

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie  
Département Génie Mécanique

## Mémoire de fin d'étude

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

**Filière : Génie Mécanique**  
**Spécialité : Energétique**

### **THEME**

**Simulation numérique d'un nanofluide en jet laminaire sur  
une paroi chauffée**

Réalisé par :  
**BARAKA Achour**

Promoteur :  
**Pr. MANSOURI Kacem**

Co Promoteur :  
**Dr. LAMROUI Hanan**

**Promotion 2019- 2020**

# Résumé

Les techniques d'amélioration du transfert de chaleur jouent un rôle important dans les domaines de la recherche et de l'industrie ; ainsi, ils ont été largement appliqués à de nombreuses applications telles que la réfrigération, l'automobile, l'aérospatiale et l'industrie des procédés. Par exemple, le transfert de chaleur peut être passivement amélioré en augmentant la conductivité thermique des fluides de travail, en adoptant des nanofluides ou en utilisant activement des jets percutants.

Dans ce mémoire, nous avons mené une étude numérique d'un nanofluide ( $Al_2O_3$ ) en jet laminaire sur une plaque chauffée. Cette étude a été menée en considérant le nanofluide comme Newtonien pour une large gamme de fraction volumique solide ( $0 \leq \varphi \leq 5\%$ ) et le nombre de Reynolds comprise entre 50 à 250.

Une approche fluide monophasique a été utilisée pour modéliser le nanofluide avec des propriétés thermo physiques constantes. Les équations gouvernantes ont été résolues par la méthode des volumes finis en utilisant le code de calcul FLUENT.

**Mots clés : fluide newtonien, transfert de chaleur, nanofluide, régime laminaire, volumes finis**

# Abstract

Heat transfer enhancement technologies play an important role in research and industrial fields; thus, they have been widely applied to many applications as in refrigeration, automotive, aerospace, and process industry. For example, heat transfer can be passively enhanced by increasing the thermal conductivity of the working fluids, adopting nanofluids, or actively by employing impinging jets.

In this thesis, we conducted a numerical study of a nanofluid ( $Al_2O_3$ ) in a laminar jet. This study was carried out considering the nanofluid as Newtonian for a wide range of solid volume fraction ( $0 \leq \varphi \leq 5\%$ ) and the Reynolds number between 50 to 250.

A monophasic fluid approach was used to model the nanofluid with constant thermophysical properties. The governing equations were solved by the finite volume method using the FLUENT calculation code.

**Keywords: Newtonian fluid, heat transfer, nanofluid, laminar regime, finite volumes**

## ملخص

تلعب تقنيات تعزيز نقل الحرارة دورًا مهمًا في مجالات البحث والصناعة؛ وبالتالي، فقد تم تطبيقها على نطاق واسع في العديد من التطبيقات مثل التبريد، والسيارات، والفضاء، وصناعة العمليات. على سبيل المثال، يمكن تعزيز نقل الحرارة بشكل سلبي عن طريق زيادة التوصيل الحراري لسوائل العمل، أو اعتماد السوائل النانوية، أو بشكل نشط عن طريق استخدام نفائات تصادم.

في طائرة نفائة. أجريت هذه الدراسة مع الأخذ في  $(Al_2O_3)$  في هذه الرسالة، أجرينا دراسة عددية للسائل النانوي. الاعتبار أن نانوفلويد هو نيوتوني لمجموعة واسعة من الكسور الصلبة (0-5%) وعدد رينولدز بين 50 إلى 250. تم استخدام نهج السائل أحادي الطور لنمذجة الموائع النانوية بخصائص ثابتة. تم حل المعادلات الحاكمة بواسطة طريقة الحجم المحدود باستخدام كود حساب FLUENT.

الكلمات المفتاحية: السائل النيوتوني، انتقال الحرارة نانوفلويد، النظام الرقائقي، الأحجام المحدودة

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail à mes très chers Parents, pour leur soutien  
et tous les efforts qui ont fournis tout au long de mon parcours  
et je leur souhaite bonne santé et longue vie.*

*A ma famille, mes frères et mes sœurs, et tout  
particulièrement à Sylia sans elle je ne serai pas  
là aujourd'hui.*

*A Mes très chers Amis : Moussa, Khaled, et à  
Meriem qui ont été là pour moi.*

*Je vous dédie ce modeste travail qu'il soit  
l'accomplissement de vos vœux le fruit de votre  
soutien infaillible*

# *Remerciements*

*Je tiens à remercier tout particulièrement Mon Promoteur Pr  
MANSOURI Kacem et Co promoteur LAMRAOUI Hanan ,  
non seulement pour la qualité de son encadrement mais aussi  
pour sa disponibilité. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon  
gratitude la plus sincère.*

*Mes remerciements s'adressent aux membres du Jury pour  
avoir accepté de lire et critiquer ce mémoire.*

*Je remercie également les enseignants de la formation Génie  
Mécanique pour tout le savoir qu'ils ont su nous transmettre  
durant ces années, et en particulier toutes les personnes qui  
ont su nous orientés et guidés tout au long de mon cursus.*

# TABLE DES MATIERES

<b>Table des figures</b> .....	i
<b>Table des tableaux</b> .....	iii
<b>Nomenclature</b> .....	iv
<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I – Généralité sur les nanofluides</b>	
I.1. Introduction.....	2
I.2. Définition d'un nanofluide :.....	2
I.3 les taille des nanoparticules .....	2
I.4. Les etudes effectuees sur les nanofluides .....	4
I.5. les nanoparticules et les fluides porteurs .....	5
I.5.1. Les nanoparticules metalliques.....	5
I.5.2. Les nanoparticules non metalliques. ....	6
I.5.3. Les nanoparticules d'oxyde metallique.....	7
I.5.4. Les nanotubes de carbone (CNT).....	7
I.6. Les nouvelles formes de carbone : .....	8
I.7. Les applications de nanofluides : .....	9
L'industrie : .....	9
Refroidissement Des systemes thermiques : .....	9
Refroidissement des systèmes spatiaux :.....	10
Refroidissement des systèmes- militaires :.....	10
Refroidissement des systemes nucleaires :.....	10
La biomédecine.....	10
D'autres applications .....	11
I.8. Les avantages des nanofluides : .....	11
I.9. les inconvenients des nanofluides .....	11
I.10. Les fluides newtoniens et non-newtoniens .....	12

# TABLE DES MATIERES

I.10.1. Les fluides Newtoniens .....	12
I.10.2. Les fluides non-Newtoniens .....	12
I.11. Convection libre ou naturelle .....	12
I.12. Convection forcee .....	13
I.13. Domaines d'applications.....	13
Conclusion.....	15
<b>Chapitre II – Recherche bibliographique</b>	
II.1. Introduction .....	16
II.2. Jet libre laminaire .....	17
II.3. Jets libres turbulents stationnaires .....	18
II.4. Classification des jets .....	19
Principe .....	20
II.5. Configuration d'un jet impactant.....	21
Région de jet libre .....	21
Région de stagnation (région d'impact).....	21
Région de jet pariétal .....	21
II.6. L'écoulement de stagnation.....	22
II.7. L'nfluence de la vitesse du jet .....	23
II.8. L'nfluence de la geometrie de l'injecteur.....	24
II.9. L'utilisation des nanofluides dans l'amélioration du transfert thermique .....	25
II.9.1. Les effets influent sur les proprietes thermophysiques des nanofluides.....	26
- La concentration volumique des particules .....	26
- L'effet du type du nanoparticule .....	27
- L'effet de la température .....	28
II.10. Applications industrielles.....	29
II.11. Conclusion .....	30

# TABLE DES MATIERES

## Chapitre III – Etude et modélisation d’un jet impactant

III.1. Introduction .....	31
III.2. Description de phynomene physique .....	31
III.3. Proprietés thermophysiques des nanofluides .....	32
III.3.1. La fraction volumique ( $\varphi$ ) .....	32
III.3.2. Masse volumique .....	33
III.3.3 Viscosité dynamique ( $\mu$ ).....	33
- Modèle d'EINSTEIN.....	34
- Modèle de BRINKMAN .....	34
- Modèle de MAIGA .....	34
III.3.4. Chaleur spécifique .....	35
III.3.5. Conductivité thermique .....	35
III.4. Description mathématique et équations gouvernantes .....	36
- Equation de continuité.....	36
- Equation de quantité du mouvement.....	36
- Equation d'énergie .....	37
III.5. Les conditions limites.....	37
III.6. Procédure numérique.....	38
III.7. Présentation de logiciel ANSYS-Fluent.....	38
III.8. Architecture du logiciel.....	39
III.8.1. Méthode des volumes finis .....	40
III.8.2 Description géométrique.....	41
III.8.3. Le maillage .....	41
III.8.4. Implémentation sous fluent .....	42
- Mise en œuvre sous fluent .....	42
III.9. Conclusion.....	42

# TABLE DES MATIERES

## **Chapitre IV – Résultats et discussions**

IV.1. Introduction .....	44
IV.2. Choix de maillage .....	44
IV.3 Interpretation des resultats .....	45
IV.3.1. Effet du nombre de Reynolds .....	46
IV.3.2 Effet du rapport de H/W .....	48
IV.3.3 Effet de la fraction volumetrique des nanoparticules .....	50
IV.3.4. Effet de la fraction volumique sur la puissance de pompage.....	52
IV.3.5. Critère d'évaluation de la puissance.....	53
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>55</b>
<b>Référence bibliographique.....</b>	<b>56</b>

## TABLE DES FIGURES

Figure I.1 Gamme de taille des nanoparticules comparées à celles des principaux organes vivants .....	3
Figure I.2 Représentation graphique d'un nanotube de carbone multifeuillets (MWNT).....	8
Figure I.3 Représentation graphique d'un nanotube de carbone monoparois (SWCNT).....	9
Figure I.4 Principe physique de la convection naturelle .....	13
Figure I.5 Emanation de chaleur sur une puce électronique .....	14
Figure II.1 Représentation schématique de la structure du jet libre.....	18
Figure II. 2 Classification des jets .....	19
Figure II.3 Photographies d'un jet d'air impactant une plaque plane horizontal.....	20
Figure II.4 Structure d'un jet impactant sur une paroi plane. ....	21
Figure II.5 Représentation de stagnation ou point d'arrêt.....	22
Figure II.6 Représentation du champ de la vitesse du fluide sur une paroi .....	23
Figure II.7 Les types d'orifices .....	24
Figure II.8 Effet de la concentration volumique sur la conductivité thermique du nanofluide	27
Figure II.9 Effet des types de particules sur la conductivité thermique des nanofluides .....	28
Figure II.10 Effet de la température sur la conductivité thermique des nanofluides.....	29
Figure III.1 Description schématique d'un jet .....	38
Figure III.2 Interface Logiciel Ansys-Workbench .....	39
Figure III.3 Schéma d'utilisation du logiciel ANSYS-Fluent .....	40
Figure III.4 La géométrie étudiée sur ANSYS-Workbench .....	41
Figure III.5 Exemple de création de maillage .....	42
Figure III.6 Interface de logiciel Fluent .....	43
Figure IV.1 Résultats du test de maillage en fonction du coefficient de transfert de chaleur local sur la paroi isotherme .....	44
Figure IV.2 Variation du nombre de Nusselt local pour $H/W = 2,4$ .....	47
Figure IV.3 Variation l'influence de coefficient convectif en fonction de nombre de Reynolds .....	48
Figure IV.4 Variation l'influence de la hauteur au long de la paroi (isotherme).....	49
Figure IV.5 Variation des résultats numériques de distribution du coefficient de transfert de chaleur pour une plage de Reynolds comprise entre [100-250].....	49
Figure IV.6 Variation de coefficient thermique en fonction de la fraction volumétrique de nanoparticule .....	51
Figure IV.7 Profils de la puissance de pompage requise en fonction de Reynolds .....	52

## TABLE DES FIGURES

Figure IV.8 Rapport de coefficient pompage de plusieurs fractions volumertique au fluide de base (eau pure) .....	53
Figure IV.9 Evaluation du critère de performance en fonction du nombre de Reynolds.....	54

# TABLE DES TABLEAUX

<b>Tableau I.1</b> Les propriétés thermo physiques de différents matériaux.....	4
<b>Tableau III.1</b> Propriété thermo-physiques de l'eau et des particules $Al_2O_3$ à $T=293K$ .....	33
<b>Tableau III.2</b> Propriété thermo-physique de nanofluide $Al_2O_3$ a plusieurs fractions.....	35
<b>Tableau IV.1</b> Résultats du coefficient convectif thermique (Nusselt) au point de stagnation.....	45

# NOMENCLATURE

## SYMBOLES

$Al_2O_3$	Oxyde d'aluminium
$C_p$	Chaleur spécifique [kJ/kg.K]
$h$	Coefficient de transfert convectif [W/(m <sup>2</sup> .K)]
$H$	Hauteur du canal [m]
$K$	Conductivité thermique [W/(m.K)]
$L$	Longueur du canal [m]
$Nu$	Nombre de Nusselt
$T$	Température [K]
$u$	Vitesse dimensionnelle suivant x [m/s]
$VP$	Volume de solide nanoparticule [m <sup>3</sup> ]
$VT$	Volume totale [m <sup>3</sup> ]
$v$	Vitesse dimensionnelle suivant y [m/s]
$W$	Diametre de l'injecteur [m]
$P$	Pression [pas]
$PP$	Puissance de Pompage [W]
$PEC$	Critere d'evaluation de puissance
$x$	Coordonnée axiale [m]
$y$	Coordonnée axiale [m]
$\Delta T$	Difference de Temperature [K]
$\Delta P$	Difference de Pression [Pas]
$Q_v$	Debit volumetrique [m <sup>3</sup> /s]

## SYMBOLES GRECS

$\alpha$	Diffusivité thermique [m <sup>2</sup> /s -1]
$\varphi$	Fractions de volume de nanoparticules
$\mu$	Viscosité dynamique [Pa.s]
$\rho$	Masse volumique [Kg/m <sup>3</sup> ]
$\Phi$	Flux chaleur [W]

## ABBREVIATION

<i>bf</i>	fluide de base
<i>moy</i>	moyene
<i>nf</i>	Nanofluide

# **INTRODUCTION GENERALE**

# INTRODUCTION GENERALE

Les techniques d'amélioration du transfert de chaleur jouent un rôle important dans le domaine de l'industrie ou elles ont été largement adoptées dans plusieurs applications technologiques et industrielles. Le besoin d'améliorer le transfert de chaleur par convection est le but principal de plusieurs recherches. Parmi les méthodes utilisées pour améliorer les échanges thermiques on trouve notamment l'ajout des nanoparticules dans un liquide.

L'utilisation des nanoparticules de haute conductivité thermique (par exemple, le cuivre, l'aluminium, l'argent, etc.) permet d'augmenter la conductivité thermique des fluides de base. Les nanofluides ont attiré l'attention à une nouvelle génération de fluides dans le chauffage de bâtiments, des échangeurs de chaleur ainsi que les applications de refroidissement automobile en raison de leur excellente performance thermique.

Les jets impactants sont largement adoptés dans les séchages thermiques et du refroidissement de certaines pièces électroniques afin d'éviter une surchauffe qui causera des dommages irréversibles dans certains cas. L'étude consiste à simuler un refroidissement d'une paroi chauffée en utilisant les jets impactants et voir l'influence des nanoparticules

Le but de notre travail est d'étudier par simulation numérique le comportement thermique en 2D, d'un écoulement de fluide en régime laminaire. Le présent travail comprend quatre chapitres et une conclusion générale.

**Le premier chapitre** est consacré à une introduction générale sur les nanofluides.

**Dans le deuxième chapitre**, on présente plus en détail la description générale de jet impactant, sa configuration, le transfert de chaleur. Dans un second temps nous présenterons en général le problème physique. Nous avons constaté à travers une analyse des différents travaux antérieurs les différents paramètres influençant sur l'écoulement et le transfert de chaleur à savoir la convection des nanofluides

**Le troisième chapitre** est dédié à la formulation mathématique utilisée à savoir les équations de conservation de masse, de quantité de mouvement, d'énergie ainsi que les différentes étapes suivies sous ANSYS-FLUENT.

**Le quatrième chapitre** est réservé à la présentation des résultats de la simulation numérique avec leurs interprétations.

Finalement, la conclusion générale résume notre travail et les perspectives qui peuvent être dégagées de ce travail.

## **Chapitre I**

# **GENERALITE SUR LES NANOFUIDES**

## I.1. INTRODUCTION

Contrairement aux fluides de refroidissement conventionnels qui sont plus efficaces avec les développements énergétiques dans l'industrie produisant de flux de chaleur. L'idée d'améliorer les propriétés thermophysiques des fluides en introduisant des particules solides à l'échelle nanomètre de très bonnes caractéristiques thermiques est fondamentale au sein d'un fluide de base. Cette nouvelle conception porte le nom de « Nanofluide ». Dont le terme a été introduit par Choi [1] au niveau du laboratoire d'Argonne aux États-Unis d'Amérique en 1995.

## I.2. DÉFINITION D'UN NANOFLUIDE

Les nanofluides sont des solutions colloïdales composées de particules de taille nanométrique (nanoparticules) en suspension dans un liquide qui s'appelle un liquide de base. La liste des nanoparticules [1] utilisées pour obtenir des nanofluides est très large on peut citer notamment:

- L'aluminium, Al et l'oxyde d'aluminium,  $Al_2O_3$  ;
- Le cuivre, Cu et l'oxyde de cuivre,  $CuO$  ;
- L'or  $Au$  ;
- L'argent  $Ag$ ;
- Les nanotubes de carbone ;
- Le dioxyde de titane  $TiO_2$ .

## I.3. LES TAILLES DES NANOPARTICULES

Une nanoparticule est un assemblage de quelques centaines à quelque millier d'atomes, conduisant à un objet dont au moins l'une des dimensions est de taille nanométrique (1-100 nm) – voir **Figure I.1**, les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire. Elles ont un intérêt à la fois fondamental et appliqué, et sont très étudiées actuellement.

Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides sont :

- 1- Les nanoparticules d'oxydes métalliques :
  - L'oxyde d'aluminium  $Al_2O_3$  ;
  - L'oxyde de cuivre ( $CuO$ ) ;
  - L'oxyde de silicium ( $SiO_2$ ) ;

- L'oxyde de Titane ( $TiO_2$ ).
- 2- Les nanoparticules métalliques :
- L'aluminium ( $Al$ ) ;
  - Le cuivre ( $Cu$ ) ;
  - L'or ( $Au$ ) ;
  - L'argent ( $Ag$ ).
- 3- Les nanoparticules non métalliques :
- Les nanotubes de carbone (CNT) ;
  - Le diamant (C).

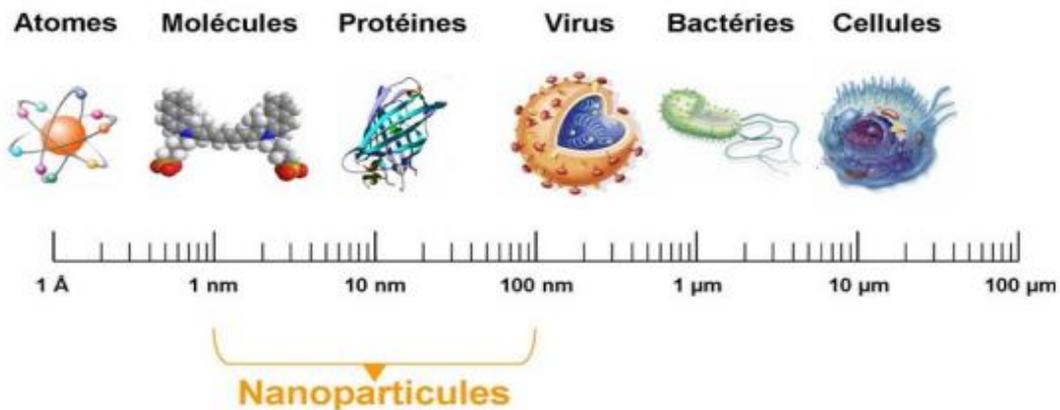


Figure I. 1 Gamme de taille des nanoparticules comparées à celles des principaux organes vivants

- 4- Les liquides de base les plus utilisés sont :
- L'eau;
  - L'éthylène glycol (EG);
  - Les huiles;
  - Les fluides de réfrigération (R12, R22, etc.)

Les suspensions de nanoparticules dans un fluide, souvent appelées nanofluides, ont des caractéristiques thermiques intéressantes comparées aux fluides de base traditionnels - voir **Tableau I.1.**

	Nanoparticule et fluide de base	$K$ (W/m K)	$P$ (kg/m <sup>3</sup> )	$Cp$ (J/kg K)	$\mu$ (Pa.s)
<b>Métallique</b> (solides)	Cu	400	8954	383	
	Fe	80,2	7870	447	
	Ni	90,7	8900	444	
	Au	317	19,300	129	
	Ag	429	10,500	235	
	C (diamant)	2300	3500	509	
<b>Oxyde métallique</b> (solides)	SiO <sub>2</sub>	1,38	2220	745	
	TiO <sub>2</sub>	8,4	4157	710	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36	3970	765	
	CuO	69	6350	535	
	SiC	490	3160	675	
<b>Liquides non métallique</b>	L'eau	0,597	998.2	4182	0,000993
	éthylène-glycol (EG)	0,258	1132	2349	0,0157

Tableau I. 1 Les propriétés thermophysiques de différents matériaux

#### I.4. LES ÉTUDES EFFECTUÉES SUR LES NANOFLUIDES

Compte tenu de l'importance accordée aux nanofluides, plusieurs études effectuées sur leurs propriétés physiques telles que le coefficient de transfert thermique et la viscosité dynamique ont prouvé que les nanofluides sont très différents par rapport aux fluides de base et présentent de meilleures caractéristiques thermophysiques. En effet, l'adjonction des particules métalliques dans un fluide de base a mis en évidence une amélioration des capacités thermiques de celui-ci.

Dans leurs premiers travaux, Choi et col. [2] ont constaté que l'addition d'une petite quantité de nanoparticules (concentration volumique  $\phi < 1\%$ ) doublait le coefficient de transfert de chaleur. D'autre part, Das et col. [3] ont déterminé que l'augmentation de la conductivité thermique dépasse de 25% la conductivité du fluide de base pour les différentes nanoparticules et les différentes concentrations volumiques ( $0.5\% < \phi < 4\%$ ).

## I.5. LES NANOPARTICULES ET LES FLUIDES PORTEURS

Les premiers travaux traitant du transfert de chaleur en présence des nanoparticules ont pratiquement commencé en 1995 avec l'étude de Choi [1], qui ont permis plus tard de déterminer les propriétés thermophysiques des nanofluides. Par la suite de nombreuses études expérimentales et numériques ont été menées par plusieurs chercheurs pour comprendre et analyser le comportement thermo-hydrauliques des nanofluides. Ces études peuvent être classées en trois catégories selon le type de matière de la nanoparticule :

- Les nanoparticules métalliques ;
- Les nanoparticules d'oxyde métallique ;
- Les nanoparticules non métalliques.

Nous présentons ici les différentes études expérimentales et numériques disponibles dans la littérature, qui représentent les propriétés principales des nanofluides et leur impact sur le transfert de chaleur tel que la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la viscosité dynamique. Diverses corrélations ont été proposées et comparées avec les expressions classiques.

### I.5.1. LES NANOPARTICULES MÉTALLIQUES

Xuan et Li [4,5] ont réalisé un système expérimental pour étudier le coefficient du transfert de chaleur convectif et le coefficient de frottement des nanofluides pour des écoulements laminaire et turbulent à travers un tube horizontal. Ils ont utilisé l'eau déminéralisée comme fluide de base avec une dispersion de nanoparticules de Cuivre (le diamètre de la nanoparticule  $d_{np} \leq 100$  nm) pour différentes fractions volumiques (0.3, 0.5, 0.8, 1, 1.5 et 2%) en faisant varier le nombre de Reynolds entre 800 et 25.000 et en imposant un flux thermique sur la paroi.

Les résultats expérimentaux ont montré que le coefficient du transfert de chaleur convectif «  $h$  » de nanofluide varie en fonction de la vitesse d'écoulement et la fraction volumique. Le nombre de Nusselt augmente de 60% - pour une concentration volumique  $\phi=2\%$ , par rapport à l'eau pure. D'autre part, ils ont trouvé que l'équation de Dittus-Boelter [6] était non valide pour la prédiction du nombre de Nusselt pour les diverses fractions volumiques.

Chin et col. [7] ont effectué une étude sur l'écoulement du nanofluide d'or de diamètre 17 nm à travers une conduite miniature chauffée - en forme de disque avec un diamètre de 9 mm et une hauteur de 2 mm, le fluide de base est l'eau. Les résultats ont montré que la résistance thermique de la conduite diminue sensiblement avec l'augmentation de la concentration des nanoparticules. De leur côté Tsai et col. [8] ont utilisé les solutions des nanoparticules d'or de différentes tailles (2-35 nm et 15-75 nm), préparées par la réduction de  $\text{HAuCl}_4$  avec du citrate tri-sodique et l'acide tannique. Une grande diminution de la résistance thermique du caloduc nanofluidique par rapport à l'eau déminéralisée a été observée. En effet, la résistance thermique du caloduc circulaire s'est étendue de 0.17 à 0.215 K/W avec les différentes solutions.

### **I.5.2. LES NANOPARTICULES NON MÉTALLIQUES.**

Dans leur travaux, Wen et Ding [9] ont étudié l'effet de la température sur la conductivité thermique des nanofluides pour les nanotubes MWCNT (Multi-wall Carbon Nanotubes) de 20 à 60 nm de diamètre et quelques dizaines de  $\mu\text{m}$  en longueur dispersée dans l'eau. Pour des températures inférieures à 30 °C, une dépendance approximativement linéaire de la conductivité thermique et la température. De leur côté, Ding et col. [10] ont montré que la conductivité thermique effective augmente avec la température. Ils ont constaté que l'amélioration de la conductivité thermique est légèrement plus grande que celle rapportée par Assael et col. [11], Xie et col. [12], et Wen et Ding [13], mais beaucoup plus inférieure à celle citée par Choi et col. [2]. De la même manière, Liu et col. [14] ont mesuré la conductivité thermique des nanofluides contenant les nanotubes de carbone (CNT) dispersé dans l'éthylène-glycol et dans l'huile synthétique de moteur. Ils ont trouvé que la conductivité thermique augmente jusqu'à 12.4% pour une fraction volumique  $\phi=1.0\%$  de CNT dans l'éthylène glycol et de 30% dans l'huile synthétiques de moteur pour une concentration volumique  $\phi=2\%$ .

Hwang et col. [15] ont comparé la conductivité thermique de quatre types de nanofluides tels que les nanotubes de carbone multi paroi (MWCNT) dans l'eau, du  $\text{CuO}$  dans l'eau,  $\text{SiO}_2$  dans l'eau, et de  $\text{CuO}$  dans de l'éthylène-glycol. Ils ont constaté que la conductivité thermique du nanofluide de MWCNT a été augmentée jusqu'à 11,3% pour une concentration volumique de 1% , qui est relativement plus élevée que celle obtenue par les autres groupes de nanofluides.

### I.5.3. LES NANOPARTICULES D'OXYDE MÉTALLIQUE.

Murshed et col. [16] ont étudié en convection forcée, l'écoulement d'un nanofluide dans une conduite cylindrique. Ce dernier contenant des nanoparticules de  $TiO_2$  de formes nanotube de diamètre de 10 nm et 40 nm de longueur et sphériques de 15 nm de diamètre où l'eau déminéralisée comme fluide de base. Ils ont montré que la conductivité thermique augmente avec l'augmentation de la concentration volumique  $\phi$ , et ils ont trouvé également que pour une concentration volumique  $\phi = 5\%$  l'amélioration de la conductivité thermique effective est d'environ de 33% pour les nanotubes et de 30% pour les nanoparticules sphériques. Ils ont alors constaté que la dimension et la forme de la particule ont une influence importante sur la conductivité thermique des nanofluides.

D'autre part Wen et Ding [17] ont effectué une étude expérimentale d'un nanofluide dans un écoulement en convection naturelle, entre deux disques horizontaux dont l'un des deux chauffé uniformément. Les nanoparticules d'oxyde de Titane ( $TiO_2$ ) de 30 et 40 nm de diamètre sont dispersés dans de l'eau distillée à travers le mécanisme de stabilisation électrostatique et à l'aide d'un homogénéisateur. Ils ont montré qu'il y avait une diminution systématique du coefficient du transfert de chaleur avec l'augmentation de la concentration volumique  $\phi$ .

### I.5.4. LES NANOTUBES DE CARBONE (CNT)

Le nanotube de carbone est un feuillet de graphite formé d'atomes de carbone disposés en réseau hexagonal comme un nid d'abeilles, et enroulé sur lui-même. Son diamètre est de l'ordre nanométrique (un milliard de fois moins que l'unité internationale : le mètre et sa longueur peut mesurer plusieurs micromètres. Le nanotube de carbone est cent mille fois plus fin qu'un cheveu mais cent fois plus résistant et six fois plus léger que l'acier. Aussi, nous pouvons citer d'autres avantages liés à ce type de matériaux révolutionnaire de la science nouvelle, comme par exemple sa flexibilité, sa conductivité, ainsi que ses propriétés mécaniques, électroniques et thermiques. Dans les différentes formes traditionnelles du carbone sont [10] :

- Les diamants ;
- Le graphite ;
- Les autres types de carbone dans la nature.

## I.6. LES NOUVELLES FORMES DE CARBONE

### - Les fullerènes et dérivés

L'élément de base de graphite et qui sert à la construction de nouvelles nanostructures carbonées, est le plan de graphène. On peut se représenter comme une feuille sous forme de pavage d'hexagones. Il est possible de briser virtuellement la planéité de la feuille de graphène en insérant des défauts dans la structure, de type pentagone ou heptagone. L'ajout d'un pentagone créera - dans le même plan, une courbure négative. La courbure créée par chaque type de défaut s'annule et une feuille de graphène dans laquelle on aura inséré un pentagone et un heptagone resterait globalement plane [10].

### - Les nanotubes multifeuillets (MWNT)

On obtient ces formes de carbone dans le produit d'évaporation de graphite par arc électrique – voir **Figure I.2**. Ainsi, on obtient des structures graphitiques unidimensionnelles baptisées nanotubes multi feuillets. (Multi Wall nanotubes) [10].

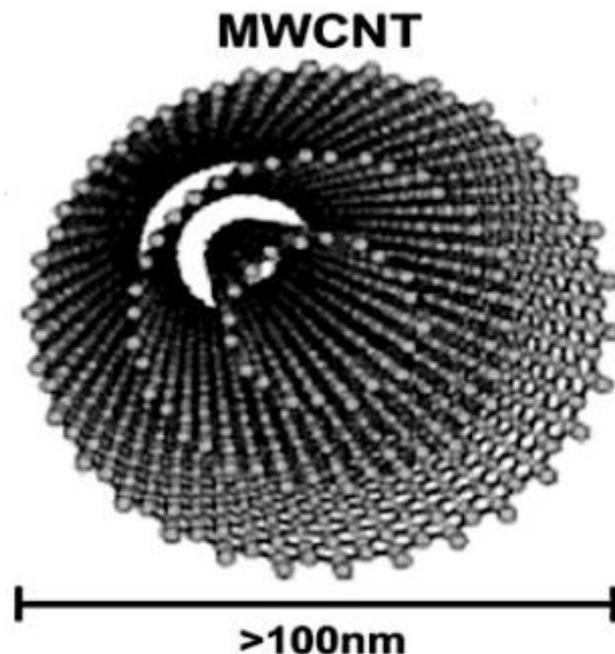


Figure II. 2 Représentation graphique d'un nanotube de carbone multifeuillets (MWNT)

- **Les nanotubes monofeuillets ou monoparois**

Ce genre de nanotubes de carbone a été découvert en parallèle par les deux savants Béthune et Iijima en 1993. Un nanotube de carbone monofeuillet. La **Figure I.3** est une feuille de graphène enroulée sur elle-même, de manière à former un cylindre unique. Les atomes de carbone restent dans un état hybridation.



*Figure II. 3 Représentation graphique d'un nanotube de carbone monoparois (SWCNT)*

## I.7. LES APPLICATIONS DE NANOFLUIDES

- **L'industrie :**

L'industrie au sens large (moteur thermique, climatisation, composant de puissance, installation nucléaire, accélérateur de particules, domaine aéronautique ou spatial, etc.), car cela permet de réduire la taille des équipements de refroidissement ou leur consommation électrique puisqu'on gagne en efficacité sans trop en dépenser. On estime en effet que pour doubler le coefficient d'échange, il faut multiplier la puissance de pompage par 10, ce qui est considérable et non rentable. Un nanofluide permet de s'en affranchir partiellement en améliorant ce coefficient jusqu'à 80% en régime turbulent sans modifier la puissance nécessaire au fonctionnement.

- **Refroidissement des systèmes thermiques :**

Le mélange d'éthylène-glycol et l'eau, sont utilisés comme liquide de refroidissement dans les moteurs des véhicules. L'addition des nanoparticules dans ces liquides améliore le taux de refroidissement. Ce point est étudié par plusieurs groupes de chercheurs dont notamment

You et col. [18] qui ont dispersé les nanoparticules de  $CuO$  et  $Al_2O_3$  dans l'huile de refroidissement du moteur de transmission. Dans une application, Vassallo et col. [19] ont rapporté une étude pour réduire l'usure (lubrification) à l'aide des nanoparticules, pour améliorer les propriétés tribologiques ainsi que la résistance à l'usure avec la réduction du frottement entre les éléments mécaniques mobiles.

- **Refroidissement des systèmes spatiaux :**

Pour les applications dans l'espace, You et col. [18], Vassallo et col. [19] ont effectué des études pour montrer que la présence des nanoparticules dans le fluide de refroidissement en électronique générale joue un rôle très important dans les applications de l'espace où la densité de puissance est très élevée.

- **Refroidissement des systèmes- militaires :**

Les exemples des applications militaires incluent le refroidissement de l'électronique de puissance et les armes d'énergie dirigée. Ces derniers impliquent des flux thermique très élevés ( $q > 500$  à  $1000 \text{ W/cm}^2$ ), où les nanofluides ont montré leur efficacité pour refroidir ces systèmes, et aussi les autres systèmes militaires, y compris les véhicules militaires, les sous-marins, et les diodes lasers à haute puissance.

- **Refroidissement des systèmes nucléaires :**

L'institut de technologie de Massachusetts a réservé un centre interdisciplinaire uniquement pour la nouvelle nanotechnologie (nanofluide) dans l'industrie de l'énergie nucléaire. Actuellement, ils évaluent l'impact potentiel de l'utilisation des nanofluides sur la sûreté neutronique et de la performance économique des systèmes nucléaires.

- **La biomédecine :**

Les nanofluides et les nanoparticules ont beaucoup d'applications en biomédicale. Par exemple, pour éviter quelques effets secondaires des méthodes traditionnelles de traitement du cancer, les nanoparticules à base de fer ont été employées comme transporteur des drogues. Aussi pour une chirurgie plus sûre en produisant le refroidissement efficace autour de la région chirurgicale, Jordan et col. [19] ont effectué une étude où les nanofluides pourraient être employés pour produire une température plus élevée autour des tumeurs pour tuer les cellules cancéreuses sans affecter les cellules saines voisines.

### - D'autres applications :

Il y a des situations nombreuses où l'augmentation de l'efficacité du transfert thermique peut être liée à la qualité, la quantité, et au coût d'un produit d'un processus. Par exemple, dans l'industrie de l'énergie renouvelable, les nanofluides sont utilisés pour augmenter le transfert de chaleur à partir des capteurs solaires aux réservoirs de stockage et pour augmenter la densité d'énergie. Les liquides réfrigérants de nanofluide ont une application potentielle dans la majorité des industries de transformation, telles que les matériaux, la production chimique, la nourriture, la boisson, le pétrole et le gaz.

## I.8. LES AVANTAGES DES NANOFLUIDES

Il est indéniable qu'un bon nanofluide apporte un coup de pouce à l'efficacité d'un système de refroidissement liquide quelconque sans avoir plus de bruit et sans consommer plus. Au contraire, l'efficacité générale étant améliorée, on peut penser à réduire la ventilation ou à prendre une pompe moins puissante, tout en gardant un niveau de performance identique si le silence de fonctionnement est la priorité. Cependant les nanofluides offrent d'autres avantages non négligeables dont:

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides ;
- Volume réduit par rapport au liquide pur pour obtenir une équivalence d'intensification de transfert de chaleur.

## I.9 LES INCONVÉNIENTS DES NANOFLUIDES

On a vu que l'érosion des surfaces et la sédimentation sont des effets que l'on peut négliger avec un nanofluide. La corrosion reste un point à vérifier, mais si on le choisit bien en prenant quelque chose d'inerte ou en l'adaptant à son circuit, alors il n'y aura aucun souci. Mais il présente pas mal d'inconvénients tels que :

- Le manque de l'accord des résultats obtenus par différents chercheurs ;
- Le manque de compréhension théorique des mécanismes responsables de changements des propriétés ;
- Instabilité des nanoparticules (dispersion) ;
- Chute de pression accrue lors du pompage ;
- Le coût élevé des nanofluides ;

- Difficultés dans le processus de production.

## **I.10. LES FLUIDES NEWTONIENS ET NON-NEWTONIENS**

Dans ce qui viendra, on présentera les fluides newtoniens et non-newtoniens.

### **I.10.1 LES FLUIDES NEWTONIENS**

Un fluide, que ce soit un gaz ou un liquide, sera appelé newtonien, si les contraintes qu'on observe sur un objet qui se déplace à l'intérieur sont linéairement proportionnelles à la vitesse à laquelle on se déplace [20].

Par exemple, avec de l'air ou de l'eau (qui sont des fluides Newtoniens), si on se déplace à l'intérieur à une certaine vitesse, on pourra ressentir une force de résistance : la contrainte.

Si on se déplace 2 fois plus vite, on va ressentir 2 fois plus de contrainte.

Une autre propriété des fluides Newtoniens est que leur viscosité est constante, c'est-à-dire qu'elle ne varie pas en fonction des forces qui s'appliquent sur eux. Si on se déplace plus ou moins vite dans de l'eau, elle ne devient pas plus ou moins visqueuse.

### **I.10.2 LES FLUIDES NON-NEWTONIENS**

Un fluide est appelé non-Newtonien lorsque sa viscosité est variable en fonction de la vitesse à laquelle un objet se déplace à l'intérieur, ainsi qu'aux contraintes auxquels il est soumis. Ils ont la particularité de se solidifier ou de se liquéfier en fonction de la contrainte soumise

## **I.11. CONVECTION LIBRE OU NATURELLE**

Dans ce type de convection le mouvement résulte de la variation de la masse volumique du fluide avec la température ; cette variation crée un champ de forces gravitationnelles qui conditionne les déplacements des particules du fluide comme le montre la **Figure I.4**.

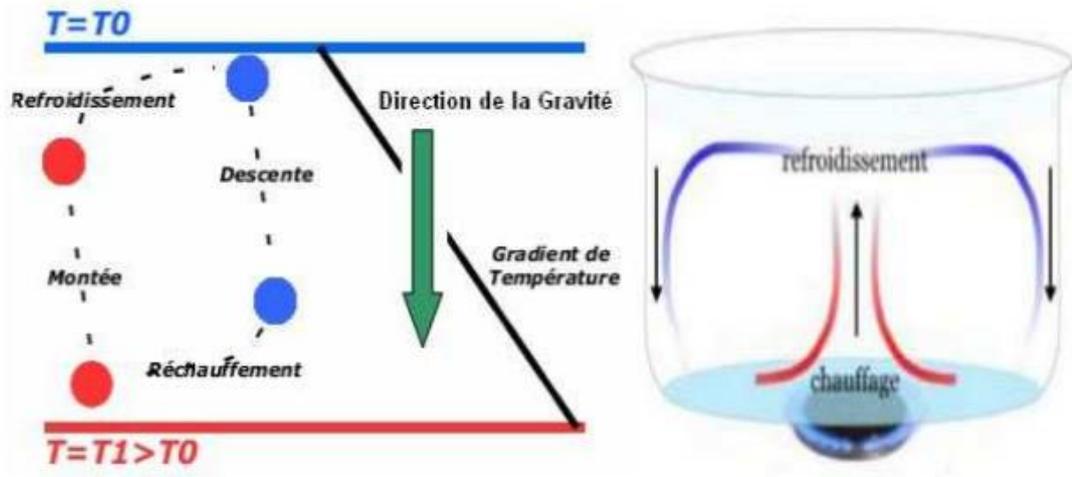


Figure II. 4 Principe physique de la convection naturelle

## I.12. CONVECTION FORCÉE

Dans ce type de convection le mouvement est provoqué par un procédé mécanique indépendant des phénomènes thermiques (compresseur, pompe, ventilateur, etc.) C'est donc un gradient de pression extérieur qui provoque les déplacements des particules du fluide. L'étude de la transmission de chaleur par convection est donc étroitement liée à celle de l'écoulement des fluides [20].

## I.13. DOMAINES D'APPLICATIONS

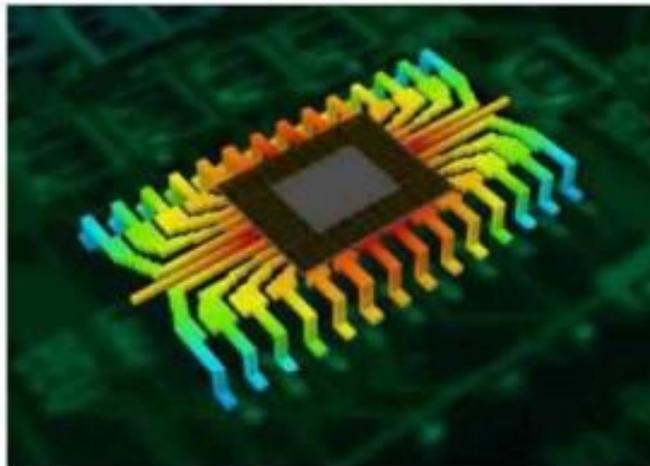
Les applications du transfert de chaleur par convection sont nombreuses pour que l'on puisse envisager de les citer toutes ici. Elles interviennent à chaque fois que l'on chauffe ou que l'on refroidit un liquide ou un gaz. Par exemple, le chauffage d'un liquide dans une casserole, dans un radiateur de chauffage central, ou dans un radiateur associé à un moteur d'une voiture ou dans un évaporateur ou condenseur.

La convection s'applique même si la surface d'échange n'est pas matérialisée par une paroi, ce qui est le cas des condenseurs par mélange ou des réfrigérants atmosphériques, voir des sècheurs à air chaud. La convection naturelle est rencontrée dans plusieurs situations. En effet, elle est toujours présente tant que la température du fluide est variable ainsi que lorsqu'il y a un champ d'accélération tel que la gravité.

Dans quelques applications, le transfert de chaleur en convection naturelle est parfois petit, comparé aux autres modes de transfert de chaleur (conduction - rayonnement), par conséquent, il peut être négligé.

Il y a des situations où on a besoin de supprimer la convection naturelle, comme dans le cas de la chaleur perdue par la vapeur depuis une canalisation, depuis des fenêtres, ou depuis des collecteurs solaires. Mais d'autre part on cherche à augmenter le transfert de chaleur par convection naturelle afin de refroidir les composants microélectroniques dégageant de la chaleur par effet Joule – voir **Figure I.5**.

Généralement, le refroidissement se fait par convection forcée et par changement de phase, cependant, la convection naturelle est une partie intégrante de la dissipation de chaleur surtout dans le cas des ordinateurs portables et les appareils électroniques de petites dimensions. Bien que la convection forcée reste le principal mode de refroidissement, il est toutefois important de déterminer avec certitude le processus de transport du fluide dans l'absence de courte durée d'un écoulement externe forcé quand il y a interruption temporaire du système de refroidissement par ventilation [20].



*Figure II. 5 Émanation de chaleur sur une puce électronique*

D'après la revue scientifique américaine (YEH'S REVIEW - 2002), une étude de l'U.S. Air force a indiqué que plus de 52% des défauts des systèmes électroniques sont étroitement liés à la hausse incontrôlée des températures.

Quant aux ventilateurs installés sur les PC, bien qu'ils soient souvent bon marché en matière de coûts, ils représentent des inconvénients majeurs car ils font du bruit et requièrent de l'espace,

donc peu efficaces et peu fiables. Les études de convection sont donc nécessaires à la gestion des flux thermiques et la conception des équipements (équipements électroniques, fabrication des films fins, décomposition des vapeurs chimiques et bien d'autres domaines...)

#### **I.14. CONCLUSION**

Le chapitre de généralité consiste à introduire le concept des nanofluides et de nous permettre de les classer selon :

- Le type de matière des nanoparticules ;
- La nature du fluide de base ;
- Les domaines d'applications.

## **Chapitre 2**

# **RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE**

## II.1. INTRODUCTION

Lors de ces deux dernières décennies de nombreuses recherches théoriques et expérimentales ont été menées, en vue de mieux caractériser les propriétés thermo-physiques des fluides (la masse volumique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique et la conductivité thermique)

Cependant, ces cinq dernières années, les jets impactants ont été principalement étudiés en raison de leur grande application dans le refroidissement des moteurs thermiques, des appareils électroniques du traitement des métaux et du traitement des matériaux. De plus sur cette période, la dissipation de puissance des boîtiers électroniques modernes est devenu plus importante en raison de leur flux thermique élevé et de leurs petites dimensions. Comparées aux jets circulaires, les configurations de jets à fentes ont attiré une grande attention en raison de leurs avantages en matière de refroidissement et d'efficacité [23].

Toutefois, certaines investigations ont été effectuées que expérimentalement et numériquement. Le premier article ont été présentés par Roy et col. [24] qui ont obtenu des résultats sur les capacités d'amélioration des liquides de refroidissement avec des nanoparticules métalliques en suspension dans une configuration de refroidissement à flux laminaire radial. Le modèle monophasé a également été adopté. Les champs hydrodynamiques et thermiques des nanofluides d'oxyde d'aluminium à base d'eau comme liquide de base dans les systèmes de refroidissement radiaux ont été décrits dans un flux laminaire et des concentrations en volume de nanoparticules jusqu'à 10% ont été pris en compte. Une amélioration maximale du transfert de chaleur jusqu'à 200% à un nombre de Reynolds égal à 1200 a été observée, mais de fortes augmentations de la contrainte de cisaillement des parois ont été évaluées. Palm et col. [24] ont considéré les propriétés des fluides en fonction de la température. Ils ont souligné la diminution des valeurs de contrainte de cisaillement des parois en adoptant des propriétés dépendantes de la température par rapport aux résultats obtenus en utilisant des propriétés constantes.

Manca et col. [24] ont étudié numériquement l'effet du confinement sur les jets impactant qui frappent pour les nombres de Reynolds dans la plage 50-300 en adoptant l'approche en une seule phase. Concentration de particules jusqu'à 5% des nanofluides à base d' $Al_2O_3$  ont été considérés. Une amélioration significative en matière de coefficients de transfert de chaleur par

convection a également été évalué pour les concentrations élevées en volume de particules comme une augmentation de la puissance de pompage requise. De plus, ils ont récemment présenté certains résultats, prenant également en compte l'effet de la flottabilité. Yang et Lai [24]. ont également présenté des résultats numériques sur des jets confinés et des configurations comparées à température constante et propriétés dépendantes

Récemment dans les études théoriques examinées par Lamraoui et col. [23], les nanoparticules sont ajoutées à un fluide de base newtonien et un mélange résultant est considéré comme se comportant comme un fluide newtonien. Cependant, des études expérimentales liées à un nanofluide ont montré qu'un mélange (nanoparticules - fluide de base Newtonien) se comporte vraiment comme un fluide pseudo plastique non newtonien.

Cependant les études relatives à l'impact du jet dans un espace confiné où le mélange de nanoparticules et de fluide de base newtonien est considéré comme un nanofluide non newtonien n'ont pas encore été étudiées.

L'objectif de ce travail est de développer une étude pour évaluer l'influence de paramètres pertinents tels que : les nombres de Reynolds, la concentration volumique des nanoparticules ( $\varphi$ ), la puissance de pompage.

## II.2. JET LIBRE LAMINAIRE

Le jet laminaire est la forme la plus simple d'écoulement de jet. Un jet étant le plus souvent issu d'une conduite droite, le nombre de Reynolds le caractérisant est pris égal au nombre de Reynolds à la sortie de l'orifice. Un jet peut donc être considéré laminaire lorsque le nombre de Reynolds est inférieur à 2000 -  $Re < 2000$  ; au-delà de cette valeur, il peut être considéré turbulent. Les données de la littérature sont disponibles dans les ouvrages généralistes de la mécanique des fluides [25].

Les forces qui régissent l'écoulement d'un jet libre peuvent se regrouper de la façon suivante :

- Les forces d'inertie ;
- Les forces de pesanteur ;
- Les contraintes visqueuses.

### II.3. JETS LIBRES TURBULENTS STATIONNAIRES

Dans le cas de jets turbulents les phénomènes de diffusion moléculaire sont totalement négligeables devant ceux du mélange turbulent ; le comportement du jet devient indépendant de la viscosité du fluide ambiant ou de celle du fluide injecté.

#### Structure du jet libre turbulent :

D'après Rajaratnam [26] le jet libre turbulent – voir **Figure II. 1** se compose de deux régions principales:

- Une région de développement (ou région d'entrée) de l'écoulement où il y a coexistence entre un noyau potentiel de forme conique ;
- Mélange ; la vitesse initiale  $u_0$  y est constante et la zone de mélange se trouve de part et d'autre de ce noyau potentiel ;
- Une région établie où il n'y a plus de noyau potentiel et les lois de comportement sont semblables. Elle est aussi appelée région de similitude.

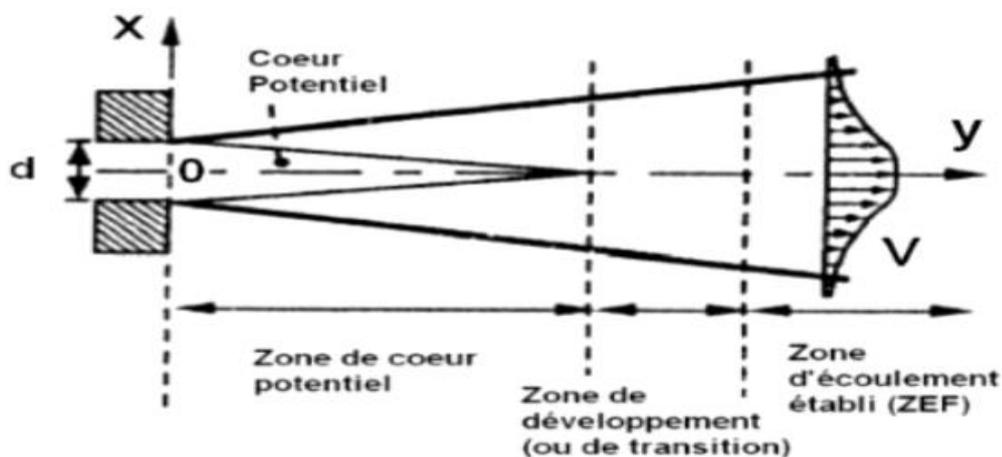


Figure II. 1 Représentation schématique de la structure du jet libre

## II.4. CLASSIFICATION DES JETS

Les travaux de Martin [27] ou Webb et Ma [28] réalisés lors du siècle dernier proposent une classification des jets selon la nature du fluide environnant. On parle ainsi de jet immergé lorsque le fluide est éjecté de la buse identique à celui constituant l'atmosphère externe, tandis que l'on parle de jet libre lorsque le fluide éjecté est liquide et qu'il débouche dans une atmosphère gazeuse - voir **Figure II. 2** Dans ce dernier cas, les phénomènes de tension superficielle à l'interface liquide gaz sont primordiaux dans la forme et la stabilité hydrodynamique du jet.

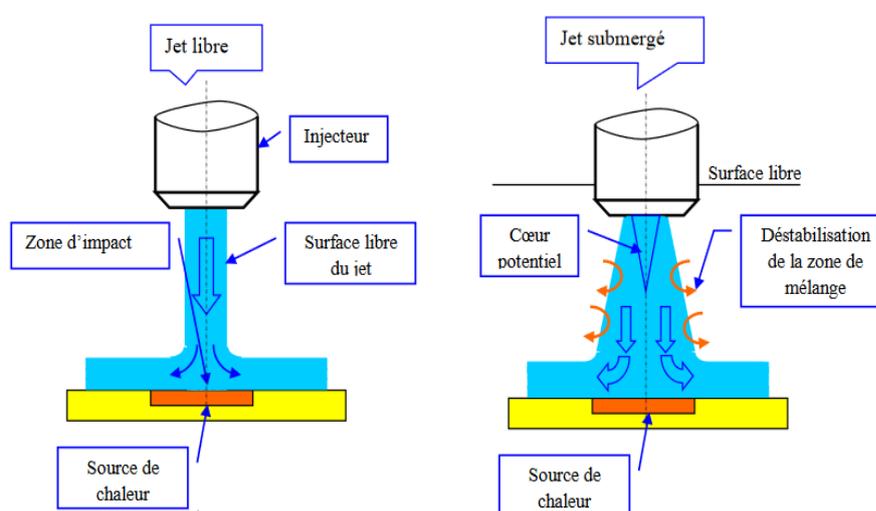


Figure II. 2 Classification des jets

Généralement les jets sont répartis en deux classes selon la géométrie de l'injecteur : Un jet rond est généré par un orifice circulaire, synonymes de jet circulaire ou axisymétrique, lorsqu'un orifice rectangulaire donnera naissance à un jet dit plan ou encore bidimensionnel.

Dans le cas d'un jet rond impactant sur une paroi située à une distance  $H$  de l'injecteur, les transferts de chaleur à la paroi peuvent être exprimés par l'introduction du nombre de Nusselt.

## PRINCIPE

Dans de nombreuses applications industrielles, les jets sont employés dans le but de contrôler la température de surface d'un corps par convection forcée. Lorsqu'un jet impacte une plaque horizontale dont la température est supérieure à celle du fluide, la dynamique de l'écoulement qui en résulte devient complexe, dans la mesure où il se produit une compétition entre les effets de flottabilité engendrés par la différence de température entre la plaque et le fluide et les effets d'inertie. En pratique, cette compétition se traduit par le décollement de la couche limite cinématique et thermique du fluide sur la plaque, à une distance plus ou moins éloignée de l'axe de la buse - voir **Figure II. 3**. Bien entendu, ce décollement de la couche limite a un effet important sur la quantité de chaleur échangée entre la plaque et le fluide, et donc sur la qualité du refroidissement de la plaque [24].

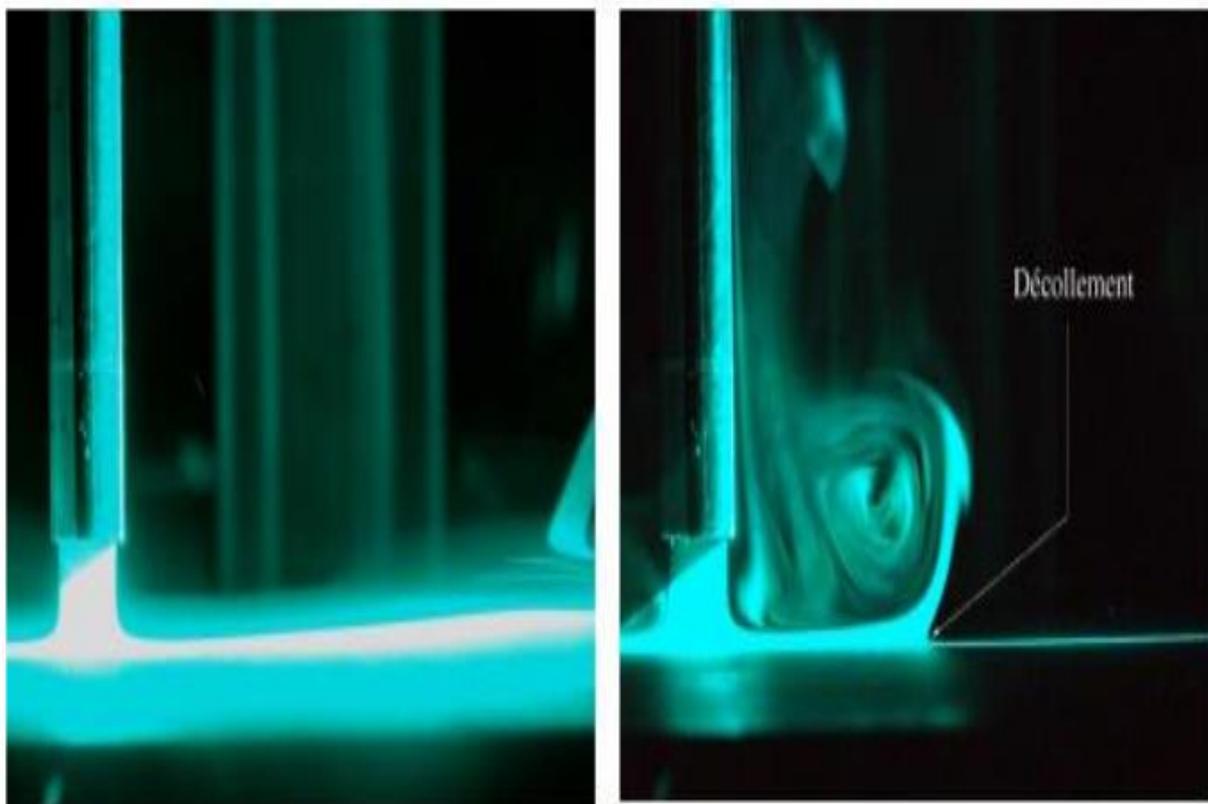


Figure II. 3 Photographies d'un jet d'air impactant une plaque plane horizontale

## II.5. CONFIGURATION D'UN JET IMPACTANT

En général, le jet impactant sur une paroi plane - voir **Figure II. 4**, peut se décomposer en trois régions essentielles :

### Région de jet libre :

Cette région est caractérisée par l'écoulement d'un jet rond, axisymétrique en moyenne. Il peut atteindre une zone d'écoulement établi ZEF (Zone of Established Flow) cette dernière ne peut apparaître que lorsque la distance d'impact est suffisamment grande.

### Région de stagnation (région d'impact) :

Cette région est caractérisée principalement par une forte diminution de la composante de vitesse axiale à l'amont du point de stagnation, une élévation importante de la pression au point d'arrêt, et une forte augmentation de la composante de vitesse radiale en aval du point d'impact.

### Région de jet pariétal :

Cette région est caractérisée par le développement et l'épaississement d'un jet pariétal, c'est à dire le long de la surface d'impact et dont la vitesse radiale maximale diminue [31].

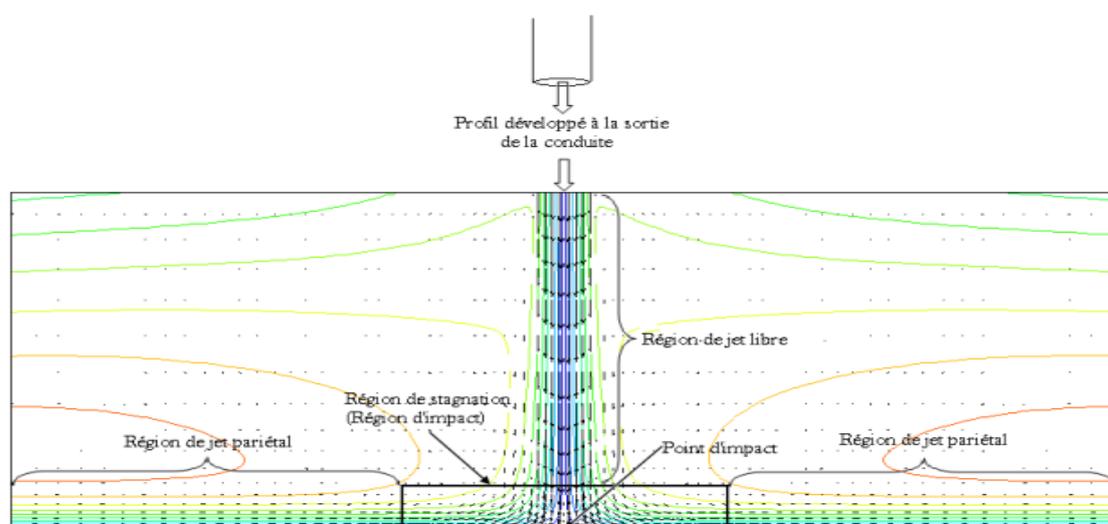
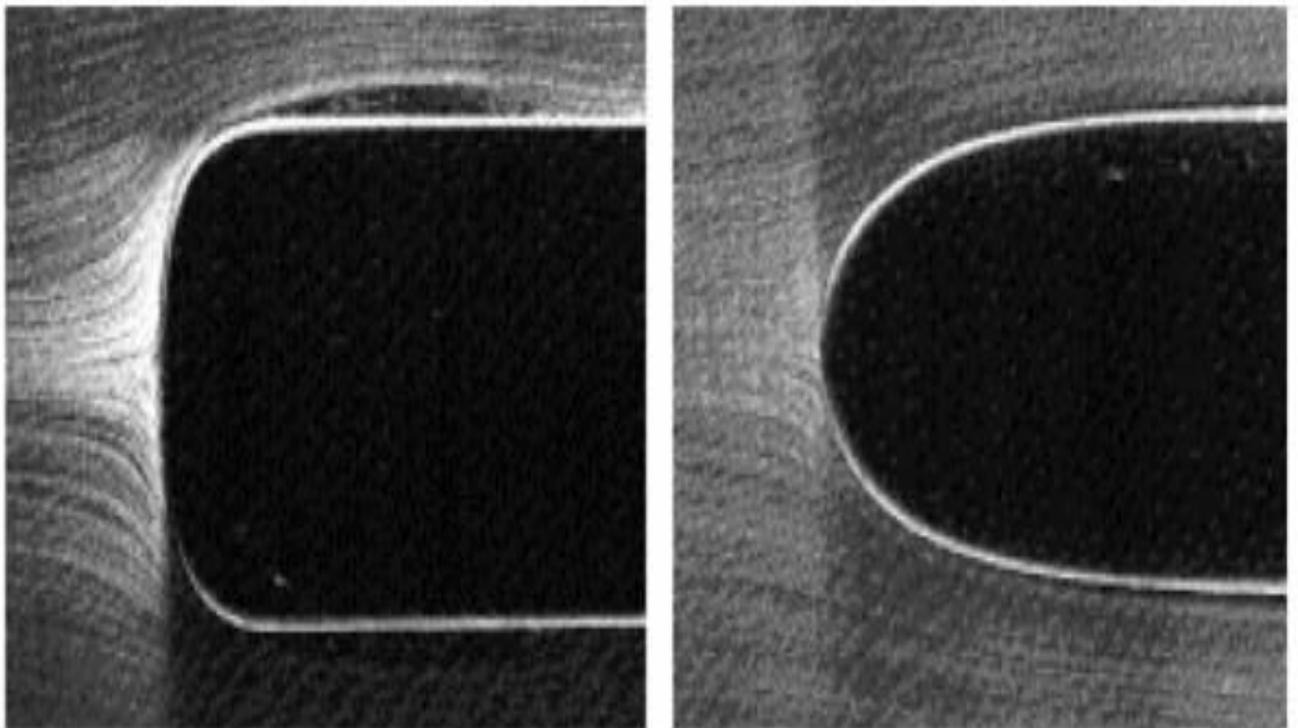


Figure II. 4 Structure d'un jet impactant sur une paroi plane.

## II.6. L'ÉCOULEMENT DE STAGNATION

L'écoulement de couche limite de stagnation avec transfert de chaleur est largement répandu dans beaucoup d'applications qui sont le siège d'écoulements en présence de fluide impactant sur des obstacles solides chauffés. On le retrouve dans différents procédés industriels (dégivrage de bord d'attaque des ailes, refroidissement des aubes des turbines et des composants électroniques, etc.) car il permet des taux élevés d'échange de chaleur et de masse - voir la **Figure II. 5**. Il convient de mettre le point sur la particularité et l'intérêt de l'écoulement de stagnation convectif. En effet, dans ce type de situation les flux thermiques échangés sont nettement plus élevés au voisinage du point de stagnation. Ce qui s'explique par l'existence d'une importante composante de vitesse normale à la paroi qui empêcherait le développement des couches limites. Le transfert de chaleur sera ainsi favorisé puisque celui-ci est inversement proportionnel à l'épaisseur de la couche limite.



*Figure II. 5 Représentation de stagnation ou point d'arrêt*

## II.7. INFLUENCE DE LA VITESSE DU JET

Toujours dans le cadre des études liées au refroidissement, Brevet et col. [29], ont montré que la vitesse du jet de l'écoulement influe sur les échanges, dès lors qu'il devient supérieur. Les travaux de la Journée organisée par la Société Française de Thermique [30], ont mis en évidence l'influence de ce paramètre pour  $H/d = 10$  et divers nombres de Reynolds – voir **Figure II.6**.

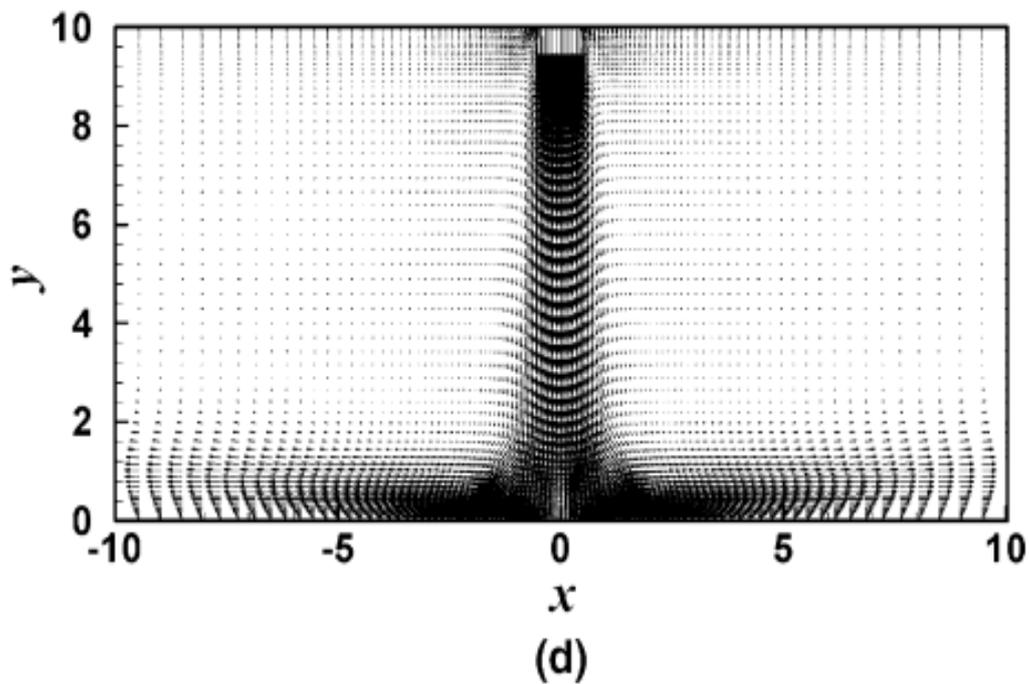


Figure II. 6 Représentation du champ de la vitesse du fluide sur une paroi

## II.8. INFLUENCE DE LA GÉOMÉTRIE DE L'INJECTEUR

La génération de vorticité à la sortie de l'injecteur est un élément important pour accentuer les échanges de chaleur. Récemment, Lee et col. [28], ont étudié les performances de pompage de l'injecteur. L'analyse de leurs résultats montre qu'un orifice - voir **Figure II. 7**, à bords tranchants provoque une légère amélioration des échanges du fait d'une meilleure tendance à générer de la vorticité dès la sortie du jet.

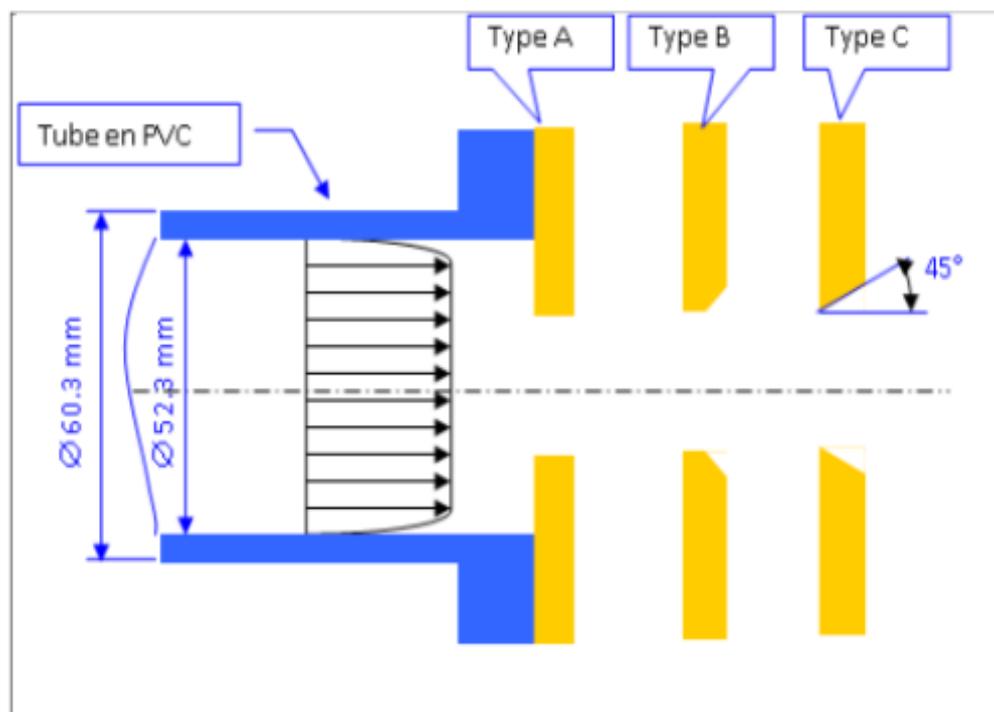


Figure II. 7 Les types d'orifices

## II.9. L'UTILISATION DES NANOFLUIDES DANS L'AMÉLIORATION DU TRANSFERT THERMIQUE

La convection thermique est un mode de transport d'énergie par l'action qui combine de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes.

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre et convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dû simplement aux différences de densité résultantes des gradients de température, on dit que la convection est naturelle ou libre.

Par contre si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée. Si les deux causes existent simultanément, sans que l'une soit négligeable par rapport à l'autre, la convection est dite mixte.

Multiplés études expérimentale et numérique sont disponibles dans la littérature montrant l'influence des nanofluides sur le transfert convectif dans les tubes, plusieurs corrélations ont été proposées pour la prédiction de nombre de Nusselt. Pak et Cho [32] ont étudié expérimentalement le transfert de chaleur convectif des nanofluides pour un écoulement laminaire et turbulent, ils ont utilisé des nanoparticules d'oxyde d'aluminium (13 nm) et des nanoparticules de dioxyde de titane (27 nm) de fraction volumique variant de 0 à 3% dispersées dans l'eau comme fluide de base. Ils ont remarqué que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds.

Lamraoui et col. [23] ont constatés que lorsque est l'écoulement est laminaire et qu'une température uniforme constante est appliquée sur la surface cible le coefficient d'échange est meilleur que lorsqu'on utilise un fluide de base telle que de l'eau pure. L'approche du modèle monophasé a été adoptée afin de décrire le comportement des nanofluides et différents paramètres influents la convection thermique.

Les concentrations volumétrique de particules ont été prises en compte lors des simulations qui ont été effectuées pour différents rapports géométriques. Afin de prendre en

compte les effets de confinement, les nombres de Reynolds et le volume solide fraction du nanoparticule.

Lee et Yoon [33] ont remarqué une augmentation de 7 à 20% pour le transfert thermique des nanofluides par rapport au fluide de base (eau) pour les écoulements laminaires et turbulents.

### II.9.1. LES EFFETS INFLUENT SUR LES PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES DES NANOFLUIDES

Les paramètres principaux influant sur la conductivité thermique des nanofluides sont :

- La concentration volumique des particules ;
- Le type de la particule ;
- La température.

#### - LA CONCENTRATION VOLUMIQUE DES PARTICULES

L'effet de la concentration volumique des particules sur l'amélioration de la conductivité thermique du nanofluide est montré dans la **Figure II. 8**, où les travaux de sept groupes de chercheurs sont présentés pour les particules de l' $\text{Al}_2\text{O}_3$  suspendus dans l'eau. La dimension de la particule et la température du nanofluide varient entre ces groupes mais la tendance générale est claire. Nous constatons que l'amélioration de la conductivité thermique augmente en fonction de la fraction volumique des particules et que les concentrations de particules d'oxyde métallique donne une amélioration allant jusqu'à 30% - [31].

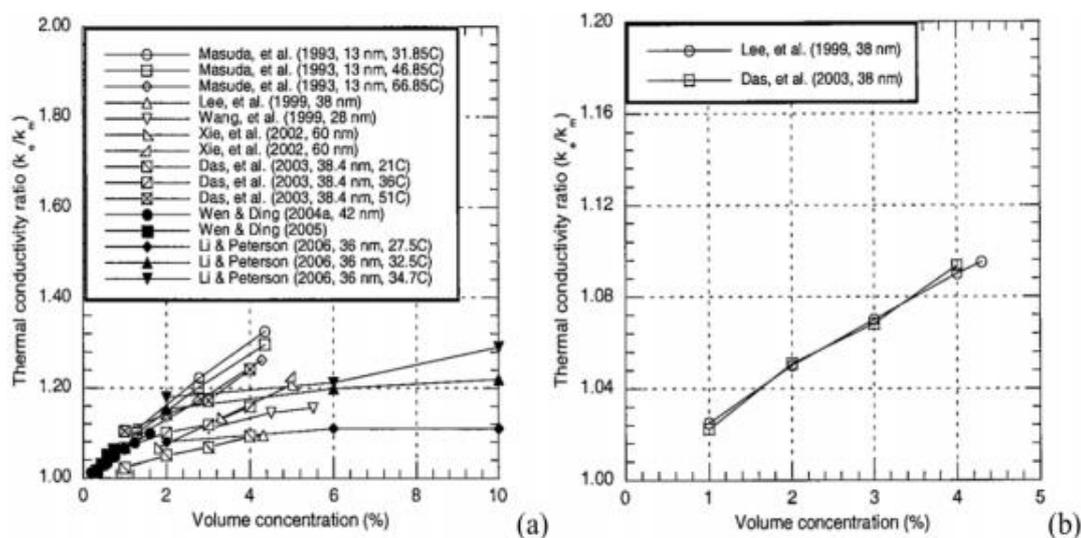


Figure II. 8 Effet de la concentration volumique sur la conductivité thermique du nanofluide [32]

#### - EFFET DU TYPE DE LA NANOPARTICULE

La Figure II. 9 regroupe les études expérimentales de plusieurs chercheurs. Elles illustrent l'effet du type des nanoparticules sur la conductivité thermique pour deux nanofluides, l'un est un oxyde métallique et le second est un métal, tous deux sont dilués dans l'eau. Tous les paramètres (température et la forme de la particule) sont supposés constants. Ils ont constaté que les particules métalliques produisent la même amélioration que les oxydes métalliques mais à faible concentration volumique [32].

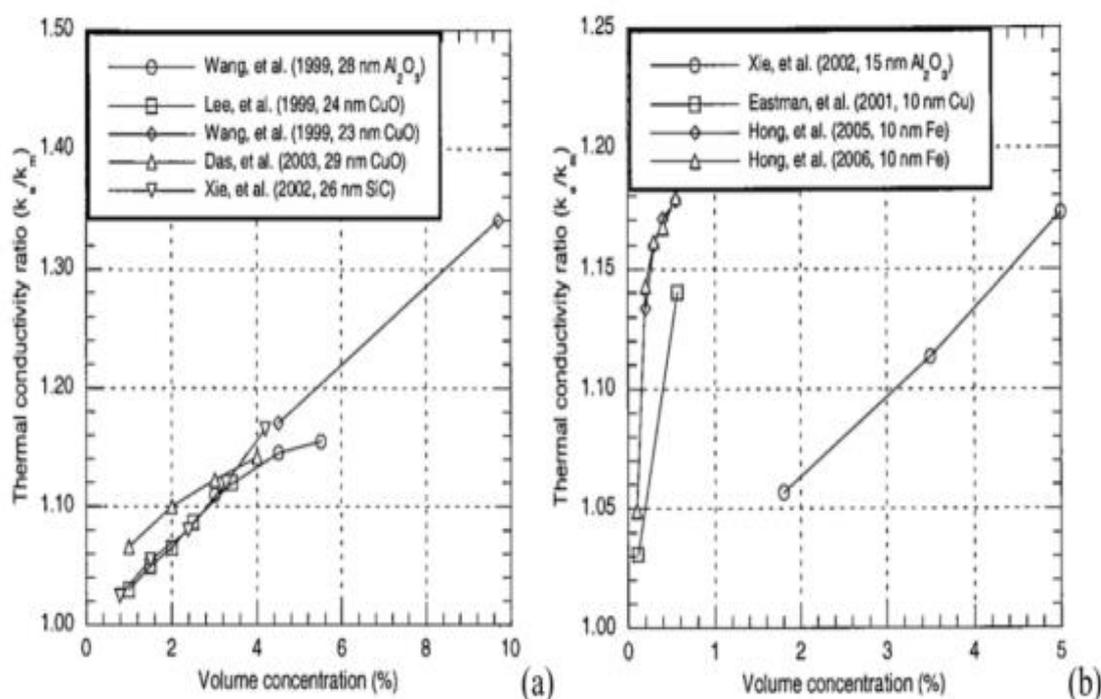


Figure II. 9 Effet des types de particules sur la conductivité thermique des nanofluides[32]

## - EFFET DE LA TEMPÉRATURE

En général, la conductivité thermique du nanofluide est sensible à la température par rapport au fluide de base. Par conséquent, l'amélioration de la conductivité thermique du nanofluide est également sensible à la température.

Ainsi, l'amélioration de la conductivité thermique augmente en fonction de la température. ont présenté leurs résultats pour un intervalle de température allant de 28°C jusqu'à 51°C en utilisant les nanoparticules d' $Al_2O_3$  et  $CuO$  à base d'eau. On observe que les données indiquent clairement que l'amélioration de la conductivité thermique augmente lorsque la température augmente - voir **Figure II.10**

Cependant, elle est plus élevée pour l'oxyde de cuivre  $CuO$  par rapport à l'oxyde d'aluminium  $Al_2O_3$ , où le taux de la conductivité pour une concentration volumique de  $\phi=4\%$  et une température de  $T=51^\circ C$ . Ils atteignent 1,24 pour  $Al_2O_3$  et une valeur de 1,36 pour  $CuO$  [32].

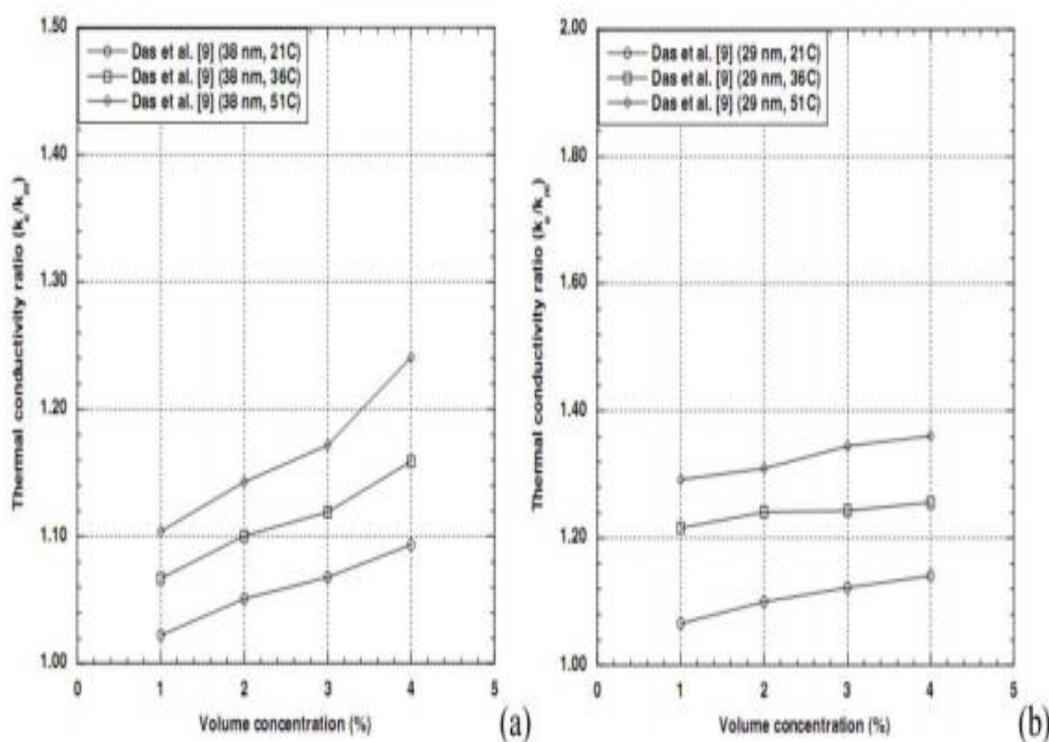


Figure II. 10 Effet de la température sur la conductivité thermique des nanofluides [32]

## II.10. APPLICATIONS INDUSTRIELLES

Les jets impactant sont largement utilisés dans l'industrie car ils génèrent d'importants transferts de chaleur et / ou de masse. On les observe principalement dans diverses applications telles que [32] :

- La congélation des produits agro-alimentaires ;
- Le séchage du papier, de textiles et des produits alimentaires ;
- Le nettoyage des surfaces ;
- Découpe de matériaux (métaux, céramique) ;
- Refroidissement des composants électroniques ;
- Refroidissement du rotor et du stator des turbines à gaz ;
- Refroidissement des chambres de combustion des moteurs de nouvelles générations ;
- Refroidissement par jet d'air, autour d'une cuve sous pression d'un réacteur nucléaire ;

- Désembuage et dégivrage des pare-brises ;
- Dégivrage des couches de glace déposées sur les ailes d'avions ;
- L'utilisation pour les avions missiles et les engins spatiaux à décollage et atterrissage vertical.

## II.11. CONCLUSION

Dans cette recherche bibliographique, nous avons donné dans un premier temps une description générale de jet impactant, sa configuration, le transfert de chaleur, etc. Une synthèse bibliographique a ensuite été réalisée. Nous avons constaté à travers une analyse des différents travaux antérieurs les différents paramètres influençant l'écoulement et le transfert de chaleur à savoir le transfert convectif des nanofluides.

## **Chapitre III**

# **ETUDE ET MODELISATION D'UN JET IMPACTANT**

### III.1. INTRODUCTION

L'écoulement des fluides dans une paroi chauffée est caractérisé par un système d'équations différentielles qui expriment la modélisation mathématique de ce problème physique. Le modèle physique, mathématique et les hypothèses simplificatrices ont été appliqués .

On propose d'étudier le transfert de chaleur par convection forcée, on cherche à mettre en évidence les performances des nanofluides et comparer, par la suite, entre deux ou plusieurs nanofluides a fraction différente.

Ce chapitre traite de la simulation d'un nanofluide en jet laminaire sur une plaque chauffée. Une étude détaillée a été présentée par la création de la géométrie, le maillage et l'utilisation fluent. Elle nous a permis de voir le comportement des paramètres de l'écoulement dans différentes zones. L'étude de l'interaction jet-paroi est régie par des équations de transport faisant intervenir plusieurs variables.

La résolution analytique de ce système d'équations fait appel à l'outil numérique. Le développement des techniques numériques a servi à mettre au point des algorithmes traitant tous les problèmes de mécanique des fluides, notamment : la turbulence, le transfert de chaleur, le transfert de masse, les écoulements multiphasiques.

Dans la présente étude, le calcul est mené à l'aide du code CFD (Computational Fluid Dynamics) qui utilise la méthode des volumes finis, nécessitant un maillage conçu par le logiciel « ANSYS- FLUENT ».

### III.2. HYPOTHESES SIMPLIFICATIONS

Les hypothèses simplificatrices retenues dans notre étude du phénomène de la convection forcée sont les suivantes :

- L'écoulement est laminaire et bidimensionnel ;
- Les propriétés thermo physiques des fluides sont constantes ;
- Ecoulement permanent ;

- Fluide incompressible Newtonien ;

À noter qu'on néglige le transfert d'énergie par rayonnement et conduction et qu'il n'y pas de changement de phase de fluide.

### III.3. PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES DES NANOFLUIDES

Les propriétés thermophysiques (conductivité thermique, masse volumique, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique et cinématique, etc.) des fluides de base sont profondément modifiées par l'ajout des nanoparticules. Nous supposons, dans notre travail, que les nanoparticules sont bien dispersées de façon uniforme et forment une suspension stable dans le fluide de base et qu'elles sont en état d'équilibre thermique avec ce dernier [35].

#### III.3.1. LA FRACTION VOLUMIQUE ( $\Phi$ )

La fraction volumique est la propriété la plus importante pour le nanofluide, puisque le calcul de toutes les autres propriétés se base sur la fraction volumique du nanofluide. On peut définir la fraction volumique comme le volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules + fluide de base).

La valeur de la fraction volumique varie entre 0 (fluide de base pure) et 1. La fraction volumique est donnée par la relation suivante :

$$\Phi = \frac{V_P}{V_T} \quad (III.1)$$

$V_P$ : volume de solide (nanoparticules) [m<sup>3</sup>].

$V_T$ : volume totale [m<sup>3</sup>].

### III.3.2. MASSE VOLUMIQUE

La détermination de la masse volumique d'un nanofluide parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique  $\varphi$  à une température  $T$  donnée, se fait à partir de la définition de la masse volumique d'un mélange. Dans le cas d'un mélange la masse volumique est donnée par la relation suivante [32] :

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{m_f + m_p}{V_f + V_p} = \frac{\rho_{bf} V_{bf} + \rho_p V_p}{V_T}$$

$$\rho_{nf} = \rho_{bf}(1 - \varphi) + \rho_p \varphi \quad (III.2)$$

### III.3.3 VISCOSITÉ DYNAMIQUE ( $\mu$ )

La viscosité peut être définie comme étant une propriété d'un fluide pour qu'il résiste aux déformations lorsqu'il est mis en mouvement. On peut donc parler de la viscosité comme étant une mesure du frottement interne d'un fluide.

Un liquide très visqueux est un liquide qui présente un frottement interne élevé. La dispersion des nanoparticules dans un liquide a un effet sur la viscosité dynamique de ce dernier du fait que les nanoparticules se déplacent en tant que des corps solides à une vitesse donnée et interrompent, par conséquent, le mouvement du fluide.

La viscosité obtenue devient la viscosité dynamique du nanofluide qui peut être influencé énormément par la qualité de la dispersion de la nanoparticule dans le fluide de base et de la température. Cette viscosité dynamique peut être calculée à partir de la viscosité dynamique du fluide de base et la fraction volumique du nanofluide, Pour ce qui suit nous allons citer trois modèles pour le calcul des viscosités apparentes [32] – voir **Tableau III.1**.

$\varphi$	$\rho [Kg / m^3]$	$C_p [J / Kg K]$	$\mu [Pas]$	$\lambda [W / m K]$
$Al_2O_3$	3880	773	//	36
$H_2O$	998.2	4182	$993 \cdot 10^{-6}$	0.597

Tableau III. 1 Propriété thermo-physiques de l'eau et des particules d' $Al_2O_3$  à  $T = 293 K$

### - MODÈLE D'EINSTEIN

Dans ce modèle, la relation donnant la viscosité d'une solution liquide-solide fut déduite originellement par Einstein en 1906 sous la forme :  $\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + \phi)$ , qui a été corrigée cinq ans plus tard par Einstein lui-même à la relation suivante qui est largement connu en tant que relation d'Einstein [34] :

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5\phi) \quad (III.3)$$

Cette relation est valable juste pour  $\phi < 3\%$

### - MODÈLE DE BRINKMAN

Par contre, Brinkman a généralisé la formule pour qu'elle soit utilisable pour une large plage de concentrations volumiques [35] :

$$\mu_{nf} = \frac{1}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (III.4)$$

Les deux modèles précédents sont basés sur une étude analytique utilisant un modèle moléculaire, où on traite les nanoparticules comme des sphères qui n'ont aucune interaction entre eux.

### - MODÈLE DE MAIGA

Pour calculer la viscosité dynamique des nanofluides des chercheurs ont dû faire recours aux données expérimentales pour proposer des corrélations liant la viscosité des nanofluides et la fraction volumique, nous citerons, entre autres, les corrélations proposées dans plusieurs travaux de recherches y compris ceux cités en titre et qui seront utilisées dans nos calculs [35]

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 123\phi^2 + 7.2\phi + 1 \quad (III.5)$$

Pour : eau +  $Al_2O_3$

Il est à noter que toutes les études expérimentales montrent que la viscosité des nanofluides est toujours supérieure à la viscosité du fluide de base – voir **Tableau III.2**. Pareillement, les viscosités des nanofluides déduites expérimentalement sont aussi supérieures aux viscosités calculées par les relations de prédiction analytiques.

$\varphi$	$\rho$ [ Kg / m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [ J / Kg K ]	$\mu$ [ Pa s ]	$\lambda$ [ W / m K ]
0 %	998.2	4182	$993 \cdot 10^{-6}$	0.597
1%	1027	4053	$1110 \cdot 10^{-6}$	0.617
2%	1055	3932	$1168 \cdot 10^{-6}$	0.629
4%	1113	3707	$1370 \cdot 10^{-6}$	0.653
5%	1142	3603	$1724 \cdot 10^{-6}$	0.663

Tableau III. 2 Propriétés physiques du nano-fluides Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> à plusieurs fractions

### III.3.4. CHALEUR SPÉCIFIQUE

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène. Elle correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance de 1 Kelvin lors de la transformation considérée.

La chaleur spécifique d'un nanofluide est donnée, en fonction de la fraction volumique  $\varphi$  par deux formules, dont la première est déduite analytiquement, en considérant le nanofluide en tant que mélange en équilibre comme suit :

$$(C_p)_{nf} = \varphi(C_p)_p + (1 - \varphi)(C_p)_{bf} \quad (III.6)$$

### III.3.5. CONDUCTIVITÉ THERMIQUE

Maxwell [35] a été l'un des premiers à étudier analytiquement la conduction thermique dans les particules en suspension en ignorant les effets d'interactions entre ces particules. L'équation de Maxwell peut être obtenue en résolvant l'équation de Laplace pour le champ de température à l'extérieur des particules de deux façons:

En considérant une grande sphère contenant toutes les particules sphériques avec une conductivité thermique effective innovées dans un fluide de conductivité thermique.

Et en prenant en compte toutes les particules sphériques avec une conductivité thermique noyée dans un fluide de conductivité thermique.

L'équation qui en résulte est :

$$k_{eff} = k_f + 3 \varphi \frac{k_s - k_f}{k_s + 2k_f - \varphi(k_s - k_f)} \quad (III.7)$$

Notons que l'équation de Maxwell n'est qu'une approximation de premier ordre et ne s'applique qu'aux mélanges avec de faible concentration volumique des particules.

### III.4. DESCRIPTION MATHÉMATIQUE ET EQUATIONS GOUVERNANTES

Une analyse dynamique des fluides d'un jet à fente confiné bidimensionnel frappant normalement sur une surface cible isotherme avec des nanofluides à base d'eau /  $Al_2O_3$  sont réalisés. De plus, la simulation les configurations sont des cas confinés, comme indiqué précédemment dans la **Figure III. 1**.

On considère dans cette étude un fluide newtonien, incompressible, l'écoulement est supposé bidimensionnel et stationnaire en moyenne.

#### - Equation de continuité :

L'équation de continuité exprime le principe de conservation de la masse pour un fluide incompressible :

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} = 0 \quad (III.8)$$

#### - Equation de quantité du mouvement :

L'équation de quantité de mouvement est le deuxième principe de l'équation de Newton dont l'accélération égale à la somme des force extérieurs ( force de pression, force visqueuse)

Direction x

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left( -\frac{\partial P}{\partial x} + \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right) \right) \quad (III.9)$$

Direction y

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{nf}} \left( -\frac{\partial P}{\partial y} + \left( \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right) \right) \quad (III.10)$$

#### - Equation d'énergie :

L'équation de l'énergie est l'utilisation de premier principe de la thermodynamique

$$\left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \alpha_{nf} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (III.11)$$

### III.5. LES CONDITIONS LIMITES

Une description schématique d'un jet impactant dans un espace confiné est présentée dans la **Figure III. 1**. Le schéma descriptif consiste en deux plaques parallèles séparées par une distance H allant de 1,24 cm à 7,44 cm et la largeur de l'orifice du jet W= 1.24 cm. Le jet frappe la plaque inférieure à des vitesses d'entrées uniformes à température  $T_w = 293K$  sur la plaque inférieure, la condition antidérapante est appliquée et la paroi est maintenue à une température uniforme,  $T_h = 313 K$ . La paroi supérieure est supposée adiabatique. À la section de sortie du canal, la pression ambiante (Pression atmosphérique) est appliquée comme condition aux limites de sortie de pression.

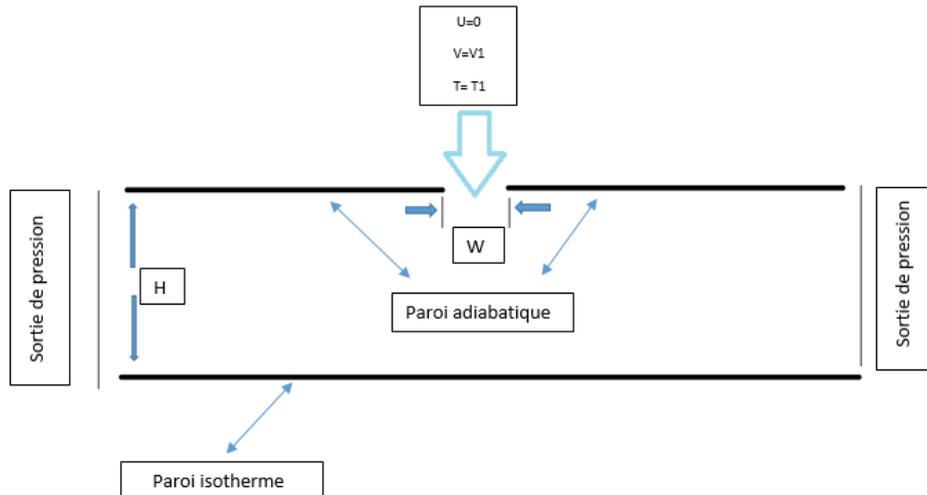


Figure III. 1 Description schématique du jet

### III.6. PROCÉDURE NUMÉRIQUE

Les équations régissant la continuité, la quantité de mouvement et l'énergie rapportées dans la section précédente, ont été résolues au moyen de FLUENT.

Une solution en régime permanent et une méthode ségréguée sont choisies pour résoudre les équations gouvernantes, qui sont implicitement linéarisées par rapport aux variables dépendantes de l'équation.

Un vent de second ordre schéma et le simple couplage SIMPLE sont choisis pour l'énergie et les équations de quantité de mouvement et de coupler la pression et la vitesse, respectivement.

### III.7. PRÉSENTATION DE LOGICIEL ANSYS-FLUENT

Il existe un certain nombre d'algorithmes industriels, très performants, permettant la prédiction d'écoulements de fluides (FLUENT, CFX, PHOENICS, FEMLAB, CFD-ACE, FLOTRAN, CFDS-FLOW3D, etc.). Pour réaliser nos simulations, nous avons choisi le code de calcul ANSYS-Fluent, que nous présentons dans cette partie.

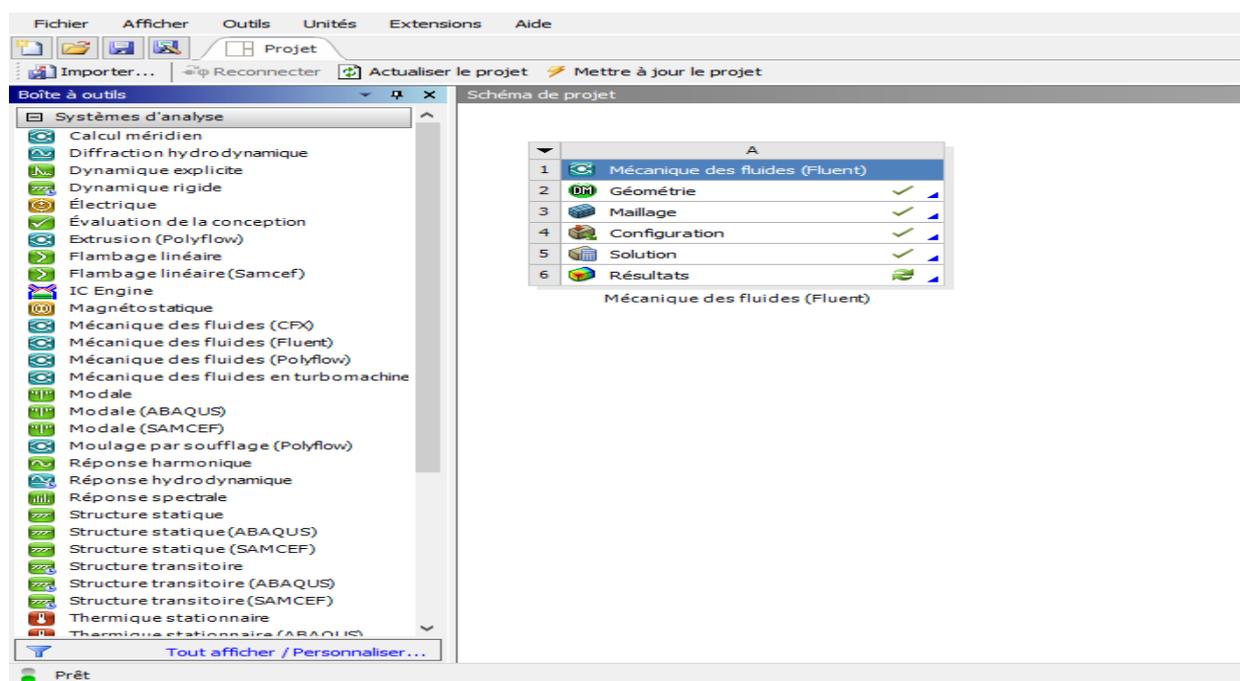


Figure III. 2 Interface Logiciel Ansys-Workbench

### III.8 ARCHITECTURE DE LOGICIEL

Le code de calcul "Fluent" est commercialisé par le groupe ANSYS. Ce groupe est actuellement l'un des pôles de compétence en mécanique des fluides numérique les plus importants. Il développe et commercialise une solution complète sous forme de logiciels de CFD (Computational Fluid Dynamics) généralistes, qui simule tous les écoulements de fluides, compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes, tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques et les écoulements multiphasiques pour toute l'industrie. Les produits et services proposés par le groupe "ANSYS" aident les chercheurs d'amplifier leurs rendements, optimiser leur conception et réduire leurs multitude essais.

Ce logiciel est largement utilisé dans l'industrie aéronautique, automobile ainsi qu'en hydraulique. Il offre une interface sophistiquée qui facilite son utilisation. Le logiciel "ANSYS-Fluent" modélise par la méthode des volumes finis des écoulements très variés dans des configurations plus ou moins complexes. Il est composé, comme tout logiciel de type CFD, de trois éléments clés qui sont le préprocesseur, le solveur et le post-processeur. Ces trois éléments sont illustrés dans la **Figure III. 3**

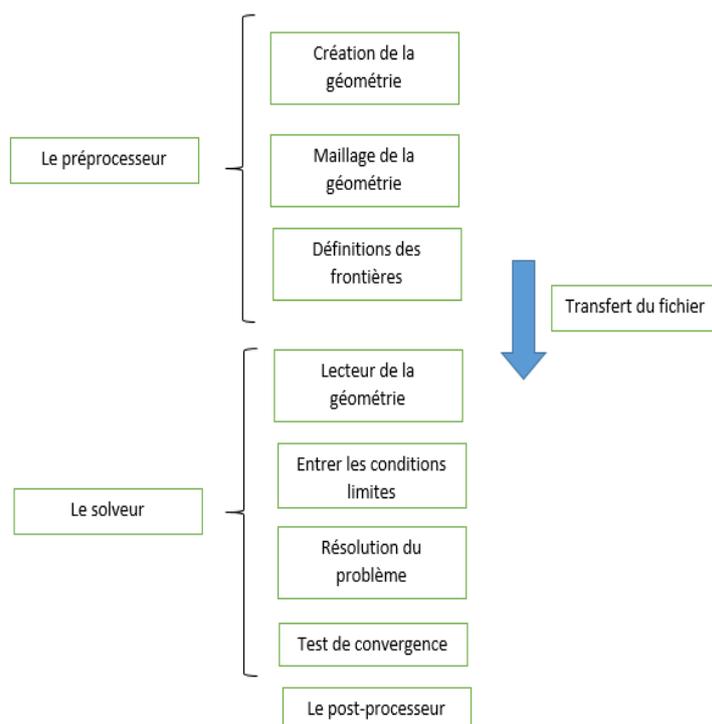


Figure III. 3 Schéma d'utilisation du logiciel ANSYS-Fluent

### III.8.1. MÉTHODE DES VOLUMES FINIS

En analyse numérique, la méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre des équations aux dérivées partielles, comme la méthode des différences finies et celle des éléments finis dont plusieurs logiciels utilisent cette méthode (ANSYS-Fluent, ANSYS CFX , STAR CD et OpenFOAM).

Toutefois, cette approche se base directement sur la forme dite forte de l'équation à résoudre. Alors que la méthode des éléments finis se fonde sur une formulation variationnelle de l'équation (on parle aussi de formulation faible).

L'équation aux dérivées partielles est résolue de manière approchée à l'aide d'un maillage constitué de volumes finis qui sont des petits volumes disjoints (en 3D, des surfaces en 2D, des segments en 1D) dont la réunion constitue le domaine d'étude. Les volumes finis peuvent être construits autour de points d'un maillage initial, mais ce n'est pas une nécessité.

Les méthodes de volumes finis ont été initialement mises au point pour des lois de conservations hyperboliques, mais des développements récents permettent à présent de les utiliser pour des équations elliptiques et paraboliques.

Ces équations aux dérivées partielles contiennent des termes de divergence. En utilisant le théorème de flux-divergence, les intégrales de volume d'un terme de divergence sont transformées en intégrales de surface et ces termes de flux sont ensuite évalués aux interfaces entre les volumes finis. On utilise une fonction de flux numérique pour élaborer une approximation des flux aux interfaces. Puisque le flux entrant dans un volume donné est égal au flux sortant du volume adjacent. Ces méthodes sont conservatives donc adaptées à la résolution de lois de conservation [36].

### III.8.2 DESCRIPTION GÉOMÉTRIQUE

ANSYS-Workbench - voir **Figure III. 4** , nous a facilité la tâche et nous a permis sans efforts manuels , en temps réduit et avec précision la conception et la préparation de la géométrie de l'aube, cette dernière était réalisée à partir des coordonnées cartésiennes (x, y).

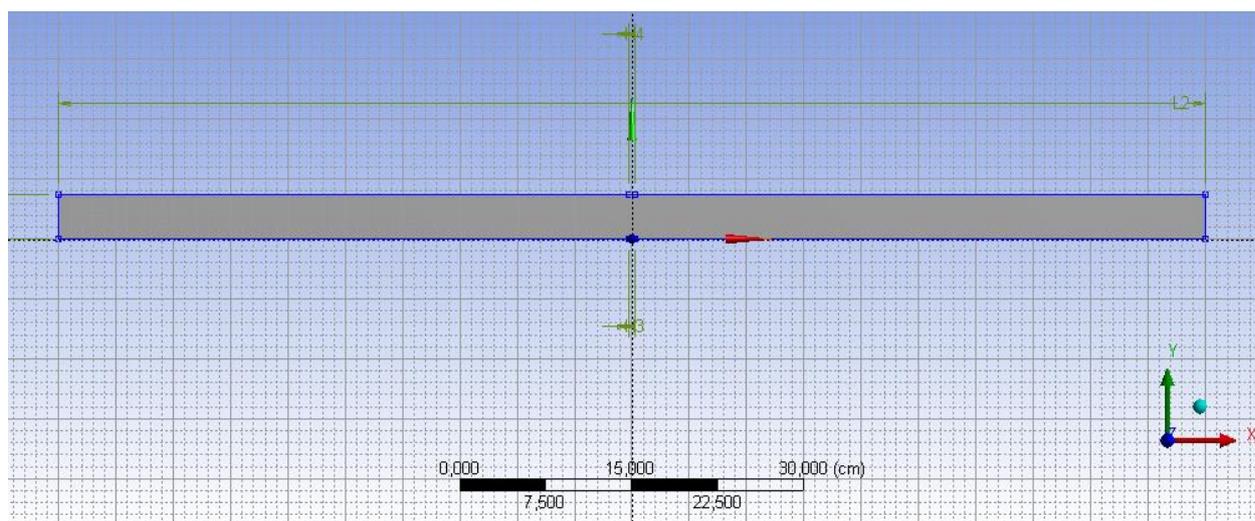


Figure III. 4 La géométrie étudiée sur ANSYS-Workbench

### III.8.3. LE MAILLAGE

La génération du maillage se fait aussi à l'aide du ANSYS-Workbench. En s'appuyant sur la géométrie précédente, nous définissons d'abord les sélections nommées de toutes les bordures. Nous fixons par la suite les dimensionnements du maillage ainsi que la nature du corps surfacique. Le module permet de générer un maillage quadrilatérale et triangulaire en 2D (surfaccique)- voir **Figure III. 5**.

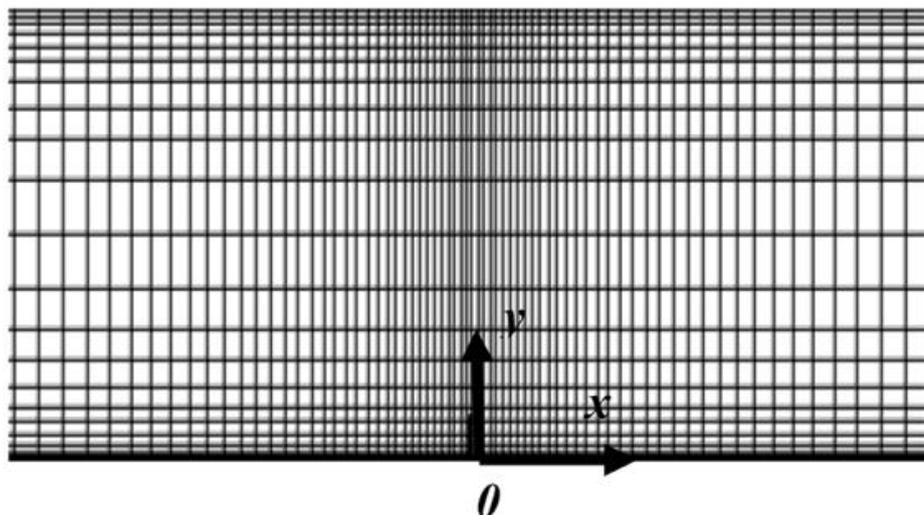


Figure III. 5 Exemple de création de maillage

#### III.8.4. IMPLÉMENTATION SOUS FLUENT

Le code de calcul FLUENT est un solveur, paramétré par une interface graphique. Ce logiciel permet la mise en place de script pour automatiser les processus de calcul.

FLUENT est un logiciel très puissant du fait du grand nombre de modèles disponibles, pouvant faire face à de très nombreux aspects de la mécanique des fluides : écoulement diphasique (miscible, non miscible, cavitation, solidification), laminaire, turbulent et combustion (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulement en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage, etc. Les schémas temporels et spatiaux peuvent de plus être modifiés pour améliorer la convergence.

##### - Mise en œuvre sous fluent

A la lecture du maillage sous Fluent, nous devons transformer l'unité de longueur de la géométrie à l'échelle réelle du problème (centimètre pour notre cas). Le logiciel permet aussi de redonner les nœuds, les surfaces et les cellules en mémoire, de telle façon qu'ils aient la même disposition dans la grille et dans la mémoire, pour améliorer les performances du calcul et l'efficacité de l'accès à la mémoire – voir **Figure III. 6**.

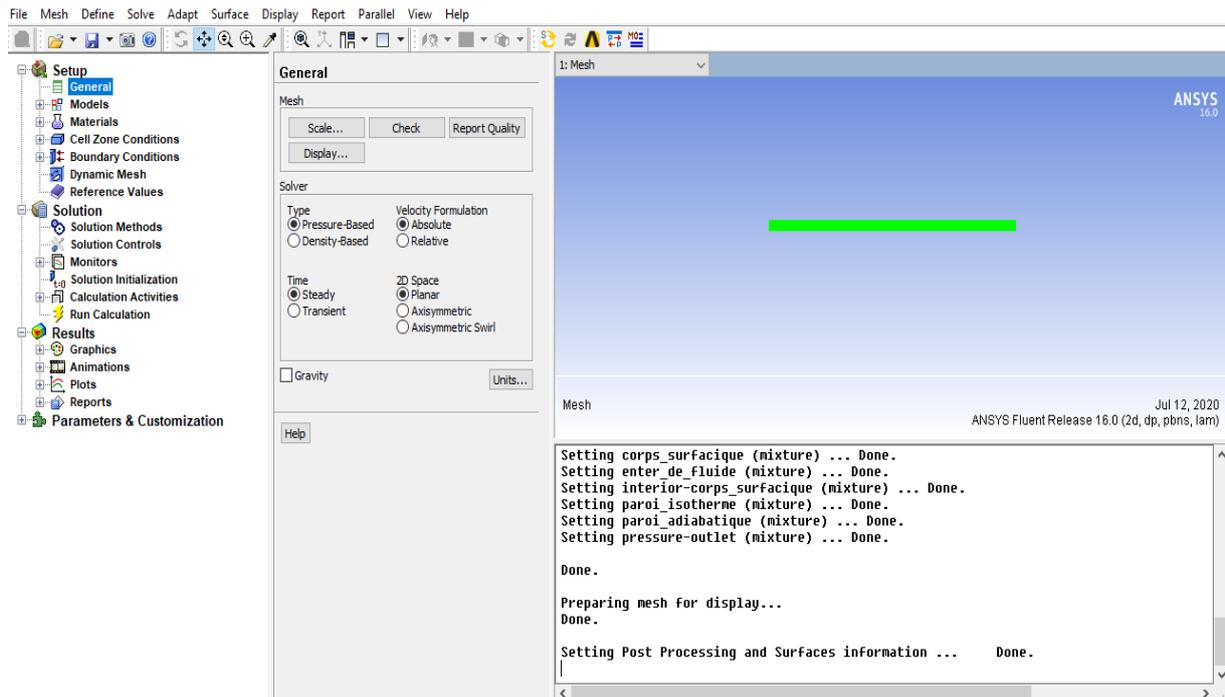


Figure III. 6 Interface de logiciel Fluent

### III.9. CONCLUSION

Dans cette étude nous avons mené sur des données expérimentales des propriétés des nanofluides en utilisant des équations de transport avec le logiciel ANSYS-Fluent. Afin de vérifier la précision du maillage, des tests de convergence. De plus, le traitement des données de la simulation ont été effectuées.

## **Chapitre IV**

# **RESULTATS ET DISCUSSIONS**

## IV.1. INTRODUCTION

Après avoir bien posé le problème sous "Fluent", comme expliqué au chapitre précédent, on procède maintenant à l'analyse des résultats obtenus des simulations. Les simulations ont été réalisées en considérant les hypothèses de simplification. Pour exploiter ces résultats, on tire les courbes tracées par Fluent après chaque simulation et pour plus de clartés nous avons présenté l'évolution du coefficient de transfert convectif.

## IV.2. CHOIX DE MAILLAGE

Afin d'assurer une indépendance des résultats numériques par rapport au maillage utilisé, il faut d'abord tester le maillage pour différents nombres de nœuds.

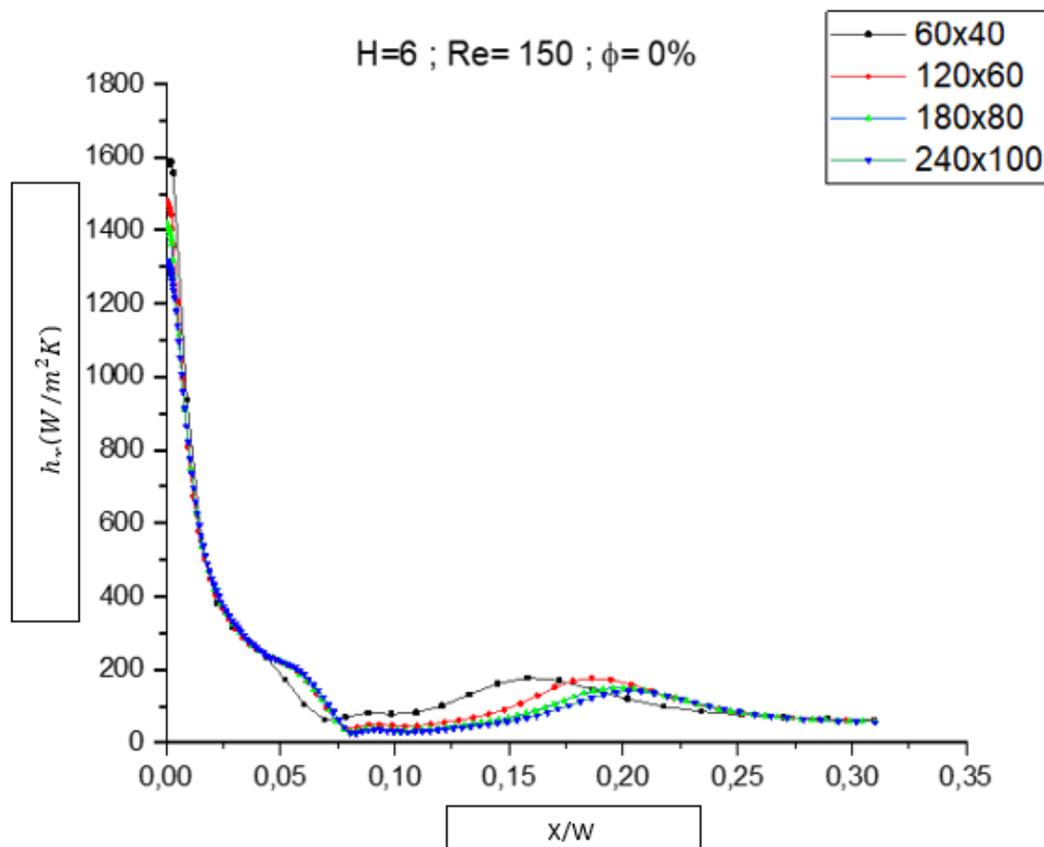


Figure IV. 1 Résultats du test de maillage en fonction du coefficient de transfert de chaleur sur la paroi isotherme

On remarque que les résultats des maillages au nombre 60x40 et 120x60 sont très éloignés par rapport aux résultats au nombre 180x80 et 240x100.

On observe aussi par ailleurs de la **Figure IV.1** que la courbe au maillage converge à partir du nombre 180x80.

Comme le temps de calcul est proportionnel au nombre de division. Pour avoir les résultats plus précis, le nombre 180x80 sera notre essai pour la simulation.

### IV.3 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Une analyse bidimensionnelle a été faite pour un jet confiné avec une nanoparticule de  $Al_2O_3$  à plusieurs fractions à base d'eau comme fluide de base à température 293 K dans la propriété thermophysique constante est définie.

Le régime d'écoulement est défini comme un régime laminaire monophasique qui a été adopté à plusieurs nombres Reynolds avec le rapport de H/W qui varie.

- Nombre de Reynolds : [ 50,100,150,200,250]
- H/W : [ 2,4,6]
- Fraction des nanoparticules  $Al_2O_3$  : [ 0%, 1%, 4%, 5%]

Les résultats des essais sont présentés en fonction de coefficient convectif thermique  $h_x$  voir **Tableau IV.1**.

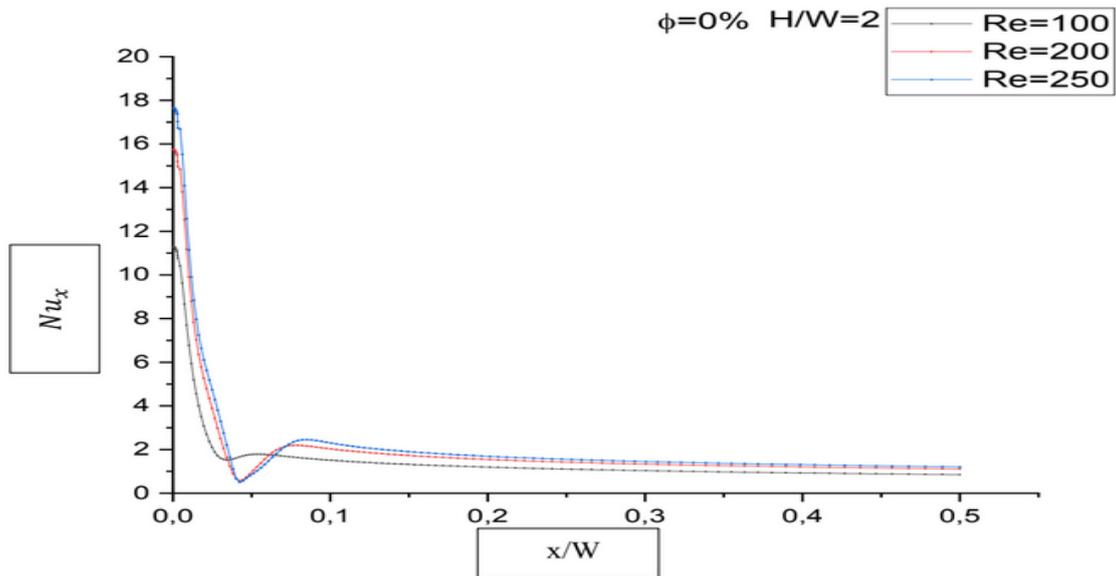
Tableau IV. 1 Résultats du coefficient convectif thermique (Nusselt) au point de stagnation

		Re	$\phi$			
			0.00	0.01	0.04	0.05
$H/W = 2$	Newtonien $N_{u0}$	50	8.09	8.30	8.71	9.37
		100	11.29	11.59	12.15	13.09
		150	13.71	14.87	14.76	15.90
		200	15.79	16.21	17.02	18.70
		250	17.65	18.83	20.83	21.34
		300	19.37	19.89	21.91	22.53

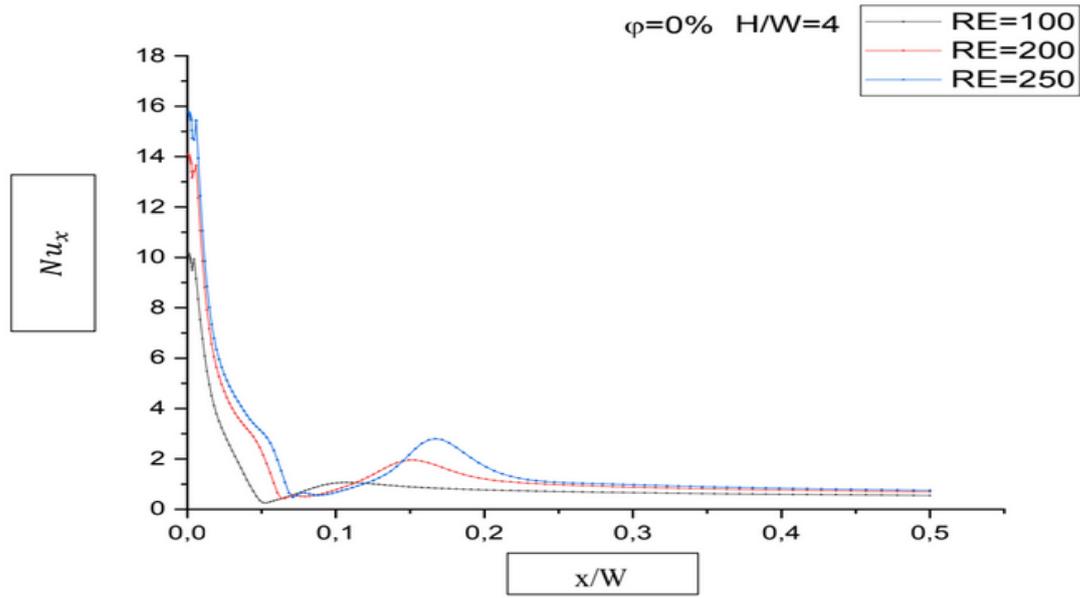
		Re	$\phi$			
			0.00	0.01	0.04	0.05
$H/W = 4$	Newtonien $N_{u0}$		0.00	0.01	0.04	0.05
		50	7.03	7.22	7.58	8.18
		100	11.14	11.27	11.90	12.85
		150	13.40	13.62	14.34	15.83
		200	15.67	16.35	16.82	18.55
		250	17.59	18.59	19.27	20.90
		300	18.90	19.34	21.23	22.68

		Re	$\phi$			
			0.00	0.01	0.04	0.05
$H/W = 6$	Newtonien $N_{u0}$		0.00	0.01	0.04	0.05
		50	6.18	6.34	6.62	7.18
		100	10.62	10.86	11.49	12.45
		150	12.98	14.43	15.20	15.22
		200	15.47	17.30	17.51	17.96
		250	17.53	18.38	19.33	20.73

V.3.1. EFFET DU NOMBRE DE REYNOLDS

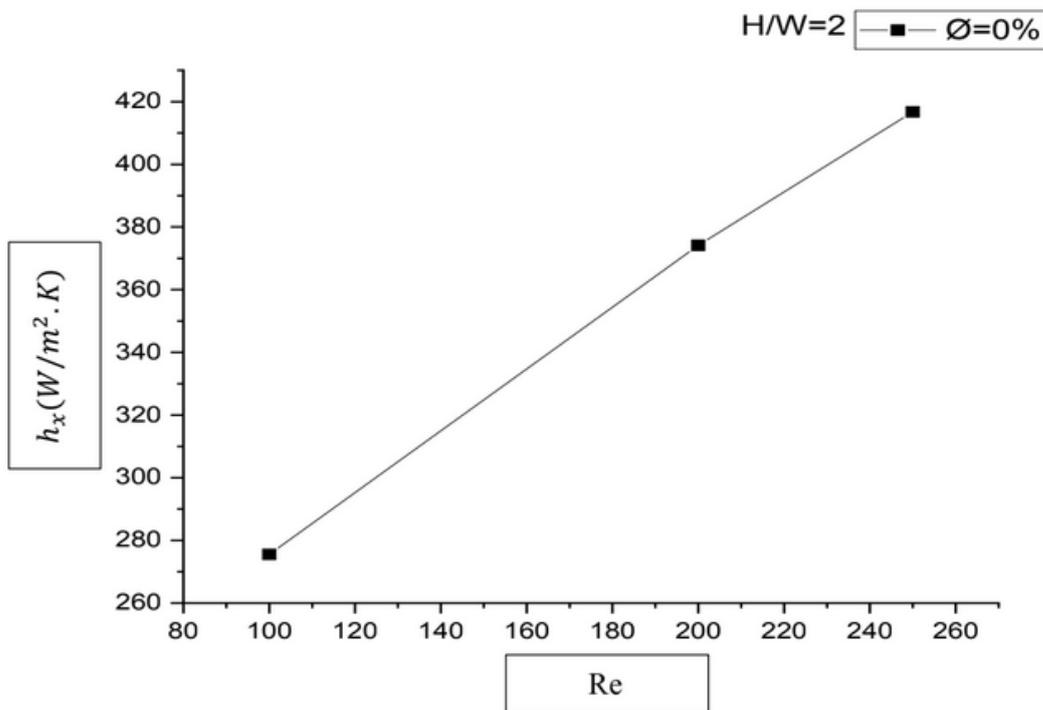


(a)

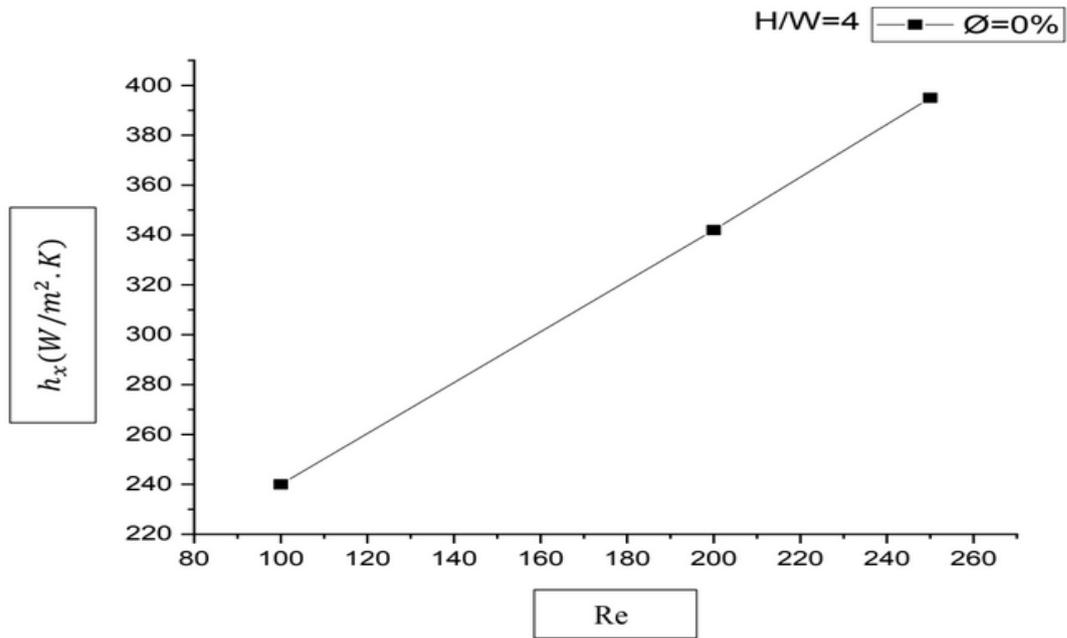


(b)

Figure IV. 2 Variation du nombre de Nusselt local pour  $H/W=2,4$



(a)

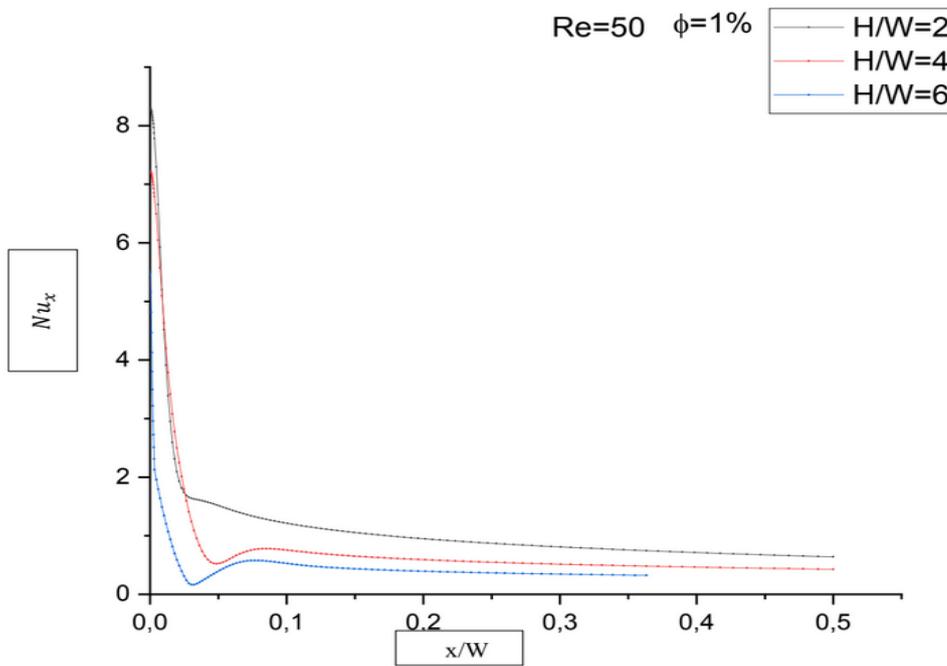


(b)

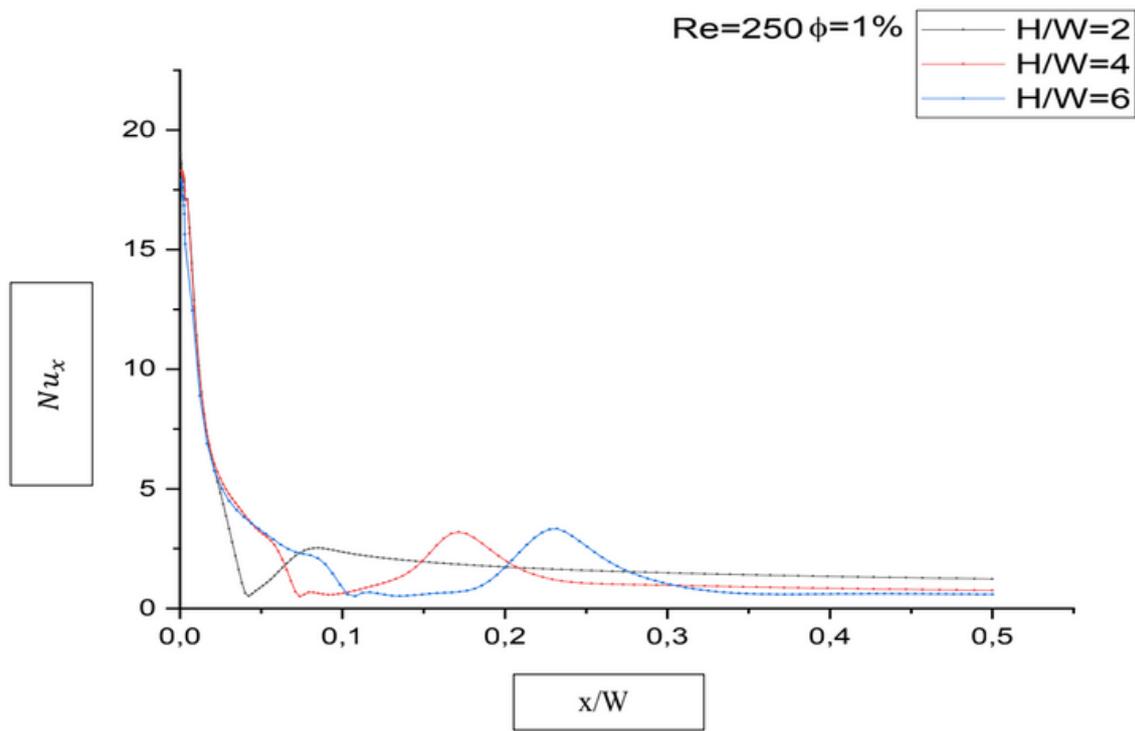
Figure IV. 3 Variation l'influence de coefficient convectif en fonction de nombre de Reynolds

On observe à partir des deux figures **Figure IV.2** et **Figure IV.3** une augmentation du nombre de Nusselt et de coefficient de convection lorsque le nombre de Reynolds est plus élevé.

**IV.3.2. L'EFFET DU RAPPORT DE H/W**



(a)



(b)

Figure IV. 4 Variation l'influence de la hauteur au long de la paroi (isotherme)

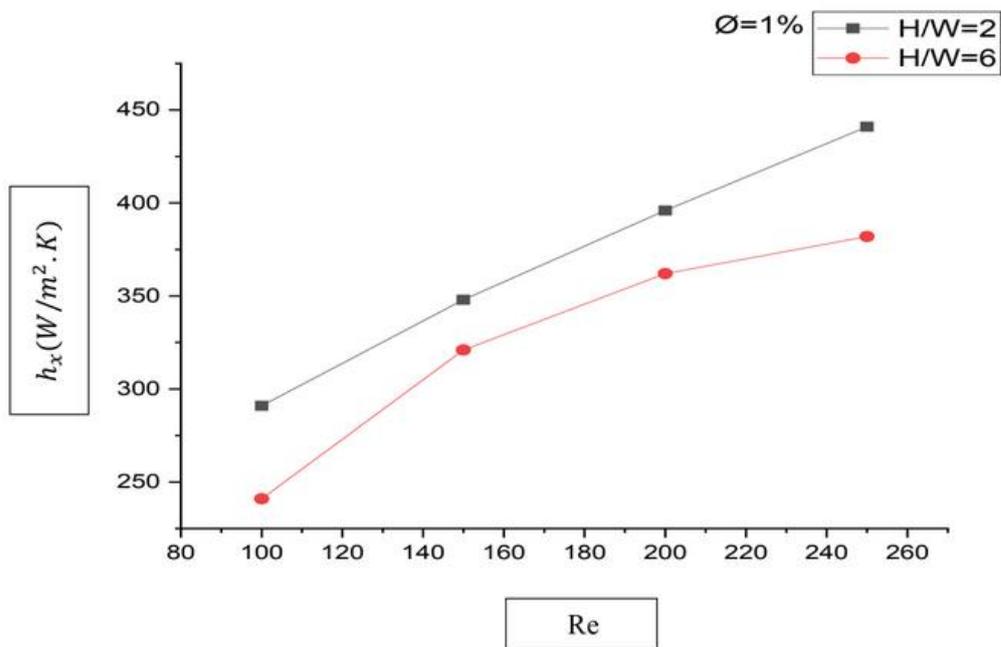


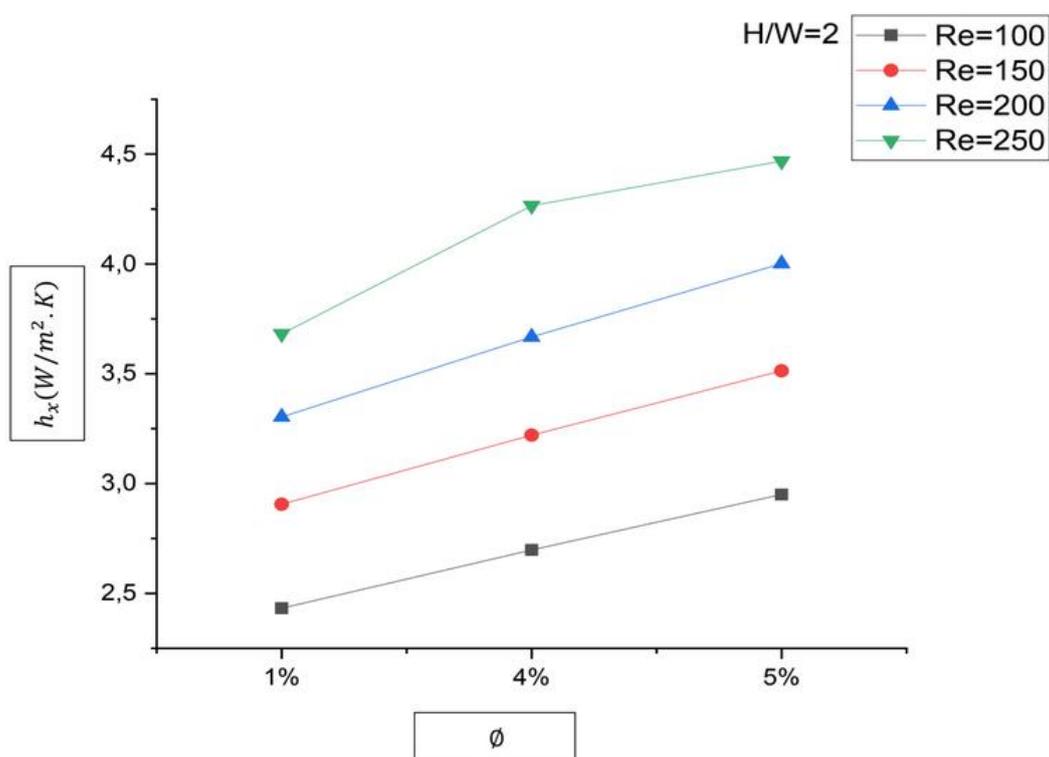
Figure IV. 5 Variation des résultats numériques de distribution du coefficient de transfert de chaleur pour une plage de Reynolds comprise entre [100-250]

Les résultats de transfert de chaleur sont illustrés sur la **Figure IV.4** et la **Figure IV.5** en termes de profils de nombre de Nusselt local et de coefficient convection thermique.

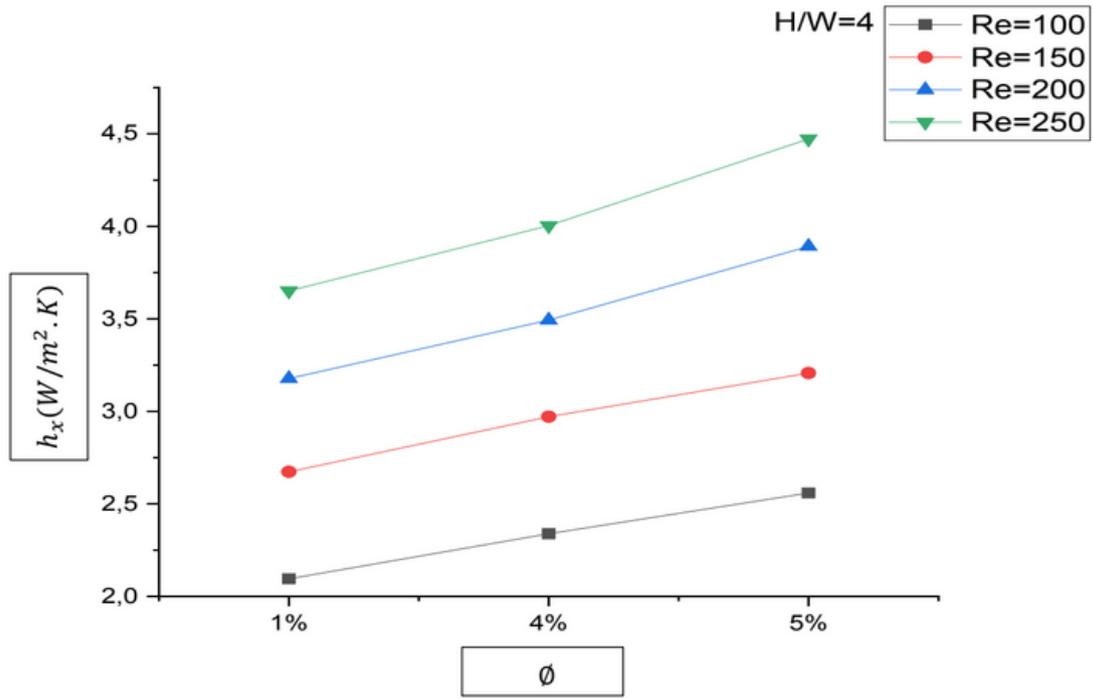
Le coefficient de convection thermique montre un comportement décroissant pour un rapport  $H/W$  plus conséquent. Cette diminution est constatée dans la **Figure IV.5**. Ce phénomène physique s'explique que lorsqu'un flux d'un jet parcourt une distance plus longue.

Par conséquent, le coefficient convectif sur la paroi diminue avec l'augmentation de la hauteur.

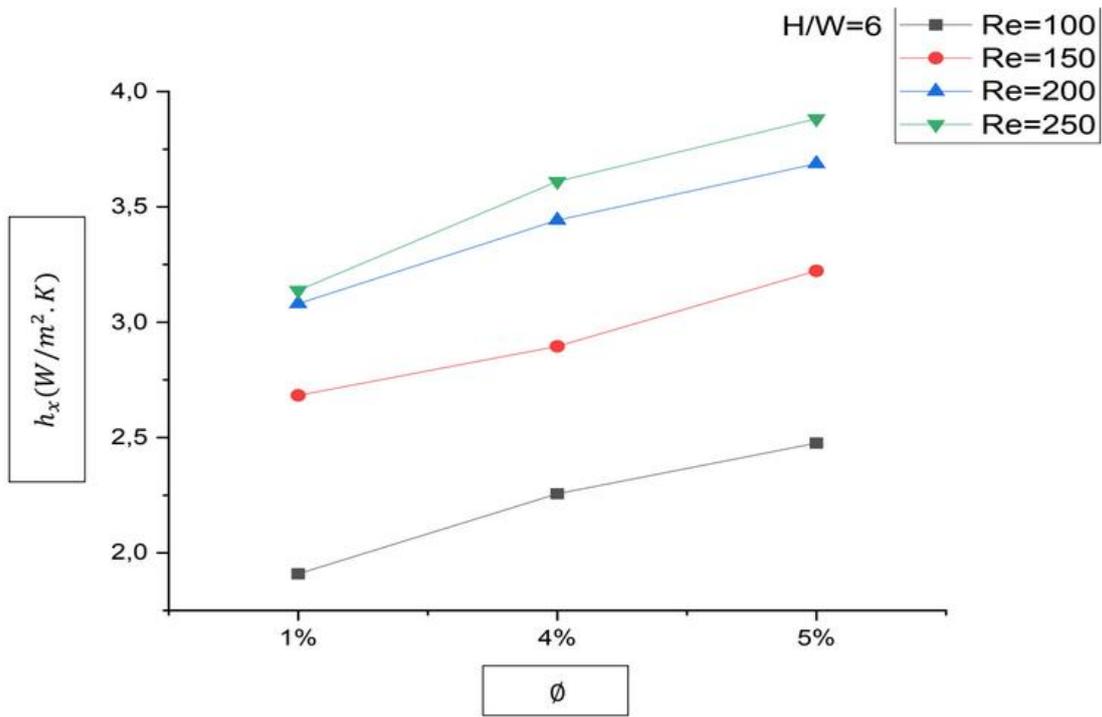
### IV.3.3 L'EFFET DE LA FRACTION DES NANOPARTICULES



(a)



(b)



(c)

Figure IV. 6 Variation de coefficient thermique en fonction de la fraction volumétrique de nanoparticule

On observe de la **Figure IV.6** l'augmentation le coefficient de transfert convectif en fonction de concentration de nanoparticule. Cette augmentation est due à l'ajout de nanoparticules dans le fluide de base.

#### IV.3.4. L'EFFET DE LA FRACTION VOLUMÉTRIQUE SUR LA PUISSANCE DE POMPAGE

Dans les applications d'échangeurs de chaleur ou dans le refroidissement des moteurs thermiques champ, la puissance de pompage ainsi que la perte de charge dans le système devrait être étudiés pour parvenir à une stratégie hautement efficace. La puissance de pompage est définie comme :

$$PP = Q_v \cdot \Delta P \quad (IV. 1)$$

Où  $Q_v$  représente le débit volumique ( $m^3/s$ ) de l'entrée du jet

( $\Delta P$ ) La différence de pression (Pascal)

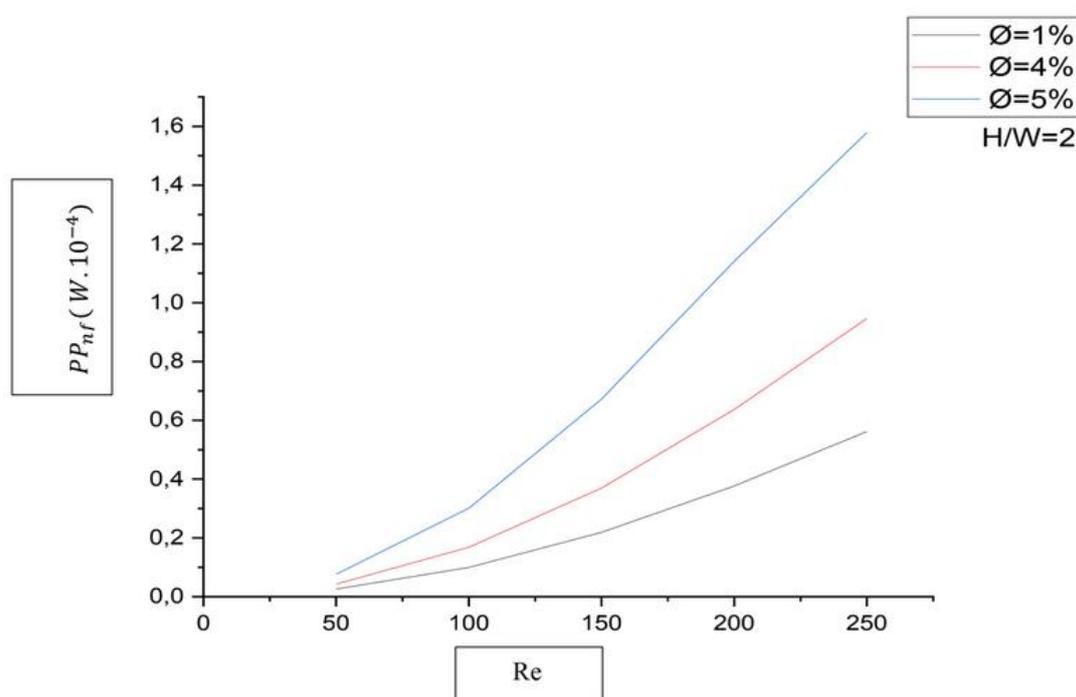


Figure V. 7 Profils de la puissance de pompage requise en fonction de Reynolds

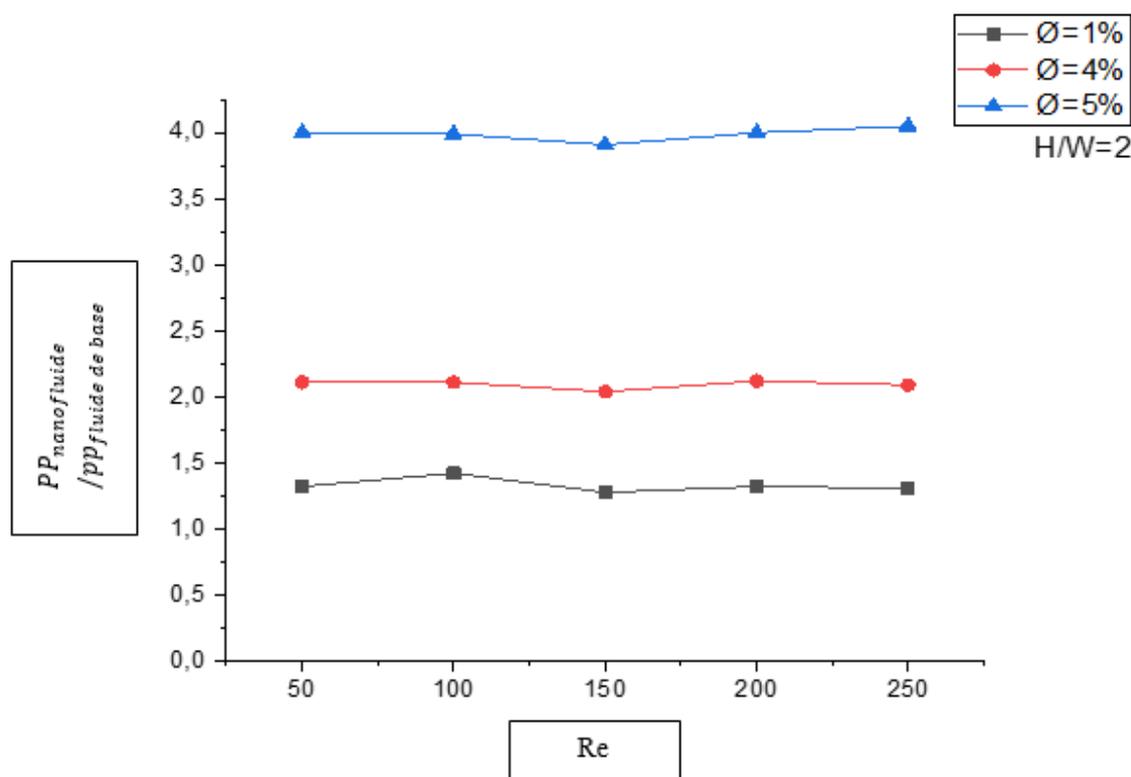


Figure IV. 8 Rapport de coefficient de pompage à plusieurs fractions des nanofluides a un fluide de base (eau pure)

Il a été observé dans la **Figure IV.7** que la puissance de pompage augmente avec le nombre de Reynolds et la fraction volumique. Ceci est attribué à une viscosité dynamique plus élevée du nanofluide en raison de l'ajout de nanoparticules dans le fluide de base.

On observe par ailleurs que dans la **Figure IV.8** que ce rapport ne semble pas dépendre de  $Re$ . En effet, pour  $100 \leq Re \leq 250$ , la puissance de pompage requise est de 1,32, 1,42, 4 fois supérieure aux valeurs calculées en cas de fluide de base (eau pure) pour  $\varphi = 1,4$  et 5%.

#### IV.3.5. CRITÈRE D'ÉVALUATION DE LA PUISSANCE

La performance globale des nanofluides peut être présentée en utilisant le critère d'évaluation des performances. Il est défini comme le rapport entre la chaleur et la puissance de pompage requise

$$PEC = \frac{\dot{m}C_p\Delta T}{PP} \quad (IV. 2)$$

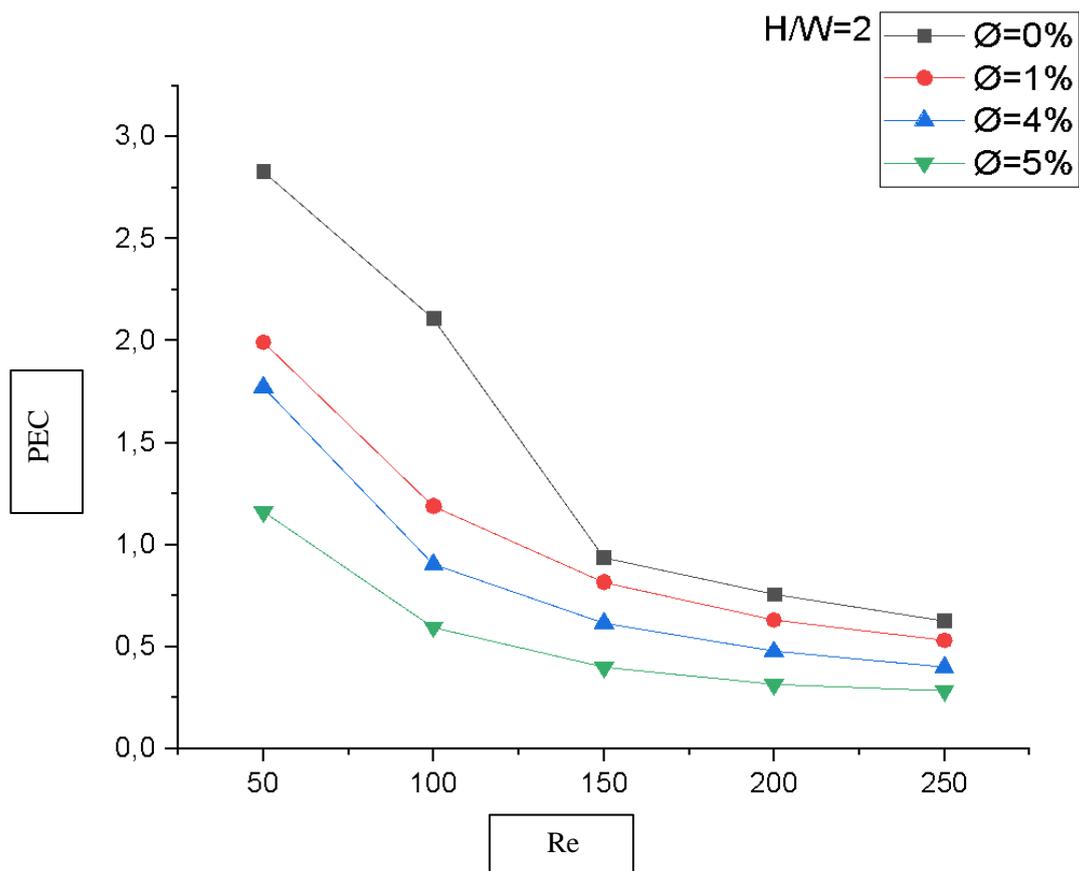


Figure IV. 9 Evaluation du critère de performance en fonction du nombre de Reynolds

On peut observer de la **Figure IV.9** une diminution des performances avec l'augmentation de fraction de nanoparticule plus élevée. Ceci est attribué aux puissances de pompage élevées dû à une importante perte de charge.

# **CONCLUSION GENERALE**

# CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire avait pour ambition de faire une étude de simulation numérique d'un nanofluide en jet impactant une paroi chauffée avec des nanoparticules d'oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ ) immergées dans l'eau pure comme fluide de base.

Le régime de l'écoulement est défini comme laminaire bidimensionnel monophasique avec des propriétés thermo physiques constantes.

Une plage de nombre Reynolds variant de 50 à 250 avec une large plage de la fraction volumique de nanoparticule ( $\phi = 0\%, 1\%, 4\%, 5\%$ ). Les effets de confinement sont étudiés en considérant les rapports H/W, allant de 2 à 6, le diamètre de nanoparticule est de 30 nm et le nombre de Prandtl de l'eau pure est 6.95.

Pour cela il a fallu définir l'équation de conservation de masse, d'énergie et les équations de Navier Stokes, dont des simplifications ont été adoptées.

Les conclusions tirées de cette étude sont résumées comme suit :

A titre de comparaison, les nanofluides à des fractions plus élevées donnant des meilleurs coefficients de transfert de thermique.

- Les effets du nombre de Reynolds

Lorsque le nombre de Reynolds est plus élevé on remarque une augmentation du coefficient de transfert convectif.

- Les effets du rapport de H/W

Lorsque le rapport H/W est plus conséquent, le coefficient transfert convectif sur la paroi diminue.

Malgré cela certains inconvénients sont à prévoir. Notamment une perte de charge importante en particulier avec les nanofluides qui impliquent une augmentation de puissance de pompage.

Cette étude ouvre la porte de recherche tel que :

- Effet d'un nanofluide non-Newtonien ;
- Etude d'un jet impactant pour un régime turbulent ;
- Des nouvelles conceptions d'échangeurs thermiques pour les domaines industriels.

## **REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE**

## REFERECENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Choi S.U.S, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*, FED-vol 231/MD-vol 66(1995), pp: 99–105.
- [2] Choi S.U.S, Z.G Zhang, W Yu, F.E Lockwood, E.A Grulke (2001), Anomalous thermal conductivity enhancement in nano-tube suspensions, *Applied Physics Letters* 79 2252–2254.
- [3] Das S.K, N Putta, P Thiesen, W Roetzel (2003), Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids, *ASME Trans. J. Heat Transfer* 125 567–574.
- [4] Xuan Y, Q Li, Heat transfer enhancement of nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Transfer* 21(2000) 58–64.
- [5] Xuan Y, Q Li, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, *Journal of Heat Transfer* (2003)125 151–155.
- [6] Dittus ,F.W. ,and Boelter ,L.M.K. ,*Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type*, University of California Publications in Engineering, vol.2,pp.443–461,1930.
- [7] ChienH.T, C.I Tsai, P.H Chen, P.Y Chen, Improvement on thermal performance of a disk-shaped miniature heat pipe with nanofluid, in: *ICEPT (2003), Fifth International Conference on Electronic Packaging Technology, Proceedings (IEEE Cat. No.03EX750)*, IEEE, Shanghai,China, p. 389.
- [8] Tsai C.Y, H.T Chien, P.P Ding, B Chan, T.Y Luh, P.H Chen, Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance, *Material Letters* 58(2004) 1461–1465.
- [9] Wen D, Y. Ding, Effective thermal conductivity of aqueous suspensions of carbon nanotubes (carbon nanotube nanofluids), *Journal of Thermo-physics and Heat Transfer* 18 (4) (2004) 481–485.
- [10] Ding Y, H Alias, D Wen, R.A Williams (2005), Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes , *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 240–250.
- [11]Assael M.J, C.F Chen, I.N Metaxa,W.A Wakeham, Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water, in: *15th Symposium on Thermophysical Properties*, National Institute of Standards(2003), University of Colorado, Boulder, USA.
- [12] Xie H, H. Lee, W. Youn, M. Choi (2003), Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities, *Journal of Applied Physics* 94 (8) 4967–4971.
- [13] Wen D, Y. Ding, Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids Entrance region under laminar flow conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47 (24) (2004) 5181.

## REFERECENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [14] Davis R. H, The Effective Thermal Conductivity of a Composite Material with Spherical Inclusions. *International Journal of Thermophysics* 7(1986): 609-620.
- [15] Hwang Y.J, Y.C. Ahn, H.S. Shin, C.G. Lee, G.T. Kim, H.S. Park, J.K.Lee, Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids, *Current Appl. Phys.* 6 (2006) 1068–1071.
- [16] Murshed S.M.S, K.C Leong, C Yang, enhanced thermal conductivity of TiO<sub>2</sub>–water based nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences* 44 (4) (2005)367–373.
- [17] Wen D, Y. Ding, Formulation of nanofluids for natural convective heat transfer applications, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 26 (6) (2005) 855–864.
- [18] Das S. K, N Putra, and W Roetzel, Pool Boiling Characteristics of Nano-Fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46(2003.b): 851-862.
- [19] Davis R. H, The Effective Thermal Conductivity of a Composite Material with Spherical Inclusions. *International Journal of Thermophysics* 7(1986): 609-620.
- [20] Fourier, J. *Théorie Analytique de la Chaleur*. Paris: Chez Firmin Didot. (1822).
- [21] Serge PIPERNO, *Systèmes hyperboliques instationnaires et méthodes de type DG*, (Cermics - ENPC), 2007.
- [22] K.Mensouri H.Lamraoui R.Saci Numerical investigation on fluid dynamic and thermal behavior of a non-Newtonian Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–water nanofluid flow in a confined impinging slot jet
- [23] O. Manca D. Ricci S. Nardini G. Di Lorenzo Thermal and fluid dynamic behaviors of confined laminar impinging slot jets with nanofluids.
- [24] T.Bercherrawy (2012) *Physique Edition Hecht Traduction de la 1<sup>ère</sup> Edition américaine*
- [25] Rivière Nicolas, “Etude expérimentale d’une injection turbulente: application au jet impactant une surface libre”, Thèse de Docteur, Ecole Doctorale des Sciences Physiques et de l’Ingénieur, Université de Bordeaux I, 2 avril 2008.
- [26] Martin H., 'Heat and Mass Transfer Between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces', *Advances in Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 1-60, 1977.
- [27] Webb B.W. and Ma C.F., 'Single-Phase Liquid Jet Impingement Heat Transfer', *Advances in Heat Transfer*, Vol. 26, pp. 105-217, 1995.
- [28] Lee J. and Lee S-J., 'The Effect of Nozzle Aspect Ratio on Stagnation Region Heat Transfer Characteristics of Elliptic Impinging Jet', *Int. J. Heat and Mass Transf.*, 43, pp. 555-575, 2000a.
- [29] Brevet P., Dorignac E. et Vullierme J.J., 'Refroidissement par Impact de Jets : Application aux Aubes de Turbines de Turboréacteurs', *Journée Thématique de la Société Française de Thermique*, Paris, 14 Mars 2001.

## REFERECENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [30] Marty P., 'Transferts de Chaleur et de Masse dans les Jets', Journée Thématique de la Société Française de Thermique, Paris, 14 Mars 2001.
- [31] D. Benmouhoub Simulation Numérique D'un Jet Turbulent Impactent Une Parois, Université Des Sciences Et De La Technologie Houari Boumediene Faculté De Physique 2011. **[Magistère]**
- [32] A. Derdouri Etude Par La Programmation D'un Jet Rond Turbulent Impactant Une Plaque Plane Circulaire Université Constantine 1 Faculte Des Sciences De La Technologie Département De Génie Mécanique.
- [33] S.KLALECHE Simulation numérique de la convection forcée entre deux disques en présence d'un nanofluide – Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou 2015. **[Master]**
- [34] E.E. (Stathis) Michaelides, Nanofluidics: Thermodynamic and Transport Properties, Springer International Publishing Switzerland. 2014.
- [35] S .E.B. Maïga et al. / Int .J Heat and Fluid Flow 26 (2005) 530-546.