

N° :



Département de Physique

Faculté des Sciences, Université M'hamed Bougara de Boumerdès

Mémoire

Pour obtenir le diplôme de :

Master en Physique

Spécialité : Dynamique des Fluides et Energétique

Présenté par :

ABDOUL HAQ AHMED MOHAMED Mohamed

Intitulé :

**Etude numérique d'un écoulement diphasique
liquide-gaz à travers une singularité (Venturi)**

Soutenu publiquement le 06/07/2022, devant le jury composé de :

Mme. C. ABDELLAHOUM	MCA (UMBB)	Présidente
Mr. N.B. SAFER	MCB (UMBB)	Examineur
Mr. M. ZAMOUM	Pr (UMBB)	Encadrant

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier Allah le tout-puissant et miséricordieux de m'avoir donné la santé, la patience et la volonté d'accomplir ce mémoire.

Mes plus sincères et distingués remerciements vont en second lieu à mon encadreur le professeur Zamoum Mohammed de l'université M'hamed Bougara de Boumerdès, pour la qualité de son encadrement remarquable, ses appréciations compétentes, ses précieux conseils, et surtout pour la confiance qu'il m'a témoignée durant la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à adresser mes vifs remerciements à Mme. Abdellahoum Chahrazad, Maître de conférences classe A à l'université M'hamed Bougara de Boumerdès, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

J'adresse également mes respectueux remerciements à M. Safer Nabil, Maître de conférences classe B à l'université M'hamed Bougara de Boumerdes, d'avoir accepté d'examiner et participer au jury de ce mémoire.

A toi Mlle. Imane Benghalia, doctorante à l'université M'hamed Bougara de Boumerdès, je dis merci très sincèrement pour ton aide précieuse et ton temps dont tu m'as fait part durant la réalisation de ce mémoire.

Sans oublier tous mes enseignants et enseignantes ayant contribué à ma formation durant ces longues années d'études.

Enfin, je tiens à remercier profondément toutes personnes ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.



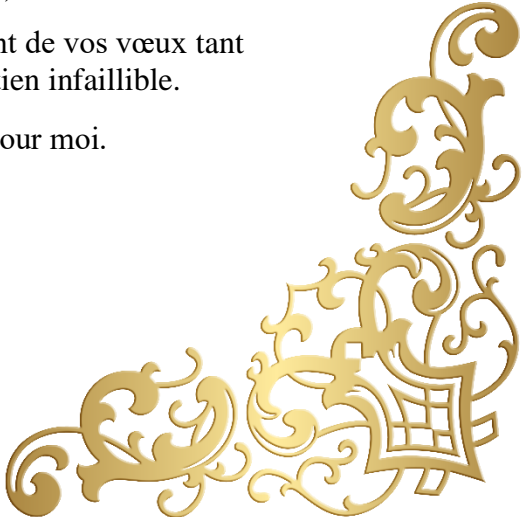

Dédicace

Je dédie ce mémoire à ma très chère mère qui a été toujours à mes côtés et m'a toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance, qu'elle trouve ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'elle a consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

A toute ma famille

A Krifali Anis et toute sa famille

Et a tous mes ami(e)s



Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués et le fruit de votre soutien infailible.

Merci d'être toujours là pour moi.

Mohamed.

Table des matières

Table des matières

Nomenclature	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Résumé	
Introduction Générale -----	1
Chapitre I. Généralités sur les écoulements diphasiques-----	3
I.1. Introduction-----	3
I.2. Notions fondamentales des écoulements diphasiques -----	3
I.2.1. Définition d'un écoulement diphasique-----	3
I.2.2. Définition d'une phase-----	3
I.2.3. Concept d'interface-----	3
I.2.4. Notion de tension de surface -----	4
I.2.5. Les régimes d'écoulement diphasique-----	5
I.2.5.1. Régimes d'écoulements dans une conduite verticale -----	5
I.2.5.1.1. Écoulement à bulles (Bubble flow) -----	5
I.2.5.1.2. Écoulement avec bouchons (Slug or plug flow) -----	5
I.2.5.1.3. Écoulement à forte coalescence (Churn flow)-----	6
I.2.5.1.4. Écoulement annulaire (Annular) -----	6
I.2.5.1.5. Écoulement annulaire avec brouillard (Wispy annular) -----	6
I.2.5.2. Régimes d'écoulements dans une conduite horizontale-----	7
I.2.5.2.1. Écoulement à bulles dispersées (Dispersed bubble) -----	7
I.2.5.2.2. Écoulement bouchons (Plug flow) -----	7
I.2.5.2.3. Écoulement stratifié (Stratified flow) -----	7
I.2.5.2.4. Écoulement stratifié avec vagues (Stratified wavy flow)-----	7
I.2.5.2.5. Écoulement avec vagues moutonnantes (Semi-Slug or Slug flow) -----	7
I.2.5.2.6. Écoulement annulaire dispersé (Annular dispersed flow) -----	8
I.2.6. Applications des écoulements diphasiques-----	8
I.3. Phénomène de cavitation -----	10
I.3.1. Définition-----	10
I.3.2. Les principales formes de cavités de vapeur -----	11
I.3.3. Les régimes de cavitation -----	11
I.3.4. Situations d'apparition et de développement de la cavitation -----	12
I.3.5. Effet de la cavitation -----	13
I.3.5.1. Le bruit -----	13
I.3.5.2. L'érosion -----	13

I.3.5.3. La chute des performances-----	13
I.3.6. Applications de la cavitation -----	13
I.3.7. Revue bibliographique-----	14
I.4. Conclusion-----	19
Chapitre II. Modélisation et méthode numérique-----	20
II.1. Introduction-----	20
II.2. Formulation du problème et équations gouvernantes-----	20
II.2.1. Modèles d'écoulement et de turbulence -----	21
II.2.2. Modèle de cavitation-----	22
II.3. Présentation du Logiciel ANSYS_Workbench et ANSYS_Fluent -----	23
II.3.1. ANSYS_Workbench -----	23
II.3.2. ANSYS_Fluent -----	23
II.4. Maillage-----	23
II.4.1. Choix du type de maillage-----	23
II.4.1.1. Maillage structuré (quadra/hexa) -----	23
II.4.1.2. Maillage non structuré (tri/tétra)-----	24
II.4.1.3. Maillage hybride -----	24
II.4.2. Techniques générales de génération du maillage-----	24
II.4.3. Qualité d'un maillage -----	24
II.4.4. Génération d'un maillage couche limite -----	25
II.5. Création de la géométrie et génération du maillage sous ANSYS_Workbench -----	25
II.5.1. Création de la géométrie-----	25
II.5.2. Génération du maillage-----	29
II.6. Test de maillage-----	29
II.7. Validation numérique -----	30
II.8. Conclusion-----	31
Chapitre III. Résultats et discussion-----	32
III.1. Introduction-----	32
III.2. Géométrie utilisée (Venturi)-----	32
III.3. Propriétés thermo-physiques du fluide utilisé -----	32
III.4. Conditions aux limites -----	32
III.5. Méthodologie de résolution numérique-----	33
III.6. Influence du rapport de pression du Venturi -----	33
III.7. Influence de la longueur du col du Venturi -----	36
III.8. Conclusion-----	39
Conclusion Générale et Perspectives -----	40
Références Bibliographiques-----	41

Nomenclature

Nomenclature

Caractères alphanumériques

GRANDEUR	DESCRIPTION	UNITÉ
d	Diamètre de col du Venturi	m
D	Diamètre du Venturi	m
G_k	Génération d'énergie cinétique turbulente	$kg/(m^2 \cdot s^2)$
G_ω	Génération du taux de dissipation spécifique	$kg/(m^2 \cdot s^2)$
k	Energie cinétique turbulente	m^2/s^2
l	Longueur de col du Venturi	m
l/d	Rapport adimensionnel (longueur/diamètre)	—
n_b	Densité du nombre de bulles	—
P	Pression	Pa
P_{ext}	Pression extérieur	Pa
P_{int}	Pression intérieur	Pa
P_v	Pression de saturation (vaporisation) de la vapeur du liquide	Pa
P_∞	Pression en aval entièrement récupérée	Pa
R_1	Rayon relatif au repère 1	m
R_2	Rayon relatif au repère 2	m
R_b	Rayon de la bulle	m
R_c	Débit massique due à la condensation	kg/s
R_e	Débit massique due à l'évaporation	kg/s
RP	Rapport de pression (entré/sortie)	—
S	Tenseur de vitesse de déformation	$1/s$
S_{ij}	Tenseur de vitesse de déformation suivant l'indice de position i, j	$1/s$
v_i	Vecteur vitesse suivant l'indice de position i	m/s
$v_{i,m}$	Vecteur vitesse de la phase mixture suivant l'indice de position i	m/s
v_j	Vecteur vitesse suivant l'indice de position j	m/s
$v_{j,m}$	Vecteur vitesse de la phase mixture suivant l'indice de position j	m/s
v_m	Vecteur vitesse de la phase mixture	m/s
v_q	Vecteur vitesse de la phase individuelle	m/s

V_v	Volume de la phase vapeur	m^3
V_m	Volume de la phase mixture	m^3
x	Coordonnée cartésienne	m
x_i	Coordonnée cartésienne suivant l'indice de position i	m
x_j	Coordonnée cartésienne suivant l'indice de position j	m
Y_k	Dissipation de l'énergie cinétique turbulente	$kg/(m^2 \cdot s^2)$
Y_ω	Dissipation du taux de dissipation spécifique	$kg/(m^2 \cdot s^2)$

Caractères grecques

GRANDEUR	DESCRIPTION	UNITÉ
α	Angle de convergent du Venturi	<i>degré</i>
α^*	Un paramètre de l'Eq.6	—
α_v	Fraction volumique de la vapeur	—
α_q	Fraction volumique de la phase individuelle	—
β	Angle de divergent du Venturi	<i>degré</i>
δ_{ij}	Symbole de Kronecker	—
κ	Courbure moyenne de la surface	$1/m$
μ	Viscosité dynamique	<i>Pa.s</i>
μ_m	Viscosité dynamique de la phase mixture	<i>Pa.s</i>
μ_t	Viscosité dynamique turbulente	<i>Pa.s</i>
ρ	Masse volumique	kg/m^3
ρ_l	Masse volumique du liquide	kg/m^3
ρ_m	Masse volumique de la phase mixture	kg/m^3
ρ_q	Masse volumique de la phase individuelle	kg/m^3
ρ_v	Masse volumique de la phase vapeur	kg/m^3
σ	Tension superficielle ou de surface	N/m
σ_k	Constante réglable attribuée à l'énergie cinétique turbulente	—
σ_ω	Constante réglable attribuée au taux de dissipation spécifique	—
ω	Taux de dissipation spécifique	m^2/s^3

Liste des figures

Figure 1: Représentation de l'interface, d'après[1] ----- 4

Figure 2: Particule fluide sphérique----- 4

Figure 3: Principaux régimes d'écoulement en écoulement gaz-liquide ascendant dans des tubes verticaux, d'après[2]----- 6

Figure 4: Principaux régimes d'écoulement en écoulement gaz-liquide dans des tubes horizontaux, d'après[2]----- 8

Figure 5: FPSO, flottant, production, stockage et déchargement pour la production offshore de pétrole, d'après[2]----- 9

Figure 6: Une centrale à vapeur moderne. L'ébullition et les écoulements diphasiques ont lieu dans le générateur de vapeur tandis que l'évaporation des gouttelettes dans la tour de refroidissement, d'après[2]----- 9

Figure 7: Réacteur à eau sous pression (en haut) et réacteur à eau bouillante (en bas), d'après[2] -10

Figure 8: Schéma du Venturi-----20

Figure 9: Création du projet -----25

Figure 10: Propriétés de la géométrie-----26

Figure 11: Interface Design Modeler -----27

Figure 12: Création de la géométrie, cas $l/d = 0$ -----28

Figure 13: Surface de la géométrie à mailler, cas $l/d = 0$ -----28

Figure 14: Maillage généré, cas $l/d = 0$ -----29

Figure 15: Profils de turbulence et de vitesse prévus avec une densité de maillage variable, d'après[25] -----30

Figure 16: (a) Comparaison des résultats numériques et expérimentaux sur la chute de pression par rapport à la vitesse d'entrée avec Shi, (b) Comparaison des résultats numériques et expérimentaux sur le débit volumique par rapport à la chute de pression avec Simpson, (c) Comparaison du débit massique par rapport à l'inverse du rapport de pression avec celui d'Abdulaziz, d'après[29] -----31

Figure 17: Schéma du Venturi utilisé-----32

Figure 18: Distribution de la pression statique en fonction de la position pour différents rapports de pressions -----34

Figure 19: Distribution moyenne de la pression, le long du panneau de vannes pour différentes conditions de fonctionnement, d'après[36]-----35

Figure 20: Distribution de la vitesse axiale en fonction de la position pour différents rapports de pressions -----35

Figure 21: Contours des fractions volumiques de vapeur pour différents rapports de pressions ----36

Figure 22: Distribution de la pression statique en fonction de la position pour différentes longueurs de col -----37

Figure 23: Distribution de la vitesse axiale en fonction de la position pour différentes longueurs de col -----38

Figure 24: Contours des fractions volumiques de vapeur pour différentes longueurs de col -----39

Liste des tableaux

Tableau 1: Configurations du Venturi-----20
Tableau 2: Informations sur le maillage-----30
Tableau 3 : Propriétés thermo-physiques du fluide -----32

Résumé

Les écoulements diphasiques liquide-gaz sont présents dans plusieurs domaines notamment les installations industrielles et les systèmes hydrauliques. La présence de deux phases liquide et gaz rend l'étude de ces écoulements très complexe. Pour une meilleure compréhension de ces phénomènes, nous avons étudié numériquement un écoulement diphasique liquide-gaz à travers un Venturi. Cette étude a été réalisée à l'aide du code commercial CFD, Ansys Fluent (v.2022 R1) qui consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations régissant le fluide. Les effets de la turbulence ont été pris en compte en se servant du modèle de turbulence $k-\omega$ SST avec Schnerr-Sauer comme modèle de cavitation. Les résultats obtenus montrent les effets du rapport de pression (pression d'entrée/pression de la sortie) et de la géométrie (longueur du col) du Venturi sur les différents paramètres de l'écoulement à savoir ; la pression, la vitesse et la fraction volumique de la vapeur. En effet, le rapport de pression et la longueur du col du Venturi ont une influence significative sur l'apparition et l'évolution de la phase gazeuse (cavitation) dans le liquide.

Mots clés: écoulement diphasique, cavitation, CFD, Venturi.

Abstract

Two-phase liquid-gas flows are present in several fields, in particular industrial installations and hydraulic systems. The presence of two phases, liquid and gas, makes the study of these flows very complex. For a better understanding of these phenomena, we numerically studied a two-phase liquid-gas flow through a Venturi. This study was carried out using the commercial CFD code, Ansys Fluent (v.2022 R1) which consists in studying the movements of a fluid, or their effects, by the numerical resolution of the equations governing the fluid. The effects of turbulence were taken into account using the $k-\omega$ SST turbulence model with Schnerr-Sauer as the cavitation model. The obtained results show the effects of the pressure ratio (inlet pressure/outlet pressure) and the geometry (throat length) of the Venturi on the various parameters of the flow, namely; fluid pressure, velocity and volume fraction. Indeed, the pressure ratio and the length of the Venturi throat have a significant influence on the appearance and evolution of the gas phase (cavitation) in the liquid.

Keywords: two-phase flow, cavitation, CFD, Venturi.

Introduction Générale

Introduction Générale

Les écoulements diphasiques liquide-gaz interviennent dans de nombreux dispositifs industriels. Ce type d'écoulement est causé par l'augmentation de la température au-dessus de la température d'ébullition (phénomène d'ébullition) ou par une chute de pression inférieure à la pression de la vapeur saturante (phénomène de cavitation). Ce dernier a fait l'objet de notre travail. L'apparition de la cavitation dans les installations industrielles et en particulier hydrauliques conduit à des pertes importantes de performance de ces installations, à des problèmes d'instabilités de fonctionnement des machines et à l'érosion des parois du composant. Pour cela la compréhension de ce phénomène est primordiale afin d'assurer le bon fonctionnement des machines hydrauliques.

Compte tenu de la complexité des phénomènes physiques entrant en jeu dans la cavitation, et malgré le nombre important des études menées sur le sujet, plusieurs questions ont été posées jusqu'à ce jour. De nombreux chercheurs ont utilisé le Venturi pour étudier expérimentalement et numériquement ce phénomène car il représente une géométrie relativement simple qui permet d'avoir la dépression et par conséquent la cavitation. Ce dispositif est utilisé généralement pour mesurer le débit.

La cavitation se manifeste par la formation des structures de vapeur qui peuvent exister sous plusieurs formes, ce qui nous permet de distinguer plusieurs types de cavitation. Parmi lesquels, la cavitation à bulles qui représente le contexte de notre travail. Avec tous les champs d'applications dans lesquelles la cavitation se développe son étude est du domaine de la recherche fondamentale. Sa modélisation va continuer à susciter beaucoup d'intérêt et donc divers modèles ont été proposés, les plus couramment utilisées étant basées sur des formes réduites de l'équation de Rayleigh-Plesset à savoir le modèle de Singhal et al, le modèle de Schnerr-Sauer sur lequel est basé notre travail puis le modèle de Zwart et al. Et jusqu'à ce jour la modélisation du phénomène de cavitation reste toujours une source de challenge pour les chercheurs.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier numériquement un écoulement diphasique liquide-gaz à travers un Venturi, de plusieurs longueurs de col, en utilisant un modèle multiphasique (Mixture) de la mécanique des fluides CFD (Computational Fluid Dynamics). Les effets de la turbulence ont été pris en compte en se servant du modèle de turbulence $k-\omega SST$ avec Schnerr-Sauer comme modèle de cavitation. La résolution numérique de ces modèles, à l'aide du code commercial ANSYS_Fluent, permet d'étudier les influences du rapport de pression et de la longueur du col du Venturi sur les différents paramètres de l'écoulement à savoir la pression, la vitesse et la formation de la fraction volumique de la vapeur.

Ce mémoire se répartit en trois chapitres fondamentaux :

Le premier chapitre constitue un aperçu global sur la généralité des écoulements diphasiques (les différents régimes existants et champ d'application) ainsi que le phénomène de cavitation et la revue bibliographique visant à exposer et analyser des progrès scientifiques et techniques réalisés en conséquence de ce phénomène.

Le deuxième chapitre consiste à présenter les équations gouvernantes de l'écoulement diphasique liquide-gaz. Nous avons opté pour le modèle de cavitation de Schnerr-Sauer. Ce modèle est choisi du fait que numériquement il est robuste et converge rapidement. Une explication simple des étapes à mener de la création du projet et de la génération du maillage sont donnée.

Le troisième chapitre est consacré aux résultats numériques obtenus à l'aide du solveur ANSYS_Fluent en résolvant les équations de modèle ainsi présenté dans le chapitre II. Nous avons présenté deux résultats: il s'agit des effets du rapport de pression (pression d'entrée de Venturi/pression de sortie du Venturi) et la géométrie (longueur du col) du Venturi sur les différents paramètres de l'écoulement à savoir la pression, la vitesse et la fraction volumique de la vapeur.

Nous terminons par une conclusion générale accompagnée d'un ensemble de perspectives.

Chapitre I. Généralités sur les écoulements diphasiques

Chapitre I. Généralités sur les écoulements diphasiques**I.1. Introduction**

Les écoulements diphasiques comportent deux phases continues et par conséquent le cas le plus simple après les écoulements monophasiques. Sur le plan physico-chimique ces deux éléments peuvent avoir des propriétés et des phases différentes (liquide-gaz), comme ils peuvent être de même phase (liquide-liquide, gaz-gaz). En ce qui nous concerne, nous nous intéressons aux écoulements liquide-gaz. Les systèmes gaz-liquide diphasiques occupent actuellement une place importante dans l'industrie et les installations technologiques. Ils présentent une certaine complexité par rapport aux écoulements monophasiques due, d'une part, à la dynamique des interfaces (déformation, rupture, coalescence) qui varie d'une façon inattendue, et d'autre part, l'évolution de ces interfaces à des échelles très différentes pouvant varier de quelques microns à quelques mètres.

Ce chapitre présente un aperçu global de la généralité des écoulements diphasiques (les différents régimes existants et champ d'application) ainsi que le phénomène de cavitation et une revue bibliographique visant à exposer et analyser des progrès scientifiques et techniques réalisés en conséquence de ce phénomène.

I.2. Notions fondamentales des écoulements diphasiques

Une brève description de certains des concepts nécessaires à la compréhension de l'écoulement diphasique est donnée.

I.2.1. Définition d'un écoulement diphasique

Écoulement montrant deux phases non miscibles avec des caractéristiques dynamiques non identiques. Par exemple: écoulement d'eau avec des bulles de gaz ou avec des particules de sédiments, écoulement de gaz avec des particules ou des gouttelettes de liquide.

I.2.2. Définition d'une phase

Bien que la notion de phase soit très simple, il est difficile de la définir précisément. Une bonne définition de la phase serait une définition d'un système thermodynamique de l'état de la matière (solide, liquide, ou gaz). En général, les phases sont continues lorsqu'elles occupent une surface continue de l'espace, et dispersées lorsqu'elles occupent une surface discontinue. Cela signifie que deux états d'un système sont dans la même phase s'il y a transformation de la matière passant d'un état à un autre sans changement brutal des propriétés thermodynamiques.

I.2.3. Concept d'interface

C'est une zone de faible épaisseur, où les grandeurs physiques subiront une absence de continuité ou un bond. Au niveau moléculaire, une interface liquide-gaz correspond à une zone de transition dans laquelle la densité passe graduellement d'une valeur moyenne dans le liquide à une valeur

moyenne dans le gaz. La courbe en trait plein de la figure 1 représente cette variation. La taille de la zone de transition est de l'ordre de certaines trajectoires moyennes libres de molécules. Dans le sens thermodynamique du terme, ce concept d'interface permet d'évoquer en général la surface de séparation qui existe entre deux phases. L'interface est donc causée par la discontinuité des forces intermoléculaires entre les deux phases.

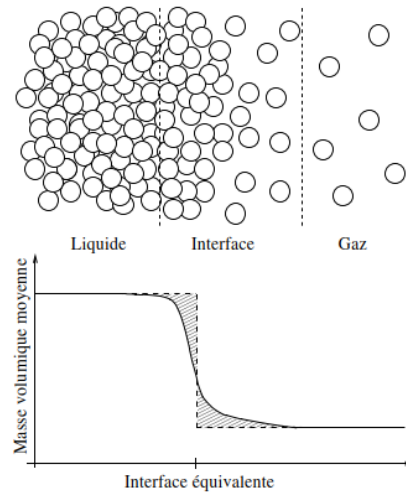


Figure 1: Représentation de l'interface, d'après[1]

I.2.4. Notion de tension de surface

La tension de surface est la tension qui existe sur la surface de séparation de deux phases, définie comme la force qui doit être appliquée à l'unité de longueur le long d'une ligne perpendiculaire à la surface d'un liquide en équilibre pour provoquer l'extension de cette surface, ou comme le travail exercé par cette force par unité de surface. On peut formaliser cette propriété de la manière suivante: il existe une différence de pression entre le liquide et le gaz, égale à la courbure locale de la surface κ multipliée par un coefficient σ , appelé coefficient de tension de surface, dépendant des deux fluides en présence. La pression la plus forte règne dans le fluide dont la surface est convexe (voir figure 2).

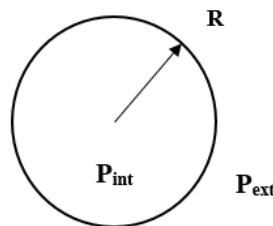


Figure 2: Particule fluide sphérique

$$P_{int} - P_{ext} = \kappa\sigma \tag{1}$$

L'équation (1) s'appelle équation de Laplace, κ est la courbure moyenne de la surface, c'est-à-dire la somme des deux courbures principales :

$$\kappa = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2)$$

Si la pression est uniforme à l'intérieur et à l'extérieur de la goutte, le saut de pression est constant sur la surface et, par conséquent, la courbure l'est. La force qui en résulte est orientée du gaz vers le liquide. Une tension de surface élevée implique une forte résistance au mélange.

I.2.5. Les régimes d'écoulement diphasique

Les écoulements diphasiques liquide-gaz peuvent se manifester dans différentes structures topologiques. Ces différentes structures sont généralement connues sous le nom de régimes d'écoulement ou modèles d'écoulement. Les paramètres usuellement utilisés pour l'identification des régimes d'écoulements sont les vitesses superficielles des deux phases qui représentent le débit volumétrique de la phase correspondante divisé par la section de la conduite. Cependant, les vitesses superficielles des phases seules ne sont pas suffisantes pour caractériser la configuration géométrique de l'écoulement diphasique. En général, le régime d'écoulement dépend des propriétés physiques des phases et aussi de la géométrie de la conduite.

I.2.5.1. Régimes d'écoulements dans une conduite verticale

L'écoulement diphasique dans une conduite verticale tend à être plus symétrique, car les forces de pesanteur agissent identiquement dans les directions circonférentielles. La force gravitationnelle joue un rôle prédominant dans la phase liquide (et donc dans tout l'écoulement diphasique) dans un canal vertical. La figure 3 montre les structures d'écoulement rencontrées dans un écoulement vertical ascendant.

I.2.5.1.1. Écoulement à bulles (Bubble flow)

Les bulles de vapeur (gaz) sont disséminées dans la phase liquide continue. La taille des bulles varie considérablement mais est généralement petite par rapport au diamètre du tube.

I.2.5.1.2. Écoulement avec bouchons (Slug or plug flow)

Au fur et à mesure que les bulles grossissent et commencent à se consolider, des bouchons peuvent se former. Les bouchons se présentent souvent sous la forme d'une balle dans un écoulement ascendant et peuvent être séparés par des espaces occupés par le liquide avec une dispersion de bulles de petite taille. Couramment, ces bouchons en forme de balles sont appelés « Bulles de Taylor » après une instabilité de Taylor.

I.2.5.1.3. Écoulement à forte coalescence (Churn flow)

Quand les bulles grossissent, elles commencent à se briser résultant ainsi à un écoulement plus aléatoire et instable. Bien que la phase vapeur s'écoule continuellement vers le haut, la phase liquide peut subir des mouvements intermittents de haut en bas car la force de cisaillement de la phase vapeur peut équilibrer le gradient de pression imposé et la force de gravité descendante. Ce modèle oscillatoire est appelé l'écoulement à forte coalescence ou écoulement semi-annulaire, et représente un régime intermédiaire entre l'écoulement à bouchons et l'écoulement annulaire. Ce type d'écoulement peut passer directement d'un écoulement à bouchons à un écoulement annulaire, lorsque le diamètre du tube vertical est petit sans passer par ce modèle.

I.2.5.1.4. Écoulement annulaire (Annular)

À une valeur de qualité relativement élevée, une fine couche de liquide s'écoule le long de la paroi interne du tube et le noyau central de l'écoulement est constitué d'une phase vapeur (gaz). L'écoulement annulaire se produit lorsque la force de cisaillement de surface sur le film liquide (par rapport aux grandes vitesses de gaz ou de vapeur) l'emporte sur la gravité. Le fluide est ensuite repoussé du centre du tube pour former un film fluide sur la paroi du tube postérieur. Étant donné que la vitesse de la phase vapeur (au cœur du tube) est beaucoup plus grande que la vitesse de la phase liquide, le noyau de la vapeur peut onduler la couche liquide et former des vagues dans le film liquide. Il est également possible qu'une partie de la phase liquide soit entraînée sous forme de gouttelettes dans le noyau gazeux, ou que certaines bulles soient entraînées dans le film liquide.

I.2.5.1.5. Écoulement annulaire avec brouillard (Wispy annular)

A l'une des valeurs considérables du débit de liquide, la concentration de gouttelettes dans le noyau de vapeur (gaz) augmente. La fusion de ces gouttelettes liquides peut entraîner des ruptures ou des mèches de liquide dans le noyau de gaz.

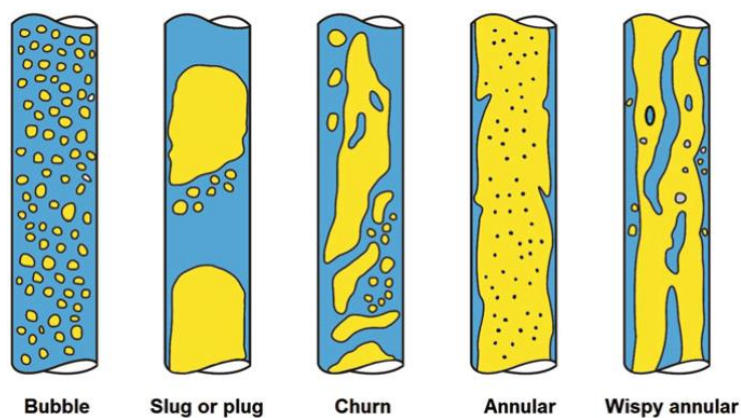


Figure 3: Principaux régimes d'écoulement en écoulement gaz-liquide ascendant dans des tubes verticaux, d'après [2]

I.2.5.2. Régimes d'écoulements dans une conduite horizontale

L'écoulement diphasique horizontal a des modèles d'écoulement différents de ceux que l'on rencontre dans l'écoulement vertical, en raison des forces de gravité qui agissent perpendiculairement à la direction de l'écoulement. L'écoulement diphasique dans un canal horizontal est plus compliqué que celui d'un écoulement diphasique vertical, car l'écoulement n'est normalement pas axisymétrique en raison des effets de la gravité. Sur la figure 4 sont illustrés les types d'écoulements rencontrés dans un écoulement diphasique horizontal.

I.2.5.2.1. Écoulement à bulles dispersées (Dispersed bubble)

Dans la phase liquide continue, la phase vapeur (gazeuse) apparaît sous forme de bulles discrètes. Les bulles ont tendance à remonter vers le haut du flux en raison des effets de flottabilité. Lorsque la vitesse du liquide est grande, les bulles peuvent être réparties uniformément dans le liquide comme dans le cas d'un écoulement vertical.

I.2.5.2.2. Écoulement bouchons (Plug flow)

L'amélioration de la qualité entraîne une plus grande taille de bulles de vapeur (gaz) et la formation de bouchons sphériques qui ont tendance à rester au sommet du canal en raison des forces de flottabilité.

I.2.5.2.3. Écoulement stratifié (Stratified flow)

La vitesse du liquide et de la vapeur (gaz) sont relativement faibles dans ce régime, et la qualité est relativement considérable. Le liquide s'écoule le long du fond du canal en raison de la gravité, tandis que la phase vapeur (gazeuse) s'écoule au sommet. Il est également possible qu'une très fine couche de liquide se forme sur le canal d'écoulement.

I.2.5.2.4. Écoulement stratifié avec vagues (Stratified wavy flow)

Dans l'écoulement stratifié lorsque la vitesse de la vapeur (gaz) augmente, les forces de cisaillement de la phase vapeur (gazeuse) provoquent des ondulations au-dessus de la phase liquide et entraînent la formation d'ondes (vagues) au niveau de l'interface liquide-vapeur (gaz). Les vagues roulent sur les côtés du canal et la couche de liquide au fond commence à s'étirer et à s'amincir.

I.2.5.2.5. Écoulement avec vagues moutonnantes (Semi-Slug or Slug flow)

L'amplitude des ondes formées augmente au fur et à mesure que le débit du liquide augmente, les crêtes peuvent ainsi recouvrir tout le canal et un pont commence à se former séparant les structures (bouchons) ainsi formées. La phase liquide reste aspirée au fond du canal par la gravité, le haut du canal étant toujours mouillé par un film relativement mince de liquide.

I.2.5.2.6. Écoulement annulaire dispersé (Annular dispersed flow)

Semblable au modèle d'écoulement vertical, la couche de liquide s'écoule près de la paroi interne du canal et la vapeur (gaz) s'écoule dans le noyau central. Néanmoins, la couche de liquide au fond du canal est plus épaisse qu'au sommet en raison des effets de la gravité.

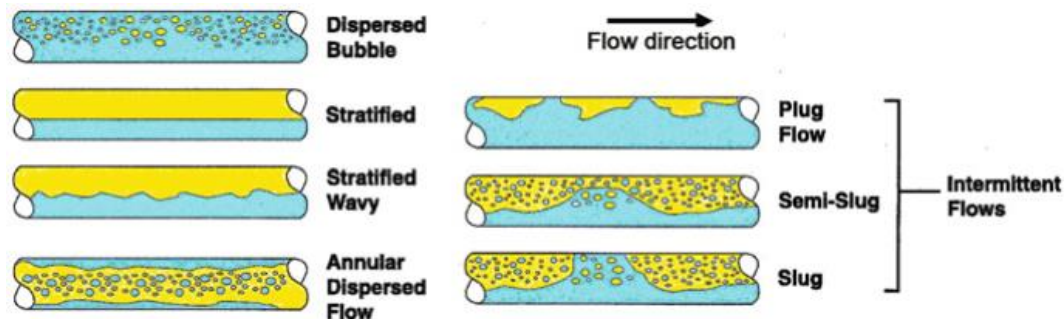


Figure 4: Principaux régimes d'écoulement en écoulement gaz-liquide dans des tubes horizontaux, d'après[2]

I.2.6. Applications des écoulements diphasiques

Nous présentons maintenant quelques exemples où les écoulements diphasiques jouent un effet dominant dans la conception et le fonctionnement de très grands systèmes d'ingénierie.

- La production offshore: elle est importante pour l'extraction des hydrocarbures depuis les années 1950. Il s'agit habituellement d'une plateforme de forage qui exploite un certain nombre de puits pour produire du pétrole brut. Le pétrole sort du sol habituellement sous forme d'un mélange de pétrole brut, d'eau de mer, de sable et de gaz. Un mélange multiphasique à composantes multiples qui doit être manipulé avec précaution en raison des divers dangers et des équipements extrêmement coûteux impliqués. La figure 5 montre les puits de production, les plates-formes de forage, et un navire flottant de production, de stockage et de déchargement.
- La production d'électricité à partir du pétrole, charbon ou du gaz: La majorité des centrales électriques utilisent un cycle à vapeur où l'eau est le fluide de travail. La figure 6 montre le cycle de la vapeur d'une usine moderne ; l'eau est vaporisée dans la section du générateur de vapeur à haute pression et la vapeur à basse pression sortante de la turbine se condense dans le condenseur. Encore une fois, des écoulements diphasiques et des processus de changement de phase sont présents tout au long de l'usine à vapeur.

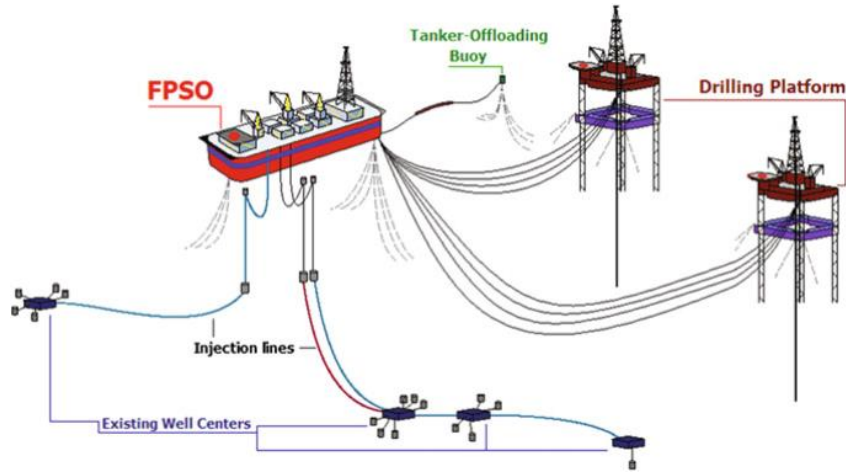


Figure 5: FPSO, flottant, production, stockage et déchargement pour la production offshore de pétrole, d'après[2]

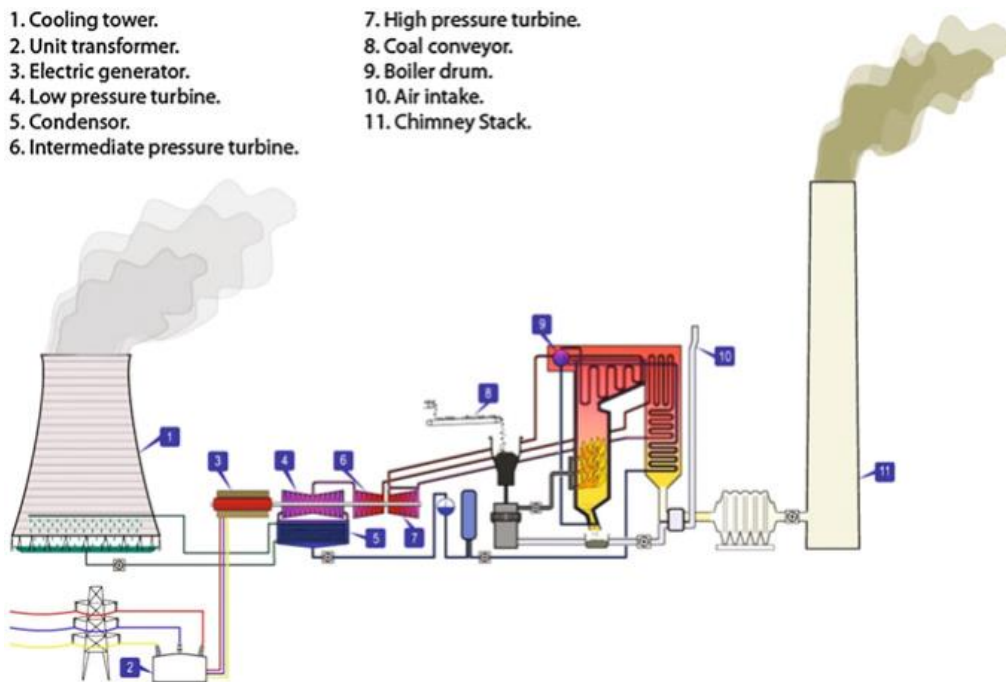


Figure 6: Une centrale à vapeur moderne. L'ébullition et les écoulements diphasiques ont lieu dans le générateur de vapeur tandis que l'évaporation des gouttelettes dans la tour de refroidissement, d'après[2]

- Dans une centrale nucléaire: la chaudière nucléaire est la partie de la centrale où l'eau à haute pression est chauffée dans la cuve du réacteur par la réaction nucléaire en chaîne qui se produit dans les barres de combustible. La vapeur est ensuite produite (soit dans la cuve du réacteur, comme dans un réacteur à eau bouillante, figure 7 (en bas), soit dans un générateur de vapeur, comme dans un réacteur à eau sous pression, figure 7 (en haut), et utilisée dans la turbine génératrice pour produire de l'énergie électrique. L'écoulement diphasique de l'eau et de la vapeur s'effectue dans des équipements très coûteux. Pour faire

fonctionner le système de manière sûre et efficace pendant toute la durée de vie de l'équipement, il faut une connaissance approfondie de l'écoulement diphasique et du transfert de chaleur.

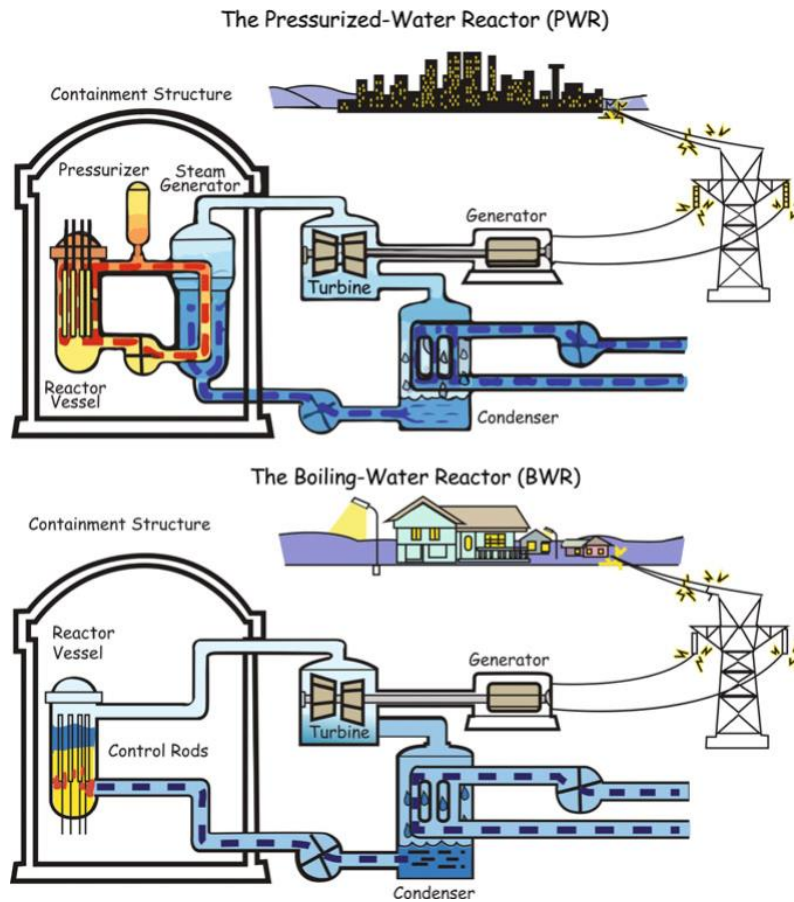


Figure 7: Réacteur à eau sous pression (en haut) et réacteur à eau bouillante (en bas), d'après[2]

Les systèmes conventionnels de production d'électricité de ces deux principaux types sur les centrales nucléaires sont assez similaires et fonctionnent dans des conditions thermodynamiques très similaires. Dans le réacteur à eau bouillante (*BWR*), la génération directe de vapeur a lieu dans le cœur du réacteur tandis que dans le réacteur à eau sous pression (*PWR*), elle a lieu dans le générateur de vapeur intermédiaire.

I.3. Phénomène de cavitation

I.3.1. Définition

La cavitation, en d'autres termes l'apparition de cavités de vapeur à l'intérieur d'un milieu liquide initialement homogène, se produit dans des situations très différentes. Selon la configuration d'écoulement et les propriétés physiques du liquide, celui-ci peut présenter diverses caractéristiques. Donc, la cavitation peut être définie comme la rupture d'un milieu liquide sous de très basses pressions qui peut avoir lieu dans un liquide au repos comme dans un liquide en mouvement.

Un exemple simple de tous les jours est celui d'une seringue. Un remplissage correct nécessite que le mouvement du piston soit relativement lent, sinon la colonne de liquide casse et le remplissage s'arrête. Du fait des pertes de charge à l'intérieur de l'aiguille, la pression à l'intérieur de la seringue descend en dessous de la valeur atmosphérique. La différence de pression augmente avec la vitesse du piston. De plus, à l'entrée de la seringue, où le flux est un jet de liquide submergé, des fluctuations de pression turbulentes supplémentaires se produisent. Les deux mécanismes contribuent à une réduction de la pression locale, éventuellement à une valeur inférieure à la pression de vapeur du liquide, produisant ainsi de la vapeur.

I.3.2. Les principales formes de cavités de vapeur

La cavitation peut prendre différentes formes au fur et à mesure qu'elle se développe depuis le début. Initialement, il dépend fortement de la structure d'écoulement de base sans cavitation. Cependant, au fur et à mesure de son développement, les structures de vapeur ont tendance à perturber et à modifier l'écoulement de base. Les modèles de cavitation peuvent être divisés en trois groupes. Ceux-ci sont:

- a. Des bulles isolées, emportées avec l'écoulement, qui sont issues des germes microscopiques contenus dans le liquide. Ces bulles explosent dans les régions de basse pression et implosent ensuite lorsqu'elles rencontrent un gradient de pression adverse.
- b. Des poches de cavitation accrochées aux parois. Dans ce cas, on distingue le régime de cavitation partielle dans lequel la cavitation prend naissance au niveau d'un changement de géométrie (exemple : l'entrée des orifices d'injection, zone de décollement) et le régime de super cavitation dans lequel la poche se referme au sein de l'écoulement à l'aval du corps qui a donné lieu à sa naissance.
- c. Des filaments tourbillonnaires cavitants qui résultent des basses pressions engendrées dans les zones où la vorticité est fortement concentrée: zones de cisaillement entre deux écoulements de vitesses d'ensemble différentes (exemple: sillages de poches de cavitation).

I.3.3. Les régimes de cavitation

En ce qui concerne les écoulements cavitants, on distingue les principaux régimes suivants:

- Les régimes limites entre le fonctionnement non cavitant et le fonctionnement cavitant.
- Les régimes de cavitation développés.

Cette différenciation renvoie à la possibilité d'accepter ou non la cavitation dans les systèmes industriels. Alors que dans les régimes limites, on s'intéresse principalement à la définition et à la détection pratique du seuil d'apparition ou de disparition de la cavitation. On suppose, en cavitation développée, que tel seuil est largement dépassé, et que cela se traduit soit par une modification

notable des performances des machines, soit par une expansion et un taux de présence suffisant des figures de cavitation.

- Les régimes de cavitation partielle: s'il s'agit d'une cavitation par poches sur des profils ou des aubages, on distingue le régime de cavitation partielle, dans lequel une cavité prend naissance près des bords d'attaque et se referme sur la paroi.
- Les régimes super cavitants: c'est le même que le régime de cavitation partielle, seulement que dans le régime super cavitant, la cavité se referme au sein de l'écoulement à l'aval du corps.

I.3.4. Situations d'apparition et de développement de la cavitation

Les principales circonstances au cours desquelles la cavitation se produit et se développe sont les suivantes:

- La géométrie des parois peut imposer des survitesses locales, et par conséquent des dépressions, à un écoulement globalement permanent: restriction du passage de l'écoulement dans un Venturi, ou courbure imposée aux lignes de courant par des ailes portantes ou des aubages de machines.
- Le cisaillement entre deux écoulements de vitesses différentes entraîne de grandes fluctuations turbulentes de la pression: couches cisillées, jets noyés, sillages d'obstacles ou d'organes de réglage de débit.
- Le caractère fortement non permanent d'écoulement en conduites (alimentation de moteur en carburant, coup de bélier dans des circuits de commandes hydrauliques ou dans les installations hydrauliques domestique) se traduit par des valeurs importantes des termes temporels de l'accélération du liquide qui conduisent eux aussi à des dépressions menant à la cavitation.
- Les rugosités des parois peuvent donner lieu à des sillages cavitants de très petites tailles ; c'est le cas en particulier des parois en béton d'ouvrage de génie civil, notamment d'évacuateurs de crues.
- Les mouvements vibratoires de parois peuvent engendrer des champs de pression alternatifs, comme dans le cas de l'eau de refroidissement des cylindres de moteurs diesel. Un autre exemple est celui de la cavitation ultrasonore provoquée par l'application d'un champ de pression oscillant très rapidement sur un volume de liquide globalement au repos.
- Certaines entailles remplies de liquide dont les parois sont animées de petits mouvements alternatifs sont les sièges d'aspirations et de refoulements successifs qui conduisent aussi à la disparition de bulles de cavitation.

- Enfin, les parois solides immergées soumises à des chocs peuvent conduire à la vaporisation des particules situées dans leur voisinage, particulièrement auprès de leurs bords anguleux s'il existe.

I.3.5. Effet de la cavitation

La cavitation est souvent un effet indésirable lorsqu'elle se produit dans une installation hydraulique, au fur et à mesure de l'évolution du phénomène, les nuisances tendent à s'accroître. Habituellement, la cavitation s'accompagne de ce qui suit:

I.3.5.1. Le bruit

Lors de la mise en place de la cavitation, on assiste à la formation de petites poches de vapeur dont la croissance est toujours suivie d'une implosion violente. D'un point de vue acoustique, ces cavités se comportent comme des monopoles, sources de bruits le plus efficaces dans les liquides. Elles sont donc la cause de bruit intense, s'étendant sur une large gamme de fréquences, pouvant aller de quelques centaines de hertz à plusieurs mégahertz. Par ailleurs, le temps caractéristique d'implosion (effondrement) des bulles formées est de quelques microsecondes. Ces chocs excitent toutes les structures au voisinage desquelles ils se produisent. Le bruit global mesuré est donc toujours un bruit à large bande.

I.3.5.2. L'érosion

On approuve une certaine technique de développement de prévention de la cavitation, dans la plupart des équipements hydrauliques industriels. Il serait souvent possible de concevoir des appareils qui en sont complètement exempts. Cependant, le coût de tels composants serait prohibitif et cette solution, parfois retenue, ne peut être systématique. Dans ces conditions, la cavitation intéresse une partie non négligeable des machines: aubes de turbines, profils de pompes, pales d'hélices. Les bulles de vapeur sont alors de dimensions importantes. Lors de leur collapse, les chocs produits peuvent être suffisamment violents pour causer des dégâts aux structures voisines. L'aspect de la surface érodée rappelle celle d'une peau d'orange. Par la suite, il arrive que la cavitation arrive à percer les matériaux sur des épaisseurs de plusieurs millimètres.

I.3.5.3. La chute des performances

Quand la cavitation continue à se développer, soit en abaissant le niveau général de pression des écoulements, soit en augmentant leur vitesse, la vapeur peut recouvrir complètement les parties actives des machines, limitant ainsi leurs performances.

I.3.6. Applications de la cavitation

La cavitation est utile dans les processus qui exigent la concentration d'énergie sur des zones restreintes pour produire localement des pics de pression élevés, malgré ses aspects négatifs décrits

ci-dessous. Assez souvent, elle est alors obtenue avec des moyens ultrasonores qui permettent de produire des implosions de bulles au prix d'une densité d'énergie modérée.

À titre d'exemple, mentionnons:

- La purification (nettoyage) des surfaces par ultrasons ou par jets cavitants.
- La dispersion de particules dans les liquides.
- La production d'émulsions.
- Le massage thérapeutique qui consiste à la destruction de cellules vivantes et de bactéries.
- Le dépôt par électrolyse: les bulles brisent les couches d'ions qui entourent les électrodes, ce qui permet d'accélérer le dépôt et d'en améliorer l'uniformité.

I.3.7. **Revue bibliographique**

La cavitation est un problème très préoccupant depuis plusieurs décennies, Parsons (1906)[3] a été le premier à identifier ce phénomène comme étant la résultante de la vaporisation au sein même de l'écoulement.

Par la suite, une explication a été donnée par Rayleigh (1917)[4] où il a considéré que les fortes surpressions causées par l'effondrement sont la source principale de l'endommagement matériel. Cette explication, basée sur l'équation de Rayleigh, suppose que la symétrie sphérique de l'effondrement est préservée. Or, il est clair que même dans le cadre de cette hypothèse, les bulles responsables de l'endommagement doivent s'effondrer à proximité des parois solides. De plus, la configuration géométrique étant responsable de la création des basses pressions nécessaires à la cavitation, les cavités ont tendance à se créer et à disparaître à proximité des frontières de l'écoulement.

Se basant sur cette explication, un important axe de recherche, prenant pour thème la dynamique de la bulle, a été ouvert par Rayleigh (1917), puis par Lamb (1923)[5], Col (1948)[6], Blake (1949)[7] et Plesset (1949)[8]. De très nombreuses études ont été publiées depuis cette époque sur ce sujet, prenant progressivement en compte tous les paramètres physiques et mettant en œuvre des techniques expérimentales de plus en plus fines. La relative simplicité des formes de la bulle a permis d'utiliser intensivement les techniques analytiques dans ce domaine de recherche.

Muir et Eichorn (1963)[9] ont étudié l'écoulement dans un Venturi. Ils ont trouvé que le gaz accélère plus que le liquide dans la section convergente du Venturi, car la densité du gaz est inférieure à celle du liquide. VanWijngaarden (1964)[10] a fait l'étude analytique de la dynamique de nuage de cavitation, et a proposé le modèle continu pour étudier le comportement d'une couche de fluide à bulles effondré près d'une paroi plane. Il a trouvé que la pression moyenne élevée à la paroi est causée par les effets d'interactions des bulles. Par la suite, le même auteur

VanWijngaarden (1968, 1972)[11, 12] a proposé le modèle continu de mélange à bulles, homogène et non linéaire, couplé avec l'équation de Rayleigh-Plesset pour la dynamique de la bulle. Depuis cette époque, plusieurs chercheurs ont basé leurs études sur ce modèle.

Kim et Prosperetti (1992)[13] ont fait la simulation d'un mouvement d'une ou plusieurs bulles dans un écoulement potentiel à travers un Venturi. Ils ont introduit l'interaction bulle/bulle et bulle/paroi du Venturi. Les résultats montrent qu'en dehors de l'axe du Venturi, la bulle pourrait être déviée vers la ligne centrale et atteint par la suite les parois lointaines de la tuyère.

Yi-Chun Wang et C. E. Brennen (1998)[14] ont utilisé le modèle non barotropique continu de mélange à bulle pour étudier l'écoulement cavitant unidimensionnel à travers une tuyère convergente-divergente. La dynamique non linéaire de la cavitation des bulles a été modélisée par l'équation de Rayleigh-Plesset. Les résultats analytiques montrent que l'interaction bulle/bulle à travers l'hydrodynamique du milieu liquide, a un effet très important dans ce genre d'écoulement. Un effet clair d'interaction s'appelle l'effet de Bernoulli, qui est causé par la croissance et l'effondrement des bulles dans la tuyère. Ils ont constaté aussi que les caractéristiques d'écoulement changent même si le taux de vide est très petit. Il en résulte deux différents régimes d'écoulements qui proviennent de la solution stationnaire nommée quasi-stationnaire et quasi-instationnaire. Le premier est caractérisé par les grandes fluctuations spatiales en aval du col qui sont induites par les pulsations des bulles de cavitation, le deuxième correspond au flashing flow. La bifurcation se produit comme transition d'écoulement d'un régime à l'autre. Dans l'expression analytique, la dimension critique de bulle à la bifurcation est obtenue, en fin. Ils ont traité la cause physique de cette instabilité quasi-statique.

Schnerr et Sauer (2001)[15] ont étudié la modélisation physique et numérique des écoulements cavitants instationnaires dispersés pour les turbomachines hydrodynamiques à grande échelle. Le modèle de cavitation permet l'application simultanée de techniques VOF standard, ainsi leur méthode VOF dispersée nouvellement développée a permis de prédire la croissance et l'effondrement des nuages de bulles, le calcul de la distribution de vapeur en fonction du temps dans chaque cellule de calcul. Des tests approfondis ont été effectués pour démontrer quantitativement les effets de discrétisation de la méthode numérique et les effets d'échelle du modèle de cavitation. Ce modèle néglige la viscosité du fluide pour démontrer et résoudre les phénomènes à grande et petite échelle de la dynamique de cavitation instable développée avec la formation périodique de jets de rentrée, la perte et l'effondrement des nuages de bulles et les ondes de pression hydrodynamiques qui en résultent. Les simulations des écoulements internes à travers les tuyères et des écoulements externes sur les hydrofoils NACA 0015 ont démontré la sensibilité des résultats

par rapport à l'emplacement de référence des conditions aux limites de pression et de l'effet d'amortissement des surfaces libres.

Singhal et al. (2002)[16] ont développé un modèle complet pour les écoulements cavitants et l'intégré dans un code CFD avancé pour la prédiction de performances des équipements d'ingénierie. Ce code CFD et ce modèle de cavitation ont été appliqués à un certain nombre de problèmes de validation et de démonstration afin de vérifier la précision du modèle et d'évaluer les performances de convergence sur des problèmes d'ingénierie difficiles. Les résultats de validation de la cavitation d'écoulement à grande vitesse sur des hydroptères et des corps cylindriques immergés ont été présentés, et dans les deux cas, les prédictions du modèle de cavitation étaient en très bon accord avec les données expérimentales. Le modèle a également été appliqué à un écoulement cavitant à travers un orifice et les résultats calculés se comparent bien aux données expérimentales, même pour des conditions d'écoulement très sévères impliquant des différentiels de pression très élevés à travers l'orifice. Ainsi, ce modèle de cavitation, couplé au code CFD-ACE1, peut être appliqué à un large éventail de problèmes et constituer un outil de prédiction précieux pour la vérification et l'optimisation de la conception.

Philip J. Zwart et al. (2004)[17] ont développé un nouvel algorithme CFD d'écoulement multiphasique pour prédire la cavitation. Le taux de transfert de masse entre les phases liquide et vapeur est calculé à l'aide d'un modèle basé sur l'équation de Rayleigh-Plesset. Il a été implémenté de manière conservatrice dans une méthode de volumes finis basée sur des éléments et présente un comportement de linéarisation et de couplage soigneux afin d'obtenir un bon comportement de convergence robuste pour prédire les écoulements tridimensionnels avec une cavitation étendue. Ce modèle a été implémenté dans le logiciel CFX-5, qui comprend également une discrétisation par éléments finis de volume de contrôle et une méthodologie de résolution qui couple implicitement les équations de continuité et de quantité de mouvement. En effet, le modèle a été validé sur une gamme d'applications, y compris l'écoulement sur un hydroptère, un inducteur et la cavitation transitoire dans un Venturi.

Abdulaziz (2014)[18] a mené des tests sur un petit Venturi en variant les conditions en amont, au niveau du col et en aval. Un modèle pour la fraction de vide de la vapeur d'eau a été proposé et validé par une analyse détaillée des images du processus de cavitation. Les résultats expérimentaux et ceux du modèle montrent que la cavitation se produit au col pour un rapport de pression critique (pression en aval / pression en amont). Pour un rapport de pression inférieur au rapport de pression critique, le débit massique est étranglé donnant une augmentation de la formation de la vapeur dans la partie divergente du Venturi. L'analyse des images montre clairement la formation de vapeur à partir du col jusqu'au milieu de la partie divergente du Venturi. Des traces de vapeur sont observées

à la sortie du Venturi où les conditions thermodynamiques ne peuvent pas maintenir l'existence de bulles de vapeur.

Ashrafizadeh et Ghassemi (2015)[19] ont étudié expérimentalement et numériquement des Venturis cavitants de petite taille destinés à la régulation du débit massique. Les effets des pressions en amont et en aval, ainsi que des paramètres géométriques, tels que le diamètre du col, sa longueur, et l'angle du diffuseur sur le débit massique et le rapport de pression critique ont été étudiés. Pour l'acquisition de données expérimentales, trois Venturis cavitants avec des diamètres de col de 0.7, 1 et 1.5mm ont été réalisés et testés. Les Venturis réalisés ont été testés sous différentes pressions en amont et en aval, afin de mesurer leur débit massique à la sortie et obtenir leurs courbes caractéristiques. L'écoulement à l'intérieur des venturis cavitants a été également simulé numériquement. Les résultats numériques ont montré un accord avec les données expérimentales avec un écart maximal de 5 à 10% et ont confirmé que l'approche numérique peut être utilisée pour prédire le rapport de pression critique et le débit massique à l'état de cavitation. Il est constaté que, malgré leur petite taille, les venturis sont capables de contrôler le débit massique. En diminuant le diamètre du col, leur mode de cavitation est limité. Les résultats ont montré également que l'augmentation de l'angle du diffuseur et de la longueur du col conduit à une diminution du rapport de pression critique.

Mauro Capocelli et al. (2015)[20] ont étudié la cavitation hydrodynamique dans un réacteur Venturi en considérant la dégradation du p-nitrophénol et la simulation numérique d'une bulle cavitante dans des conditions expérimentales explorées. Les paramètres illustrant les performances de cavitation ont été rapportés pour plusieurs conditions expérimentales et le meilleur résultat de masse de pNP éliminée à 30 min a été trouvé en fixant la pression d'entrée à 0,70 MPa et celle de récupération à 0,38 MPa ($\approx 40\%$), tandis que les meilleures performances en termes de conversion de pNP par unité d'énergie consommée ont été observées à 0,40 MPa (2,41 mg/MJ). Leur étude représente une avancée dans les travaux menés par les chercheurs de leur groupe pour acquérir des connaissances théoriques et optimiser la cavitation pour le traitement avancé des eaux usées.

Dino Musmarra et al. (2016)[21] ont étudié les voies de réaction, les effets des paramètres opératoires de la dégradation de l'ibuprofène par cavitation hydrodynamique dans un Venturi et leur étude présente la preuve vivante que seule la cavitation hydrodynamique est efficace dans la dégradation de l'ibuprofène, à la fois sous forme neutre et dissociée. Leur travail expérimental représente donc la base pour concevoir et développer des schémas de traitement avancés incluant la cavitation hydrodynamique pour le traitement des eaux usées pharmaceutiques. En outre, ils ont rapporté une approche globale innovante en couplant des observations expérimentales avec des simulations numériques et une analyse thermodynamique (à partir de la littérature pertinente) afin

de comprendre la phénoménologie du processus à partir de différents points de vue complémentaires.

Zamoum et al. (2016-2019 et 2020)[22-24] ont étudié numériquement la dynamique d'un écoulement de bulles à travers un Venturi et une tuyère-convergente. Les effets de taux de vide en amont, du nombre de bulles et de la distance entre les bulles sont étudiés. La résolution numérique de l'ensemble d'équations (ODE) a révélé que le rayon de la bulle change considérablement avec le taux de vide en amont et une instabilité est apparue juste après le col du Venturi pour les deux cas une bulle ($N=1$) et deux bulles ($N=2$).

Simpson et al. (2019)[25] ont développé des modèles informatiques par CFD durant leur étude pour simuler l'écoulement de cavitation à travers diverses conceptions de Venturi. Ils ont trouvé que le modèle de cavitation de Singhal est capable de décrire un écoulement diphasique dans un Venturi tout au long du régime de cavitation et la comparaison avec les données expérimentales ont montré un bon accord pour le rapport de pression prédit par rapport au comportement du débit pendant le régime de cavitation. En effet, l'angle du diffuseur c'est avéré comme le paramètre dominant qui influence le début et l'étendue de la cavitation et les angles de paroi plus petits ont pour effet d'encourager la cavitation à s'amorcer pour des rapports de pression inférieurs. Cependant, le plus grand angle de paroi de 15° qui a été considéré dans leur étude a conduit à une réduction du nombre d'initiation de la cavitation de 0,45 ainsi les simulations de trajectoire ont indiqué que le taux moyen de récupération de pression est réduit avec l'augmentation du rapport de pression. De plus, il a été démontré que l'augmentation du rapport de pression réduit considérablement la fréquence initiale des fluctuations de pression turbulentes subies par les cavités.

Averaldo Bimestre et al. (2020)[26] ont mené une étude expérimentale et numérique sur l'écoulement turbulent cavitant en utilisant ANSYS_CFD pour étudier l'influence des paramètres géométrique (pression d'entrée (2.3 et 4 bar), longueur de col (1.5, 5mm) et le diamètre (1.5, 2mm)) et physique de la cavitation. Ils ont analysé aussi l'influence de concentration du NAOH pour évaluer le prétraitement assisté par cavitation hydrodynamique alcaline de la bagasse de canne à sucre, ils ont trouvé que la cavitation a été efficace pour améliorer la solubilisation de la lignine de la bagasse de canne à sucre.

Maxwell Brunhart et al. (2020)[27] ont étudié numériquement le mécanisme de dégagement de vapeur dans un Venturi axisymétrique pour faire la comparaison entre les résultats numérique de la CFD avec ceux des expériences précédentes. Ils ont comparé aussi les fractions volumiques de la vapeur numériquement par l'aide des tranches CT des expériences, et ont analysé en détailles le

développement des structures de vapeur au cours d'un cycle à deux mécanisme (dégagement de vapeur) qui correspondaient à ceux des expériences.

Hee Jin Hwang et al. (2020)[28] ont examiné numériquement l'effet de formation de la cavitation dans un Venturi à un ou deux étages d'angle du diffuseur, ils ont trouvé que la taille de la bulle de cavitation est petite quand l'angle du diffuseur augmente. Cette étude montre qu'il y a une forte instabilité de l'écoulement au niveau du diffuseur pour un grand angle.

Nilanjan Dutta et al. (2021)[29] ont étudié numériquement les nouvelles stratégies pour améliorer l'intensité de la cavitation dans un Venturi, l'écoulement a été examiné pour les gammes de paramètres suivants : angle du convergent (15° ; 20°), angle du divergent (6.2° ; 8° ; 10°), longueur de gorge (1 ; 2 ; 3mm) et rapport de pression (2 - 4). Puis, ils ont analysé en détail avec ou sans la rugosité de surface de la fraction volumique de vapeur, le coefficient de perte de pression et le nombre de cavitation. Cette étude conclue que la rugosité de la surface offre une cavitation améliorée.

Hou-sheng Zhang et al. (2022)[30] ont étudié expérimentalement les caractéristiques de fluctuation de pression dans un écoulement cavitant, instationnaire à l'aide d'une caméra à grande vitesse et ils ont mesuré les fluctuations de pression de la paroi et les comportements de cavitation, ils ont démontré que les fluctuations de pression est composée de trois parties : le bruit de l'écoulement, les fluctuations à basse fréquences et l'impulsion induite par l'effondrement de la cavité. Les fluctuations de pression sont effectuées en termes de distribution de densité de probabilité. Les spectres de fréquence ont montré que les fluctuations de basses fréquences se composent de deux composants dominants, l'un les fluctuations induites par la perte de cavité et l'autre le maintien et le verrouillage des fluctuations.

I.4. Conclusion

A la lumière de ce qui précède dans ce chapitre, nous avons introduit les écoulements diphasiques en explicitant les différents régimes existants et leur champ d'application de même que le phénomène de cavitation: un phénomène à multiples dégâts et non souhaitable toutefois intervenant lors des écoulements diphasiques. Ensuite, nous avons exposé et analysé des progrès scientifiques et techniques réalisés en vertu de ce phénomène. Dans le but d'une meilleure compréhension de ce phénomène, nous allons étudier numériquement (CFD) le comportement d'un écoulement diphasique liquide-gaz à travers une simple géométrie (Venturi). Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et à la présentation de la méthode de résolution en utilisant le CFD.

Chapitre II. Modélisation et méthode numérique

Chapitre II. Modélisation et méthode numérique

II.1. Introduction

Les ressources de calcul ont évolué d'une manière exponentielle dans le temps. La simulation numérique en mécanique des fluides CFD est reconnue aujourd'hui comme l'un des outils incontournables de conception qui est largement utilisée dans l'industrie. De ce fait nous avons choisi de simuler notre problématique par le CFD (solveur ANSYS_Fluent) qui nous permet de donner des résultats rapides et peu coûteux. Dans ce chapitre, nous présenterons les modèles mathématiques ainsi que les logiciels utilisés et décrire brièvement les étapes nécessaires à suivre pour la création d'une géométrie à la génération d'un maillage de la configuration étudié.

II.2. Formulation du problème et équations gouvernantes

Considérons un Venturi ayant un diamètre D et un diamètre de col d , un angle convergent α , un angle divergent β et une longueur de col l , comme illustré à la figure 8.

Le tableau 1 représente la configuration du Venturi mettant en évidence ses dimensions principales. Ce Venturi a fait l'objet d'une étude expérimentale par D. Musmarra et al[21] et numérique par A. Simpson et al[25].

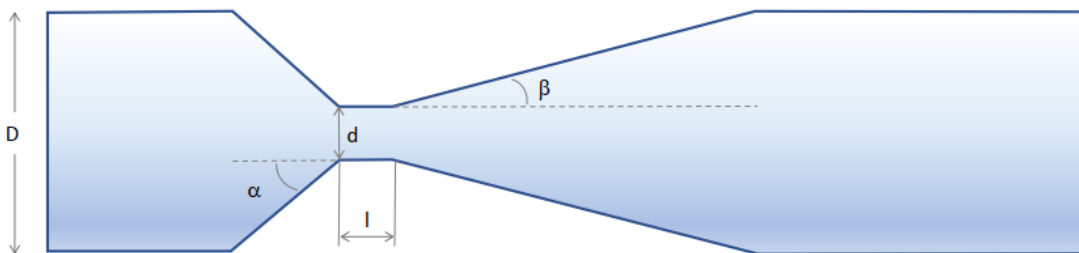


Figure 8: Schéma du Venturi

		$l/d = 1$	$l/d = 2$	$l/d = 3$
D [mm]	12	12	12	12
d [mm]	2	2	2	2
l [mm]	0	2	4	6
α [°]	22.5	22.5	22.5	22.5
β [°]	9.25	9.25	9.25	9.25

Tableau 1: Configurations du Venturi

Le présent travail est focalisé sur l'effet des modifications géométriques sur une large gamme de conditions, et par conséquent, l'approche Reynolds Averaged Navier-Stokes (*RANS*) est utilisée où $k-\omega$, le modèle de turbulence *SST*, est utilisé car il présente des avantages uniques dans la prédiction de la séparation des flux et du comportement dans des gradients de pression défavorables. Par conséquent, c'est le modèle de turbulence le plus courant pour le flux industriel avec un grand rapport d'aspect[31]. Un modèle multiphasique mixture qui traite le fluide comme un mélange fluide unique de phases individuelles est utilisé avec un modèle de cavitation approprié. Les équations de continuité et de quantité de mouvement pour le modèle de mixture s'écrivent comme suit[32]:

II.2.1. Modèles d'écoulement et de turbulence

- Equation de continuité:

$$\frac{\partial(\rho_m v_{i,m})}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

Où

$$v_m = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q v_q}{\rho_m} \quad (4)$$

- Equation de quantité de mouvement:

$$\frac{\partial(\rho_m v_{i,m} v_{j,m})}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} \delta_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_m + \mu_t) \left(\frac{\partial v_{i,m}}{\partial x_j} + \frac{\partial v_{j,m}}{\partial x_i} \right) \right] \quad (5)$$

Où $v_{i,m}$ et v_q sont la vitesse de la phase mixture et de la phase individuelle, respectivement. ρ_m est la masse volumique de la phase mixture. μ_t et μ_m sont respectivement la viscosité turbulente et la viscosité de la phase mixture. La viscosité turbulente du modèle *SST RANS*, $k-\omega$ s'écrit comme suit[32]:

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho_m k}{\omega} \quad (6)$$

Où α^* est un paramètre d'entrée qui dépend du nombre de Reynolds. k et ω sont l'énergie cinétique turbulente et le taux de dissipation spécifique où elles sont définies par les équations de transport suivantes:

$$\frac{\partial(\rho_m k v_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - Y_k \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho_m \omega v_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + G_\omega - Y_\omega \quad (8)$$

Où

$$G_k = \mu_t S^2 \quad G_\omega = \frac{\omega}{k} G_k \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \quad (9)$$

G_k , G_ω , Y_k et Y_ω sont respectivement la génération et la dissipation de l'énergie cinétique turbulente k et le taux de dissipation spécifique ω .

II.2.2. Modèle de cavitation

Divers modèles de transfert de masse ont été proposés dans la littérature pour décrire le processus de cavitation, les plus couramment utilisées étant basées sur des formes réduites de l'équation de Rayleigh-Plesset à savoir le modèle de Singhal et al[16], le modèle de Schnerr-Sauer[15] et Zwart et al[17]. Singhal est souvent qualifié du modèle de cavitation complète car ce modèle tient compte de la génération et du transport des bulles de vapeur, des fluctuations de pression et de vitesse et de l'effet des gaz dissous non condensables (*NCG*). Mais, nous avons choisi d'utiliser, dans notre travail, le modèle de Schnerr-Sauer comme modèle de cavitation du fait que numériquement il est robuste et converge rapidement. Dans ce modèle, la fraction volumique de vapeur est calculée à partir d'une équation de transport pour la fraction de vapeur comme suit:

$$\frac{\partial(\alpha_v \rho_v v_{i,m})}{\partial x_i} = R_e - R_c \quad (10)$$

α_v est la fraction volumique de la phase vapeur et ρ_v est la masse volumique de la phase vapeur, R_e et R_c représentent les termes de débit massique due respectivement à l'évaporation et à la condensation pendant la cavitation. Les expressions de R_e et R_c s'écrivent comme suit lorsque :

$$P_v \geq P_\infty \quad R_e = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_b} \sqrt{\frac{2(\rho_v - \rho_l)}{3\rho_l}} \quad (11)$$

$$P_v \leq P_\infty \quad R_c = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_b} \sqrt{\frac{2(\rho_l - \rho_v)}{3\rho_l}} \quad (12)$$

Où P_∞ est la pression en aval entièrement récupérée. Le rayon de la bulle peut s'écrire comme suit :

$$R_b = \left(\frac{3\alpha_v}{(1 - \alpha_v)4\pi n_b} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

La fraction volumique de la vapeur est donnée par :

$$\alpha_v = \frac{V_v}{V_m} = \frac{n_b \frac{4\pi}{3} R_b^3}{1 + n_b \frac{4\pi}{3} R_b^3} \quad (14)$$

Où n_b est la densité du nombre de bulles et $n_b = 10^{13}$ est utilisé dans ce travail.

II.3. Présentation du Logiciel ANSYS_Workbench et ANSYS_Fluent

II.3.1. ANSYS_Workbench

ANSYS_Workbench est la plateforme d'intégration et de flux de travail (projet personnel) qui relie les produits ANSYS. Les schémas du projet permettent aux utilisateurs de configurer leurs processus de simulation, d'optimiser l'exploration grâce à la gestion paramétrique, de soumettre des tâches au solveur à la fois localement et à distance, et d'ajouter des API (Interface de programmation) qui autorisent les logiciels tiers.

II.3.2. ANSYS_Fluent

ANSYS_Fluent est un code de calcul dans la CFD qui modélise par la méthode des volumes finis des écoulements très variés dans des configurations plus ou moins complexes. Ce solveur offre toutes les capacités physiques nécessaires pour la modélisation des écoulements fluides, des turbulences, des transferts de chaleur et des réactions chimiques. Le logiciel est utilisé pour des applications industrielles allant de l'écoulement d'air autour d'une aile d'avion, à la combustion à l'intérieur d'un four ; des colonnes à bulles aux plates-formes pétrolières ; du flux sanguin à la fabrication de semi-conducteurs ; de la conception de salles blanches aux usines de traitement des eaux usées. Des modèles spécifiques sont proposés pour modéliser les phénomènes de combustion interne, d'aéroacoustique ainsi que les turbomachines et les systèmes multiphasiques, ce qui élargit encore son champ d'application.

II.4. Maillage

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée. Ce menu permet de mailler en particulier une ligne de la géométrie, à savoir disposer les nœuds avec des conditions particulières (utilisation d'un ratio pour modifier la pondération du maillage, application de formes différentes de maillage).

II.4.1. Choix du type de maillage

II.4.1.1. Maillage structuré (quadra/hexa)

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc. Ses avantages sont les suivants:

- Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent.
- Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage.

Ses inconvénients:

- Difficile à générer dans le cas d'une géométrie complexe.
- Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes.

II.4.1.2. Maillage non structuré (tri/tétra)

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition. Ses avantages:

- Peut-être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments.
- Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés.

Ses inconvénients :

- Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré.
- Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importante si l'on compare avec le maillage structuré.

II.4.1.3. Maillage hybride

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D. Encore plus, il combine entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré.

II.4.2. Techniques générales de génération du maillage

Pratiquement, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable.

Nous pouvons résumer ces règles ainsi:

- Maintenir une bonne qualité des éléments.
- Assurer une bonne résolution dans les régions à fort gradient.
- Assurer un bon lissage dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier.
- Minimiser le nombre total des éléments (temps de calcul raisonnable).

II.4.3. Qualité d'un maillage

La génération d'une très bonne qualité de maillage est essentielle pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant. Ainsi, la bonne qualité du maillage repose sur une bonne résolution dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc, etc...) et la qualité du maillage à un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution, et surtout sur le temps de calcul.

II.4.4. Génération d'un maillage couche limite

La notion de résolution concerne plus particulièrement les zones qui présentent un fort gradient, ainsi une bonne résolution permet de mieux décrire les phénomènes physiques qui existent dans ces zones telles que les ondes de choc, ou les phénomènes liés à la couche limite.

II.5. Création de la géométrie et génération du maillage sous ANSYS_Workbench

La création d'une géométrie et la génération d'un maillage sont des phases très importantes pour bien mener une analyse CFD, vu l'influence du maillage sur la solution calculée, en termes de précision et de temps de calcul.

II.5.1. Création de la géométrie

Avant de se lancer dans la création de la géométrie, il est important de créer d'abord un projet. Pour cela, il faut commencer par démarrer ANSYS_Workbench puis automatiquement un nouveau projet s'ouvre et choisir dans la Toolbox => Analysis System => Fluid Flow (Fluent) (en haut à gauche) puis cliquer et faire glisser dans Project Schematic (voir figure 9). Ensuite, nous précisons le type de la géométrie que l'on veut créer, donc on va cliquer sur Geometry dans la boîte que nous venons de créer. La colonne de droite se remplit, dans Advanced Geometry Options => Analysis Type choisir 2D. Au cas où cette étape est sautée et qu'on n'utilise pas la troisième dimension dans notre dessin, Workbench passera de lui-même en mode 2D (voir figure 10).

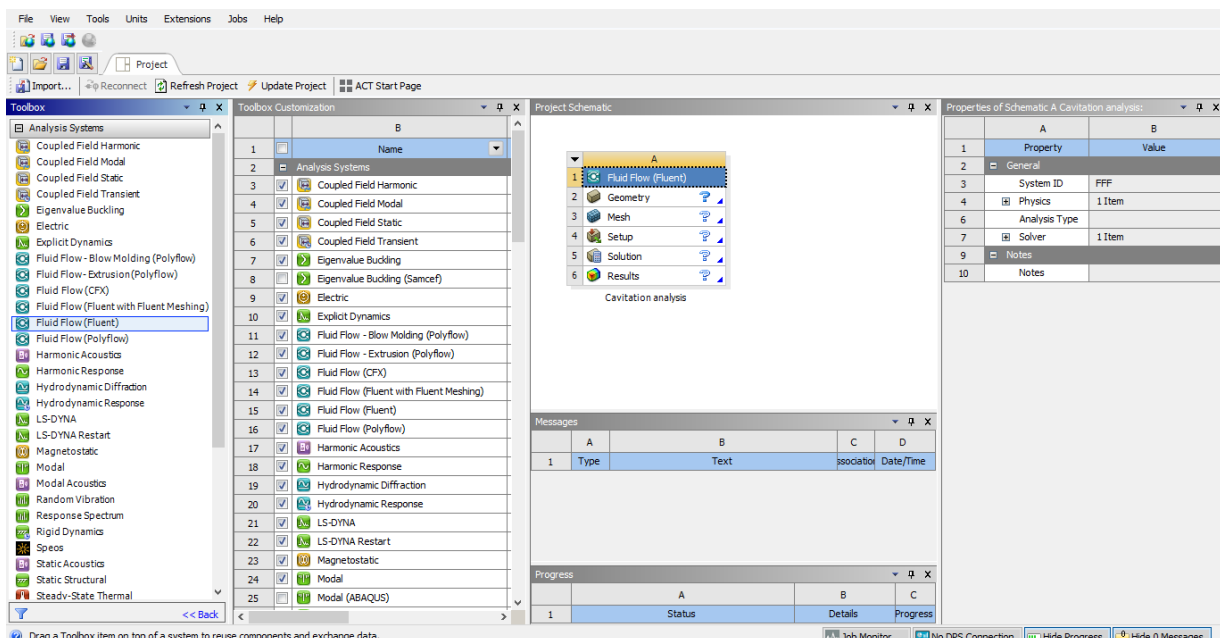


Figure 9: Création du projet


	A	B
1	Property	Value
2	General	
3	Component ID	Geometry
4	Directory Name	FFF
5	Notes	
6	Notes	
7	Used Licenses	
8	Last Update Used Licenses	
9	Basic Geometry Options	
10	Solid Bodies	<input checked="" type="checkbox"/>
11	Surface Bodies	<input checked="" type="checkbox"/>
12	Line Bodies	<input type="checkbox"/>
13	Parameters	Independent
14	Parameter Key	ANS;DS
15	Attributes	<input type="checkbox"/>
16	Named Selections	<input type="checkbox"/>
17	Material Properties	<input type="checkbox"/>
18	Advanced Geometry Options	
19	Analysis Type	3D
20	Use Associativity	3D
21	Import Coordinate Systems	2D
22	Import Work Points	<input type="checkbox"/>
23	Reader Mode Saves Updated File	<input type="checkbox"/>
24	Import Using Instances	<input checked="" type="checkbox"/>
25	Smart CAD Update	<input checked="" type="checkbox"/>
26	Compare Parts On Update	No
27	Endurance and Symmetry Processing	<input checked="" type="checkbox"/>

Figure 10: Propriétés de la géométrie

Avant de commencer à dessiner la géométrie, nous enregistrons le projet : Files => Save As, et lui donner le nom qu'on souhaite. Maintenant, nous allons lancer Design Modeler, le logiciel permettant de tracer la géométrie. Pour ce faire, double clique sur Geometry, dans la boîte associée au projet. A cette étape, nous pouvons passer à l'étape suivante, le tracé de la géométrie.

Tout d'abord, nous choisissons l'unité caractéristique du système, dans notre cas il s'agit des millimètres et commencer à créer la géométrie. Il faut donc:

- Commencer par la tracer grossièrement (juste les formes).
- Préciser les côtes.
- Transformer le dessin en Edge (bord de la géométrie pour le maillage).
- Préciser les zones et leur nature (fluide ou solide).

Pour tracer l'esquisse et faire apparaître les premières formes de notre géométrie, il faut choisir le plan dans lequel on travaille, ici ce sera le plan XY, pour le sélectionner, on clique sur XY Plane dans Tree Outline (au milieu de la colonne de gauche). Le repère apparaît. Pour se mettre perpendiculairement à un plan, il faut cliquer sur  le plan en question qui se trouve sur la barre d'outils. Nous obtenons cela (figure 11):

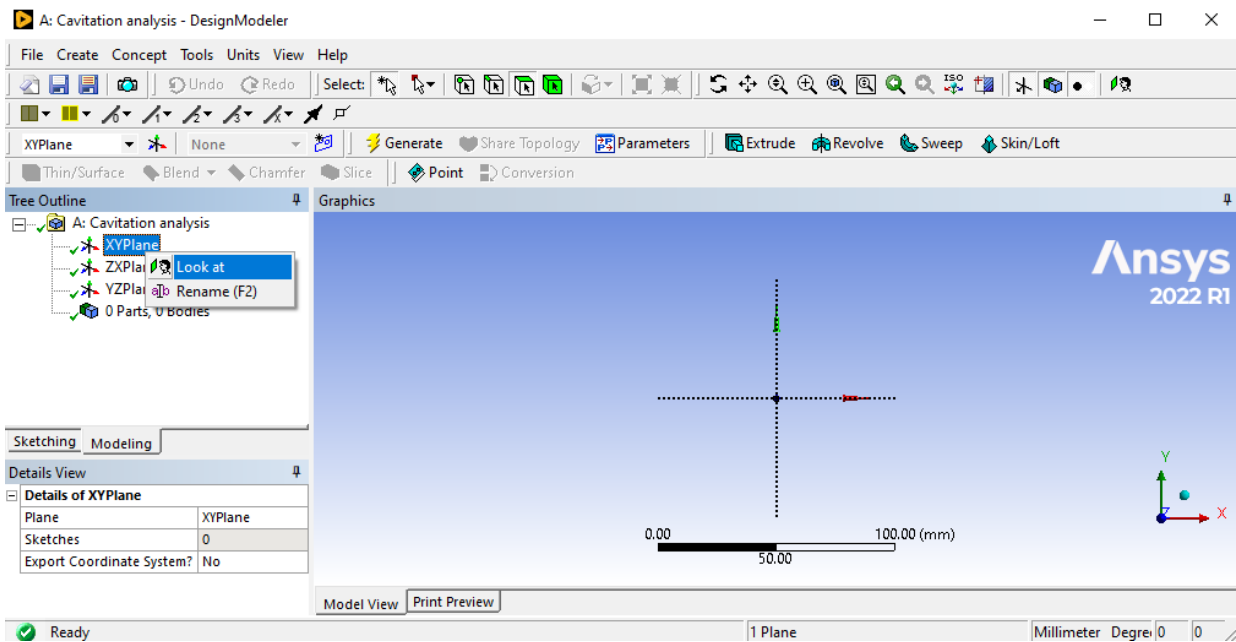




Figure 11: Interface Design Modeler

Pour passer en mode dessin, on clique sur Sketching dans Tree Outline (avec le plan qui nous intéresse toujours sélectionner). Un menu nous proposant différentes forme géométriques apparaît.

Quelques conseils utiles:

- Pour supprimer, cliquer sur  (outils de sélection) et sur  (pour choisir les courbes) dans la barre d'outils, cliquer sur la partie de la géométrie à effacer et appuyer sur Suppr.
- Pour tracer des lignes verticales ou horizontales, on va incliner notre trait jusqu'à voir apparaître un "V" ou un "H", Design Modeler corrigera l'angle et nous ramènera à la verticale.
- Pour ajuster une ligne sur un point (par exemple la fin d'une autre ligne), il suffit de s'en approcher, Design Modeler nous rapprochera automatiquement du point visé.

Une fois nous avons fait apparaître notre esquisse (figure 12), on va créer la surface à mailler, dans notre cas c'est très simple parce que la surface à mailler est simplement celle délimité par l'esquisse. La définition des surfaces se fait dans le menu Concept (tout en haut au milieu). On pourrait simplement utiliser Surface From Sketches, sélectionner notre esquisse (pensez à appuyer sur Apply dans la fenêtre de sélection) et appuyer sur Generate.

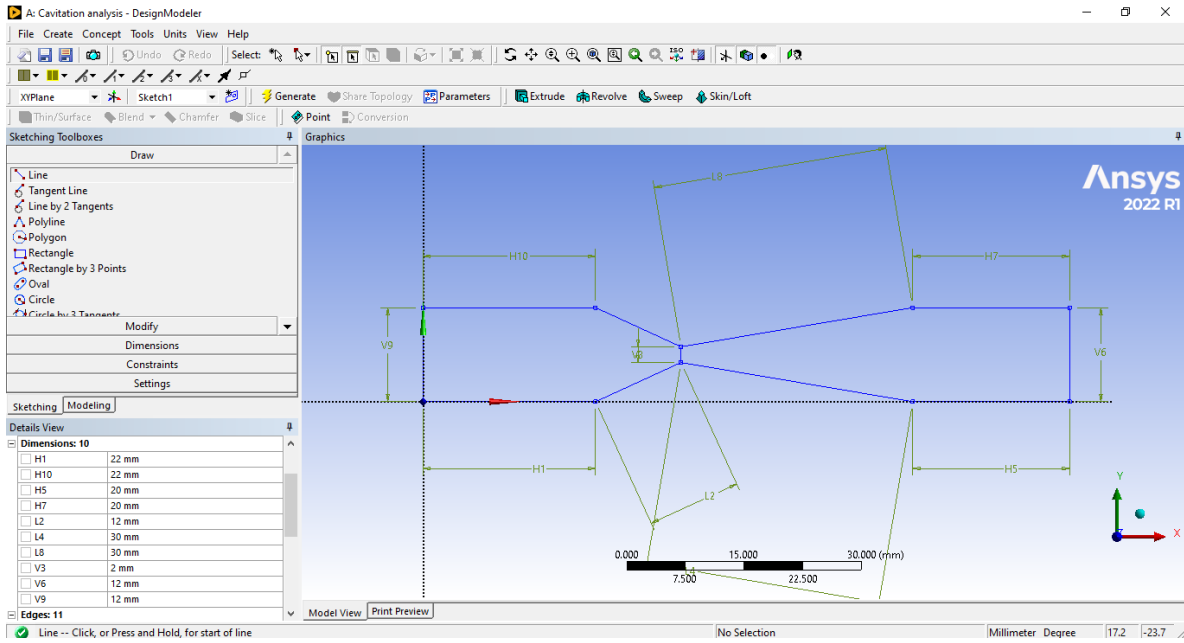


Figure 12: Création de la géométrie, *cas $l/d = 0$*

Nous allons donc spécifier la totalité de la région à mailler avec les fonctions qui viennent juste d'être décrites : Concept => Surface From Sketches => sélectionner Sketch1 => Generate. Alors, nous venons de créer une zone qui englobe toute la partie fluide. Pour préciser que notre surface est du fluide (le solide étant l'option par défaut), on clique sur le Surface body puis préciser sa nature dans la fenêtre Details View en bas à gauche (voir figure 13).

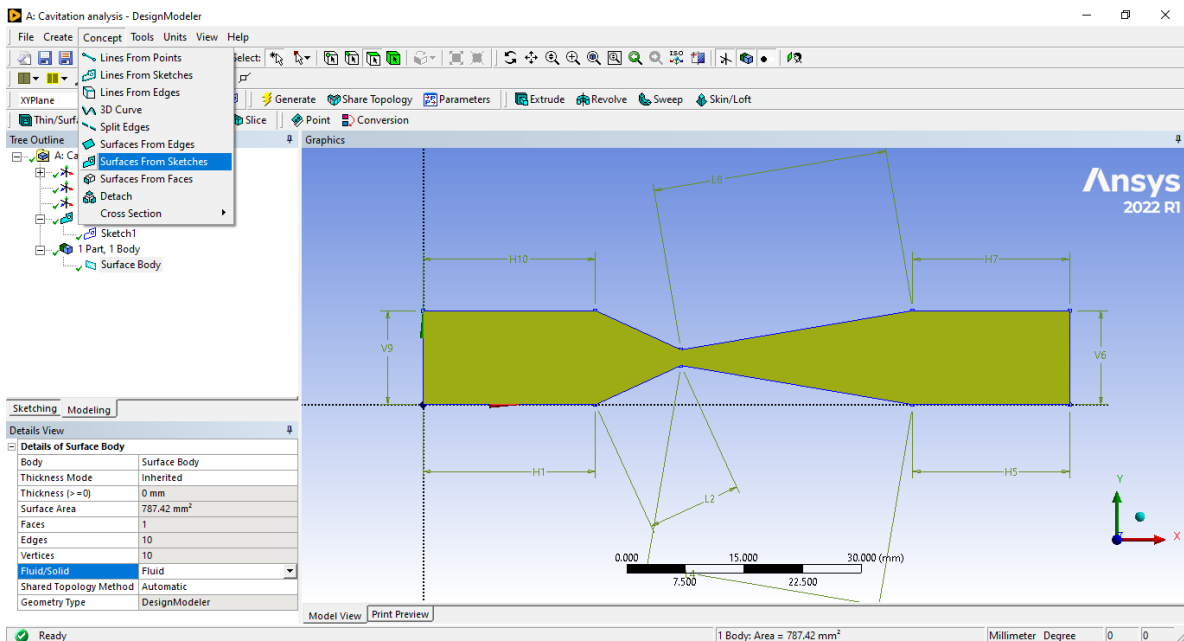




Figure 13: Surface de la géométrie à mailler, *cas $l/d = 0$*

II.5.2. Génération du maillage

Ici, nous allons créer le maillage, pour cela on va lancer Mesh en double cliquant sur Mesh dans la boîte Workbench. Une fois lancé, la première chose qu'il nous demande est la méthode de maillage. Comme nous allons donner nous-mêmes des spécifications et que notre géométrie étant créée en 2D, la méthode Automatique ira très bien. Une fois le maillage souhaité est généré (figure 14), nous commençons par nommer les régions qui auront un intérêt particulier dans la définition des conditions aux limites afin de permettre à Fluent de leur affecter à des paramètres particuliers.

Pour la nomination d'une partie, il faut la sélectionner => clic droit => Créer la sélection nommée => lui donner un nom. Pour sélectionner une partie de la géométrie, il faut avoir l'outil en conséquence:  pour les surfaces,  pour les arêtes. En appuyant sur Ctrl on peut sélectionner plusieurs éléments.

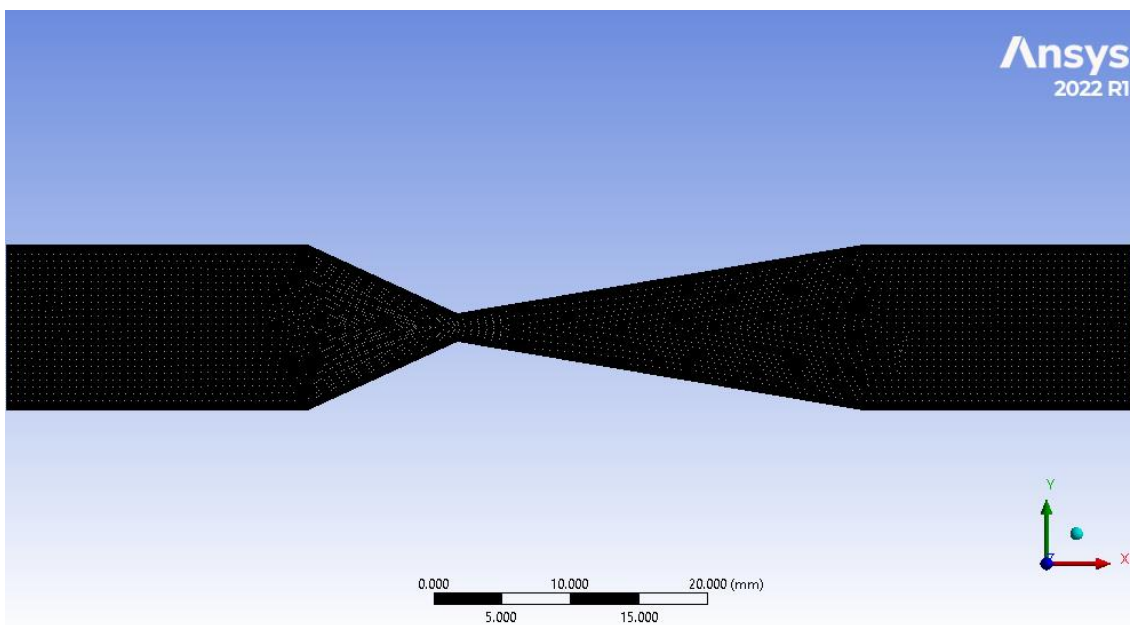


Figure 14: Maillage généré, cas $l/d = 0$

II.6. Test de maillage

Pour déterminer la sensibilité au raffinement de la grille, en particulier les tailles de cellules (éléments) locales et les taux de croissance dans le col, une série de maillages systématiquement raffinés a été étudiée par Simpson[25]. Des tailles de grille de 20 000 cellules, 40 000, 80 000 et une grille finale de 160 000 cellules ont été construites, toutes en utilisant des éléments quadrilatéraux 2D, et des résultats convergés obtenus à partir de chacun. La figure 15 présente des tracés des distributions d'énergie cinétique turbulente et de vitesse axiale à mi-chemin le long de la section du diffuseur avec des densités de grille variables. Il existe une différence négligeable dans les profils

entre les tailles de grille de 80 000 et 160 000, et en tant que tel, dans ce travail nous avons fixé le raffinement de la grille dans la plage de 80 000 cellules.

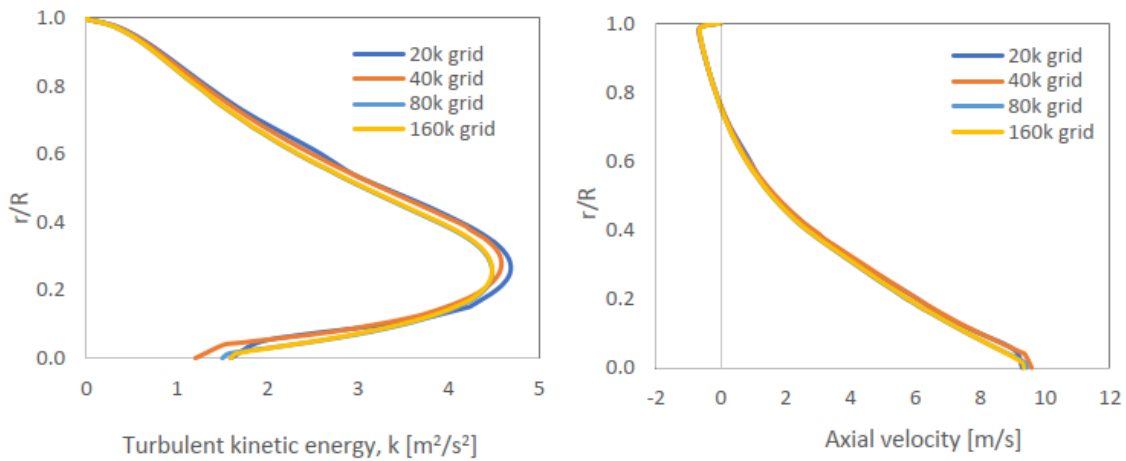


Figure 15: Profils de turbulence et de vitesse prévus avec une densité de maillage variable, d’après[25]

Le tableau 2 illustre les informations du maillage structuré 2D généré pour chaque conception du Venturi.

	$l/d = 0$	$l/d = 1$	$l/d = 2$	$l/d = 3$
NOMBRE D'ÉLÉMENTS	88293	80075	80708	81738
NOMBRE DE NŒUDS	266728	241860	243761	246927

Tableau 2: Informations sur le maillage

II.7. Validation numérique

Nous présentons ici, la validation numérique des modèles décrits ci-dessus, réalisée par Nilanjan Dutta et al.[29] . L’effet de la vitesse d’entrée sur la chute de pression est illustré à la figure 16(a). Un bon accord a été observé avec les résultats numériques et expérimentaux rapportés par Shi et al.[33] . De même, une comparaison des résultats numériques et expérimentaux sur le débit volumique par rapport au rapport de pression avec ceux de Simpson et al.[25], sont montrés à la figure 16(b). La prédiction numérique et les résultats expérimentaux s’avèrent être en étroite correspondance pour un ensemble donné de gamme de conditions. De plus, le débit massique par rapport à l’inverse du rapport de pression est comparé à celui d’Abdulaziz[18], comme le montre la figure 16(c). Les erreurs en pourcentage entre les résultats expérimentaux et numériques se situent dans la plage de 5 à 13% dans ce cas, comme le montre la figure 16(c). Il suffit d’ajouter ici que les résultats actuels ont été considérés comme étant en bonne correspondance avec Shi et al. et Simpson

tandis qu'un écart légèrement supérieur apparaît avec celui d'Abdulaziz. De tels écarts entre les résultats expérimentaux et numériques ne sont pas rares. Simpson et al. ont également signalé un écart similaire de prédiction numérique avec les résultats expérimentaux d'Abdulaziz. La raison plausible de tels écarts pourrait être la présence de gaz non condensables (NCG) dissous et de solides en suspension dans le fluide. En un mot, les résultats actuels concordent avec les résultats numériques et les résultats expérimentaux rapportés dans la littérature.

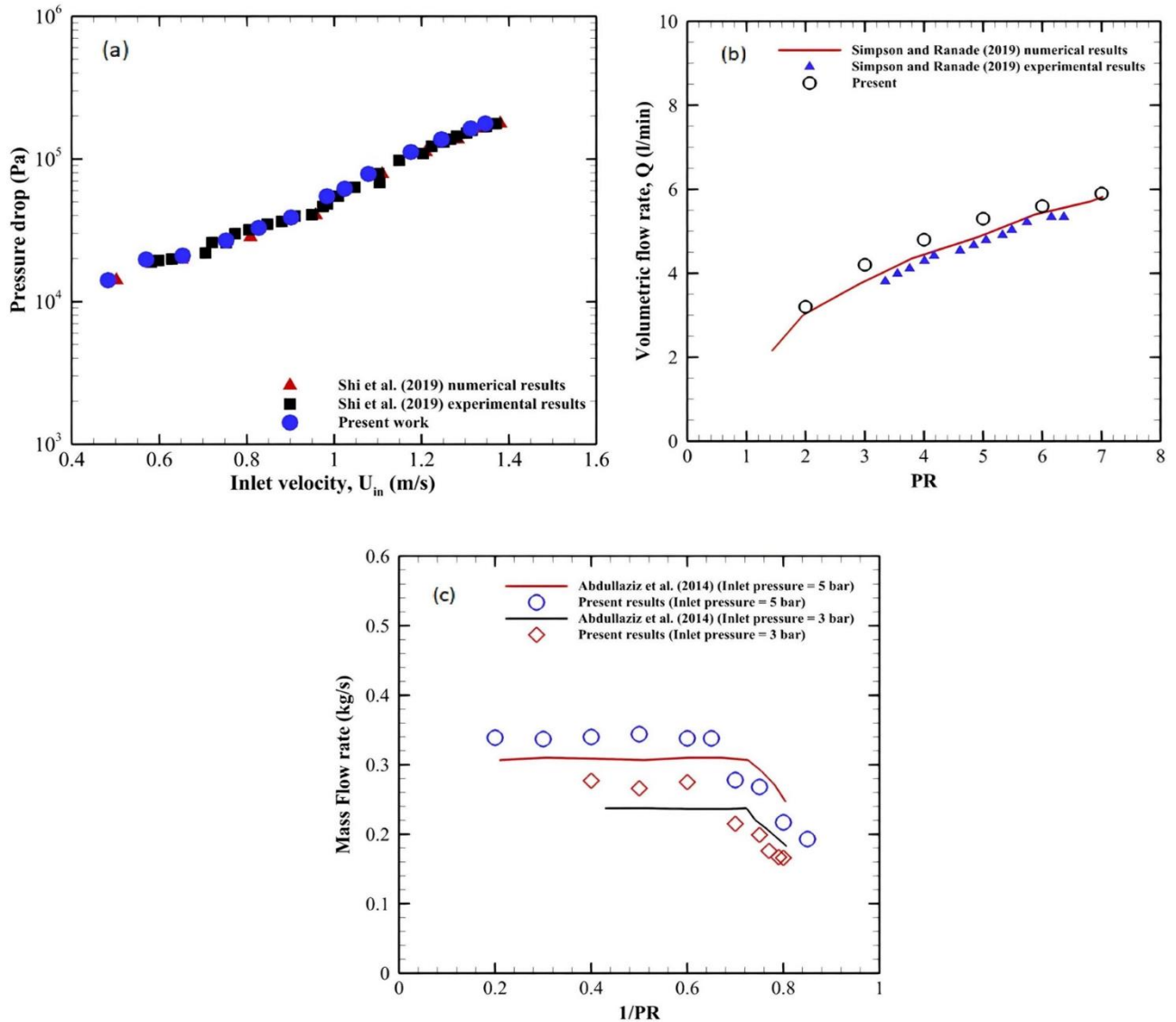


Figure 16: (a) Comparaison des résultats numériques et expérimentaux sur la chute de pression par rapport à la vitesse d'entrée avec Shi, (b) Comparaison des résultats numériques et expérimentaux sur le débit volumique par rapport à la chute de pression avec Simpson, (c) Comparaison du débit massique par rapport à l'inverse du rapport de pression avec celui d'Abdulaziz, d'après[29]

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné les équations gouvernantes de l'écoulement diphasique et en particulier le modèle de cavitation choisi dans ce travail. Puis, nous avons montré et expliqué les différentes étapes pour la création du projet (géométrie) ainsi que la génération du maillage.

Chapitre III. Résultats et discussion

Chapitre III. Résultats et discussion

III.1. Introduction

Ce chapitre, est dédié à la présentation des résultats issue de la résolution numérique du modèle décrit dans la section précédente. Il s'agit de simuler un écoulement diphasique liquide-gaz stationnaire à travers un Venturi (figure 17).

III.2. Géométrie utilisée (Venturi)

Dans cette étude nous avons utilisé un Venturi de 12mm de diamètre à l'entrée et à la sortie du Venturi, et 2mm de diamètre au niveau du col. L'angle convergent α est égale à 22.5° et l'angle divergent β est égale à 9.25° . La longueur de col de ce Venturi est variée de $(l/d) = 0$ à $(l/d) = 3$ (figure 17).

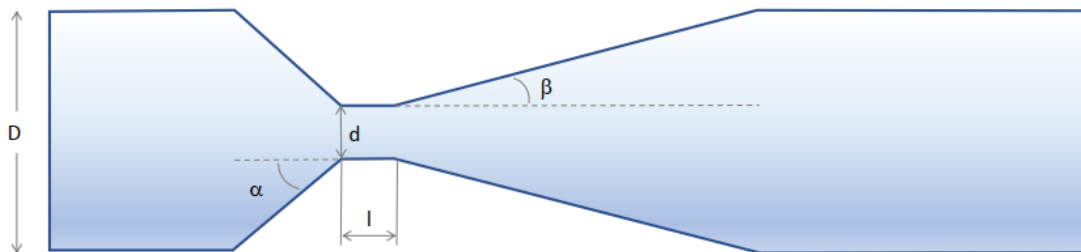


Figure 17: Schéma du Venturi utilisé

III.3. Propriétés thermo-physiques du fluide utilisé

Le fluide de travail considéré pour mener toutes les simulations est de l'eau saturée à 21°C , et ces propriétés thermo-physiques prennent les valeurs regroupées dans le tableau 3 suivant:

Pression de vaporisation $P_v [Pa]$	Densité volumique $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$		Viscosité dynamique $\mu \left[\frac{kg}{m.s} \right]$		Tension superficielle $\sigma \left[\frac{N}{m} \right]$ Liquide
	Liquide	Vapeur	Liquide	Vapeur	
2504.17585	997.9503	0.01842	0.000976	9.76×10^{-6}	0.00674

Tableau 3 : Propriétés thermo-physiques du fluide

III.4. Conditions aux limites

Les conditions aux limites d'entrée et de sortie de pression sont utilisées respectivement à l'entrée et à la sortie du Venturi. La pression totale à l'entrée est fixée à $5 \times 10^5 Pa$ tandis que la pression de sortie varie de 1×10^5 à $4.5 \times 10^5 Pa$. Une condition de non-glissement (no-slip condition) est imposée aux parois. L'intensité turbulente et le diamètre hydraulique sont prescrits

à 1% et 12 mm respectivement. La fraction volumique $\alpha_v = 0$ est prise à l'entrée et à la sortie pour toutes les simulations effectuées.

III.5. Méthodologie de résolution numérique

Les équations du modèle décrites dans le chapitre II ont toutes été résolues à l'aide du code CFD commercial, ANSYS_Fluent (version 2022 R1). Des modèles planaire 2D ont été utilisé partout et, dans chaque cas, le rapport de pression a été fixé par les conditions aux limites de pression d'entrée et de sortie, ce qui rend la solution de débit dépendante. L'algorithme SIMPLE a été utilisé pour le couplage pression-vitesse[34], avec le PRESTO! Schéma de discrétisation appliqué pour la pression. Pour la quantité de mouvement et les quantités turbulentes une discrétisation du 2nd ordre a été appliquée dans chaque cas.

Le modèle de fermeture de turbulence $k-\omega SST$ a été sélectionné pour être utilisé partout. Il a été démontré que ce modèle offre une précision améliorée par rapport à d'autres modèles basés sur la viscosité turbulente dans un certain nombre d'études de validation complètes de cas d'écoulement complexes impliquant une séparation et des gradients de pression défavorables[35]. L'interaction entre la cavitation et les structures d'écoulement turbulent est extrêmement complexe et les mécanismes détaillés ne sont pas encore entièrement compris.

Les pas de temps nécessaires pour obtenir la convergence des calculs *URANS* pour chaque simulation variaient donc de 1×10^{-4} à 1×10^{-6} s à moins de 3510 itérations.

Après avoir introduit les conditions initiales, la simulation numérique nous a permis d'obtenir deux résultats intéressants : l'influence du rapport de pression et de la longueur du col sur les différents paramètres de l'écoulement (pression, vitesse et fraction volumique de la vapeur).

III.6. Influence du rapport de pression du Venturi

Nous avons étudié l'influence du rapport de pression (pression d'entrée de Venturi/pression de sortie du Venturi) pour la conception du Venturi ayant une dimension de rapport $(l/d) = 0$ (longueur de col égale à zéro). Les résultats obtenus sont montrés sur la figure 18. Cette figure montre la distribution de la pression statique prédite le long de l'axe x pour différentes pressions de sortie lorsque la pression à l'entrée du Venturi est constante. On remarque que toutes les courbes ont la même tendance pour tous les rapports de pressions. En effet, à l'entrée du Venturi (section constante), on remarque que la pression est constante, en suite la pression diminue dans la partie convergente jusqu'à atteinte de sa plus basse valeur au niveau du col. Dans la partie divergente du Venturi, on remarque que la pression augmente puis tende vers une valeur constante à la sortie du Venturi.

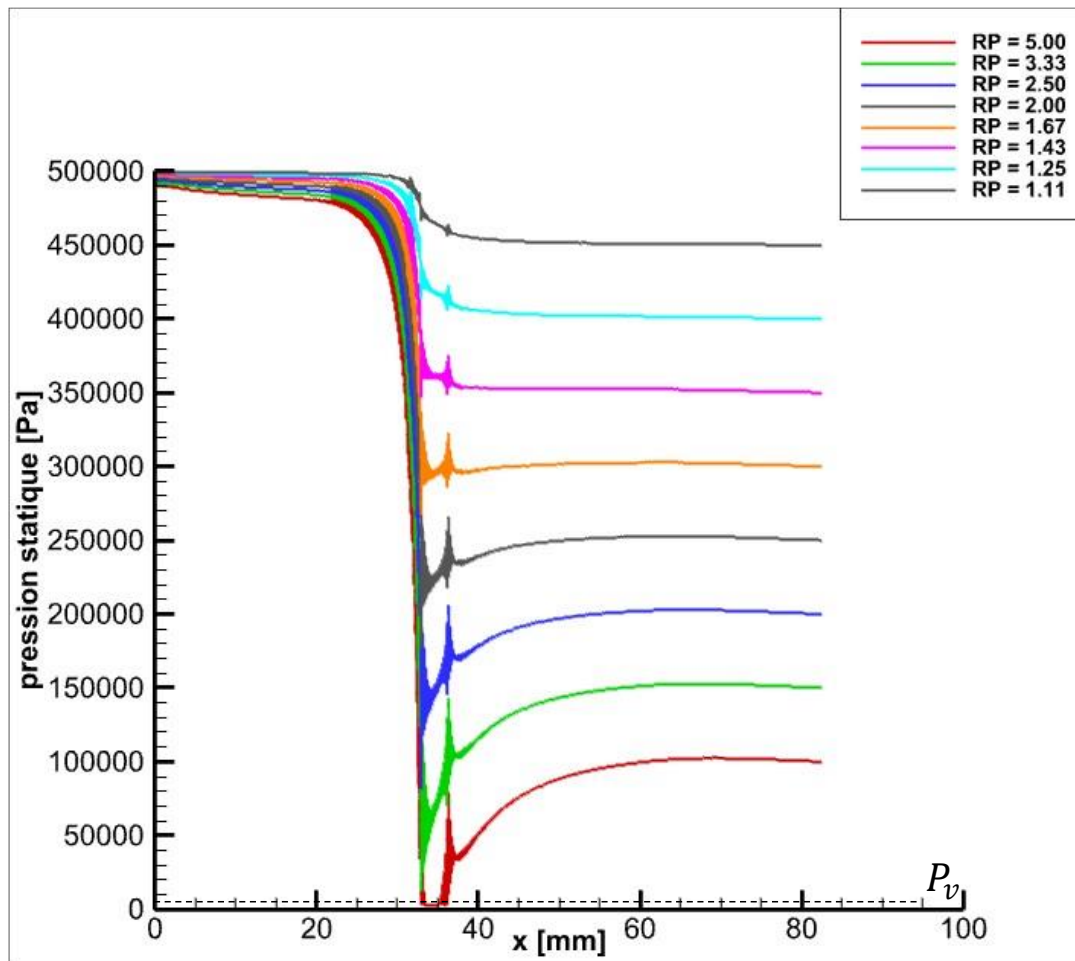


Figure 18: Distribution de la pression statique en fonction de la position pour différents rapports de pressions

Lorsque la pression atteint son minimum au niveau du col, le fluide est à l'état de la pression de vapeur saturante mais seuls les rapports de pressions (RP) = 5.00 et 3.33 atteindront cet état et permettront la formation de la cavitation. Tandis que, pour les rapports de pressions (RP) = 2.50, 2.00, 1.67, 1.43, 1.25 et 1.11 cet état de vaporisation qui engendre la production de ce phénomène n'est pas atteint à cause du faible écart de pression de chaque cas.

Ainsi, sur la figure 19, nous avons la distribution moyenne de la pression, le long du panneau de vannes pour différentes conditions de fonctionnement lorsque la pression en amont est constante. Ce résultat est trouvé par Bo Wu et al.[36] durant leurs étude expérimentale et CFD des caractéristiques de cavitation étranglée du débit d'écart dans le linteau de vanne des verrous de navigation.

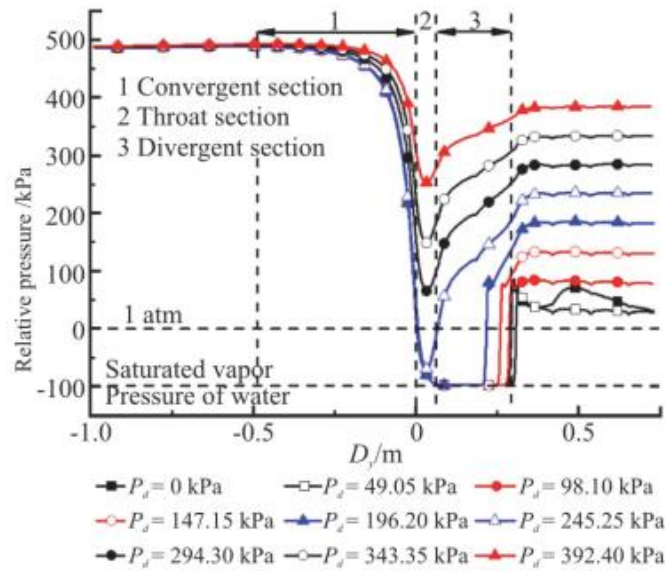


Figure 19: Distribution moyenne de la pression, le long du panneau de vannes pour différentes conditions de fonctionnement, d’après[36]

La distribution de la vitesse axiale prédite le long de l’axe x pour différents rapports de pressions (pression d’entrée de Venturi/pression de sortie du venturi) est montrée sur la figure 20.

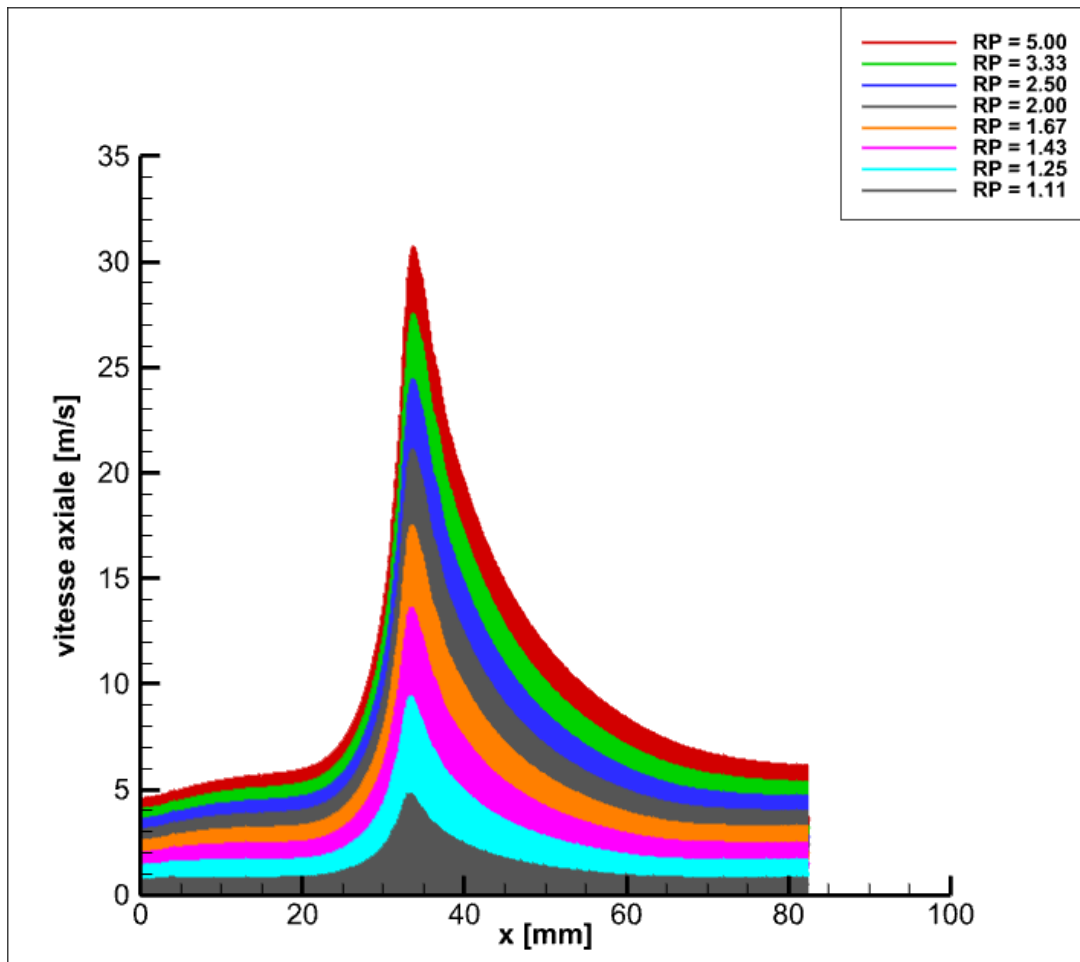


Figure 20: Distribution de la vitesse axiale en fonction de la position pour différents rapports de pressions

On remarque que les courbes ont la même tendance pour tous les rapports de pression considérés. Aussi, la vitesse de l'écoulement varie contrairement à la pression (Bernoulli). En effet, la vitesse de l'écoulement est constante à l'entrée du Venturi puis elle augmente dans la partie convergente jusqu'à atteinte de son maximum au niveau du col. Ensuite elle diminue dans la partie divergente et tend vers une valeur constante à la sortie du Venturi.

Toujours, pour les mêmes conditions de fonctionnement nous montrons sur la figure 21 la distribution des contours de fractions volumiques de la vapeur. On remarque que pour les six cas de (h) à (c) l'absence de la cavitation (pas de changement de phase) parce que le rapport de pression est faible. Tandis que la cavitation se produit pour les cas (a) et (b), car les conditions d'apparitions de la cavitation sont atteintes.

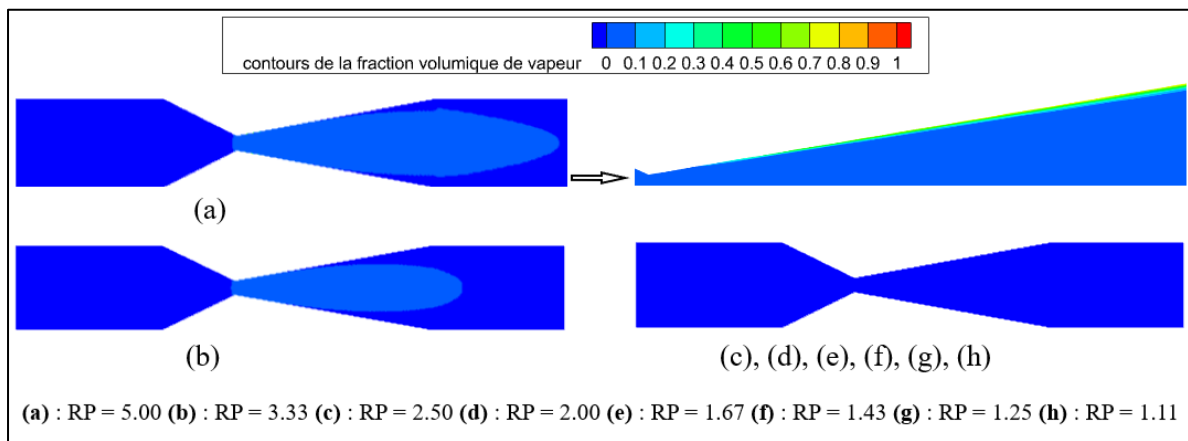


Figure 21: Contours des fractions volumiques de vapeur pour différents rapports de pressions

III.7. Influence de la longueur du col du Venturi

Dans cette partie, nous étudions l'effet de la longueur du col du Venturi sur la pression statique et la vitesse de l'écoulement pour des conceptions du Venturi ayant des rapports variables $(l/d) = 0.00, 1.00, 2.00$ et 3.00 . Cette étude est faite aux mêmes conditions pour un rapport de pression $(PR) = 5.00$. les résultats obtenus sont montrés sur les figures 22, 23 et 24.

La distribution de la pression statique le long de l'axe x pour les différentes longueurs du col de Venturi est montrée sur la figue 22. On remarque que la pression statique est constante à l'entrée du Venturi puis diminue dans la partie convergente jusqu'à atteinte de son minimum au niveau du col puis elle augmente dans la partie divergente et en fin tend vers une valeur constate à la sortie du Venturi. On remarque aussi, que plus la longueur du col augmente, le minimum de la pression

statique se déplace en aval. De plus, la cavitation se produit lorsque le rapport $(l/d) = 0.00$ et 1.00 du fait que la pression à l'intérieur du Venturi diminue au-dessous de la pression de vaporisation du fluide. En effet, le début et l'étendue de la cavitation ne sont pas les mêmes pour ces deux rapports malgré que les conditions soient les mêmes. Cependant, la cavitation ne se produit pas pour les rapports $(l/d) = 2.00$ et 3.00 parce que l'augmentation de la longueur du col a favorisé la récupération de la pression au sein du Venturi avant que la pression de vaporisation du fluide soit atteinte.

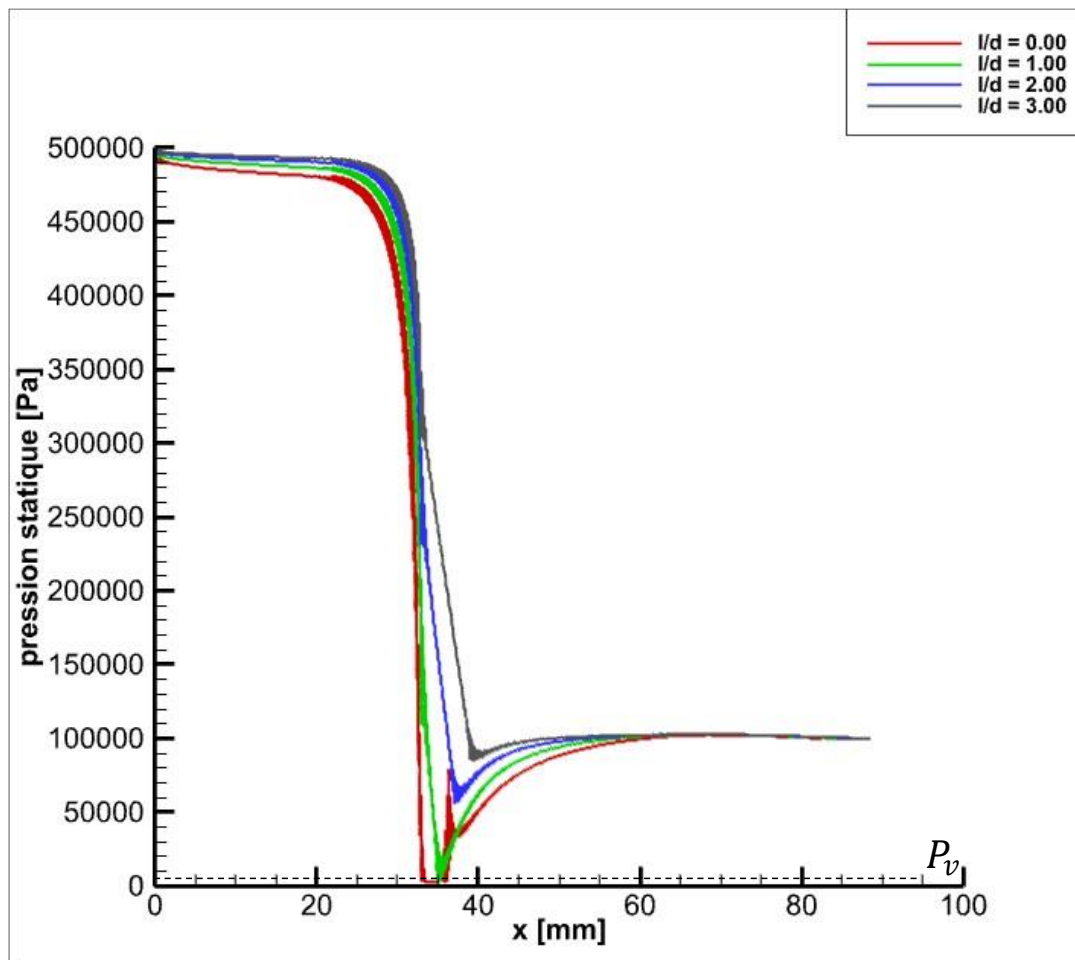


Figure 22: Distribution de la pression statique en fonction de la position pour différentes longueurs de col

De même sur la figure 23, nous montrons la distribution de la vitesse axiale prédite le long de l'axe x . Sur cette figure, contrairement à la pression, on remarque que la vitesse est presque constante à l'entrée du Venturi puis augmente dans la partie convergente du Venturi jusqu'à atteindre de son maximum au niveau du col, en suite la vitesse de l'écoulement diminue dans la partie divergente et tend vers une valeur constante à la sortie du Venturi. On remarque aussi que la

vitesse est constante dans le col et plus la longueur du col est faible plus le maximum de la vitesse est élevé.

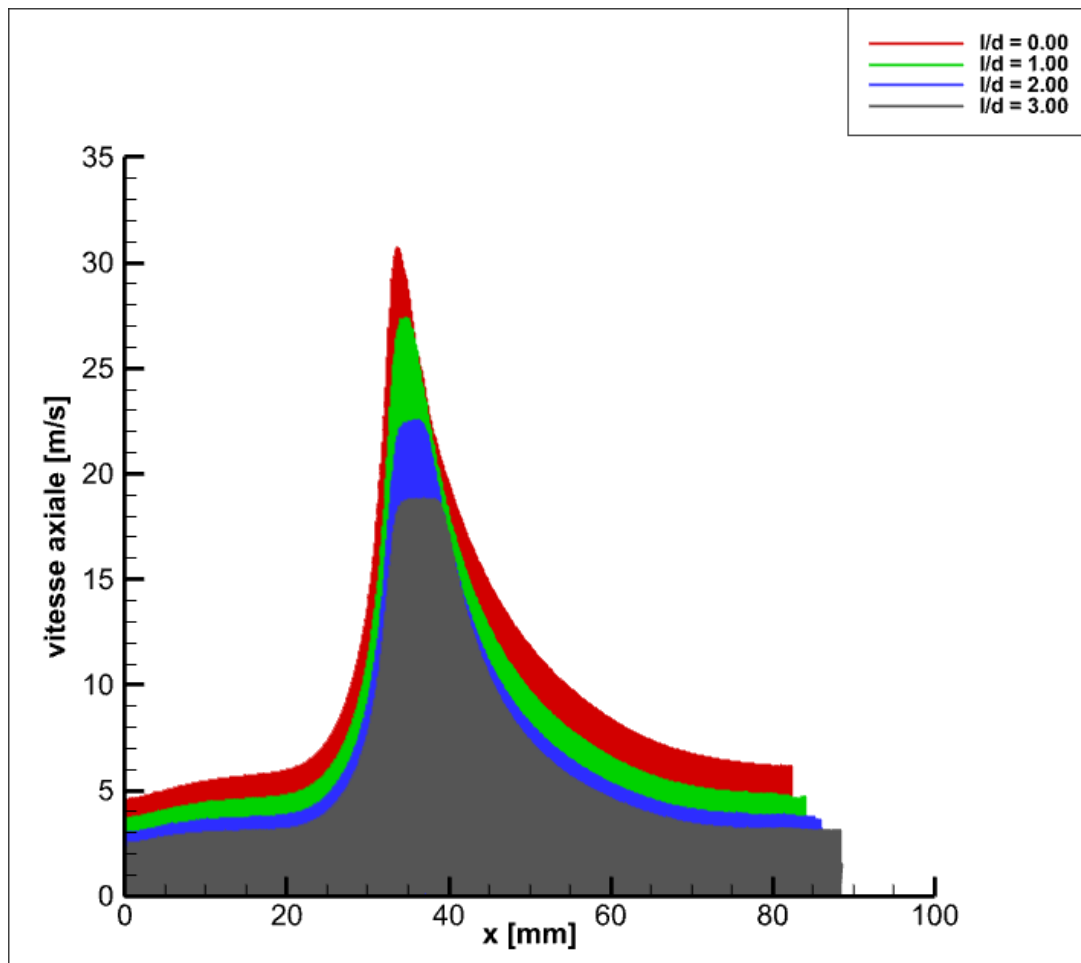


Figure 23: Distribution de la vitesse axiale en fonction de la position pour différentes longueurs de col

La figure 24 montre la distribution des contours de fractions volumiques de la vapeur apparue dans la partie divergente du Venturi. On remarque que pour les cas (c) et (d) qui correspondent à $(l/d) = 2$ et 3 respectivement l'absence de la cavitation. Par contre, pour les cas (a) et (b) qui correspondent à $(l/d) = 0$ et 1, nous avons l'apparition de la cavitation. En effet, lorsque la longueur du col est faible, la pression statique diminue et atteinte la pression critique (la pression de vapeur saturante) pour laquelle la cavitation aura lieu. Au-delà de cette pression, le changement de phase liquide vapeur est possible (cavitation).

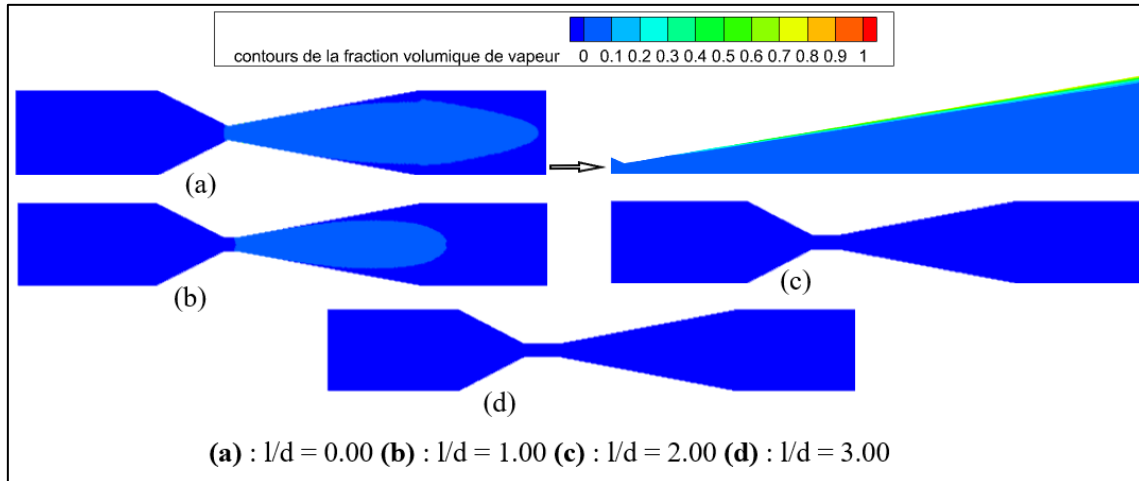


Figure 24: Contours des fractions volumiques de vapeur pour différentes longueurs de col

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré les résultats de la simulation numérique, en utilisant le computationnel fluide dynamique CFD, d'un écoulement diphasique liquide-gaz à travers une tuyère de type Venturi. Les résultats obtenus montrent que le rapport de pression entrée et sortie du Venturi et la géométrie du Venturi (longueur du col) influencent d'une manière significative les paramètres de l'écoulement à savoir la pression et la vitesse du fluide ainsi que la formation des poches de bulle de vapeur (l'apparition de la cavitation).

Conclusion Générale et Perspectives

Conclusion Générale et Perspectives

En vertu de ce mémoire, nous avons étudié numériquement l'écoulement diphasique liquide-gaz bidimensionnel stationnaire à travers une tuyère de type Venturi. Le modèle théorique choisi pour décrire ce type d'écoulement est constitué de quatre équations basiques: l'équation de la continuité, l'équation de la quantité de mouvement, l'équation de transport de la turbulence $k-\omega SST$ et l'équation de transport de la fraction volumique de la vapeur. La résolution numérique de ce système d'équations, en utilisant le CFD (solveur ANSYS_Fluent), nous a permis d'étudier les effets du rapport de pression (pression d'entrée de Venturi/pression de sortie du Venturi) et de la géométrie (la longueur du col) sur les paramètres de l'écoulement à savoir ; la pression, la vitesse du fluide ainsi que la formation des poches de bulle de vapeur (l'apparition de la cavitation) dans le Venturi.

Les résultats obtenus montrent que le rapport de pression du Venturi a un effet très important sur la formation des bulles de vapeur (cavitation) ainsi que sur la vitesse et la pression de l'écoulement. En effet, l'augmentation du rapport de pression au-delà de 3.33 conduit à une diminution de la pression au-dessous de la pression de vapeur saturante (à la température de travail du fluide 21 °C), et par conséquent formation de la vapeur au sein du milieu liquide (la cavitation se produit).

Aussi, nous avons montré l'effet de la géométrie, à travers la variation de la longueur adimensionnelle du col de venturi, sur la pression et la vitesse du fluide ainsi que sur l'apparition de la vapeur dans le Venturi. En effet, pour les longueurs du col $(l/d) = 2$ et 3 nous avons l'absence de la cavitation. Par contre, pour les longueurs $(l/d) = 0$ et 1 , nous avons l'apparition de la cavitation. Lorsque la longueur du col est faible, la pression statique diminue et atteint la pression critique (la pression de vapeur saturante) pour laquelle la cavitation aura lieu. Au-delà de cette pression, le changement de phase liquide vapeur est possible (cavitation).

Perspectives

Nous pouvons poursuivre le travail effectué pour :

- L'étude de l'écoulement instationnaire.
- L'étude de l'effet de la variation de l'angle convergent et divergent du Venturi sur le comportement de l'écoulement.
- Etudier autres géométries ; tuyère convergente-divergente, rétrécissement, élargissement.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] A. Toutant, "Modélisation physique des interactions entre interfaces et turbulence," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Soutenue le 4 décembre 2006.
- [2] G. Yadigaroglu and G. F. Hewitt, Eds. Introduction to Multiphase Flow (Zurich Lectures on Multiphase Flow). Springer, Cham, 2018.
- [3] L. Bergerat, "Développement d'une méthode numérique compressible pour la Simulation de la cavitation en géométrie complexe," Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers de Paris - ENSAM, Soutenue publiquement le 17 décembre 2012.
- [4] L. Rayleigh, "VIII. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity," The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, vol. 34, no. 200, pp. 94-98, 2009, doi: 10.1080/14786440808635681.
- [5] H. Lamb, "XXIII. The early stages of a submarine explosion," The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, vol. 45, no. 266, pp. 257-265, 1923/02/01 1923, doi: 10.1080/14786442308634111.
- [6] R. H. COLE, Underwater Explosions. Princeton University Press, 1948.
- [7] F. G. Blake, The Tensile Strength of Liquids: A Review of the Literature. Acoustics Research Laboratory, Department of Engineering Sciences and Applied Physics, Harvard University, 1949.
- [8] M. S. PLESSET, "The Dynamics of Cavitation Bubbles," Applied Mechanics, vol. 16, 1949.
- [9] J. F. Muir and E. R., Compressible flow of an air-water mixture through a vertical, two-dimensional, converging-diverging nozzle. 1963.
- [10] L. van Wijngaarden, On the collective collapse of a large number of gas bubbles in water. Applied mechanics : proceedings of the Eleventh International Congress of Applied Mechanics, 1964.
- [11] L. van Wijngaarden, "On the equations of motion for mixtures of liquid and gas bubbles," Journal of fluid mechanics, vol. 33, no. 3, pp. 465-474, 1968.
- [12] L. van Wijngaarden, "One-Dimensional Flow of Liquids Containing Small Gas Bubbles," Annual review of fluid mechanics, vol. 4, pp. 369-396, 1972.
- [13] H. S. Kim and P. Andrea, "Numerical Simulation of the Motion of Rigid Spheres in Potential Flow," SIAM J. Appl. Math. SIAM Journal on Applied Mathematics, vol. 52, no. 6, pp. 1533-1562, 1992.
- [14] Y. C. Wang and C. E. Brennen, "One-Dimensional Bubbly Cavitating Flows Through a Converging-Diverging Nozzle," Journal of Fluids Engineering, vol. 120, no. 1, pp. 166-170, 1998.

- [15] G. H. Schnerr and J. Sauer, "Physical and Numerical Modeling of Unsteady Cavitation Dynamics," Proceedings of 4th International Conference on Multiphase Flow (ICMF2001), 2001.
- [16] A. K. Singhal, M. M. Athavale, H. Li, and Y. Jiang, "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model," TRANSACTIONS- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF FLUIDS ENGINEERING, vol. 124, pp. 617-624, 2002.
- [17] P. J. Zwart, A. G. Gerber, and T. Belamri, "A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics," ICMF 2004 International Conference on Multiphase Flow, Yokohama, Japan, vol. 152, 2004.
- [18] A. M. Abdulaziz, "Performance and image analysis of a cavitating process in a small type venturi," Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 53, pp. 40-48, 2014, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2013.10.010.
- [19] S. M. Ashrafizadeh and H. Ghassemi, "Experimental and numerical investigation on the performance of small-sized cavitating venturis," JFMI Flow Measurement and Instrumentation, vol. 42, pp. 6-15, 2015.
- [20] M. Capocelli, M. Prisciandaro, A. Lancia, and D. Musmarra, "Cavitation reactor for advanced treatment of contaminated water: the effect of recovery pressure," Desalination and Water Treatment, vol. 55, no. 12, pp. 3172-3177, 2014, doi: 10.1080/19443994.2014.947779.
- [21] D. Musmarra et al., "Degradation of ibuprofen by hydrodynamic cavitation: Reaction pathways and effect of operational parameters," Ultrasonics Sonochemistry, vol. 29, pp. 76-83, 2016, doi: 10.1016/j.ultsonch.2015.09.002.
- [22] M. Zamoum, M. Kassel, and R. Boucetta, "Effect of Bubbles Number on Cavitating Flow Through a Venturi," Ninth International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD9), Istanbul, Turkey, July 11-15 2016.
- [23] M. Zamoum, M. Kassel, and R. Boucetta, "Modeling and Numerical Investigations in the Behavior of One-dimensional bubbly Cavitating Flows Through a Venturi," 24^{ème} Congrès de Mécanique, Brest, 26 au 30 Aout 2019.
- [24] M. Zamoum, M. Kassel, and R. Boucetta, "Bubbly Cavitating Flow Through a Converging Nozzle," Proceedings of the 6th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'19), Prague, Czech Republic – August 2020.
- [25] A. Simpson and V. V. Ranade, "Modeling hydrodynamic cavitation in venturi: influence of venturi configuration on inception and extent of cavitation," AIC AICHe Journal, vol. 65, no. 1, pp. 421-433, 2019, doi: 10.1002/aic.16411.

- [26] T. A. B. J. A. M. Júnior, C. s. A. B. E. Canettieri, and C. E. Tuna, "Theoretical modeling and experimental validation of hydrodynamic cavitation reactor with a Venturi tube for sugarcane bagasse pretreatment," *BITE Bioresource Technology*, vol. 311, 2020.
- [27] M. Brunhart, C. Soteriou, M. K. Gavaises, Ioannis, P. Koukouvinis, S. Jahangir, and C. Poelma, "Investigation of cavitation and vapor shedding mechanisms in a Venturi nozzle," 2020.
- [28] H. J. Hwang, J. Park, and J. K. Min, "A numerical study on the flow control characteristic of a cavitating venturi with one- and two-stage diffusers," *J Mech Sci Technol Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 35, no. 4, pp. 1463-1472, 2021.
- [29] N. Dutta, P. Kopparthi, A. K. M. N. Nirmalkar, and G. Boczkaj, "Novel strategies to enhance hydrodynamic cavitation in a circular venturi using RANS numerical simulations," *Water research.*, vol. 204, 2021.
- [30] H.-s. Zhang, G.-h. Chen, Q. Wu, and B. Huang, "Experimental investigation of unsteady attached cavitating flow induced pressure fluctuation," *J Hydrodyn Journal of Hydrodynamics*, vol. 34, no. 1, pp. 31-42, 2022.
- [31] F. R. Menter, "Influence of freestream values on k-omega turbulence model predictions," *AIAA Journal*, vol. 30, no. 6, pp. 1657-1659, 1992, doi: 10.2514/3.11115.
- [32] A. Fluent, *Ansys fluent theory guide 15.0*. ANSYS. Canonsburg, 2013, p. 33.
- [33] H. Shi, M. Li, P. Nikrityuk, and Q. Liu, "Experimental and numerical study of cavitation flows in venturi tubes: From CFD to an empirical model," *CES Chemical Engineering Science*, vol. 207, pp. 672-687, 2019.
- [34] S. Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere, Washington D.C, 1980.
- [35] J. E. Bardina, P. G. Huang, and T. J. Coakley, *Turbulence modeling validation*. In: AIAA-1997-2121, 1997.
- [36] B. Wu, Y.-a. Hu, X. Wang, and X.-j. Yan, "Experimental and CFD investigations of choked cavitation characteristics of the gap flow in the valve lintel of navigation locks," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 32, no. 5, pp. 997-1008, 2020.