

Visa du chef de département des
Sciences et Technologies
Signature:.....
Date:.....

ETUDE EXPERIMENTALE ET SIMULATION NUMERIQUE DE LA CAVITATION DANS UN TUBE VENTURI

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master académique
en «*Installations Energétiques*»

Encadreur: Dr.BAGHDAD
Mohammed, MCB
Signature:
Date:

Réalisé par :
Étudiante : Benafia Faiza
Signature :
Date :

Membres du jury

M. KHERRAB Mohamed	MAA	Président
M MEDHKOUR Mihoub	MAA	Examineur
M. BAGHDAD Mohammed	MCB	Encadreur

Visa du chef de département des
Sciences et Technologies
Signature:.....
Date:.....

ETUDE EXPERIMENTALE ET SIMULATION NUMERIQUE DE LA CAVITATION DANS UN TUBE VENTURI

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master académique
en «*Installations Energétiques*»

Encadreur: Dr. BAGHDAD
Mohammed, MCB
Signature:
Date:

Réalisé par :
Étudiante : Benafia Faiza
Signature :
Date :

Membres du jury

M. KHERRAB Mohamed	MAA	Président
M. MEDHKOUR Mihoub	MAA	Examineur
M. BAGHDAD Mohammed	MCB	Encadreur

Résumé

La cavitation est un phénomène qui peut être présent dans plusieurs applications telles que les vannes de réduction de pression, des orifices d'arrosage ou même dans l'écoulement propulsifs maritime et les pompes. Dans la présente recherche, une expérimentale et numérique a été effectuées pour analyser des écoulements cavitants dans un tube Venturi. Les essais ont été réalisés avec l'eau avec plusieurs débits variant de 300 à 700 l/h et des températures de 10, 20, 30 et 40°C. La simulation numérique a été effectuée sur le code commercial Fluent 6.3. Les résultats montrent une bonne concordance avec les mesures expérimentales en termes de pression et paramètres de la cavitation.

Mots clés : cavitation ; Tube de venturi ; Vaporisation ; Fluent.

Dédicace

Je dédie ce mémoire de fin d'étude

A mon très cher frère à l'esprit « Aissa »

A ma chère mère.

A mon cher père.

A mes sœurs : "Hanane, Zohra".

À mes très chers frères : Slimane, abd-el-kader, abd-el-Rahmane, Benamer et son femme et leurs enfants (Tasnim et yassine).

A ma famille exceptionnellement.

A tous étudiants de ma promotion de 2ème année master génie mécanique.

Amel, Khadidja, Fatiha.A, Zolikha, Fatiha.B, Rahma, Fatima.

A tous mes enseignants.

Remerciements

Avant tout, je dois remercier Dieu le tout puissant qui m'a donné le courage et la force pour mener ce travail à terme.

En premier lieu je tiens à grande remercier vivement mon directeur de thèse Monsieur **Dr. BAGHDAD Mohamed**, enseignant au centre universitaire de Tissemsilt institut des sciences et technologies qui m'a encadré, au jour le jour, avec une grande disponibilité, tout au long de cette thèse. Sa sympathie, son enthousiasme et ses encouragements m'ont été infiniment précieux au cours de cette année de mon travail. Je le remercie plus particulièrement pour la confiance qu'il m'a accordée durant cette année et d'en avoir amélioré le contenu par la qualité de leur remarque.

Je souhaite également remercier tous les membres du jury **M. Kherrab M.** et **M. Medhkour M.** pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire.

Je tiens à témoigner ma profonde reconnaissance à ma famille pour sa gentillesse, son écoute attentive, son efficacité, sa grande disponibilité au cours de la préparation de ce travail.

Je tiens à remercier aussi tous les enseignants qui ont participé à notre formation, et qui nous ont aidés à préparer ce mémoire.

Je remercie également les plus sincères à ma famille et mes amies pour leurs encouragements permanents, durant la réalisation de ce travail.

J'exprime aussi mes remerciements tous les professeurs de génie mécanique, science de la matière.

En fin, je remercie tous ceux qui m'ont aidée et soutenue de près ou loin.

Nomenclatures

C_1	constante du modèle	
C_2	constante du modèle	
D	Diamètre du tube	[m]
\vec{F}	force du corps	[N]
F_{cond}	Coefficient de condensation	
F_{vap}	coefficient d'évaporation	
f_g	fraction de masse non condensable	
f_v	fraction massique de vapeur	
G_k	énergie cinétique turbulente due à gradient de vitesse	[m ² .s ²]
G_b	énergie cinétique turbulente due à la flottabilité	[m ² .s ²]
C_μ	fonction de la déformation	
K	énergie cinétique turbulente	[Nm]
L	Longueur de tube	[m]
N	nombre de phases	
P	pression locale,	[Pa]
P_B	pression de surface de la bulle	[Pa]
P_v	Pression de vapeur (moyenne)	[Pa]
p_1	pression de l'entrée	[Pa]
P_3	pression de la sortie	[Pa]
R	taux de changement de phase nette	[Kg.s]
\mathcal{R}_B	rayon de la bulle	[m]
R_c	Le taux de condensation	[kg/s]
R_e	Le taux évaporation	[kg/s]
S_{ij}	le taux moyen de tenseur	[s ⁻¹]
S_k	défini par l'utilisateur terme source	
S_ε	défini par l'utilisateur terme source	
T_{eau}	La température de l'eau	[k]
T_{emb}	température ambiante	[k]
\vec{u}_m	la vitesse de masse moyenne	[m.s ⁻¹]
$\vec{u}_{dr,k}$	la vitesse de dérive de la phase secondaire	[m.s ⁻¹]
\vec{u}_v	la vitesse de phase vapeur	[m.s ⁻¹]

V	La vitesse	[m.s ⁻¹]
Y _m	énergie cinétique turbulente due aux fluctuations de l'ensemble l'énergie de dissipation	[m ² .s ²]

Symboles grecs :

α	la fraction volumique de la vapeur	
ε	taux de dissipation d'énergie	[m ² .s ⁻³]
ϵ	Taux de dissipation	
ρ	La densité	Kg.m ⁻³
μ_m	la viscosité du mélange	[Pa.s]
μ_t	viscosité Turbulent	[Pa.s]
μ_k	la fraction volumique de la phase k	
ρ	La densité	[Kg.m ⁻³]
ρ_k	la densité de la phase k	[Kg.m ⁻³]
ρ_l	la densité du liquide	[Kg.m ⁻³]
ρ_m	densité du mélange	[Kg.m ⁻³]
ρ_v	la densité de la vapeur	[Kg.m ⁻³]
σ	Nombre de cavitation	
σ_k	nombre de Prandtl turbulent pour k	
σ_ε	nombre de Prandtl turbulent pour ε	
ζ	la perte de coefficient	
Γ	le coefficient de diffusion.	[m ² .s ⁻¹]

Indice :

m	mélange
v	vapeur
l	liquide
k	phase
s	Particules solide
dr	dérive
emp	ambiante
B	bulle
$cond$	condensation
$evap$	vaporisation

Liste des figures

Fig.2.1-	Évolution de l'état d'un corps en fonction de la température et de la pression.....	09
Fig.2.2-	Cavitation à bulles sur une hélice marine.....	11
Fig.2.3-	Cavitation à poche partielle.....	11
Fig.2.4-	Cavitation de tourbillon.....	12
Fig.2.5-	Détérioration de pièce mécanique soumise à une exposition prolongée de la cavitation.....	13
Fig.3.1-	Dispositif de banc d'essai.....	16
Fig.3.2-	les appareils de mesure la pression (manomètres).....	17
Fig.3.3-	Thermomètre.....	18
Fig.3.4-	débit mètre à corps flottant.....	18
Fig.3.5-	Schéma coté de tube de venturi avec sens de l'écoulement et raccords....	19
Fig.4.1-	Domaine physique.....	22
Fig.4.2-	domaine de calcule.....	29
Fig.4.3-	Maillage de tube de venturi.....	29
Fig.4.4-	Facteurs de sous relaxation et types de discrétisation utilisés.....	30
Fig.5.1-	Profils et contours de pression.....	34
Fig.5.2-	Effet de Température sur le profil et contours de la pression ; <i>a.</i> T=20 °C, <i>b.</i> 25 °C, <i>c.</i> 30 °C.....	35
Fig.5.3-	Localisation des sections axiales le long du tube de venturi.....	35
Fig.5.4-	Profils de vitesse manitude à T=20°C ; <i>a.</i> $x/L=0.05$, <i>b.</i> 0.35, <i>c.</i> 0.95.....	36
Fig.5.5-	Contour de vitesse magnitude à T=20°C.....	37
Fig.5.6-	Contour de fraction volumique de la vapeur à température 20 °C.....	38
Fig.5.7-	Comparaison de nombre de cavitation et le perte coefficient numérique vs. Expérimentale.....	39
Fig.5.8-	Nombre de cavitation numérique et expérimentale en fonction de température.....	39
Fig.5.9-	perte de coefficient numérique et expérimentale en fonction de température.....	40

Liste des tableaux

Tableau 3.1-	caractéristiques de tube de venturi.....	19
Tableau 5.1-	sensibilité des paramètres de cavitation au maillage à $T=20^{\circ}\text{C}$	33

Sommaire

Chapitre 01: Etude Bibliographique	01
Introduction.....	02
1.1 Synthèse bibliographique.....	02
1.2 Objectifs de mémoire.....	05
Chapitre 02: Généralités sur la Cavitation	07
Introduction.....	08
2.1 Historique.....	08
2.2 Changement de phase.....	09
2.3 Les types de cavitation	10
2.3.1 Cavitation à bulles.....	10
2.3.2 Cavitation à poche.....	11
2.3.3 Cavitation de tourbillon.....	12
2.4 Conséquences de la cavitation.....	12
2.4.1 Érosion de cavitation.....	12
2.4.2 Bruit de cavitation.....	13
2.4.3 Pertes de performances.....	13
2.5 Utilisation de la cavitation.....	13
Chapitre 03 : Etude expérimentale	15
Introduction	16
3.1 Description du dispositif.....	16
3.2 Méthodes et moyens de mesures sur les bancs d'essai.....	17
3.2.1 Mesure de pression.....	17
3.2.2 Mesure de température.....	17
3.2.3 Mesure Le débit.....	18
3.3 Les caractéristiques géométriques du tube de venturi.....	19
3.4 Conditions expérimentales.....	19
3.5 But du travail.....	19
Chapitre 04 : Modélisation et Mise en Equations	21
Introduction.....	22
4.1 Description du Problème.....	22
4.2 Mise en Equations.....	23
4.2.1 Équation de continuité.....	23

4.2.2 Équations de Navier-Stokes.....	24
4.3 Modèle de turbulence.....	24
4.4 Théorie du modèle de cavitation.....	25
4.5 Conditions aux limites.....	29
4.6 Résolution Numérique.....	29
Chapitre 05: Résultats et discussion.....	31
Introduction.....	32
5.1 Etude de maillage.....	32
5.2 Contours de pression.....	33
5.3 Champs de vitesse.....	35
5.4 Contour de phases (fraction de vapeur)	37
5.5 Paramètre de cavitation.....	39
Conclusion générale.....	41
Références bibliographiques.....	42

Chapitre 01

Etude Bibliographique

Introduction

La cavitation est la formation de cavités remplies de vapeur ou gaz dans un liquide en mouvement. Donc en général, la cavitation se réfère à des poches de gaz apparaissant dans un écoulement fluide. En d'autres termes, il s'agit d'un phénomène diphasique avec changement de phase, qui permet de passer de l'état liquide à l'état vapeur par une diminution de la pression sans apport de chaleur. La cavitation se produit lorsque la pression d'écoulement est inférieure à la pression de vapeur saturante. Ce mot décrit un phénomène complexe pouvant exister dans une installation de pompage. Ce phénomène est discontinuité apparaissant au sein d'un fluide en raison d'une baisse complète de la pression, sans changement important de la température. C'est la naissance et l'oscillation radiale de bulles de gaz et de vapeur dans un liquide soumis à une dépression. Si cette dépression est suffisamment élevée, la pression peut devenir inférieure à la pression de vapeur saturante, et une bulle de vapeur est susceptible de se former. La cavitation est également très énergique et très bruyante dans la gamme audible. La cavitation est un processus dynamique concernant la croissance et l'effondrement des cavités de gaz dans les liquides.

Dans ce cas, l'écoulement atteint une vitesse locale suffisante, la pression statique diminue jusqu'à atteindre la valeur de la pression de vapeur saturante et le fluide se vaporise.

Nous proposons dans ce chapitre une étude bibliographique sur le phénomène de cavitation dans un tube de venturi. La recherche théorique concernant ce phénomène a réellement débutée avec l'étude de la dynamique des bulles dans la première moitié du 20^{ème} siècle. La cavitation fait aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches fondamentales dans le monde.

Cette recherche scientifique qui fait sur le phénomène de la cavitation dans un tube de venturi qui est renfermée sur une comparaison d'étude numérique et expérimentale pour étudier des écoulements cavitants dans un tube de venturi.

1.1 Synthèse bibliographique

Le début d'importe quel projet ou d'invention est une idée, et le phénomène de cavitation qui été établi dans le monde pour la premier fois en (1884) par Charles Algernon Parson dans son tunnel de cavitation personnel [1]. Figuet en (1977) a été proposé une étude permis de définir pour une géométrie de type venturi, l'influence de paramètres sur l'apparition de la cavitation en sodium et en eau, et de comparer les résultats obtenus entre ces deux fluides et les paramètres fondamentaux cherchés sont dans l'ordre est la géométrie

de l'écoulement qui définit son type de cavitation (cavitation de profil, cavitation de mélange, cavitation de bout d'aile..), le nombre de Thomas $\sigma = ((P_{ref} - P_v) / \frac{1}{2} \rho v^2)$ [2]. Harris et al, (2001) ont été testé 2 tubes de Venturi fabriqués dans une gamme de rapports de diamètres de 0,4 à 0,75. 15 tubes sont standards, avec un angle de convergence de 21°, fabriqué dans une gamme des diamètres compris entre 50 mm à 200 mm. Ils ont tous été étalonné dans l'eau et le gaz à haute pression. Pour la norme des Tubes de Venturi a été obtenue une équation pour le coefficient de décharge dans de l'eau avec une incertitude de 0,74%. Il est clair que les données dans le gaz avec un angle de convergence 10,5° est beaucoup plus lisse que ceux des tubes de Venturi avec un angle convergent supérieur [3]. Yazici (2006) a été étudié numériquement et expérimentalement la cavitation de l'écoulement qui travers un tube de venturi. Des écoulements cavitants axisymétriques et tridimensionnels sont calculés en utilisant le code Fluent. Une étude expérimentale est alors réalisée pour évaluer les solutions numériques. L'effet de convergent d'admission, le divergent de sortie, le rapport de la longueur de gorge au diamètre d'admission et le rapport du diamètre de gorge au diamètre d'admission sur le coefficient de débit, et le comportement d'oscillation de la bulle cavitante sont étudiés en détails [4]. Palau-Salvador et al.(2007) ont proposé un modèle de cavitation et comparé avec le modèle du code Fluent 6.1. Ce modèle est testé pour un écoulement à travers un orifice dans une cavité. Il fournit une simulation très fiable pour les géométries simple quand le flux stationnaire [5]. Rolland et al. (2007) ont été simulé en 2D l'écoulement de R114 dans un tube de Venturi. Une comparaison des résultats numériques et les données expérimentales, les résultats globaux et locaux sont analysés. Le taux de cavitation, la température et la pression en paroi montrent une bonne représentation par le modèle utilisé [6]. Barre et al. (2009) ont été effectué une étude expérimentale et numérique pour analyser des écoulements cavitants et pour décrire les structures d'écoulement dans les géométries de venturi. Des mesures ont été effectuées et des méthodes numériques ont été développées pour estimer des champs de cavitation et de vitesse pour des écoulements d'eau froids. Analyse basé sur des comparaisons entre les mesures expérimentales et les résultats numériques [7]. Goncalves et al.(2010) ont été présenté les résultats de différents modèles de turbulence pour l'écoulement dans un tube de venturi. Les résultats numériques ont comparé avec des données expérimentales [8]. Bojko et al. (2010) ont été étudié en expérimentale ainsi que en modélisation numérique la formation et de l'évolution de la cavitation dans l'élément hydraulique simple (tube à section variable) où le fluide est de l'eau, la formation et de l'évolution de cavitation pour différentes conditions de fonctionnement est évaluée. Une

modèle multiphasé de la cavitation dans le code Fluent12 est défini et appliqué pour les mêmes conditions que dans l'expérience. Les résultats de la simulation numérique sont comparés aux mesures expérimentales [9].

Decaix et Goncalvès (2013) ont été simulé en 2D et 3D le comportement et le développement des poches de cavitation dans une géométrie de venturi, en basant sur les modèles RANS et LES pour modélisé l'effet de turbulence [10]. Rudolf et *al.* (2014) ont été réalisé un circuit d'essai fermé avec la possibilité pour contrôler le débit et le niveau de pression statique dans un tube de venturi. Le coefficient de perte a été évalué pour différents valeur de σ . Des visualisations du développement de cavitation ont été acquises, trois régimes de cavitation ont été groupé : cavitation partielle, cavitation en pleine, super cavitation [11]. Frenander (2014) a été étudié le comportement de l'écoulement dans un tube de venturi à la présence d'un corps d'obstacle. Les paramètres critiques pour induire la cavitation hydrodynamique ont été présentés [12]. Abdulaziz (2014) a été fait des études expérimentales et théoriques sur le processus de cavitation d'écoulement dans un tube de venturi, les résultats expérimentaux et modèles ont prouvé que la cavitation se produit à un certain rapport de pression critique où le liquide commence à s'évaporer à la gorge du tube. Le rapport de pression de venturi est diminué avec la diminution du rapport de pression critique [13]. Vijay et *al.*(2014) et Brinkhorst et *al.* (2015) ont été employés le codeFluent pour démontrer les caractéristiques de l'écoulement dans venturi mètre, le domaine de calcul a été réduit en 2D, le modèle $k-\varepsilon$ est utilisé. Les résultats numériques ont été validés avec les données expérimentales de la littérature et se sont avérés en bon accord [14] et [15]. Dalton et *al.* (2015) ont été construit une installation expérimentale pour étudier les écoulements diphasiques des mélanges binaires dans un tube convergent- divergeant (tube de venturi) [16]. Bertoldi et *al.* (2015) ont présente une étude numérique sur le développement de Pocket de cavitation dans un venturi. Le transfert de masse entre les phases est conduit par un nouveau modèle d'équation de transport. Une nouvelle relation de fermeture est proposée et comparée à d'autres formulations. Les profils de rapport cavitation et les fluctuations de pression sont analysés pour discerner l'exactitude de résultats [17]. Mena et *al.* (2015) ont détaillé la conception et la caractérisation de performance d'un tube venturi cavitant cryogénique. Ce système de contrôle d'écoulement est prévu pour le règlement d'écoulement de la masse cryogénique, tels que l'oxygène liquide et le méthane liquide, dans des systèmes de propulsion de contrôle de réaction. Par des essais d'écoulement, le coefficient de débit pour le venturi a été calculé et employé pour déterminer le taux d'écoulement de la masse pour des pressions d'admission

spécifiques des propulseurs [18]. Andrej et Muhič (2015) ont été montré l'effet de la géométrie du tube venturi sur l'écoulement cavitant. Ils ont utilisé une caméra à grande vitesse pour capter les configurations d'écoulement cavitant, quatre régime de cavitation sont distingué : cavitation débutante, cavitation partielle, cavitation en pleine maturité et cavitation superbe. En conclusion, des résultats de la simulation numérique instationnaire d'écoulement sont présentée [19]. Tomov et *al.* (2016) ont été réalisé des expériences sur la cavitation aérée et non aérée dans un tube de venturi horizontal transparent. Les observations sont faites au moyen d'une caméra à grande vitesse. En conséquence, trois régimes différents sont identifiés : cavitation de feuille, cavitation de nuage et cavitation de superbe. Ces régimes sont encore aérés en injectant des bulles d'air. Des écarts type, les diagrammes du temps-espace et le spectre de fréquence basés sur la distribution verticale du niveau gris suivant une ligne surveillée sont tracés pour tous les régimes observés [20].

1.2 Objectifs de mémoire

La cavitation est un phénomène qui se produit fréquemment dans les éléments hydrauliques conventionnels tels que des pompes, des valves, des turbines et des propulseurs. Dépasse la limitation de vitesse imposée par la géométrie locale, phénomènes de cisaillement, accélération ou la vibration peut causer des chutes de pression locales dans le fluide. Quand la pression d'écoulement est moins que la pression de vapeur du fluide, il y a une vaporisation partielle et les structures de vapeur surgissent. Les structures ainsi formées sont entraînées par l'écoulement et quand elles atteignent une zone de pression plus élevée elles condensent et implosent violemment. La cavitation mène à la perte significative de performance de système, aux problèmes de l'instabilité du fonctionnement des machines et à l'érosion des murs composants. C'est ainsi une source primaire des problèmes techniques dans le domaine des turbomachines hydrauliques (les pompes centrifuges), de la propulsion navale (les hélices de bateau) et de l'espace aussi bien que dans l'injection de carburant à haute pression. D'abord la cavitation est le mécanisme le plus important de changement de phases d'un fluide.

La cavitation est un phénomène de discontinuité apparaissant au sein d'un fluide en raison d'une baisse complète de la pression, sans changement important de la température. Phénomène fréquent et souvent fort méconnu, la cavitation se produit au niveau des milieux liquides soumis à de brutales variations de pression, la cavitation se manifeste par l'apparition de petites bulles ou d'énormes cavités, qui se forment puis implosent en quelques millisecondes. Elle est à l'origine de nuisances graves telles que l'érosion des

matériaux, le bruit et les chutes de performances dans les installations hydrauliques ou marines.

Dans cette étude, nous étudions expérimentalement et numériquement l'écoulement d'eau dans un tube de venturi. Le régime de l'écoulement a été varié jusqu'à avoir la formation de zone de cavitation à la sortie d'étranglement du tube, différentes températures d'eau ont été testées. Une comparaison entre les mesures des essais et les résultats de la simulation numérique en termes de structure de l'écoulement et facteur des cavitations.

Le mémoire est structuré en cinq chapitres et une conclusion générale. Le premier chapitre consiste, tout d'abord, à présenter une légère revue bibliographique englobant des travaux expérimentaux et numériques sur les écoulements et le phénomène de cavitation dans un tube de venturi. Ensuite, l'objectif de la présente étude est précisé. Il a été jugé utile d'inclure un chapitre présentant une généralité sur la cavitation. Dans le troisième chapitre, en détaillant le banc d'essai et les instruments de mesures ainsi que les méthodes et les étapes d'expériences. La formulation mathématique, la physique du problème, les conditions aux limites et la méthode de résolution seront étalés dans le quatrième chapitre de ce mémoire. Le cinquième chapitre est réservé à la présentation des résultats de l'expérience et de la simulation numérique. Une conclusion générale ainsi que les travaux futurs envisagés clôturent le mémoire.

Chapitre 02

Généralités sur la Cavitation

Introduction

La cavitation reste, aujourd'hui encore, un sujet de préoccupation majeure, soit utilisateur, installateur ou bien entendu, par exemple dans un tube de venturi, le phénomène de cavitation, rendent nécessaire la mise à jour des connaissances sur le sujet.

Mécaniquement, on peut définir la cavitation par la rupture du milieu continu de liquide sous l'effet de contraintes excessives [21]. Physiquement, La cavitation est le phénomène de vaporisation d'un fluide soumis à une pression inférieure à sa pression de vapeur. Ce phénomène se manifeste par la formation au sein de l'écoulement, de bulles, de poches, de tourbillons ou de torches de vapeur. Elle peut être liée à un écoulement de liquide à forte vitesse, par exemple dans un tube de venturi, en effet, une zone de forte vitesse dans un fluide correspond à une faible pression.

2.1 Historique

La cavitation en hydrodynamique a été observée pour la première fois en 1884 par Charles Algernon Parson dans son tunnel de cavitation personnel. Mais la recherche théorique concernant ce phénomène a réellement débutée avec l'étude de la dynamique des bulles dans la première moitié du 20^{ème} siècle [1].

Tout le monde se souvient dans les années 1930-1940 des dégradations importantes provoquées sur les pâles des hélices des paquebots qui se disputaient le record de vitesse de la traversée de l'Atlantique. Sur ces hélices les érosions (arrachement moléculaire) allaient jusqu'à 14 cm de profondeur. On cite également le cas du destroyer américain ou, seulement après quelques heures à la vitesse maximale, la cavitation avait percé un trou de plusieurs cm² sur des tôles de plus d'un mètre d'épaisseur. Des exemples analogues existent sur les turbines hydrauliques de toutes dimensions (turbines du barrage de Serre-Ponçon). Lorsque la cavitation est importante les performances du matériel peuvent chuter. En hydraulique on observe une perte de rendement sur les turbines, un manque de pression et de débit sur les pompes. Phénomène fréquent et souvent fort méconnu, la cavitation se produit dans des liquides soumis à de brutales variations de pression. C'est le mathématicien Euler qui le premier, pressentit le phénomène de la cavitation. Mais ce n'est que dans les années 1930-1940 que les premières recherches plus ou moins « empiriques » eurent lieu. [22]

2.2 Changement de phase

La vaporisation d'un liquide est le changement de phase qui le transforme en vapeur. Cette transformation est le plus souvent produite par apport de chaleur, Comme dans les générateurs de vapeur des centrales thermiques ou ordinairement dans une casserole. Elle peut également être provoquée par une mise en dépression, Cas par exemple des évaporateurs des usines de dessalement. Dans certains cas, on donne sur la figure suivante la vaporisation résulte d'une combinaison de ces deux effets, apport de chaleur et mise en dépression [23].

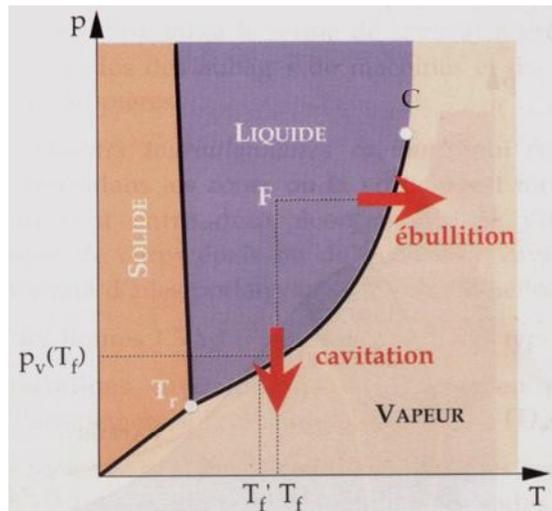


Fig.2.1-Évolution de l'état d'un corps en fonction de la température et de la pression.

[23]

Si on prend l'exemple de l'eau, et on regarde l'évolution de ses états en fonction de la température, à la pression atmosphérique, l'eau sous forme de glace chauffée atteint son point de fusion à 0°C et l'eau devient liquide. Si on continue à chauffer, toujours à la pression atmosphérique, elle passe à l'état de gaz par le phénomène d'ébullition à 100 °C. Cette évolution des différents états s'explique par la figure 2.1.

A température constante, si on se place désormais à une température donnée, l'eau pour la pression atmosphérique est à l'état liquide (point F). D'après le diagramme précédent, on observe qu'il existe une manière pour faire passer l'eau de l'état liquide à l'état gazeux à température constante : Il suffit d'abaisser suffisamment la pression [21]. Lorsque cette dépression amenant à la vaporisation du liquide est locale (discontinuité dans le milieu liquide), on parle alors du phénomène de cavitation, qui se manifeste par l'apparition de poche d'air et de bulles.

Les endroits les plus critiques où peut se produire la cavitation dans un circuit d'eau sont les réductions et les élargissements soudains de la section transversale, et les

changements d'écoulement du flux. Donc, la cavitation est la vaporisation d'un fluide soumis à une pression inférieure à sa pression de vapeur. Ce phénomène se manifeste par la formation, au sein de l'écoulement, de bulles et cavités remplies de vapeur d'eau. Des implosions se produisent alors à des fréquences élevées et créent des surpressions locales très élevées (jusqu'à des centaines de bars).

2.3 Les types de cavitation

On rencontre donc une quantité de type de cavitation, dont certains particulièrement importants, ont fait l'objet de classification plus ou moins admises par la communauté spécialisée. Parmi les sous-classifications pouvant présenter un certain intérêt, consiste à considérer qui se produisent au sein du liquide et celles qui sont provoqués près des parois. Toutes les cavitations obtenues au sien d'un liquide impliquent la présence de tourbillons permanents ou non. Elles sont particulièrement sensibles au nombre de Reynolds :

- cavitation à haut nombre de Reynolds : l'inertie du liquide (sa mise en mouvement) ralentit l'expansion de la partie vapeur.
- cavitation à faible nombre de Reynolds : la viscosité du liquide limite la vitesse d'expansion.
- cavitation élastique : la résistance élastique du milieu et la tension de surface limitent la dilatation de la phase gazeuse.

Un autre sous classification possible, il convient de considérer deux grandes familles d'écoulements cavitants, la cavitation à structures séparées, qui nécessite la présence de germes pour se développer, et la cavitation quasi permanent, la cavitation à poches, par exemple, qui après avoir été initiée, s'auto-entretient par vaporisation du liquide environnement au travers d'une interface assez bien définie. On présente certains types de cavitation les plus couramment admis et leurs formes dégradées éventuelles [24].

2.3.1 Cavitation à bulles

Les bulles ont pour origines des germes de cavitation contenus dans le fluide. Ces germes de cavitation sont des microbulles et il n'y a pas de milieu liquide qui n'en contienne. La teneur en germes (le nombre de germes de cavitation par unité de volume fluide) caractérise la qualité de l'eau. Quand un germe de cavitation se déplace avec le fluide dans la zone de dépression à l'extrados de la pale (coté bateau), elle grossit et devient une bulle clairement visible.

La bulle grossit jusqu'à ce qu'elle atteigne la zone de recompression. La rapidité du passage provoque une implosion de la bulle. Un exemple de la cavitation à bulles sur une hélice est présenté à la figure 2.2 [25]



Fig.2.2-Cavitation à bulles sur une hélice marine. [23]

2.3.2 Cavitation à poche

La cavitation à poche (Figure 2.3) est moins bruyante et moins destructive que la cavitation à bulles (pas d'implosion). Un des effets néfastes de la cavitation à poche est la perte de performances du propulseur. De plus, la cavitation à poche peut être à l'origine de problèmes de vibrations dont les conséquences peuvent aller jusqu'à l'endommagement de la structure [25].



Fig.2.3-Cavitation à poche partielle. [25]

2.3.3 Cavitation de tourbillon

Le fluide, en plus de son mouvement d'ensemble, est animé d'un mouvement de rotation autour d'un axe ou d'une ligne courbe, la vitesse de rotation diminuant dès que l'on s'éloigne de l'axe. L'axe du tourbillon est le siège d'une dépression qui, lorsqu'elle est suffisante, provoque la vaporisation du fluide et la formation de tourbillons cavitants. Elle se rencontre avec les hélices et les pompes et turbines hydrauliques.

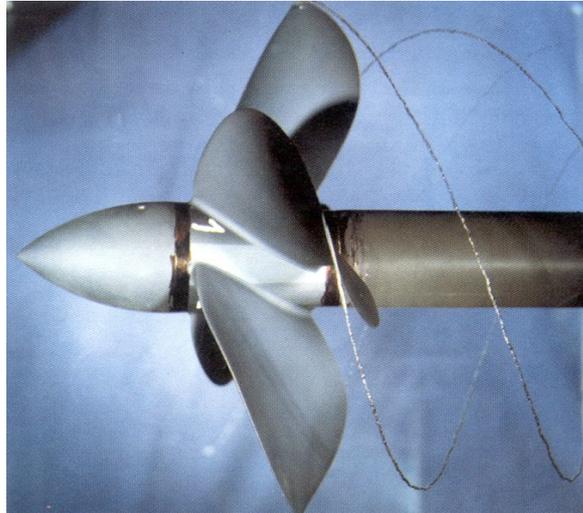


Fig.2.4–Cavitation de tourbillon. [25]

2.4 Conséquences de la cavitation

L'intérêt que l'on peut porter à la cavitation est lié aux conséquences très souvent néfastes que ce phénomène peut avoir sur les performances hydrodynamiques, ou même sur la durabilité des matériaux sujets à évoluer sous les contraintes de la cavitation. Cette section évoque brièvement ces problèmes, puis quelques cas où la cavitation présente un aspect utile.

2.4.1 Érosion de cavitation

L'érosion due à la cavitation peut obliger à réparer fréquemment les machines, même si celles-ci sont correctement dimensionnées d'un strict point de vue de leurs performances hydrodynamiques.

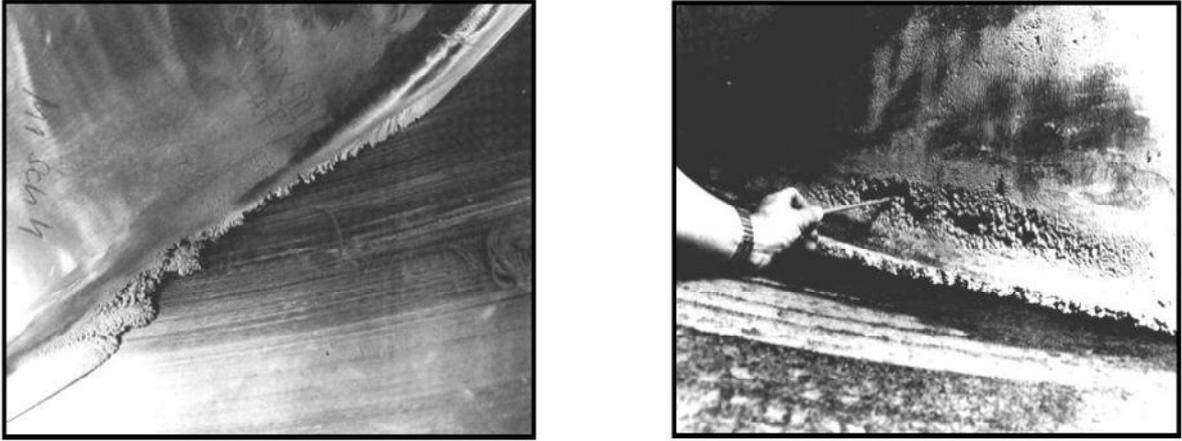


Fig.2.5–Détérioration de pièce mécanique soumise à une exposition prolongée de la cavitation. [25]

2.4.2 Bruit de cavitation

La première manifestation d'une pompe qui cavite est le bruit, qui révèle la présence de microbulles dans l'écoulement. Ce bruit hydraulique généré par la cavitation excite ensuite les parois de la pompe et des tuyauteries proches de celle-ci. Les tuyauteries, à leur tour, rayonnent ce bruit dans le milieu aérien ambiant. Lorsqu'une pompe cavite de manière importante, on enregistre un bruit caractéristique de crépitements et claquements quelquefois. Pour des machines de grande taille ou tournant très vite, le bruit aérien généré par la cavitation peut être gênant pour l'utilisateur ou l'environnement. Cependant, la part du bruit qui incombe directement à la cavitation ne représente qu'une faible partie du bruit rayonné par les pompes.

2.4.3 Pertes de performances.

Lorsque le phénomène est trop développé, c'est-à-dire lorsque la vapeur a envahi les composants, les machines subissent des chutes importantes de leurs performances pouvant, à la limite, aller jusqu'à les rendre totalement inutilisables.

2.5 Utilisation de la cavitation

Cependant en dépit de ses aspects négatifs, la cavitation trouve des applications dans certains procédés industriels qui nécessitent la concentration d'énergie sur de petits domaines afin de produire localement des pics de pressions élevés.

La cavitation est ainsi utilisée dans

- Limitation de débit de liquide
- aide forage pétrolier

- Générateur de microbulles
- catalyseur de réaction chimique
- Le nettoyage des surfaces par ultrasons ou par jets cavitants
- La production d'émulsion
- Le dégazage des liquides
- création de jets d'encre

Pour éviter l'apparition de la cavitation, il faut maintenir le nombre de cavitation σ aussi élevé que possible. En plus, un nombre de cavitation bas induit une consommation importante d'énergie et de faibles dimensions de la turbomachine.

Chapitre 03

Etude expérimentale

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale sur un banc d'essai de la modèle de démonstration de la cavitation, disponible dans laboratoire d'institut des sciences et technique au Centre universitaire El-Wancharissi de Tissemsilt. Les moyens expérimentaux utilisés dans les essais de ce travail sont présentés dans ce chapitre.

Les techniques de mesure principalement mise en œuvre sont la pression atmosphère et température ambiante $T_{emb}=15.5^{\circ}\text{C}$ et utilise un banc d'essai de démonstration de la cavitation. Ces mesures directes sont utilisées pour effectuer les calculs expérimentaux de le nombre de cavitation et le perte de coefficient dans un tube de venturi à des différents débits et des températures variées, par une série d'expériences en utilisant le banc d'essai **GUNT ST 250**.

3.1 Description du dispositif

Le **GUNT ST 250** (figure 3.1) modèle de démonstration de la cavitation permet de rendre visible le processus de cavitation à l'aide d'un tube de venturi transparent. Dans le tube de venturi, la pression est convertie en vitesse jusqu'à ce que la valeur devienne inférieure à la température ambiante. Dans la section la plus étroite du tube, des bulles de vapeur se forment alors ; elles coulent de nouveau au niveau d'un agrandissement de la section d'écoulement.

Le modèle de démonstration nécessite uniquement d'eau avec une pression d'alimentation d'environ 4bars.

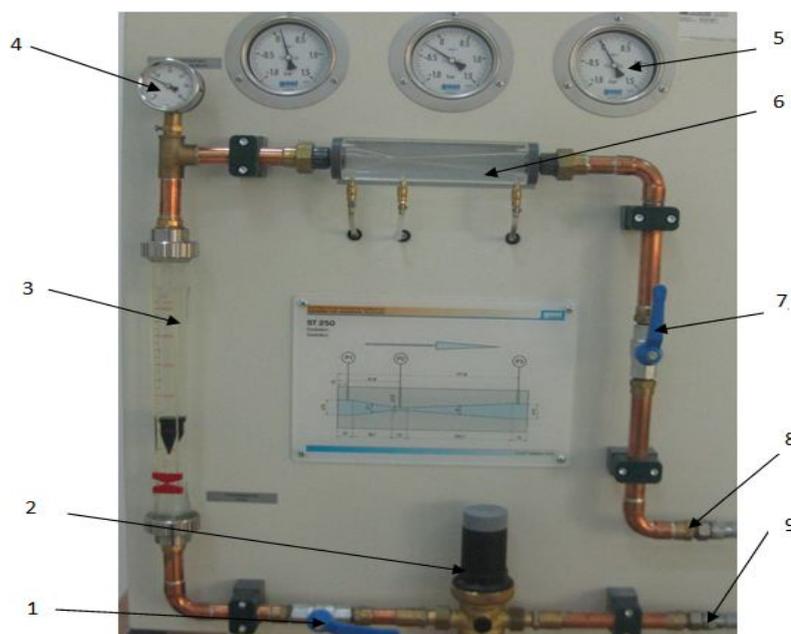


Fig.3.1- Dispositif de banc d'essai.

- | | |
|---------------------------------|----------------------------------|
| 1 : Robinet à boisseau | 6 : Tube de venturi |
| 2 : Détendeur | 7 : Robinet à boisseau sphérique |
| 3 : Débitmètre à corps flottant | 8 : Raccord évacuation de l'eau |
| 4 : Thermomètre | 9 : Raccord arrivée d'eau |
| 5 : Manomètre | |

3.2 Méthodes et moyens de mesures sur les bancs d'essai

3.2.1 Mesure de pression

La mesure de la pression s'effectue directement à l'aide de manomètre qui posse dans le banc d'essais, ce valeurs variés à partir de chaque débit et de températures. Le modèle de démonstration comprend outre trois manomètres à bilame pour mesure les pressions, pression de l'entrée p_1 , pression moyenne P_2 et pression de la sortie P_3 . Le tube de venturi (figure 3.5), possède trois soutirages reliés aux raccordes à l'aide de manomètres (figure 3.3), via les tuyaux. Au débit de l'essai, tous les accouplements doivent être enfichés sur le tube de venturi pour que l'eau ne s'écoule pas des raccords.



Fig.3.2-les appareils de mesure la pression (manomètres).

3.2.2 Mesure de température

La mesure de la température de l'eau s'effectue à partir d'un bilame du thermomètre (figure 3.4) se trouve dans une gaine d'immersion qui est suspendue directement dans l'écoulement de manière à ce que la température réelle du fluide circulant soit mesurée.



Fig.3.3- Thermomètre.

3.2.3 Mesure Le débit

Le débit mètre à corps flottant (figure 3.5) mesure le débit volumique. Un corps flottant est entraîné dans un tube conique en raison de l'écoulement. Il est possible de relever sur le bord supérieur du corps flottant sur une échelle le débit en l/h.



Fig.3.4-débit mètre à corps flottant.

3.3 Les caractéristiques géométriques du tube de venturi

Les différentes sections du tube sont reportées sur le tableau 3.1. Les prises de pression pour mesurer la pression dans les trois stations du tube sont situées à l'entrée, l'étranglement et à la sortie.

Tableau 3.1- caractéristiques de tube de venturi.

Position	Section d'écoulement
Pression d'entrée P_1	D1= 18 mm
Pression moyenne P_v	D2=3.5 mm
Pression de sortie P_3	D3=18 mm



Fig.3.5-Schéma coté de tube de venturi avec sens de l'écoulement et raccords.

3.4 Conditions expérimentales

Dans la réalisation des essais de cette recherche, un certain nombre de conditions ont été pris pour l'étude des phénomènes de cavitation, il s'agit de :

- ❖ La température des essais est celle du milieu ambiant, où on a la température $T=15.5^{\circ}\text{C}$.
- ❖ La pression des essais est la pression atmosphères (101321 Pa).

3.5 But du travail

Le banc d'essai, présenté sur la figure 3.1, a été permettant une étude de changements de phases et les caractéristiques du phénomène de la cavitation dans un tube de venturi. L'objectif des différentes manipulations réalisées sur le banc d'essai est d'observer les variations des paramètres suivants :

- La pression à l'entries du tube de venturi désignée par P_1 .
- La pression à la gorge (moyenne) désignée par P_v .
- La pression à la sortie du tube de venturi désignée par P_3 .

- La température de l'eau dans le réservoir T_{eau} .
- La longueur de la cavitation.

Notre mesure retrouve dans chaque cas avec les variations de la température et le débit de l'eau. Les objectifs fixés pour cette étude est calculé le nombre de cavitation σ et la perte de coefficient ζ . Afin comparer les résultats expérimentaux avec les résultats numériques.

Chapitre 04

Modélisation et Mise en

Equations

Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des équations qui régissent le phénomène de cavitation dans un tube de venturi. Il s'agit principalement des équations régissant le mouvement du fluide, le changement de phases, ainsi que les hypothèses pour lesquelles ces équations sont valables. La fin de ce chapitre est consacrée à la présentation des caractéristiques principales de l'outil numérique utilisé pour suivre l'évolution des solutions du système. Suit une description des considérations de précision qui ont été respectées pour s'assurer de la bonne convergence numérique des résultats.

4.1 Description du Problème

On se propose d'étudier le phénomène de la cavitation dans un tube de venturi contenant une section cylindrique à l'entrée de 187.8 mm de longueur et de diamètre 18 mm, un convergeant avec un angle de 10.5° , une section cylindrique de petite diamètre puis un divergeant d'angle de 4° et à la sortie un cylindre. La configuration de la géométrie d'écoulement est illustrée sur la Figure 4.1. Les axes de coordonnées x et y ont respectivement orientés suivant les directions horizontale et verticale.

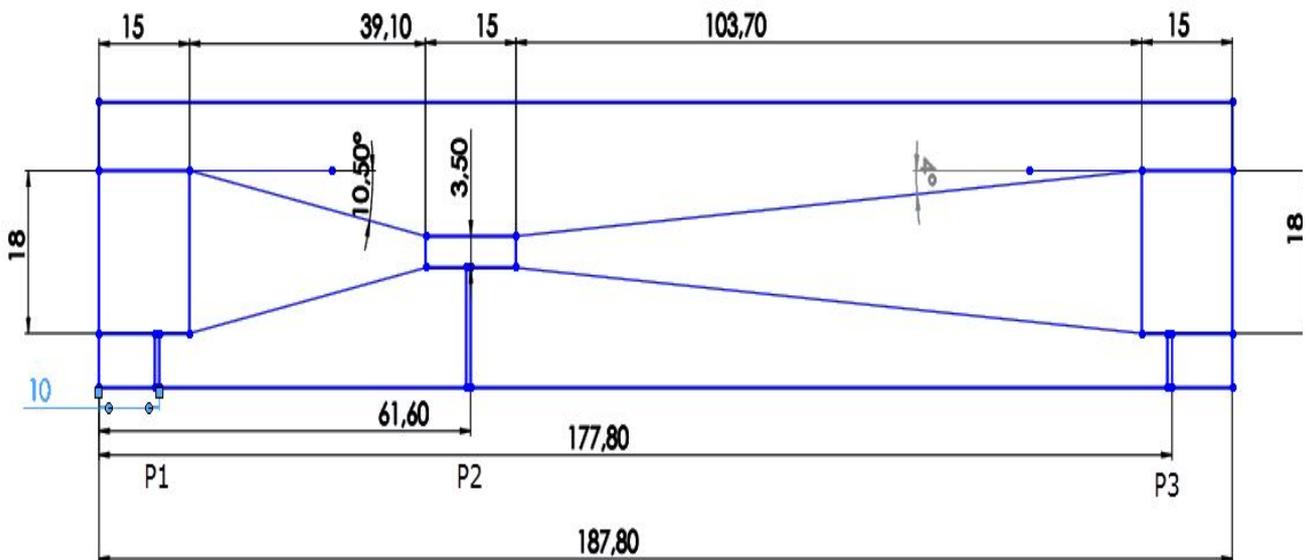


Fig.4.1-Domaine physique.

Toute simulation repose sur une modélisation du problème. Cette dernière implique certaines hypothèses simplificatrices. Les hypothèses utilisées souvent dans un phénomène de cavitation sont énumérées comme suit, les hypothèses suivantes sont faites dans les modèles standards de cavitation à deux phases dans le code Fluent 6.3 :

- ✓ Le système à l'étude doit consister en un liquide et une phase vapeur.
- ✓ Le transfert de masse entre la phase liquide et la vapeur est supposé avoir lieu. Les deux formations de bulles (évaporation) et l'effondrement (condensation) sont pris en compte dans les modèles de cavitation.
- ✓ Les modèles de cavitation sont basés sur l'équation de Rayleigh-Plesset décrivant la croissance d'une seule bulle de vapeur dans un liquide.
- ✓ Les propriétés des matériaux d'entrée utilisées dans les modèles de cavitation peuvent être des constantes, des fonctions de température ou définies par l'utilisateur.
- ✓ L'écoulement est considéré 2D axésymétrie et stationnaire.

4.2 Mise en Equations

La cavitation est modélisée en utilisant le code Fluent 6.3. Il utilise un modèle de cavitation résout les équations d'écoulement multiphase, avec transfert de masse due à la cavitation comme la source et l'évier termes liquide et vapeur équations de continuité. L'écoulement multiphasique est calculé en utilisant le modèle de mélange, qui traite les phases continus interpénétrés. Le modèle de mélange permet de résoudre l'équation de mouvement et de continuité pour le mélange et l'équation de la fraction volumique de la phase secondaire. La turbulence est résolue en utilisant le modèle k-ε réalisable. Le transfert de masse interphase est résolu en utilisant une forme modifiée de l'équation de Rayleigh-Plesset qui est dérivé par Singhal et *al.*, 2001.

4.2.1 Équation de continuité

L'équation de continuité pour le mélange est :

$$\frac{\partial(\rho_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m) = 0 \quad (4.1)$$

où \vec{u}_m est la vitesse de masse moyenne donnée par :

$$\vec{u}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k u_k}{\rho_m} \quad (4.2)$$

ρ_m est la densité du mélange donné par

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (4.3)$$

α_k est la fraction volumique de la phase k et ρ_k est la densité de la phase k .

4.2.2 Équations de Navier-Stokes

L'équation de mouvement pour le mélange peut être obtenu en additionnant les équations cinétiques individuelles pour toutes les phases [Batchelor, 1967], représentés par

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{u}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m \vec{u}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{u}_m + \nabla \vec{u}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot (\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{u}_{dr,k} \vec{u}_{dr,k}) \quad (4.4)$$

où n est le nombre de phases, \vec{F} est une force du corps, et μ_m est la viscosité du mélange, donnée par :

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (4.5)$$

$\vec{u}_{dr,k}$ est la vitesse de dérive de la phase secondaire k , défini comme étant

$$\vec{u}_{dr,k} = \vec{u}_k - \vec{u}_m \quad (4.6)$$

Le terme $\nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m \vec{u}_m)$ représente les forces cinétiques d'énergie, $\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{u}_m)$ représente les forces d'inertie et $[\mu_m (\nabla \vec{u}_m + \nabla \vec{u}_m^T)]$ représente les forces visqueuses.

L'équation de la fraction volumique de la phase secondaire est obtenue à partir de l'équation de cette phase de continuité donnée par :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{u}_m) = \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{u}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (m_{qp}^i - m_{pq}^i) \quad (4.7)$$

4.3 Modèle de turbulence

La turbulence dans un système donné est pris en compte par la résolution de l'équation pour k (énergies cinétiques turbulentes) et ε (taux de dissipation turbulente) selon le modèle k - ε réalisable en Fluent 6.3, telle que donnée par :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.8)$$

et

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu} \epsilon} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (4.9)$$

avec

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad \eta = S \frac{k}{\epsilon} \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

Dans l'équation de ϵ , G_k , G_b et Y_m sont l'énergie cinétique turbulente due au gradient de vitesse, la flottabilité, et les fluctuations dues à l'énergie de dissipation globale, respectivement; S_k et S_ϵ sont définis par l'utilisateur des termes sources; σ_k et σ_ϵ sont des nombres de Prandtl turbulent; et C_1 et C_2 sont des constantes; S_{ij} est le taux moyen de tenseur.

viscosité Turbulent est obtenue par :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4.10)$$

où C_μ est une fonction de la déformation et la rotation des taux moyens, la vitesse angulaire de la rotation du système, et les champs de turbulence.

4.4 Théorie du modèle de cavitation

Dans la cavitation, le transfert de masse de la vapeur (évaporation et de condensation) est calculé par l'équation de transport de vapeur suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha \rho_v \vec{u}_v) = R_e - R_c \quad (4.11)$$

Où ν est la phase vapeur, α est la fraction volumique de la vapeur, et ρ_v est la masse volumique de la vapeur. R_e et R_c dans l'équation (4.11) sont la génération de vapeur et de taux de condensation termes, qui représentent le transfert de masse entre les phases.

La croissance de la bulle et l'effondrement sont régies par la dynamique des bulles équations qui est donnée par l'équation de Rayleigh-Plesset [Brennan, 1995] comme ;

$$\mathfrak{R}_B \frac{d^2 \mathfrak{R}_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{d\mathfrak{R}_B}{dt} \right)^2 = \left(\frac{P_B - P}{\rho_l} \right) - \frac{4u_l}{\mathfrak{R}_B} \mathfrak{R}_B - \frac{2\sigma}{\rho_l \mathfrak{R}_B} \quad (4.12)$$

où \mathfrak{R}_B est le rayon de la bulle, ρ_l est la densité du liquide, P_B est la pression de surface de la bulle, P est la pression locale, et σ est la tension superficielle.

Négliger les termes de second ordre et l'équation (4.12) à long terme de la tension superficielle réduire à :

$$\frac{d\mathfrak{R}_B}{dt} = \sqrt{\frac{2 P_B - P}{3 \rho_l}} \quad (4.13)$$

L'équation pour le taux net de changement de phase a été obtenue par Singhal comme suit [Singhal et al., 2001];

L'équation de continuité de phase liquide :

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1 - \alpha) \rho_l] + \nabla \cdot [(1 - \alpha) \rho_l \vec{u}] = -R \quad (4.14)$$

L'équation de continuité de phase vapeur :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha \rho_v \vec{u}) = R \quad (4.15)$$

L'équation de continuité pour le mélange :

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (4.16)$$

où ρ densité du mélange est définie comme suit :

$$\rho = \alpha \rho_v + (1 - \alpha) \rho_l \quad (4.17)$$

En combinant les équations (4.15) , (4.16) et (4.17), une relation entre la densité du mélange et de la fraction volumique de la vapeur est obtenue en :

$$\frac{d\rho}{dt} = -(\rho_l - \rho_v) \frac{d\alpha}{dt} \quad (4.18)$$

En supposant que la bulle soit de forme sphérique, la fraction volumique de vapeur α est alors liée à densité de nombre de bulles n et rayon de la bulle \mathfrak{R}_B comme :

$$\alpha = n \times \left(\frac{4}{3} \pi \mathfrak{R}_B^3 \right) \quad (4.19)$$

En combinant les deux équations ci-dessus (4.18) et (4.19) donne :

$$\frac{d\rho}{dt} = -(\rho_l - \rho_v) (n4\pi)^{\frac{1}{3}} (3\alpha)^{\frac{2}{3}} \frac{d\mathfrak{R}_B}{dt} \quad (4.20)$$

En utilisant l'équation (4.13), et en combinant les équations (4.14), (4.15), (4.18) et (4.19) donner une expression pour la phase nette taux de variation R comme :

$$R = (n4\pi)^{\frac{1}{3}} (3\alpha)^{\frac{2}{3}} \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \sqrt{\frac{2 P_v - P}{3 \rho_l}} \quad (4.21)$$

L'équation (4.21) donne le taux d'expression de la production de vapeur par évaporation et condensation. Cette équation peut être écrite en termes de \mathfrak{R}_B comme :

$$R = \frac{3\alpha}{\mathfrak{R}_B} \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \sqrt{\frac{2 P_v - P}{3 \rho_l}} \quad (4.22)$$

L'équation (4.22) indique que le transfert de masse volumique dépend de la densité de la vapeur, la densité du liquide et la densité du mélange. P la pression locale est la pression du centre de la cellule et P_B est égale à la pression P_v vapeur.

$$P_B = P_v \quad (4.23)$$

Le modèle proposé pour le transport de vapeur donnée comme suit [Zwart, 2005]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_v \rho) + \nabla \cdot (f_v \rho \vec{u}_v) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla f_g) + R_e - R_c \quad (4.24)$$

Où f_v est la fraction massique de vapeur, f_g est la fraction de masse condensable non et Γ est le coefficient de diffusion. R_e et R_c dans l'équation (4.24) sont évaporation et taux de condensation termes qui sont définis comme suit :

Lorsque $P_v \geq P$, $R_c = 0$ et :

$$R_e = F_{vap} \frac{\max(1.0, \sqrt{k})(1 - f_v - f_g)}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_l}} \quad (4.25)$$

Lorsque $P_v < P$, sinon $R_e = 0$ et:

$$R_c = F_{cond} \frac{\max(1.0, \sqrt{k})(1 - f_v - f_g)}{\sigma} \rho_v \rho_l \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P - P_v}{\rho_l}} \quad (4.26)$$

Lorsque $P_v < P$, les constantes dans l'équation (4.25) et (4.26) sont $F_{vap} = 0,02$ et $F_{cond} = 0,01$. La pression de saturation est corrigée pour tenir compte des changements en raison des fluctuations de pression turbulente par :

$$P_v = P_{sat} + \frac{1}{2}(0.39k) \quad (4.27)$$

où k est l'énergie cinétique turbulente. Ces termes de masse de taux de transfert sont en fonction des paramètres d'écoulement tels que la pression locale, la vitesse du fluide et de la turbulence, et les propriétés physiques des fluides tels que liquide et vapeur densités de phase, la pression de saturation et la tension de surface liquide vapeur [Singhal et al., 2001]

4.5 Conditions aux limites

La simulation numérique dans cette présente étude vise à étudier l'écoulement de changement de phase dans un tube de venturi de longueur 187.8mm. Le tube est circulaire l'eau chaude, qui entrée et sortie à diamètre de 18mm, comme l'illustre la Figure 4.2.

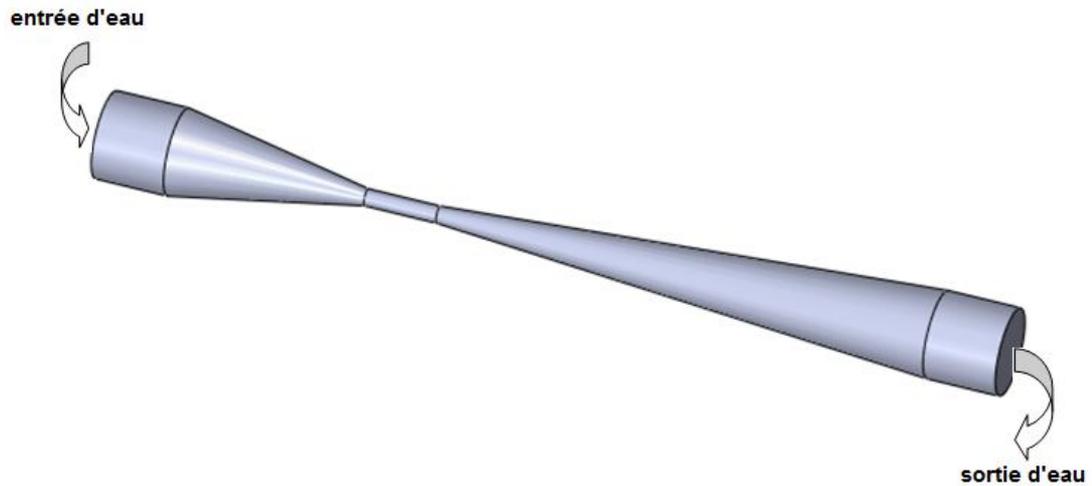


Fig.4.2- domaine de calcul.

4.6 Résolution Numérique

La résolution numérique des équations a été effectuée sur une configuration bidimensionnelle par la méthode des volumes finis à l'aide du code *CFD Fluent* 6.3.26. Le maillage utilisé a été réalisé par sur *Gambit* 2.3.16 pour étudier le comportement de l'eau dans le tube de venturi à des différents régimes ($m=200\div 700$ l/h). Un aperçu de ces différents maillages est présenté dans la Figure.4.3. Le maillage a été resserré près des parois. Le maillage a été resserré près de convergeant et divergeant. Le problème a été résolu en utilisant un solveur « pressure based ».

L'équation de pression est discrétisée par le schéma *PRESTO*, les autres équations sont discrétisées par un schéma de deuxième ordre. La solution est considérée comme convergente quand le résidu des équations algébriques est inférieur à 10^{-6} .

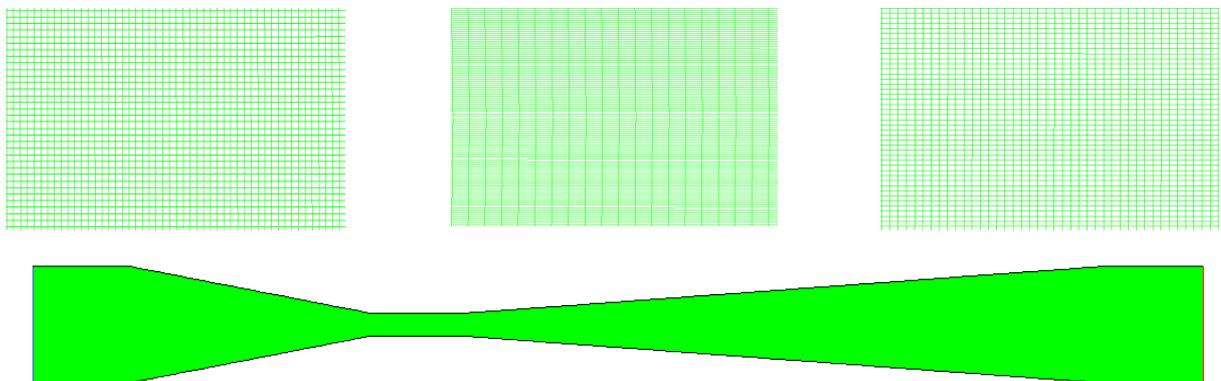


Fig.4.3-Maillage de tube de venturi.

La solution est considérée comme convergente quand le résidu des équations algébriques est inférieur à 10^{-6} pour le cas turbulent, les facteurs de sous relaxation ont été ajustés. La convergence est assurée pour un nombre d'itérations supérieur à 5000.

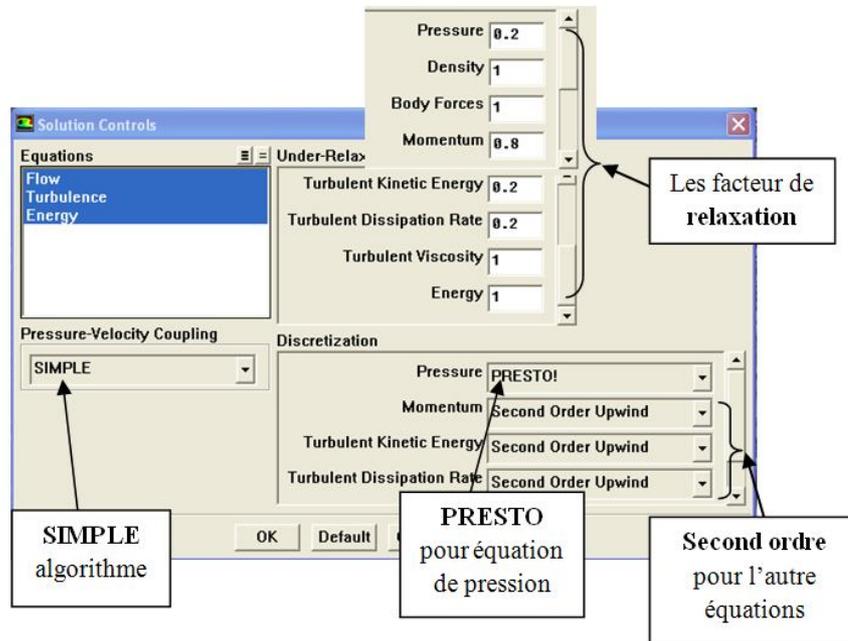


Fig.4.4-Facteurs de sous relaxation et types de discrétisation utilisés.

Chapitre 05

Résultats et Discussions

Introduction

Ce chapitre est consacré principalement à la présentation et la discussion des résultats du changement de phases obtenus à partir des simulations numérique et à partir des expériences a travers un banc de cavitation dans un tube de venturi, à différent température 20°C à 40°C et débit de 300 l/h à 700 l/h. Les calculs vont permettre de montrer une comparaison entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux, l'influence du la température et les débits sur le changement de phases dans un tube de venturi.

5.1 Etude de maillage

Dans toute étude numérique, la qualité du maillage possède une grande influence sur la précision de la solution. A cet effet, des tests de sensibilité au maillage ont été effectués pour garantir une solution indépendante de la grille choisie. Cette dernière est évaluée par l'analyse de trois maillages de 20,000, 40,000 et 60,000 cellules pour le cas d'un débit d'admission de 700 l/h à une température 20 °C.

Les trois maillages ont été comparés quantitativement en tenant compte des incertitudes numériques pour prédire les paramètres de la cavitation dans le tube.

Le Tableau 5.1 montre la sensibilité de nombre de cavitation σ et La perte de coefficient ζ au maillage. Le nombre de cavitation σ est obtenu à partir des mesures des pressions à l'entrée et à la sortie et la pression a gorge et qui est donnée par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{P_1 - P_v}{P_1 - P_3} \quad (5.1)$$

La perte de coefficient ζ est obtenue à partir de la relation suivante :

$$\zeta = \frac{P_1 - P_3}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (5.2)$$

Les valeurs σ et ζ des maillages 3 et 4 sont presque identiques. Il est à noter que seulement 0.6% de variation de la différence moyenne de température se produit lorsque la grille de calcul passe de 40,000 à 60,000 cellules.

Sur la base des incertitudes mentionnées ci-dessus, il est donc jugé convenable d'utiliser le maillage 2 pour le reste de l'étude. L'utilisation du maillage 3 a provoqué une augmentation considérable des coûts de calcul des cas testés sans apport de changement significatif.

Tableau 5.1 – sensibilité des paramètres de cavitation au maillage à T=20°C.

in (l/h)	σ			ζ			Erreur (%)	
	M1 (20.000)	M2 (40.000)	M3 (60.000)	M1 (20.000)	M2 (40.000)	M3 (60.000)	σ	ζ
300	3.554	3.677	3.840	0.00273	0.00262	0.00243	0.046	0.072
400	3.597	3.714	3.897	0.00276	0.00263	0.00243	0.048	0.076
500	2.299	2.285	2.319	0.00441	0.00440	0.00420	0.0013	0.045
600	1.519	1.514	1.528	0.00656	0.00650	0.00626	0.0066	0.036
700	1.325	1.336	1.328	0.00737	0.00698	0.00635	0.00075	0.090

5.2 Contours de pression

Afin de donner un aperçu détaillé sur les mécanismes qui se produisent dans le tube de venturi, ce dernier est analysé pour plusieurs débit entrant et à différente température. La Figure 5.1 montre les profils de pression dans la ligne médiane du tube ainsi que les contours sur le tube.

Les profils de vitesse montre une valeur constante le long de la partie cylindrique du tube de venturi et dans la majorité du convergent ($x/L=0$ jusqu'à 0.2) quel que soit le débit entrant. Il y a une forte chute de pression près de la gorge du tube, provoquant une augmentation de la vitesse qui s'approche du régime sonique, cette diminution atteindre la pression de saturation (-38000 Pa). Par la suite, une forte chute de la pression à l'entrée du cylindre de la gorge est notée. Cependant, les pressions statique augmente brusquement lors de de la sortie de l'écoulement vers un divergeant pour atteindre une pression avoisinant la pression nulle. La chute pression statique est reste similaire pour tous les débits entrants, avec des grandeurs différent.

Une bonne concordance a été observé entre les mesures expérimentales et résultats du numérique.

La figure 5.2 illustre l'effet de la température d'eau sur la pression statique dans le tube ; les mesures en expériences ainsi que les résultats numériques sont présentés. Les mêmes constats peut être effectuée pour les températures de 25°C et 30°C.

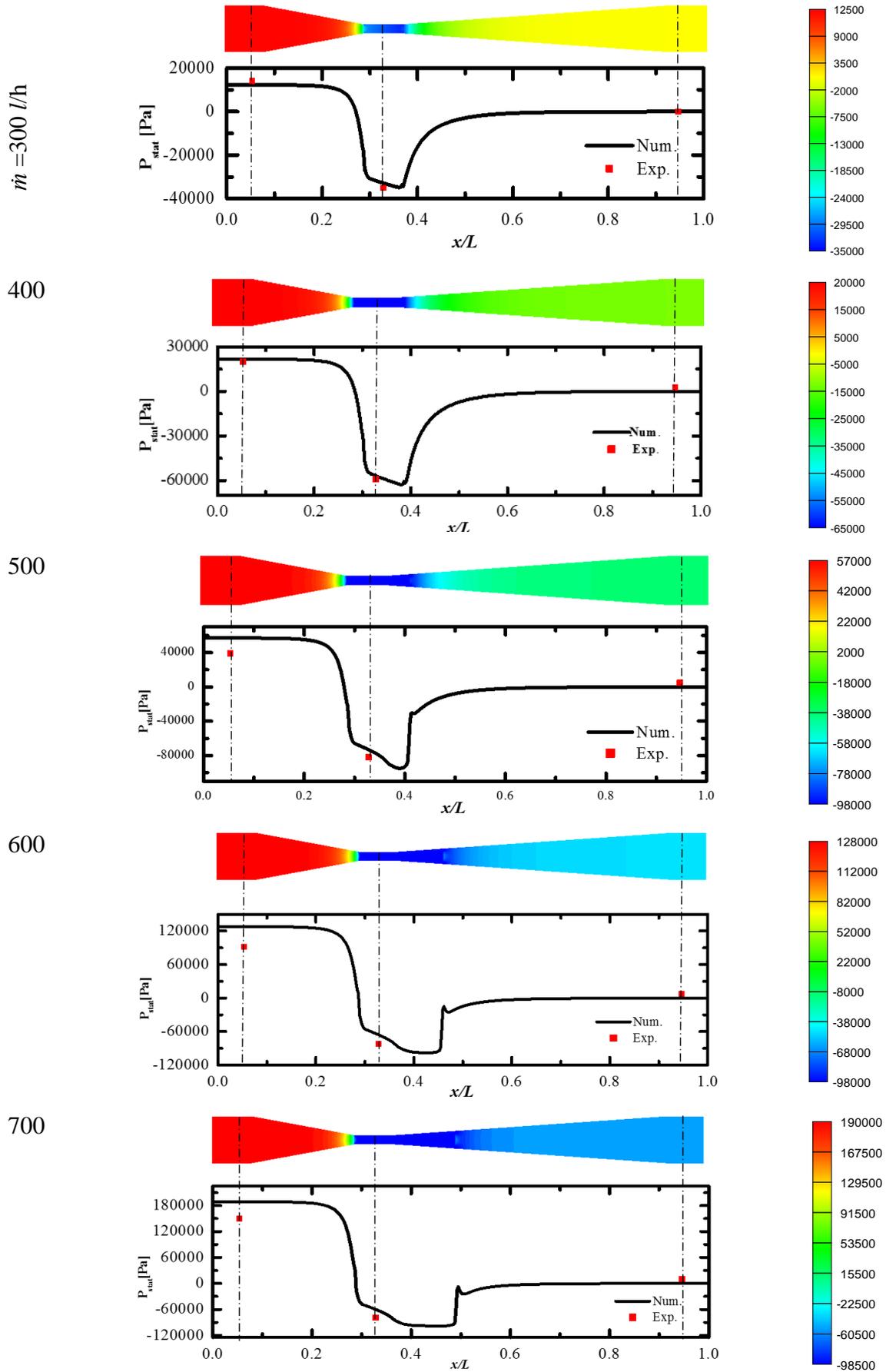


Fig.5.1-Profiles et contours de pression à $T=20^\circ\text{C}$.

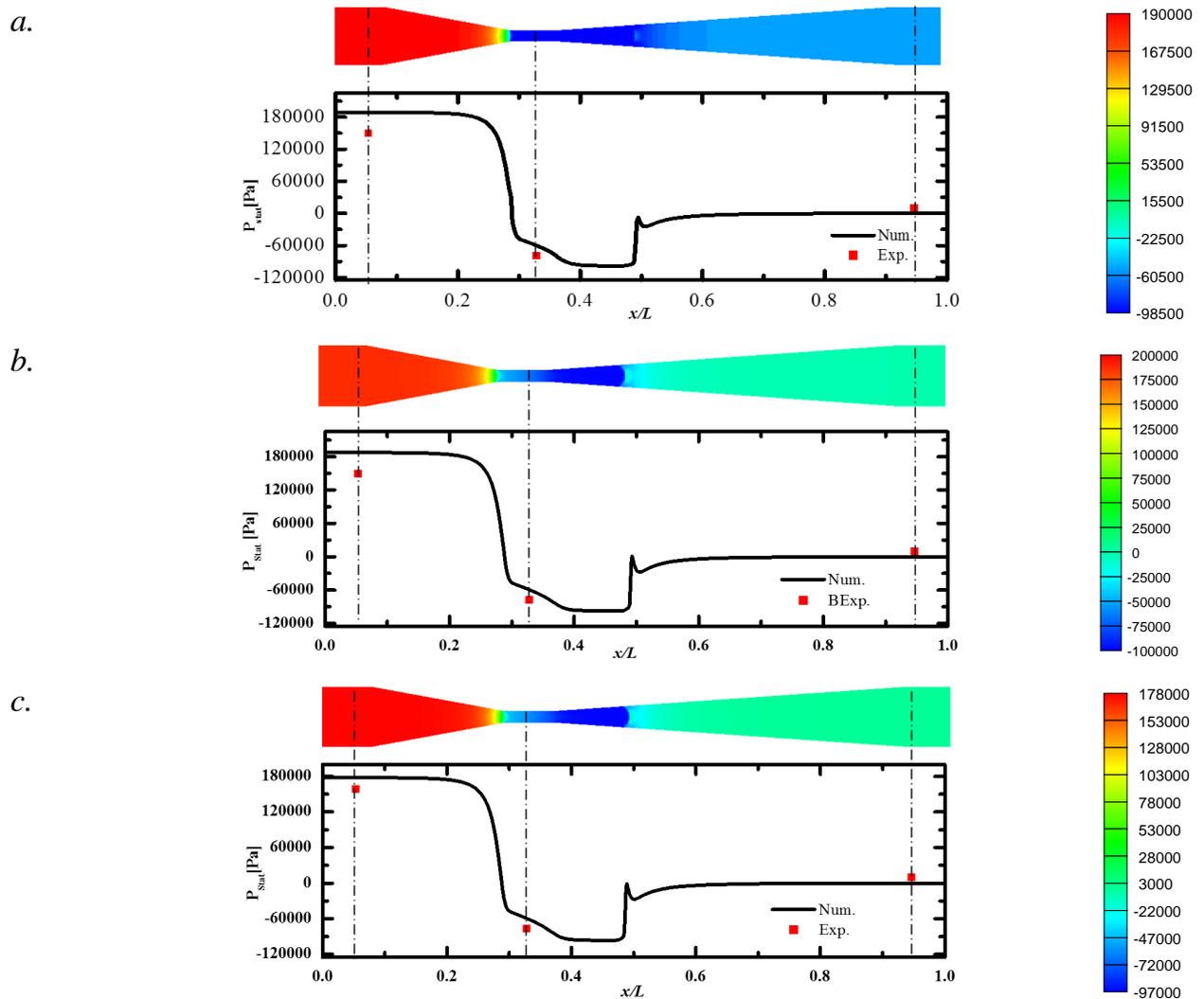


Fig.5.2- Effet de Température sur le profil et contours de la pression ; a. $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, b. $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, c. $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5.3 Champs de vitesse

L'écoulement à l'intérieur du tube est analysé en considérant le champ de vitesse, la structure de l'écoulement est analysée par des distributions radiales dans différentes sections de long du tube. Les sections considérées englobent les positions suivantes : près de l'entrée ($x/L=0.05$), près de la gorge ($x/L=0.32$) et pris de la sortie chaude ($x/L=0.95$) (Figure 5.3).

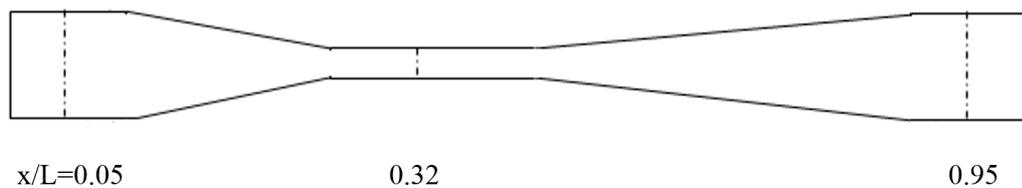


Fig.5.3- Localisation des sections axiales le long du tube de venturi.

La Figure 5.4 montre l'évolution du profil de la magnitude des composantes de vitesse en fonction du rayon du tube à des sections $x/L=0.05$, 0.32 et 0.95 . D'une manière générale la vitesse diminue en fonction de l'augmentation du rayon. De plus, Le profil radial de la vitesse indique des valeurs maximales près de la paroi dans la station près de l'entrée, ce qui explique par le indéveloppement de l'écoulement, dans les deux autres stations, les profils de vitesses sous formes d'un soumet similaires. La vitesse augmente avec l'augmentation du débit.

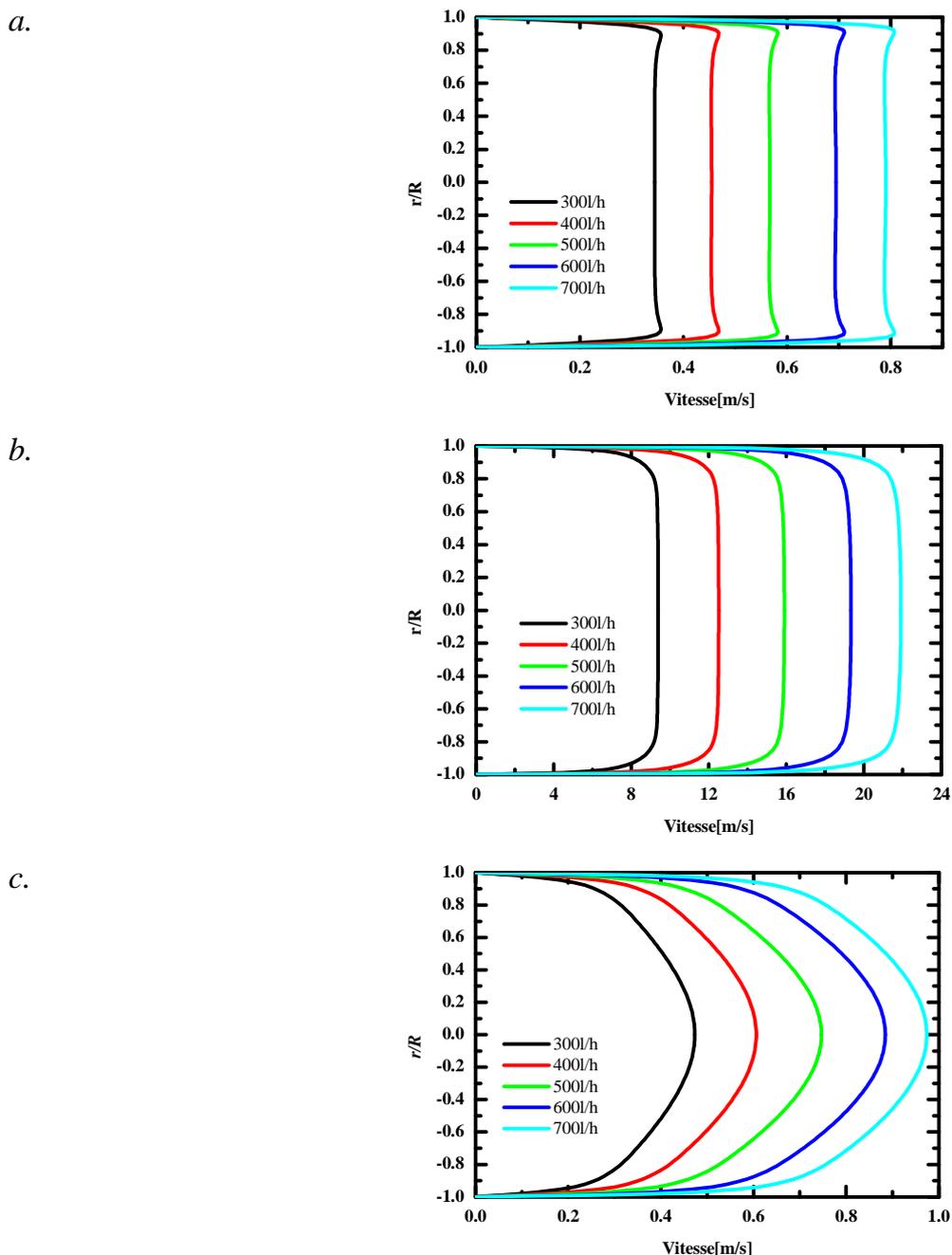


Fig.5.4– Profils de Champs de vitesse manitude à $T=20^{\circ}\text{C}$; a. $x/L=0.05$, b. 0.35 , c. 0.95

La figure 5.5 montre la variation de vitesse dans un tube de venturi. Il est évident que la valeur maximale de la vitesse se produit au niveau de la gorge du venturi. En outre la variation de la vitesse dans la partie de sortie et l'entrée de tube est différente par rapport à la section de gorge. La vitesse de l'écoulement à la gorge de tube est augmentée avec l'augmentation des débits.

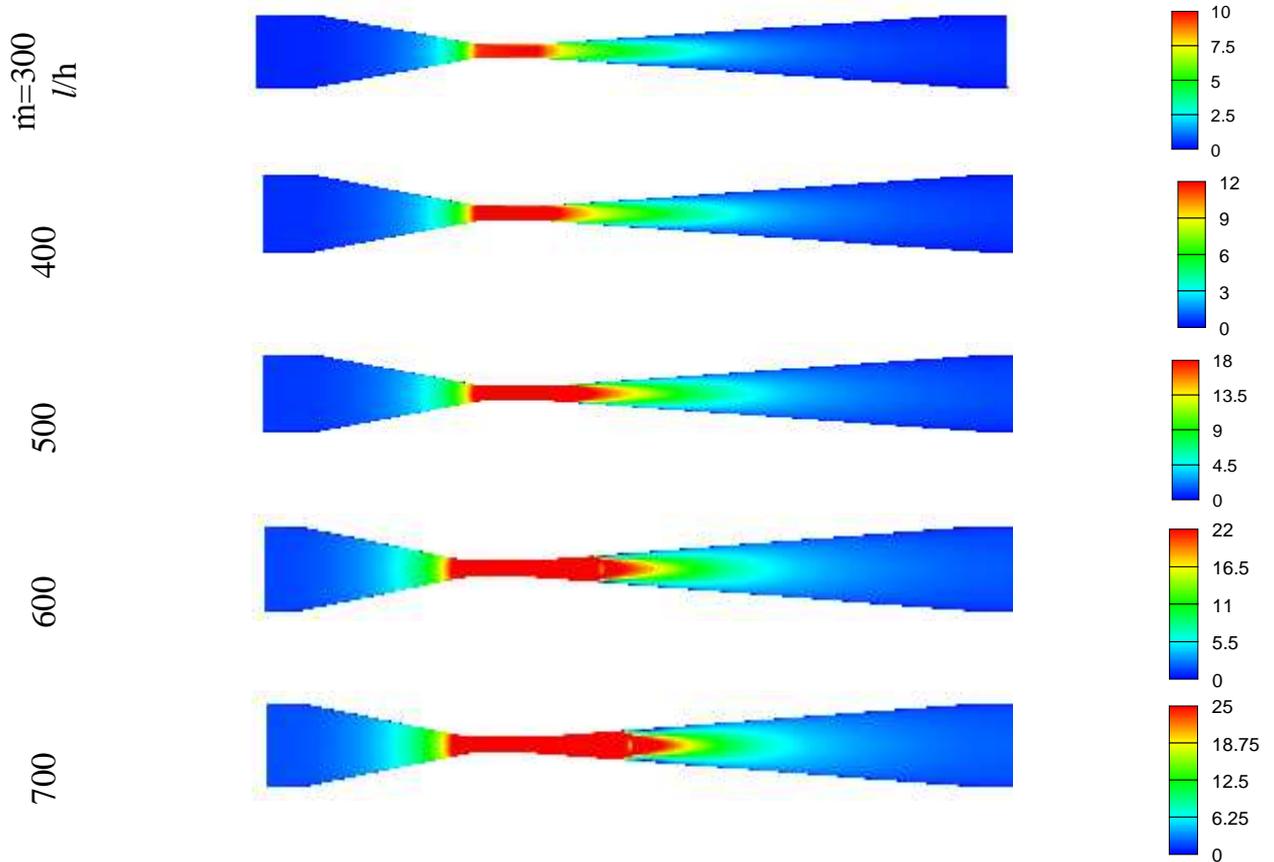


Fig.5.5– Contour de Champs de vitesse magnitude à T=20°C.

5.4 Contour de phases (fraction de vapeur)

L'échantillon du contour de phases de fraction de vapeur à l'étude numériques et à l'expérimental est montré sur Figure 5.6. D'ailleurs les résultats de la simulation numérique sont comparés aux résultats expérimentaux en qualité de contours. Le volume de vapeur est augmentées à chaque fois le débit est augmentées, le montant global de la vapeur augmentait au débit de 500 l/h, et augmentait fortement au débit de 700 l/h la longueur de cavité avait augmenté avec la croissance des débits.

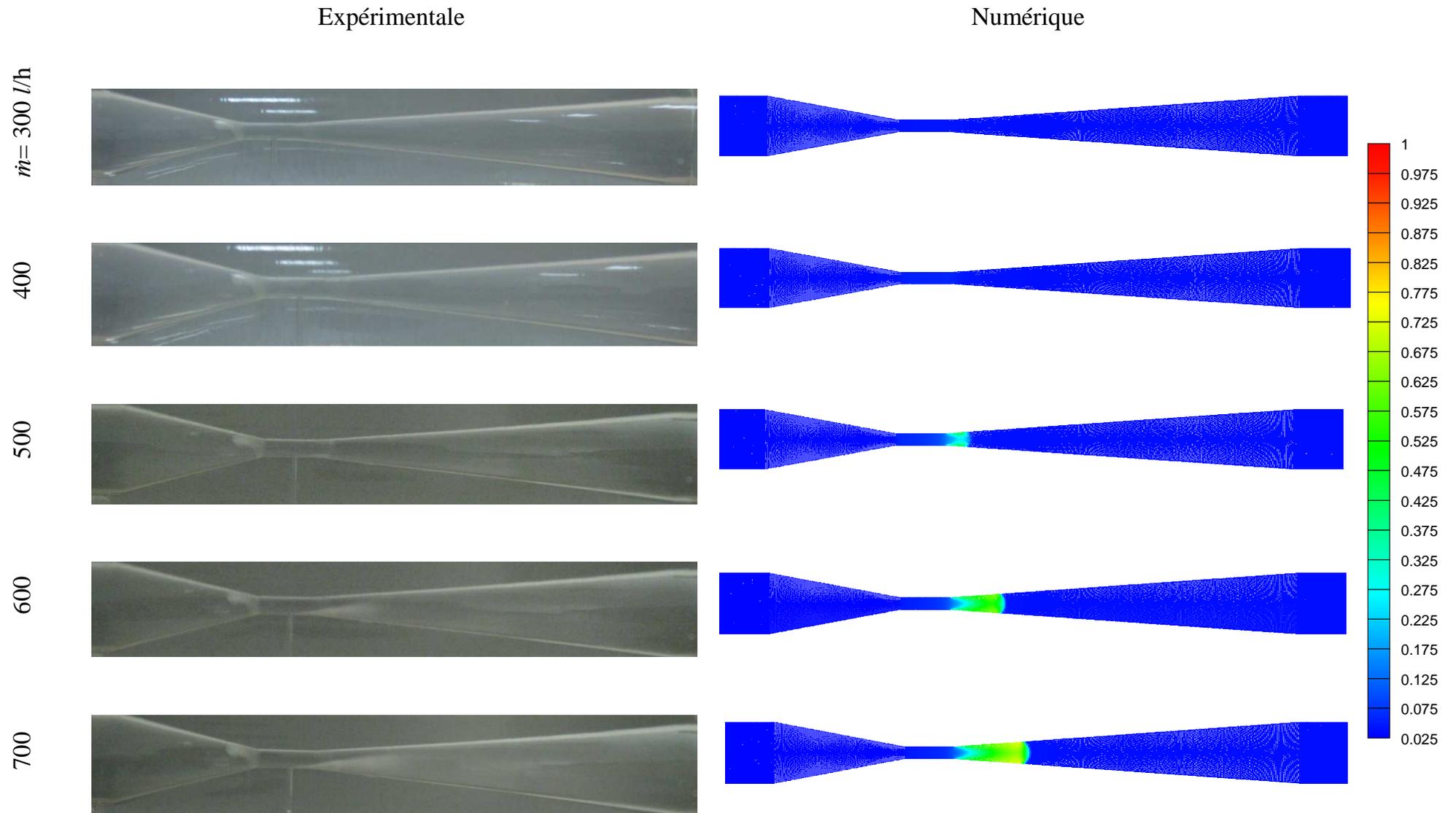


Fig.5.6- Contour de fraction volumique de la vapeur à température 20 °C.

5.5 Paramètre de cavitation

Les résultats expérimentaux et numériques obtenus avec le tracé des profils de nombre de cavitation σ et la perte de coefficient ζ . La Figure 5.7 représente la comparaison de nombre de cavitation numérique et expérimentale en fonction de débit les résultats qui remarques sont a chaque fois le débits augmente la valeurs de nombre de cavitation est démunie. une comparaison de perte de coefficient numérique et expérimentale en fonction de débit, Les résultats sont obtenus elle est la haut des débits Convient l'augmentation de perte de coefficient.

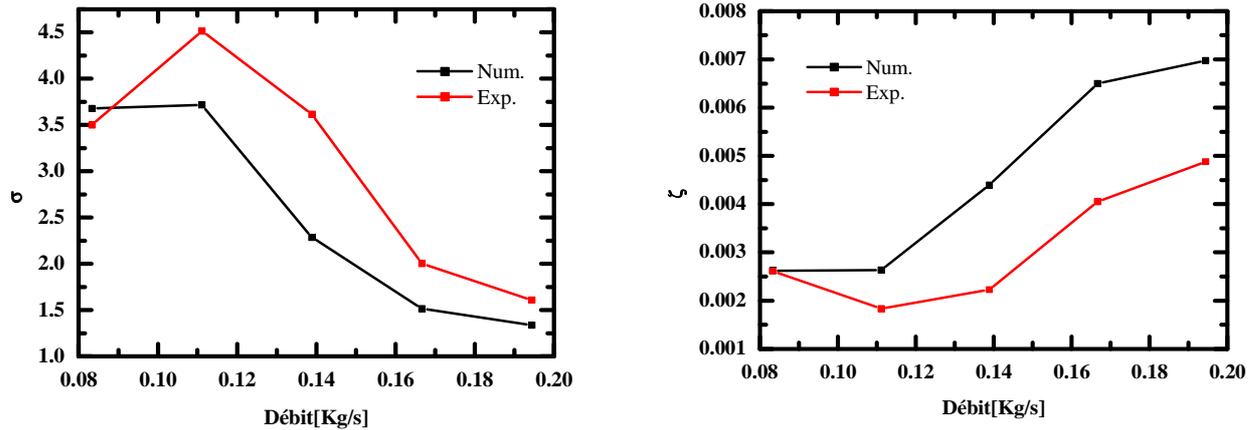


Fig.5.7–Comparaison de nombre de cavitation et le perte coefficient numérique vs. Expérimentale.

La figure.5.8 représente le nombre de cavitation numérique et expérimentale en fonction de température et de débit de 300l/h à 700l/h. le nombre de cavitation est démunie avec l'augmentation de la température et démunie avec l'augmentation de débit.

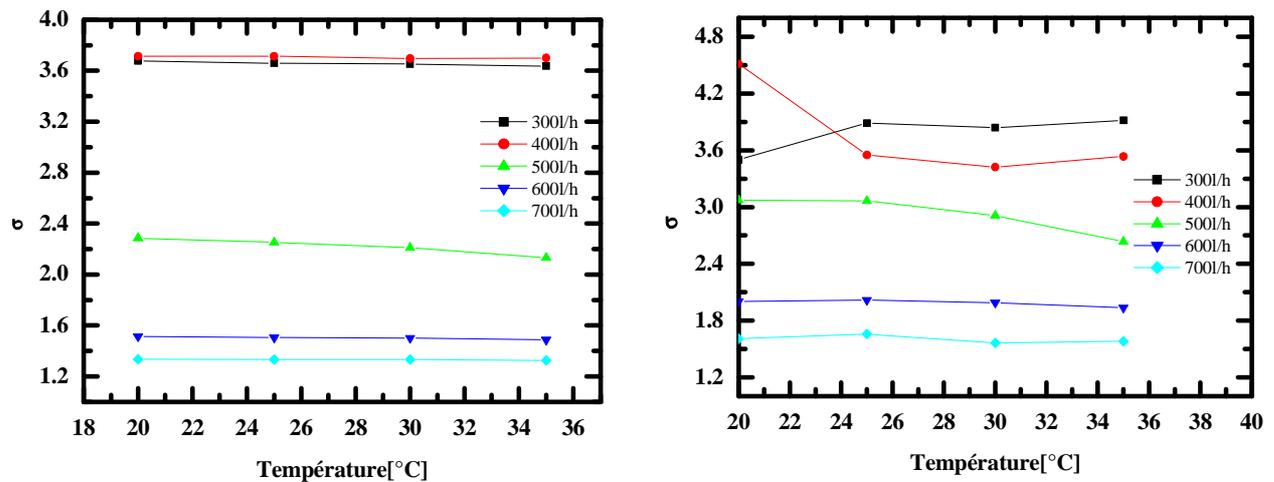


Fig.5.8- Nombre de cavitation numérique et expérimentale en fonction de température.

La figure 5.9 cité la perte de coefficient numérique et expérimentale en fonction de température de débit de 300l/h à 700l/h. la perte de coefficient elle est augmente avec l'augmentation de la température et le débit.

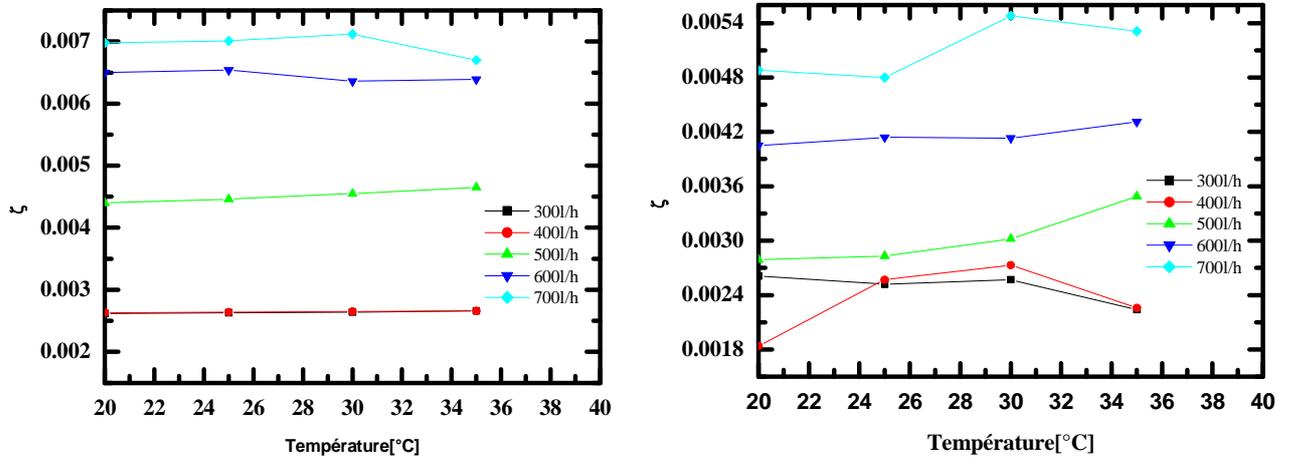


Fig.5.9- perte de coefficient numérique et expérimentale en fonction de température.

Conclusion générale

La cavitation est un problème fréquent entraînant des dommages principalement sur les pompes centrifuges et les hélices de bateau. L'objectif de notre étude est la simulation numérique et étude expérimentale des phénomènes diphasiques (la cavitation) dans un tube de venturi. Cet objectif émane de la nécessité de comprendre et de maîtriser le code de calcul "Fluent V6.3". Tous d'abord on premier temps on a installé le code de «Fluent V6.3». Ensuite, la maîtrise du code. Et une deuxième étape faire une étude expérimentale sur le tube de venturi à l'atelier avec une plusieurs changements de débit et des températures. Ce phénomène a plusieurs effets tels que : l'érosion, le bruit, la perte de performances. Dans ce mémoire, on étudie numériquement et expérimentalement le phénomène de cavitation dans un tube de venturi. En démontrant la comparaison entre les mesures des essais et les résultats de la simulation numérique en termes de structure de l'écoulement et facteur des cavitations. Certains des paramètres importants pour l'écoulement cavitant de venturi comme le nombre de cavitation et la perte de coefficient sont étudiés également.

Après cette étude Si nous comparons le résultat des simulations numériques et des expériences, en général nous pouvons dire que le paramètre principal comme la perte coefficient et le nombre de cavitation peut être prévu avec le solveur FLUENT d'écoulement.

Les résultats de simulations numériques coïncident avec les résultats de l'étude expérimentale, Ceci est illustré par la présence d'un consensus entre les résultats expérimentaux et numériques montrent que le nombre de cavitation, la perte de coefficients, les profils et le contour de pression statiques et l'existence d'un consensus entre la phase de fraction de vapeur.

En fin, nous souhaitons que ce mémoire puisse servir d'outil de travail pour les étudiants et qu'il constitue une base pour d'autre projet dans cette spécialité.

Références bibliographiques

- [01]. **Davy, D., 2007.** Simulation d'écoulements cavitants par résolution numérique des équations de Navier – Stokes en moyenne de Reynolds application à la cavitation de tourbillon d'extrémité, Ph. D. theses, université de Nantes ;
- [02]. **Figuet, J., 1977.** étude de la cavitation initiée par des tourbillons cavitation dans un venturi: Analogie entre l'eau et le sodium liquide, Ph. D. thesis, Université de Pierre et Marie Curie, Paris VI;
- [03]. **Reader, H., Brunton, W., Gibson, J., Hodges, D., Nicholson, I., 2001.** Discharge coefficients of Venturi tubes with standard and non-standard convergent angles, *Flow Measurement and Instrumentation*, PP.135–145;
- [04]. **Bora, y., 2006.** numerical and experimental investigation Through a cavitating venturi, Approval of the Graduate School of Natural and Applied Sciences of middle east technical university;
- [05]. **Palau, S., González, A., Arviza, V., 2007.** Numerical modeling of cavitating flows for simple geometries using FLUENT V6.1, *Spanish Journal of Agricultural Research*, PP. 460-469;
- [06]. **Julien, R., Eric, G., Regiane, F., 2007.** Etude numérique de la cavitation avec effet thermodynamique, BP 53 38041 Grenoble Cedex 9, Grenoble, Paris;
- [07]. **Barre, S., Rolland, J., Boitel, G., Goncalves, E., Fortes Patella, R., 2009.** Experiments and modeling of cavitating flows in venturi: attached sheet cavitation, *European Journal of Mechanics B/Fluids* 28, PP.444–464;
- [08]. **Eric, G., Jean, D., Fortes Patella, R., 2010.** Unsteady simulation of cavitating flows in Venturi, 9th International Conference on Hydrodynamics, PP.753-758, Shanghai, China;
- [09]. **Bojko, M., Milada, Babejová, S., BÍLÝ, D., 2010.** Experimental and numerical solution of formation and evolution of cavitation in laval nozzle, *Technical University of Ostrava, Mechanical Series*, article No. 1808;
- [10]. **Jean, D., Eric, G., 2013.** Investigation of three-dimensional effects on a cavitating Venturi flow, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 44, pp.576–595, France;
- [11]. Pavel, R., Martin, H., Milan, G., David, Š., 2014. Characterization of the cavitating flow in converging-diverging nozzle based on experimental investigations, *Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, EPJ Web of Conferences* 67;
- [12]. **Kristian, F., 2014.** Optimization and Automated Parameter Study for Cavitating Multiphase Flows in Venturi - CFD Analysis, Master's Thesis, ISSN 1652-8557, Chalmers University of Technology Gothenburg, Sweden;
- [13]. **Abdulaziz, A.M., 2014.** Performance and image analysis of a cavitating process in a small type venturi, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 53, pp.40–48;
- [14]. **Hari Vijay, P., Subrahmanyam, V., 2014.** CFD simulation on different geometries of venturimeter, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, PP. 2321-7308, India;
- [15]. **Brinkhorst, S., von Lavante, E., Wendt, G., 2015.** Numerical investigation of cavitating Herschel Venturi-Tubes applied to liquid flow metering, *Flow Measurement and Instrumentation*. 43, pp. 23–33, Germany;
- [16]. **Dalton, B., Caio, D., Jader, B., 2015.** Experimental analysis of flash cavitation of a binary mixture in a venturi tube, *IV Journeys in Multiphase Flows (JEM)*, Federal University of Santa Catarina, Florianopolis, SC, 88040-900, Brazil;
- [17]. **Boris, C., Jean, D., Eric, G., 2015.** A comparative study of cavitation models in a Venturi flow, *European Journal of Mechanics B/Fluids* 49, pp. 287–297, University of Applied Sciences, Western Switzerland;
- [18]. **José Luis, M., Marjorie, A., Vivek, S., Ahsan, C., 2015.** An investigation of a cavitating venture flow control feature in a cryogenic propellant delivery system, *Flow Measurement and Instrumentation*.41, PP. 97–103, Department of Mechanical Engineering, The University of Texas, USA;

- [19]. **Andrej L., Simon, M., 2015.** Cavitation and dynamic problems, 6th IAHR meeting of the Working Group, IAHRWG, Faculty of Technologies and Systems, Slovenia;
- [20]. Tomov, P., Khelladi, S., Ravelet, F., Sarraf, C., Bakir, F., Vertenoeuil, P., 2016. Experimental study of aerated cavitation in a horizontal venturi nozzle, *Experimental Thermal and Fluid Science*. 70, pp. 85–95, Paris, France;
- [21]. **vincent p., dominique,B., 2002.** le phénomène de cavitation, laboratoire de biomécanique-ensam, paris et chu carémeau nimes ;

- [22]. **Laures, R.** Effets et influences des champs magnétiques sur la cavitation, Chevalier des Palmes Académiques Marie Curie de Menton et Pierre Sola de Nice, pp 01-02;
- [23]. **Kouiled, S., Sayah, L., 2011.** investigation expérimentale du phénomène de cavitation dans les pompes, mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme master, l'université Kasdi Merbah–Ouargla, PP.27-29;
- [24]. **Yves Lecoffre., 1994.** la cavitation traqueur de bulles, durand-28600 luisant paris;
- [25]. **Surasak, P., 2009.** développement d'un modèle de cavitation à poche sur hydrofoils et hélices en régimes transitoires, implémentation sur codes potentiels et validation expérimentale, l'université de bretagne occidentale ;

الملخص

التجويف هو ظاهرة موجودة في العديد من التطبيقات مثل صمامات تخفيض الضغط وثقوب الرش وايضا في تدفق الدفع البحري والمضخات. في هذا البحث تم تحليل التدفقات التجويفية في أنبوب بخاخ تجريبيا و حسابيا. وأجريت الاختبارات بالاستعمال الماء مع عدة تدفقات متفاوتة من 300 إلى 700 لتر/ساعة وفي درجات حرارة مختلفة 10، 20، 30 و 40 درجة مئوية. تم إجراء المحاكاة الرقمية بواسطة Fluent 6.3. أظهرت النتائج المحصل عليها اتفاق جيد مع القياسات التجريبية من حيث معاملات الضغط والتجويف.

الكلمات المفتاحية: التجويف , أنبوب بخاخ، التبخر، Fluent

Résumé

La cavitation est un phénomène qui peut être présent dans plusieurs applications telles que les vannes de réduction de pression, des orifices d'arrosage ou même dans l'écoulement propulsifs maritime et les pompes. Dans la présente recherche, une expérimentale et numérique a été effectuées pour analyser des écoulements cavitants dans un tube Venturi. Les essais ont été réalisés avec l'eau avec plusieurs débits variant de 300 à 700 l/h et des températures de 10, 20, 30 et 40°C. La simulation numérique a été effectuée sur le code commercial Fluent 6.3. Les résultats montrent une bonne concordance avec les mesures expérimentales en termes de pression et paramètres de la cavitation.

Mots clés : cavitation ; Tube de venturi ; Vaporisation ; Fluent.

Abstract

Cavitation is a phenomenon that may be present in several applications such as pressure reduction valves, spray holes or even in the marine propulsion flow and pumps. In this research, an experimental and digital has been made to analyze cavitating flows in a Venturi tube. The tests were carried out with water with several flows varying from 300 to 700 l / h and temperatures of 10, 20, 30 and 40°C. The numerical simulation was performed on the commercial code Fluent 6.3. The results show good agreement with the experimental measurements in terms of pressure and cavitation parameters.

Key words: cavitation; Tube venturi; Vaporization; Fluent.

La cavitation هي ظاهرة موجودة في العديد من التطبيقات مثل صمامات تخفيض الضغط وثقوب الرش وايضا في تدفق الدفع البحري والمضخات. في هذا البحث تم تحليل التدفقات التجوييفية في أنبوب بخاخ تجريبيا و حسابيا. وأجريت الاختبارات بالاستعمال الماء مع عدة تدفقات متفاوتة من 300 إلى 700 لتر/ ساعة وفي درجات حرارة مختلفة 10، 20، 30 و 40 درجة مئوية. تم إجراء المحاكاة الرقمية بواسطة رمز Fluent 6.3. أظهرت النتائج المحصل عليها اتفاق جيد مع القياسات التجريبية من حيث معاملات الضغط والتجوييف.

الكلمات المفتاحية: التجوييف، أنبوب بخاخ، التبخر، Fluent

Résumé

La cavitation est un phénomène qui peut être présent dans plusieurs applications telles que les vannes de réduction de pression, des orifices d'arrosage ou même dans l'écoulement propulsifs maritime et les pompes. Dans la présente recherche, une expérimentale et numérique a été effectuées pour analyser des écoulements cavitants dans un tube Venturi. Les essais ont été réalisés avec l'eau avec plusieurs débits variant de 300 à 700 l/h et des températures de 10, 20, 30 et 40°C. La simulation numérique a été effectuée sur le code commercial Fluent 6.3. Les résultats montrent une bonne concordance avec les mesures expérimentales en termes de pression et paramètres de la cavitation.

Mots clés : cavitation ; Tube de venturi ; Vaporisation ; Fluent.

Abstract

Cavitation is a phenomenon that may be present in several applications such as pressure reduction valves, spray holes or even in the marine propulsion flow and pumps. In this research, an experimental and digital has been made to analyze cavitating flows in a Venturi tube. The tests were carried out with water with several flows varying from 300 to 700 l / h and temperatures of 10, 20, 30 and 40°C. The numerical simulation was performed on the commercial code Fluent 6.3. The results show good agreement with the experimental measurements in terms of pressure and cavitation parameters.

Key words: cavitation; Tube venturi; Vaporization; Fluent.