

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**

**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Installations Energétiques et Turbomachines

Par :

**Berri Ziad**

**Alouache Lydia**

**Thème**

---

**Simulation numérique d'un écoulement diphasique dans une conduite  
avec changement de phase**

---

Soutenu le 02/07/2023 devant le jury composé de:

Mr. Nait Bouda Faycal

Président

Mr. Allouche Moussa

Rapporteur

Mr. Mouloud Smail

Examineur

**Année Universitaire 2022-2023**



## **Remerciement**

*Nous remercions le Dieu de nous avoir donné du courage et de la détermination  
pour mener à terme ce travail.*

*Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre encadreur*

***Mr ALLOUCHE Moussa,***

*nous le remercions sincèrement pour son bon encadrement, son soutien, sa disponibilité,  
ses orientation, ses conseils et sa sympathie qui ont été le moteur de notre motivation  
pour la réalisation de notre recherche.*

*Notre gratitude va aussi aux membres du jury à*

***Mr NAIT BOUDA Faycal***

*et*

***Mr MOULOUD Smail***

*qui ont accepté d'évaluer et d'examiner notre présent travail.*

*On tient à remercier tout particulièrement nos très chers parents  
pour leur soutien et leurs encouragements*

*Nous tenons à remercier l'ensemble des enseignants de la formation*

***« Génie mécanique »***

*Nous adressons nos remerciements à tous les intervenants et toutes les personnes  
qui leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions à  
l'élaboration de ce mémoire.*

*Enfin, que toutes celle et tous ceux qui, de loin ou de près, ont contribué à rendre notre  
mission agréable, qu'ils soient ici sincèrement remerciés.*

# DEDICES

*A nom du dieu miséricordieux par essence et pour excellence*

*Je dédie ct travail*

*A mes très chère parent que dieu me les gardes*

*Mes très adorables frères*

*Redha, Lotfi*

*Mes très chères sœurs*

*Fahima, Fatima*

*Et*

*Radhia et son mari loucif*

*Je dédie ce modeste travail spécialement à mon binôme*

*Ziad et sa famille.*

*En enfin, à tous ceux qui ont contribué de près et de loin pour la réalisation de ce  
modeste travail*

*Lydia*

# DEDICES

*À nom du dieu miséricordieux par essence et pour excellence*

*Je dédie ct travail*

*À mes très chère parent que dieu me les gardes*

*Mes très chères sœurs*

*Je dédie ce modeste travail spécialement à mon binôme*

*Lydia et sa famille.*

*En enfin, à tous ceux qui ont contribué de près et de loin pour la réalisation de ce  
modeste travail*

*ziad*

# Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale .....1

## **Chapitre 1 : Généralités & étude bibliographique**

<b>1.1 Généralité</b> .....	3
1.1.1 INTRODUCTION .....	3
1.1.2 définitions de l'écoulement déphasique .....	3
1.1.2.1 concept de l' interface.....	3
1.1.2.2 Les systèmes diphasique dans l'industrie .....	4
1.1.2.3 Classification d'écoulement diphasique.....	4
1.1.2.3.1 Classification bas é sur la combinaisons des phases.....	4
1.1.2.3.2 Classification basé sur la distribustion des interfaces.....	5
1.1.3 Régime d'écoulement diphasique .....	6
1.1.3.1 Ecoulementdans une colonne montante.....	6
1.1.3.2 Ecoulement dans conduite horizontale .....	8
1.1.3.3 L a différence principale entre les régimes d'écoulements.....	10
1.1.3.4 Transition entre les écoulements.....	11
1.1.3.5 Carte d'écoulement.....	12
1.1.4 Principaux paramètres des écoulements diphasiques.....	13
1.1.4.1 Calculs VOF en régime permanent et transitoire.....	14
1.1.4.2 La fraction du vide.....	15
1.1.4.3 Les vitesses.....	15

1.1.4.4	La tension de surface.....	16
1.1.4.5	Le schéma implicite.....	17
1.1.4.6	Propriétés matérielles.....	18

## **1.2 revue bibliographique**

### **Chapitre 2 : Position du problème et formulation mathématique**

2.1	INTRODUCTION.....	29
2.2	Description du problème.....	29
2.3	Equations de basse.....	30
2.3.1	Equations de conservation moyennées.....	30
2.3	Hypothèses simplificatrices.....	31
2.3.3	Équation de continuité et de quantité de mouvement vectorielle.....	31
2.3.4	Equation de continuité et de quantité de mouvement projetés.....	32
2.3.4.1	Equation de continuité.....	32
2.3.4.2	Equation de quantité de mouvement.....	32
2.3.5	Équation de l'énergie.....	32
2.3.6	Conditions aux limites.....	32
2.3.7	Les équations moyennées en régime turbulent.....	33
2.3.8	Le modèle k-ε réalisable.....	34
2.3.9	Le nombre de Nusselt local .....	36

### **Chapitre 3 : Résultats et discussions**

3.1.	INTRODUCTION.....	37
3.2.	cas de l'ébullition du l'eau.....	38
3.2.1	configuration de l'écoulement.....	38

3.2.2	variation de la température.....	41
3.2.3	Fraction volumique .....	43
3.2.4	Nombre de Nusselt.....	45
3.2.5	coefficient de convection à la paroi.....	46
3.3	cas de l'ébullition du R-1270 (propylène) dans une conduite verticale.....	49
3.3.1	L'influence de la température sur la masse volumique.....	49
3.3.2	Configuration de l'écoulement.....	50
	Conclusion générale .....	54
	Références bibliographiques	



## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b>	vision schématique de l'interface .....	3
<b>Figure 1.2</b>	la distribution des interfaces .....	6
<b>Figure 1.3</b>	régimes d'écoulements dans une colonne verticale .....	7
<b>Figure 1.4</b>	régime d'écoulement dans une colonne horizontale .....	10
<b>Figure 1.5</b>	variation du régime d'écoulement avec l'augmentation de la vitesse superficielle de la phase gazeuse .....	11
<b>Figure 1.6</b>	Processus de la coalescence de la bulle .....	12
<b>Figure 1.7</b>	Exemple d'une carte d'écoulement expérimentale.....	13
<b>Figure 1.8</b>	Section du taux de vide.....	15
<b>Figure 1.9</b>	Equilibre mécanique dans particule fluide sphérique.....	17
<b>Figure 2.1</b>	géométrie du cas d'une conduite horizontale.....	27
<b>Figure 2.2</b>	: géométrie du cas d'une conduite verticale.....	28
<b>Figure 3.1</b>	: Evolution de l'ébullition cas de la conduite verticale en fonction de temps.....	37
<b>Figure 3.2</b>	: Evolution de l'ébullition cas de la conduite horizontale .....	38
<b>Figure 3.3</b>	: Variation de la température statique la paroi en fonction du temps.....	40
<b>Figure 3.4</b>	: Variation de la fraction volumique en fonction de temps.....	42
<b>Figure 3.5</b>	: Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction de la température.....	43
<b>Figure 3.6</b>	: Evolution du coefficient du transfert de chaleur en fonction de la fraction volumique.....	45
<b>Figure 3.7</b>	: Evolution du coefficient du transfert de chaleur en fonction de la température...	46
<b>Figure 3.8</b>	: Evolution de la masse volumique en fonction de la température.....	49
<b>Figure 3.9</b>	: Configurations de l'écoulement du propylène .....	54

## Liste des tableaux

**Tab 2.1** : condition aux limites.....31

**Tab 2.2** : constantes du modèle de turbulence k- réalisable.....34

## Nomenclature

Symboles	Définition	Unité (SI)
A	Surface	m <sup>2</sup>
A <sub>q</sub>	Surface de la phase liquide	m <sup>2</sup>
A <sub>p</sub>	Surface de la phase vapeur	m <sup>2</sup>
D	Diamètre de tube	m
L	Longueur de tube	m
p	Pression	Pa
C <sub>p</sub>	Chaleur massique à pression constante	J/kg.k
$u_{qs}$	Vitesse superficielle de la phase liquide	m <sup>2</sup>
$u_{ps}$	Vitesse superficielle de la phase vapeur	m <sup>2</sup>
$u_p$	Vitesse locale vapeur	.m <sup>2</sup>
$u_q$	Vitesse locale liquide	.m <sup>2</sup>
$\dot{m}$	Débit massique	kg/s
$\dot{m}_{qp}$	La masse échangé entre p et q	
g	Accélération de pesanteur	m/s <sup>2</sup>
V, U	Composante vitesse	m/s
G <sub>k</sub> , G <sub>b</sub>	génération de l'énergie cinétique turbulente	
S <sub>k</sub> , S $\epsilon$ , S <sub>h</sub>	terme de source	
E	énergie	J
K	Energie cinétique turbulente	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
h	Enthalpie	J/kg
J	Flux massique d'espèce	J/m <sup>2</sup> s
T	Température	k
$\phi$	Densité de flux chaleur	W/m <sup>2</sup>
N	Nombre de Nusselt	
p	Pression adimensionnelle	
q	débit volumique	
T	Température	k

$U_R, U_z$	Composante de la vitesse dimensionnelle	radial
$r$	Coordonné cylindriques dimensionnelle	
<b>Symboles grecs</b>	<b>Définition</b>	<b>Unité (SI)</b>
$\alpha$	Diffusivité thermique	$m^2s^{-1}$
$\mu$	Viscosité dynamique	$m^{-1}kg s^{-1}$
$\nu$	Viscosité cinématique	$m^2s^{-1}$
$\rho$	Masse volumique	$Kg m^{-3}$
$\lambda$	Conductivité thermique	$W m^{-1}K^{-1}$
$\Delta T$	Différence de température	K
$\theta$	Température adimensionnelle	
$\varepsilon$	Dissipation,	$m^2/s^2$
$\sigma$	Tension superficielle	N/m
$\alpha$	fraction volumétrique	
$\bar{\tau}_{eff}$	le tenseur de contrainte de cisaillement turbulent	
$\omega_k$	la vitesse angulaire	$s^{-1}$
$\bar{\Omega}_{ij}$	vitesse moyenne du tenseur	
<b>Indices</b>	<b>Définition</b>	
$f$	Friction	/
$m$	Masse	/
$min$	Valeur minimale	/
$inf$	Inférieur	/
$eff$	Effective	/
$q$	Phase liquide	/
$p$	Phase vapeur	/
$e$	Entrée	/
$t$	Thermique	/
$r$	Composante radial	/
<b>Abréviations</b>		

CFD	Computational Fluid Dynamic
VOF	Volume of fluid
DPM	Discrete Phase Model

# **Introduction générale**

## Introduction général

Le phénomène d'ébullition sous saturée ou locale est observé dans diverses applications industrielles, telles que les centrales électriques, les complexes sidérurgiques ou les raffineries, ainsi que dans des équipements de petite et moyenne taille tels que les microprocesseurs et les moteurs à combustion interne. Avec les technologies avancées, les systèmes de refroidissement modernes doivent faire face à des charges thermiques considérables sur les surfaces chauffantes, ce qui limite la capacité d'échange thermique, le débit du fluide caloporteur et les températures autorisées des parois. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de passer du régime de refroidissement liquide simple au régime d'ébullition nucléée, où le fluide caloporteur est contrôlé de manière à permettre le transfert de chaleur.

La recherche dans ce domaine se concentre principalement sur des projets industriels, car les problèmes rencontrés sont complexes et multidisciplinaires. L'industrie joue un rôle crucial dans la survie de la recherche scientifique, car elle fournit des défis concrets. Notre étude se concentre sur un sujet d'actualité et d'un grand intérêt industriel, à savoir les écoulements diphasiques.

Les écoulements diphasiques peuvent impliquer différentes phases, telles que liquide, solide, gaz ou plasma (gaz ionisé). Par exemple, il peut s'agir de mélanges de deux liquides non miscibles (utilisés dans les échangeurs à contact direct), de mélanges solides-liquides (transport de boue, etc.) ou de mélanges gaz-solide ou gaz-liquide (ébullition).

La simulation numérique des écoulements diphasiques a connu une croissance significative ces dernières années grâce aux progrès des moyens informatiques. Bien qu'elle ne remplace pas l'expérimentation, la simulation numérique la complète en permettant l'analyse des problèmes dans des conditions réalistes (reproduction d'essais expérimentaux pour une meilleure compréhension à moindre coût) ou dans des conditions extrêmes/marginales (climats extrêmes, défauts d'installations, etc.).

Dans cette étude, nous nous concentrons sur les écoulements gaz-liquide, qui sont au cœur de nombreux travaux scientifiques dans ce domaine. Les processus industriels ont stimulé une importante recherche théorique, expérimentale et numérique dans les domaines du génie chimique, du génie nucléaire et du génie pétrolier.

L'objectif de notre travail est de mettre en œuvre la méthode VOF (Volume of Fluid) pour suivre les interfaces et simuler un écoulement dans une conduite verticale chauffée par un flux et une vitesse d'entrée.

Dans le premier chapitre, nous rappelons quelques définitions essentielles pour comprendre les écoulements diphasiques. Ensuite, nous présentons une synthèse des travaux portant sur les régimes d'écoulement et l'établissement de cartes d'écoulement. Une partie de ce chapitre fournit des définitions de nombres adimensionnels largement utilisés dans le domaine des écoulements diphasiques.

Le deuxième chapitre aborde la formulation mathématique des écoulements diphasiques, en mettant l'accent sur la description des méthodes numériques utilisées pour simuler l'écoulement gaz/liquide.

Le troisième chapitre se concentre sur la simulation numérique de l'écoulement diphasique en utilisant le logiciel Gambit pour générer le maillage et le logiciel Fluent comme solveur. Nous présenterons ensuite les résultats de cette étude et mènerons des discussions à leur sujet.

La conclusion résumera les contributions de ce travail et proposera des suggestions pour des compléments qui pourraient permettre une meilleure compréhension de certains aspects qui restent encore peu clairs.



**Chapitre 1 :**  
**Généralités et revue**  
**bibliographiques**

## 1.1 Généralités

### 1.1.1 Introduction

L'écoulement diphasique étudie le déplacement de deux phases continues sont le plus complexes que les écoulements monophasiques à cause, d'un part, de la dynamique des interfaces et d'autre part, de l'évolution de ces interfaces.

Dans ce chapitre, on verra des généralités sur les écoulements diphasique domaine d'application, les différents régimes et cartes d'écoulement ainsi que des principaux paramètres.

### 1.1.2 Définition de l'écoulement diphasique

Écoulement présentant deux phases non **miscibles** ayant des caractéristiques dynamiques non identiques.

#### 1.1.2.1 Concept d'interface

A l'échelle moléculaire une interface gaz-liquide se manifeste par une zone de transition où la densité varie progressivement entre une valeur moyenne dans le liquide et une valeur moyenne dans le gaz. Cette notion est couramment utilisée pour désigner la surface de séparation entre deux phases résultante de la discontinuité des forces intermoléculaires

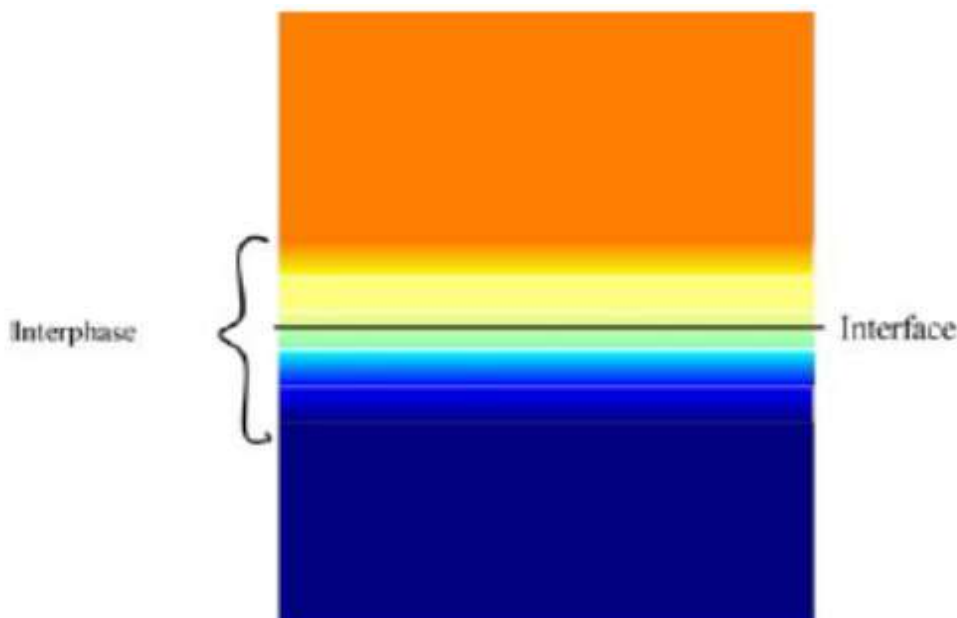


Figure 1.1 : vision schématique de l'interface. [1]

### 1.1.2.2 Les systèmes diphasiques dans l'industrie

Les principaux domaines où les processus industriels ont suscité un développement important sont concernés par les écoulements diphasiques gaz-liquide. Le génie chimique et le génie de procédés qui vise à augmenter les surfaces d'échanges pour favoriser les réactions chimiques. En génie nucléaire les applications de cet écoulement sont d'une envergure importante, car pour prévoir le comportement des circuits de refroidissement des réacteurs nucléaires en fonctionnement nominal (en régime transitoire ou en évolution accidentelle), la connaissance approfondie de la thermo-hydraulique des écoulements diphasiques est nécessaire. Les écoulements diphasiques observés dans ces systèmes sont du type eau-air comme dans les tours aéro-réfrigérantes et eau-vapeur dans les réacteurs nucléaires à eau bouillante.

En génie pétrolier, les écoulements gaz-liquide sont fréquemment rencontrés. En sur tout dans l'exploitation des gisements. La configuration de cet écoulement qui est du type écoulement à poches. En exploitation naturelle, le pétrole est extrait sous l'effet de la pression exercée par le gaz sur le liquide, et en exploitation assistée on injecte du gaz sous pression dans la poche du gisement.

Dans d'autres nombreux secteurs industriels ces écoulement interviennent comme par exemple, les échangeurs à chaleur, machines frigorifiques ou les pompes de type gaz lift et même dans l'industrie automobile.

### 1.1.2.3 Classification d'écoulement diphasique

Les principes classes d'écoulement rencontrées dans la littérature peuvent être classifié selon les combinaisons des phases au selon la distribution des interfaces.

#### 1.1.2.3.1 Classification basée sur les combinaisons des phases

Pour cette classification, les combinaisons possibles sont énumérées ci-dessous :

1. Mélange de deux liquides non miscible (échangeurs à contact direct)
2. Mélange solide-liquide (transport de boue,...)
3. Mélange gaz-solide (transport pneumatique, ....)
4. Mélange gaz-liquide (ébullition dans les réacteurs nucléaires,...)
5. Mélange plasma solide (synthèse de nanoparticule)

### 1.1.2.3.2 Classification basée sur la distribution des interfaces

Un écoulement diphasique peut être classifié selon la distribution géométrique des phases appelée régime ou configuration d'écoulement, qui sont identifiés par inspection ou par analyse spectrale des fluctuations de fraction volumique ou des pressions instables. Un résumé des configurations typiques d'écoulement est présenté dans les figures suivantes

#### a) A phases dispersées

Un ou deux fluides sont présents sous forme de volume, dans toute ou partie de la section de la colonne.

#### b) A phases séparées

Les fluides s'écoulent de façon stratifiée deux couches continues disposées selon leur densité et séparées par une interface plus au moins perturbée. Un cas particulier est l'écoulement annulaire, composé de deux couches continues s'écoulant concentriquement

#### c) De transition

Les phases s'écoulent sous la forme de grandes poches, ou de bouchons. Ces régimes intermittents apparaissent en général lorsque les différences de masses volumiques des fluides sont faibles (voir la figure1.2)

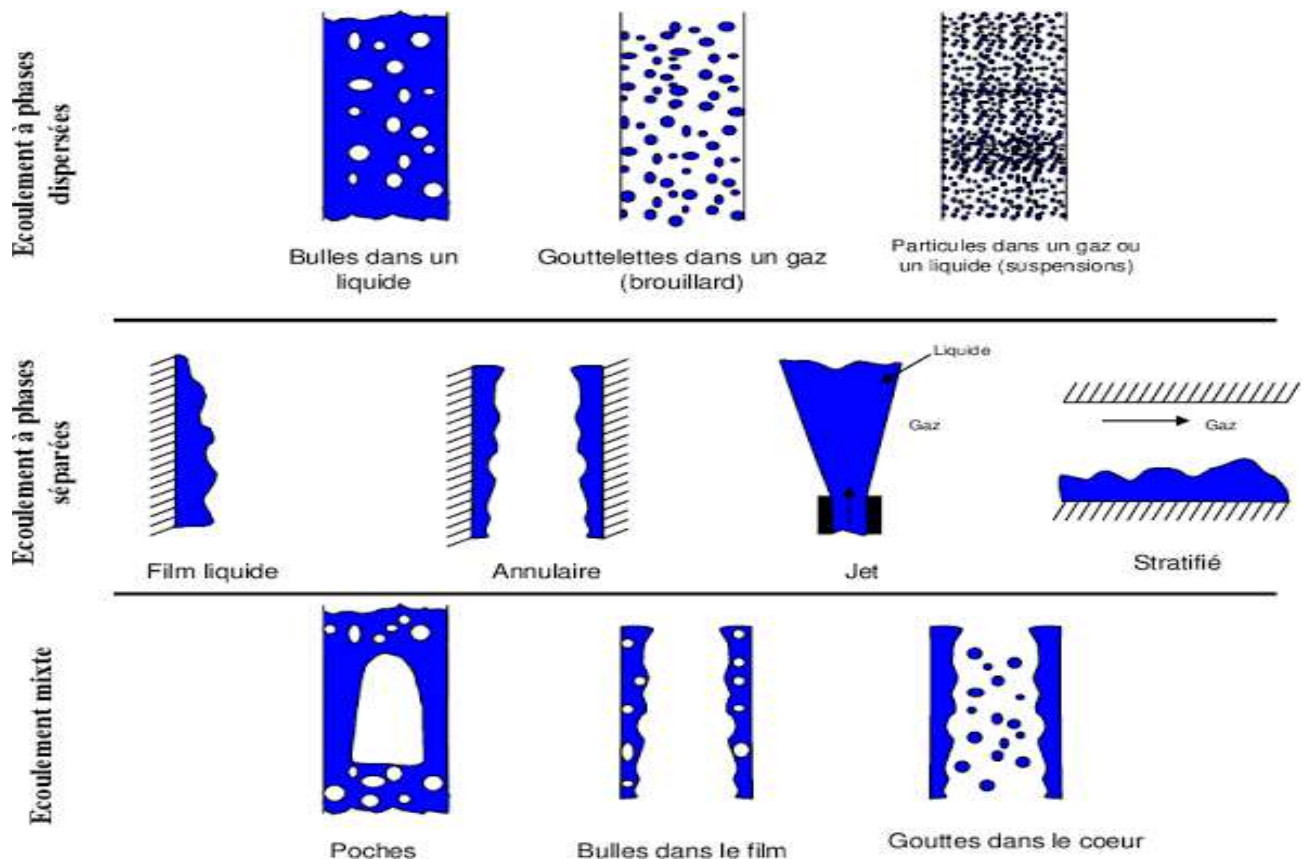


Figure 1.2 : la distribution des interfaces [2]

### 1.1.3 Régimes d'écoulement diphasique liquide-gaz

#### 1.1.3.1 Ecoulement dans une colonne montante

Lors d'un écoulement diphasique gaz liquide, l'interface entre les deux phases peut prendre plusieurs formes, cela dépend du débit, des propriétés du fluide et de la géométrie du système. Les configurations de l'écoulement sont utilisées dans la description de cette distribution. Dans ce type d'écoulement, la force gravitationnelle est prédominante et elle joue le rôle d'une force créatrice du mouvement.

##### a. Ecoulement à bulles :

La phase gazeuse de l'écoulement est répartie sous forme de bulles dispersés dans le liquide qui constitue la phase continue. Les dimensions de ces bulles sont petites en comparaison avec le diamètre du la conduit, ce régime n'apparait que pour de faible vitesse superficielles de gaz.

**b. Ecoulement à poches :**

En augmentant le débit de gaz, les bulles coalescent pour donner lieu à des poches séparées par des bouchons de liquide de sections voisines de celle de la conduite.

**c. Ecoulement à fort coalescence :**

L'écoulement à poches peut mener à des instabilités. Dans cette situation la forme du bouchon est très irrégulière et avec une interface instable et allongée.

**d. Ecoulement de transition :**

Les bouchons de liquide entre les bulles de gaz disparaissent et en un point la phase liquide se distribue de manière discontinue alors que la phase gazeuse devient continue.

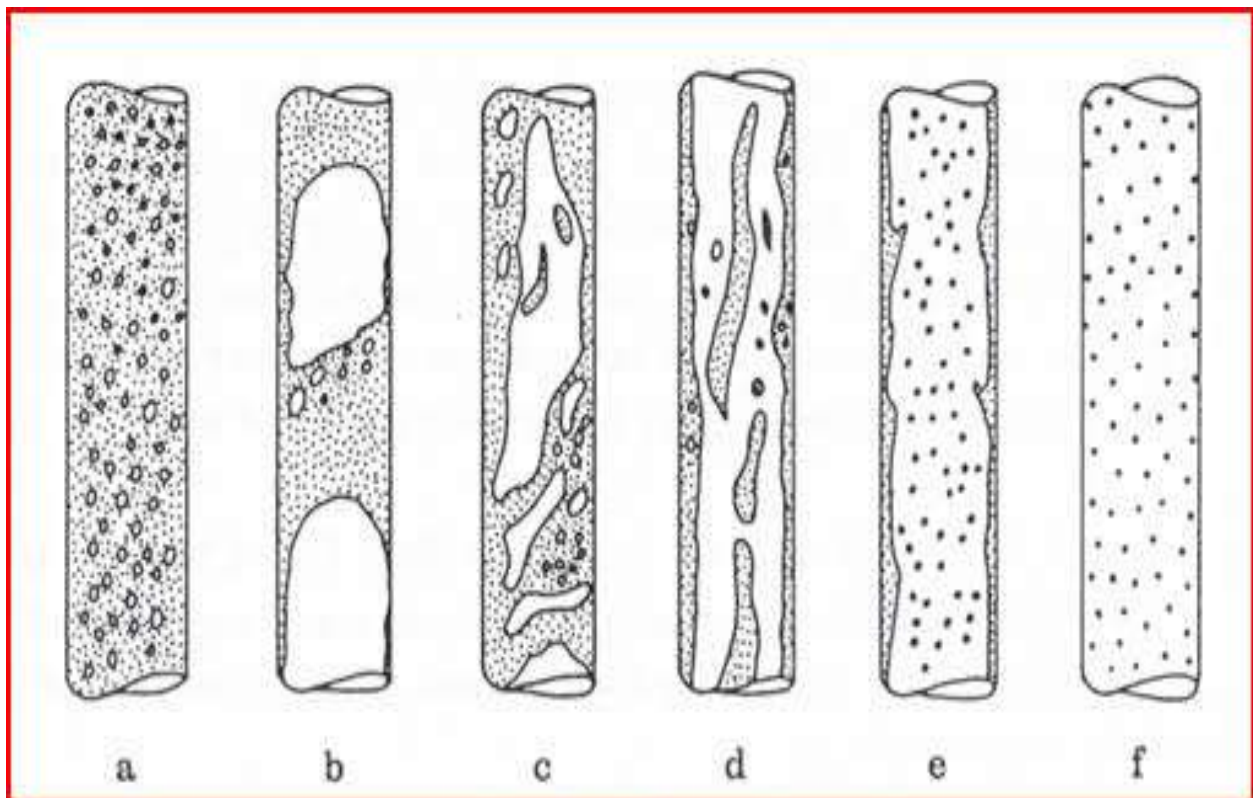
**e. Ecoulement annulaire :**

La phase liquide circule comme un film près des parois du tube, avec ou sans bulles.

Cette phase est aussi présente sous une forme dispersée, dans la phase gazeuse qui s'écoule dans le centre du tube.

**f. Ecoulement dispersé :**

La phase liquide se présente comme de petites gouttes dispersées dans la phase gazeuse continue et le liquide mouille la paroi de la conduite. (Voir la figure I.3).



**Figure 1.3** : régimes d'écoulements dans une colonne montante. [2]

Il est supposé que la valeur critique de la fraction du vide pour que la coalescence prédomine est de 25% approximativement.

### 1.1.3.2 Ecoulements dans une conduite horizontale

L'écoulement diphasique horizontal présente des configurations différentes de ceux rencontrés 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 complexe par rapport à l'écoulement diphasique vertical, car n'est pas souvent axisymétrique, en raison des effets de la gravité. Les types d'écoulements rencontrés dans un écoulement diphasique horizontal sont définis comme suit :

#### a) L'écoulement à bulles allongées

L'écoulement à bulles allongées (elongated bubbles) est constitué d'une succession de poches de gaz dont l'avant est arrondi et l'arrière est plat. Ces poches se déplacent le long de la partie supérieure de la conduite et sont transportées par la phase liquide. Le sillage de chaque poche contient souvent de nombreuses bulles.

#### b) L'écoulement stratifié

Les écoulements stratifiés (stratified flow) présentent une séparation nette entre la phase liquide située dans le bas du tube et la phase gazeuse. Cette configuration se rencontre pour des débits de gaz et de liquide assez faibles. La forme de l'interface est contrôlée par la compétition entre les forces d'inertie qui tendent à la déformer (champ de vagues) et les forces de gravité et de tension superficielles qui tendent à la maintenir plane.

#### c) L'écoulement ondulé

Pour des vitesses de gaz plus importantes, l'interface a tendance à se déformer et des petites vagues apparaissent à la surface. Les travaux sur la stabilité des écoulements diphasiques en conduite horizontale montrent que les domaines d'existence des régimes stratifiés et ondulés sont définis par une courbe nommée ZNS (zero neutral stability) (Brauner et Moalem Maron) (1992) ou encore KVH (Viscous Kelvin-Helmholtz) (Trallero) (1995). Cette courbe est issue de l'étude des instabilités de type Kelvin-Helmholtz, réalisée à partir de la formulation temporelle des équations du modèle à deux fluides.

#### d) L'écoulement à bouchons

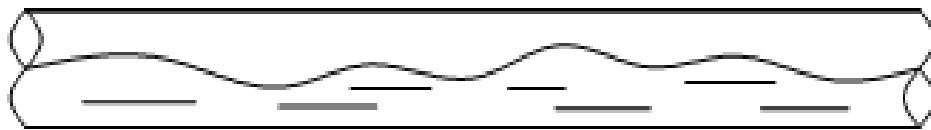
L'écoulement à bouchons (slug pour la version anglo-saxonne) est présent pour des vitesses de gaz et de liquides moyennes. La structure présente une succession de poches de gaz et de bouchons de liquide qui contiennent de petites bulles.

e) **L'écoulement dispersé**

C'est un écoulement dans lequel les bulles de gaz se déplacent le long de la partie supérieure de la conduite. Ces bulles sont distribuées au sein d'une phase liquide continue. Avec une augmentation du débit du gaz, le nombre de bulles augmente jusqu'à remplir entièrement la section droite de la conduite.

f) **L'écoulement annulaire**

Lorsque la proportion et le débit de la phase gazeuse sont très élevés, le liquide ne peut plus être assimilé par l'écoulement et reste confiné aux parois de la conduite formant alors un anneau dont la face interne est ondulée par la turbulence. Le régime annulaire est ainsi caractérisé par la continuité de la phase gazeuse au cœur du tube et donc par une séparation quasi-totale des phases. De fines gouttelettes sont cependant observées dans la colonne de gaz centrale. Voir (Fig.1.4).



(a)



(b)

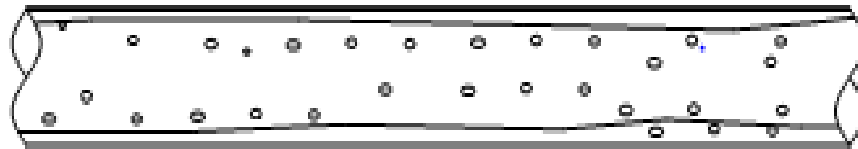


(c)

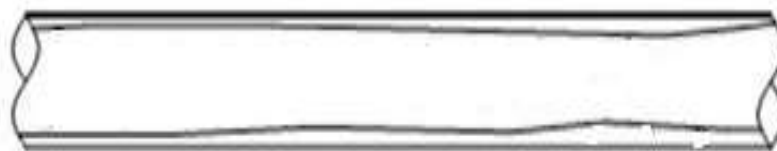




(d)



(e)



(f)

**Figure 1.4 :** Régime d'écoulement dans une Conduite horizontale. [3]

### 1.1.3.3 La différence principale entre les régimes d'écoulements

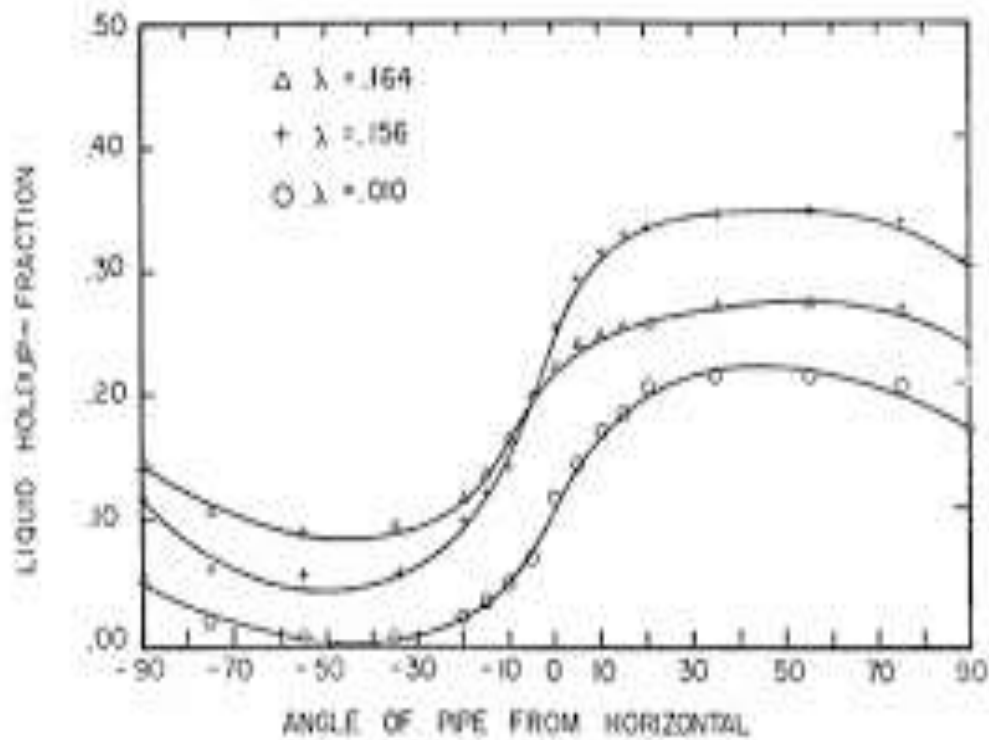
Dans les conduites verticales et horizontales, la différence réside dans la diversité dans les effets de la force de gravité.

Dans les colonnes verticales, elle agit dans la même direction que la force d'inertie et la force visqueuse, tandis que dans la configuration horizontale, la force de gravité agit dans une direction normale à l'axe du canal ; ceci a comme conséquence l'apparition de la stratification des deux phases.

Dans l'écoulement en conduite inclinée, différents régimes peuvent apparaître. La retenue du liquide devient un facteur très important de l'écoulement.

Si la phase gazeuse circule à une vitesse superficielle importante, la retenue du liquide augment. A une inclinaison supérieure à 30 degrés, il y a apparition de larges bouchons de liquide, le diagramme ci-dessous indique la variation du régime d'écoulement avec l'augmentation de la vitesse superficielle de la phase gazeuse. Il est très influencé par

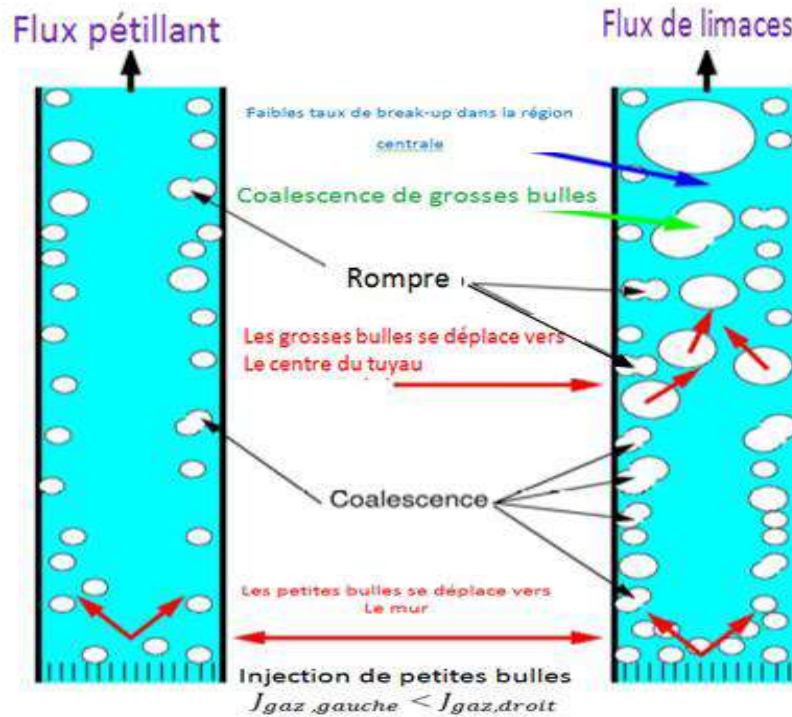
l'inclinaison de la conduite. Le paramètre  $\lambda$  indique la fraction du liquide ( voir la figure I.3)



**Figure 1.5** : variation du régime d'écoulement avec l'augmentation de la vitesse superficielle de la phase gazeuse. [3 ]

#### 1.1.3.4 Transition entre les écoulements

La transition entre l'écoulement à bulles et l'écoulement à poches se produit à cause du processus de coalescence de la bulle, l'équilibre entre les deux Processus définit pour chaque débit et pression les conditions de la transition, et la transition vers l'écoulement annulaire se produit avec les valeurs faibles de la vitesse de la phase gazeuse, la coalescence des gouttes peut avoir lieu et mène vers l'écoulement à poches.



**Figure 1.6 :** Processus de la coalescence de la bulle. [4]

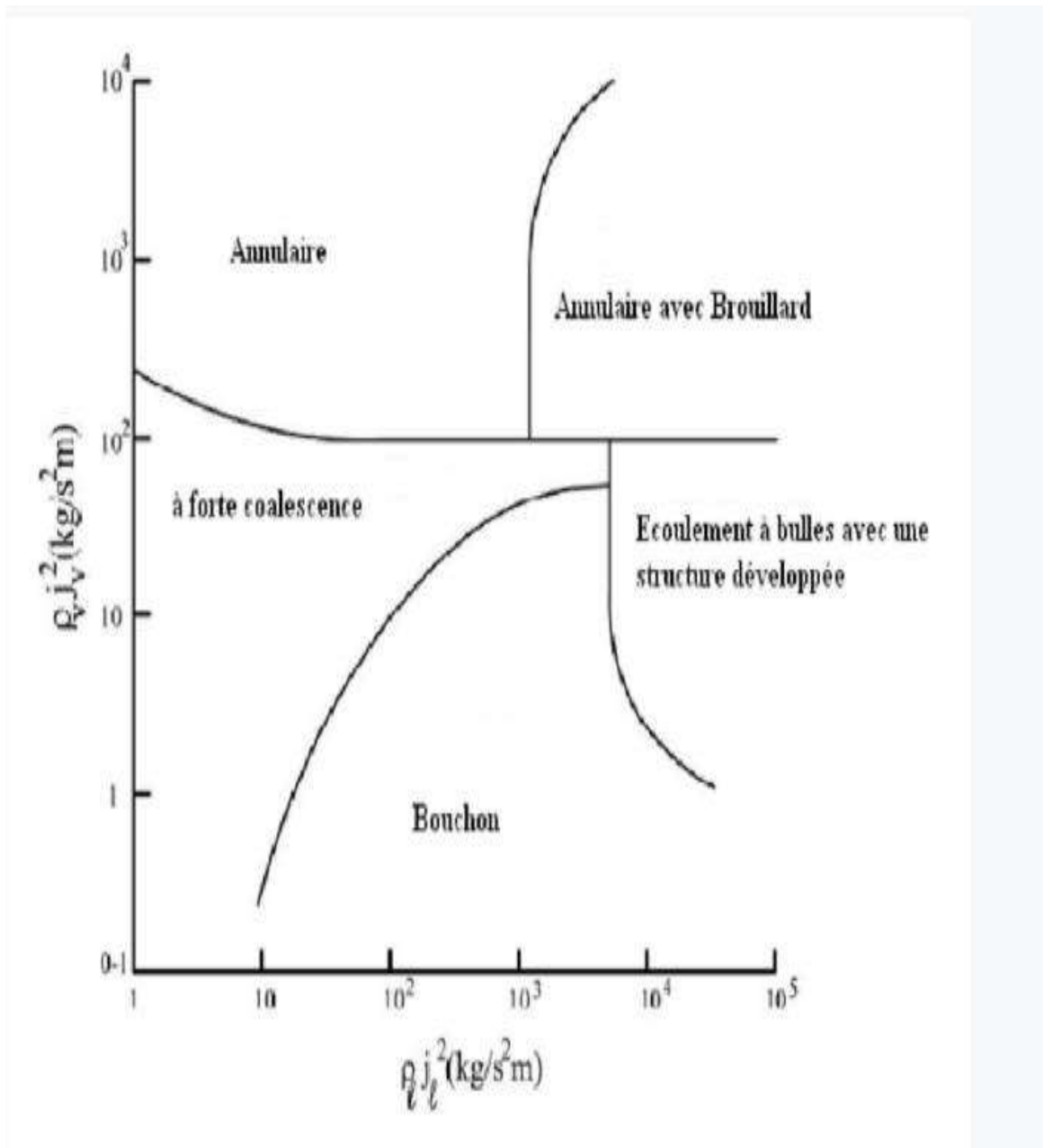
### 1.1.3.5 Cartes d'écoulement

Une carte d'écoulement, comme son nom l'indique, est une représentation graphique bidimensionnelle des domaines d'existence des différents régimes. Les systèmes de coordonnées qui la définissent sont choisis parmi les variables de l'écoulement diphasiques. Ces derniers sont différents selon les auteurs, et il n'existe pas de consensus sur le meilleur système, les paramètres qui sont souvent employés sont ceux utilisés par l'expérimentateur pour contrôler l'écoulement ; à savoir les vitesses superficielles du liquide et du gaz, ...etc. Les frontières entre les différents régimes n'ont jamais été bien définies et les zones de transition sont relativement étendues, d'où le caractère subjectif de ces cartes d'écoulement.

La génération de ces cartes d'écoulements est de deux types, l'une est une carte expérimentale (fig1.7). Pour prendre en considération les effets des propriétés des fluides et du diamètre de la conduite, des corrélations additionnelles doivent être introduites.

Les cartes mécanistes sont par contre développées en analysant les mécanismes physiques de transition modélisée à travers les équations fondamentales.

Les corrélations empiriques sont toujours utilisées dans les modèles mécanistes pour la fermeture du modèle.



**Figure 1.7 :** Exemple d'une carte d'écoulement expérimentale. [5]

### 1.1.4 Principaux paramètres des écoulements diphasiques

Dans tout ce qui suit, l'indice 'q' se rapporte à la phase liquide et l'indice 'p' se rapporte à la phase vapeur. Nous définissons les grandeurs utilisées en écoulement diphasique de la manière suivante :

### 1.1.4.1 Calculs VOF en régime permanent et transitoire

La formulation VOF dans ANSYS Fluent est généralement utilisée pour calculer une solution dépendante du temps, mais pour les problèmes dans lesquels vous ne vous préoccupez que d'une solution en régime permanent, il est possible d'effectuer un calcul en régime permanent. Un calcul VOF en régime permanent n'est utile que lorsque votre solution est indépendante des conditions initiales et qu'il existe des limites d'afflux distinctes pour les phases individuelles. Par exemple, étant donné que la forme de la surface libre à l'intérieur d'une coupelle rotative dépend du niveau initial du fluide, un tel problème doit être résolu en utilisant la formulation dépendante du temps. D'autre part, l'écoulement de l'eau dans un canal avec une région d'air sur le dessus et une entrée d'air séparée peut être résolu avec la formulation en régime permanent.

La formulation VOF repose sur le fait que deux ou plusieurs fluides (ou phases) ne s'interpénètrent pas. Pour chaque phase supplémentaire que vous ajoutez à votre modèle, une variable est introduite : la fraction volumique de la phase dans la cellule de calcul. Dans chaque volume de contrôle, les fractions volumiques de toutes les phases totalisent l'unité. Les champs de toutes les variables et propriétés sont partagés par les phases et représentent des valeurs moyennes en volume, tant que la fraction volumique de chacune des phases est connue à chaque emplacement. Ainsi, les variables et les propriétés dans une cellule donnée sont soit purement représentatives de l'une des phases, soit représentatives d'un mélange des phases, en fonction des valeurs de fraction volumique. Autrement dit, si  $q^{\text{th}}$  la fraction volumique du fluide

Dans la cellule est notée, alors les trois conditions suivantes sont possibles :

$\alpha_q = 0$  : La cellule est vide ( $q^{\text{th}}$  du fluide).

$\alpha_q = 1$  : La cellule est pleine ( $q^{\text{th}}$  du fluide).

$0 < \alpha_q < 1$ : La cellule contient l'interface entre  $q^{\text{th}}$  de fluide ou plusieurs autres fluides.

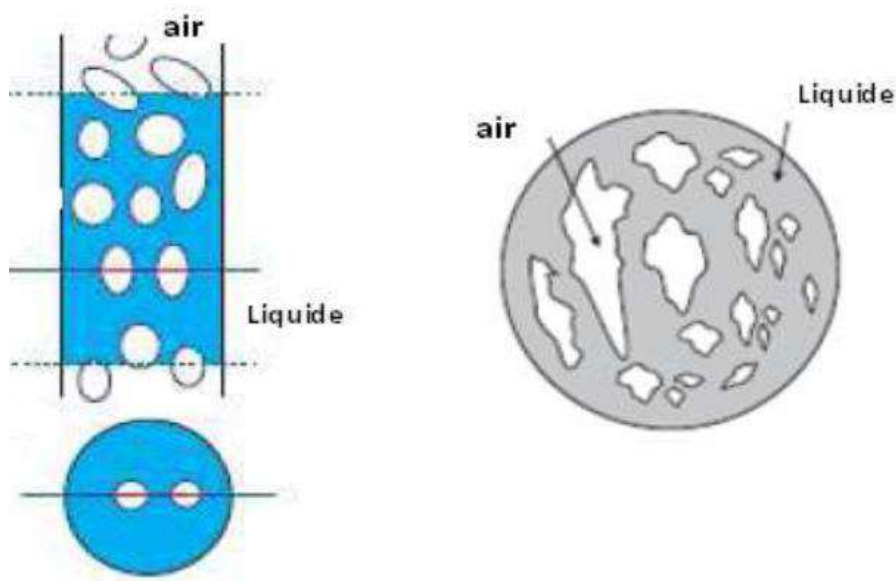
En fonction de la valeur locale de  $\alpha_q$ , les propriétés et variables appropriées seront attribuées à chaque volume de contrôle dans le domaine.

### 1.1.4.2 La fraction du vide (gaz)

Considérons un canal avec un écoulement courant de deux phases, la section de passage de l'ensemble de cette écoulement est représentée par la surface A. La surface  $A_q$  représente la section de l'écoulement de la phase liquide,  $A_p$  représente la section de l'écoulement de la phase gazeuse seulement, Le rapport de la surface d'écoulement du gaz et du liquide sur la surface totale de l'écoulement, la fraction de vide représente un paramètre fondamental dans le calcul des coefficients de transfert thermique, des transitions des régimes d'écoulement et des chutes de pression, et souvent dénotée par  $\alpha$

$$\alpha_q = \frac{A_q}{A} \quad (1.1)$$

$$\alpha_p = \frac{A_p}{A} \quad (1.2)$$



**Figure 1.8 :** Section du taux de vide.

### 1.1.4.3 Les vitesses débitantes

Les vitesses débitantes (superficielles) du liquide et du gaz, représente le débit volumique d'une phase sur la surface totale :

$$u_{qs} = \frac{q_q}{A} \quad (1.3)$$

$$u_{ps} = \frac{q_p}{A} \quad (1.4)$$

Compte tenu la définition les vitesses locales du gaz et du liquide peuvent être exprimées en fonction des vitesses superficielles respectifs :

$$u_q = \frac{u_{qs}}{\alpha_q} \quad (1.5)$$

$$u_p = \frac{u_{ps}}{\alpha_q} = \frac{u_{ps}}{1 - \alpha_q} \quad (1.6)$$

#### 1.1.4.4 La tension de surface

La tension de surface est la tension qui existe à la surface de séparation de deux phases.

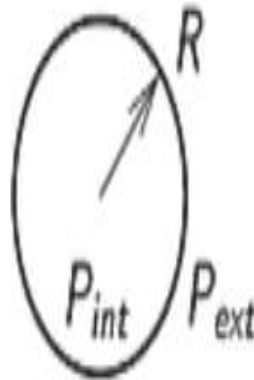
On la définit comme la force qu'il faut appliquer à l'unité de longueur, le long d'une ligne perpendiculaire à la surface d'un liquide en équilibre pour provoquer l'extension de cette surface, ou comme travail exercé par cette force unité de surface. On peut formaliser cette propriété de la manière suivante : il existe une différence de pression entre le liquide et le gaz, égale à la courbure locale de surface  $k$  multipliée par un coefficient  $\sigma$ , appelé coefficient de tension de surface, dépendant des deux fluide en présence. La pression la plus forte règne dans le fluide dont la surface est convexe.

$$P_{int} - p_{ext} = k\sigma \quad (1.7)$$

Cette équation s'appelle équation de Laplace,  $k$  est la courbure moyenne de la surface, c'est à dire la somme des deux courbures principales ou  $p_{int}$  et  $p_{ext}$  sont respectivement les pressions dans la phase non mouillante et la phase mouillante. La discontinuité de la pression a l'interface  $p_{int} - p_{ext}$  est appelée pression capillaire

$$k = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (1.8)$$

$R_1$  et  $R_2$  sont les rayons de courbure de l'interface dans deux plans orthogonaux.



**Figure 1.9 :** Equilibre mécanique dans particule fluide sphérique. [6]

#### 1.1.4.5 Le schéma implicite

Lorsque le schéma implicite est utilisé pour la discrétisation temporelle, les schémas d'interpolation aux différences finies standard d'ANSYS Fluent, QUICK, Second Order Upwind et First Order Upwind, et les schémas HRIC modifiés, sont utilisés pour obtenir les flux de face pour toutes les cellules, y compris celles proches de l'interface.

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q U_f^{n+1} \alpha_q^{n+1} f) = \left[ \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_{\alpha q} \right] V \quad (1.9)$$

Étant donné que cette équation nécessite les valeurs de fraction volumique au pas de temps courant (plutôt qu'au pas précédent, comme pour le schéma explicite), une équation de transport scalaire standard est résolue de manière itérative pour chacune des fractions volumiques de phase secondaire à chaque instant.

Le schéma implicite peut être utilisé pour les calculs en fonction du temps et en régime permanent.



### 1.1.4.6 Propriétés matérielles

Les propriétés apparaissant dans les équations de transport sont déterminées par la présence des phases constitutives dans chaque volume de contrôle. Dans un système à deux phases, par exemple, si les phases sont représentées par les indices 1 et 2, et si la fraction volumique de la seconde de celles-ci est suivie, la densité dans chaque cellule est donnée par :

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1 \quad (1.10)$$

La densité  $\rho$  et la viscosité dynamique  $\mu$  dans cette équation sont fonction de la fraction volumique de toutes les phases :

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad (1.11)$$

$$\mu = \sum \alpha_q \mu_q \quad (1.12)$$

## 1.2 Revue bibliographique

### **Julien Rajomalahy et al (2021) [6] :**

Ce travail est axé sur l'étude numérique de la vaporisation de l'eau dans un tube chauffé en utilisant le modèle « Two phase Flow » en MATLAB Simulink qui calcule les propriétés thermodynamiques et de transport de l'eau et de la vapeur saturée variant avec la température. L'étude de l'ébullition dans des tubes est une préoccupation majeure de plusieurs chercheurs. Le présent travail étudie numériquement l'écoulement d'ébullition pour un tube vertical de section circulaire dont le diamètre interne varie dans un intervalle compris entre 0,25 à 0,40 m en utilisant l'eau comme fluide de fonctionnement. On peut dire que l'exploitation géothermique est fondée sur la température, la pression et le débit massique du réservoir. Les courbes de la qualité de vapeur ont montré la fraction de vapeur récupérable pour plusieurs paramètres d'entrées différentes. La vaporisation de l'eau est influencée par la pression du réservoir ainsi que le débit massique. L'eau entre dans la conduite à 423,15 K a un débit massique compris entre l'intervalle :  $0,5 \leq \dot{m} \leq 1$  kg/s. La conduite est sectionnée en quatre sections qui sont chauffées à des températures différentes. La vapeur ainsi récupérée peut être utilisée pour l'exploitation géothermique.

### **Nysanov, E. A., Zh S. Kemelbekova, et al (2020) [7] :**

Dans cet article, le modèle mathématique d'écoulement instationnaire du flux ouvert diphasique prend en compte la redistribution de la concentration en particules, la profondeur d'écoulement et la filtration de l'eau sur le fond du canal, et a également créé une méthode de calcul efficace. Dans ce cas, l'écoulement à deux vitesses est considéré, c'est-à-dire que la présence des composantes longitudinale et verticale des vitesses de phase est prise en compte, et nous pensons également que les paramètres d'écoulement le long de l'écoulement ne changent pas. Les conditions initiales et aux limites sont établies sur la base de formules théoriques et empiriques, largement utilisées dans la pratique. L'écoulement dans les canaux ouverts n'est pas sous pression, se produit sous l'influence de la gravité et se caractérise par le fait que l'écoulement a une surface libre. Au moment initial, nous considérons que l'écoulement est uniforme dans la direction longitudinale et tous les paramètres sont fixés par des formules théoriques et empiriques connues. Au fond du canal pour la composante de vitesse longitudinale de la condition d'utilisation de l'eau d'adhérence, et pour la composante de vitesse longitudinale de la condition de phase solide pour le déplacement et croire les concentrations connues de particules solides, et les composantes verticales de vitesse les

phases du filtrage conditions (pour l'eau) et taille hydraulique (pour les particules solides). Sur la surface libre, on considère qu'il n'y a pas de particules solides, et pour les composantes longitudinales des vitesses de phase on néglige la force de frottement de l'air, et pour les composantes verticales des vitesses de phase on utilise la condition de non-uniformité de la surface libre dans le temps. Sur la base du modèle mathématique développé et de la méthode de calcul créée, les changements des principaux paramètres dans la profondeur de l'écoulement et dans le temps sont déterminés.

**Fabien Raoult (2019) [8] :**

La brumisation en amont d'un échangeur à air permet d'intensifier les échanges de chaleur entre l'air et les parois de l'échangeur. La simulation de l'écoulement au sein d'un échangeur est complexe à cause des interactions avec les parois chauffées. Peu d'études traitent de la simulation de l'interaction spray/paroi d'un échangeur à l'aide d'un code CFD. Ces travaux de thèse sont donc une contribution au développement d'un outil numérique permettant de simuler l'effet d'un spray sur une plaque chauffée.

Le code CFD 3D Code\_Saturne, développé par EDF, est utilisé. Pour des topographies complexes, comme un réseau de parois, l'approche eulérienne est pressentie comme une alternative aux approches lagrangiennes plus coûteuses en temps de calcul et choisie pour simuler la phase dispersée. Le modèle de spray développé couple un modèle 0D de formation de spray et un modèle CFD 3D simulant la dispersion et l'évaporation de gouttelettes d'eau dans un écoulement d'air. L'approche de la partie dispersion a été comparée et validée à l'aide de mesures expérimentales. Une analyse paramétrique est réalisée et les résultats obtenus sont conformes à ceux de la littérature. Cette analyse a également permis de montrer que la majorité de l'évaporation est réalisée lors de la formation du spray. Le bon refroidissement d'une cible est obtenu pour une cinétique d'évaporation rapide couplée à une surface de spray proche de la surface cible.

L'interaction du nuage de gouttes avec la paroi est également abordée. Un nouveau dispositif expérimental est mis en oeuvre afin d'étudier l'interaction spray + paroi avec des flux massiques d'eau faibles. Une plaque chauffée par un flux imposé est positionnée dans un écoulement d'air dans lequel un spray est injecté. Le flux massique de gouttes impactant la paroi est déterminé numériquement à partir de la vitesse normale à la paroi. La formulation des conditions de dépôt des gouttes et des conditions thermiques sur la paroi est un travail original. Les résultats numériques et expérimentaux sont confrontés. Les premiers résultats

numériques obtenus sur le refroidissement de la plaque chauffée sont très encourageants pour l'obtention d'un outil numérique simulant un écoulement diphasique au sein d'un échangeur.

**Aghaee, Mohammad et al (2017) [9] :**

Les auteurs de cette publication ont décrit L'écoulement multiphasique, en particulier l'écoulement diphasique, est largement utilisé dans l'industrie. Par conséquent, des études plus précises des écoulements diphasiques sont nécessaires afin de prédire les régimes d'écoulement, les chutes de pression, les transferts de chaleur et les transitions de phase. Dans l'industrie pétrolière, la séparation des phases telles que l'eau et l'huile est réalisée à l'aide d'écoulements tourbillonnants et de tourbillons ; par conséquent, l'évolution des tourbillons dans les écoulements diphasiques doit être prise en compte. Une méthode de séparation nécessite que le fluide pénètre dans un long tube dans un vortex libre. Leur étude nécessite une bonne compréhension des tourbillons libres dans les tubes. Cette étude examine l'évolution d'un vortex libre biphasé confiné dans un tube à l'aide de la dynamique des fluides computationnelle. Les équations discrètes sont résolues par la méthode simple.

**Davy Khaophone (2016) [10] :**

Cette thèse est dédiée à l'étude expérimentale et numérique des phénomènes de condensation dans un pressuriseur de chaufferie nucléaire embarquée conçu par l'entreprise DCNS. Au sein du système est observé un écoulement diphasique avec changement d'état, descendant dans un tube vertical partiellement immergé dans du liquide. Le liquide sous-refroidi s'écoule dans le tube sous l'effet de la gravité en entraînant de la vapeur saturée qui se condense à son contact.

Dans un premier temps, l'étude des phénomènes de condensation est réalisée sur un banc expérimental dont la conception, le dimensionnement, la réalisation et l'exploitation ont été effectués au cours de cette thèse. Le dispositif est une version simplifiée à l'échelle 1 du système réel. Cette étude expérimentale a permis d'identifier les régimes d'écoulements diphasiques présents dans le système et d'analyser l'impact de trois paramètres : le débit de liquide injecté, le sous-refroidissement de ce liquide à l'entrée du tube et la pression en sortie de tube. Par ailleurs, l'étude propose un modèle déterminant les conditions pour laquelle le tube d'essais est complètement noyé, ce qui minimise les phénomènes de condensation.

Dans un second temps, une simulation numérique de l'écoulement diphasique est réalisée par CFD sur ANSYS Fluent à l'aide du modèle « Volume Of Fluid ». La prise en compte de la

condensation de la vapeur au contact du liquide sous-refroidi a nécessité le développement, grâce aux fonctions utilisateur du logiciel, d'un modèle spécifique s'appuyant sur un modèle de la littérature. Les résultats obtenus ont permis de reproduire qualitativement le déversement du liquide observé expérimentalement en entrée de tube ainsi que la condensation de la phase vapeur au contact de la phase liquide

**Hongjie Song, Wei Zhang (2016) [11]:**

Le récepteur à caloduc avec stockage d'énergie thermique latente à haute température intégré est l'un des composants clés du système d'alimentation spatiale dynamique solaire (SDPSS), parmi lesquels l'évaporation et la condensation sont le principal mode de transfert de chaleur, un flux biphasé très compliqué. Cependant, la recherche sur les caractéristiques d'écoulement diphasique et de transfert de chaleur est un moyen efficace d'améliorer l'efficacité du système et de réduire la masse du système. Ainsi, un modèle physique bidimensionnel a été construit et la technique du volume de fluide (VOF) a été utilisée pour modéliser l'interaction entre les deux phases. La fonction UDF (Users Define Function) a été introduite pour gérer les termes de source de masse. Dans l'étude, la relation entre la surchauffe, le sous-refroidissement et le flux de chaleur pariétal a été étudiée. De plus, le schéma d'écoulement des bulles dans le tube a été analysé. Comparé au flux de bulles de baratte, le coefficient de transfert de chaleur du flux de bulles était beaucoup plus élevé. Le diamètre de départ des bulles augmentait à mesure que le sous-refroidissement de surface augmentait. Le travail dans cet article jette une bonne base pour la poursuite des recherches sur les caractéristiques de transfert de chaleur du récepteur de caloduc avec stockage intégré d'énergie thermique latente à haute température.

**Shengchun Liu, Yan Huo et al(2015) [12] :**

Les auteurs de cet article ont procédé à une étude, de la simulation numérique sur la condensation du R245fa à l'intérieur d'un tube horizontal de diamètre intérieur de 8 mm est recherchée dans cet article. L'effet de la variation de la vitesse, de la température de condensation et de la super-la chaleur de la vapeur d'entrée et la variation de la température de l'eau de refroidissement sur le coefficient de transfert de chaleur sont in-étudiée sous forme d'étude paramétrique. Le processus de condensation de la vapeur a été modélisé avec succès par appliquer une fonction définie par l'utilisateur (UDF) ajoutée à la dynamique des fluides computationnelle commerciale (CFD) packages. En analysant les contours de condensats correspondants et les courbes de transfert coefficient, les relations entre le coefficient de transfert de chaleur de condensation et divers paramètres de R245fa à l'intérieur du tube

horizontal sont obtenus. Il montre que le coefficient de transfert de chaleur augmente par l'augmentation de la vitesse, de la température de condensation et de la surchauffe de la vapeur d'eau et la diminution de la température de l'eau de refroidissement. Les erreurs entre le coefficient de transfert de chaleur de si le résultat de simulation et le modèle de Wang et Shah sont à  $\pm 30\%$ . L'étude paramétrique fournit la base pour concevoir des échangeurs de chaleur efficaces de R245fa.

### **Rémi Dinsenmeyer (2015) [13] :**

Les travaux présentés dans cette thèse concernent l'étude de l'évolution des régimes d'écoulements diphasiques lors de l'évaporation progressive dans un canal horizontal. Le but est de mieux comprendre l'écoulement à l'intérieur d'un tube récepteur d'une centrale solaire à concentration à génération directe de vapeur. Cette technologie, présentée comme une amélioration des systèmes actuels pouvant permettre une réduction des coûts, consiste en la production de vapeur directement sous l'effet du rayonnement solaire concentré. La prévision de l'écoulement liquide-vapeur alors généré dans le tube est encore de nos jours difficile, c'est pourquoi le recours à la simulation numérique est intéressant. Pour cela un modèle a été développé permettant la simulation de ces écoulements, depuis le début de la création de la vapeur jusqu'à l'existence de larges poches. Basé sur le modèle diphasique VOF du code Fluent, par l'ajout de fonctions personnalisées et d'une phase dispersée supplémentaire, il permet de modéliser différents phénomènes liés au processus d'évaporation : création en paroi, transport, recondensation et création de larges structures. Ce développement a été mis en œuvre pour simuler des écoulements en évaporation, permettant de reproduire l'évolution des régimes d'écoulement. La validation est faite grâce à une étude expérimentale de la littérature, en comparant les régimes d'écoulements obtenus pour différents débits de liquide et sous l'effet de différents flux de chaleur. Enfin, le modèle a été appliqué à la simulation de la génération de vapeur dans le tube récepteur d'une centrale solaire, mettant en évidence l'apparition et l'évolution des différents régimes d'écoulement. Au vu du peu d'installations expérimentales trouvées dans la littérature sur le sujet, et afin de valider au mieux les fonctions développées, une installation expérimentale a été conçue et dimensionnée.

### **Brahim Mohamedi et al (2015) [14]**

La présente étude consiste à développer une nouvelle fonction définie par l'utilisateur à l'aide de réseaux de neurones artificiels destinés à Simulation de la dynamique des fluides (CFD) pour la prédiction des écoulements multiphasiques de vapeur d'eau à travers le carburant

assemblages de réacteur nucléaire. En effet, la fourniture de données de matériaux précises, en particulier pour l'eau et la vapeur sur une large gamme de températures et de pressions est une exigence essentielle pour effectuer des simulations CFD en thermohydraulique du génie nucléaire. Contrairement au solveur CFD commercial ANSYS-CFX, où le norme industrielle IAPWS-IF97 (International Association for the Properties of Water and Steam-Industrial Formulation 1997) est implémenté dans la base de données matériaux interne ANSYS-CFX, le solveur ANSYS-FLUENT fournit uniquement la possibilité d'utiliser l'équation d'état (EOS), comme la loi des gaz parfaits, Redlich-Kwong EOS et par morceaux interpolations polynomiales. À cette fin, une nouvelle approche est utilisée pour mettre en œuvre les propriétés thermophysiques d'eau et de vapeur pour l'eau sous-refroidie dans le solveur CFD ANSYS-FLUENT. La technique est basée sur des réseaux de neurones artificiels de type multicouche pour prédire avec précision 10 propriétés thermodynamiques et de transport de la masse volumique, de la chaleur spécifique, de la viscosité dynamique, de la conductivité thermique et de la vitesse du son sur liquide saturé et vapeur saturée. La température est utilisée comme paramètre d'entrée unique, l'erreur absolue maximale prédite par le réseaux de neurones artificiels ANNs, était d'environ 3%. Ainsi, l'investigation numérique sous le solveur CFD ANSYSFLUENT devient compétitif avec les autres codes CFD dont ANSYS-CFX dans ce domaine. En effet, le couplage du modèle d'ébullition de paroi du Rensselaer Polytechnical Institute (RPI) et du modèle développé Neural-UDF (User Defined Function) s'est avéré utile pour prédire la fraction volumique de vapeur dans un flux d'ébullition sous-refroidi.

#### **Hassan Abdulmouti (2014)[15] :**

Le nombre d'articles sur les écoulements multiphasiques dans le domaine de la dynamique des fluides est énorme et ne cesse de croître. La diversité des types de flux rend une description générale presque impossible. Cela rend la recherche fondamentale nécessaire

En particulier, des expériences contrôlées sont nécessaires pour une meilleure compréhension physique et comme cas de test pour les travaux numériques et théoriques. Le but de cet article est le désir de démontrer, d'examiner et de résumer la principale découverte de la recherche précédente sur les caractéristiques, les structures, les comportements et les modèles d'écoulement à deux phases de bulles. De plus, élucider certains modèles et techniques importants pour mesurer les paramètres d'écoulement à bulles diphasiques tels que le mouvement des bulles, le régime d'écoulement, la forme des bulles qui jouent un rôle considérable dans de nombreuses applications d'ingénierie.

**Guillaume Prigent (2013)[16] :**

Ce travail de thèse, est consacré à la modélisation et simulation numérique d'écoulements diphasiques liquide-gaz, mettant en jeu des transferts de chaleur. La simulation de configurations où la prise en compte des effets de compressibilité de la phase gazeuse est indispensable (micro pompes, micro actionneurs, etc...) a nécessité l'utilisation d'un modèle original, considérant le liquide incompressible et le gaz compressible sous l'hypothèse faible Mach. Lors de cette thèse, ce modèle a été implémenté dans un code diphasique prenant en compte l'interface à l'aide d'une méthode de front-tracking. Des cas tests ont été développés spécifiquement afin de vérifier la conservation de l'énergie pour des configurations de complexité croissante. Les résultats des cas tests ont permis de mettre en évidence la difficulté à assurer la conservation de l'énergie lorsque l'interface n'est pas discontinue mais lissée, comme c'est le cas dans la méthode de front-tracking standard. Une méthode de traitement d'interface hybride a été proposée, rétablissant le caractère discontinu de l'interface avec la reconstruction d'une fonction indicatrice de phase échelon, tandis que le déplacement de l'interface est assuré d'un pas de temps à l'autre à l'aide du front-tracking. Les résultats obtenus avec cette nouvelle méthode hybride sont très satisfaisants, la méthode hybride permettant d'assurer la conservation de l'énergie et de la masse avec précision dans les simulations.

**D. Simón, M. C. Paz et al (2010) [17] :**

Dans cet article, un modèle d'ébullition pour le logiciel de simulation d'écoulement de fluide "Fluent 6", pour sa utilisation dans les échangeurs de chaleur gaz-liquide, est présentée. Après une étude approfondie de l'existante bibliographie, un modèle physique a été compilé, qui a été incorporé dans le modèle multiphase eulérien, le plus adapté de ceux disponibles dans Fluent pour la résolution de ces types d'écoulements multiphasiques. Sont également discutés certains des aspects de la mise en œuvre, qui consistent essentiellement en la modélisation de les interactions entre les phases en tant que termes sources dans les équations gouvernantes résolues par Fluent. Enfin, la mise en œuvre du modèle a été validée par tests expérimentaux de la littérature disponible, atteignant un degré satisfaisant de concordance.

**L. Vyskocil et al (2010) [18] :**

Cet article présente des simulations de l'écoulement convectif en ébullition réalisées avec NEPTUNE\_CFD et Codes FLUENTS. Les expériences DEBORA menées au CEA Grenoble ont été utilisées comme ensemble de données expérimentales. Dans ces expériences, le fréon R12 s'écoule vers le haut à l'intérieur d'un tuyau vertical. Radial les profils des variables de



débit sont mesurés à la fin de la section chauffée. Sept cas DEBORA ont été sélectionnés pour la simulation. Le code NEPTUNE\_CFD a été utilisé sans modification car il contient tous les éléments nécessaires des modèles. Dans FLUENT, une partie importante des modèles a été implémentée par programmation en User Fonctions définies. La comparaison des profils radiaux de taux de vide, température liquide, gaz la vitesse et le diamètre moyen des bulles à la fin de la section chauffée montrent que les deux codes peuvent fournir résultats raisonnables dans des conditions d'ébullition. Le travail présenté a été réalisé dans le cadre du 6ème projet cadre CE NURESIM. Le code NEPTUNE\_CFD est implémenté dans la plateforme NURESIM.

### **Gloria Faccanoni (2008) [19]**

Cette thèse étudie la modélisation et la simulation numérique d'écoulements diphasiques à interfaces avec changement de phase. Cette transition est localisée en des interfaces qui sont produites dynamiquement. On prend également en compte la diffusion de la chaleur, la tension de surface et les forces de gravité. L'application envisagée est la simulation d'écoulements dans un réacteur à eau pressurisée dans l'industrie nucléaire civile. On s'intéresse ici plus précisément à un éventuel fonctionnement accidentel et en particulier au phénomène de la crise d'ébullition. On modélise les écoulements diphasiques avec changement de phase par un modèle basé sur le système des équations d'Euler fermé par une seule équation d'état obtenue en postulant un équilibre instantané et local des pressions, températures et potentiels chimiques de chaque phase. On en étudie ensuite l'hyperbolicité et le problème de Riemann qui lui est associé. Du point de vue numérique, puisqu'il n'y a pas d'expression analytique pour la loi à l'équilibre dans le cas général, on propose une méthode simple pour approcher cette loi d'état lorsque les propriétés des deux phases sont décrites par des lois très générales, éventuellement sous forme tabulée. Enfin, pour simuler des écoulements diphasiques avec changement de phase, on présente un schéma numérique de type relaxation/projection pour lequel la phase de projection utilise cette approximation de l'équilibre thermodynamique.

### **Dillon, Chad Michael (2004) [20] :**

Une étude de l'écoulement diphasique dans des canaux annulaires avec des espaces annulaires inférieurs à 1 mm est utile pour la conception et l'analyse de la sûreté de systèmes à haute densité de puissance tels que les cibles d'accélérateurs et les cœurs de réacteurs nucléaires. La chute de pression le long d'une section d'essai annulaire concentrique a été mesurée pour des

cas de qualité constante ou de qualité variable sur sa longueur (comme dans le cas d'une ébullition sous-refroidie et d'un flux). Un tube poreux a été utilisé pour injecter du gaz le long de la surface interne du canal annulaire, simulant ainsi le cas d'un écoulement bouillant le long de la surface interne. Les données ont été comparées aux prédictions de divers modèles et corrélations. De plus, l'effet des vibrations de la paroi sur la chute de pression a été examiné. Une étude de l'écoulement diphasique dans des canaux annulaires avec des espaces annulaires inférieurs à 1 mm est utile pour la conception et l'analyse de la sûreté de systèmes à haute densité de puissance tels que les cibles d'accélérateurs et les cœurs de réacteurs nucléaires. Bien que de nombreux travaux aient été réalisés sur la chute de pression dans un écoulement diphasique, les concepteurs s'appuient principalement sur des modèles empiriques et des corrélations ; par conséquent, il est utile d'étudier leur applicabilité pour différentes tailles de canaux, géométries et qualités de gaz. La chute de pression le long d'une section d'essai annulaire concentrique a été mesurée pour des cas de qualité constante ou de qualité variable sur sa longueur (comme dans le cas d'une ébullition sous-refroidie et d'un flux). Un tube poreux a été utilisé pour injecter du gaz le long de la surface interne du canal annulaire, simulant ainsi le cas d'un écoulement bouillant le long de la surface interne. Les données ont été comparées aux prédictions de divers modèles et corrélations. De plus, l'effet des vibrations de la paroi sur la chute de pression a été examiné. Des expériences ont été menées en imposant des vibrations d'amplitudes et de fréquences connues sur le tube extérieur de l'anneau. On pense que les vibrations de la paroi sont importantes pour l'écoulement dans les microcanaux où les amplitudes de vibration peuvent être importantes par rapport au diamètre hydraulique du canal. Les résultats obtenus dans cette enquête indiquent que la corrélation de chute de pression donnée par Beattie et Whalley fournit le meilleur accord avec les données à la fois pour l'injection de gaz de tube poreux (c'est-à-dire de qualité variable) et pour l'écoulement diphasique de qualité constante dans l'anneau étroit. De plus, les résultats montrent qu'il y a un effet minimal des vibrations sur la perte de charge diphasique sur la gamme de fréquences et d'amplitudes étudiées.

**Robert ROUMY (1969)[21] :**

Ce rapport est une étude expérimentale d'un mélange diphasique eau-air dans des tubes verticaux de différents diamètres. Nous avons mesuré la fraction de vide moyenne dans une portion de canal de longueur 2 m, au moyen d'un système de vannes à fermeture rapide et simultanée. Au moyen de sondes résistives et de photographies nous avons déterminé la configuration de l'écoulement et tracé des cartes donnant les frontières entre les différentes

configurations d'écoulement : bulles indépendantes, bulles agglomérées, bouchons, semi-annulaire, annulaire.

# **Chapitre 2**

**Position du problème**

**et**

**Formulation mathématique**

## 2.1 Introduction

Un écoulement diphasique est caractérisé par une interface entre les phases qui crée la discontinuité des transferts de masse et de chaleur. Une description complète d'un écoulement diphasique exige la résolution des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie pour chaque phase. Ces équations sont plus complexes que celles régissant un problème monophasique parce qu'elles contiennent des termes additionnels qui gouvernent le Transfer de masse, de quantité de mouvement et d'énergie entre les phases.

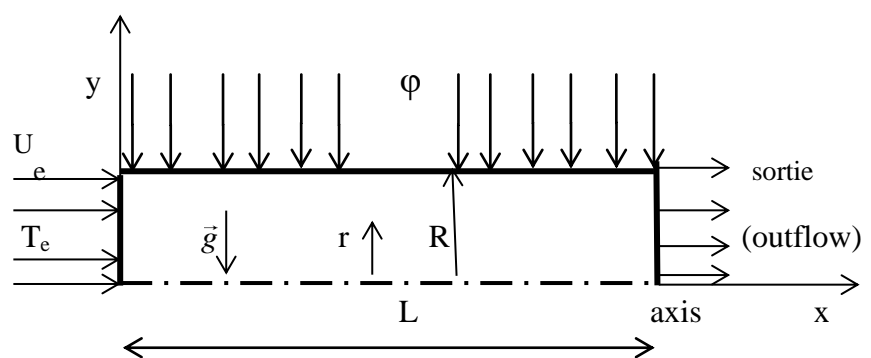
Ce chapitre est réservé à la présentation des équations qui régissent l'écoulement diphasique dans un tube. Il s'agit principalement des équations régissant le mouvement du fluide et le transfert de chaleur, ainsi que les formulations qui régissent l'interaction entre les phases liquide-vapeur et les équations du modèle de turbulence utilisé. De plus, une description du problème.

## 2.2 Description problème

Dans ce travail on présente une étude numérique des caractéristiques dynamiques d'un écoulement diphasique liquide-vapeur en régime transitoire dans une colonne montante de longueur  $L= 150\text{mm}$  et de diamètre  $D =1.1\text{mm}$ . Chauffée par un flux de chaleur uniforme.

Le domaine a été subdivisé en  $2500 \times 30$  cellules dans, respectivement, les directions axiale et radiale.

### a. Cas d'une conduite horizontale



**Figure 2.1** : géométrie du cas d'une conduite horizontale.

## b. Cas d'une conduite verticale

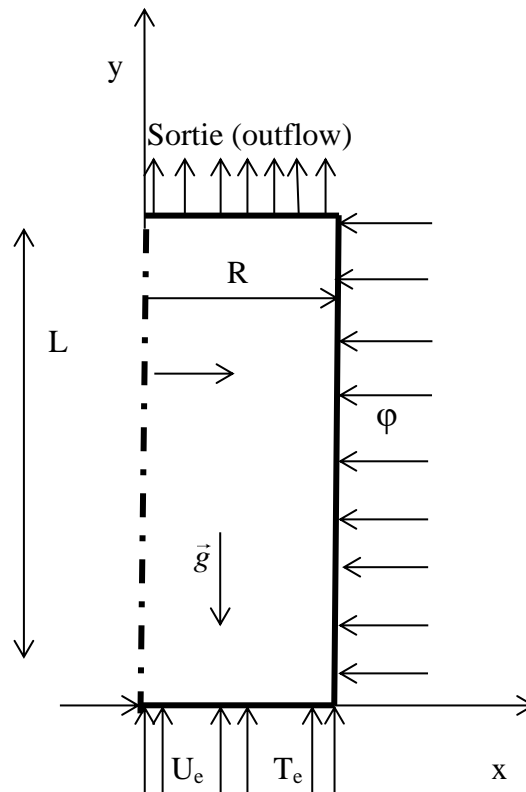


Figure 2.2 : géométrie du cas d'une conduite verticale.

## 2.3 Equations de Base

La simulation numérique des écoulements diphasiques (liquide-vapeur) est un véritable défi à l'égard des multiples difficultés relatives à la modélisation physique autant qu'aux méthodes numériques. En effet, il s'agit de représenter un écoulement comportant des interfaces liquide-vapeur de dynamique rapide avec de plus des changements de phase. À l'échelle la plus locale, un écoulement diphasique est constitué de fluides monophasiques (la vapeur et le liquide) séparés par des interfaces mobiles. Une des complexités de ces écoulements (avec ou sans changement de phase) provient justement de la présence de ces interfaces qui sont le siège d'échanges entre les phases et dont la position est une inconnue supplémentaire du problème (par rapport au cas monophasique).

### 2.3.1 Equations de conservation moyennées

Pour aboutir à une analyse CFD, les équations de la mécanique des fluides doivent être considérées. Dans la littérature de la CFD, l'ensemble des équations régissant le mouvement

d'un fluide se réfère aux équations de Navier-Stokes moyennées, communément désignées par RANS (pour *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*). Les équations suivantes expriment la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie pour un écoulement multiphasique.

Les équations régissant le problème sont les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement et l'équation de l'énergie. Pour une formulation simple du problème, nous allons supposer quelques hypothèses

### 2.3.2 Hypothèses simplificatrices

- L'écoulement est turbulent
- L'écoulement est bidimensionnel
- L'écoulement est incompressible
- L'écoulement est axisymétrique
- Le régime est transitoire

### 2.3.3 Équation de continuité et de quantité de mouvement vectorielles

Une seule équation de quantité de mouvement est résolue dans tout le domaine et le champ de vitesse résultant est partagé entre les phases. L'équation de quantité de mouvement, illustrée ci-dessous, dépend des fractions volumiques de toutes les phases à travers les propriétés  $\rho$  et  $\mu$ .

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.1)$$

Ou 
$$\rho = \alpha_v \rho_v + (1 - \alpha_v) \rho_l$$

et 
$$\mu = (\alpha_v \rho_v + (1 - \alpha_v) \rho_l) \nu$$

$\rho$  : Masse volumique du mélange

$\rho_v$  et  $\rho_l$  sont les masse volumique respectivement de la vapeur et du liquide

### 2.3.4 Equation de continuité et de quantité de mouvement projetées

#### 2.3.4.1 Equation de continuité

$$\nabla \cdot \vec{u} = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{V}{r} = 0 \quad (2.2)$$

**2.3.4.2 Equation de quantité de mouvement**

❖ **Equation de quantité de mouvement suivant r.**

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (\rho UV) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho UV) = -\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu_{eff} \left( 2 \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u}) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu_{eff} \left( \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \rho g + S_U \tag{2.3}$$

❖ **Equation de quantité de mouvement suivant x**

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (\rho UV) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho UV) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu_{eff} \left( 2 \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u}) \right) \right] - 2 \mu_{eff} \frac{V}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu_{eff}}{r} (\nabla \cdot \vec{u}) + S_V \tag{2.4}$$

Où : U → composante de la vitesse selon r

V → composante de la vitesse selon x

**2.3.5 Équation de l'énergie**

L'équation d'énergie, également partagée entre les phases, est présentée ci-dessous

$$\frac{\partial}{\partial x} (U(\rho E + P)) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV(\rho E + P)) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} - \sum h_i J_{ix} + (\bar{\bar{\tau}}_{eff} \cdot \vec{v})_x \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} - \sum h_i J_{ir} + (\bar{\bar{\tau}}_{eff} \cdot \vec{v})_r \right) + S_h \tag{2.5}$$

D'où  $\bar{\bar{\tau}}_{eff}$  est le tenseur de contrainte de cisaillement turbulent (2D),  $\vec{v}$  est le vecteur vitesse et  $S_h$  est le terme source pour l'énergie

**2.3.6 Conditions aux limites**

Condition aux limites considérés sont représenté dans le tableau suivant :

x=0	0 ≤ r ≤ R	U = U <sub>e</sub> V = 0 T = T <sub>e</sub>	Entrée
r=R	0 ≤ x ≤ L	U = 0 V = 0 -λ $\frac{\partial T}{\partial r}$   <sub>r=R</sub> = φ	Paroi sup
		$\frac{\partial U}{\partial r}$   <sub>r=0</sub> = 0	



$r=0$	$0 \leq x \leq L$	$\left. \frac{\partial V}{\partial r} \right _{r=0} = 0$ $\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right _{r=0} = 0$	Axe de symétrie
$x=L$	$0 \leq r \leq R$	$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right _{x=L} = 0$ $\left. \frac{\partial U}{\partial z} \right _{x=L} = 0$ $\left. \frac{\partial V}{\partial z} \right _{x=L} = 0$	Sortie (outflow)

**Tab 2.1** : condition aux limites

Soit dans le tableau suivant les conditions limites dynamiques et thermiques.

### 2.3.7 Les équations moyennées en régime turbulent

$$\overline{\phi'} = 0$$

$$\overline{\overline{\phi}} = \overline{\phi}$$

$$\overline{f + \phi} = \overline{f} + \overline{\phi}$$

$$\overline{f \cdot \phi} = \overline{f} \cdot \overline{\phi} + \overline{f' \cdot \phi'}$$

$$\frac{\partial \overline{\phi}}{\partial x} = \frac{\partial \overline{\phi}}{\partial x}$$

Le système d'équations (2.1), (2. 2), (2. 3) et (2. 4) devient:

$$\overline{\nabla \cdot \vec{u}} = \frac{\partial \overline{U}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{V}}{\partial r} + \frac{\overline{V}}{r} \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho \overline{UU}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho \overline{UV}) = -\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu_{eff} \left( 2 \frac{\partial \overline{U}}{\partial x} - \frac{2}{3} (\overline{\nabla \cdot \vec{u}}) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu_{eff} \left( \frac{\partial \overline{U}}{\partial r} + \frac{\partial \overline{V}}{\partial x} \right) \right] + \rho g + S_U \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho \overline{UV}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho \overline{VV}) = -\frac{\partial \overline{P}}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial \overline{U}}{\partial r} + \frac{\partial \overline{V}}{\partial x} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu_{eff} \left( 2 \frac{\partial \overline{V}}{\partial r} - \frac{2}{3} (\overline{\nabla \cdot \vec{u}}) \right) \right] - 2 \mu_{eff} \frac{\overline{V}}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu_{eff}}{r} (\overline{\nabla \cdot \vec{u}}) + S_V \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\bar{U}(\rho E + P)) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \bar{V}(\rho E + P)) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{eff} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} - \sum h_i J_{ix} + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \bar{v})_x \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda_{eff} \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} - \sum h_i J_{ir} + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \bar{v})_r \right) + S_h \quad (2.9)$$

### 2.3.8 Le modèle $k - \varepsilon$ réalisable

Le modèle  $k - \varepsilon$  réalisable a été utilisé pour la turbulence dans la présente simulation. Les équations gouvernantes pour la turbulence de l'énergie cinétique  $k$  et le taux de dissipation  $\varepsilon$  sont :

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U k) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho V k) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial r} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U \varepsilon) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho V \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (2.11)$$

Dans ces équations,  $G_k$  représente la génération de l'énergie cinétique turbulente due aux gradients de la vitesse moyenne.  $G_b$  est la génération de l'énergie cinétique turbulente due à la flottabilité.  $C_{1\varepsilon}$  et  $C_{2\varepsilon}$  et  $C_{3\varepsilon}$  sont des constantes.  $S_K$  et  $S_\varepsilon$  sont des termes de source.

$$C_1 = \max \left[ 0.43 \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$$

$$\eta = S \frac{\varepsilon}{k}$$

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

#### ❖ Dans la modélisation de la turbulence

La viscosité turbulente  $\mu_t$  est calculée en combinant  $k$  et  $\varepsilon$  dans l'expression suivante:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.12)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (2.13)$$

Alors que  $C_\mu$  est une constante dans le modèle  $k - \varepsilon$  standard, elle varie pour le modèle

$k - \varepsilon$  Réalisable de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 U^* &= \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \widehat{\Omega}_{ij}\widehat{\Omega}_{ij}} & (2.14) \\
 \widehat{\Omega}_{ij} &= \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \\
 \Omega_{ij} &= \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k
 \end{aligned}$$

Ici,  $\bar{\Omega}_{ij}$  est la vitesse moyenne du tenseur de rotation vue dans un mouvement cadre avec la vitesse angulaire  $\omega_k$ , les constantes du modèle  $A_0$  et  $A_s$  sont données par :

$$\begin{aligned}
 A_0 &= 4.04 \\
 A_s &= \sqrt{6} \cos \varphi \\
 \varphi &= \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W) \\
 W &= \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{S^3} \\
 \tilde{S} &= \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \\
 S_{ij} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) & (2.14)
 \end{aligned}$$

La dissipation de l'énergie cinétique est donnée par :

$$G_\varepsilon = c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_\varepsilon \quad (2.15)$$

Les constantes sont déterminées à partir des expériences et elles diffèrent de celles du modèle  $k$ - $\varepsilon$ . Elles sont données comme suit :

$c_{1\varepsilon}$	$c_{2\varepsilon}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
1.44	1.9	1.0	1.2

**Tab 2.2** : constantes du modèle de turbulence  $k$ - réalisable.

### 2.3.9 Le nombre de Nusselt local

L'étude du transfert de chaleur, nécessite la détermination des taux de transfert, donnés par le biais du nombre de Nusselt défini comme suit :

$$Nu_x = h_x \frac{R}{\lambda}$$

Où : R est la longueur caractéristique

$$h_x = \frac{\phi_x}{T_c - T_f} \qquad \phi_x = -\lambda_f \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R}$$

Avec  $(\phi_x)$  est la densité du flux de chaleur et  $(h_x)$  le coefficient d'échange thermique superficiel.

En tenant compte des variables adimensionnelles définies précédemment à savoir :

$$\theta = \frac{T - T_f}{T_c - T_f} \qquad \bar{R} = \frac{r}{R}$$

Il vient que

$$Nu_x = - \left. \frac{\partial \theta}{\partial \bar{R}} \right|_{\bar{R}=1}$$

La valeur moyenne du nombre de Nusselt le long de cette paroi est calculée par l'intégrale suivante :

$$\overline{Nu} = - \int_0^1 \left( \frac{\partial \theta}{\partial \bar{R}} \right) \Big|_{\bar{R}=1} \partial X \qquad \text{avec} \qquad X = \left( \frac{x}{R} \right)$$

**Chapitre 3**

**Résultats**

**et**

**Discussions**

### 3.1 Introduction

La résolution des équations de conservation couplées à celles du modèle diphasique choisi permet de décrire l'écoulement diphasique à travers la visualisation des différentes configurations rencontrées lors de l'ébullition de l'eau. L'objet de ce chapitre est de présenter les différentes configurations de l'écoulement diphasique et d'évaluer le coefficient d'échange de chaleur en fonction des paramètres de fonctionnements, à savoir, le flux de chaleur et la vitesse d'entrée du fluide. Les résultats sont présentés un seul fluide.

Une simulation instationnaire a été choisie pour obtenir une solution convergente. L'évolution de l'écoulement d'ébullition a été captée par une simulation instationnaire. Le pas de temps pour une telle simulation d'écoulement multiphasique était en général de  $10^{-4}$  s. Les coordonnées sont : l'accélération de la pesanteur ( $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ) sur l'axe x négatif pour le cas d'une conduite verticale et ( $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ) sur l'axe r négatif pour une conduite verticale.

Dans cette étude on a effectué une teste avec un flux de chaleur de 250kw/m<sup>2</sup> et une vitesse d'entrée du fluide de 0.0002m/s, 4 configurations d'écoulement ont été observées comme le montre la Figure Ces configurations englobent l'écoulement :

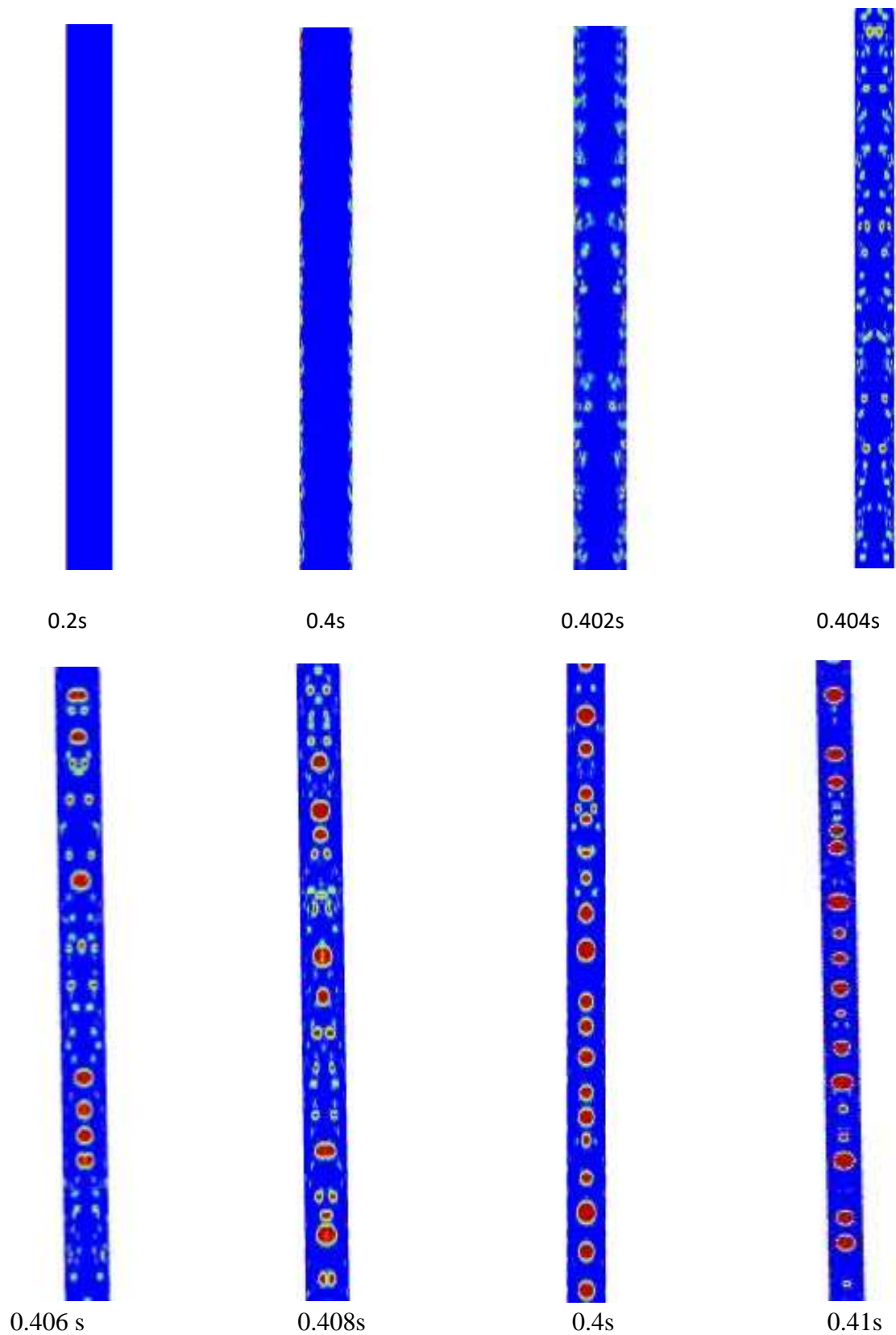
- **À bulles dispersées:** de nombreuses petites bulles flottent dans une phase liquide continue
- **À bulles:** la phase vapeur est distribuée sous forme de bulles discrètes dans une phase liquide continue et les bulles sont plus petites en longueur que le diamètre du tube. Cette configuration de l'écoulement couvre un intervalle très restreint de titre en vapeur.
- **À bulles confinées:** la taille de la bulle atteint le diamètre du tube et elle est confinée par la paroi du tube. Les bulles ont une interface vapeur-liquide régulière et une forme sphérique.

## 3.2 Cas de l'ébullition du l'eau

### 3.2.1 Configuration de l'écoulement

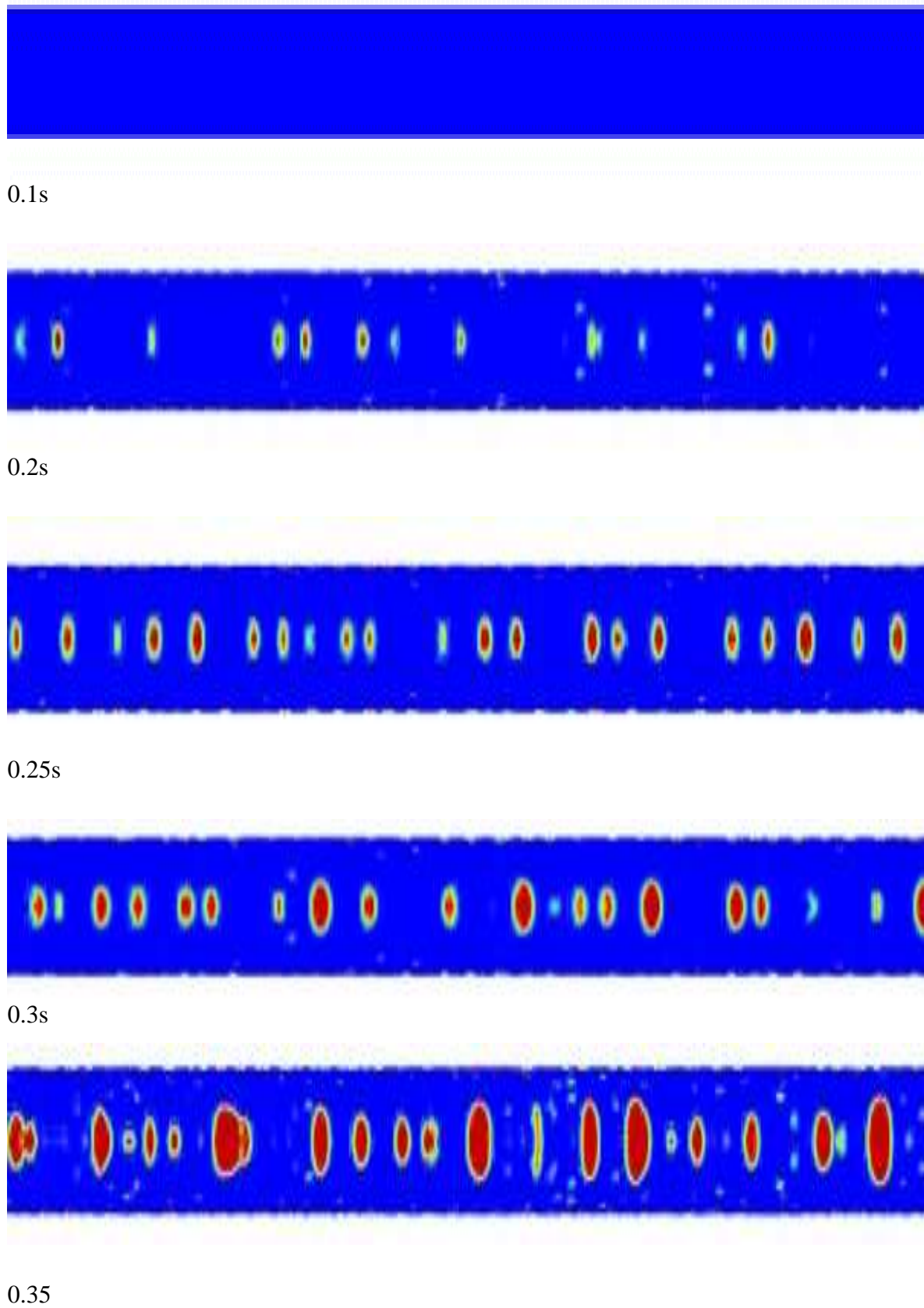
Montre l'évolution de la fraction de vide durant le processus de l'ébullition

- ❖ **t=0.2 s :** Tant que la température de la paroi est inférieure à un certain seuil, il s'agit d'un écoulement monophasique liquide dont le transfert de chaleur avec la paroi est appelé convection monophasique liquide.
- ❖ **0.3 ≤ t < 0.4 s :** La température de la paroi devient suffisante pour déclencher la nucléation. A ce moment débute l'ébullition nucléée sous-saturée associée à un changement de configuration de l'écoulement avec l'apparition de l'écoulement à bulles (bulles attachées à la paroi dans un premier temps). La température du liquide à la paroi est alors supérieure de quelques degrés à la température de saturation tandis que la température du liquide au cœur de l'écoulement tend vers la température de saturation.
- ❖ **0.4 ≤ t < 0.44 s :** L'augmentation du titre conduit à de nouveaux changements de configuration avec l'apparition de l'écoulement à poches. Le transfert de chaleur par ébullition nucléée
  - La couleur bleu c'est l'eau
  - La couleur rouge c'est la vapeur



**Figure 3.1** : Evolution de l'ébullition cas de la conduite verticale en fonction de temps

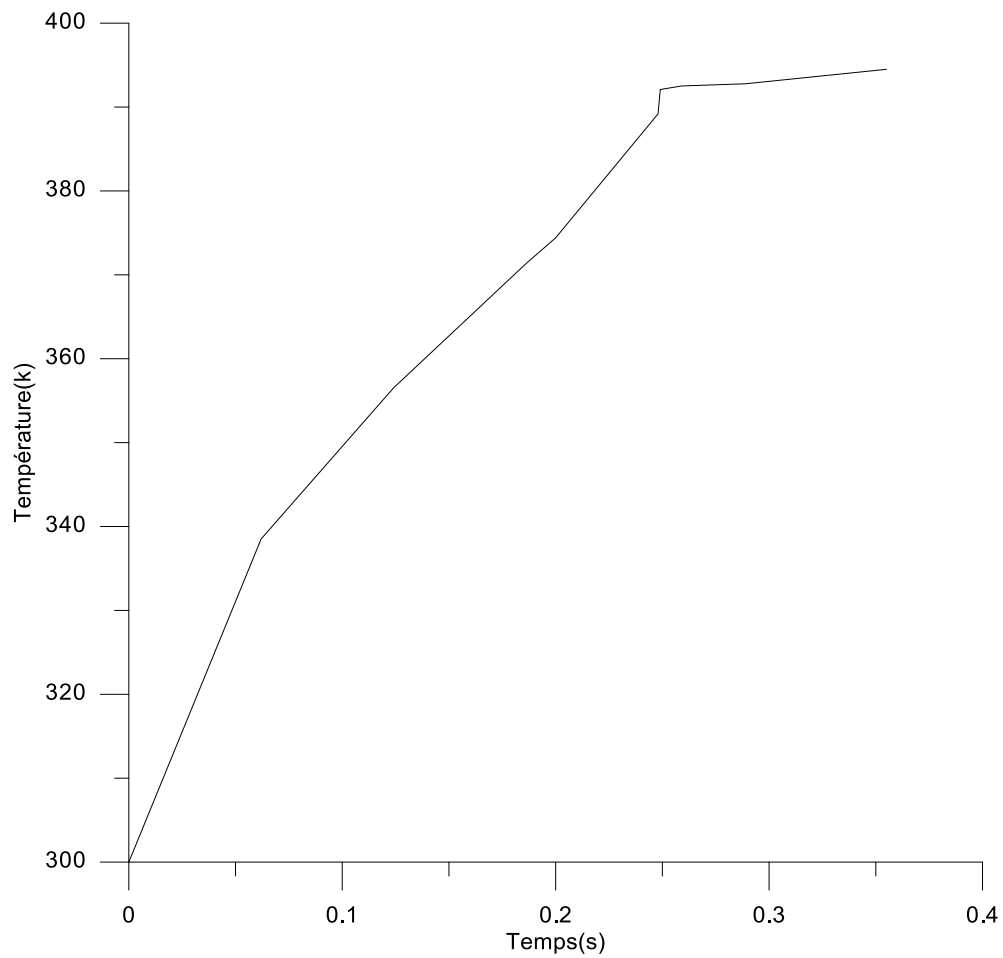




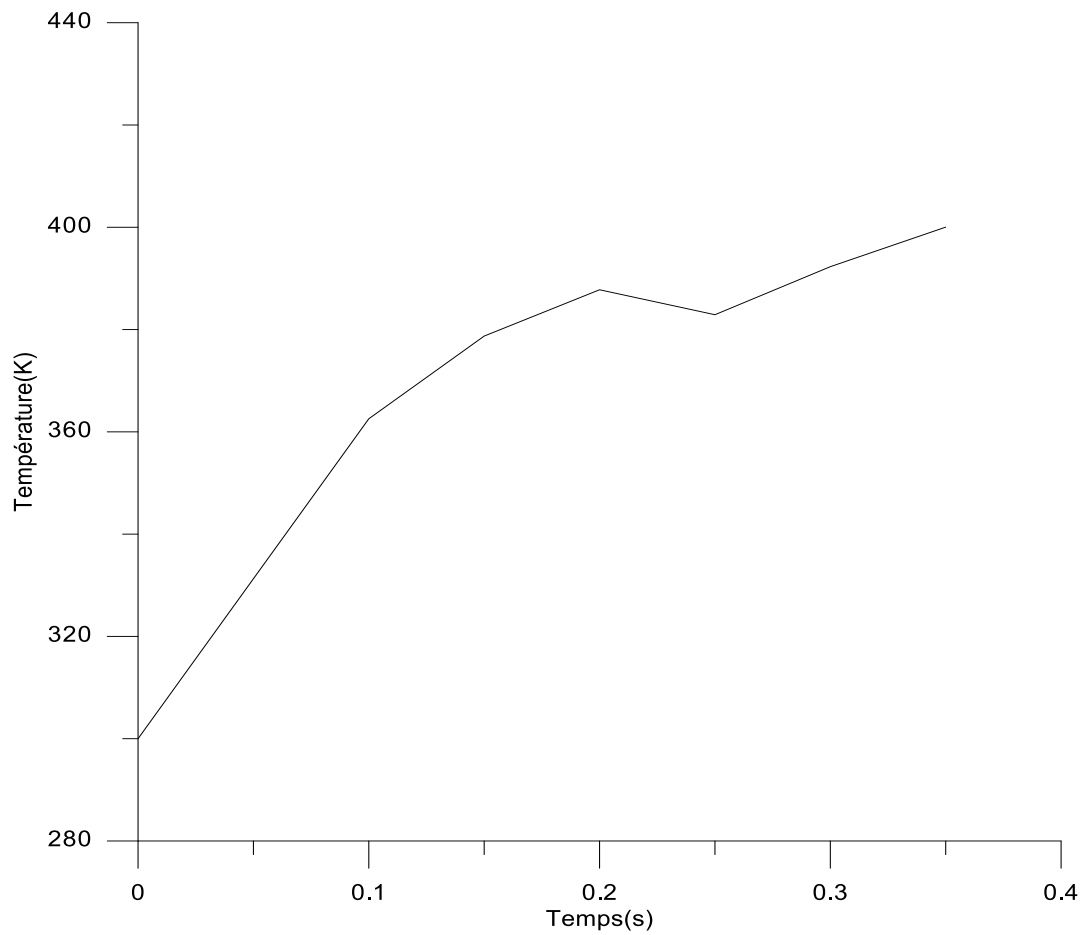
**Figure 3.2** : évolution de l'ébullition cas de la conduite horizontale

- ❖  $t=0.1$  s : il s'agit écoulement monophasique liquide dont le transfert de chaleur avec la paroi est appelé convection monophasique liquide.
- ❖  $t=0.2$  s : changement de la configuration et l'apparition des bulls
- ❖  $t > 0.2$  s : L'augmentation progressive du diamètre des bulle

### 3.2.2 Variation de la température



**Conduite verticale**

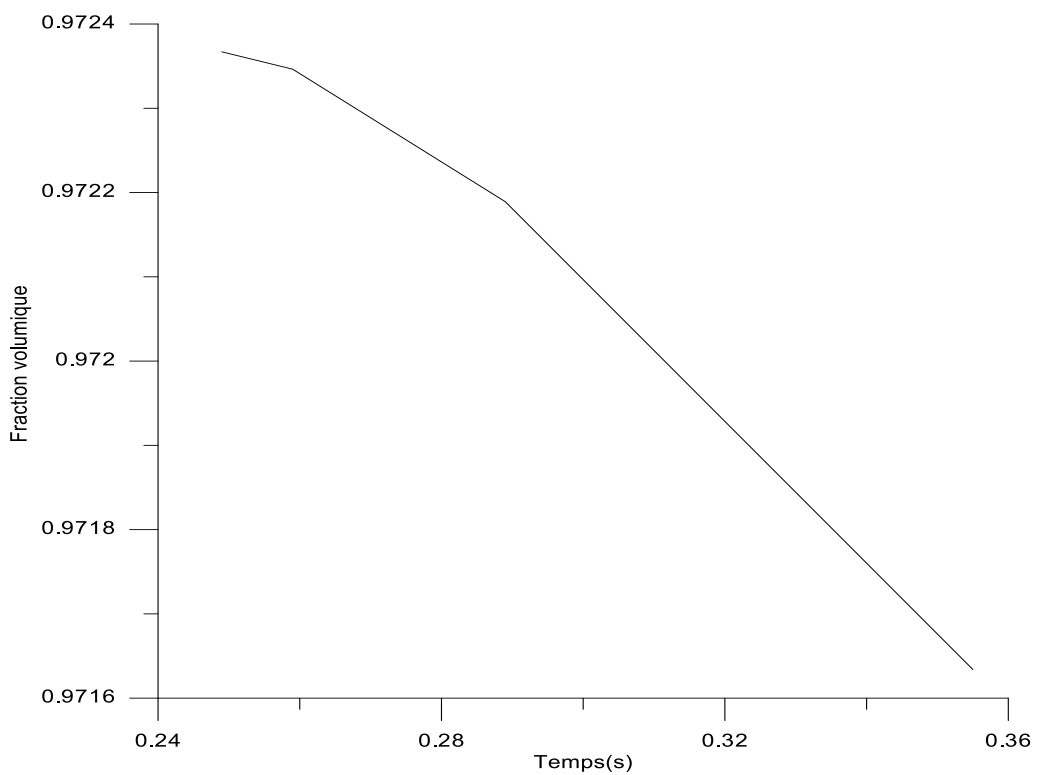


### Conduite horizontale

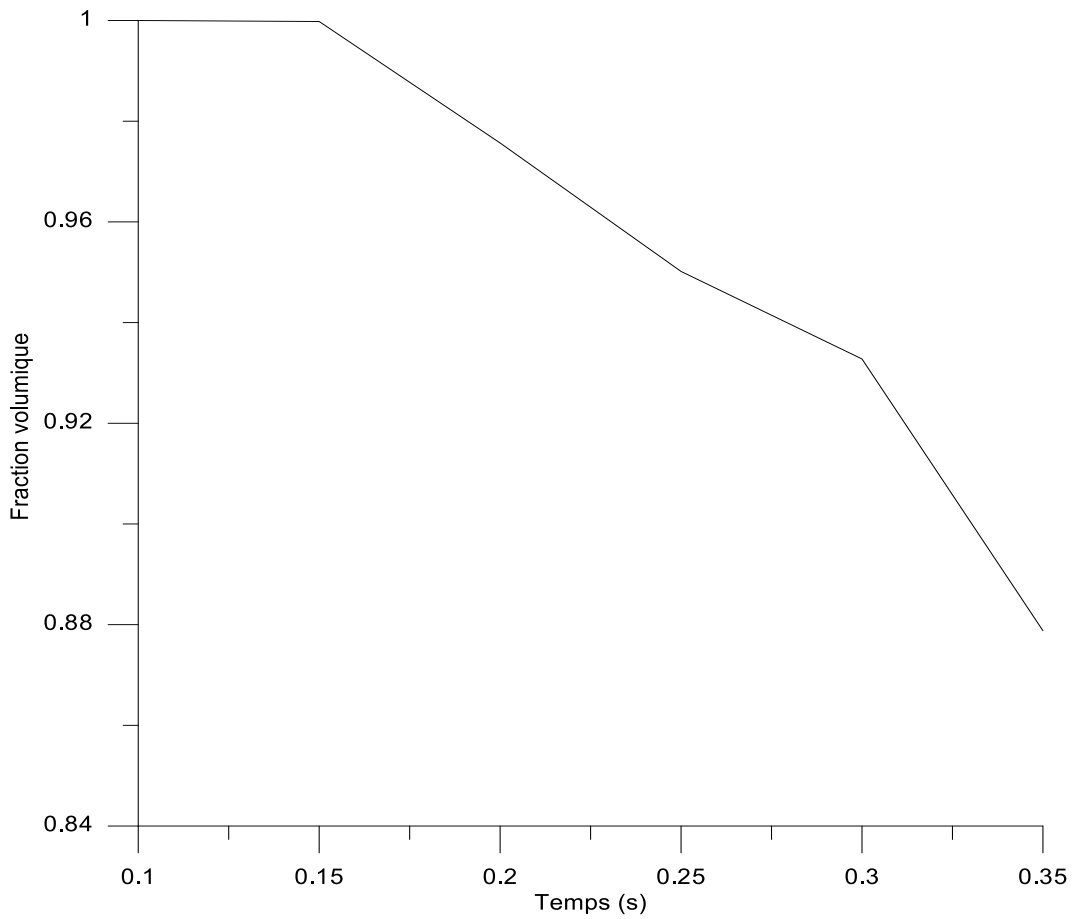
**Figure 3.3 :** Variation de la température statique à la paroi du mélange à la paroi en fonction du temps

L'évolution de la température de la paroi en fonction du temps peut être déterminé les échanges thermiques entre le liquide et la paroi, lorsque le fluide s'écoule dans la conduite, il est chauffé par un flux uniforme. Ce chauffage augmente la température du fluide qui a son tour échange de la chaleur avec la paroi de la conduite. La température de la paroi augmente en réponse à cet échange de chaleur.

### 3.2.3 Evolution de la fraction volumique du l'eau



#### Conduite verticale

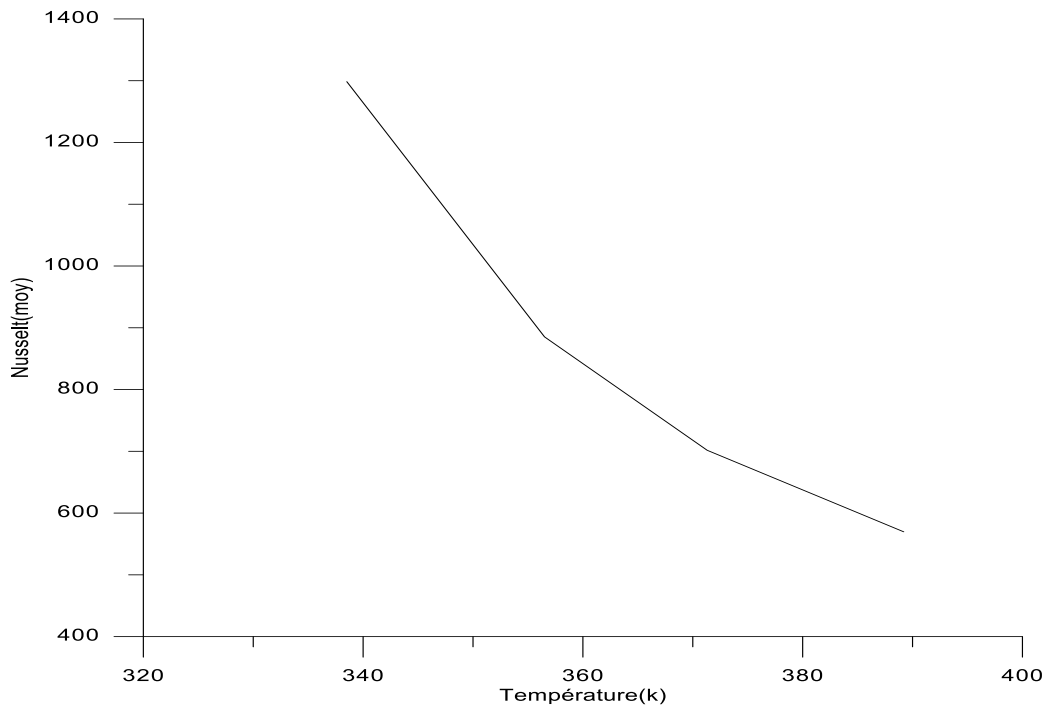


### Conduite horizontale

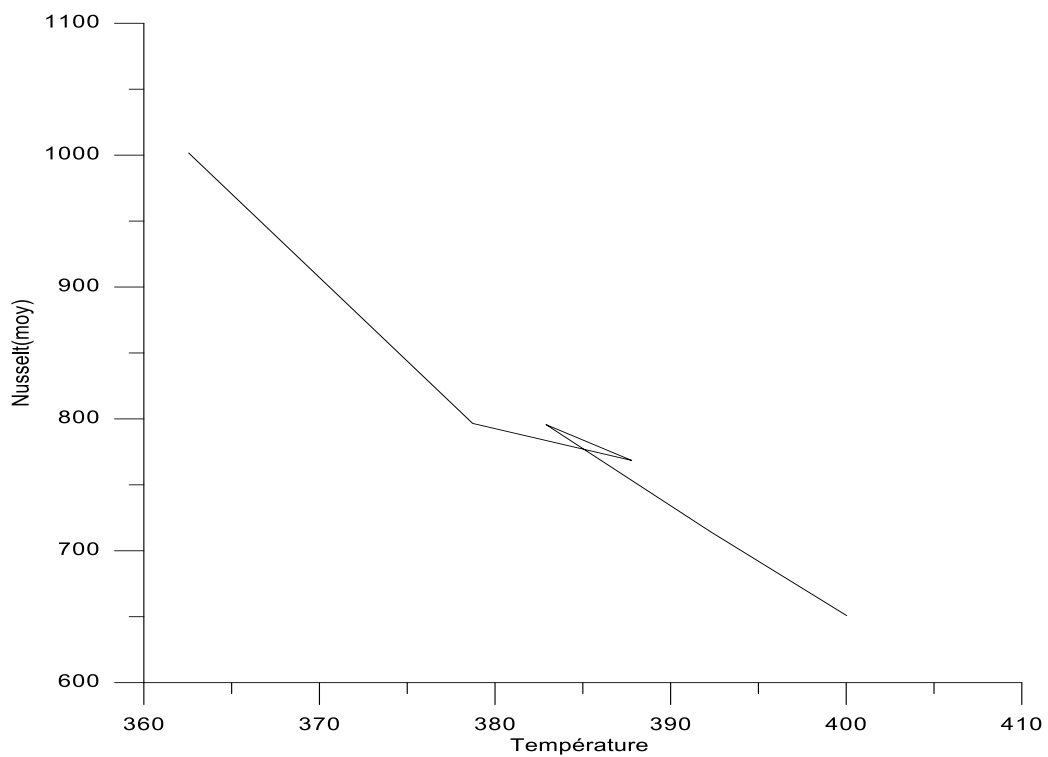
**Figure 3.4 :** Variation de la fraction volumique en fonction de temps

La décroissance de la fraction volumique du liquide est due à l'évaporation partielle du liquide, ou certaines molécules de liquide se vaporisent et passent à l'état de vapeur. Cela se produit en raison de l'apport de chaleur à travers le flux de chaleur appliqué à la conduite.

### 3.2.4 Nombre de Nusselt



#### Conduite verticale

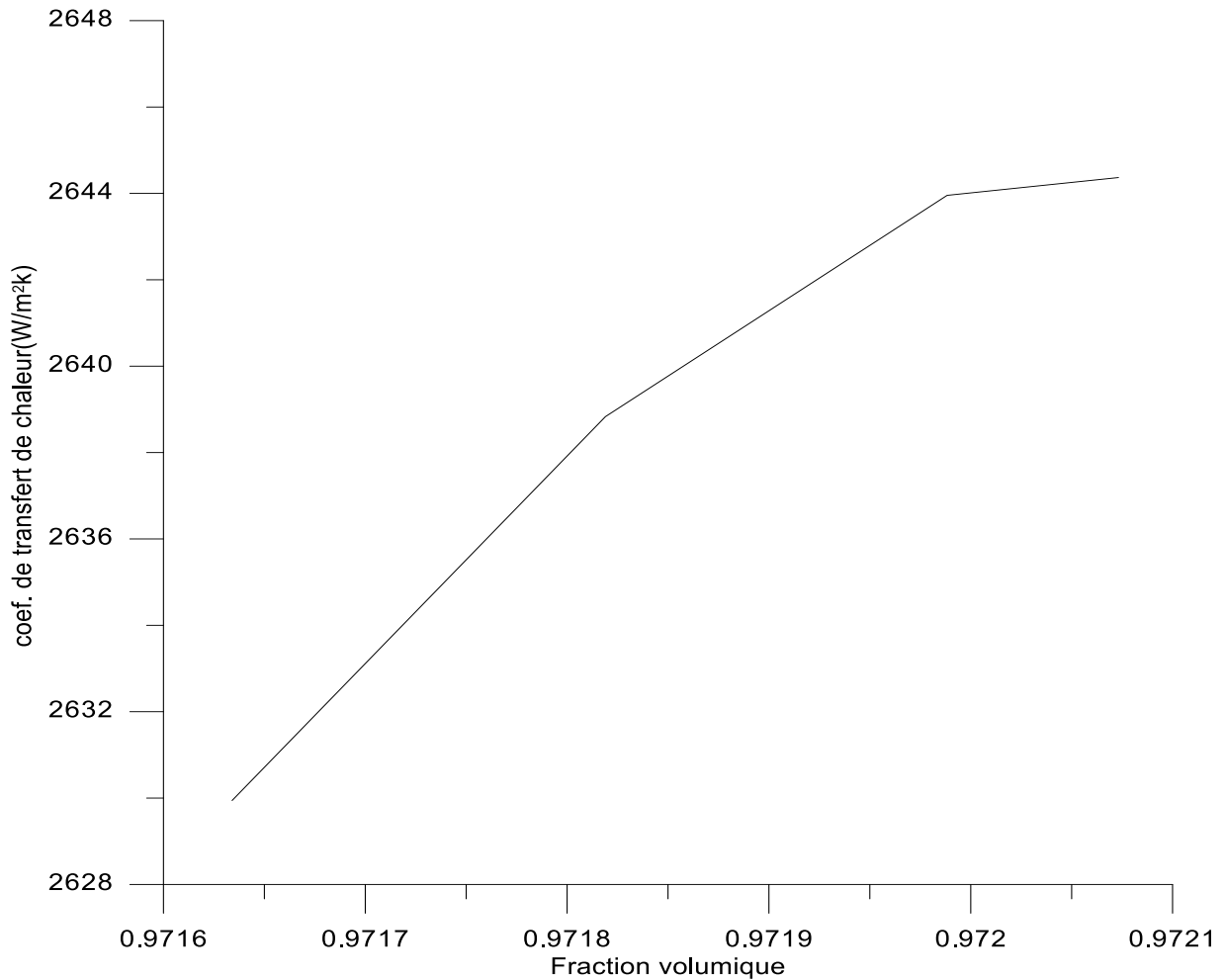


#### Conduite horizontale

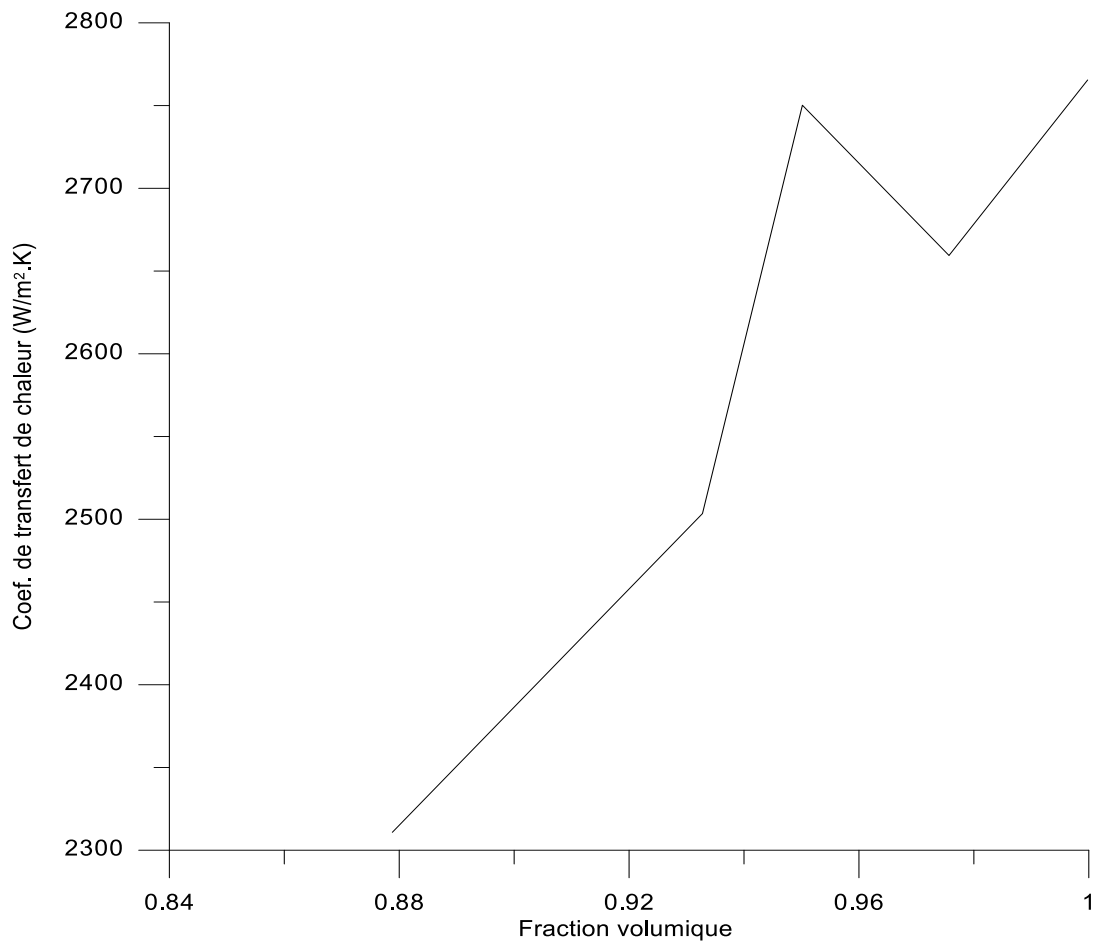
**Figure 3.5 :** Variation du nombre de Nusselt moyen en fonction de la température moyenne

Lorsque le gradient de température entre la paroi et le fluide, provoque une diminution du transfert de chaleur par convection ce qui entraine une diminution du nombre de Nusselt.

### 3.2.5 Coefficient de convection à la paroi



#### Conduite verticale

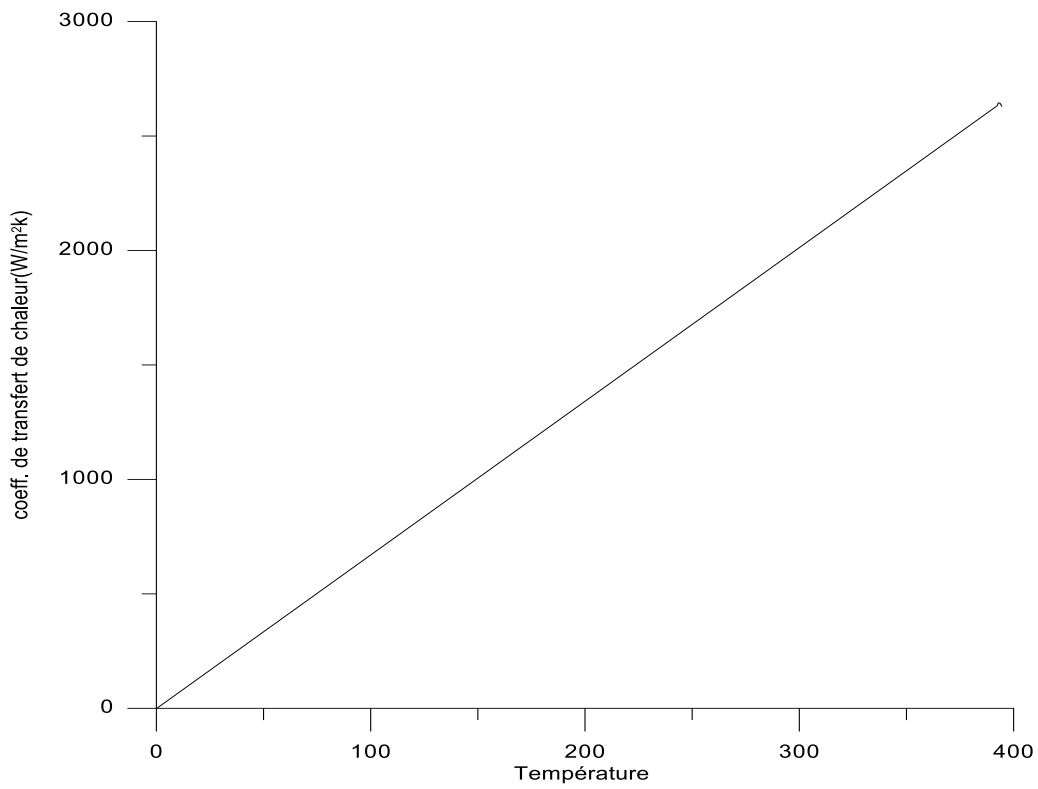


### Conduite horizontale

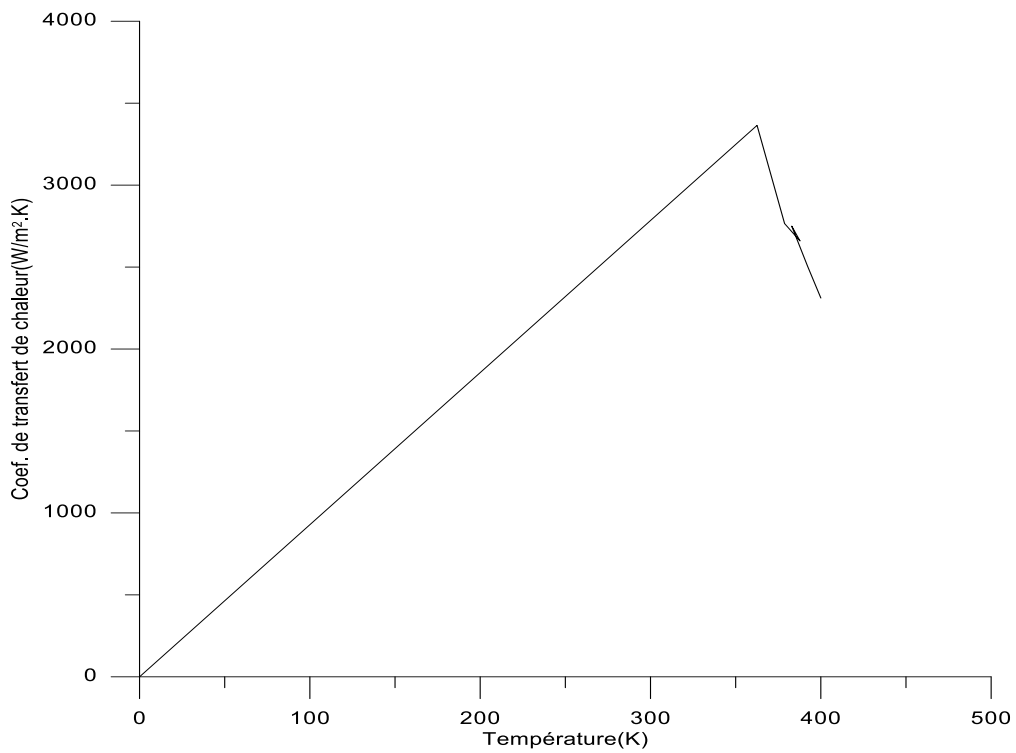
**Figure 3.6** : Evolution du coefficient du transfert de chaleur en fonction de la fraction volumique

La variation du coefficient d'échange de chaleur en fonction de la fraction volumique est dû à la présence du liquide améliore la convection et favorise les échanges de chaleur avec la surface ce qui entraîne une augmentation du coefficient d'échange de chaleur et c'est le cas la diminution de la fraction volumique du liquide ce qui diminue la convection et diminue le coefficient d'échange de chaleur.





**Conduite verticale**



**Conduite horizontale**

**Figure 3.7 :** Evolution du coefficient du transfert de chaleur en fonction de la température

Lorsque le fluide s'écoule dans la conduite et est chauffé par un flux de chaleur uniforme, la température de la paroi peut avoir un impact significatif sur le coefficient d'échange de chaleur. L'augmentation de la température statique à la paroi peut entraîner une augmentation du gradient de température entre le fluide et la paroi, ce qui favorise les échanges de chaleur par convection.

### 3.3 Cas de l'ébullition du R-1270 (propylène) dans une conduite verticale

Le propylène est un hydrocarbure destiné aux applications de réfrigération industrielle et de climatisation à basse et moyenne température.

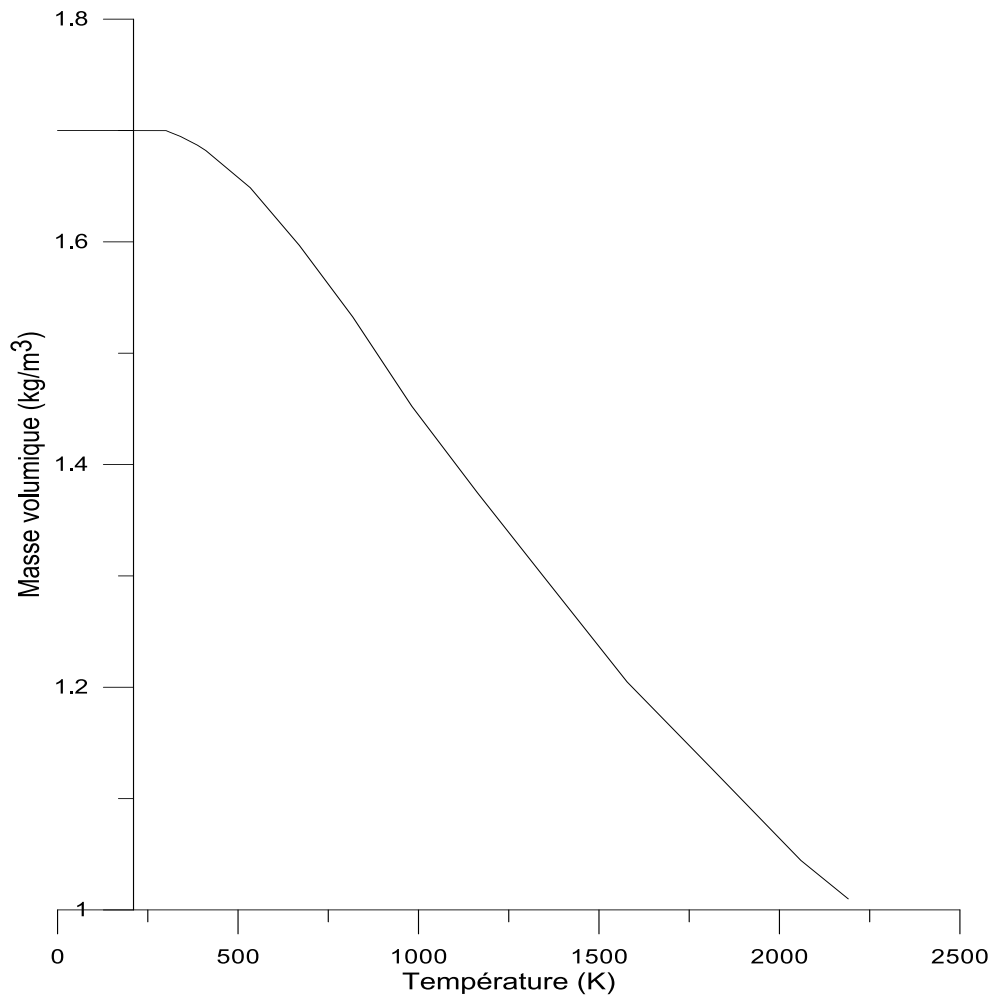
#### ➤ Propriété physique

- Formule :  $C_3H_6$
- Masse volumique :  $1.74 \text{ kg/m}^3$
- Masse molaire :  $42,081 \text{ g/mol}$
- Point d'ébullition :  $-47,6 \text{ }^\circ\text{C}$

L'objectif de cette partie c'est de montrer l'influence les différences de masses volumiques des fluides à des faibles écarts sur la configuration de l'écoulement et le comportement des bulles. Comparant les résultats obtenus avec l'eau.

#### 3.3.1 L'influence de la température sur la masse volumique

Comme la montre la figure la masse volumique dépend de la température. Avec l'augmentation de la température la masse volumique diminue.

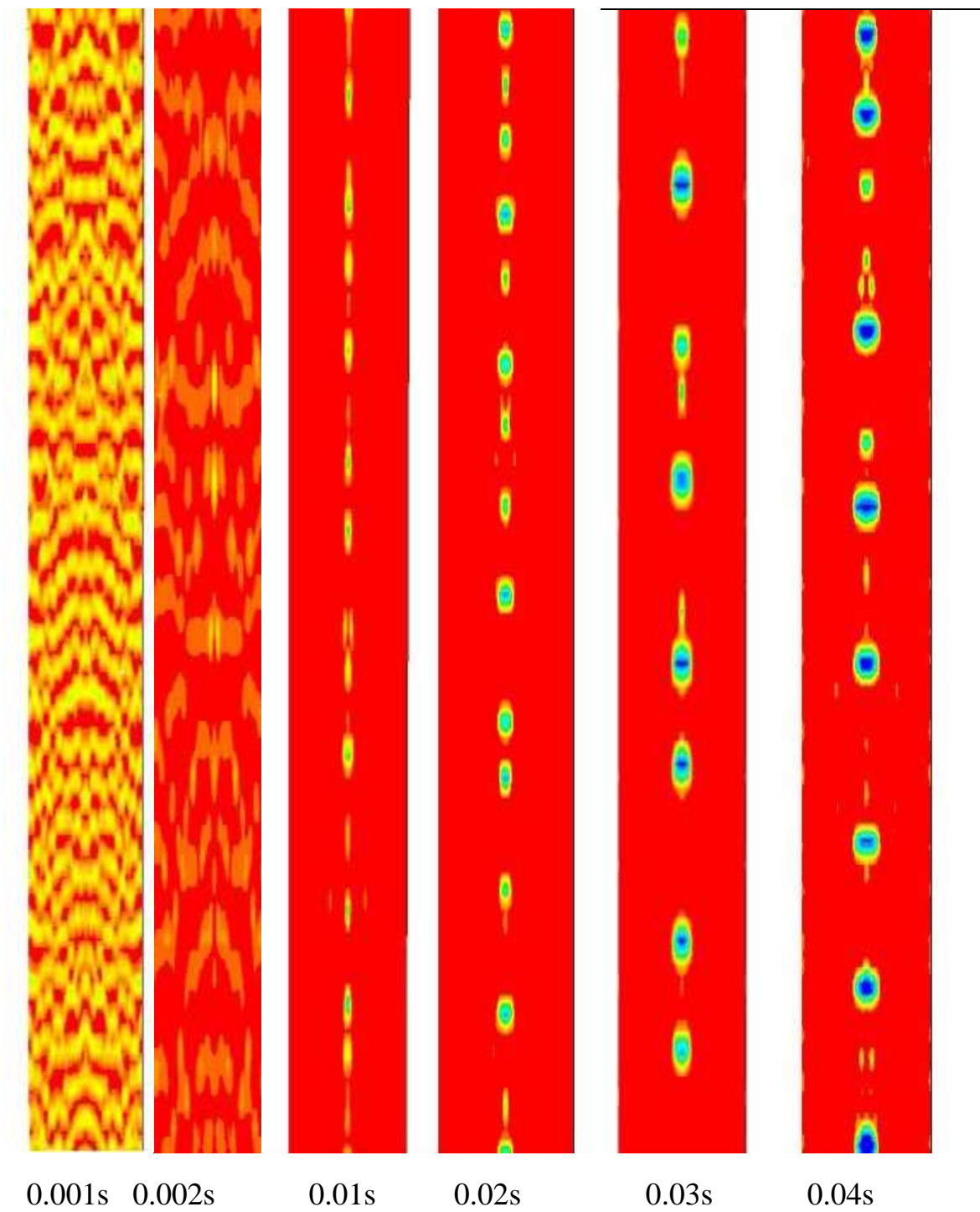


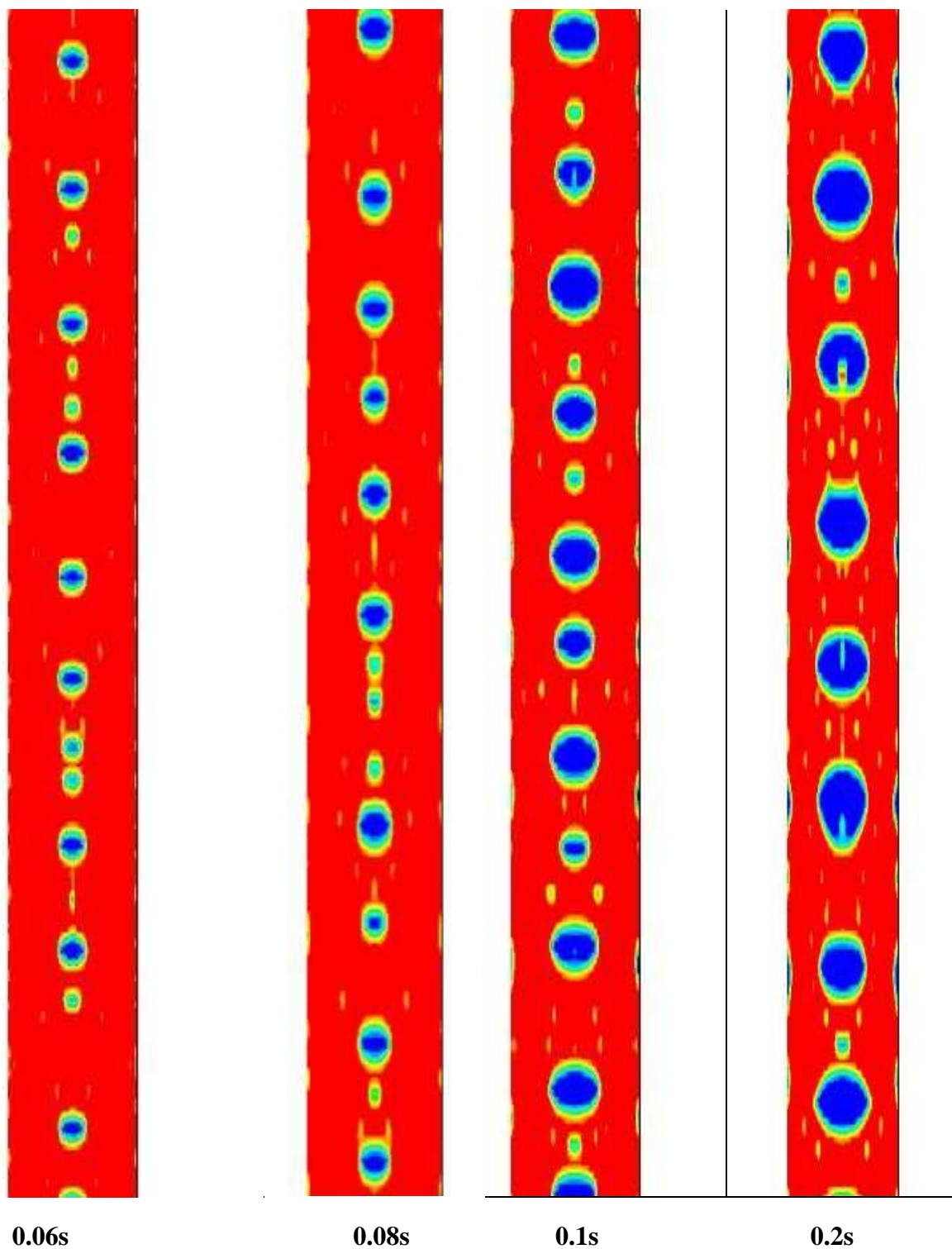
**Figure 3.8 :** évolution de la masse volumique en fonction de la température

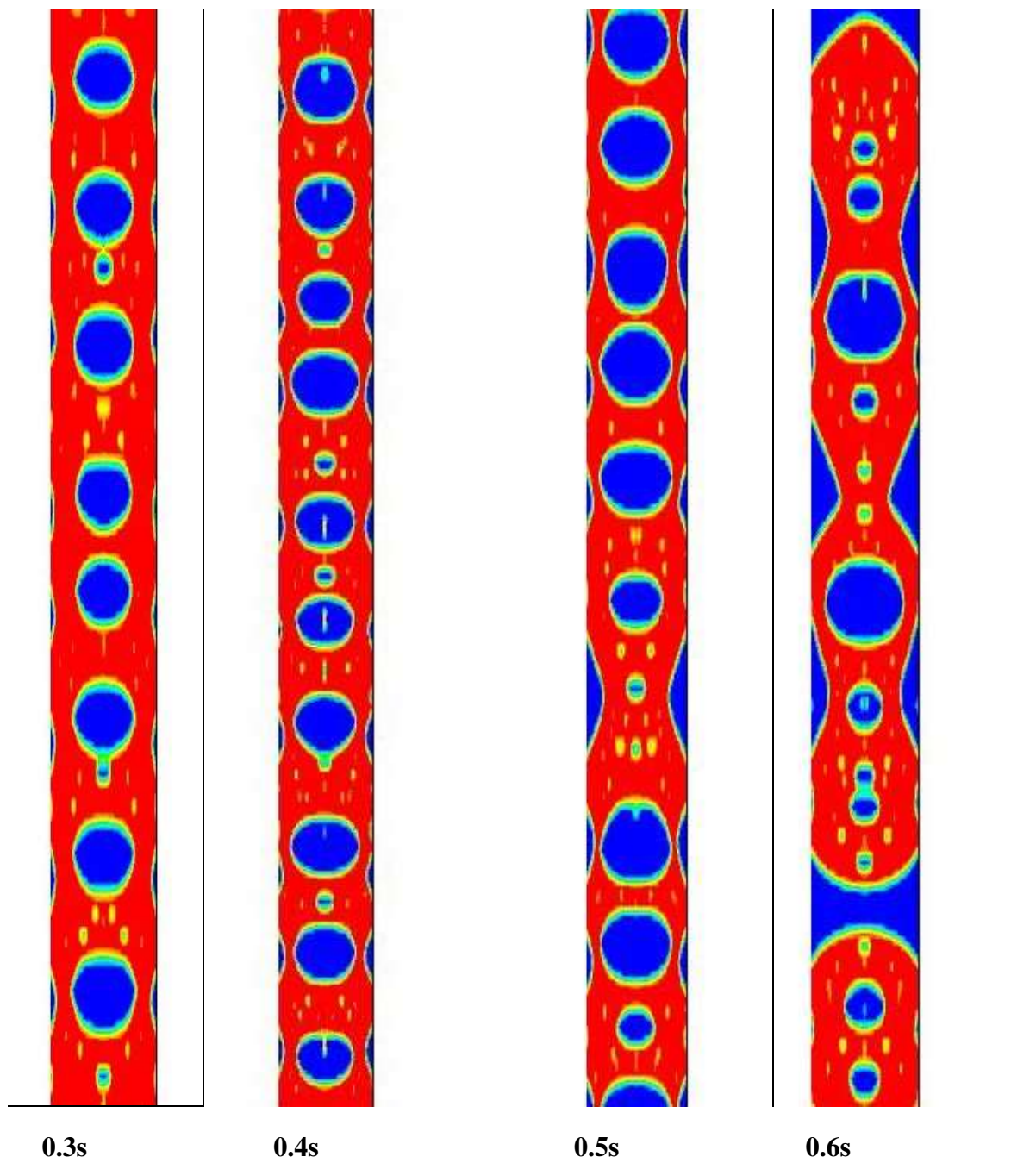
### 3.3.2 Configuration de l'écoulement

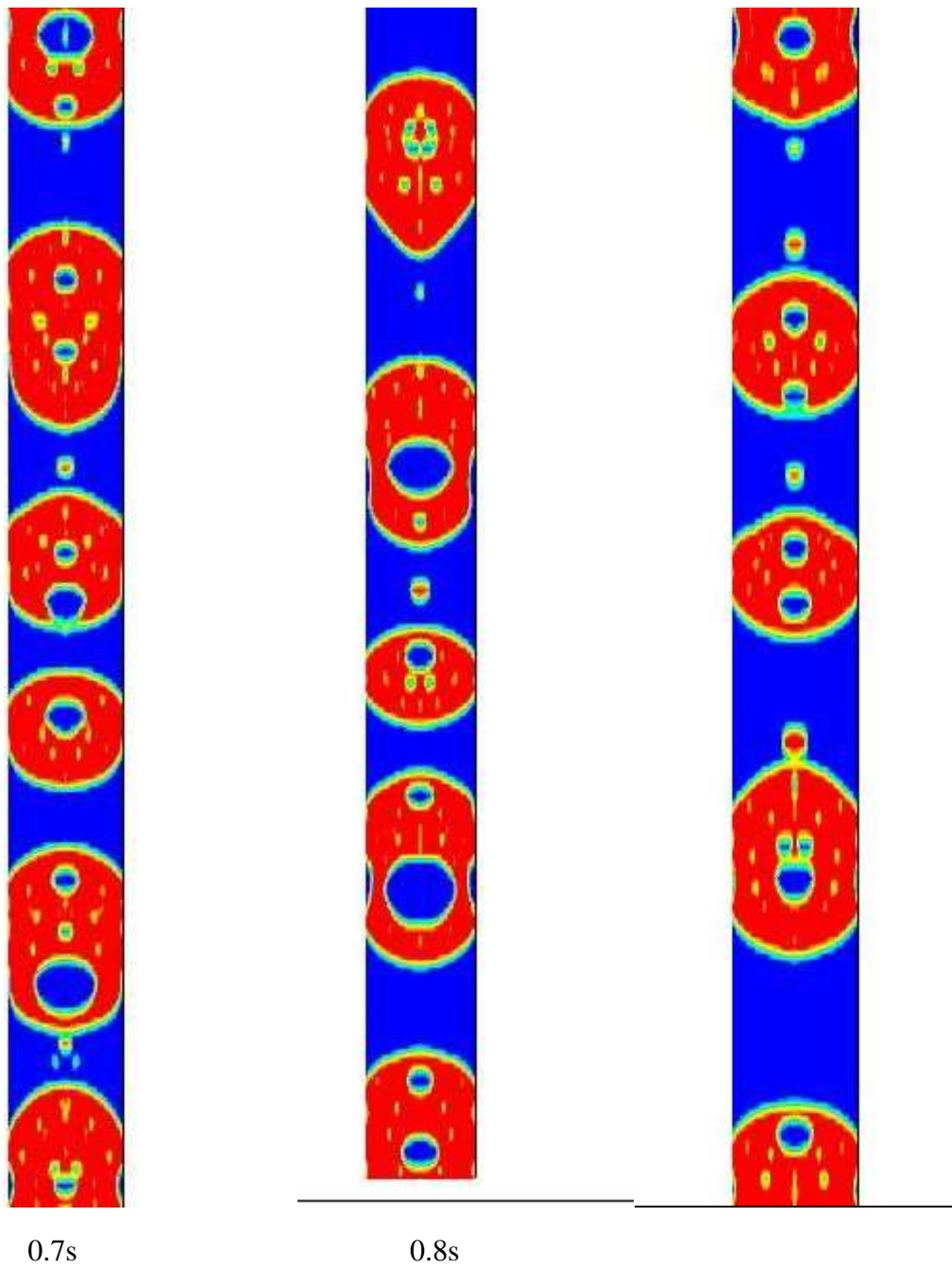
La configuration de l'écoulement change avec le temps cela est dû au fluide qui est suffisamment chauffé pour avoir un changement de phase de la phase liquide vers la phase vapeur a des instants très petit. L'augmentation de la température a causé la diminution de la masse volumique du liquide, au fur à mesure elle se rapproche à celle de la vapeur.

On a aussi la masse volumique du R-1270 qui est déjà proche de celle de la vapeur, avec la température qui augmente on voit le fluide s'écoule sous forme de grande poches et le régime intermittent apparait rapidement si on compare ces résultats aux résultats obtenu avec l'eau.









**Figure 3.9** : configurations de l'écoulement du propylène

## Conclusion est perspective

A travers cette étude les principales observations et conclusion son :

L'apparition des bulles : Dans une conduite horizontale, l'apparition des bulles est généralement plus fréquente et rapide en raison de l'absence de la gravité qui favorise la formation de poches de gaz ascendantes. En revanche, dans une conduite verticale, l'apparition des bulles peut être atténuée en raison de force gravitationnelle significative pour favoriser leur ascension. Cependant, d'autres facteurs tels que la vitesse du fluide et le gradient de température peuvent également influencer la formation des bulles.

Variation du coefficient d'échange de chaleur : La variation du coefficient d'échange de chaleur en fonction de la fraction volumique du liquide dépendra des propriétés spécifiques du fluide, des conditions d'écoulement et de la géométrie de la conduite. Des études expérimentales ou des simulations numériques seront nécessaires pour établir des relations quantitatives entre ces variables.

Décroissance du nombre de Nusselt : La décroissance du nombre de Nusselt en fonction de la température moyenne à la paroi peut être attribuée à plusieurs facteurs, tels que la réduction de la convection thermique due à une meilleure conductivité thermique de la paroi, la diminution des gradients de température entre la paroi et le fluide, et l'augmentation de la conduction thermique à travers la paroi

Finalement on a testé le propylène qui a une masse volumique de  $1.74 \text{ kg/m}^3$  pour pouvoir déduire l'influence de la différence des masses volumiques sur l'apparition du régime. Lorsque l'écart des masses volumique des fluides est faible, et change de phase plus rapidement et s'écoule sous forme de poches et de bouchons.

En résumé, la configuration de la conduite (verticale ou horizontale) et les conditions d'écoulement (vitesse d'entrée fixe, flux de chaleur uniforme) exercent des influences significatives sur les phénomènes observés tels que l'apparition des bulles et le comportement du transfert de chaleur. Il est essentiel de considérer ces aspects pour une analyse plus approfondie et une conception efficace des systèmes de conduites.



## Références bibliographiques

- [1] **Hani Narimane, Merabetene mounia**, « Etude d'un écoulement diphasique stratifié à vage liquide-gaz dans un canal horizontal », Université Bejaia, 2020.
- [2] **Hewitt G.F. and al.** Multiphase science and technology, volume 8, two phase Flow Fundamentals, Begell House Inc, 1994.
- [3] **Merrouche Djemai**, « Simulation Numérique de l'écoulement Gaz-Liquide Ascendant à poches dans une Conduite Verticale », diplôme Magister, Université M'Hamed Bouguerra, Boumerdes, 2003.
- [4] **Bouarab Samir**, « simulation numérique des écoulements diphasiques à l'aide de schémas hybrides de capture et de suivi d'interface », mémoire magister université M'Hmed bougarra Boumerdes, 2001.
- [5] **Erich Zacharian**. Modélisation et Analyse des Instabilités d'Écoulements Diphasiques dans les Conduites pétrolières du Type Pipeline-Riser. Systèmes dynamiques [math.DS]. Université Paris 13, 2000
- [6] **GHALEM Abdelkader**. « Simulation numérique d'un canal bouillant sous conditions normales et transitoires ». Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2010.
- [7] **Julien Rajomalahy and Laivola Andriana**. « Simulation numérique de la vaporisation de l'eau dans une conduite verticale : cas de l'écoulement de fluide géothermique », Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, Petroleum Engineering Department. 2021.
- [8] **Nysanov, E. A., Zh S. Kemelbekova, O. M. Ibragimov, A. E. Kozhabekova et M. Osman**. « CALCULATION OF TWO-SPEED FLOW OF TWO-PHASE OPEN FLOW ». NEWS of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan 6, no 444 (15 décembre 2020).
- [9] **Fabien Raoult**. « Modélisation d'un écoulement diphasique évaporatif le long d'une paroi chauffée. Génie des procédés ». Sorbonne Université, 2019. Français.

- [10] **Aghaee, Mohammad, Rouhollah Ganjiazad, Ramin Roshandel et Mohammad Ali Ashjari.** « Two-phase flow separation in axial free vortex flow ». *Journal of Computational Multiphase Flows* 9, no 3 (24 juillet 2017).
- [11] **Davy Khaophone.** « Etude expérimentale et numérique des phénomènes de condensation dans un tube vertical partiellement immergé. Plasmas ». Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2016. Français.
- [12] **Hongjie Song, Wei Zhang\*, Yaqi Li, Zhengwei Yang and Anbo Ming.** « Simulation of the Vapor-Liquid Two-Phase Flow of Evaporation and Condensation ». Xi'an Research Institute of Hi-Tech, Xi'an, Shaanxi 710025, China. 2016
- [13] **Rémi Dinsenmeyer.** « Étude des écoulements avec changement de phase : application à l'évaporation directe dans les centrales solaires à concentration. Génie des procédés » Université Grenoble Alpes, 2015.
- [14] **Brahim Mohamedi,1, 2, y Salah Hanini,2 Abdelrahmane Ararem,1 and Nacim Mellel1.** « Simulation of nucleate boiling under ANSYS-FLUENT code by using RPI model coupling with artificial neural networks », Birine Nuclear Research Center B.P.180, Ain Oussera 17200, Algérie.2015.
- [15] **Hassan Abdulmouti,** « Bubbly Two-Phase Flow: Part I- Characteristics, Structures, Behaviors and Flow Patterns ». Mechanical Engineering Program, College of Engineering, University of Sharjah. *American Journal of Fluid Dynamics* 2014, 4(4) : 194-240.
- [16] **Guillaume Prigent,** « Modélisation et simulation numérique d'écoulements diphasiques pour la microfluidique », Université Paris Sud - Paris XI, 2013. Français.
- [17] **D. Simón, M. C. Paz, A. Eirís & E. Suárez.** « Eulerian model for the prediction of nucleate boiling of refrigerant in heat exchangers ». E.T.S. Ingenieros Industriales, University of Vigo, Spain.2010

[18] **L. Vyskocil, J. Macek**, « BOILING FLOW SIMULATION IN NEPTUNE\_CFD AND FLUENT CODE », Nuclear Research Institute Rez (NRI), Dept. of Thermal Hydraulic Analyses, 250 68 Rez, Czech Republic.2010.

[19] **Gloria Faccanoni** « Étude d'un modèle fin de changement de phase liquide vapeur.Contribution à l'étude de la crise d'ébullition.. Modélisation et simulation », Ecole Polytechnique X, 2008. Français.

[20] **Dillon, Chad Michael**. « Two-Phase Flow Within Narrow Annuli », Thesis, Georgia Institute of Technology, 2004.

[21] **Robert ROUMY**. « Structure des écoulements diphasiques eau-air. Etude de la fraction de vide moyenne et des configurations des écoulements. Centre d'Etudes Nucléaires de Grenobl »,1969.