

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Amar Thlidji- Laghouat –

Faculté : Technologie

Département : Génie Mécanique

Option : Systèmes thermiques et énergétiques



Mémoire en vue de l'obtention de diplôme de Magistère.

Thème :

---

# Optimisation de la géométrie et des dimensions d'un convertisseur d'énergie houlo-motrice

---

Encadré par :

Mr : BENCHATTI Ahmed

Mr: BOUALI Belkacem

Réaliser par :

Mr. BENMEBAREK Ahmed

Membres du jury :

Président de jury : Dr.BEHORMA Aissa – M.C.A– Université de Laghouat.

Examineur : Pr.MEDJELLED Ahmed – Professeur – Université de Laghouat.

Examineur : Dr.AOUISSI Mokhtar – M.C.A– Université de Laghouat.

Rapporteur: Pr.BENCHATTI Ahmed – Professeur – Université de Laghouat.

Rapporteur: Dr.BOUALI Belkacem– M.C.A – Université de Laghouat.

# Remerciements

**Je remercie tout d'abord Dieu le tout puissant qui nous éclaire le bon chemin**

**Je remercie vivement et chaleureusement mon encadreur Monsieur **BENCHATTI .A**, pour la confiance dont il a fait preuve à mon égard et pour les encouragements et les subtiles orientations prodiguées tout le long de ce travail.**

**Je tiens a remercier mon co-encadreur Monsieur **BOUALI .B** pour les intentions dont j'ai pu bénéficier et pour m'avoir dirigé avec compétence et rigueur tout le long de ce travail.**

**A tous, je tiens a exprimer mes sincères remerciements.**

## SOMMAIRE

## INTRODUCTION GENERALE

1-Introduction générale.....	2
------------------------------	---

## Chapitre 1

## RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

1-Introduction.....	6
2- Conclusion.....	11

## Chapitre 2

## LES ENERGIES MARINS RENOUVELABLES

1-Introduction.....	13
2-Les technologies d'énergies renouvelables maritimes.....	14
3-L'énergie marémotrice.....	14
3-1 Généralités et ressource.....	14
3-2 Développement actuel.....	15
4-Énergie des vagues (houlo-motrice).....	16
4-1 Généralités et ressource.....	16
4-2 Développement actuel.....	16
4-2-1 Systèmes à colonne d'eau oscillante.....	16
4-2-2 Systèmes oscillants (rotation) flottants.....	17
4-2-3 Systèmes oscillants (rotation) immergés / au fond.....	19
4-2-4 Systèmes oscillants (translation) immergés.....	19
4-2-5 Systèmes oscillants (translation) flottants.....	20
5-Énergie des courants.....	20
6-Énergie thermique des mers (ETM).....	21
7-Énergie osmotique.....	23
8-Énergie éolienne offshore (structures flottantes).....	24
8-1 Conditions du développement futur.....	24
9- Comparaison des énergies marines.....	25
10-Des nombreuses solutions, des stades de développement variés.....	26
11-Conclusions.....	28

## Chapitre 3

## MODELISATION MATHEMATIQUE

1-Introduction.....	30
2-Modélisation mathématique .....	30
2-1 Formulation générale.....	30

2-2 Équations de Navier-Stokes.....	31
3-Nature de la turbulence.....	32
3-1 Les approches de modélisation.....	33
3-1-1 L'approche DNS (Direct Numerical Simulation).....	33
3-1-2 L'approche LES (Large Eddy Simulation).....	33
3-1-3 L'approche RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes).....	34
4 Modèles de la turbulence .....	35
4-1 Modèles différentiels (RSM) .....	35
4-2 Modèles à viscosité tourbillonnaire .....	35
4-3 Traitement de la paroi .....	36
4-4 Le modèle (K- ) .....	37
5-Résolution numérique .....	38
5-1 La Méthode des volumes finis .....	38
6-Traitement d' interface .....	40
6-1 Les Modèles microscopiques .....	41
6-1-1 La Méthodes Lagrangiennes .....	42
6-1-2 La methode Marker et Cell (MAC method) .....	42
6-1-3 La méthode de" Front tracking method" .....	43
6-2 La Méthodes Eulériennes .....	44
6-2-1 La méthode volume de fluide (Volume of Fluid VOF method) .....	44
6-2-2 Level-Set method .....	45
6-2-3 Méthodes mixtes.....	46
7-Littérature des théories des vague.....	46
7-1 Houle de Stokes.....	46
7-2 Théorie linéaire, houle d' Airy .....	47
7-2-1 Expression des potentiels des vitesses .....	47
7-2-2 Champs de vitesse .....	49
7-2-3 Trajectoires des particules .....	49
7-2-4 Champ de pression .....	50
7-2-5 Domaine d'application de la houle linéaire .....	50
7-3 Houle de Stokes au deuxième ordre .....	51
7-4 Champs des vitesses .....	53
8 conclusion .....	55

## Chapitre 4

## SIMULATION ET RESULTATS

1-Introduction.....	57
2-La Discrétisation de l'OWC.....	57
2-1 La conception géométrique de l'OWC.....	57
2-2Principe de fonctionnement.....	58
3-La Méthodologie.....	59
3-1La Modélisation physique.....	59

3-2 La Modélisation géométrique.....	61
3-3 Les Conditions aux limites.....	63
3-4 Les Conditions initiales.....	64
3-5 Les Paramètres de l'onde.....	65
3-6 La Configuration de la résolution.....	65
3-7 La Simulation.....	65
3-7-1 L'effet de la variation de dimension de l'orifice de la chambre.....	66
3-7-2 L'effet d'orientation de la paroi frontale.....	68
3-7-3 L'effet de la hauteur de colonne d'air.....	70
3-7-4 L'effet de la forme de la surface supérieure de la chambre d'air .....	71
3-7-5 L'effet de nombre des orifices de la chambre.....	71
3-8-1 L'effet des dimensions d'orifice de la chambre cubique.....	72
3-8-2 L'effet d'orientation de la paroi frontale.....	73
3-8-3 L'effet de nombre des orifices.....	74
4-Conclusion.....	74

## CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale.....	77
--------------------------	----

# INTRODUCTION GENERALE

La conquête et la maîtrise de l'énergie par l'être humain sont souvent perçus comme une des grandes victoires pour la civilisation. Nous nous appuyons sur l'énergie fossile depuis la révolution industrielle et elle est devenue le moteur de l'économie mondiale, aujourd'hui le plus grand défi est de trouver de nouvelles ressources d'énergie.

Nous reconnaissons, que c'est grâce à l'énergie fossile et à la découverte des lois de la thermodynamique que nous pourrions comprendre les différents aspects physiques de l'énergie, l'exploration de l'espace et l'utilisation dans différents domaines (l'industrie, les transports, le chauffage des bâtiments, les hôpitaux, dans les maisons,...etc.). Mais l'énergie fossile n'est pas disponible partout et ce n'est pas facile de l'exploiter directement, parce qu'elle nécessite des moyens et des technologies, ça d'un côté, et d'un autre côté n'oublions pas leur impact écologique responsable du réchauffement climatique. Cette dernière conséquence nous pousse à réfléchir à d'autres ressources qui comblent nos besoins énergétiques sans toucher le côté environnemental, c'est ce qu'on appelle les énergies renouvelables. Ces dernières peuvent être présentées dans la nature sous forme de vent, des vagues maritimes, rayonnement solaire et chaleur géothermique. Il existe plusieurs technologies pour convertir ces ressources énergétiques en énergie électrique parmi ces technologies (Les éoliennes, Photovoltaïque, La Biomasse, Hydrogène, etc.)

Les éoliennes sont des sortes de moulins situées sur terre ou en mer qui ont l'avantage de n'émettre aucun gaz à effet de serre. Leurs inconvénients, outre l'intermittence et le degré de déperdition de l'énergie de départ, le bruit et la diffusion d'ondes électromagnétiques qui provoquent des débats contradictoires concernant leurs effets sur la santé[1]. L'énergie solaire se caractérise par son abondance mais le coût des équipements reste le plus grand problème. Néanmoins elle pose des problèmes de toxicité des matériaux utilisés[1], la géothermie ne dégage pas de CO<sub>2</sub> mais des précautions doivent être prises lors de l'exploitation pour éviter que d'autres composants polluent l'atmosphère ou les cours d'eau[1].

La mer est un milieu fluide riche en flux énergétiques qui peuvent être exploités sous les formes suivantes : Énergie éolienne offshore, Énergie des courants de marée, Énergie thermique des mers, Énergie osmotique, Énergie marémotrice et l'Énergie des vagues (houlo-motrice) qui fera l'objet de notre travail, mais il y a plusieurs systèmes de conversion d'énergie qui sont utilisés, nous choisissons *la colonne d'eau oscillante (OWC oscillating water column)*.

La colonne d'eau oscillante (l'OWC) utilise un grand volume d'eau en mouvement comme un piston dans un cylindre. L'air est expulsé de la colonne lorsque la vague y monte et l'air en mouvement est aspiré lorsque la vague tombe. Ce mouvement d'air fait tourner une turbine montée au sommet de la colonne. Les facteurs qui interfèrent dans nos études (la nature du vague, le type d'écoulement, les pertes de charge dans l'OWC qui a une relation directe avec la géométrie). Ce phénomène est obtenu de l'interaction entre le fluide et les vagues et le type de dispositif l'OWC qui influencent directement sur l'efficacité de ce dispositif.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres et aborder successivement la recherche bibliographique, les énergies marines renouvelables, la modélisation mathématique d'écoulement, en suit les applications et les résultats et enfin une conclusion générale.

Le premier chapitre parle de la synthèse des connaissances et l'état de l'art sur les énergies et les convertisseurs des vagues où nous présentons une analyse bibliographique des différents travaux qui traitent le même type qu'on l'a étudié.

Le second chapitre se concentre sur les différentes techniques de récupération de l'énergie marine, les études de développement actuelles.

Le troisième chapitre traite les équations générales de la turbulence et les relations nécessaires pour prédire les écoulements qui sont les équations Navier-Stokes. Ainsi nous présentons le modèle de turbulence  $K-\epsilon$ . L'écoulement à surface libre est considéré comme un écoulement bi-phasique (air /eau) où les équations peuvent être reformulées sous une forme « 1-fluide » dont laquelle intervient un fluide équivalent aux caractéristiques variables. Le suivi d'interface entre les deux phases air eau est assuré par une méthode de type la fraction volumique (**Volume Of Fluid - VOF**). Et à la fin, nous donnons des éclaircissements généraux sur les différents modèles des vagues.

Dans le quatrième chapitre nous présentons une définition globale de l'OWC et nous soulignons la méthodologie de notre travail dans ce dernier. On va traiter et commenter les résultats de la simulation à propos de l'efficacité des prototypes proposés. On va résumer aussi les points discutés dans ce chapitre en cinq titres comme suit:

- ✓ l'effet de la variation de dimension de l'orifice de la chambre.
- ✓ l'effet de l'orientation de la paroi frontale.

- ✓ l'effet de la variation de la hauteur de la colonne d'air.
- ✓ l'effet de la forme de la surface supérieure de la chambre d'air.
- ✓ l'effet du nombre des orifices de la chambre.

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale et on va donner les grands titres qui résumant notre objectif.

Chapitre 1

# RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

**Introduction:**

La surface de la terre est couverte par les mers et les océans. L'eau douce, déjà apprivoisée, permet de satisfaire 16 % de la production mondiale d'électricité[2]. Elle est la première des énergies renouvelables, sans déchet ni émission de gaz à effet de serre. Un bouillonnement mondial de technologies vise désormais à capter l'énergie des mers, infinie et prédictible.

Selon le rapport de l'IEA(**International Energy Agency**)[3], le potentiel mondial pour la houle est de 8000 à 80000 Twh/an. Par comparaison, les courants de marée possèdent un potentiel de 800 Twh/an et l'énergie thermique des mers 10000 Twh/an. On constate donc que l'énergie de la houle pourrait s'avérer plus prometteuse que l'énergie thermique des mers. Mais il est nécessaire de préciser qu'elle est dépendante de la force des vagues et que cette force n'est pas homogène dans le monde.

En général, les convertisseurs d'énergie houlo-motrice utilisent le mouvement ascendant et descendant des vagues pour produire de l'électricité. Il existe plusieurs types des systèmes. Certains systèmes extraient l'énergie des vagues de surface, tandis que d'autres utilisent l'énergie des fluctuations de pression sous la surface de l'eau provenant de la vague elle-même. Certains systèmes sont fixes, tandis que d'autres suivent le mouvement des vagues.

De très nombreux dispositifs ont été expérimentés avec deux grandes catégories, les dispositifs côtiers et les dispositifs de pleine mer (off-shore). Les premiers utilisent le déferlement des vagues, les seconds utilisent les variations du niveau de la mer lors du passage de la houle. Les dispositifs côtiers sont faciles à construire et à entretenir mais leur rendement est nettement moins bon que les dispositifs off-shore qui exploitent des vagues plus puissantes et plus régulières. Les méthodes les plus couramment utilisées pour capter l'énergie des vagues comprennent : le système à colonne d'eau oscillante, le système à batteurs et le système à canal.

Les colonnes d'eau oscillantes sont de simples constructions qui agissent à la manière d'un piston et d'un cylindre. Lorsqu'une vague entre dans la colonne d'eau oscillante, elle réplique l'action d'un piston, en poussant la colonne d'air vers l'avant et en dernier lieu vers la turbine. Lorsque la vague se retire, l'effet opposé s'exerce sur le

mécanisme. Une dépression d'air est créée dans la colonne d'eau oscillante qui actionne à la turbine[4].

Dans ce travail, on ne s'intéresse qu'à l'énergie des vagues pouvant être utilisée pour la production d'énergie exportable à la terre sous forme d'électricité avec des colonnes d'eau oscillantes (**Oscillating Water Column OWC**).

En raison de l'importance de ce type de convertisseurs d'énergie, et pour justifier notre choix, il est indispensable d'entamer cette étude par une synthèse bibliographique des travaux antérieurs qui ont traité les différents aspects de ces appareils, nous citons particulièrement :

**Michael T. Morris-Thomas, Rohan J. Irvin , KrishetP. Thiagarajan (2007) [5].**

Ont consacré leur travail, principalement, à l'interaction de chambre semi-immersée avec les vagues grâce à une colonne d'eau oscillante (OWC) et ont réalisé une étude expérimentale sur l'efficacité énergétique du dispositif. L'onde considérée, dans cette étude, est plane et progressive. Plusieurs cas testés sont réalisés en fonction des paramètres de l'onde (période, amplitude,...) et de la profondeur d'eau. La caractéristique principale de cette expérimentation met l'accent sur l'influence de la géométrie du mur avant celle de la chambre de l'OWC.

**Mohammed AsidZullah et Young-Ho Lee[6].**

Ont présenté une étude numérique directe de la prise de puissance directement d'un rotor incorporé au fond arrière d'une chambre d'un OWC. Les auteurs se sont intéressés, dans cette étude à l'effet de la courbure des aubes du rotor sur les performances de l'OWC. La simulation de l'écoulement est réalisée en utilisant le code ANSYS-CFX. Cette étude a montré que l'efficacité varie considérablement selon l'angle du rotor de la turbine.

**A.F. de O. Falcao P et A.P. Justino [7].**

Ont étudié un modèle théorique développé pour simuler la conversion de l'énergie de la vague d'une colonne d'eau oscillante (OWC) équipé d'une turbine à air de type (Wells) et une vanne (en série ou en parallèle avec la turbine) pour contrôler le débit d'air. Des simulations numériques montrent que l'utilisation d'une soupape de commande, en empêchant ou en réduisant les pertes de décrochage aérodynamique au

niveau des aubes du rotor de la turbine, peut fournir un moyen d'augmenter sensiblement la quantité d'énergie produite par l'installation, en particulier au niveau de puissance d'ondes incidentes élevées. Du point de vue hydrodynamique, une vanne (bypass) ou une soupape d'étranglement doivent être utilisées, selon le système d'absorption d'énergie de la houle.

**B. BOUALI et S. LARBI [8].**

L'objectif principal de cette étude est d'optimiser la géométrie et les dimensions du convertisseur d'énergie OWC pour obtenir le maximum de puissance disponible dans une onde progressive avec une période et une longueur d'ondes constantes. la modélisation et la simulation numérique sont effectuées en utilisant le logiciel ANSYS CFX, ICEM CFD. Dans cette étude, les auteurs ont montré particulièrement que l'orientation du mur avant de la chambre de l'OWC en contrecourant (forme en L) donne la meilleure efficacité.

**D. V. Evans et R. Porter[9].**

Ont étudié les caractéristiques hydrodynamiques d'une colonne d'eau oscillante OWC, sous l'hypothèse de la théorie linéaire des vagues. Les propriétés hydrodynamiques importantes sont exprimées en terme d'intégrales de fonctions proportionnelles aux vitesses du fluides en dessous du mur avant de la chambre de l'OWC. Les fonctions utilisées vérifient les équations intégrales dont les solutions sont approchées de façon très précise en utilisant la méthode de **Galerkin** .

**V. karami ,M.J.Ketabdari, et A. K. Akhtari[10].**

Ont réalisé une simulation numérique d'un OWC par la méthode des différences finies. Les auteurs ont modélisé le mouvement de la surface libre à l'intérieur de la chambre de l'OWC par un système mécanique à ressorts. L'analyse a été effectuée dans le domaine fréquentiel et basée sur la théorie linéaire des ondes de gravité et l'écoulement a été supposé potentiel. Les résultats de cette étude ont été validés par l'expérimentation. Cette analyse a montré que la modélisation mécanique par un système à ressorts, est un moyen puissant pour l'évaluation des performances d'un OWC.

**A. Babarit , J. Hals , M.J. Muliawan , A. Kurniawan , T. Moan et J. Krokstad [11].**

Auteurs de l'étude numérique comparative d'un groupe convertisseurs d'énergie des vagues WEC, pour estimer l'absorption d'énergie annuelle moyenne d'une sélection de huit convertisseurs (WEC) avec des principes de travail différents. Cette étude est basée sur des mesures de la puissance et du rendement.

**Brad Stappenbelt , Paul Cooper et Massimo Fiorentini(2010) [12].**

Ont proposé un modèle mécanique oscillant pour un convertisseur d'énergie à colonne d'eau oscillante et flottante. L'étude sur l'évaluation de la performance du dispositif comprend l'analyse du couplage dynamique de l'OWC et de la structure flottante.

**M. N. Gomesa, C. D. Nascimento, B. L. Bonafini, E. D. Santos , L. A. Isoldi, et L. A. O. Rocha [13].**

Ce travail est consacré principalement à l'optimisation numérique bidimensionnelle de la géométrie d'un convertisseur d'énergie des vagues en énergie électrique qui a comme système principal et opérationnel la colonne d'eau oscillante. La formulation considère la théorie linéaire des ondes de gravités. Pour ce faire, les principes fondamentaux de conception constructive étaient utilisés pour faire varier les degrés de liberté  $H1/L$  (rapport entre la hauteur et la longueur de la chambre de l'OWC), et  $H2/L$  (rapport entre la hauteur et la longueur de la cheminée). Dans cette étude, ils ont adoptée une vague régulière avec dimensions de l'échelle du laboratoire. L'objectif principal était d'optimiser le dispositif de géométrie pour maximiser la puissance absorbée. Pour la résolution numérique, les auteurs ont utilisé le code de calcul **Fluent**, basé sur la méthode des volumes finis et la technique VOF (Volume of Fluid). La géométrie optimale pour OWC a été obtenue pour le degré de liberté  $H1/L = 0,84$ .

**M.Duval,D.Astruc et D.Legendre [14].**

Leur travail consiste à tester la pertinence d'une méthode VOF sans reconstruction d'interface pour modéliser le déferlement des vagues. Tout d'abord, une onde de Stokes en eau profonde conduisant au déferlement plongeant est étudiée et montre la même dynamique que les simulations VOF avec reconstruction d'interface. La dissipation

d'énergie est aussi étudiée, ensuite, le déferlement d'une onde solitaire, se propageant sur un récif immergé, est testée. Les résultats sont en accord avec ceux obtenus avec la théorie potentielle jusqu'au point de déferlement.

**Yali Zhang, Qing-Ping Zou et Deborah Greaves[15].**

Ont étudié la modélisation de la performance hydrodynamique d'une colonne d'eau oscillante avec l'écoulement diphasique eau-air, pour simuler l'interaction des ondes avec une chambre semi-immersée. Les auteurs ont utilisé une méthode numérique basée sur un niveau à deux phases pour examiner ses caractéristiques hydrodynamiques. Les résultats numériques pour un OWC dans diverses conditions des vagues sont comparés avec les données expérimentales publiées par **Morris-Thomas [3]**.

**Nuno Fonseca et Joao Pessoa [16].**

Ont réalisé une modélisation numérique d'un convertisseur d'énergie des vagues qui consiste en une structure flottante asymétrique avec un réservoir, partiellement rempli d'eau, en forme de U à l'intérieur et deux chambres à air latérales raccordées par un conduit. Le mouvement de la colonne d'eau oscillante, en forme de U, est provoqué par le roulement du flotteur qui force l'air à travers le conduit qui contient une turbine Wells. Le modèle numérique implémenté est testé sur un convertisseur d'énergie avec un déplacement de 1150t y compris 490t pour la colonne d'eau intérieure et une turbine installée de 2.3m de diamètre. L'analyse de l'influence de l'évolution des différents paramètres de conception sur l'efficacité du système est également présentée.

**Jose´ Perdigo et Antonio Sarmiento [17].**

Ont réalisé une optimisation générale sur l'efficacité dans le convertisseur d'énergie de type colonne d'eau oscillante. Ils ont démontré que le contrôle optimal permet une absorption maximale d'énergie des vagues mais pas la production d'énergie maximale.

**Tomoki Ikoma, Koichi Masuda, Hisaaki Maeda et Hikaru Omori [18].**

Ont décrit une méthode pour l'amélioration de l'efficacité du convertisseur d'énergie des vagues type OWC, et les effets de la projection des murs par une méthode de prédiction. Les essais sont effectués sur un réservoir d'ondes et une formulation théorique de prédiction a été présentée. Le teste de la méthode est réalisé avec des vagues de mer habituelles (régulières) et des vagues obliques. L'efficacité de conversion primaire du WEC calculées par cette méthode est plus grande que celle de l'OWC conventionnel.

**W. Sheng, T. Lewis et R. Alcorn[19].**

Ont présenté une enquête sur la relation de l'efficacité de l'OWC avec la taille de la colonne d'eau (longueur et largeur). Une analyse analytique/déduction a montré que pour convertir d'énergie des vagues avec un rendement de conversion élevé, il faut que la largeur et la longueur de la colonne doivent être conçus de manier appropriée. Généralement, une colonne large peut être utile pour capturer plus d'énergie incidente selon les équations mathématiques et la validation expérimentale.

**concluions:**

A partir de notre recherche bibliographique dans ces travaux sur les convertisseur d'énergie, on comprend que le premier intérêts est l'optimisation géométrique de l'OWC pour augmente sa performance avec des simulations ou avec des expériences. Notre étude portera sur les cinq axes suivants:

- L'effet de la géométrie (la forme et la dimension) de la chambre de l'OWC sur L'efficacité de l'OWC.
- L'effet de l'orientation de la paroi frontale.
- L'effet des dimensions de l'orifice (évent) introduit pour modéliser la prise de puissance (turbine).
- L'effet du volume d'air dans la chambre (la hauteur de la chambre d'air).
- La différence entre prise de puissance simple et multiple.

Chapitre 2

# LES ENERGIES MARINS RENOUVELABLES

## 1-Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons les causes énergétiques qui nous ont poussé à choisir l'énergie maritime, en suite nous passerons aux différentes techniques pour convertir l'énergie des mers en énergie électrique, par la suite nous citerons quelque solution pour améliorer les technologies dans ce domaine finalement nous allons clore ce chapitre avec une conclusion.

La surface de la Terre étant recouverte à 70% par des océans ça rend la ressource marine potentielle et prometteuse[2]. A titre d'exemple, l'énergie naturellement dissipée par les seules marées est évaluée à environ 25000 TWh/an ce qui dépasse la consommation d'électricité mondiale (17800 TWh en 2011 d'après l'IEA,[3]). Bien sûr, ce potentiel théorique n'est pas exploitable en totalité en raison de différents facteurs environnementaux, économiques, techniques ou liés à des conflits d'usages (navigation, pêche, tourisme...).

Si le niveau de maturité des énergies marines est très hétérogène, aucune n'a encore atteint à ce jour le stade du développement commercial. Certains dispositifs sont encore au stade de **R&D**, tandis que d'autres ont atteint le stade de démonstration en mer à taille réelle. Bien que les énergies marines ne représentent actuellement qu'une part infime de la production mondiale d'électricité, cette part est amenée à croître dans les années à venir, Par ailleurs, si les énergies marines renouvelables permettent de fournir de l'électricité, certaines d'entre elles permettent également la production d'eau douce, de froid ou de biocarburants.

### *Les énergies marines, pour quels acteurs ?*

Les technologies d'énergies marines, peut mûre pour la plupart, sont développées par des nombreuses startups mais aussi par des équipementiers, à qui elles offrent la perspective d'un relai de croissance.

Face à ces fournisseurs de technologies, les énergies marines donnent aux producteurs d'électricité la possibilité de diversifier leur portefeuille de production EnR.

Enfin, pour les consommateurs d'énergie et les collectivités, les énergies marines apportent une solution pour consommer une énergie propre produite à partir d'une ressource locale, d'autant plus précieuse dans des zones difficilement accessibles car isolées en mer (territoires insulaires, plates-formes pétrolières et gazières offshore, bouées de signalisation, stations de mesure...).

## **2-Les technologies d'énergies renouvelables maritimes.**

La mer est un milieu riche en ressources énergétiques qui peuvent être exploitées sous différentes formes. Cette publication se focalise sur la production d'électricité via les filières suivantes :

- ✓ Énergie marémotrice
- ✓ Énergie des vagues (houlo-motrice)
- ✓ Énergie des courants (courants de marée et courants océaniques)
- ✓ Énergie Thermique des Mers (ETM)
- ✓ Énergie osmotique (exploitation du gradient de salinité)
- ✓ Énergie éolienne offshore flottante

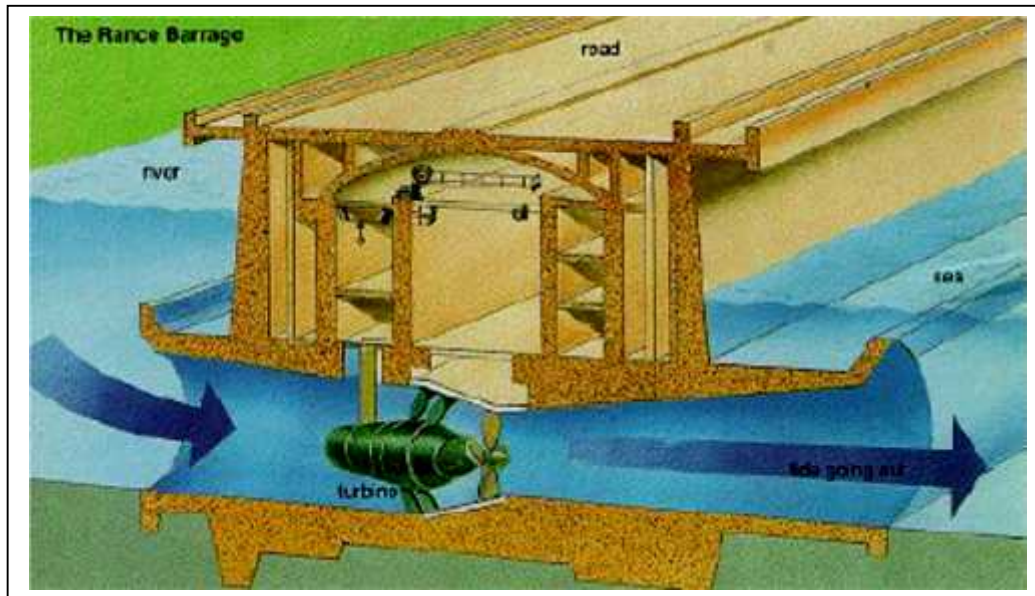
\*L'éolien offshore posé n'est pas abordé dans ce classement car cette filière fait l'objet d'un développement nettement plus avancé et présente des spécificités proches de l'éolien à terre. La filière biomasse marine est également exclue car son potentiel de développement réside plutôt dans les biocarburants que dans la production d'électricité[20].

### **3L'énergie marémotrice.**

#### **3-1 Généralités et ressource.**

L'énergie marémotrice est l'énergie potentielle liée à la marée, plus précisément à la différence de hauteur entre pleine mer et basse mer. Elle peut être exploitée grâce à la construction d'un barrage équipé des turbines dans une baie ou dans un estuaire. Le flux et le reflux de la marée permettent alternativement de remplir ou de vider la retenue d'eau ainsi créer, en actionnant des turbines qui produisent de l'électricité.

La filière est mature et bien maîtrisée techniquement, et la puissance marémotrice est fortement prédictible. Cependant, au vu du fort impact environnemental de ce type d'installations (envasement, modification de l'écosystème), les perspectives de développement sont très limitées.



**Figure (2.1):**Schéma d'une installation système marémotrice Ref: [20]

### 3-2 Développement actuel

La récupération de l'énergie des marées est ancienne, les nombreux moulins à marée en témoignent. Ce sont des systèmes à barrage et bassin de retenue du type de l'usine de la Rance (240MW installés pour 10 groupes bulbes) qui reste à ce jour la plus grande réalisation mondiale sur ce principe. D'autres réalisations, plus modestes, ont vu le jour au Canada (20 MW), en Chine (quelques MW). D'autres projets comme en Russie n'ont quasiment pas vu le jour à échelle significative ou ont été abandonnés (projet des îles Chausey, de la Severn). Après 35 ans de production sans accident majeur, on peut considérer que la technologie de ces centrales, assez proche de celle des centrales hydrauliques fluviales, est au point.

La nature périodique (12h) de la ressource fait que les centrales ne produisent pas en continu, mais seulement 4 à 5 heures par cycle, et donc pas nécessairement en phase avec la demande; par contre, cette énergie est totalement prédictible. La réversibilité des groupes bulbes a permis d'optimiser la production de l'usine de la Rance, notamment pour pomper de l'eau lors des heures creuses et stocker ainsi de l'énergie.



**Figure (2.2):** Usine marémotrice de La Rance Ref: [21]

## **4Énergie des vagues (houlo-motrice)**

### **4-1 Généralités et ressource**

Flotteurs ponctuels ou linéaires, systèmes à déferlement ou encore colonnes d'eau oscillantes... ce type d'énergie marine est à l'origine d'un foisonnement de technologies pour convertir l'énergie des vagues en électricité. Il existe une multitude de projets différents, la plupart encore au stade d'études à travers le monde.

La ressource houlo-motrice est usuellement chiffrée en kW par mètre de front de vague (kW/m). La gamme optimale pour un convertisseur d'énergie des vagues est comprise entre 15 et 75 kW/m. A titre d'exemple, sur la façade atlantique française, la puissance moyenne transmise par les vagues est de l'ordre de 45 kW/m. Les zones situées dans des hautes latitudes (plus de 40° par rapport à l'équateur) et les côtes occidentales des continents reçoivent plus d'énergie des vagues, ce qui correspond parfaitement à la situation du littoral européen [20].

### **4-2 Développement actuel**

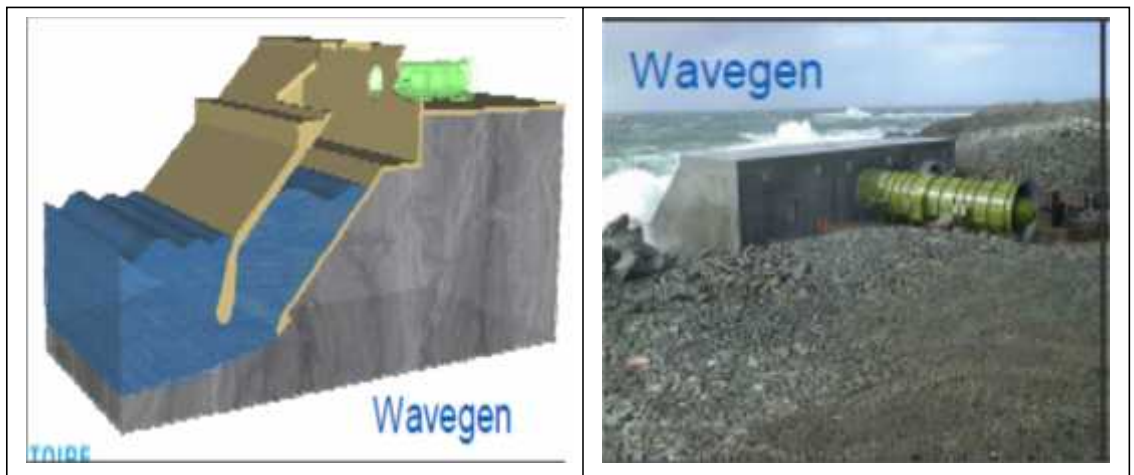
Dans ce secteur il y a plusieurs techniques pour récupérer l'énergie des vagues

#### **4-2-1 Systèmes à colonne d'eau oscillante**

##### **Caractéristiques :**

- ✓ Cavité ouverte au fond et communiquant avec l'extérieur

- ✓ Les vagues font monter et descendre la colonne d'eau, qui compressent et décompressent l'air au-dessus.
- ✓ L'air active une turbine bidirectionnelle (Wells)
- ✓ Technologie onshore, nearshore Wavegen (Voith-Siemens) ou offshore (flottante Oceanlinx) [21]



**Figure (2.3):** La colonne d'eau oscillante Wavegen Ref: [21]

#### 4-2-2 Systèmes oscillants (rotation) flottants

##### Caractéristiques :

- ✓ Perpendiculaire à la crête des vagues
- ✓ Les mouvements le long de la machine sont exploités par un système de conversion
- ✓ Technologie offshore



**Figure (2.4):** Pelamis Systèmes oscillants flottants Ref: [21]

**Pelamis:** 1er parc de 3 machines :

**Caractéristiques :**

- ✓ Agucadoura, au Portugal (2008)
- ✓ Puissance  $3 \times 750 \text{ kW} = 2.25 \text{ MW}$
- ✓ Projet pour installer autres 25 machines pour une puissance totale de 21 MW
- ✓ Surface nécessaire prévue  $< \text{à } 1 \text{ km}^2$

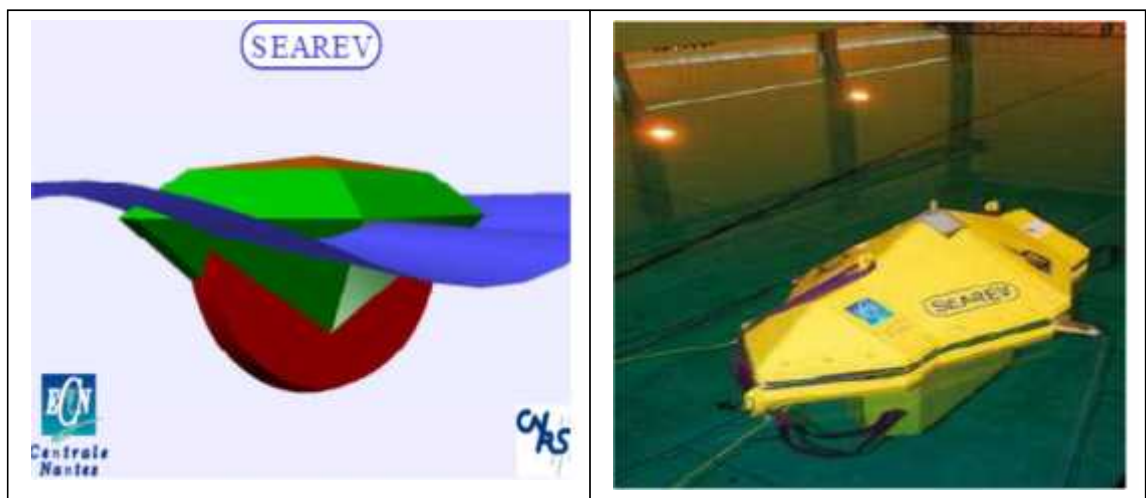


**Figure (2.5):**ferme houlomotrice avec plusieurs modules offshore de type Pelamis Ref: [21]

**SEAREV :** Ecole Centrale Nantes

**Caractéristiques :**

- ✓ R&D depuis plusieurs années (Alain Clément et collab.)
- ✓ Mouvement relatif de 2 corps
- ✓ Contrôle optimisé (latching)
- ✓ Etudes et tests en laboratoire



**Figure (2.6):**Systèmes oscillants flottants SEAREV Ref: [21]

### 4-2-3 Systèmes oscillants (rotation) immergés / au fond

#### Caractéristiques :

- ✓ La machine exploite la vitesse des particules d'eau due aux vagues
- ✓ Une paroi oscillante «suit» les vagues et convertit l'énergie cinétique
- ✓ Technologie nearshore, pour faibles profondeurs, ou onshore



Figure (2.7):Les parois oscillantes immergées Ref: [21]

### 4-2-4 Systèmes oscillants (translation) immergés

#### Caractéristiques :

- ✓ La machine exploite la variation des forces de pression générées par les vagues
- ✓ L'oscillation verticale est exploitée pour produire de l'énergie
- ✓ La machine est ancrée au sol
- ✓ Technologie nearshore, pour faibles profondeurs(30-40m)



Figure (2.8):Prototype du Systèmes Oscillants CETO Ref: [21]

#### 4-2-5 Systèmes oscillants (translation) flottants

##### Caractéristiques :

- ✓ Structure flottante qui absorbe l'énergie des vagues dans toutes les directions
- ✓ L'énergie est générée par les mouvements du corps
- ✓ Différents systèmes de conversion ont été proposés
- ✓ Technologie nearshore ou offshore

Le constructeur américain Océan Power Technologie s'est installé en 2011 un pilote de 150 kW à proximité de la côte Nord-Est de l'Écosse. Cette technologie « PowerBuoy », de type flotteur ponctuel, a été mise à l'eau avec succès durant une période de six mois[21].



**Figure (2.9):**Système Power Buoy (Ocean Power Technologies)Ref: [21]

#### 5 Énergie des courants

Les projets les plus nombreux pour convertir l'énergie cinétique des courants de marées ou des courants océaniques en électricité sont des projets d'hydroliennes, dispositifs équivalents aux éoliennes en milieu sous-marin. D'autres technologies de convertisseurs existent : turbines à axe vertical, profils oscillants... A l'image du secteur éolien, les dispositifs sont prévus pour être modulaires (quelques MW) et déployés sous forme de « fermes » à l'échelle commerciale[20].

En octobre 2011, le prototype d'hydrolienne « Arcouest » (500 kW), de technologie Irlandaise OpenHydro, a été immergé en Bretagne pour le compte d'EDF [20].

L'avantage de cette énergie est qu'elle s'appuie sur une ressource continue dans le cas des courants océaniques et fortement prédictible pour les courants de marée. De plus, les installations sont immergées, ce qui limite la pollution visuelle et sonore.

Les sites éligibles sont très spécifiques : une vitesse de courant minimale de 2,5 m/s est nécessaire pour permettre une production d'électricité significative grâce à une hydrolienne.

La ressource est localisée là où les courants sont les plus forts. La vitesse des courants de marée peut être accélérée dans certaines zones par la configuration de la côte (singularités bathymétriques, effet d'entonnoir dans un estuaire, réflexion aux abords d'une péninsule...). En France, le littoral de la Bretagne et celui de la Normandie possèdent plusieurs sites où les courants atteignent des vitesses importantes



**Figure (2.10):** Hydrolienne(OpenHydro)Ref: [20]

## 6Énergie thermique des mers (ETM)

L'Énergie Thermique des Mers exploite, au sein d'un cycle thermodynamique classique, la différence de température entre l'eau chaude de surface disponible dans certaines parties du globe (entre 25 et 30°C) et l'eau froide des profondeurs (environ 4°C à partir de 800m). Grâce à ces sources thermiques, un fluide de travail est

successivement condensé puis vaporisé pour actionner une turbine reliée à un alternateur qui produit de l'électricité. Le système n'est pertinent que si la différence de température entre les deux sources d'eau est supérieure à 20°C, la zone intertropicale est donc la plus propice pour le développement de ce type d'énergie [20].

Des prototypes de centrales ETM ont été testés dès les années 1970, mais face à des obstacles technologiques et économiques, les efforts de R&D ont été abandonnés suite au contrechoc pétrolier. Récemment, un regain d'intérêt pour ce type d'énergie est observé dans plusieurs pays européens et autre-Atlantiques.



**Figure (2.11):**Prototype ETM à terre Ref: [20].

La DCNS, en partenariat avec le Conseil Régional de la Réunion, a construit en 2011 un prototype à échelle réduite (1/150) de centrale ETM à terre. L'entreprise mène également des études de faisabilité pour des centrales pilotes à Tahiti et en Martinique. L'avantage majeur de l'ETM réside dans son caractère non-intermittent. Cependant, il reste des défis à relever, notamment concernant le design des échangeurs thermiques en milieu marin et celui de la longue canalisation d'eau froide (800 m) de grand diamètre (environ 5 m). Au-delà de la production d'électricité, l'ETM permet également de produire du froid, de l'eau douce ou de favoriser l'aquaculture.

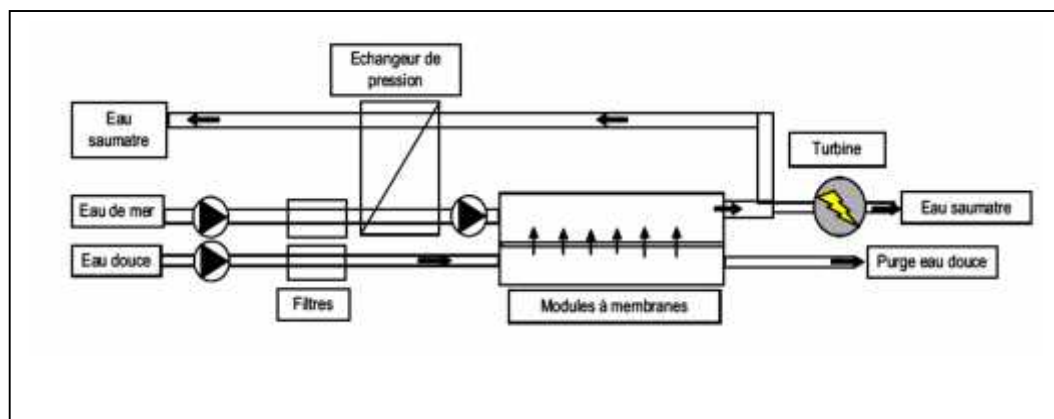
## 7 Énergie osmotique

La conversion de l'énergie osmotique en électricité est basée sur la différence de concentration du sel entre deux solutions aqueuses séparées par une membrane. Dans la technologie PRO (Pressure Retarded Osmosis), l'eau douce migre à travers une membrane semi-perméable vers le compartiment de l'eau salée, ce qui crée une surpression dans ce dernier. Ce flux d'eau sous pression permet d'actionner une turbine hydraulique, reliée à un alternateur.

L'énergie osmotique est encore très peu mature, et seul le groupe Norvégien Statkraft a construit en 2009 une centrale pilote de quelques kW en Norvège.



**Figure (2.12):** Prototype de centrale osmotique (Statkraft) Ref: [20]



**Figure (2.13):** Principe d'une centrale osmotique Ref: [22 ]

Il existe d'autres concepts que la technologie PRO pour l'exploitation de cette énergie la technologie RED (Reverse Electro Dialysis) sur laquelle travaille la société Néerlandaise Wetsus ou encore la technologie VDPU (Vapour Pressure Différence Utilisation). Aucun projet de démonstration n'a encore été réalisé à ce jour sur ces technologies.

Tout comme l'ETM, l'avantage majeur de ce type d'énergie réside dans son caractère non-intermittent. Cependant, le rendement des membranes est un point critique qui nécessite encore beaucoup de recherche.

### **8 Énergie éolienne offshore (structures flottantes)**

Les structures flottantes permettent d'élargir la gamme des sites potentiels pour l'énergie éolienne offshore. En effet, alors que les éoliennes posées sur le sol marin sont limitées à une profondeur d'eau de 30 à 50 m, les structures flottantes peuvent être installées dans des profondeurs allant actuellement jusqu'à 200 m. Les technologies des systèmes de flottaison sont empruntées au secteur pétrolier : TLP1, plate-forme semi-submersible, Spar... Le fonctionnement de la partie turbine est exactement le même que pour les éoliennes à terre.

L'entreprise Norvégienne Statoil a installé le premier démonstrateur à l'échelle commerciale « Hywind » (2,3 MW) en 2010 le long des côtes Norvégiennes, dans une profondeur d'eau de 200 m.

Les éoliennes flottantes peuvent être installées dans des zones où le fond marin plonge soudainement, y compris à faible distance de la côte comme en France. D'autre part, elles offrent la perspective de pouvoir s'éloigner des côtes, impliquant une meilleure productivité grâce à une ressource en vent plus importante et plus constante. Cet éloignement permet une réduction des conflits d'usages et de la pollution visuelle par rapport aux éoliennes précédents.

#### **8-1 Conditions du développement futur**

La nécessité industrielle de réaliser des fermes de grande puissance pour atteindre des coûts acceptables entraîne un besoin important de financement. Les projets éoliens offshore sont des projets ambitieux qui mettent en jeu de grosses sommes d'argent.

Les investisseurs et les organisations bancaires qui s'engagent pour une longue durée (environ 20 ans) ont avant tout besoin d'une bonne visibilité sur la rentabilité à terme des projets. La signature de contrats de rachat de l'énergie à des tarifs suffisants et garantis est essentielle pour que les projets soient lancés.



**Figure (2.14):** Eolienne flottante (Hywind)Ref: [22]

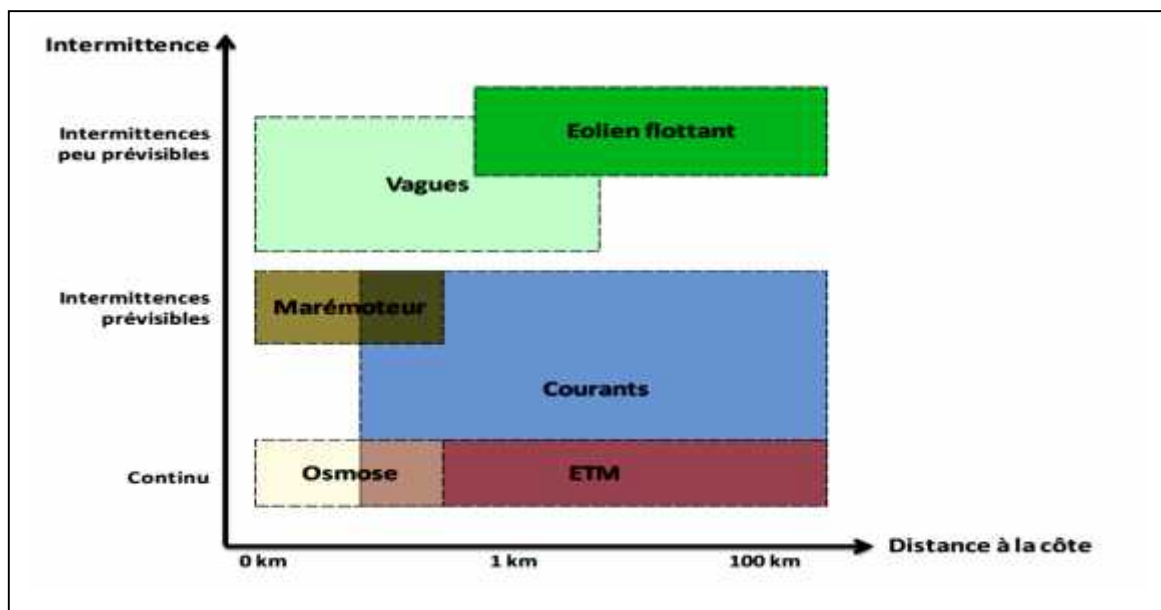
### 9- Comparaison des énergies marines

Les énergies marines renouvelables présentent des caractéristiques techniques propres qui diffèrent selon les technologies considérées :

- ✓ **Le caractère continu ou intermittent** de la ressource, et dans ce dernier cas son degré de prévisibilité
- ✓ **La distance à la côte**
- ✓ **La profondeur d'eau**

La distance à la côte et la profondeur d'eau reflètent l'accessibilité du système et donc les coûts d'installation et de maintenance, ainsi que les coûts de transport d'électricité. En revanche, du point de vue de l'acceptabilité sociale, une grande distance à la côte est un atout. Distance et profondeur ne sont pas toujours corrélées, citons

par exemple le littoral atlantique espagnol, où la profondeur augmente très rapidement avec l'éloignement des côtes. A l'inverse, le plateau de la mer du Nord assure une profondeur d'eau modérée sur de grandes distances. La figure (2.15) positionne les types d'énergies marines selon leur intermittence et distance à la côte typiques. L'énergie osmotique, l'ETM ou les courants océaniques permettent de fournir une production continue d'électricité, véritable atout dans le secteur des énergies renouvelables. La production d'électricité basée sur l'énergie des marées (marémotrice et courants de marées) est intermittente mais bien plus prédictible que celle provenant du vent. Sur certains sites, la ressource naturelle peut être insuffisante par rapport aux capacités des technologies actuellement déployées ; le niveau de ressource minimal propre à chaque type d'énergie marine est détaillé tableau 1. A l'inverse sur d'autres sites, l'accessibilité peut être limitée car l'abondance de la ressource (fortes vagues ou courants) ne permet pas l'installation ou la maintenance dans des conditions de sécurité satisfaisantes.



**Figure (2.15):**Cartographie des types d'énergies marines selon leur intermittence et leur distance à la côte Ref: [20]

### 10-Des nombreuses solutions, des stades de développement variés

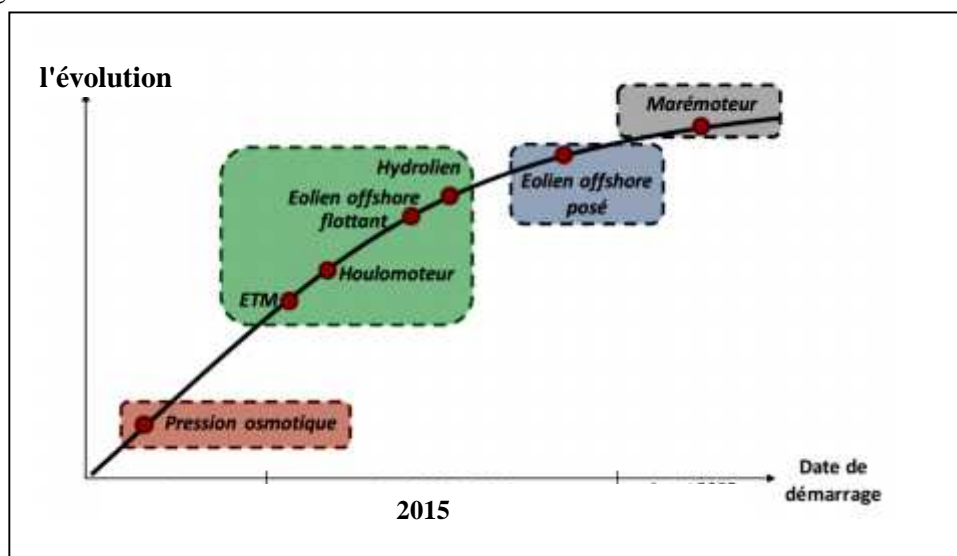
A l'exception de l'énergie marémotrice qui alimente déjà la France et la Corée du Sud en électricité, le secteur des énergies marines renouvelables est globalement à un stade de développement émergent.

L'énergie marémotrice a fait ses preuves depuis de nombreuses années, mais au vu des impacts environnementaux, les perspectives de développement sont très faibles. Le secteur hydrolienne, suivi de près par l'éolien offshore flottant, est à un degré de maturité relativement avancé : des démonstrateurs à taille réelle sont actuellement installés en mer. Les hydroliennes et les éoliennes flottantes se basent sur des concepts éprouvés et sur des technologies déployées par de grands groupes industriels dans d'autres secteurs (éolien à terre et structures flottantes du secteur pétrolier offshore pour les éoliennes flottantes, éolien à terre et turbines hydrauliques pour les hydroliennes). Leur évolution suit celle du secteur éolien avec une quinzaine d'années de retard, ce qui laisse présager un déploiement commercial dans les années à venir.

L'énergie des vagues est à un stade de développement moins avancé. Il existe un foisonnement de technologies très variées. Les projets sont menés de manière individuelle par des start-up ou des laboratoires de recherche, et si les technologies développées sont très innovantes, elles nécessitent encore des efforts de R&D afin d'en valider les concepts.

Bien qu'ayant fait l'objet de travaux de recherches et de prototypes dans les années 1970, la construction de centrales ETM de taille conséquente se heurte actuellement à des verrous technologiques importants.

Enfin, l'énergie osmotique est la moins mature des énergies marines. Quelques programmes de recherche existent à travers le monde mais le développement de cette énergie en est encore à ses balbutiements.



**Figure (2.16):** L'évolution des énergies marines, d'après France Energies Marines Ref:

[20]

**11-Conclusions:**

On comprend alors l'intérêt primordial d'étoffer les connaissances théoriques sur la dynamique marine et les interactions qui agissent autour de tous ces domaines. La modification du milieu naturel n'étant jamais sans conséquences, elle doit être soigneusement évaluée pour que son impact sur l'environnement soit minimisé. D'où l'intérêt d'une étroite collaboration et d'une synergie harmonieuse entre les différents chercheurs et acteurs du domaine maritime.

La mer est riche en énergies renouvelables, d'origine thermique et mécanique. Leur exploitation ne génère pas de gaz à effet de serre et est compatible avec les obligations du développement durable. La conquête de ces ressources a déjà commencé et le potentiel est immense.

Mais l'électricité produite est souvent fluctuante et plus ou moins bien prédictible, ce qui engendre des externalités économiques (besoin d'autres moyens de production capables de répondre à la demande et de moyens de stockage) et une gestion spécifique de l'énergie produite.

Aujourd'hui toutes les filières affichent des coûts qui paraissent encore élevés, mais qui seront compétitifs demain, surtout si le prix des énergies fossiles augmente dans le futur, et si le coût de l'émission de carbone était inclus dans ce prix.

Pour que l'exploitation de ces énergies soit possible, il est nécessaire d'interagir avec le milieu marin. Les effets environnementaux doivent être systématiquement étudiés. Les interactions avec les autres usages de la mer doivent aussi être explorées, et la concertation à tous les niveaux est indispensable pour repartir au mieux les nouvelles contraintes qui pourraient apparaître. Notons simplement que les diverses activités professionnelles en mer ne s'excluent pas nécessairement les unes les autres, mais qu'une cohabitation sur les zones identiques est souvent possible.

Chapitre 3

# MODELISATION MATHÉMATIQUE

## 1. Introduction :

Ce chapitre début par une présentation des équations mathématiques retrouvées en mécanique des fluides (les équations de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie) et nous présenterons les équations de Navier-Stokes. En suite nous ouvrirons un résumé de la modélisation de la turbulence et les conditions frontières et une section décrivant les grandeurs d'intérêts qui sont utilisées a la fin, par la suite nous présenterons la méthode du volume fini et les différents méthodes de traitement d'interface, spécifiquement la méthode VOF (Volume Of Fluid). On finirons ce chapitre par une revue de littérature générale pour les différent modèles vagues et une conclusion.

## 2 Modélisation mathématique

En mécanique des fluides numérique, on cherche à étudier le mouvement et les forces associées à un écoulement par la résolution d'un système d'équations. La résolution de ces équations est nécessaire, dans la majorité des cas, certaines approximations qui sont en général le résultat d'un compromis entre les besoins de représentation physique et les ressources de calcul disponibles. Dû à ces approximations, il existe plusieurs méthodes pour étudier numériquement l'écoulement diphasique. la méthodologie employée dépend de ce que l'on cherche à investiguer et du niveau de précision désiré. Il est donc important de bien connaître les limites des différentes approches afin d'en faire usage adéquatement.

### 2-1 Formulation générale

De façon générale, les équations de la mécanique des fluides sont basées sur les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. L'écoulement. Ceci a comme conséquence que l'équation de l'énergie est découplée des équations de continuité et de quantité de mouvement, c'est-à-dire qu'on peut déterminer la vitesse et la pression indépendamment de l'équation de l'énergie. Dans ce cas, les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement sont suffisantes pour décrire le comportement de l'écoulement.

- ✓ **l'équation de conservation de la masse:**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (3-1)$$

- ✓ **l'équation de conservation de la quantité de mouvement:**

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} = \mathbf{f} + \nabla \cdot \mathbf{T} - \rho \mathbf{u} \mathbf{u} = 0 \quad (3-2)$$

- ✓ **l'équation de conservation de l'énergie:**

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left( e + \frac{1}{2} u^2 \right) = - \nabla \cdot \left( \rho \mathbf{e} + \frac{1}{2} u^2 \mathbf{u} - \mathbf{T} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{q} + \mathbf{u} \cdot \mathbf{f} \right) \quad (3-3)$$

## 2-2 Équations de Navier-Stokes

L'équation de la conservation de la quantité de mouvement provient de l'application de la deuxième loi de Newton appliquée au contexte des milieux continus. Pour des fluides comme l'air et l'eau, on pose l'approximation que le tenseur des contraintes visqueuses est proportionnel à la partie symétrique du tenseur des taux de déformation. Les fluides pour lesquels cette hypothèse est valable sont nommés fluides newtoniens. Comme seconde hypothèse, On obtient donc les équations de Navier-Stokes, qui sont les équations aux dérivées partielles non linéaires qui gouvernent le mouvement du fluide. Les équations de Navier-Stokes, en notation indicielle dans un repère cartésien, s'écrivent comme suit :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial \xi_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_s}{\partial \xi_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial \xi_j \partial \xi_j} \quad (3-4)$$

où  $u_i$  représente les composantes de vitesse et  $\xi_i$  les directions des coordonnées. Les indices  $i$  et  $j$  peuvent être de valeurs 1, 2 et 3. Le premier terme de la partie de gauche de l'équation représente l'évolution temporelle. Ce dernier est nul dans un écoulement en régime permanent. Le second terme de gauche est le terme convectif. Ce dernier est responsable de la non-linéarité des équations de Navier-Stokes et entraîne la turbulence. Le premier terme de la partie de droite de l'équation provient de la force causée par la pression, alors que le second terme représente la force de viscosité moléculaire qui traduit la résistance du fluide à la déformation. Les termes de gauche sont donc associés à l'inertie qui est compensée par les termes de droite qui représentent les forces.

Dans un espace à trois dimensions, on compte trois équations associées au modèle de Navier- Stokes. Il y a cependant quatre inconnues, soit les trois composantes de

vitesse  $u_i$  et la pression  $p_s$ . En effet, on pose la densité du fluide  $\rho$  et la viscosité cinématique du fluide  $\nu$  comme étant connues. On ajoute donc une seconde équation, soit l'équation de la continuité qui décrit la conservation de la masse. Cette équation stipule que la masse ne peut être créée ni détruite à l'intérieur d'un volume de contrôle. Pour un fluide incompressible et isotherme, l'équation de continuité, en notation vectorielle, dans un repère cartésien, s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial u_i}{\partial \xi_j} = 0 \quad (3-5)$$

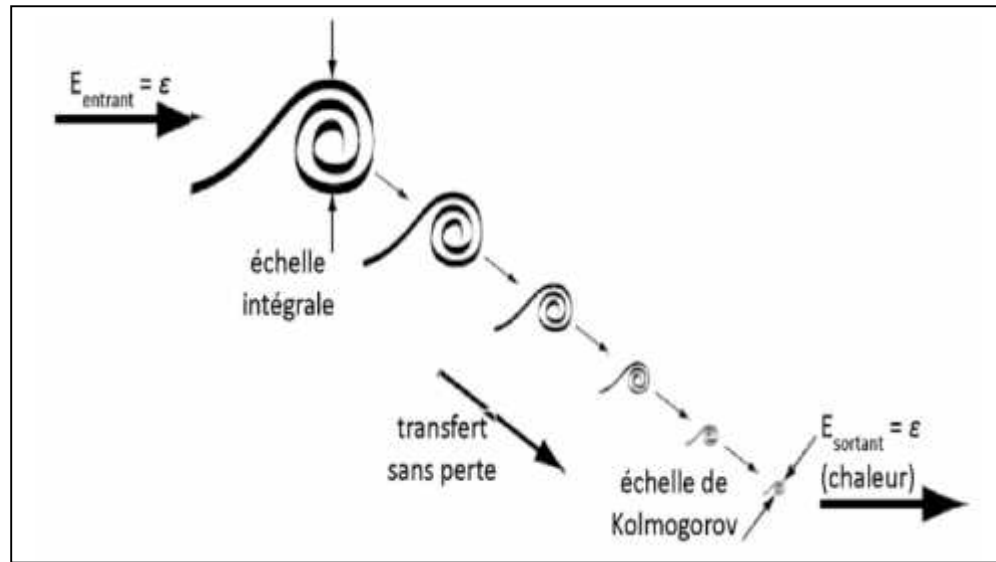
### 3 Nature de la turbulence

À ce jour, il n'existe pas de définition précise de ce qu'est la turbulence. On connaît cependant plusieurs de ses caractéristiques. Les écoulements turbulents sont irréguliers dans le temps et dans l'espace. Leur comportement semble être d'allure aléatoire et chaotique. Deux points de vue cohabitent à l'égard de la simulation de la turbulence. Il y a ceux qui tentent de modéliser la turbulence à l'aide d'outils statistiques négligeant donc tout niveau d'organisation au sein de l'écoulement turbulent et ceux qui considèrent une certaine cohérence dans le chaos turbulent et appuient l'idée que ce phénomène est très complexe, mais déterministe.

La turbulence est un phénomène tridimensionnel. De plus, la turbulence est une propriété de l'écoulement et non du fluide. Il est important de préciser que le nombre de Reynolds associé à l'écoulement au sein d'une onde hydrodynamique, ce qui signifie que l'écoulement étudié dans ce projet est turbulent. Après avoir énuméré quelques caractéristiques de la turbulence et avant de présenter les différentes façons de la modéliser, on s'attarde sur quelques concepts théoriques associés à la turbulence sur lesquels se basent les approches de modélisation.

L'idée classique de ce qu'est la turbulence repose sur une cascade de tourbillons couvrant une vaste gamme d'échelle de grandeur [23]. La Figure (3-1) illustre le concept de la cascade de tourbillons. Il y a les plus grosses structures que l'on nomme échelle intégrale. Celles-ci sont de dimension comparable à la région turbulente, comme le diamètre d'un tuyau ou l'épaisseur d'une couche limite. Ces gros tourbillons possèdent la plus grande quantité d'énergie cinétique turbulente  $k$ . Ceux-ci se brisent pour donner naissance à de plus petits tourbillons qui se briseront à leur tour pour donner de nouveaux plus petits tourbillons. Ce processus se poursuit jusqu'au moment où les forces visqueuses appliquées sur les tourbillons deviennent

plus importantes que les forces inertielles des tourbillons. À cette échelle, la diffusion visqueuse dissipe l'énergie des tourbillons. L'énergie dissipée sous forme de chaleur et provenant des petites structures dissipatives est notée  $s$ , soit le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente. La taille des structures pour laquelle les effets visqueux ont de l'importance est nommée l'échelle de Kolmogorov.



**Figure 3-1** Schéma de la cascade d'énergie avec les différentes échelles de la turbulence Ref: [23]

### 3-1 Les approches de modélisation

#### 3-1-1 L'approche DNS (Direct Numerical Simulation):

consiste à résoudre directement les équations présentées à la section précédente. On comprend que l'on doit alors résoudre toutes les échelles du mouvement turbulent : de l'échelle intégrale à l'échelle de Kolmogorov. À ce jour, cette technique est impensable dans les écoulements turbulents industriels. Un écoulement turbulent à haut nombre de Reynolds nécessite une discrétisation temporelle et spatiale dépassant la puissance informatique actuelle.

#### 3-1-2 L'approche LES (Large Eddy Simulation):

utilise le maillage afin de filtrer les échelles dissipatives isotropes et simule les échelles inertielles. Ainsi, les structures de dimension de l'échelle intégrale sont résolues à l'aide des équations présentées à la section 2-2, alors que les structures plus petites que les cellules du maillage sont représentées par un modèle de turbulence. L'idée est que les grosses structures de l'écoulement possèdent la grande majorité de l'énergie turbulente. Elles ont donc beaucoup plus d'effet sur

l'écoulement que les petites structures de l'ordre de l'échelle de Kolmogorov. L'approche LES demande un coût de calcul moins élevé que l'approche DNS. Cependant, le LES est peu répandu dans le domaine de l'ingénierie étant donné sa demande informatique encore trop gourmande pour les ordinateurs actuels dans le cas d'écoulements industriels. Cette approche est utilisée principalement en recherche.

### 3-1-3 L'approche RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes):

nécessite un coût de calcul beaucoup moins élevé que celui demandé par les approches DNS et LES. Cette approche, introduite dans les années 80, est la plus utilisée afin d'analyser les écoulements industriels comme . Avec cette approche, toutes les échelles de la turbulence sont modélisées avec l'emploi d'un modèle de turbulence.

Comme il a été mentionné à la section précédente, la turbulence est un phénomène irrégulier dans le temps. On divise donc le mouvement en deux pour les modèles RANS, soit la composante moyenne et la composante fluctuante. Cette décomposition appliquée au champ de vitesse et de pression est appelée la décomposition de Reynolds

$$\bar{u}_i = U_i + \hat{u}_i \text{ et } \bar{p}_s = P_s + \hat{p}_s \quad (3-6)$$

où  $U_i$  et  $P_s$  sont les composantes moyennes, alors que  $\hat{u}_i$  et  $\hat{p}_s$  sont les fluctuations. Les composantes moyennes sont données par :

$$U_i = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} u_i dt \text{ et } P_s = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} p_s dt \quad (3-7)$$

où  $\Delta t$  est une échelle de temps plus grande que l'échelle de temps des fluctuations. La substitution des expressions (3-6) dans l'équation de continuité et de Navier-Stokes, montrées à la section 2-2, donne les équations du mouvement moyen, aussi appelées les équations de Reynolds :

$$\frac{\partial U_i}{\partial \xi_i} = 0 \quad (3-8)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial \xi_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_s}{\partial \xi_i} + \frac{\partial}{\partial \xi_j} \nu \frac{\partial U_i}{\partial \xi_j} + \tau_{ij} \quad (3-9)$$

où  $\tau_{ij} = -\overline{\hat{u}_i \hat{u}_j}$ . On voit donc que l'équation de continuité ne dépend que des valeurs moyennes, alors que l'équation de la conservation de la quantité de mouvement ajoute le tenseur de Reynolds  $\tau_{ij}$ . Ce terme provient du produit croisé associé aux fluctuations une fois moyennées. Le tenseur de Reynolds représente

l'effet de la turbulence sur l'écoulement moyen. Il devient donc fondamental à la modélisation de la turbulence.

L'inconvénient de l'approche RANS est que le système est désormais ouvert, car on ne connaît pas la valeur de  $\tau_{ij}$ . Un modèle de turbulence est donc nécessaire afin de modéliser  $\tau_{ij}$  et de fermer le système d'équations à résoudre. Le problème est qu'il est difficile de construire un modèle de turbulence universel. Ainsi, il existe une vaste gamme de modèles qui ont chacun leurs particularités et peuvent bien fonctionner pour un certain type d'écoulement, mais échouer dans leurs prédictions pour d'autres cas d'écoulement. Il revient donc à l'utilisateur de connaître les limites de chacun des modèles de turbulence.

#### 4 Modèles de la turbulence

Comme il a été mentionné précédemment, l'utilisation de l'approche RANS nécessite l'emploi d'un modèle de turbulence afin de fermer le système d'équations à résoudre, soit déterminer la valeur du tenseur de Reynolds  $\tau_{ij}$ . Il existe deux grandes familles de modèles de turbulence :

- ✓ les modèles différentiels RSM (Reynolds Stress Model).
- ✓ les modèles utilisant la viscosité tourbillonnaire.

##### 4-1 Modèles différentiels (RSM)

Ces modèles de turbulence sont basés sur le fait que chacune des composantes de  $\tau_{ij}$  sont déterminées à l'aide d'une équation de transport. Cependant, quelques termes au sein des équations de transport doivent à leur tour être modélisés, soit le terme de diffusion, de pression-déformation et de dissipation. La justesse des modèles RSM, et ce qui les différencie entre eux, dépend surtout de la façon dont est modélisé le terme de pression-déformation. Par l'ajout d'équations de transport à résoudre, ces modèles de turbulence nécessitent plus temps de calcul que les modèles de turbulence basés sur la viscosité tourbillonnaire décrits à la prochaine section [24].

##### 4-2 Modèles à viscosité tourbillonnaire

En se basant sur l'analogie entre le mouvement moléculaire et le mouvement turbulent, Boussinesq fait l'hypothèse, en 1877, qu'il existe une relation directe entre les tensions turbulentes (les composantes de  $\tau_{ij}$ ) et les vitesses moyennes. Initialement, ce dernier avait élaboré pour une seule composante du tenseur, mais

cette hypothèse a été généralisée à tout le tenseur, comme le montre l'expression suivante :

$$\tau_{ij} + \frac{2}{3}k\delta_{ij} = \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial \xi_j} + \frac{\partial u_j}{\partial \xi_i} \right) \quad (3-10)$$

où  $\delta_{ij}$  est le delta de Kronecker et  $\nu_t$  la viscosité tourbillonnaire. Cette équation fait aussi apparaître l'énergie cinétique turbulente  $k$ , qui est la demi-trace du tenseur de Reynolds. Pour que cette expression soit valide, il faut que l'écoulement soit en équilibre local. Ceci signifie que la production et la dissipation de l'énergie turbulente sont prépondérantes comparativement à la convection et la diffusion, ce qui ne semble pas valide dans bien des écoulements [25].

La relation entre le tenseur de Reynolds et les vitesses moyennes fait apparaître deux nouvelles variables, soit  $\nu_t$  et  $k$ . Les modèles de turbulence à viscosité tourbillonnaire doivent donc déterminer ces deux nouvelles variables sans ajouter d'autres inconnues au problème. Connaissant celles-ci, on obtient donc le tenseur de Reynolds servant à fermer le système d'équations RANS.

#### 4-3 Traitement de la paroi

Le traitement de la zone près de la paroi est très important dans la simulation numérique des écoulements turbulents. Il y a deux façons de résoudre cette zone de l'écoulement :

- ✓ résoudre les équations RANS et le modèle de turbulence jusqu'à la paroi, ce qui nécessite un maillage très fin à la paroi engendrant un coût de calcul élevé.
- ✓ Ne pas résoudre le modèle mathématique jusqu'à la paroi et poser l'hypothèse que le comportement de l'écoulement près de celle-ci suit une loi empirique que l'on nomme loi de paroi. Ceci diminue donc grandement la taille du maillage.

Par une analyse des ordres de grandeur dans un écoulement turbulent cisailé libre [26], il est possible de montrer qu'une relation existe entre  $u^+$  et  $y^+$  à proximité de la paroi. Les variables de paroi associées à la vitesse et à la distance par rapport à la paroi s'expriment comme :

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} \quad \text{et} \quad y^+ = \frac{y}{\nu / u_\tau}$$

où  $U$  représente la norme de la vitesse à la distance  $y$  de la paroi. Ces variables utilisent la vitesse de frottement  $u_\tau$  qui dépend du frottement pariétal  $\tau_w$  :

$$\overline{u_\tau} = \frac{\overline{\tau_w}}{\rho}$$

#### 4-4 Le modèle (K- $\nu$ )

En 1972, ce modèle a été proposé par Jones & Launder [27]. Comme il a été expliqué à la section 3-1-3, la fermeture des équations RANS utilisant l'hypothèse de Boussinesq nécessite de déterminer l'énergie cinétique turbulente  $k$  et la viscosité tourbillonnaire  $\nu_t$ . Ce modèle de turbulence propose de déterminer  $k$  et  $\varepsilon$  à l'aide de deux équations de transport. La viscosité tourbillonnaire  $\nu_t$  est déduite d'une combinaison de ces deux dernières variables. Les équations du modèle sont les suivantes :

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3-11)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial \xi_j} = P_k + \frac{\partial}{\partial \xi_j} \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial \xi_j} - \varepsilon \quad (3-12)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{P_k}{\varepsilon} - C_{\varepsilon 2} \varepsilon + \frac{\partial}{\partial \xi_j} \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi_j} \quad (3-13)$$

$$P_k = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial \xi_j} \quad (3-14)$$

Ce système est fermé à l'aide des constantes empiriques ( $C_\mu = 0.09$ ), ( $\sigma_k = 1$ ), ( $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ), ( $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ) et ( $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ) rendant ce modèle performant pour une vaste gamme d'écoulements. Comme mentionnée ci-haut, la résolution dans la couche limite nécessite l'utilisation d'une loi de paroi étant donné que ce modèle de turbulence n'est plus valide très près des parois.

## 5 Résolution numérique

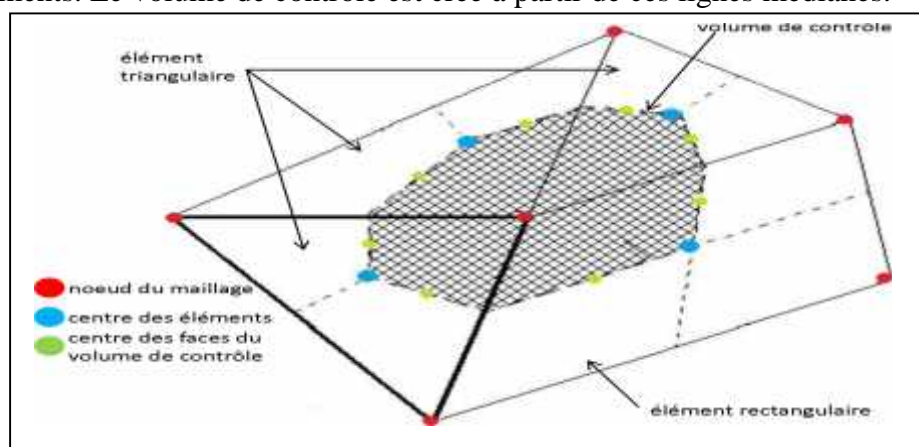
### 5-1 La Méthode des volumes finis

Le modèle mathématique regroupant les expressions présentées à la section précédente ne possède pas de solution analytique sauf pour quelques cas d'exceptions d'écoulements triviaux. Il est impensable d'obtenir une solution analytique au sein d'une onde hydrodynamique. On résout donc le modèle mathématique par la discrétisation du domaine de calcul permettant ainsi une linéarisation des équations formant un système d'équations algébriques simples. Bien sûr, la précision de la solution dépend alors de la qualité de cette discrétisation. Il est à noter que les calculs réalisés dans ce projet sont en régime in-stationnaire.

La méthode des volumes finis est utilisée afin de résoudre numériquement les équations présentées à la section précédente. Cette méthode est conservative et donc parfaitement adaptée à la résolution des lois de conservation. De plus, la formulation mathématique de cette méthode ne tient aucunement compte de la complexité du maillage. Ainsi, cette méthode est facilement utilisable dans des géométries complexes nécessitant des maillages non structurés. Pour finir, les codes commerciaux, dont le plus populaire est ANSYS CFX, utilisent davantage la méthode des volumes finis.

ANSYS CFX est un logiciel commercial de CFD (Computational Fluid Dynamics) utile pour une vaste gamme d'applications. Il met en œuvre la méthode des volumes finis afin de résoudre les équations de conservation utilisées en mécanique des fluides. Contrairement à d'autres codes de calcul, celui-ci utilise une approche couplée entre les trois composantes de vitesse et la pression, c'est-à-dire qu'il résout le champ de vitesse et le champ de pression simultanément. Ceci a l'avantage d'être plus robuste numériquement et plus général, mais demande davantage d'espace mémoire.

L'information de vitesse et de pression est enregistrée aux nœuds du maillage. Un volume de contrôle est créé autour de chacun des nœuds du maillage. Afin de simplifier la présentation et sachant que la méthode qui suit s'applique aussi dans un espace tridimensionnel, la Figure 3-2 montre une partie d'un maillage bidimensionnel contenant des éléments triangulaires (3 nœuds) et des éléments rectangulaires (4 nœuds). Des lignes médianes sont créées afin de déterminer le centre de chacun des éléments. Le volume de contrôle est créé à partir de ces lignes médianes.



**Figure 3-2** :Schématisation de la discrétisation spatiale pour la méthode des volumes finis

Ref [24]

Les équations présentées à la section précédente sont intégrées sur chacun des volumes de contrôle. À l'aide du théorème de la divergence de Gauss, les intégrales de volumes contenant l'opérateur gradient sont transformées en intégrale de surface. Pour un écoulement incompressible et isotherme, l'équation de conservation et de Navier-Stokes s'exprime donc comme suit sous forme intégrale :

$$\int_0^s u_i dn_j = 0 \quad (3-15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^v u_i dV + \int_0^s u_i u_j dn_j = - \frac{1}{\rho} \int_0^s p dn_j + \nu \int_0^s \left( \frac{\partial u_i}{\partial \xi_j} + \frac{\partial u_j}{\partial \xi_i} \right) dn_j \quad (3-16)$$

où  $V$  et  $S$  sont respectivement le volume et la surface du volume de contrôle. La variable  $dn_j$  est le vecteur normal à la surface du volume de contrôle. Les intégrales de surface représentent la sommation des flux sur chacun des volumes de contrôle. Ces flux sont évalués aux interfaces entre les volumes de contrôle et donc aux points verts sur la Figure 3-2. On utilise une interpolation entre les volumes de contrôle pour élaborer une approximation des flux aux interfaces ce qui transforme donc les intégrales de surface en expressions algébriques pouvant être résolues à l'aide d'un système matriciel.

Les intégrales de surface associées aux termes de pression et de diffusion utilisent les fonctions de formes provenant de la méthode des éléments finis afin de réaliser l'interpolation [24] Dans ANSYS CFX, ces fonctions sont linéaires. Le terme le plus sensible est le terme convectif, dont l'ordre du schéma d'interpolation utilisé s'avère donc d'une grande importance. l'intégrale de surface associée au terme de convection utilise l'expression suivante afin de réaliser l'interpolation :

$$\varphi_l = \varphi_{up,l} + \varphi_{m,l} \quad (3-17)$$

où  $\varphi_l$  est une valeur évaluée à un des points verts sur la Figure 3-2 , donc à l'interface entre deux volumes de contrôle;  $\varphi_{up,l}$  est une valeur évaluée sur un nœud «upwind», ce qui signifie près du point où est évalué  $\varphi_l$ , mais en amont de ce point dans le sens de l'écoulement;  $B$  est un facteur de mélange qui détermine l'ordre du schéma et il est spécifié par l'utilisateur du code;  $\varphi_{m,l}$  est la moyenne faite sur les nœuds adjacents au point où est évalué  $\varphi_l$  c'est le vecteur entre le point où est évaluée et le point où est évaluée . Lorsque la valeur du facteur de mélange est de zéro ( $B=0$ ), alors le schéma d'interpolation est d'ordre un. Il est donc très robuste numériquement, mais engendre beaucoup de diffusion numérique ce qui diminue la

précision. Le second terme de droite de l'expression ci-haut est perçu comme une correction diminuant l'effet de diffusion numérique apportée à un schéma du premier ordre. Lorsque le facteur de mélange est de valeur unitaire ( $B=1$ ), le schéma est formellement d'ordre deux. Augmenter l'ordre diminue habituellement l'erreur d'interpolation plus vite que le simple fait de raffiner le maillage. Cependant, cela augmente le temps de calcul et diminue la stabilité numérique, ce qui peut engendrer une divergence des résultats et donc rendre le système impossible à résoudre.

Finalement, les expressions algébriques linéaires sont résolues à l'aide d'une méthode **ILU (Incomplete Lower Upper)**. Celle-ci est une approche itérative très performante, mais ses performances diminuent rapidement lorsque la taille du maillage augmente et lorsque ce maillage possède des éléments avec un facteur de forme élevé. Pour cette raison, cette dernière méthode est couplée avec une approche **MG (Multigrid method)** qui consiste à effectuer quelques itérations de résolution sur le maillage original et ensuite de transporter les résultats sur un nouveau maillage plus grossier et d'effectuer d'autres itérations de résolution. Ce processus est fait sur plusieurs maillages de plus en plus grossiers et pour finir, l'information est transférée sur le maillage original. Cette méthode a l'avantage d'améliorer le taux de convergence de la solution. Il existe plusieurs approches MG, celle utilisée par ANSYS CFX est une méthode algébrique qui consiste tout simplement à fusionner plusieurs volumes de contrôle ensemble pour former les maillages grossiers.

## 6 Traitement d' interface

Les critères pour le choix d'une approche de la modélisation d'un écoulement diphasique à phase dispersée s'appuient essentiellement sur la précision des résultats attendus ainsi que sur les phénomènes physiques que l'on souhaite étudier. Un paramètre important dans ce choix, est le traitement de l'interface et donc dans ce cas une attention particulière doit être portée à la description des petites structures formées dans un écoulement diphasique. De manière générale, les écoulements diphasiques peuvent être modélisés à l'aide de deux types d'approches, dépendant du niveau de raffinement pour la description de l'interface entre les deux phases :

- ✓ l'approche globale ou modèle macroscopique, qui réunit toutes les méthodes basées sur la mécanique des milieux continus et qui ne permet pas d'identifier explicitement l'interface séparant les deux phases.

- ✓ l'approche locale ou modèle microscopique, dont l'objectif est de décrire précisément l'interface entre les deux phases à l'échelle microscopique. Dans la suite, nous détaillerons plus précisément différents modèles correspondant à ces deux approches. Néanmoins, comme décrit précédemment, c'est l'approche locale qui correspond le mieux à notre problématique, car nous souhaitons avoir une description précise du comportement de l'interface. Dans toutes les méthodes décrites ci-dessous le mouvement du fluide est représenté de façon Eulérienne.

### 6-1 Les Modèles microscopiques

L'objectif principal de l'approche locale ou modèle microscopique est de décrire précisément l'interface entre les deux phases. Il s'agit d'un type de modèle de simulation numérique directe pour traiter les écoulements diphasiques qui permet de prendre en compte la physique à l'échelle de l'interface. La qualité de la simulation des écoulements diphasiques dépendra de la capacité de la méthode choisie à décrire le comportement de l'interface le plus finement possible. Les techniques de calcul d'interface peuvent être très différentes selon le problème à résoudre. On distingue ainsi deux grandes classes de méthodes pour la description spatio-temporelle des interfaces.

- Les méthodes Lagrangiennes (méthodes de suivi d'interface).
- Les méthodes Eulériennes (méthodes de capture d'interface).

Dans la représentation Lagrangienne, on envisage la dynamique de particules sans masse et on restitue les trajectoires des particules (des marqueurs) en fonction de l'espace et du temps [28]. Des marqueurs transportés par le champ de vitesse locale, servent à localiser l'interface. Soit ils indiquent la présence ou l'absence d'un fluide (Marqueurs de volume - Marker And Cell method [29]), soit ces marqueurs ne sont définis que sur l'interface (Marqueurs de front[30],[31]).

Dans la représentation Eulérienne on envisage les variations dans le temps des caractéristiques de l'interface en des points fixes de l'espace [28]. Les méthodes Eulériennes sont caractérisées par l'utilisation d'un maillage fixe et l'interface est repérée grâce à la quantité scalaire qui est transportée par le champ de vitesse local. Plusieurs méthodes Eulériennes existent et se différencient par le choix de la quantité scalaire et la façon de reconstruire l'interface (Méthode VOF (Volume-Of- Fluid); Méthode Level-Set). Même si les méthodes Lagrangiennes possèdent souvent une précision supérieure aux méthodes Eulériennes elles souffrent de plusieurs

inconvenients. Par exemple, les marqueurs doivent être régulièrement redistribués dans le domaine de calcul pour éviter qu'ils s'accumulent dans certaines zones ou que la distance qui les sépare soit trop grande. De plus, les changements topologiques ne s'effectuent pas naturellement. Pour les rendre possibles, un critère arbitraire doit être imposé pour définir l'instant de la jonction ou de la séparation des interfaces. C'est certainement là le principal inconvénient de ces méthodes. Tous ces points limitent l'application des méthodes Lagrangiennes pour notre étude. La représentation Eulérienne est la plus commode en mécanique des fluides et elle est utilisée pour un grand nombre d'applications. Après une brève présentation des méthodes Lagrangiennes nous nous concentrerons sur les méthodes Eulériennes.

#### 6-1-1 La Méthodes Lagrangiennes

Comme nous l'avons déjà mentionné auparavant les méthodes Lagrangiennes sont basées sur l'utilisation de marqueurs. Pour ce type de méthodes, l'interface peut être repérée soit par des marqueurs qui indiquent la présence ou l'absence d'un fluide (volume tracking methods), soit par des marqueurs qui ne sont définis que sur l'interface et que l'on suit dans leur mouvement (front tracking methods).

#### 6-1-2 La méthode Marker et Cell (MAC method)

L'exemple le plus connu de l'approche volume tracking est la méthode MAC proposée par Harlow et Welch [29] en 1965 pour simuler un fluide incompressible ayant une surface libre. Le principe de cette méthode est le suivant : des marqueurs (ou des particules sans masse) sont placés dans l'écoulement pour repérer le mouvement de chacune des phases. D'après cette méthode les marqueurs sont positionnés dans tout le volume de l'une des phases que l'on souhaite suivre figure (3-3).

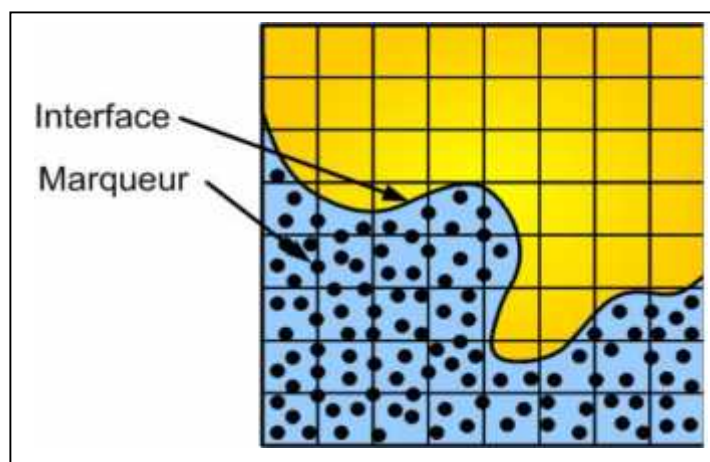
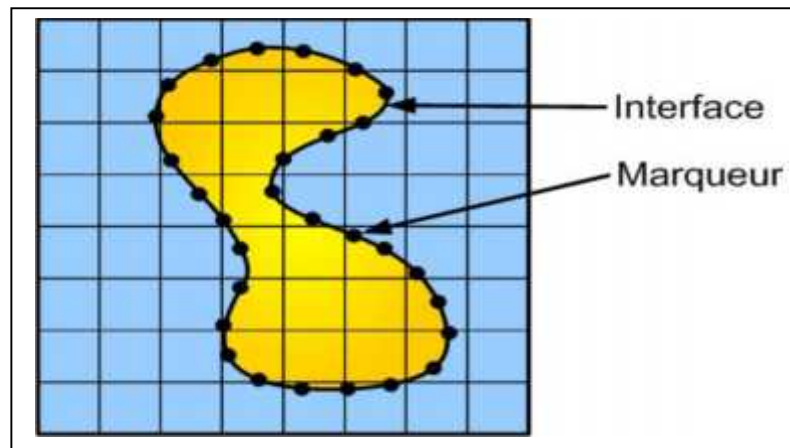


Figure 3-3 Schéma de la méthode MAC Ref: [32]

La méthode MAC fut pionnière dans le domaine de suivi d'interface, mais elle n'a pas été largement utilisée à cause de nombreuses difficultés. L'efficacité de la méthode peut être augmentée en mettant au départ plus de marqueurs dans les régions voisines des interfaces. Mais les interfaces sont malheureusement affectées par une diffusion numérique. De plus, le coût en mémoire et en temps de calcul que requièrent les très nombreux marqueurs limite ses applications.

### 6-1-3 La méthode de " Front tracking method "

En s'inspirant de la méthode MAC [33], Daly a proposé une nouvelle méthode de suivi d'interface [30] en 1968. Avec cette méthode les marqueurs sont distribués non pas dans le fluide mais sur l'interface elle-même. Les marqueurs sont connectés entre eux par des lois linéaires ou polynomiales et ils forment des chaînes ouvertes ou fermées (Figure. 3-4).



**Figure 3-4** Schéma de la méthode Front Tracking Ref: [32]

Le principal avantage de cette méthode est que la position de l'interface est connue instantanément et avec précision puisqu'elle est décrite à une échelle inférieure à celle de la maille associée aux grandeurs hydrodynamiques. Cependant, la méthode est sensible à l'écart que l'on a entre deux marqueurs. En effet, lorsque les particules sont trop espacées, le transport de l'interface manque de précision. De plus, cet écart n'est pas conservé au cours du calcul. Il est alors nécessaire d'ajouter ou d'enlever dynamiquement des particules durant la simulation. Pour le calcul de la courbure de l'interface, il est nécessaire que les particules soient bien réparties. Des difficultés apparaissent également avec la gestion des changements de topologie de l'interface, car il faut continuellement renuméroter et repositionner les marqueurs.

Enfin, la prise en compte des conditions aux limites est également difficile, en particulier si l'interface rencontre un bord du domaine.

## 6-2 La Méthodes Eulériennes

Pour les méthodes Eulériennes les équations d'évolution du fluide, ainsi que celles des interfaces, sont résolues sur un maillage fixe. Pour ce type de méthodes, l'interface est repérée grâce à la quantité scalaire transportée par le champ de vitesse local.

### 6-2-1 La méthode volume de fluide (Volume of Fluid VOF method)

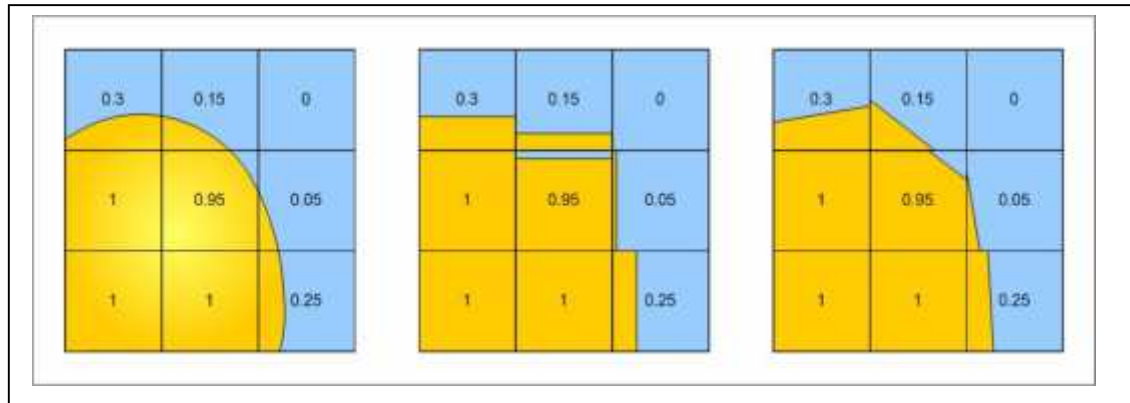
La méthode VOF a été introduite par Hirt et Nichols [34] en 1981. C'est la première méthode de suivi d'interface utilisant le concept de transport d'un champ scalaire qui ait été développée. Cette méthode, spécialement conçue pour la simulation d'écoulements diphasiques, est basée sur le principe de conservation de la masse.

#### • La fonction couleur

L'idée principale de la méthode VOF est d'utiliser un champ scalaire pour repérer les deux fluides. Ce champ scalaire s'appelle la fonction couleur  $C$ . Sa valeur varie entre 0 et 1. Cette fonction représente le volume occupé par le fluide dans une cellule de calcul. Ainsi, une maille pleine d'un fluide a la valeur 1 et une maille pleine de l'autre fluide la valeur 0. Si la valeur de la fraction volumique est comprise entre ces deux valeurs, cela indique la présence de l'interface. La fonction couleur  $C$  est advectée par le champ de vitesse local et est la solution de l'équation (3-18) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C = 0 \quad (3-18)$$

Après l'advection de la fonction couleur  $C$ , il faut reconstruire l'interface dans les mailles où  $C$  est compris entre 0 et 1. Des méthodes de reconstruction ont été développées pour améliorer la description et la localisation de l'interface. Une illustration de la méthode VOF et de deux principaux algorithmes de reconstruction est donnée sur la Figure 3-5.



**Figure 3-5** Principe de la méthode VOF; (à gauche) Interface réelle et fonction couleur associée ; (au milieu) Classe de méthodes SLIC pour reconstruire l'interface ; (à droite) Classe de méthodes PLIC pour reconstruire l'interface Ref: [32].

- **Les algorithmes de reconstruction.**

La méthode VOF SLIC (Simple Line Interface Calculation) de Noh et Woodward [35] fait partie des premières méthodes VOF développées. Dans cette méthode, l'interface est représentée dans chaque cellule du maillage à l'aide de segments de droite alignés avec l'une des directions du maillage. Cette représentation de l'interface dépend du sens de déplacement qui peut être suivant l'axe horizontal ou suivant l'axe vertical (Fig. 3.5 (au milieu)). La méthode SLIC est malheureusement insuffisante dans la pratique. Il est préférable de représenter l'interface par un segment de droite non nécessairement parallèle au maillage, comme sur la Fig. 3.5 (à droite), en utilisant la méthode VOF PLIC (Piecewise Linear Interface Calculation). Ces méthodes sont basées sur le calcul de la normale à l'interface, qui permet de définir la pente de ces droite [36],[37].

### 6-2-2 Level-Set method

La méthode Level-Set a été introduite par Osher et Sethian [38] en 1988. Son principe est de définir une fonction scalaire régulière à travers l'interface (fonction distance), dont la courbe de niveau zéro est l'interface que l'on cherche à décrire. La résolution de l'équation de transport, appliquée à cette fonction distance, permet de prédire les mouvements de l'interface dans un champ de vitesse donné. La méthode Level-Set prend en compte les changements topologiques naturellement. Elle permet également de calculer facilement les caractéristiques géométriques à partir de la fonction distance.

### 6-2-3 Méthodes mixtes

Les méthodes mixtes représentent sans doute le meilleur choix en terme de précision pour la modélisation d'une interface dans un écoulement diphasique. Ce type de méthode permet de combiner la finesse de résolution des méthodes Lagrangiennes avec la robustesse des méthodes Eulériennes.

En effet, les méthodes Lagrangiennes sont de loin les plus précises [39] puisque elles bénéficient d'une résolution inférieure à la maille. De leur côté, les méthodes Eulériennes effectuent le traitement de changements topologiques naturellement (méthode Level-Set).

À l'heure actuelle il existe plusieurs variantes de couplage parmi les différentes méthodes. Cependant, nous ne présentons dans cette partie du manuscrit que les méthodes qui nous semblent les plus prometteuses.

- ✓ Volume-of-Fluid Sub-Mesh (VOF-SM) method.
- ✓ Hybrid particle Level-Set method.

## 7 Littérature des théories des vague

On ne s'intéresse dans cette section qu'à la houle, initialement générée par le vent. La houle est un phénomène de propagation d'une perturbation depuis un endroit d'un milieu matériel à un autre, qui n'engendre pas de mouvement global du milieu lui-même. La propagation d'une perturbation se traduit par un transport d'énergie, à une vitesse qui n'est pas forcément identique à celle de la perturbation. Les hypothèses de base supposent donc un fluide parfait, isovolume. Pour une houle déjà formée, ne subissant plus les fluctuations de pression qui accompagnent le vent, les seules forces agissantes sont la gravité et la pression atmosphérique. Toutes deux sont constantes dans l'espace et dans le temps. Sous toutes ces hypothèses, les équations générales de la mécanique des fluides conduisent aux lois fondamentales qui régissent le mouvement ondulatoire de la houle.

Il y a plusieurs théories physiques pour les ondes hydrodynamique, on mentionne les plus importantes théories et sont qu'on utilise dans notre projet.

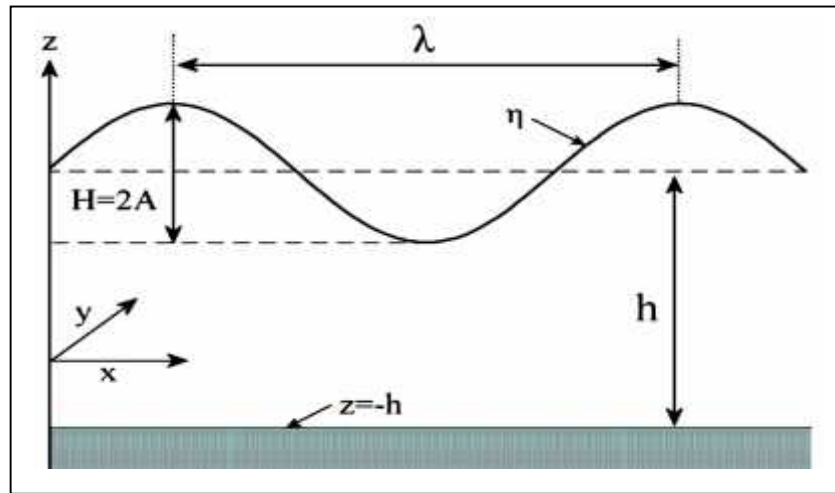
### 7-1 Houle de Stokes

L'ensemble des équations de base forme un système non linéaire, où l'on exprime le potentiel et ses dérivées sur une surface libre de profil inconnu. Les théories de

houle en eau profonde, intermédiaire ou en eau peu profonde sont liées à la valeur prise par le paramètre d'Ursell (1953),[40]:

$$U_r = \frac{a}{h} \frac{1}{(kh)^2} = \frac{aL^2}{4\pi h^3} \quad (3-19)$$

Une valeur de  $U_r$  petite devant 1 signifie que les effets de dispersion sont prépondérants devant les effets non linéaires. Une solution au problème peut être recherchée en développant le potentiel  $\Phi$ . C'est la théorie dite de Stokes qui conduit aux modèles de houles régulières (monochromatiques) portant son nom et dont l'ordre N signifie que le développement est tronqué à cet ordre en omettant les termes suivants. A l'inverse, une valeur du paramètre d'Ursell de l'ordre ou grande devant 1 conduit à prendre comme petit paramètre le ratio  $h/L$  [40].



**Figure 3-6** Représentation des paramètres caractéristiques des vagues, Ref [40].

## 7-2 Théorie linéaire, houle d'Airy

Les premières approches analytiques consistent d'abord à supposer que les ondes se propagent sur un fond plat. La houle la plus simple s'obtient en linéarisant les équations cinématique et dynamique

### 7-2-1 Expression des potentiels des vitesses

On suppose que l'amplitude de l'onde est « infiniment petite », c'est-à-dire qu'on peut négliger les termes proportionnels au carré de l'amplitude dans l'expression la condition dynamique à la surface libre suivante :

$$\left[ g \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{\partial v^2}{\partial t} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + \frac{1}{2} \vec{v} \cdot \nabla (v^2) \right]_{z=0} = 0 \quad (3-20)$$

La condition peut ainsi être écrite en  $z = 0$  par un développement de Taylor au premier ordre. La houle irrotationnelle « infiniment petite » est aussi appelée « houle d'Airy » (d'après les travaux de Airy, 1845) ou « houle de Stokes au 1er ordre ».

On recherche des solutions en fond plat, ou en profondeur infinie. La condition limite de (3.20) devient alors :

$$\text{En } z = 0 \quad g \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0 \quad (3-21)$$

$$\text{En } z = -\infty \quad \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (3-22)$$

La périodicité du mouvement  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  où  $\omega$  correspond à la pulsation de la houle, suggère pour le potentiel  $\Phi(x, z, t)$  une expression complexe (dont la solution est sa partie réelle) de la forme :

$$\Phi(x, z, t) = \Phi(x, z) e^{-i\omega t} \quad (3-23)$$

La recherche de solutions harmoniques pour  $\Phi(x, z)$ , tel que  $\Phi(x, z, t)$  satisfait aux conditions limites de (3.21) et (3.22) permet d'obtenir :

$$\Phi(x, z) = k e^{-i\omega t} + k e^{-i\omega t} \cosh(z + \infty) \quad (3-24)$$

Où  $k$ , le nombre d'onde, vérifie la relation de dispersion :

$$\omega^2 = gk \tanh k\infty \quad (3-25)$$

La vitesse de propagation de l'onde, ou vitesse de phase, notée  $C$  est donnée par :

$$C = \frac{\omega}{k} = \frac{g}{k} \tanh k\infty \quad (3-26)$$

La vitesse de phase  $C$  dépend donc de la pulsation  $\omega$ . La propagation de la houle est un phénomène dispersif, et sa longueur d'onde diminue avec la profondeur d'eau :

$$L = \frac{2\pi}{k} = CT \quad (3-27)$$

En profondeur infinie, la relation (3.26) se réduit à  $C = \frac{g}{k}$ . Tandis qu'en eau peu profonde, elle tend vers  $C = g\infty$  où la vitesse de phase dépend alors uniquement de la profondeur. Le phénomène devient dans ce cas non dispersif. Pour une onde d'amplitude  $a$  (ou de crête à creux  $H = 2a$ ) se propageant dans le

sens des  $x$  croissants, la déformée de la surface libre  $\eta$  et le potentiel des vitesses  $\Phi$  sont donnés par :

$$\eta(x, t) = a \sin(\omega t - kx) \quad (3-28)$$

$$\Phi(x, z, t) = \frac{a\omega}{k} \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \sin(\omega t - kx) \quad (3-29)$$

Par commodité, on peut aussi écrire les expressions de  $\eta$  et de  $\Phi$  sous les formes complexes suivantes :

$$\eta(x, t) = -ia e^{i(\omega t - kx)} \quad (3-30)$$

et 
$$\Phi(x, z, t) = \frac{a\omega}{k} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\sinh(kh)} e^{i(\omega t - kx)} \quad (3-31)$$

### 7-2-2 Champs de vitesse

Le champ de vitesses étant déduit de  $\vec{v} = \nabla\Phi$ , les positions des particules  $X$  et  $Z$  sont obtenues en intégrant :

$$\frac{dX}{dt} = u = \frac{\partial\Phi}{\partial x} \quad (3-32)$$

$$\frac{dZ}{dt} = w = \frac{\partial\Phi}{\partial z} \quad (3-33)$$

En identifiant la vitesse des particules  $(u, w)$  à celle de leur position moyenne  $(x, z)$  on obtient:

$$u = a\omega \frac{\cosh k(z+h)}{\sinh kh} \cos(\omega t - kx) = X_0 \cos(\omega t - kx) \quad (3-34)$$

$$w = a\omega \frac{\sinh k(z+h)}{\sinh kh} \sin(\omega t - kx) = Z_0 \cos(\omega t - kx) \quad (3-35)$$

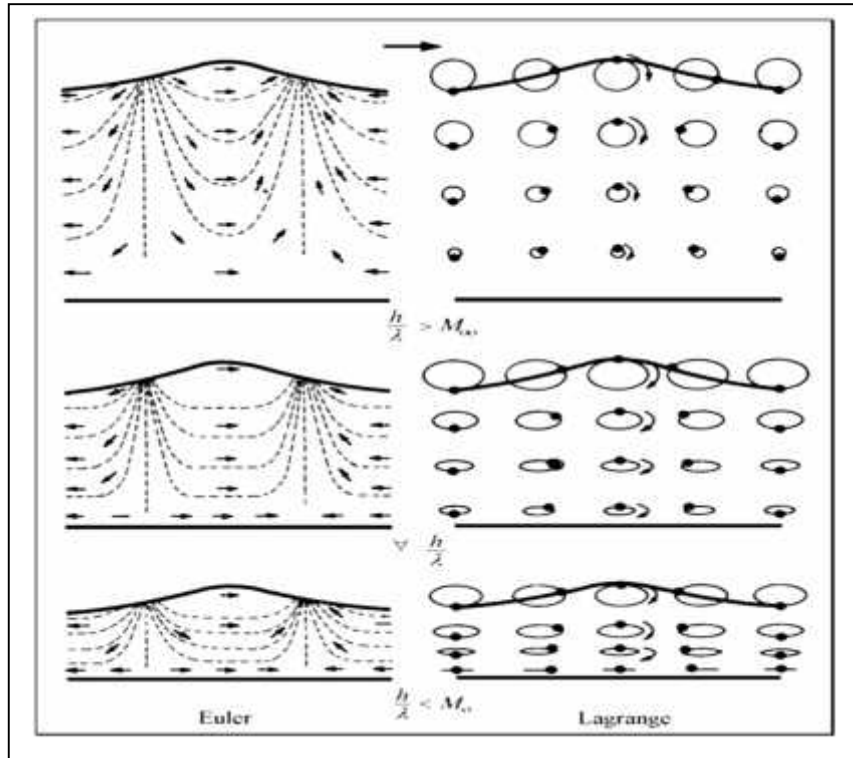
### 7-2-3 Trajectoires des particules

Les trajectoires forment des ellipses vérifiant l'équation :

$$X^2 + Z^2 = 1 \quad (3-36)$$

La trajectoire des particules est donc circulaire en profondeur infinie ( $a/h > 0.5$ ), et elliptique de forme de plus en plus écrasée au fur et à mesure que le fond remonte. Les trajectoires des particules fluides au premier ordre d'approximation, illustrées

par la figure 3-7 donc des ellipses d'autant plus aplaties que le fond remonte (et réduite à un mouvement de va et vient avant le déferlement). En profondeur infinie, ( $a/h > 0.5$ ) [40], ce sont des cercles dont le rayon décroît exponentiellement avec l'immersion  $z$ .



**Figure 3-7** Représentation des mouvements orbitaux des particules fluides au passage d'une houle progressive, Ref: [40].

### 7-2-4 Champ de pression

Le champ de pression dans le fluide exprime par l'équation suivante :

$$p = \underbrace{\rho g z}_{\text{pression hydrostatique}} - \underbrace{\rho \left( \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \Phi)^2 \right)}_{\text{pression dynamique}} \quad (3-37)$$

pour une houle d'Airy, peut se réduire à:

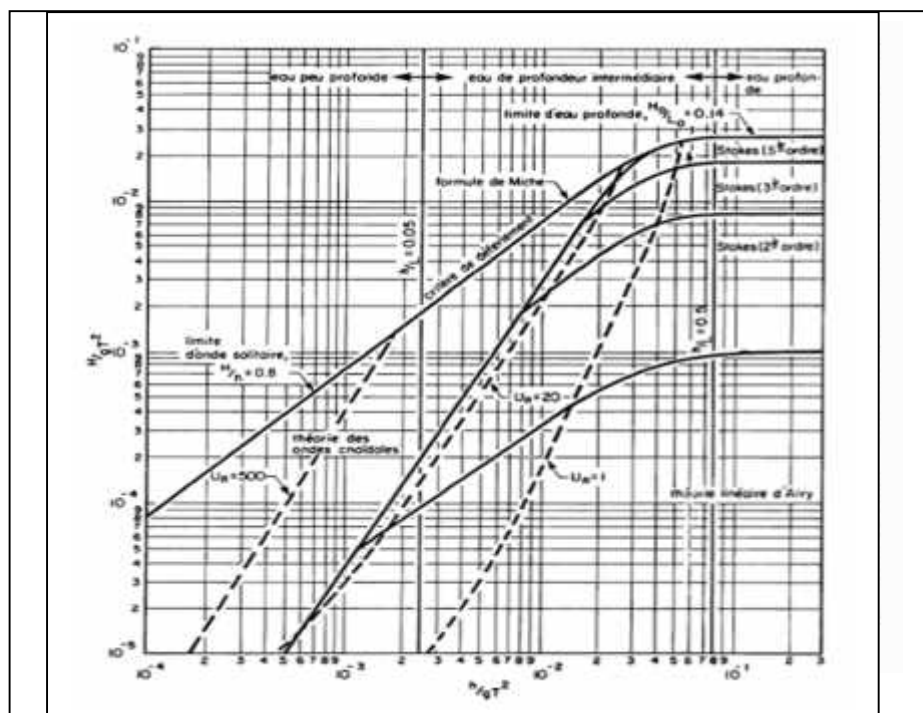
$$p = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \rho g z \quad (3-38)$$

### 7-2-5 Domaine d'application de la houle linéaire

Le domaine d'application du modèle linéaire de Stokes au 1<sup>er</sup> ordre présente l'inconvénient de ne s'appliquer en toute rigueur qu'à une houle de faible amplitude

( $ka \ll 1$ ). Ce domaine est encore plus réduit en profondeur finie où la profondeur  $h$  qui intervient, doit rester grande comparée à l'amplitude ( $a/h \ll 1$ ) [40].

Il existe plusieurs approches analytiques, en général fondées sur des développements en séries des différentes grandeurs. Elles tentent de réduire les erreurs commises sur les véritables conditions de surface libre. Les modèles de houle les plus classiquement utilisés sont la houle « cnoïdale » et le modèle de vague solitaire pour la zone côtière, et la houle de Stokes (1847) aux ordres supérieurs en formulation Eulérienne ou la houle de Gerstner (1802) en formulation Lagrangienne (et de type rotationnelle), pour les ondes du large. D'autres méthodes comme celles fondées sur les résolutions intégrales aux frontières (BIEM) permettent de résoudre « exactement » les équations [40]. La figure 3-7 présente le domaine de validité de chacune des théories de représentation de la houle suivant les paramètres de hauteur, longueur d'onde de la houle et profondeur d'eau.



**Figure 3-7** Domaine de validité des différentes théories de la houle Ref: [40].

### 7-3 Houle de Stokes au deuxième ordre

Lorsqu'une onde n'est plus d'amplitude très faible, la déformée de la surface libre n'est pas sinusoïdale mais décrit une courbe de forme « trochoïdale » en profondeur infinie, dont une approximation correcte peut être obtenue par un développement par perturbations.

De façon générale, pour de tels développements, on appelle  $\varepsilon$  le petit paramètre et on écrit :

$$\eta = \varepsilon\eta^{(1)} + \varepsilon^2\eta^{(2)} + o(\varepsilon^3) \quad (3-39)$$

$$\Phi = \varepsilon\Phi^{(1)} + \varepsilon^2\Phi^{(2)} + o(\varepsilon^3) \quad (3-40)$$

Où  $o(\varepsilon^n)$  englobent les termes dont la contribution dans les expressions de  $\eta$  et de  $\Phi$  est d'ordre  $\varepsilon^n$ . La troncature au premier ordre aboutit à la houle linéaire déjà formulée.

En écrivant  $\eta$  et  $\Phi$  sous les formes respectives (3.30) et (3.31), dans les expressions suivantes :

$$\nabla^2\Phi = 0 \quad (3-41)$$

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3-42)$$

et (3.2), et en utilisant un développement de Taylor pour (3.2), on en déduit la condition de Laplace, la condition limite au fond et la condition limite pour la surface libre en  $z = 0$ , aux ordres  $o(\varepsilon)$  et  $o(\varepsilon^3)$  suivantes :

Condition de Laplace, à chaque ordre  $\varepsilon^i, i = 1, 2$  :

$$\frac{\partial^2\Phi^{(i)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi^{(i)}}{\partial x^2} = 0 \quad (3-43)$$

Condition en  $z = -\bar{z}$  : à chaque ordre  $\varepsilon^i, i = 1, 2$  :

$$\frac{\partial\Phi^{(i)}}{\partial z} = 0 \quad (3-44)$$

Condition de surface libre

Ordre  $\varepsilon$  :

$$\frac{\partial^2\Phi^{(1)}}{\partial x^2} + g\frac{\partial\Phi^{(1)}}{\partial z} = 0 \quad (3-45)$$

Ordre  $\varepsilon^2$  :

$$\frac{\partial^2\Phi^{(2)}}{\partial x^2} + g\frac{\partial\Phi^{(2)}}{\partial z} + \eta_1\frac{\partial^3\Phi^{(1)}}{\partial t^2\partial z} + g\frac{\partial^2\Phi^{(1)}}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial t}\frac{\partial\Phi^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial\Phi^{(1)}}{\partial z}^2 = 0 \quad (3-46)$$

L'expression de la déformée de la surface libre est obtenue à partir de la condition de Bernoulli :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \overline{\text{grad} \Phi}^2 + \frac{p}{\rho} + gz = C t \quad (3-47)$$

Elle est donnée aux différents ordres en  $\varepsilon = 0$  par les relations :

Ordre  $\varepsilon$  :

$$-g\eta^1 = \frac{\partial^2 \Phi^1}{\partial t^2} \quad (3-48)$$

Ordre  $\varepsilon^2$  :

$$-g\eta^2 = \frac{\partial \Phi^2}{\partial t} + \eta^1 \frac{\partial^2 \Phi^1}{\partial z \partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial \Phi^1}{\partial x}^2 + \frac{\partial \Phi^1}{\partial z}^2 \quad (3-49)$$

Les expressions de  $\Phi$  et  $\eta$  sont alors recherchées en résolvant successivement les équations aux ordres  $\varepsilon$  et  $\varepsilon^2$

On suppose que la profondeur d'eau est constante et égale à  $h$ . Le calcul des expressions aux différents ordres du potentiel des vitesses et de la déformée de la surface libre se fait de la même manière que pour la théorie linéaire.

D'ailleurs, les solutions à l'ordre  $\varepsilon$  sont celles du cas de la houle d'Airy, ou Stokes premier ordre, d'une « houle infiniment petite » pour une profondeur finie. Pour l'ordre  $\varepsilon^2$ , en résolvant les équations (3.33), (3.34) ainsi que (3.36) et (3.39), on obtient après calculs :

Le potentiel des vitesses

$$\Phi(x, z, t) = \begin{matrix} \Phi^1 \\ + \\ \Phi^2 \end{matrix} = \begin{matrix} \frac{a\omega \cosh kz + h}{k \sinh kh} \cos \omega t - kx & \text{Ordre } \varepsilon \\ + \frac{3}{8} \frac{a^2 \omega}{\sinh^4 kh} \cosh 2kz + \frac{3}{4} \sin^2 \omega t - kx & \text{Ordre } \varepsilon^2 \end{matrix} \quad (3-50)$$

La déformée de la surface libre :

$$\eta(x, t) = \begin{matrix} \eta^1 \\ + \\ \eta^2 \end{matrix} = \begin{matrix} a \sin \omega t - kx & \text{Ordre } \varepsilon \\ - \frac{a^2 k}{2 \sinh 2kh} + \frac{a^2 k}{4} \frac{3 - \tanh^2 kh}{\sinh^4 kh} \cos 2 \omega t - kx & \text{Ordre } \varepsilon^2 \end{matrix} \quad (3-51)$$

### 7-4 Champs des vitesses

L'expression de Champs des vitesses donne par les équations suivantes :

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\pi H \cosh(2\pi/L \cdot h+z)}{T \sinh(2\pi h/L)} \cos 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) + \frac{3\pi^2 H^2 \cosh(4\pi/L \cdot h+z)}{4LT \sinh^4 2\pi h/L} \cos 4\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \quad (3-52)$$

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\pi H \sinh(2\pi/L \cdot h+z)}{T \sinh(2\pi h/L)} \sin 2\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) + \frac{3\pi^2 H^2 \sinh(4\pi/L \cdot h+z)}{4LT \sinh^4 2\pi h/L} \sin 4\pi \left( \frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \quad (3-53)$$

La condition de validité de l'approximation linéaire était obtenue en exprimant que les termes non-linéaires restaient faibles par rapport aux termes linéaires dans l'expression de la déformée de la surface libre

Pour des ondes d'amplitude « finie », le potentiel  $\Phi$  s'exprime comme la somme de la solution linéaire  $\Phi^1$  et de la correction  $\Phi^2$ , qui reste faible mais non négligeable devant  $\Phi^1$

La solution linéaire n'est donc correcte que si  $\frac{\Phi^2}{\Phi^1} \ll 1$ , c'est-à-dire :

$$\frac{\Phi^2}{\Phi^1} = ak \frac{\cosh[2k(z+h)]}{\cosh[k(z+h)]} \frac{1}{\sinh^3(kh)} \ll 1 \quad (3-54)$$

En eau profonde ( $kh \gg 1$ ), le rapport  $\frac{\Phi^2}{\Phi^1} \approx \frac{ak}{e^{2kh}}$  et tend donc vers 0 quand  $kh \rightarrow \infty$

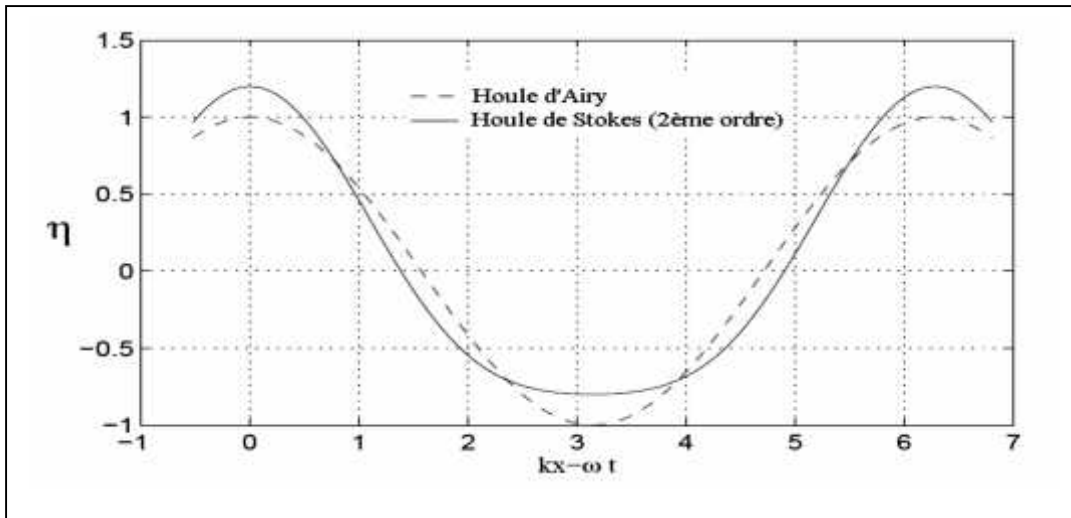
En eau peu profonde ( $kh \ll 1$ ), le rapport  $\frac{\Phi^2}{\Phi^1} \approx \frac{3}{8} \frac{ak}{kh^3} = \frac{3}{8} U_T$

Où  $U_T$  est le paramètre d'Ursell formulé en (3-19). Le nombre d'Ursell doit donc rester petit pour que la théorie de Stokes de 2<sup>ème</sup> ordre reste correcte. Une représentation de la houle de Stokes au 2<sup>ème</sup> ordre comparée à la forme de la houle d'Airy est réalisée sur la figure 3-8.

En profondeur infinie, les calculs sur la houle de Stokes montrent que  $\eta^2 = 0$ . La composante de deuxième ordre de l'élévation de la surface libre se réduit alors à :

$$\eta^2 = \frac{1}{2} a^2 k \sin \omega t - kx \quad (3-55)$$

La correction relative par rapport à  $\eta^1$  est de  $\frac{1}{2} a^2 k$ . Son effet est donc de surélever les crêtes et de combler les creux de la sinusoïde initiale.



**Figure 3-8** Comparaison des profils de surface libre pour la houle d'Airy et la houle de Stokes au 2<sup>ème</sup> ordre Ref: [40].

### 8 conclusion:

A partir de notre recherche dans ce chapitre, on déduit que La modélisation des vague, qui est une infime partie des phénomènes naturels, est réalisée en deux grandes étapes. Premièrement, la modélisation géométrique est nécessaire pour définir le domaine. Deuxièmement, utilise des données physiques d'entrées qui correspondent autant aux caractéristiques internes de la vague dans la scène (amplitude et longueur d'onde des vagues, direction et vitesse de propagation, ...) qu'aux facteurs extérieurs (bathymétrie des fonds marins, vitesse du vent, ...), pour modéliser une vague (comme nous motionnons dans la dernier section).

Et l'importance de la modélisation mathématique dans la simulation numérique. Comme nous comprîmes des notions global sur la turbulence et ses modèles.

Nous avons vu précédemment, une généralité sur la méthode de volume fini et une explication mathématique. Et comment discrétise et résoudre les équations différentiel dans la mécanique des fluides.

Finalement, on retire que les modèles microscopiques sont représentés par deux grandes catégories les méthodes Lagrangiennes et Eulériennes, de manière générale. Nous avons donc porté un intérêt plus particulier aux méthodes Eulériennes qui sont plus en mesure de suivre l'interface en cas de déformation conséquente. Pour ce type de méthodes, deux formalismes principaux se distinguent, VOF et Level-Set.

Chapitre 4

**SIMULATION  
ET  
RESULTATS**

## 1 Introduction:

Dans ce chapitre nous présenterons les grands intérêts de notre projet "optimisation de la géométrie et des dimensions d'un convertisseur d'énergie". Au début, nous allons donner une discrétisation de la conception géométrique du OWC et son principe de fonctionnement et nous définirons la modélisation physique avec les équations adéquates. En suite, nous expliquerons les conditions aux limites et initiales et les paramètres d'onde étudiée avec la configuration dans le code de calcul ANSYS-CFX, par la suite nous allons entrer dans les simulations des différents tests dans le but d'améliorer l'efficacité de l'OWC comme déclaré précédemment.

Les effets concernés de notre objectif sur l'efficacité sont les tests suivants :

- ✓ l'effet de la variation de dimension de l'orifice de la chambre.
- ✓ l'effet de l'orientation de la paroi frontale.
- ✓ l'effet de la variation de la hauteur de la colonne d'air.
- ✓ l'effet de la forme de la surface supérieure de la chambre d'air.
- ✓ l'effet de nombre des orifices de la chambre.

En fin nous allons terminer ce chapitre avec une conclusion sur les points étudiés.

## 2 La Discrétisation de l'OWC

### 2-1 La conception géométrique de l'OWC :

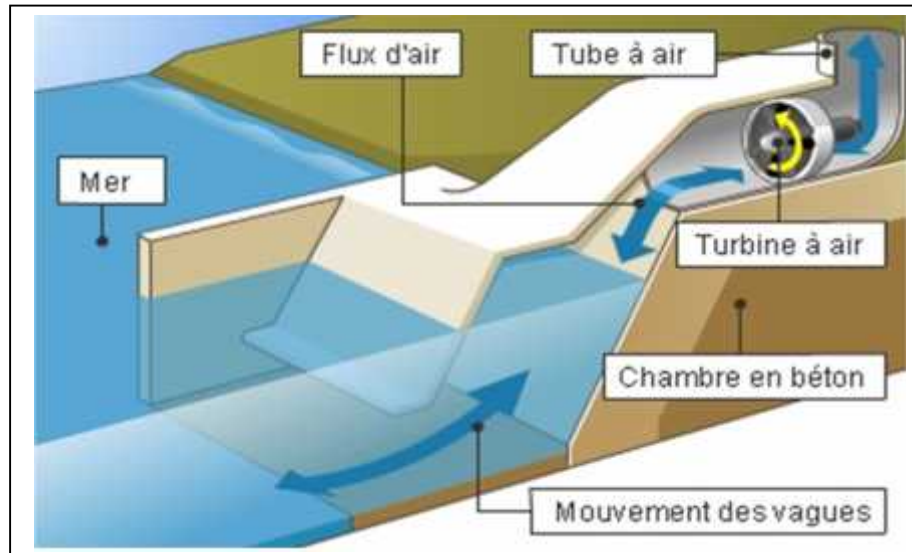
L'une des premières utilisations de l'énergie de la houle a été celle d'unités de production d'électricité utilisant la méthode dite « à colonne d'eau oscillante ». Il s'agit de petites centrales électriques construites sur les côtes de pays où la houle côtière est assez importante. Nous allons maintenant étudier plus en détail ce type d'installation.

la colonne d'eau oscillante (OWC oscillating water column) est un convertisseur d'énergie qui peut convertir l'énergie des vagues (l'énergie cinétique) sous forme d'énergie électrique (électricité) et tout simplement c'est une chambre avec plusieurs formes (cylindrique, cubique, mixte et complexe) semi-émergée dans la mer.

il y a deux types d'installation

- ✓ système flottant (off-shore system Oceanlinx): installé dans l'océan. Sa puissance de 100 kW à 1.5 MW

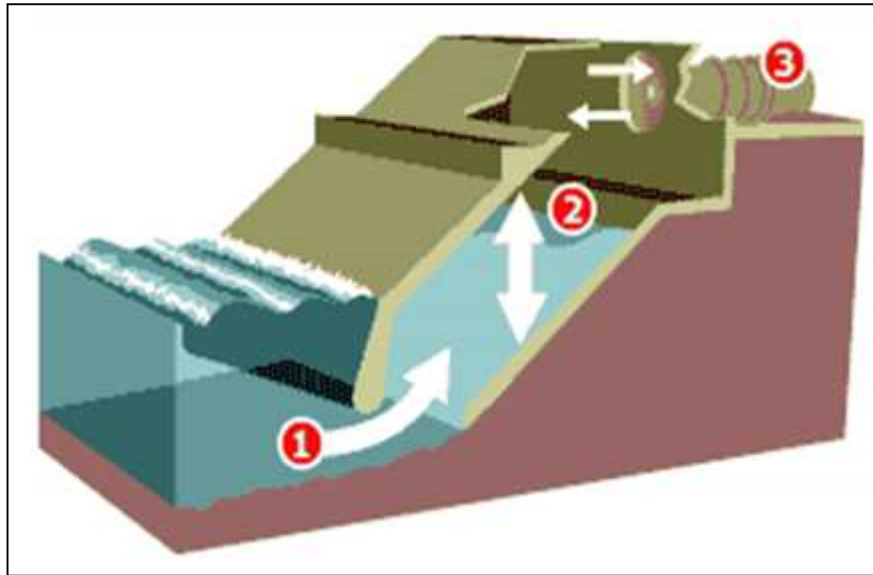
- ✓ système fixée (on-shore system Wavegen): installé le long de la plage sa puissance est de 100 kW [20].



**Figure 4-1** vue en coupe d'une centrale de colonne d'eau oscillante de l'OWC , Ref[41].

### 2-2Principe de fonctionnement:

Le principe en lui-même est relativement simple: la houle (voir 1 figure.4-2) fait augmenter la hauteur d'eau dans une colonne en béton fixée sur le rivage.(voir 2 figure.4-2). Cette brusque montée d'eau va réduire le volume de la cavité et donc comprimer l'air qui se situe dedans. Cet air n'aura d'autre choix que d'être évacué sous pression en haut de la colonne a travers une turbine couplée à un générateur (voir 3 figure.4-2). La turbine sera mise en rotation par le flux d'air comprimé. Une fois l'amplitude maximale de la vague atteinte, celle-ci redescend et provoque un appel d'air dans la colonne. Cette fois ci, l'air entre avec force dans la colonne dans l'autre sens et fait tourner la turbine. Cela produit de l'électricité. Il est à noter que quelque soit la direction du flux d'air (entrée ou sortie de la colonne), la turbine tournera toujours dans le même sens garantissant une production constante d'électricité.



**Figure 4-2** Principe de fonctionnement colonne d'eau oscillante, Ref[42].

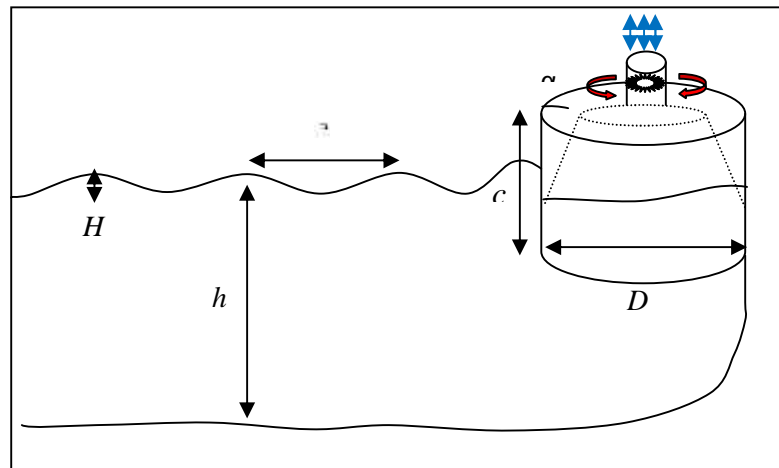
### 3La Méthodologie :

#### 3-1La Modélisation physique:

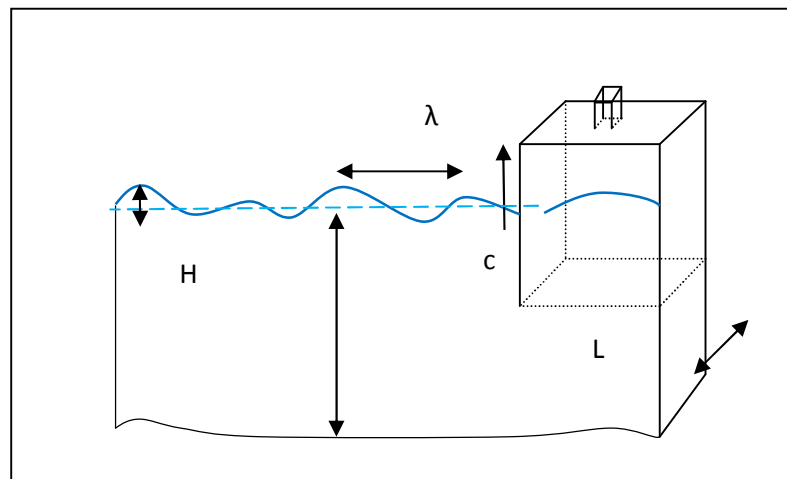
Dans notre projet, nous proposons deux désignes de la chambre l'OWC la première est un cylindre avec une conicité d'angle ( ), elle comporte une conduite de diamètre ( $d$ ) et sa paroi partiellement émergée, elle a deux formes: une droite et l'autre sous forme d'un L. La colonne d'air varie avec la variation de la hauteur ( $c$ )

la deuxième chambre, son désigne est d'une forme cubique dont la partie supérieure est centrée au milieu par un évent, de forme cubique, pour l'aspiration et le refoulement de l'air.

Tout les détails géométriques présentés dans la figure (4-3)et (4-4) et la section de la modélisation géométrique.



**Figure 4-3** Modélisation physique pour la chambre cylindrique.



**Figure 4-4** Modélisation physique pour la chambre cubique.

On choisit l'onde de Stokes 2eme ordre (comme déjà motionné dans le chapitre 3), les caractéristiques physiques de cet onde de gravité sont  $\lambda$  (la longueur d'onde),  $h$  (le niveau de la surface libre) et  $H$  (l'amplitude de l'onde).

l'équation de mouvement de la surface libre de Stokes 2eme ordre comme suite :

$$y = \frac{H}{2} \cos(kx - \check{S}t) + \frac{fH^2}{8} \frac{\cosh(kh)}{\sinh^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos 2(kx - \check{S}t) \quad (4-1)$$

- $t$ : c'est le temps physique
- $h$ : la profondeur de la mer
- $k = 2\pi / \lambda$  : représente le nombre d'onde
- $\omega = 2\pi / T$ : la fréquence et  $T$  la période de l'onde

les composants des vitesses  $u$  et  $w$

$$u = \frac{H g k}{2\check{S}} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh(kh)} \cos(kx - \check{S}t) + \frac{3H^2 \check{S} k}{16} \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - wt) \quad (4-2)$$

$$w = \frac{H g k}{2\check{S}} \frac{\sinh k(z+h)}{\cosh(kh)} \sin(kx - \check{S}t) + \frac{3H^2 \check{S} k}{16} \frac{\sinh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \check{S}t) \quad (4-3)$$

l'énergie de l'onde incidente correspondante:

$$E_{in} = \frac{\rho g}{16T} H^2 \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \left[ 1 + \frac{9}{64} \frac{H^2}{k^4 h^6} \right]$$

et on peut écrire l'équation d'énergie hydrodynamique absorbée de l'OWC dans une période T :

$$E_{owc} = \int_0^T p(t) Q(t) dt \quad (4-6) \quad Q(t) \text{ c'est le débit instantané qui passe à travers la section}$$

$S$  de la conduite comme montrer précédemment dans la figure 4-3.

on peut écrire  $Q(t) = v(t) \cdot S$  tels que  $P(t)$  représente la pression moyenne de la même section  $S$

Alors d'après l'énergie hydrodynamique absorbée par l'OWC et l'énergie incidente de la vague on peut définir l'efficacité de l'OWC comme suite :

$$\eta = \frac{E_{owc}}{T \cdot P_{in}} \quad (4-7)$$

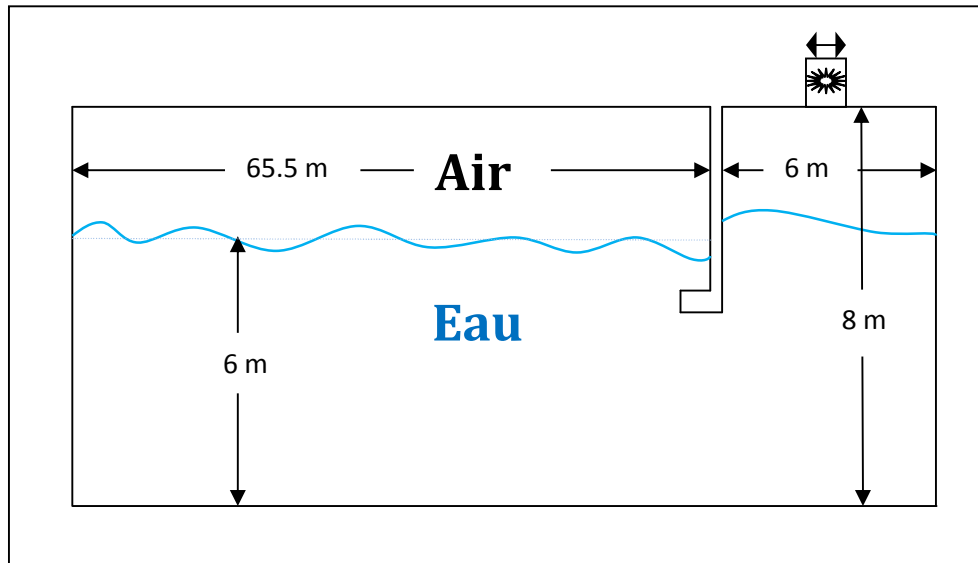
### 3-2 La Modélisation géométrique :

Dans notre modélisation de la géométrie, nous considérons le modèle étudié dans cette référence [8] un réservoir numérique ayant les dimensions suivants : 65.5m de longueur (entre le générateur de la houle et la chambre), l'hauteur de 8 m et la largeur de 6 m. La modélisation utilisée est de trois dimensions. Le réservoir est relié avec une chambre par un mur frontal sous forme de L ou simple orienté en contre courant.

Pour la première modélisation la chambre est caractérisée par une forme cylindrique de diamètre 6m et hauteur de 8m dont la partie supérieure est perforée au centre par un

évent de forme cylindrique permettant l'aspiration et le refoulement de l'air. La géométrie et les dimensions de la chambre sont illustrées dans la figure 4-5.

Et la deuxième chambre de forme cubique caractérisée par une longueur de 5.5m , une largeur de 1m et une hauteur de 8m dont la partie supérieure est centrée au milieu par un évent de forme cubique.



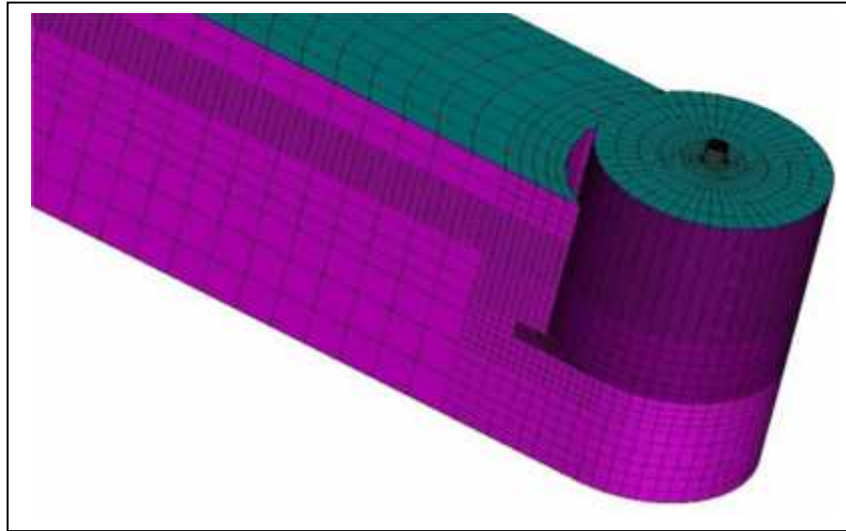
**Figure 4-5:** Les Dimensions du modèle de la géométrie de l'OWC.

Et pour le maillage, nous utilisons la stratégie de blocage dans ANSYS ICEM CFD on a crée plusieurs blocs adéquates pour générer un maillage structuré , nous utilisons dans la régions de la surface libre et dans la chambre d'air un maillage fin de raison des variations rapides des gradients des vitesses et changement de fluide (air/eau) et pour minimiser le temps d'exécution (le temps de simulation (CPU time)),aussi bien que pour le traitement de paroi comme motionné dans chapitre 3.

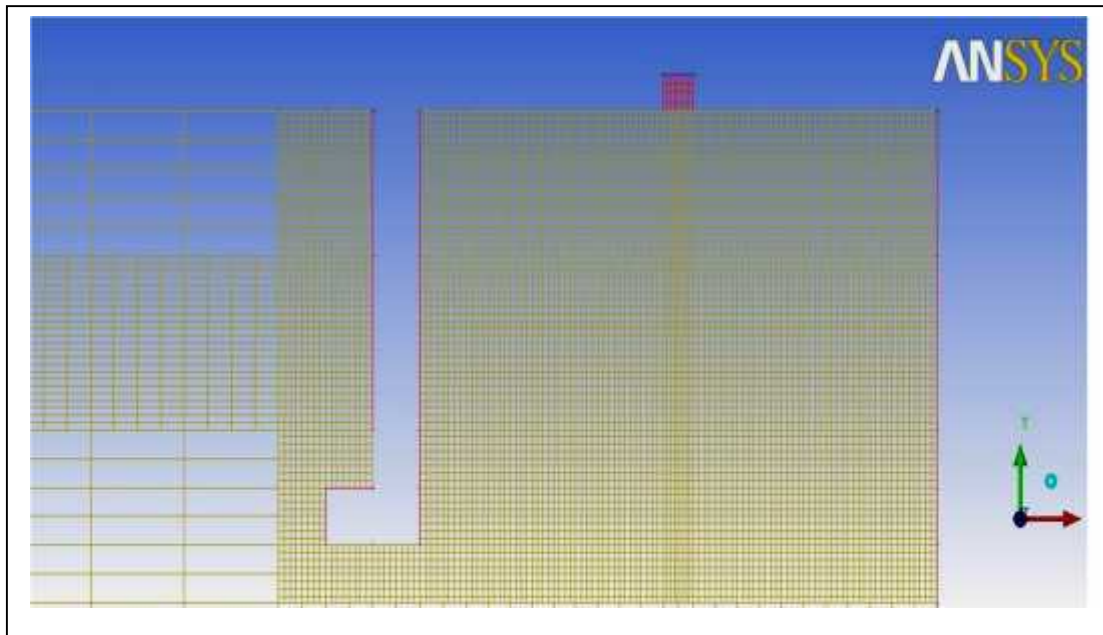
Pour la zone cylindrique comme la chambre d'air et la conduite de la turbine nous utilisons la technique de maillage O (O gride mesh) comme montré dans la figure 4-6.et pour la chambre cubique nous avons choisi des éléments quadrilatéraux de dimensions suivantes :

- ✓ La dimension des éléments de la zone de raffinage de la surface libre est de 0.25m x 0.0625m.

- ✓ La dimension des éléments de la zone de raffinement dans la chambre OWC est de 0.0575m x 0.0625m .
- ✓ pour le reste des zones la dimension est de 1m x 0.25m



**Figure 4-6 :** Maillage réalisé sous ANSYS ICEM CFD pour la chambre cylindrique.

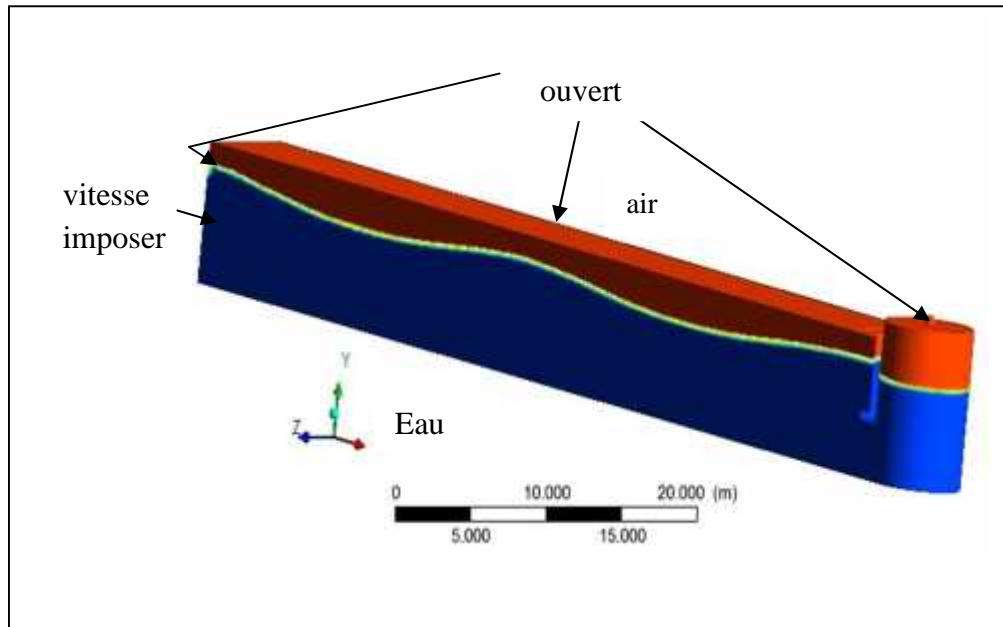


**Figure 4-6 :** Maillage réalisé sous ANSYS ICEM CFD pour la chambre cubique.

### 3-3 Les Conditions aux limites :

Le fond et les parois latérales du domaine sont considérés comme étant des murs imperméables (les vitesses normales aux parois sont nulles) alors que la frontière supérieure est ouverte à la pression atmosphérique ( $p=p_{atm}$ ).

La vitesse des vagues est adaptée à la théorie de stocks 2ème ordre , l'évent de la chambre est ouvert à la pression atmosphérique.

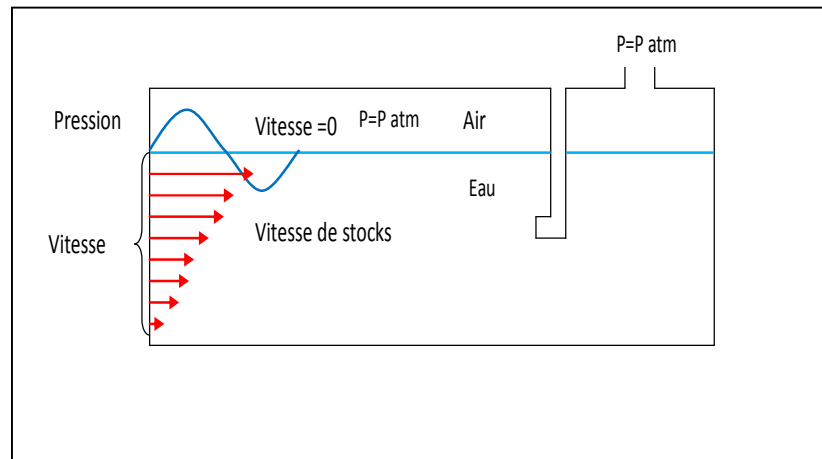


**Figure 4-5 :**Présentation les Conditions aux limites.

### 3-4 Les Conditions initiales :

Dans les conditions initiales (à  $t=0s$ ) on considère le domaine (eau/air) Au repos, alors les composantes des vitesse  $u$  et  $w$  sont nuls, la surface libre est à l'équilibre. On donne une vitesse d'onde pour les vagues incidentes (paroi gauche ou bien générateur d'onde) selon la théorie de stocks 2ème ordre comme déjà dataire dans le chapitre 3, on peut l'utiliser d'autre ordre de théorie de stocks 3ème ,4ème ,...,ect.

Et pour la distribution de la pression dans l'eau, nous la considérons initialement comme étant hydrostatique, car a l'état de stagnation les seules pressions existant sont les pressions hydrostatiques. Et pour l'air, ça pression est égale à la pression atmosphérique.



**Figure 4-6** : Présentation des conditions initiales.

### 3-5 Les Paramètres de l'onde :

Les paramètres physiques des ondes répondent à la théorie de Stokes 2<sup>ème</sup> ordre. La période  $T$  est fixée à 5s, la hauteur des vagues est de  $H=1\text{m}$  (amplitude  $a=0.5\text{m}$ ) et la profondeur de l'eau est de  $h=6\text{m}$ .

Selon l'équation (4-1), la longueur d'onde est de  $L=32.19$ . nous fixons dans toutes les analyses transitoires dans cette étude le pas de temps à 0.01 s.

### 3-6 La Configuration de la résolution:

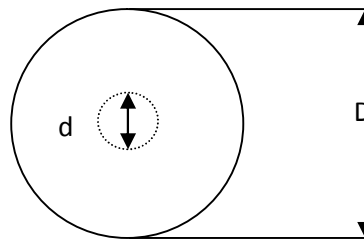
Après la modélisation géométrique et le maillage, le domaine doit être configuré sous ANSYS CFX afin de lancer la résolution des équations du transport. Pour toutes les simulations réalisées, nous avons considéré un écoulement diphasique (air/eau) avec le modèle de turbulence (K- $\nu$ ). Le logiciel utilise la discrétisation de volume finis couplée avec la technique VOF, pour capter l'interface entre les deux phases. Pour le schéma temporel, nous avons utilisé la méthode d'Euler implicite du second ordre.

### 3-7 La Simulation

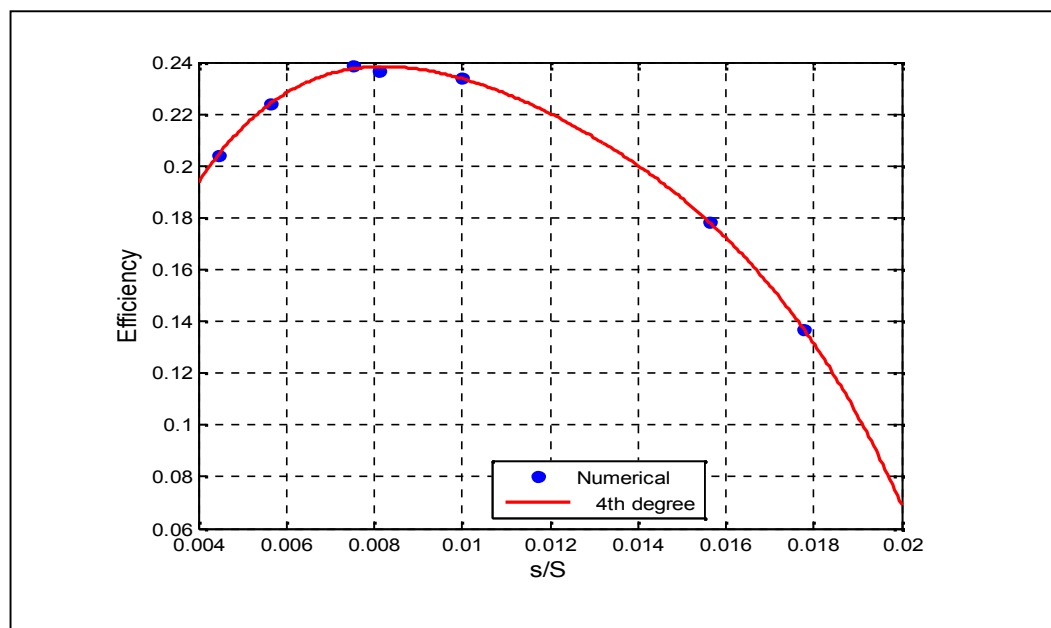
Au début des applications, nous commençons notre présentation avec l'OWC de la chambre cylindrique avec tout les tests faits et après nous allons présenter l'OWC de la chambre cubique avec les mêmes applications.

### 3-7-1 L'effet de la variation de dimension de l'orifice de la chambre:

Dans cette étape nous étudions l'effet de la variation du diamètre du trou de la chambre sur l'efficacité de l'OWC, on prend un rapport entre la section de la chambre de l'OWC ( $S$ ) et la section du trou ( $s$ )  $\frac{s}{S} = \frac{r^2}{R^2}$  notre méthodologie est de varier la section (diamètre) d'une part et de calculer l'efficacité d'une autre part.



Nous respectons les conditions aux limites, les conditions initiales et les paramètres de l'onde comme nous avons mentionné précédemment après la configuration dans ANSYS-CFX, on lance la simulation. ça va prendre entre cinq et six heures d'exécution pour chaque teste (cas), et à partir des résultats obtenus nous exporterons les valeurs des pressions et les vitesses vers un programme de MATLAB qui calcule l'efficacité de notre dispositif cas par cas. les résultats obtenus sont illustrée dans le graphe suivant.



**Figure 4-7** Résultats de simulation de l'efficacité en fonction de changement du rapport des sections.

**Commentaire :**

On remarque que le rapport optimal de section est égale à 0.0081, l'efficacité correspondante est de 24%. Par contre l'augmentation ou la diminution de la section mène a une diminution de l'efficacité. Les résultats de cette application sont largement raisonnable, car quand on augmente la section du trou de refoulement, on obtient une compression insuffisante par rapport à l'augmentations de l'efficacité. Car la compression accompli pendant la hausse du niveau d'eau (a cause de l'onde incidente), va pousser l'air vers le haut et en même temps elle expulse l'air de la chambre vers l'extérieur, alors l'augmentation de diamètre suscite l'augmentation du débit massique de refoulement alors dans ce cas au lieu de comprimer l'air on lui facilite le passage sans compression suffisante.

Par contre, si on diminue la section, le rapport de compression augmente en donnant un accroissement intermittent de l'efficacité au cours de la compression seulement. Mais d'un autre côté, pendant l'aspiration (la descente du niveau d'eau), il y aura une difficulté de passage de l'air et on obtiendra un rapport de dépression très bas. Parce que le coefficient de compressibilité de l'air dans ce cas est très important et par conséquent, on aura un mauvais remplissage pour la deuxième compression.

Alors on conclu qu'il y a une synchronisation (timing) entre la compression et la décompression avec le mouvement de la vague (l'oscillation du niveau d'eau vers le haut et vers le bas) et la variation du diamètre du trou de refoulement qui influent sur cette synchronisation et qui causent des problèmes (compression non suffisante , mauvais remplissage,...,ect) sur l'énergie emmagasiner. Cette dernière est reliée directement à l'efficacité. Pour les étapes suivantes On fixe l'efficacité maximale à 24% et le rapport de section a 0.0081. Mais l'efficacité peut être changer pour une autre longueur d'onde ou/et pour forme de la chambre, alors il faut étudier chaque cas séparément. Par exemple, une chambre rectangulaire de largeur 5.5 m et un rapport des sections 0.058 donne une efficacité maximal égale à 42% [8].

### 3-7-2 L'effet d'orientation de la paroi frontale :

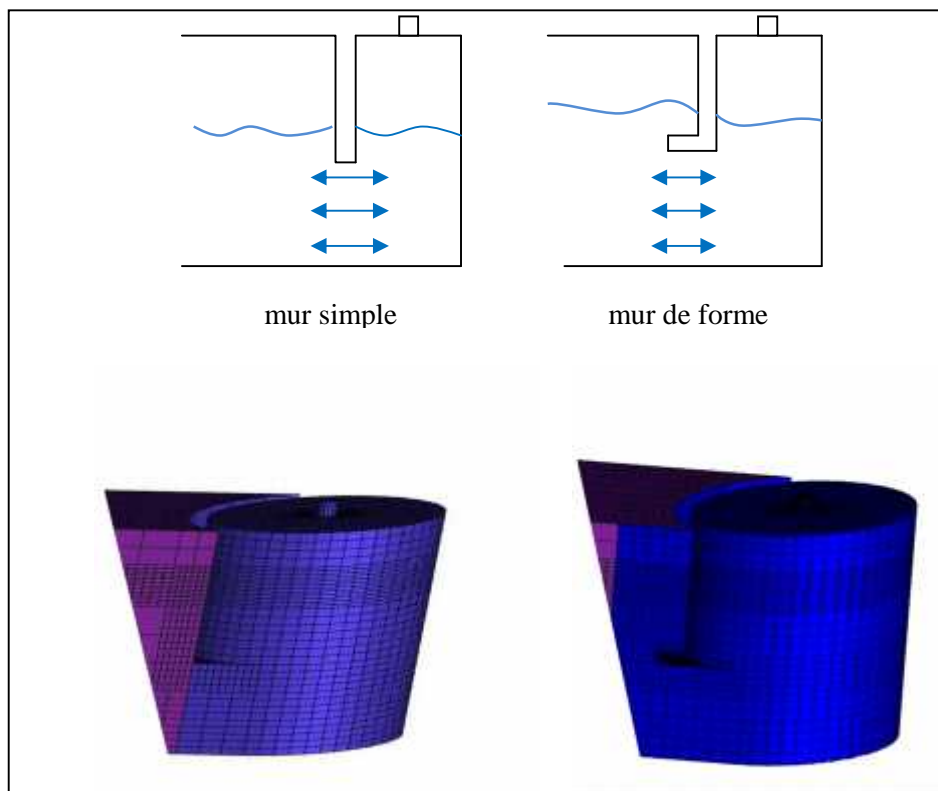
Pour ce problème "l'effet de l'orientation de la paroi" il y a plusieurs travaux qui ont été publiés[15].

Parmi les paramètres pris en compte nous mentionnons:

- ✓ la profondeur d'immersion.
- ✓ la forme et l'épaisseur du mur frontal.
- ✓ L'orientation par rapport à la direction d'écoulement et également un paramètre très important selon l'étude menée par[8] pour l'OWC d'une chambre rectangulaire.

Pour vérifier ces paramètres pour une chambre de forme cylindrique, nous avons effectué une simulation sur deux configurations différentes, un mur simple et l'autre de forme L comme montré dans la figure (4-8).

Et à partir des résultats de simulation on a obtenu une efficacité égale à 20.4% pour un mur simple et 24% pour le mur de la forme L.

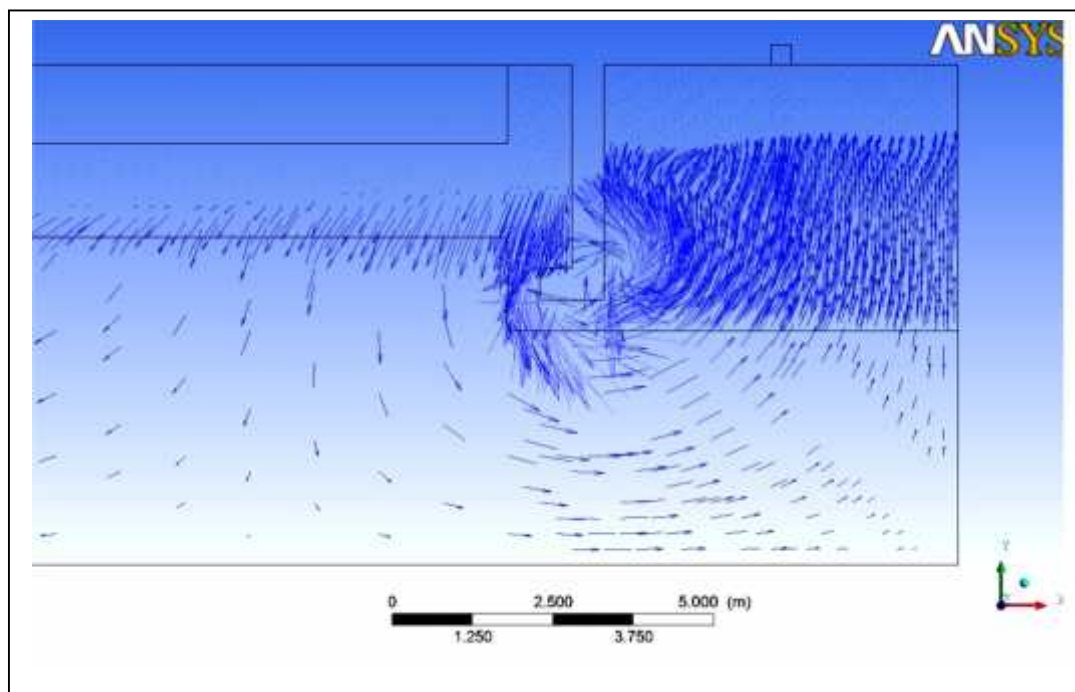


**Figure 4-8:** schéma représente les formes de mur étudié.

**Commentaire :**

D'après les résultats de simulation on remarque que la chambre avec une paroi de forme L est très rentable par rapport à la chambre de paroi simple, car le mur de forme L sépare entre la perturbation de la turbulence et l'entrée d'écoulement dans la chambre comme montré dans la figure 4-9

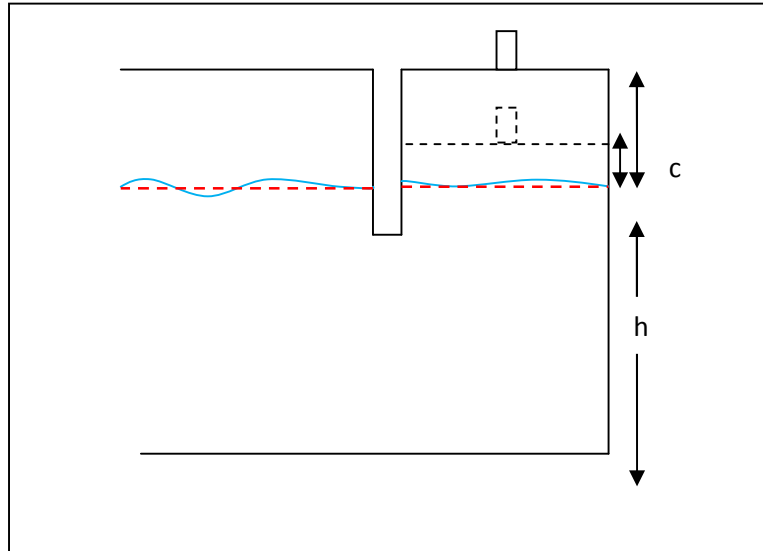
Et pour ce qui concerne la profondeur d'immersion, son augmentation mène directement à la chute de l'efficacité, puisque nous étranglions la section de passage de la chambre. Car l'augmentation de la profondeur d'immersion trouble le passage d'écoulement et on perd l'énergie de l'onde incidente sous forme d'une perte de charge (les pertes de charge singulier du mur) au lieu d'en profiter au maximum. Par contre si on réduit la profondeur d'immersion on obtiendra des valeurs d'efficacité basse. Par ce que il y a des moment pendant la compressions où l'air sortant entre le mur et la surface libre (le mur n'isoler pas les deux niveaux d'eau ). mais reste un optimum de ce paramètre pour obtenir le meilleur résultat, lorsque la distance entre le fond et le mur égale au diamètre(chambre cubique) ou à la longueur (chambre cubique) de raison d'accélééré le flux d'après [b-bouali].



**Figure 4-9:**le Champ des vitesses du flux d'onde.

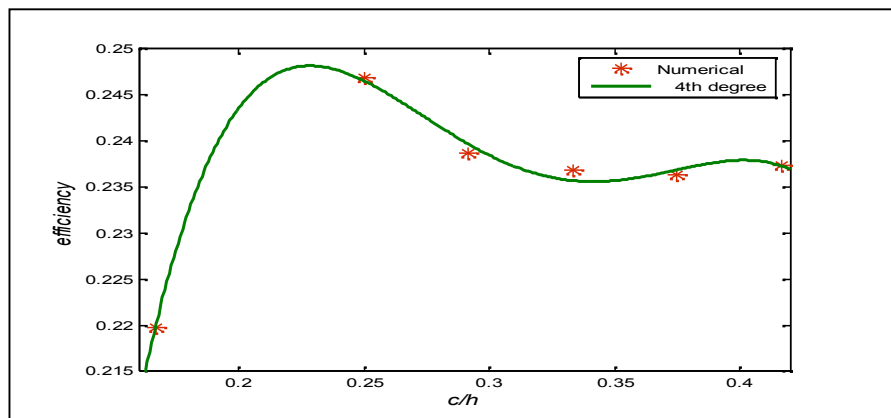
### 3-7-3 L'effet de la hauteur de colonne d'air :

Dans cette étude on va changer la hauteur de la colonne d'air et après on va prévoir comment ces changements influents sur l'efficacité.



**Figure 4-10:** représentation de la chambre d'air.

D'après les résultats obtenu, on remarque que pour une hauteur de  $0.25 \times h$  l'efficacité maximal est égale à 24.6%, quand on utilise la fonction polynômiale de la 4eme degré, on a une maximum théorique de valeur d'efficacité est égale à 24.8% avec une hauteur de  $0.83 \times h$  comme illustrée dans la figure (4-11). On ne remarque pas une grande différence quand on varie la hauteur de la chambre d'air, Parce que l'augmentation de la colonne d'air cause une augmentation de volume et cette augmentation a besoin d'une hausse importante pour compression efficace, par contre la diminution de la colonne d'air va laisser un passage pour l'eau

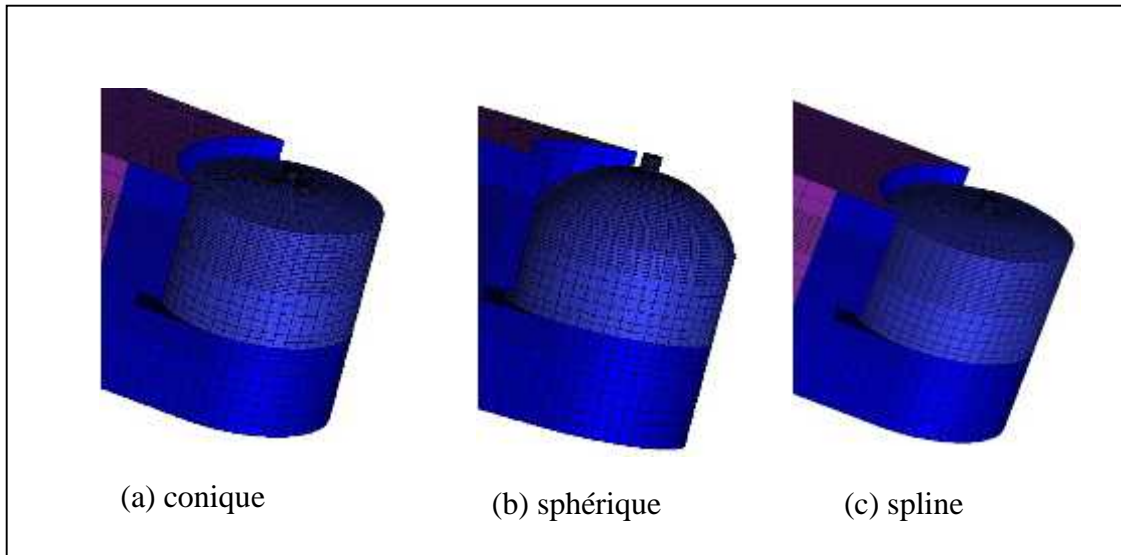


**Figure 4-11 :** Efficacité de l'OWC en fonction de changement de la hauteur d'air.

### 3-7-4 L'effet de la forme de la surface supérieur de la chambre d'air :

Dans cette étude, nous allons rechercher l'influence de la forme de la surface supérieure de chambre sur l'écoulement d'air et ses impacts sur l'efficacité.

On choisi trois formes, conique, sphérique et spline comme montrée dans la figure ci dessous.

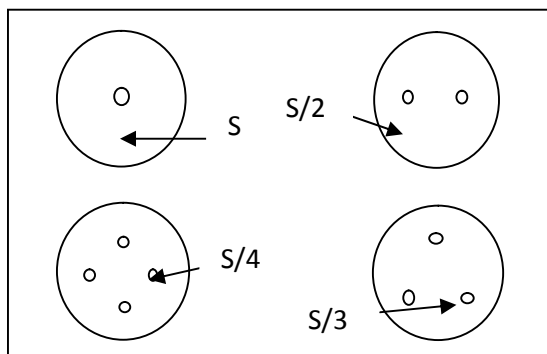


**Figure 4-12:** Représentation des formes de surface supérieur.

Les résultats de simulation montrent que la forme conique donne la meilleur efficacité, l'efficacité pour la forme conique est égale à 25%, sphérique et spline est égale à 23%.

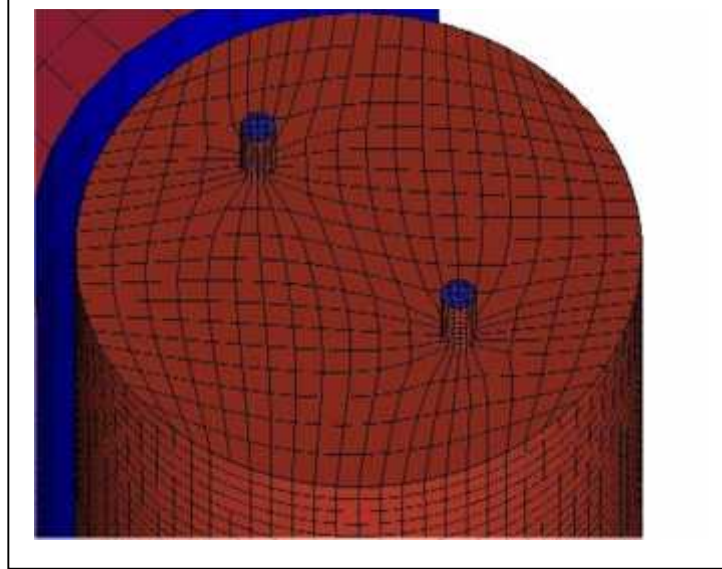
### 3-7-5 L'effet de nombre des orifices de la chambre :

Cette parties d'étude comprend l'effet du nombre des orifices de la chambre, la stratégie de travail est de créer plusieurs orifices dans des point bien déterminer et en gardant la même somme de la section qui donne l'efficacité comme montré ci-dessous.



**Figure 4-13:** représentation de nombre et localisation des orifices de surface supérieur.

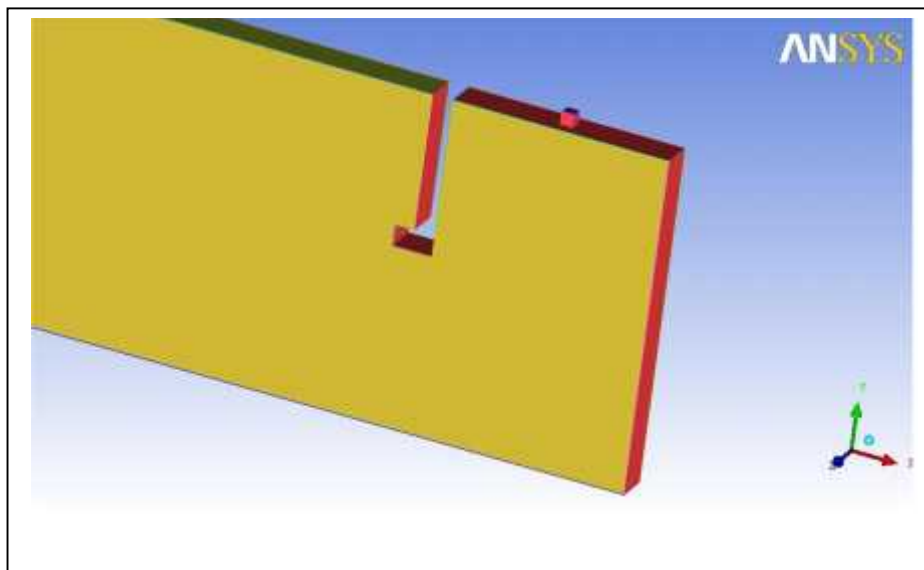
Les résultats des simulations montrent que le nombre des orifices de surface supérieur n'a pas d'effets significatifs sur les performances de notre dispositif. Le choix d'une configuration particulière sera dictée par la facilité de l'application demandée



**Figure 4-14** :Maillage de l'OWC avec deux trous.

### **3-8-1 L'effet des dimensions d'orifice de la chambre cubique:**

En faisant la même stratégie comme la section précédente (3-7-1) et en respectant la même configuration (les conditions aux limites, les conditions initiales,....,ect),Le domaine géométrique et le maillage ont été initialement créés à l'aide du logiciel ANSYS ICEM CFD.



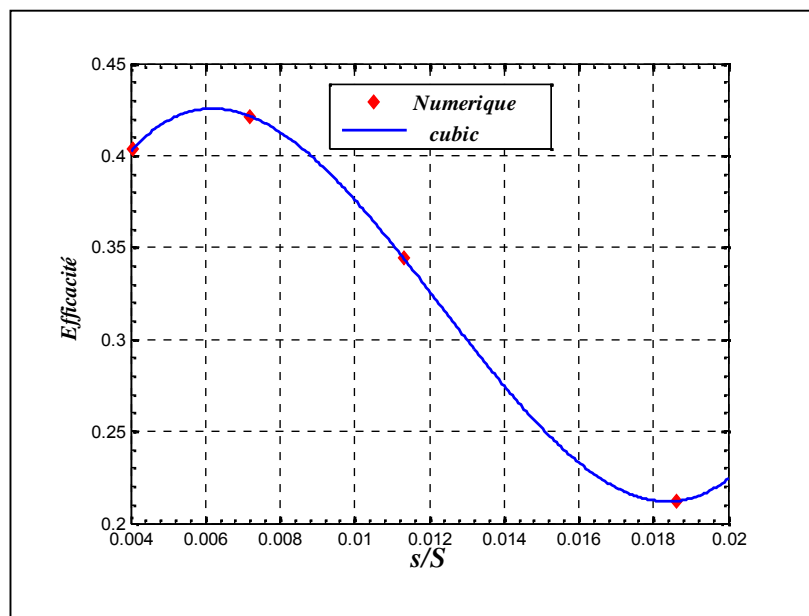
**Figure 4-15** : Modèle géométrique représente l'OWC cubique.

on obtient ces résultats qui sont illustrer dans le tableau ci dessous.

Cas	s/S	Efficacités
1	0.0040	0.4034
2	0.0072	0.4214
3	0.0113	0.3444
4	0.0186	0.2121

**Tableau 4-1** représente les résultats d'efficacité pour la chambre cubique.

a partir de ce tableau on représente ce graphe



**Figure 4-16** : L'efficacité en fonction du rapport s/S.

#### Commentaire :

On remarque qu'il y a une valeur maximale d'efficacité pour le rapport optimum égale à 0.0072, quand le rapport est inférieur ou supérieure à 0.0072, l'efficacité chute.

#### 3-8-2 L'effet d'orientation de la paroi frontale :

Dans cette partie, on garde les mêmes testes comme la section précédente 3-8-1 mais avec différente forme de paroi (forme L).

A partir des résultats obtenu, la valeur maximum est égale à 20.6% et pour la forme simple les tests faits par [8]. en effet, comme il a été montré par plusieurs auteurs [8], [9] et [5] que la forme, l'épaisseur et la profondeur d'immersion du mur frontale joue un

rôle prépondérant dans l'efficacité de l'appareil. la figure 4-16 représente notre prototype.

### 3-8-3L'effet de nombre des orifices :

pour adapté une section optimal on prend le rapport 0.0072 et on le divisant par 1, 2, 3 et 4. Le modèle géométrique est représenté dans la figure (4-18). En divisant par deux on obtient une valeur d'efficacité optimale égale à 42.65%.

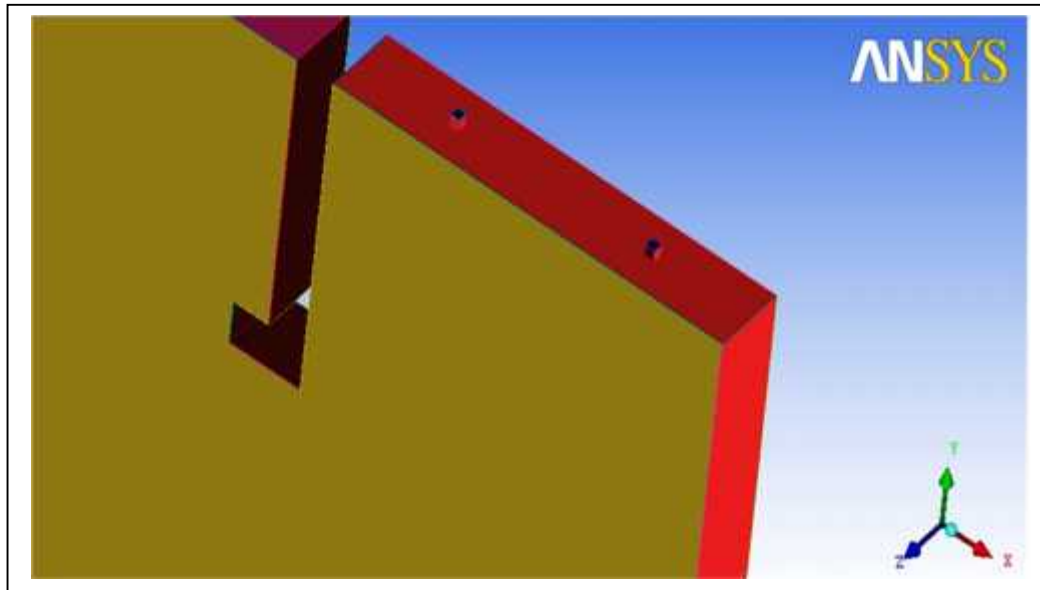


Figure 4.18 : Modèle géométrique Multi-trou.

## 4 Conclusion :

A partir de notre étude et les résultats obtenus, on déduit que l'efficacité dépend de plusieurs paramètres physiques, géométriques et de l'interaction entre les deux, à partir de ça on peut déduire que :

- pour chaque type de chambre (cylindrique ou cubique) il y a un optimum de dimension du trou de refoulement.
- le mur frontal de la forme (L) pour chaque chambre donne une meilleure rentabilité, par ce qu'il fait une séparation entre la perturbation turbulente (qui a été générée par la diffraction d'onde sur le mur frontal) et l'écoulement incident dans la chambre.
- la forme conique de la surface supérieure pour la chambre cylindrique remet des résultats mieux que les d'autres formes, car elle facilite l'écoulement d'air pendant le refoulement et l'aspiration, elle représente une solution efficace pour exploiter la pression dans les zones mortes.

- la variation des nombres des trous (évent) ne donne pas un changement remarquable
- la chambre cubique est plus rentable que la chambre cylindrique.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

L'objectif général de ce mémoire de magister est "optimisation de la géométrie et des dimensions d'un convertisseur d'énergie holo-motrice" de manière numérique, nous avons examiné les effets de la géométrie et les dimensions d'un convertisseur d'énergies des vagues, de type colonne d'eau oscillante, sur ses performance. On obtient le maximum de puissance disponible dans une onde progressive avec période et longueur d'onde constantes. Nous avons utilisé le logiciel ANSYS ICEMCFD et CFX dans notre étude. Le réservoir d'ondes numérique utilisé dans ce modèle est équipé d'un générateur d'onde de type Stocks 2<sup>ème</sup> ordre. L'écoulement de fluide est diphasique (eau/air), bidimensionnel et turbulent (modèle K- $\epsilon$ ). La prise de puissance est modélisée par un évent de deux forme cubique, ou cylindrique dont les dimensions sont variables. afin de mieux comprendre certains phénomènes au sein des technologies d'énergies renouvelables maritimes spécifiquement les colonnes d'eau oscillantes. Ce travail a permis de définir une méthodologie appropriée a fin de simuler l'OWC et d'analyser les résultats obtenu, on conclut.

La mer est riche en différentes aspects des énergies renouvelables. Quelle nécessite de les exploite, avec des plusieurs technologies, des études et des recherches.

L'OWC parmi les meilleurs solutions pour convertir l'énergie des vagues sous forme énergie électrique. Car sa conception très simple, non coûteuse et rentable, sa demande des études sur l'interaction entre L'OWC et la dynamique marine. Quelle est déjà commencer comme motionner sur le chapitre 1.

La méthode des éléments fini nous donne une saute géante dans la résolution numérique des équations différentielles et dans la recherche, quelle nous appuyons dans tous les étude physique. Et grâce a cette méthode, nous pouvons de résoudre les problèmes mathématique complexé. Et on les programme dans des codes des calcule comme ANSYS par exemple.

La méthode VOF permet de gérer naturellement les changements de topologie de l'interface, les ruptures et connexions. Elle est conservative en masse. Cependant, ses mauvaises propriétés algébriques rendent difficiles le calcul des grandeurs qui caractérisent l'interface (normale, courbure, tangente). De plus, même si les algorithmes

de reconstruction sont efficaces pour améliorer la précision, ils sont complexes et coûteux à mettre en place en 3D. Finalement, la qualité de cette méthode dépendra à la fois de la méthode de reconstruction de l'interface et du schéma numérique pour la résolution de l'équation d'advection.

Les résultats des simulations prouvèrent que, l'OWC de forme cubique plus retable que l'OWC de forme cylindrique. Elle donna presse que le double que l'autre. Ainsi que le mur frontale de forme L, nous attribua le maximum d'efficacité et de fonctionnalité par rapport le mur simple dans les deux types de chambre. Car il sépara entre la perturbation de la turbulence de l'onde incidente et l'écoulement incident dans l'OWC. Et les autre testes nous donneront pas des résultats remarquables, sauf le teste de la forme de surface supérieur mais reste au coure le développement.

Nous recommandons, enfin de soutenir notre étude numérique avec une étude expérimentale. Prenant en compte tous les paramètres ignorés ou négligés dans ce travail. Et pour valider notre résultats de simulation numérique avec des résultats pratiques. Ainsi pour faire une basse des donnes succès dans ce domaine, quelle pourra de l'utiliser pour développer cette technologie.

# Bibliographie

- [1] Jacques Vernier, **Que sais-je “Les énergies renouvelables”**, éditions PUF **2010**.
- [2] [www.enr.fr](http://www.enr.fr) - **9 January 2013**.
- [3] <http://www.iea.org/> l'IEA (International Energy Agency)" **Rapport de la mission d'étude sur les énergies marines renouvelables"** Conseil général de l'économie de l'industrie de l'énergie et des technologies CGEDD N° 2012 / 31 / CGEIET / SG **Mars 2013**.
- [4] <http://energythic.com/view.php>.
- [5] Michael T. Morris-Thomas , Rohan J. Irvin , Krish P. Thiagarajan "**An Investigation Into The Hydrodynamic Efficiency Of An Oscillating Water Column**" Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering **November 2007**.
- [6] Mohammed Asid Zullah , Young-Ho Lee :"**Performance Evaluation Of A Direct Drive Wave Energy Converter Using CFD** " journal of Science Direct **2012** .
- [7] A.F. de O. Falcao , P.A.P. Justino : "**OWC Wave Energy Devices With Air Flow Control** " journal of Ocean Engineering **1998**.
- [8] B. Bouali et S. Larbi "**Contribution To The Geometry Optimization Of An Oscillating Water Column Wave Energy Converter** " TerraGreen 13 International Conference -Lebanon - **2013**.
- [9] D. V. Evans & R. Porter : "**Hydrodynamic Characteristics Of An Oscillating Water Column Device**" journal of Applied Ocean Research **1995**.
- [10] V. karami , m.J.Ketabdari, A. K. Akhtari : "**Numerical Modeling Of Oscillating Water Column Wave Energy Converter** " International Journal Of Advanced Renewable Energy Research **2012**.

- [11] A. Babarit J. Hals , M.J. Muliawan , A. Kurniawan , T. Moan , J. Krokstad : "**Numerical Benchmarking Study Of A Selection Of Wave Energy Converters**" journal of Science Direct **2012**.
- [12] Brad Stappenbelt , Paul Cooper, Massimo Fiorentini : "**Prediction of the Heave Response of a Floating Oscillating Water Column Wave Energy Converter**" School of Mechanical, Materials and Mechatronic Engineering, University of Wollongong , Australia.
- [13] M. N. Gomes , C. D. Nascimento , B. L. Bonafini , E. D. Santos, L. A. Isoldi ,and L. A. O.Rocha : "**Two-Dimensional Geometric Optimization Of An Oscillating Water Column Converter In Laboratory Scale**" Engenharia Térmica (Thermal Engineering) **2012**.
- [14] M.Duval, D.Astruc et D.Legendre "**Numerical Modeling Of A Wave Energy Converter Based On U-Shaped Interior Oscillating Water Column**" journal Elsevier **2013**.
- [15] Yali Zhang , Qing-Ping Zou , Deborah Greaves : "**Air-Water Two-Phase Flow Modelling Of Hydrodynamic Performance Of An Oscillating Water Column Device**" journal of Science Direct **2011**.
- [16] Nuno Fonseca , Joao Pessoa : "**Numerical Modeling Of A Wave Energy Converter Based On U-Shaped Interior Oscillating Water Column**" journal of Applied ocean Research **2013**.
- [17] Jose Perdigao, Antonio Sarmento : "**Overall-Efficiency Optimisation In OWC Devices**" Journal of Applied Ocean Research **2003**.
- [18] Tomoki Ikoma, Koichi Masuda, Hisaaki Maeda and Hikaru Omori : "**A Prediction Method and Efficiency of Primary Conversion of OWC Type WEC with Projecting Walls**" Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) Kanagawa, Japan journal of IEEE.

- [19] W. Sheng , T. Lewis and R. Alcorn : " **On Wave Energy Extraction Of Oscillating Water Column Device**" 4<sup>th</sup> International Conference on Ocean Energy **2013**.
- [20] www.enea-consulting.com "les énergies marines renouvelables, enjeux et solutions techniques" mai **2012**.
- [21] Université Paris Est,EDF R&D – CETMEF – ENPC " **Énergies Marines hydrolienne et houlo-motrice** " Conférence Institut Coriolis - **24/09/2010**.
- [22][http://www.ifremer.fr/dtmsi/colloques/seatech04/mp/article/1.contexte/1.1.EC\\_RIN-OPECST.pdf](http://www.ifremer.fr/dtmsi/colloques/seatech04/mp/article/1.contexte/1.1.EC_RIN-OPECST.pdf). **jan-2012**.
- [23] Tennekes H and Lumley J L, "A **First Course In Turbulence**" The MIT Press **1974**.
- [24] ANSYS Academic Research, Release **12.0** , "ANSYS CFX solver **theory guide**" ANSYS Inc **2009**.
- [25] Schmitt F G, "L'hypothèse de boussinesq est-elle une approximation?" 16<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Nice, France, **2003**.
- [26] Cousteix J, "Turbulence et couche limite" Cepadues, Toulouse, France, **1989**.
- [27] Wilcox D C "Turbulence Modeling for CFD" second edition, DCW Industries, **2002**.
- [28] S. Candel. " **Mécanique des fluides**". Dunod, **1990**.
- [29] F. Harlow and J. Welch. "Numerical Calculation Of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow Of Fluid With Free Surfaces ". Physics of Fluids, 8 :2182–2189,**1965**

- [30] B.J. Daly and A.E. Pracht. " **Numerical Study Of Density Current Surges. Physics Of Fluids** ", 11 :15–30, **1968**.
- [31] G. Tryggvason, B. Bunner, A. Esmaeeli, D. Juric, N. Al-Rawahi, W. Tauber, J. Han, S. Nas, and Y.-J. Jan. " **A Front-Tracking Method For The Computations Of Multiphase Flow** ". Journal of Computational Physics, 169 :708–759, **2001**.
- [32] kateryna voronetska " **Simulation Numérique Directe Des Ecoulements A Phases Dispersées** " thèse -l'université bordeaux **Mars 2012**.
- [33] B.J. Daly and A.E. Pracht. " **Numerical study of density current surges**". Physics of Fluids, 11 :15–30, **1968**.
- [34] C.W. Hirt and B.D. Nichols. " **Volume Of Fluid (VOF) Method For The Dynamics Of Free Boundaries**". Journal of Computational Physics, 39 :201–225, **1981**.
- [35] W.F. Noh and P. Woodward. " **SLIC (Simple Line Interface Calculation). Proceedings** " , Fifth International Conference on Numerical Methods in Fluid Dynamics, Lecture Notes in Physics, 59 :330–340, **1976**.
- [36] B.J. Parker and D.L. Youngs." **Two and three dimensional Eulerian simulation of fluid flow with material interfaces** ". Technical report, UK Atomic Weapons Research Establishment (AWRE), **1992**.
- [37] J.S. Saltzman and E.G. Packett." **A 3-D adaptive mesh refinement algorithm for multimaterial gas dynamics** ". Physica D, 60 :84–104, **1992**.
- [38] S. Osher and J.A. Sethian. " **Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations** ". Journal of Computational Physics, 79 :12–49, **1988**.

- [39] W.J. Rider and D.B. Kothe." **Stretching And Tearing Interface Tracking Methods** ". In 12th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, San Diego, California, United States, **June 19-22 1995**.
- [40] N.Jarry " **études expérimentales et numériques de la propagation des vagues au-dessus de bathymétries complexes en milieu côtier** " Ecole doctorale des Sciences Fondamentales et Appliquées - thèse - **16 décembre 2009**.
- [41]<http://www.tekneco.it/energia/le-correnti-oceaniche-come-fonte-dienergia/>  
**9 janvier 2012**.
- [42] <http://news.bbc.co.uk/2/hi/sci/tech/1032148.stm> **20 November 2000**.