qu'en flexion.

Les fluctuations de la surface libre sont calculées numériquement en créant le modèle de fluide à l'aide d'ANSYS Fluent et la réponse dynamique du modèle structurel est extraite à l'aide d'ANSYS Mechanical. L'échange de ces deux solutions a été effectué en utilisant le couplage de systèmes dans ANSYS Workbench en suivant les étapes ci-dessous :

3.7.1 Géométrie

Nous construisons notre géométrie sur Mécanique des fluides (Fluent) avec Design Modeler en 3D, nous avons dessiné un rectangle avec les dimensions : $H_s = 300mm$, $L_f = 570mm$ pour le domaine du fluide et deux rectangles symétriques pour les parois avec les dimensions $H_s = 300mm$, $t_w = 20mm$ (figure 3.7), puis nous faisons une extrusion pour les sections de fluide et parois avec profondeur de 1m (figure 3.8).

Nous intégrons cette géométrie 3D dans la géométrie de la structure transitoire.

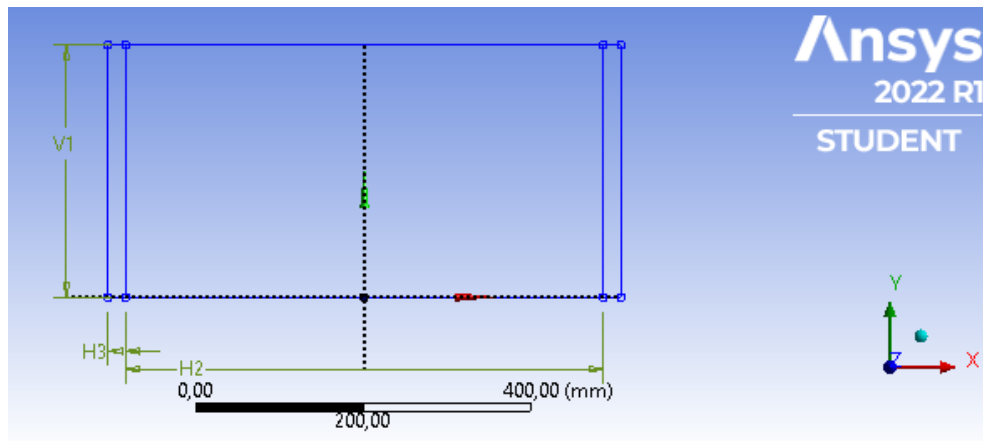


FIGURE 3.7 – Géométrie du réservoir rectangulaire en 2D avant l'extrusion

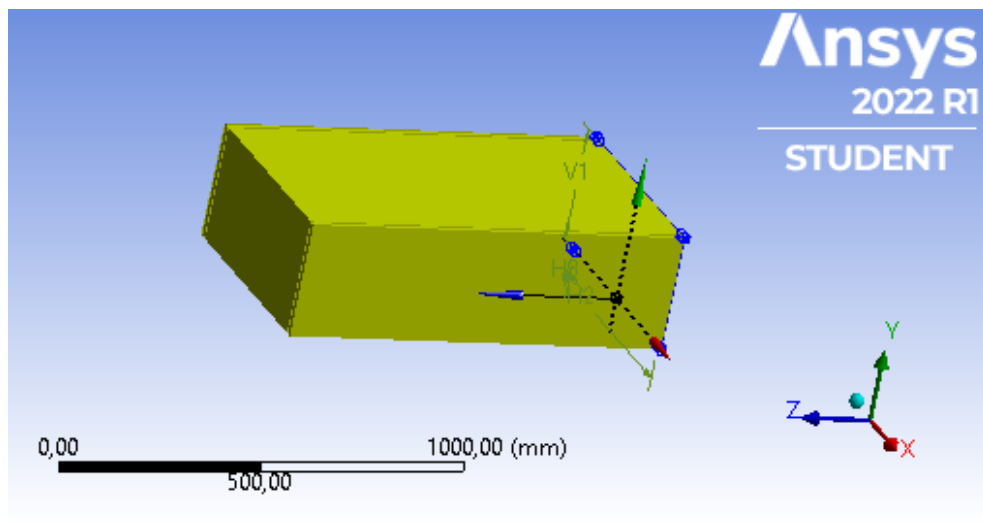


FIGURE 3.8 – Géométrie du réservoir rectangulaire en 3D (parois et fluide)

3.7.2 Maillage

Maillage du fluide

Sur le maillage de mécanique des fluides (Fluent), nous désactivons d'abord les corps solides sur la géométrie comme le montre la figure 3.9 :

Ensuite, nous réalisons un maillage par défaut comme le montre la figure 3.10.

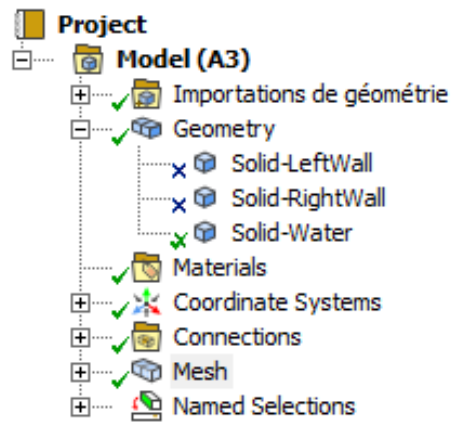


FIGURE 3.9 – Fenêtre de désactivation des corps solides

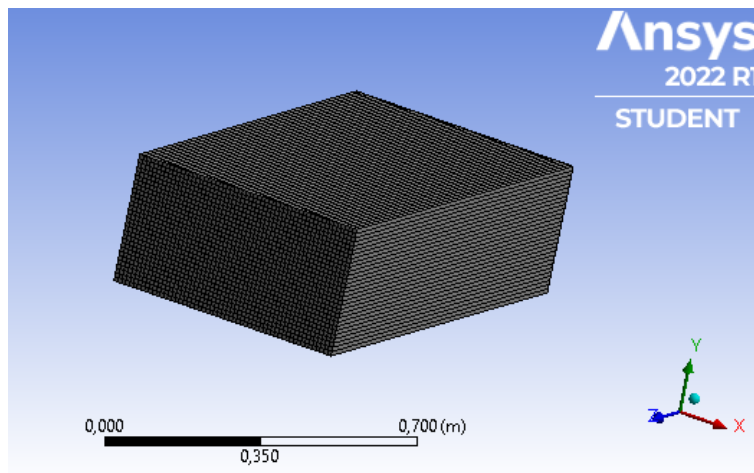


FIGURE 3.10 – Maillage du fluide sur mécanique des fluide (Fluent)

Les limites de notre géométrie sont définies comme suit (3.11) :

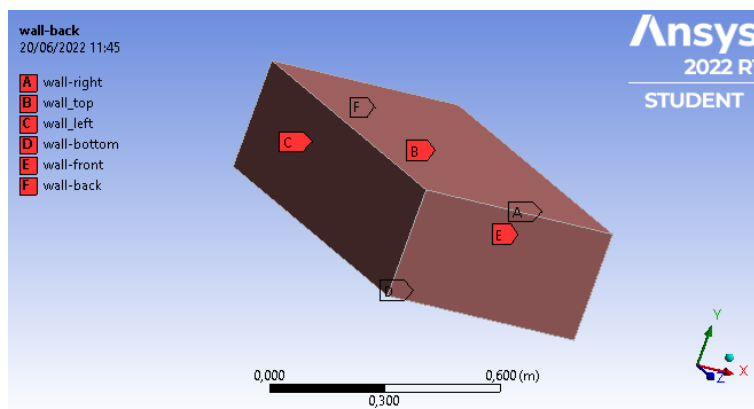


FIGURE 3.11 – Les conditions aux limites de notre géométrie du fluide

Maillage de la structure

Sur le modèle de structure transitoire, nous désactivons d'abord le corps fluide sur la géométrie comme le montre la figure 3.12 :

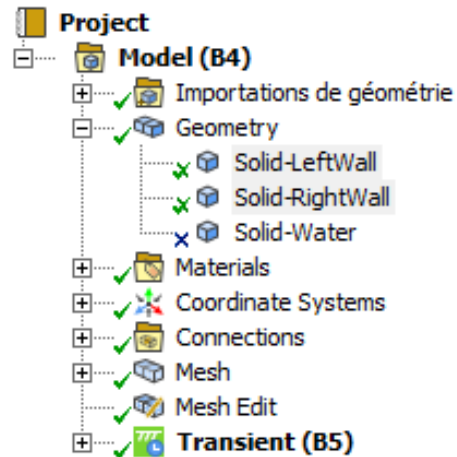


FIGURE 3.12 – Fenêtre de désactivation du corps fluide

Ensuite, nous réalisons un maillage pour les deux parois comme suit (figure 3.13) :

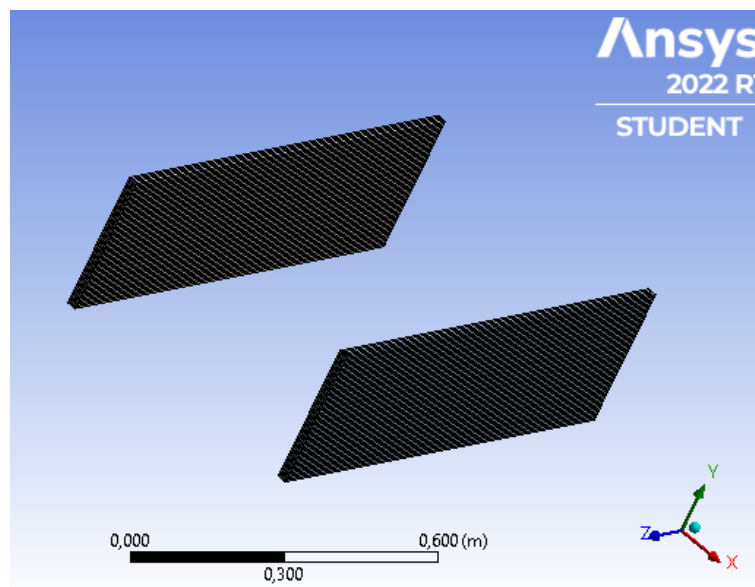


FIGURE 3.13 – Maillage des parois sur structure transitoire

3.7.3 Solveur Fluent

Nous effectuons notre modélisation de la dynamique du fluide sur le solveur fluent avec 3DDP (3 Dimensions Double Précision), nous suivons les étapes de simulation du chapitre précédent :

phases

Nous utilisons la méthode VOF avec deux phases : l'air et l'eau liquide (Figure 3.14).

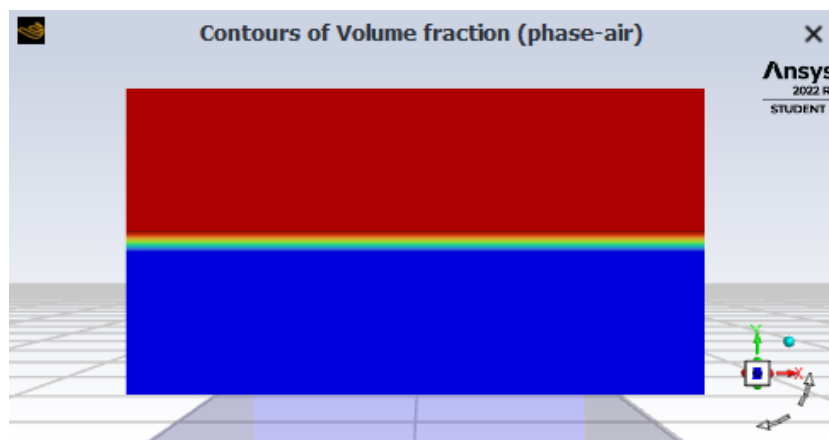


FIGURE 3.14 – Contour des phases du fluide

Conditions aux limites

Suivant la figure 3.11, les conditions aux limites de notre géométrie sont données dans le tableau ci-dessous :

Zones	Type
wall right	wall
wall left	wall
wall back	wall sans frottement (Specified Shear)
wall front	wall sans frottement (Specified Shear)
wall bottom	wall
wall top	pressure-outlet

TABLEAU 3.1 – Conditions aux limites

Région

Le liquide a une hauteur de $H_w = 150\text{mm}$, comme le montre la figure ci-dessous :

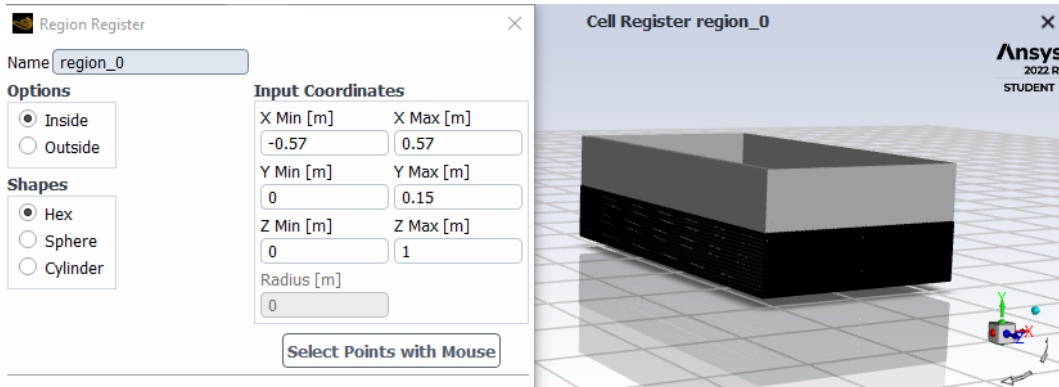


FIGURE 3.15 – La région du fluide

Les conditions de la zone cellulaire

Sur les conditions d'opération nous introduisons la gravité sur l'axe -Y : $g = 9.81\text{m/s}^2$ et sur l'axe X une expression pour l'accélération d'un ballonnement linéaire.

Plan vertical

Nous créons un plan dont les coordonnées sont indiquées sur la figure 3.16 afin d'obtenir les résultats de l'élévation de la surface libre sur ce plan.

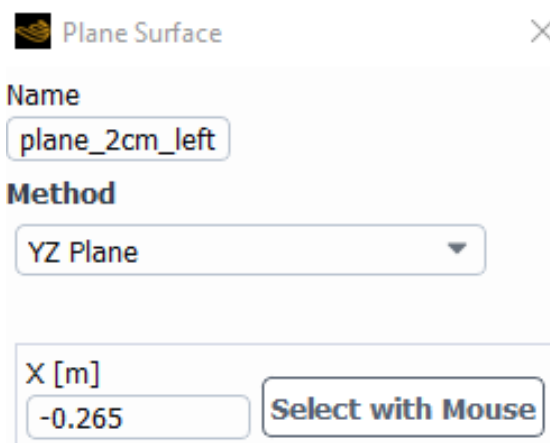


FIGURE 3.16 – Fenêtre des coordonnées du plan vertical

Maillage dynamique

Nous activons le maillage dynamique pour que le maillage fluide soit dynamique pendant le calcul avec un couplage sur l'interface d'interaction fluide-structure (figure 3.17).

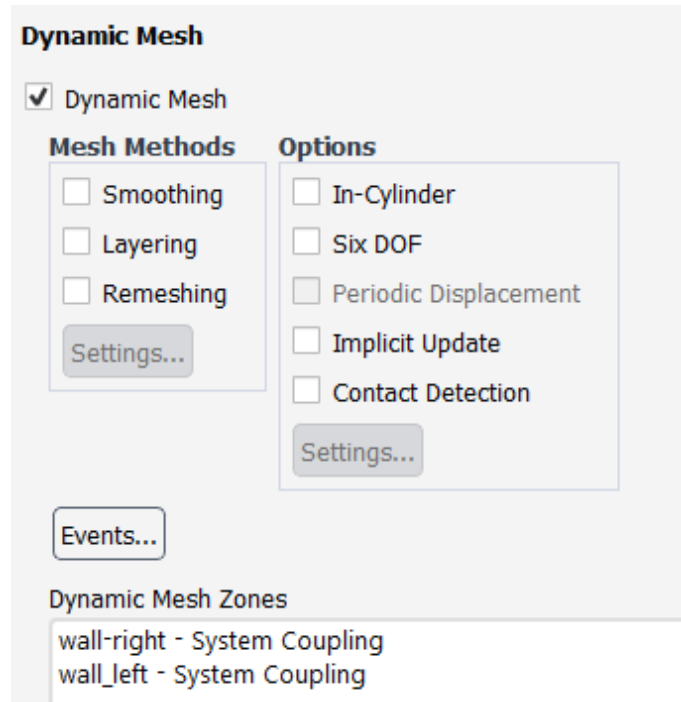


FIGURE 3.17 – Fenêtre de maillage dynamique

Initialisation

On initialise les calculs, puis on crée un "Patch" et sur la fenêtre "lancer les calculs" on introduit les valeurs suivantes sans lancer les calculs.

Pas de temps : 1000

Taille du pas de temps : 0.01 s

Nombre d'itérations : 100 itérations par pas de temps

3.7.4 Solveur Mécanique

Tout d'abord, dans le solveur mécanique, nous introduisons les caractéristiques matérielles des parois rigides et flexibles représentés sur la figure 3.18.

	A	B	C	D	E
1	Propriété	Valeur	Unité		
2	Variables des champs matériaux	Table			
3	Density	1400	kg m ⁻³	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
5	Dériver de	Modu...			
6	Module de Young	150	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Coefficient de Poisson	0,2		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Module d'élasticité	8,3333E+07	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Module de cisaillement	6,25E+07	Pa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

FIGURE 3.18 – Les propriétés du matériau rigide 150 MPa

Le module d'Young du matériau flexible est de 50 MPa et celui du matériau rigide de 150 MPa. Le coefficient de Poisson est fixé pour les deux cas à $\nu = 0.2$.

Modèle

Nous introduisons sur modèle de structure transitoire : la gravité, l'accélération, le déplacement, le support fixe et les interfaces fluide-structure comme montre la figure 3.19.

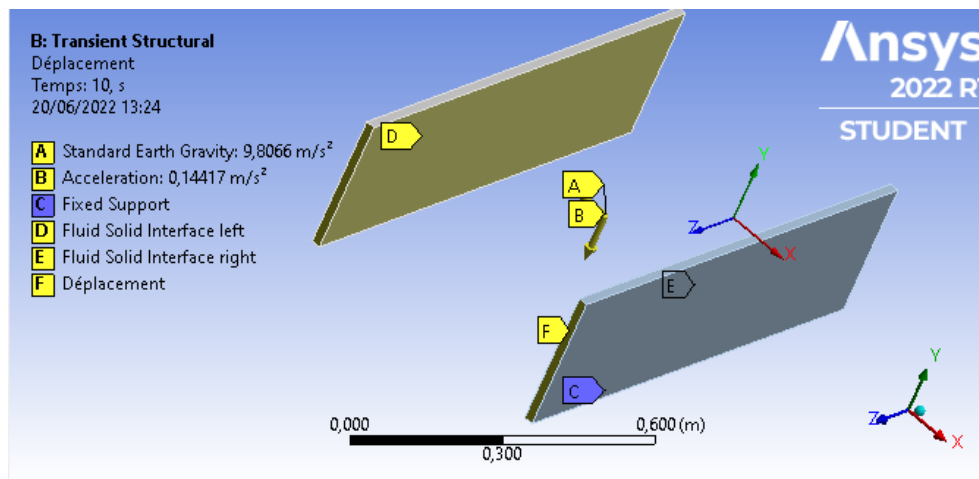


FIGURE 3.19 – Les condition données pour la structure

Réglage d'analyse

Dans cette section, nous définissons les valeurs indiquées dans le tableau 3.20.

Détails de "Réglages de l'analyse"	
Contrôles d'incrément	
Nombre d'incrément	1,
Incrément courant	1,
Temps final pour cet incrément	10, s
Incrément de temps automatique	Activé
Défini par	Temps
Incrément de temps initial	1,e-002 s
Incrément de temps minimal	1,e-002 s
Incrément de temps maximal	1,e-002 s
Effets dynamiques	Activé
Contrôles du solveur	
Type de solveur	Contrôlé par le programme

FIGURE 3.20 – Fenêtre de réglage de l'analyse sur structure transitoire

3.7.5 Couplage de systèmes

Le couplage de systèmes est un outil de couplage utilisé dans Workbench pour intégrer différents solveurs de domaine dans des simulations multi-physiques.

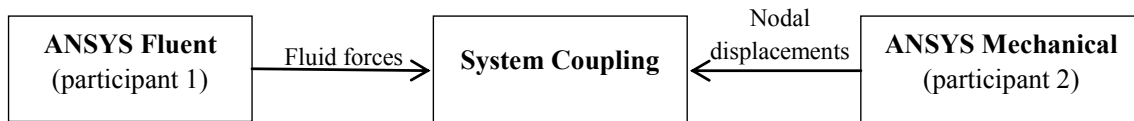


FIGURE 3.21 – Schéma de couplage de systèmes

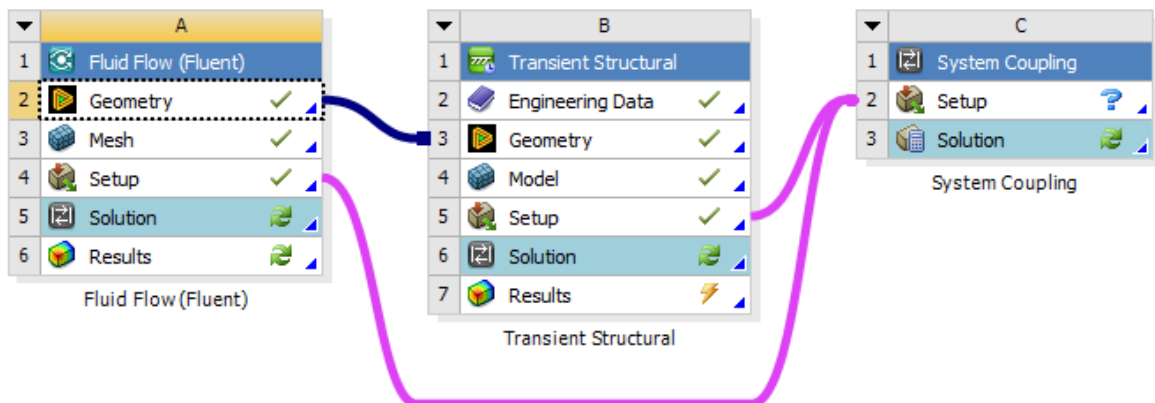


FIGURE 3.22 – Fenêtre principale de couplage fort de Fluent et Structural

La figure 3.22 montre la configuration de l'analyse IFS de ce projet en utilisant le couplage de systèmes avec Fluent et ANSYS mechanical comme solveurs numériques.

Initialement, les configurations de simulation des deux solveurs dans les sections précédentes sont exécutées, puis le composant de configuration des solveurs est intégré dans le composant de configuration de System Coupling comme indiqué. Le couplage des systèmes permet de synchroniser les conditions numériques des deux solveurs et d'identifier l'interface fluide-structure. L'étape suivante consiste à affecter les configurations de simulation dans le couplage de systèmes.

Réglage d'analyse

Ce paramètre comprend la taille du pas de temps, l'heure de fin et la taille d'incrément de couplage pour chaque pas de temps (figure 3.23).

A	B
Propriété	Valeur
Type d'analysis	Transitoire
[-] Contrôles de l'initialisation	
Initialisation du couplage	Contrôlé par le progra... ▼
[-] Contrôles de durée	
Durée définie par	Heure de fin ▼
Heure de fin [s]	10
[-] Contrôles de l'incrément	
Taille de l'incrément [s]	0,01

FIGURE 3.23 – Fenêtre de réglage de l'analyse sur couplage de systèmes

Transfert de données

C'est la partie la plus vitale du dispositif de couplage qui comprend et gère la séquence de transfert de données entre deux solveurs numériques. Ce processus de transfert de données varie en fonction du type de couplage. La figure 3.24 illustre le transfert de données pour les analyses de couplage bidirectionnel. Ce dernier a un transfert de données dans les deux sens, c'est-à-dire le premier de Fluent à ANSYS Mechanical et le second d'ANSYS Mechanical à Fluent.

	A
1	Couplage de systèmes
2	Configuration
3	Réglages de l'analyse
4	Participants
5	Transient Structural
6	Zones
7	Fluid Solid Interface left
8	Fluid Solid Interface right
9	Fluid Flow (Fluent)
10	Zones
11	solid-water
12	wall_left
13	wall-back
14	wall-bottom
15	wall-front
16	wall-right
17	Transfert de données
18	Transfert de données 4
19	Transfert de données 3
20	Transfert de données 2
21	Transfert de données

FIGURE 3.24 – Configuration du couplage de systèmes

3.8 Résultats et discussions

3.8.1 Effet de la flexibilité du réservoir sur la réponse du liquide

Afin de mettre en évidence les effets que peut avoir la flexibilité des parois du réservoir sur le ballonnement du liquide, deux cas de matériaux différents sont présentés. Un matériau rigide avec un module de Young de $E = 150MPa$ et un matériau flexible avec un module de Young de $E = 50MPa$ sont considérés. Dans les deux cas, le réservoir est soumis à la même excitation harmonique externe d'amplitude $b = 0.4mm$ et de fréquence $\omega_e = 0.83\omega_1$. Selon les équations 2.2 et 2.3 nous obtenons l'expression de l'accélération utilisée comme suit :

$$A_e = 0.4 * (0.83 * 6.0578)^2 * \sin(0.83 * 6.0578 * t)$$

La période de battement analytique est donnée par l'équation suivante :

$$T_{analytique} = \frac{2\pi}{|\omega_e - \omega_1|} \quad (3.17)$$

De l'équation 3.17 : $T_{analytique} = 6.101 s$

Les élévations de la surface libre sont reportées sur la figure 3.25 pour les deux cas.

D'après la figure 3.25, la période de battement est de : $T = 6.2 s$

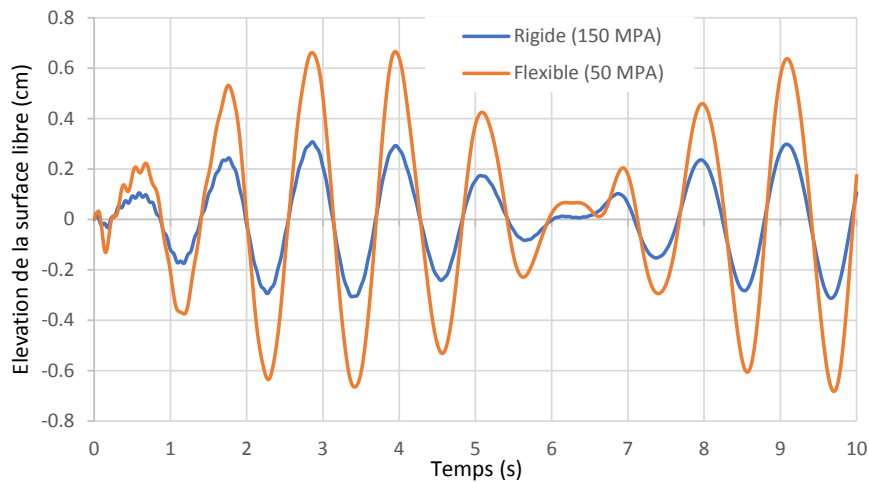


FIGURE 3.25 – Comparaison des réponses temporelles de l'élévation de la surface libre pour les réservoirs rigide et flexible

Commentaires

Au début de la simulation $t < 1$ s et dans l'intervalle 6 s $< t < 7$ s, la réponse présente des fluctuations excessives, ceci est dû au couplage des deux solveurs sur les deux interfaces.

La figure 3.25 montre des différences claires entre les courbes des deux cas. La courbe représentant le cas flexible présente des pics plus importants que ceux du cas rigide.

Ces résultats révèlent un impact significatif de la flexibilité des parois du réservoir sur la réponse oscillatoire du fluide dans le réservoir.

La valeur analytique de la période de battement est égale à 6.101 s et proche de la valeur obtenue numériquement 6.2 s.

3.8.2 Effet du ballonnement sur la déformation des parois du réservoir

Le déplacement au sommet des parois du réservoir est le principe paramètre de réponse sélectionnés pour analyser le comportement dynamique du réservoir sous les effets de couplage fluide structure. L'évolution temporelle des déplacements au niveau de la paroi gauche du réservoir est représentée sur les deux figures 3.27 et 3.26, pour les deux cas de parois : $E = 150$ MPa et $E = 50$ MPa.

La figure 3.26 représente les déplacements en haut de la paroi gauche du réservoir flexible $E = 50$ MPa en fonction du temps.

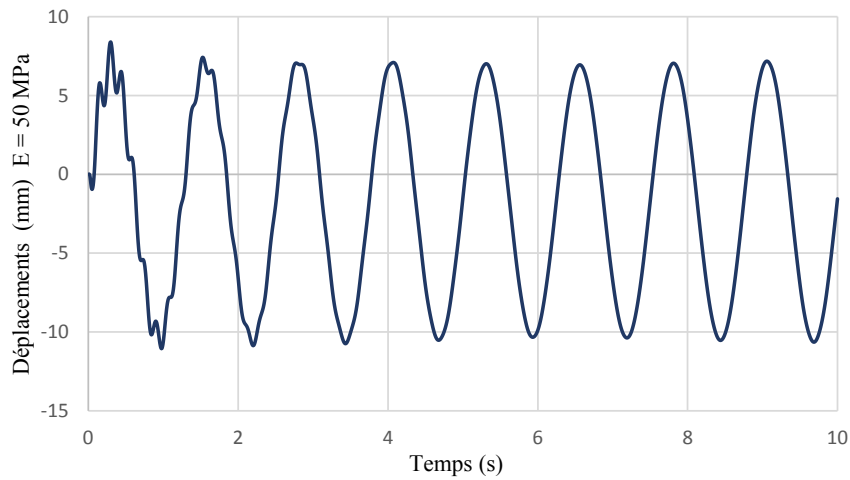


FIGURE 3.26 – Déplacements en haut de la paroi gauche pour matériau $E = 50MPa$

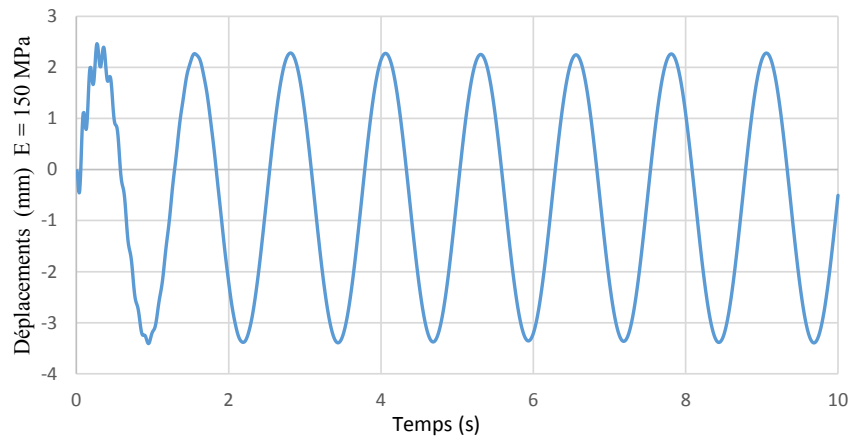


FIGURE 3.27 – Déplacements en haut de la paroi gauche pour matériau $E = 150MPa$

La figure 3.27 représente les déplacements en haut de la paroi gauche du réservoir rigide $E = 150MPa$ en fonction du temps.

Commentaires

D'après les figures 3.26 et 3.27, on constate que les amplitudes sont plus élevées pour le cas du réservoir flexible de $E = 50MPa$.

Les résultats montrent l'impact de la flexibilité du réservoir sur les déformations des parois.

3.9 Conclusion

Dans cette étude qui consiste en la réponse dynamique du réservoir soumis à une excitation à fréquence harmonique horizontale, nous confirmons que l'IFS a un rôle vital dans l'analyse du comportement dynamique du réservoir rectangulaire.

Les résultats de cette étude indiquent que la flexibilité des parois du réservoir a un impact significatif sur l'amplitude du ballonnement du réservoir et les fluctuations de la surface libre ainsi que l'effet du ballonnement du liquide sur la déformation des parois.

Dimensionnement et calcul sismique d'un réservoir

4.1 Introduction

Le présent chapitre constitue la partie pratique de notre travail de projet de fin d'études. Nous avons fait un stage d'initiation au calcul et dimensionnement d'un réservoir de stockage dans un bureau d'étude. On effectuera son dimensionnement selon l'API 650, sa présentation avec AutoCAD et son étude sismique selon le Règlement Parasismique Algérien RPA et API 650.

4.2 Normes et règlement

4.2.1 API 650

L'API 650 est un code américain de dimensionnement des réservoirs soudés en acier destinés au stockage des produits pétroliers. Il prend en considération les fortes activités sismiques et les ouragans. Ce code a vu le jour à l'American Petroleum Institute qui se trouve aux ETATS-UNIS et regroupe les industriels américains du pétrole et du gaz. Ce code a été revu plusieurs fois et amélioré selon les nouvelles données et découvertes.

4.2.2 RPA-99 version 2003

Depuis la première version a été publiée en 1981 suivie du RPA 81/version 83 suite au séisme d'El Asnam du 10 Octobre 1980. La troisième version RPA88 a été suivie par la version RPA99. Les règles RPA99 tiennent compte des errements des séismes tels que le tremblement de terre d'Oued Djer (Algérie) en octobre 1988 et celui d'Ain Témouchent en 22/12/1999. Ainsi elle introduit 4 sites de sol au lieu des 2 sites (sol meuble et sol ferme) du RPA88. Enfin le RPA99 version 2003, est en vigueur après le séisme du 21 Mai 2003.

Les RPA visent un double objectif :

- Protéger les vies humaines en évitant l'effondrement des ouvrages sous les effets

de séisme majeur, rare, en limitant le choix des systèmes constructifs ainsi que la hauteur des ouvrages en fonction de l'importance de la sismicité de la zone d'implantation.

- Limiter les dommages dans les éléments secondaires fragiles due à des déformations imposées par un séisme modéré, plus fréquent.

Le RPA99 est applicable à toutes les constructions courantes. Mais il n'est pas directement applicable aux constructions telles que les ouvrages d'art et ceux enterrés, alors il faut le compléter avec d'autres règlements.

4.3 Présentation du réservoir

Notre étude consiste en la réalisation d'un réservoir de 15.29 m de diamètre et 14.5 m de hauteur sans le toit. La hauteur de remplissage est de 13.63 m, ce qui donne une capacité de stockage de 2500 m³.

4.3.1 Présentation du réservoir avec AutoCAD

Présentation des dimensions et épaisseurs des viroles

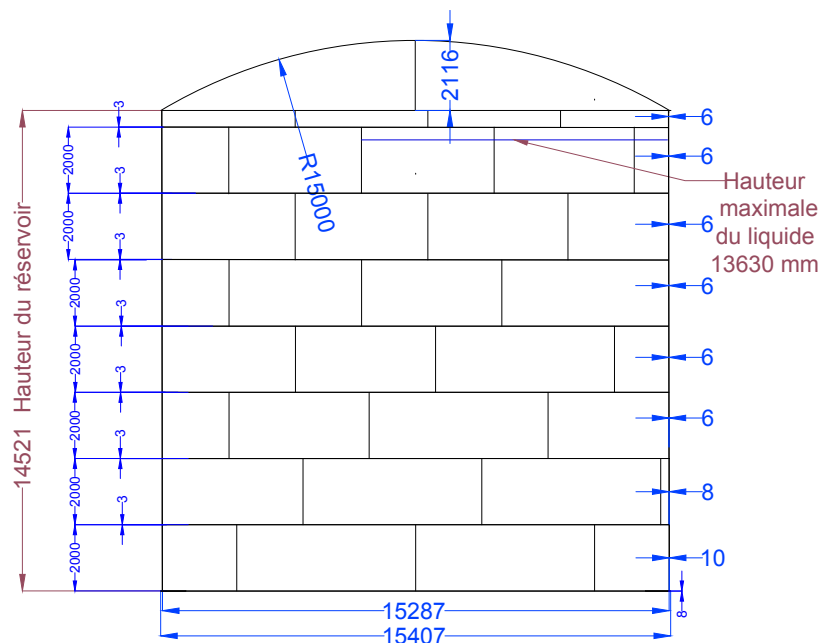


FIGURE 4.1 – Présentation de dimensions et épaisseurs des viroles avec AutoCAD

Présentation du fond et du toit du réservoir

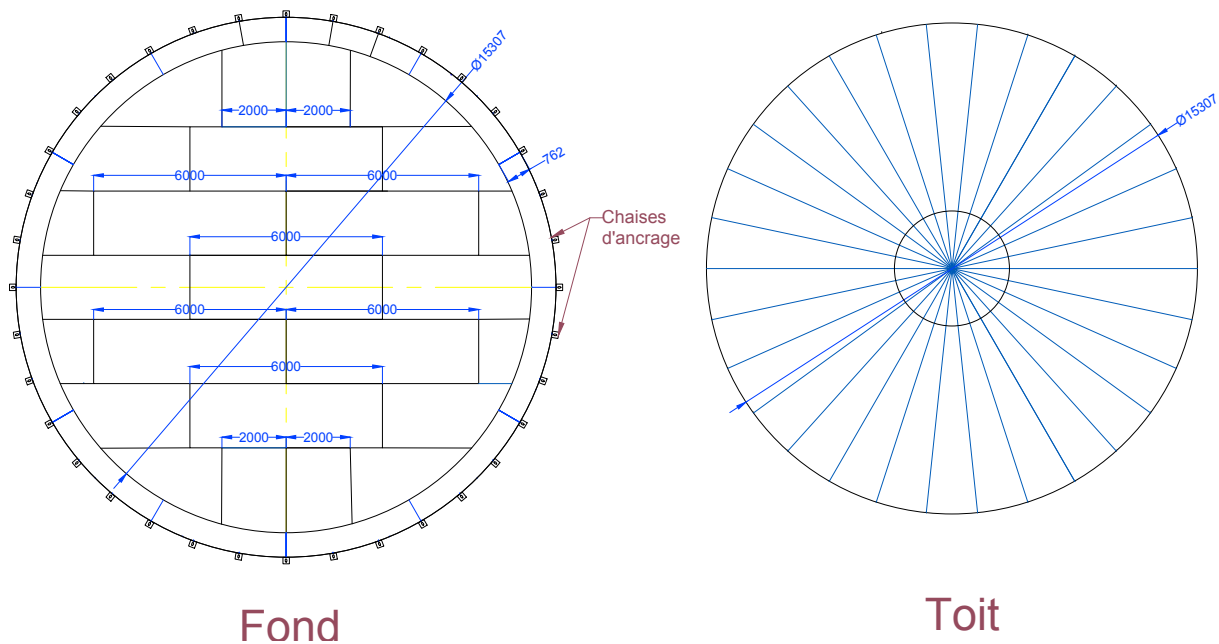


FIGURE 4.2 – Présentation de fond et toit avec AutoCAD

4.3.2 Caractéristiques

Les caractéristiques du réservoir qui fait l'objet de notre étude sont données ci-dessous :

TABLEAU 4.1 – Caractéristiques du réservoir

Diamètre	$D(m)$	15.29
Hauteur du réservoir	$H(m)$	14.5
Hauteur du liquide	$H_H(m)$	13.63
Capacité de stockage	$V(m^3)$	2501.51
Densité du liquide	G	0.92
Matériau	Acier	S355 JR

4.4 Dimensionnement du réservoir

Le dimensionnement de notre ouvrage est basé sur le code de calcul API 650 [13].

4.4.1 Calcul des contraintes

D'après notre matériau en acier S355 et le tableau 5-2a page 5-13 de l'API 650, nous avons obtenu les valeurs de la limite d'élasticité et de la résistance à la traction qui sont les caractéristiques du matériau :

TABLEAU 4.2 – Caractéristiques du matériau

Matériau	S 355 JR	
Limite d'élasticité	σ_{Sd} (MPa)	275
Résistance à la traction	σ_{St} (MPa)	410

De l'API 650 paragraphes 5.6.2.1 et 5.6.2.2 page 5-12, la contrainte admissible pour la condition de conception Sd est :

$$Sd_1 = \frac{2}{3}\sigma_{Sd} \quad (4.1)$$

$$Sd_2 = \frac{2}{5}\sigma_{St} \quad (4.2)$$

$$Sd = \min(Sd_1, Sd_2) \quad (4.3)$$

La contrainte admissible pour la condition d'essai hydrostatique :

$$St_1 = \frac{3}{4}\sigma_{Sd} \quad (4.4)$$

$$St_2 = \frac{3}{7}\sigma_{St} \quad (4.5)$$

$$St = \min(St_1, St_2) \quad (4.6)$$

Appliquant les équations précédentes 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, on obtient :

4.4.2 Calcul de l'épaisseur des viroles

Pour le calcul des épaisseurs nous avons utilisé la méthode de "one foot" (API 650 paragraphe 5.6.3 page 5-15) :

TABLEAU 4.3 – Les contraintes admissibles (MPa)

Contraintes	(MPa)
σ_{sd}	275
σ_{st}	410
St_1	206.25
St_2	175.71
Sd_1	183.33
Sd_2	164
Sd_{min}	164
St_{min}	175.71

Épaisseur de la coque pour l'essai hydrostatique :

$$t_t = \frac{4.9D(H - 0.3)}{St} \quad (4.7)$$

Épaisseur de la coque de conception :

$$t_d = \frac{4.9D(H - 0.3)G}{Sd} + CA \quad (4.8)$$

Avec :

La limite d'élasticité	$\sigma_{sd} = 275 \text{ MPa}$
La résistance à la traction	$\sigma_{st} = 410 \text{ MPa}$
Densité du liquide	$G = 0.92$
Sur-épaisseur de corrosion	$CA = 1 \text{ mm}$ (API-650 5.3.2 page 5-8)
Hauteur du liquide	$H_H = 13.63 \text{ m}$
Épaisseurs des tôles existantes de ce matériau	5, 6, 8, 10, 12 mm

On applique les équations 4.7 et 4.8 pour avoir les épaisseurs des viroles suivantes :

Dans la réalisation et après quelques réunions entre le bureau et le client, ils ont retenu :

- L'épaisseur adoptée pour la première virole est 12 mm à cause de la condition de rapport entre les rigidités des chaises d'ancrage et celle de la virole.

TABLEAU 4.4 – Les épaisseurs calculées et adoptées

Trame	hi (m)	Zi (m)	Hi = Hw - Zi	tt (mm)	td (mm)	tt adoptée	td adoptée
1	2	0	13.63	5.68	6.60	10	10
2	2	2	11.63	4.83	5.76	8	8
3	2	4	9.63	3.98	4.92	6	6
4	2	6	7.63	3.12	4.08	6	6
5	2	8	5.63	2.27	3.24	6	6
6	2	10	3.63	1.42	2.40	6	6
7	2	12	1.63	0.57	1.56	6	6
8	0.5	14	–	–	–	6	6

- Ils ont remplacé la 1 ère virole de 2 m de hauteur par la dernière de 0.5 m de hauteur en raison des conditions économiques.

Finalement, on retient les épaisseurs suivantes :

TABLEAU 4.5 – Les épaisseurs adoptées

Virole	Hauteur (m)	Epaisseur(mm)
1	0.5	12
2	2	10
3	2	8
4	2	6
5	2	6
6	2	6
7	2	6
8	2	6

4.4.3 Calcul de rayon et épaisseur de toiture

Rayon :

$$R_{min} = 0.8D \quad (4.9)$$

$$R_{max} = 1.2D \quad (4.10)$$

Selon 4.9 et 4.10 :

Épaisseur :

$$t = t_{min} + CA \quad (4.11)$$

D'après les caractéristiques de notre matériau S355, l'épaisseur minimale est 5 mm :

De 4.11, on obtient :

4.5 Vérification sismique

Pour réaliser l'analyse sismique, nous avons adopté deux méthodes de calcul utilisant les règlements RPA et API.

4.5.1 Données

4.5.2 Zone sismique

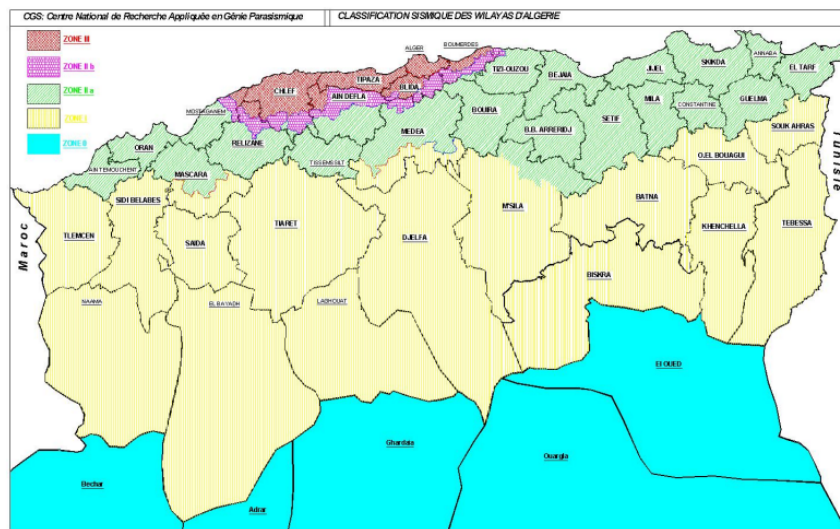


FIGURE 4.3 – La carte de classification des zones sismique d'Algérie suivant RPA [2]

TABLEAU 4.6 – Rayon du toit

Rayon (m)			
D (m)	R min	R max	R adoptée
15.29	12.23	18.35	15

TABLEAU 4.7 – Épaisseur de toit adoptée

	Épaisseur (mm)		
	t min	CA (mm)	t adoptée
	5	1	6
Hauteur	H (m)		14.5
Hauteur du toit	H_t (m)		2
Diamètre	D (m)		15.29
Hauteur du liquide	H_H (m)		13.63
Densité d'huile	γ_H (kN/m ³)		0.92
Densité du solide	γ_s (kN/m ³)		78.5
Poids du liquide	W_H (kN)		23013.87
Poids du solide	W_{silo} (kN)		547.88
Poids totale effectif	W_T (kN)		23561.75

D'après la carte géographique présentée dans la figure 4.3, la zone sismique de Béjaia est une zone de sismicité moyenne IIa.

4.5.3 Estimation en supposant la masse répartie

Les calculs se base sur le Règlement Parasismique Algérien (RPA) version 2003 [2] :

$$V = \frac{ADQ}{R} W_T \quad (4.12)$$

A : Coefficient d'accélération de zone

D : Facteur d'amplification dynamique

Q : Facteur de qualité

R : Coefficient de réduction

W_T : Poids totale effectif

Amortissement totale

Le coefficient d'amortissement pour les reservoir n'est pas spécifié dans le RPA, il a été convenu en commun accord entre le client et le BET de prendre :

$$\xi = 5\%$$

Correction d'amortissement

De RPA 4.2.3 page 40 :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2 + \xi}} \geq 0.7 \quad (4.13)$$

Facteur d'amplification dynamique

Pour $0 < T < T_2$ et de RPA 4.2.3 :

$$D = 2.5\eta \quad (4.14)$$

Facteur de qualité

Le facteur de qualité de la structure est en fonction de :

- La redondance et de la géométrie des éléments qui la constituent ;
- La régularité en plan et en élévation ;
- La qualité du contre de la construction ;

$$Q = 1 + \sum_1^5 P_q \quad (4.15)$$

Après les vérification des critères de la qualité, on prend la valeur $P_q = 0$ pour chaque critère (RPA tableau 4-4 page 44),

Donc :

$$\sum_1^5 P_q = 0$$

Coefficient d'accélération de zone

La classification de notre ouvrage selon son importance c'est le groupe 1B avec une grande importance selon RPA 3.2 page 25 et 26.

Du tableau 4.1 page 40 de RPA, pour notre zone sismique IIa et groupe 1 B de ce ouvrage on obtient la valeur de coefficient d'accélération de zone :

$$A = 0.2$$

Coefficient de réduction

D'après le tableau 4.3 page 42 de RPA, la valeur de coefficient de réduction R correspondante à notre ouvrage est non spécifiée, alors on utilise la relation suivante tirée de l'API :

$$R = \frac{R_{wi}}{I} \quad (4.16)$$

R_{wi} : Facteur de réduction impulsive

I : Facteur d'importance

Le système d'ancrage de ce réservoir est ancrage mécanique et de zone sismique II (tableaux E-4 et E-5 page E-13 D'API 650) :

Facteur de réduction impulsive $R_{wi} = 4$

Facteur d'importance $I = 1.25$

Moment à la base

Sur RPA, nous n'avons pas trouvé de méthode ou d'équation pour calculer le moment à la base, nous avons donc fait une estimation illustrée par l'équation suivante :

$$M = \frac{1}{3} H_H V \quad (4.17)$$

Résultats du calcul

A Partir des données précédentes et les équations [4.12](#), [4.13](#), [4.14](#), [4.15](#), [4.16](#) et [4.17](#), nous obtenons les résultats suivants :

TABLEAU 4.8 – Résultats d'estimation avec la masse répartie

Poids total effectif	W_T (kN)	23561.75
Amortissement totale	ξ (%)	5
Correction d'amortissement	η	1
Facteur d'amplification dynamique	D	2.5
Facteur de qualité	Q	1
Coefficient d'accélération de zone	A	0.2
Facteur de réduction impulsive	R_{wi}	4
Facteur d'importance	I	1.25
Coefficient de réduction	$R = R_{wi}/I$	3.2
Effort tranchant à la base	V(kN)	3681.52
Moment à la base	M(kN.m)	16726.39

4.5.4 Calcul avec API 650

Les calculs dans cette partie se base sur le règlement American Petroleum Institute API 650 version 2007 [13] :

Période impulsive

Selon E.4.5.1 page E-10 d'API 650 :

$$T_i = \frac{1}{\sqrt{2000}} C_i H_H \sqrt{\frac{\rho}{E} \cdot \frac{D}{t_u}} \quad (4.18)$$

C_i : Coefficient en fonction de H/D de la figure 4.4

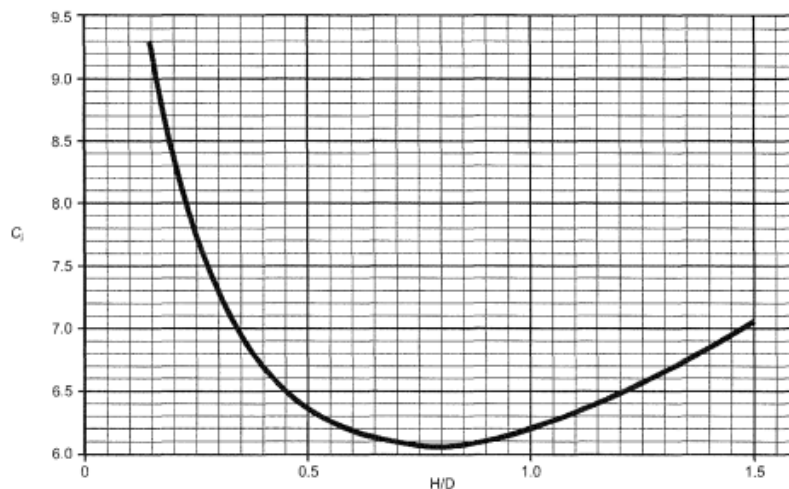


FIGURE 4.4 – Coefficient C_i

H_H : Hauteur du liquide

ρ : Masse volumique du liquide

D : Diamètre

E : Module d'élasticité du matériau

t_u : Épaisseur moyenne (tableau 4.9)

TABLEAU 4.9 – Épaisseur moyenne des viroles

Épaisseur		
hi(m)	ti(mm)	hi*ti
2	12	24
2	10	20
2	8	16
8.5	6	51
$\sum hi$	$\sum hi ti$	$t_u = \sum hi ti / \sum hi$
14.5	111	7.6551

On applique l'équation 4.18, utilisant les données du tableau 4.9 et la figure 4.4 :

TABLEAU 4.10 – Période impulsive T_i

H/D	0.897
Ci	6.2
E(MPa)	210000
$\rho (kg/m^3)$	920
D(m)	15.29
$H_H (m)$	13.63
$t_u (mm)$	7.655
$T_i (s)$	0.177

Période convective

Selon E.4.S.2 page E-11 d'API 650 :

$$T_c = 1.8K_s\sqrt{D} \quad (4.19)$$

K_s : Coefficient de période de ballonnement

$$K_s = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68H_H}{D}\right)}} \quad (4.20)$$

Appliquant les équations 4.20 et 4.19 :

TABLEAU 4.11 – Période convective

D(m)	15.29
H_H (m)	13.63
Ks	0.579
T_c (s)	4.074

Facteur de correction d'amortissement convectif

De RPA 4.2.3 page 40 :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2 + \xi}} \geq 0.7 \quad (4.21)$$

Amortissement convectif : $\xi=0.5$ (%) (E.4.2 page E-6 d'API 650)

ξ (%) convectif	0.5
η	1.673

Coefficient d'accélération impulsive

D'après E.4.6.2 page E-12 d'API 650 :

$$A_i = Q \frac{I}{R_{wi}} S_{ai} \quad (4.22)$$

Q : Coefficient de qualité

I : Facteur d'importance

R_{wi} : Facteur de réduction impulsive

S_{ai} : Action sismique impulsive

Les valeurs de périodes caractéristiques selon la catégorie du sol pour ce site S3 meuble (3.3 page 28 de RPA), sont les suivantes de tableau 4.7 page 48 de RPA :

$$T_1 = 0.15 \text{ s}$$

$$T_2 = 0.5 \text{ s}$$

Pour $T_1 = 0.15 \text{ s} < T < T_2 = 0.5 \text{ s}$ (RPA 4.3.3 page 48) :

$$S_{ai} = 2.5\eta 1.25A \quad (4.23)$$

On obtient la valeur du coefficient d'accélération impulsive à partir des données précédentes et les équations 4.23 et 4.22 :

TABLEAU 4.12 – Coefficient d'accélération impulsive

Q	1
I	1.25
R_{wi}	4
A	0.2
η	1
S_{ai}	0.625
A_i	0.195

Coefficient d'accélération convective

E.4.6.2 page E-12 d'API 650 :

$$A_c = QK\left(\frac{I}{R_{wc}}\right)S_{ac} \quad (4.24)$$

K : Coefficient permettant d'ajuster l'accélération de 5 % à 0,5 % d'amortissement = 1.5

R_{wc} : Facteur de réduction convective

De tableau E-4 page E-13 d'API pour encrage mécanique, $R_{wc} = 2$

S_{ac} : Action sismique convective

T_c : Période convective

Pour $T_c > 3$ s (RPA 4.3.3 page 48) :

$$S_{ac} = 2.5\eta 1.25A\left(\frac{T_2}{3}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\frac{3}{T_c}\right)^{\frac{5}{3}} \quad (4.25)$$

De 4.25 et 4.24 :

TABLEAU 4.13 – Coefficient d'accélération convective

η	1.673
T_2	0.5
T_c	4.074
K	1.5
R_{wc}	2
S_{ac}	0.190
A_c	0.178

Poids effectif

$$W_e = W_i + W_c \quad (4.26)$$

W_e : Poids effectif

W_i : Poids impulsif

D'après E.6.1.1 page E-13 d'API :

$$W_i = \left(1 - 0.218 \frac{D}{H_H}\right) W_H \quad (4.27)$$

W_c : Poids convectif

$$W_c = 0.23 \frac{D}{H_H} \tanh\left(\frac{3.67 H_H}{D}\right) W_H \quad (4.28)$$

D : Diamètre

W_H : poids du liquide

H_H : hauteur du liquide

De 4.27, 4.28 et 4.26 :

TABLEAU 4.14 – Poids effectif

D(m)	15.29
H_H (m)	13.63
W_H (KN)	23013.87
W_i (KN)	17385.82
W_c (KN)	5920.772
W_e (KN)	23306.5944

Effort tranchant

Selon E.6.1 page E-13 d'API 650 :

$$V = \sqrt{(V_i^2 + V_c^2)} \tag{4.29}$$

D'où :

$$V_i = A_i(W_{silo} + W_i) \tag{4.30}$$

W_{silo} : Poids du silo vide

$$V_c = A_c W_c \tag{4.31}$$

Alors de 4.30, 4.31 et 4.29, On aura les résultats suivants :

TABLEAU 4.15 – Effort tranchant

W_{silo} (KN)	547.88
W_c (KN)	17387.110
W_i (KN)	5920.772
A_i	0.1953
A_c	0.1783
V_i (KN)	3502.928
V_c (KN)	1055.511
V (KN)	3658.498

Moment à la base

De l'API 650 E.6.1.5 page E-13, nous avons extrait l'équation suivante :

$$M_{base} = \sqrt{[A_i(W_i X_i + W_s X_s + W_t X_t)]^2 + [A_c W_c X_c]^2} \tag{4.32}$$

Poids silo vide			
Fond	Wf (KN)	115.26	
Avec :	Toit	Wt (KN)	124.9
	Robe	Ws (KN)	422.98
	Total	W total (KN)	663.14

Position des centres de poussées (API 650 E.6.1.2.1 page E-14) :

Pour $D/H \leq 1.33$

Impulsive :

$$X_i = (0.5 - 0.094 \frac{D}{H})H \quad (4.33)$$

Convective :

$$X_c = (1 - \frac{\cos l - 1}{l \sinh l})H \quad (4.34)$$

$$l = 3.67 \frac{H}{D}$$

Toit :

$$X_t = H_r + \frac{1}{3}H_t \quad (4.35)$$

Robe :

$$X_s = \frac{1}{2}H_r \quad (4.36)$$

On applique les équations 4.33, 4.34, 4.35, 4.36 pour avoir le résultat suivant :

TABLEAU 4.16 – Position des centres de poussées

D/H	1.12
l	3.27
H_t (m)	2
H_r (m)	14.5
X_i (m)	5.38
X_c (m)	9.77
X_t (m)	15.17
X_s (m)	7.25

A partir des données du tableau ci-dessus 4.16, on applique l'équation 4.32 :

TABLEAU 4.17 – Moment à la base

Item	Postions X	Valeurs X	Poids W	Valeurs W	A	Valeurs A
Toit	X_t (m)	15.17	W_t (kN)	124.9	A_i	0.195
Robe	X_s (m)	7.25	W_s (kN)	422.98	A_i	0.195
Impulsive	X_i (m)	5.38	W_i (kN)	17385.82	A_i	0.195
Convective	X_c (m)	9.77	W_c (kN)	5920.77	A_c	0.178
Moment total à la base (kN.m)						21819.741

Récapitulation des calculs des efforts

La récapitulation de toutes les résultats est la suivante :

TABLEAU 4.18 – Récapitulation des calculs

	V(kN)	M(kN.m)
Masse répartie(RPA)	3681.52	16726.39
API 650	3658.26	21819.74

4.5.5 Commentaires sur les résultats

- Dans le cas d'un calcul théorique du dimensionnement d'une structure, le concepteur ajoute initialement quelques valeurs supplémentaires aux valeurs obtenues pour être plus sûr et garantir la stabilité de la structure.
- La norme RPA 99-Version 2003 ne donne pas une méthode détaillée pour l'analyse sismique des réservoirs en acier, on était obligé de faire des estimations pour les lois et les valeurs en particulier pour le coefficient de réduction ainsi que le moment à la base.
- L'API fournit des règles de calcul simplifiées pour le calcul des charges et la conception de la structure de silos.
- D'après la comparaison sur la récapitulation des calculs, les résultats des calculs sismiques des efforts tranchants et des moments à la base avec les deux réglementations RPA et API sont proches les uns des autres, ce qui confirme que nos résultats de calculs pour la conception de cette structure sont fiables et que nous n'avons pas eu d'erreurs.

4.6 Conclusion

La conception d'une structure nécessite des calculs manuels avec des règlements. Pour notre étude, nous avons dimensionné le silo avec le calcul des épaisseurs de la coque et du toit selon API ainsi que nous avons fait un calcul sismique des efforts tranchants et des moments à la base avec deux règlements API et RPA, certains des résultats du calcul avec RPA est faits avec des estimations, malgré cela, les petites différences entre les résultats des deux règlements montre la fiabilité de notre calcul.

La conception d'une structure nécessite des calculs manuels avec des règlements. Pour notre étude, nous avons dimensionné le silo avec le calcul des épaisseurs de la coque et du toit selon API ainsi que nous avons fait un calcul sismique des forces de cisaillement et des moments à la base avec deux règlements API et RPA, certains des résultats du calcul avec le RPA sont faits avec des estimations, malgré cela, les petites différences entre les résultats des deux règlements montre la fiabilité de notre calcul.

Cette partie est consacrée aux calculs analytiques de la conception du réservoir cylindrique, comme nous pouvons obtenir les résultats des efforts tranchants, des moments avec une modélisation numérique avec IFS (chapitre 2) pour avoir plus de précision sur les calculs sismiques de ce réservoir, ainsi qu'une comparaison pour avoir la fiabilité des résultats analytiques et assurer la stabilité du réservoir de tous les impacts de l'écoulement ainsi que des déformations.

Conclusion générale

Dans ce travail, le comportement dynamique de réservoirs de stockage soumis à une excitation horizontale a été étudié. Dans un premier temps, le phénomène de ballottage dans un réservoir rectangulaire 2D soumis à une excitation harmonique horizontale est pris en compte, deux études numériques ont été réalisées : une première étude avec l'hypothèse de parois rigides sans tenir compte de l'IFS, modélisée sur le solveur diphasique Ansys-Fluent pour les deux cas de ballottage linéaire et non linéaire. L'analyse effectuée a montré que le modèle proposé fournit de très bons résultats lorsqu'on le compare pour différentes tailles de maillage à la solution analytique pour le ballottage linéaire et aux résultats expérimentaux pour le ballottage non linéaire. On a vu que dans le cas de ballottage non linéaire la solution analytique n'est plus valide. En outre l'étude a montré l'influence de la taille de maillage sur la précision des résultats de la simulation numérique.

Une deuxième étude portant sur l'interaction fluide-structure pour deux cas de réservoirs rigide et flexible a été menée. Le fluide en ballottage étant systématiquement en interaction avec le réservoir qui le contient, la prise en compte du couplage fluide-structure dans la modélisation numérique est donc importante, une approche de l'interaction fluide-structure sur la base d'un couplage partitionné est réalisée pour l'analyse du ballottage linéaire. D'une part, le solveur de fluide permet de résoudre les équations de Navier-Stokes incompressibles et biphases. La formulation Arbitraire Lagrangien-Eulérien (ALE) est adoptée pour la résolution de ces équations dans un domaine mobile et la méthode VOF pour le suivi de l'interface air-liquide a été appliquée. D'autre part, le solveur solide permet de résoudre les équations d'élasticité linéaire. Les conditions aux limites à l'interface fluide-structure sont respectées par un échange de données (contraintes dans le fluide et déplacement dans la structure) au niveau de l'interface à chaque pas de temps.

L'application de ce modèle à un réservoir à parois flexibles a permis de mettre en évidence l'effet de la flexibilité des parois du réservoir sur l'amplitude du ballottage et

les fluctuations de la surface libre, d'une part, et l'effet du ballonnement du liquide sur la déformation des parois, d'autre part. Les principaux effets étudiés concernent particulièrement deux points. Premièrement, la hauteur de la surface libre du ballonnement est plus élevée pour le cas du réservoir flexible que pour le cas du réservoir rigide, cela est du moins vrai pour le cas l'excitation appliquée. En effet une étude paramétrique avec différentes excitations doit être réalisée pour généraliser ce constat. Deuxièmement, la déformation moyenne est légèrement plus élevés pour le cas du réservoir flexible.

Par ailleurs, dans une deuxième partie du travail, un dimensionnement et un calcul sismique sont effectués pour un réservoir cylindrique réel en acier ainsi qu'une présentation du réservoir avec AutoCAD. La conception de ce réservoir implique beaucoup de formules mathématiques et de calculs pour le dimensionnement ainsi que pour le calcul sismique. Les résultats montrent une faible différence entre les valeurs obtenues par le calcul avec les règlements API et RPA, ce qui indique que nos valeurs sont fiables.

Nos études numériques du comportement dynamique du réservoir rectangulaire soumis à une excitation externe avec interaction fluide-structure ouvrent la voie à d'autres études avec des géométries des réservoirs plus complexes soumis à différentes excitations et contenant différents type de fluides. En outre, une étude du ballonnement avec interaction fluide-structure et interaction sol-structure des réservoirs sous excitation externe complexe serait d'un bon apport pour la compréhension de ce type d'ouvrages. Aussi, une future étude numérique du réservoir cylindrique du dernier chapitre avec interaction fluide-structure et la validation des résultats des calculs manuels et des résultats numériques pourront être réalisés.

Bibliographie

- [1] Achour, M. Y. and Daoud, M. (2017). “Analyse du comportement sismique d’un réservoir industriel de 8000 m³ : application du code parasismique algerien.” Thèse, Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou, Tizi Ouzou, Algérie.
- [2] Algériennes, R. P. (2003). “Rpa 99/version 2003.” *Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, Algiers, Algeria*.
- [3] ANSYS (2022). “Ansys fluent-cfd software|ansys, <<https://www.ansys.com/academic/students>>.
- [4] Bonnet, G., Seghir, A., and Tahakourt, A. (2011). “Liquid filled rectangular reservoir analysis using a coupled fem/bem model.” *8th International Conference on Structural Dynamics (Eurodyn 2011)*, 1.
- [5] Boudjellal, E.-M. B. (2018). “Analyse sismique des réservoirs.” Thèse, Université de Batna 2 (Batna, Algérie), Batna, Algérie.
- [6] COMSOL, I. (2020). “Comsol multiphysics, <<http://www.comsol.com/products/multiphysics/>>.
- [7] Dahmani, L. (2017). “Notes de cours : Calcul et conception des silos et reservoirs metalliques.
- [8] De Normalisation, C. E. (1998). “Eurocode 8—design of structures for earthquake resistance—part 1 : General rules, seismic actions and rules for buildings.” *European Standard NF EN*, 1, 2005.
- [9] Faltinsen, O. M. (1978). “A numerical nonlinear method of sloshing in tanks with two-dimensional flow.” *Journal of Ship Research*, 22(03), 193–202.
- [10] Haroun, M. A. and Housner, G. W. (1981). “Seismic design of liquid storage tanks.” *Journal of the Technical Councils of ASCE*, 107(1), 191–207.
- [11] Housner, G. W. (1963). “The dynamic behavior of water tanks.” *Bulletin of the seismological society of America*, 53(2), 381–387.
- [12] Insitute, A. (2002). “Design and construction of large, welded, low-pressure storage tanks api 620.” *Washington, DC : API Publishing Services*.
- [13] Institute, A. P. (1998). *API Standard 650 : Welded Steel Tanks for Oil Storage*. American Petroleum Institute.
- [14] Kalantari, A., Nikoomanesh, M. R., and Goudarzi, M. A. (2019). “Applicability of mass-spring models for seismically isolated liquid storage tanks.” *Journal of Earthquake and Tsunami*, 13(01), 1950002.

-
- [15] Ketabdari, M. and Saghi, H. (2013). “Numerical study on behavior of the trapezoidal storage tank due to liquid sloshing impact.” *International Journal of Computational Methods*, 10(06), 1350046.
- [16] Khouf, L. (2022). “Modélisation numérique de l’interaction fluide-structure et du ballottement des liquides dans les réservoirs de stockage.” Thèse, Université de Béjaia, université de Cean Normandie, Béjaia, Algérie (Juin).
- [17] Khouf, L., Benaouicha, M., Seghir, A., and Guillou, S. (2021). “Numerical modeling of liquid sloshing in flexible tank with fsi approach.” *World Journal of Engineering*.
- [18] Kotrasová, K. and Kormaníková, E. (2017). “Liquid storage cylindrical tank-earthquake analysis.” *MATEC Web of Conferences*, Vol. 125, EDP Sciences, 04009.
- [19] Liu, D. and Lin, P. (2008). “A numerical study of three-dimensional liquid sloshing in tanks.” *Journal of Computational physics*, 227(8), 3921–3939.
- [20] Majid, F. (2015). “Réservoirs de stockage : Méthodologie de calcul et analyse sécuritaire.” *CFM 2015-22ème Congrès Français de Mécanique*, AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie.
- [21] Ozdemir, Z., Souli, M., and Fahjan, Y. M. (2010). “Fsi methods for seismic analysis of sloshing tank problems.” *Mechanics & Industry*, 11(2), 133–147.
- [22] Raja, R. S. (2012). “Coupled fluid structure interaction analysis on a cylinder exposed to ocean wave loading.” *Chalmers University of Technology*.
- [23] Standard, B. (2006). *Eurocode 1 : Actions on structures*. British Standards Institution.
- [24] Toutant, A. (2006). “Modélisation physique des interactions entre interfaces et turbulence.” Thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, <<https://oatao.univ-toulouse.fr/7604/>> (December).
- [25] Veletsos, A. (1984). “Seismic response and design of liquid storage tanks.” *Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems*, 255–370.
- [26] Veletsos, A. S. and Tang, Y. (1987). “Rocking response of liquid storage tanks.” *Journal of Engineering Mechanics*, 113(11), 1774–1792.
- [27] Wozniak, R. S. (1978). “Basis of seismic design provisions for welded steel oil storage tanks.” *API Refining Dep. 43rd Midyear Meeting*, 1–34.
- [28] ZERGUIT, N. E. H. (2018). “Etude expérimentale et numérique de l’écoulement à surface libre au-dessus du déversoir à seuil épais.” Mémoire, Université ABOU BEKR BELKAID, Tlemcen, Algérie (Juin).