

الجمهورية الجزائرية
الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبو بكر بلكايد
تلمسان – بلقاييد
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : génie mécanique

Spécialité : énergétique

Par : LAFENDI Mehdi Issam & BENZADI Akram Nayel

Sujet

Simulation numérique du comportement thermo-hydraulique d'un nanofluide en écoulement pulsé dans un canal sinusoïdal.

Soutenu publiquement, le 21 / 06 / 2026 devant le jury composé de :

M/ ALIANE Abdennour	MCB	Université de Tlemcen	Président
Mme/ MOSTEFAOUI Amina	MCB	Université de Tlemcen	Encadrante
Mme/ SARI HASSOUN Hind	MAA	Université de Tlemcen	Examinatrice
M/ SAIM Rachid	Pr	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2025 /2026

Remerciement

En premier lieu, nous rendons grâce à Allah, le Tout Miséricordieux, pour nous avoir accordé la santé, la patience et la force nécessaires tout au long de ce parcours universitaire.

Je tiens ensuite à exprimer ma profonde gratitude envers nos familles. À nos parents, nos frères et sœurs, et l'ensemble de nos proches, pour leur soutien inconditionnel, leurs encouragements constants, leurs sacrifices et leur amour qui ont été notre pilier tout au long de ces années d'études

Je remercie également le Professeur BENDERMEEL Othman pour son aide précieuse, son soutien constant et ses contributions significatives qui ont grandement enrichi ce travail.

Mes sincères remerciements vont également à nos encadreur, Mme. MOSTEFAOUI Amina et Mr. SAIM Rachid, pour leur encadrement rigoureux, leurs précieux conseils, leur disponibilité et leur accompagnement tout au long de la réalisation de ce travail. Leurs orientations et leurs remarques constructives ont grandement contribué à la qualité de cette thèse.

Que Dieu vous récompense tous pour votre générosité et votre bienveillance.

Merci à tous.

Dédicace

A nos chers parents

A nos frères et sœurs

A nos amis proches

Avec tout notre amour et notre reconnaissance

تقدم هذه الدراسة تحليلاً عددياً للأداء الحراري الهيدروليكي لسائل نانوي ماء- Al_2O_3 يتدفق داخل قناة جيبيية (sinusoidal) تحت تدفق نبضي (نظام مضطرب، $\text{Re} = 4000$ ، نموذج الاضطراب $k-\omega$ SST). إضافة الجسيمات النانوية (من 0 إلى 5%) تحسن بشكل كبير نقل الحرارة: يزداد رقم نوسلت ومعامل نقل الحرارة بالحمل الحراري بنسبة تصل إلى 20-29% عند تركيز 5%. زيادة رقم ستروغال (من 0.11 إلى 2.07) تعزز آليات الخلط وتحسن الكفاءة الحرارية الهيدروليكية الإجمالية للنظام. يسمح الجمع بين التدفق النبضي والسائل النانوي بتحسين الأداء الحراري بشكل ملحوظ مع الحفاظ على خسائر ضغط مقبولة. نستنتج ان هذه الدراسة تبرز فوائد هذا النهج لتحسين التبريد في القنوات الجيبية.

الكلمات المفتاحية :

قناة جيبيية، التدفق النبضي، نانوسائل، نقل الحرارة، اضطراب.

Résumé

Cette étude analyse numériquement les performances thermo-hydrauliques d'un nanofluide Al_2O_3 -eau circulant dans un canal sinusoïdal sous écoulement pulsé (régime turbulent, $Re = 4000$, modèle $k-\omega$ SST).

L'ajout de nanoparticules (0 à 5 %) améliore fortement le transfert de chaleur : augmentation du nombre de Nusselt et du coefficient de convection jusqu'à 20-29 % à 5 % de concentration. L'augmentation du nombre de Strouhal (0,11 à 2,07) renforce les mécanismes de mélange et améliore l'efficacité thermo-hydraulique globale du système.

La combinaison écoulement pulsé + nanofluide permet d'améliorer significativement les performances thermiques tout en gardant des pertes de charge acceptables.

On conclue que cette étude démontre l'intérêt de cette approche pour optimiser le refroidissement dans les canaux sinusoïdaux.

Mots clés : Canal sinusoïdal, écoulement pulsé, nanofluide, transfert de chaleur, turbulence

Abstract

This study presents a numerical analysis of the thermo-hydraulic performance of an Al_2O_3 -water nanofluid flowing in a sinusoidal channel under pulsed flow (turbulent regime, $\text{Re} = 4000$, $k-\omega$ SST turbulence model).

The addition of nanoparticles (0 to 5%) significantly enhances heat transfer: the Nusselt number and convection heat transfer coefficient increase by up to 20–29% at a 5% concentration.

Increasing the Strouhal number (0.11 to 2.07) strengthens mixing mechanisms and improves the overall thermo-hydraulic efficiency of the system.

The combination of pulsed flow and nanofluid significantly improves thermal performance while maintaining acceptable pressure losses.

We conclude that, this study highlights the benefits of this approach for optimizing cooling in sinusoidal channels.

Keywords:

Sinusoidal channel, Pulsating flow, Nanofluid , Heat transfer, Turbulence.

Table des matières

Table des matières	7
Liste des figures	10
Liste des tableaux	13
Nomenclature	15
Introduction générale	20
Chapitre 1 Etude bibliographique des écoulements pulsés dans les canaux	23
1.1 Introduction	24
1.2 Définition des canaux :	24
1.2.1 Principe Fondamental :	25
1.2.2 Types des canaux :	25
1.3 Matériaux de Construction	30
1.3.1 métaux	30
1.3.2 matériaux non métalliques	30
1.4 Ecoulement pulsée:	31
1.4.1 Définition de l'écoulement pulsé :	31
1.4.2 Types d'écoulements pulsés	31
1.4.3 Méthodes d'intensification dans un canal	31
1.5 Synthèse des travaux antérieurs (Revue de la littérature et synthèse bibliographique)	35
1.6 Conclusion	43
Chapitre 2 Etude sur les Nanofluides	45
2.1 Introduction	46
2.2 Définition et Composition	46
2.2.1 Pourquoi utiliser les nanofluides ?	46
2.3 Classification des nanofluides	47
2.3.1 Classification selon la nature des nanoparticules	47
2.3.2 Classification selon la nature du fluide de base	48
2.3.3 Classification selon le nombre de types de nanoparticules	48
2.3.4 Classification selon la forme géométrique des nanoparticules	49
2.4 Méthodes de Préparation	49
2.4.1 Méthode en une étape (One-step method)	49
2.4.2 Méthode en deux étapes (Two-step method)	49
2.5 Stabilité des Nanofluides	50
2.5.1 Pourquoi la stabilité est-elle essentielle ?	50
2.5.2 Méthodes de caractérisation de la stabilité	50
2.6 Propriétés Thermophysiques	52
2.6.1 Fraction volumique (ϕ)	52
2.6.2 Diffusivité thermique	52

2.6.3 Masse volumique (densité).....	52
2.6.4 Chaleur spécifique (capacité calorifique massique)	52
2.6.5 Conductivité thermique	53
2.6.6 Viscosité dynamique	54
2.7 Effet des nanofluides sur l'amélioration du transfert de chaleur.....	54
2.8 Conclusion.....	55
Chapitre 3 Description du problème physique étudié	56
3.1 Introduction	57
3.2 Description du problème étudié :	57
3.3 Formulation mathématique :	58
3.3.1 Hypothèses de calcul :.....	58
3.3.2 Équations gouvernantes :.....	59
3.3.3 Modélisation de la turbulence (Modèle k- ω SST) :	59
3.3.4 Propriétés thermo-physiques du fluide :.....	61
3.3.5 Grandeurs caractéristiques du système.....	61
3.4 Conditions aux limites :.....	62
3.5 Étude du maillage :.....	63
3.6 Condition d'entrée pulsée via UDF :.....	64
3.7 Principe de la méthode des volumes finis et critère de convergence :	64
3.8 Conclusion.....	65
Chapitre 4 Résultats et Discussion	66
4.1 Introduction	67
4.2 Validation du modèle numérique	67
4.3 Résultats et discussions	68
4.3.1 Cas de fraction volumique pour l'eau pure	68
4.3.2 Impact de la fraction volumique des Nanoparticules.....	70
4.3.3 Coefficient de transfert de chaleur par convection (h)	73
4.3.4 Nombre de Nusselt moyen	74
4.3.5 Facteur de frottement.....	75
4.3.6 Indice de performance thermo-hydraulique η	76
4.4 Contours de température	77
4.5 Contours de vitesse axiale	78
4.6 Vecteur de vitesse axiale	80
4.7 Lignes de courants.....	82
Conclusion et perspective.....	84
Références bibliographiques.....	87

Liste des figures

Figure 1.1: Ecoulement dans une canal circulaires. [1].....	26
Figure 1.2: Ecoulement laminaire dans une canal rectangulaire. [2]	26
Figure 1.3: Canal elliptique. [3]	27
Figure 1.4: Schéma d'une conduite rectiligne avec profils de vitesse pleinement développés en régimes d'écoulement laminaire et turbulent. [4]	27
Figure 1.5: Représentation schématique d'un écoulement convergent et tourbillonnaire dans un tuyau mince. [5]	28
Figure 1.6: Ecoulement à travers un conduit divergent. [6]	28
Figure 1.7: Ecoulement dans un canal ondulé. [7]	28
Figure 1.8: Ecoulement de l'eau dans un canal simple. [8]	29
Figure 1.9: Schéma de principe d'un échangeur de chaleur à double tube. [9]	29
Figure 1.10: Schéma conceptuel d'un écoulement monophasique pulsé dans un tube. [10]	32
Figure 1.11: Schéma conceptuel d'un écoulement diphasique pulsé (liquide et gaz) dans un tube . [11]	33
Figure 1.12 : Schémas conceptuels des dispositifs de génération de pulsations mécaniques [12].....	34
Figure 1.13: Principe de génération de pulsations par tube collable. [13].....	34
Figure 1.14: Schéma d'un cylindre carré chauffé dans un canal. [14].....	35
Figure 1.15: Géométrie d'un mini-canal ondulé.. [15]	36
Figure 1.16 : Géométrie du canal. [16].....	36
Figure 1.17: Schéma de l'installation expérimentale. [17]	37
Figure 1.18: Principe de génération de pulsations auto-entretenues par tube collable [13]	38
Figure 1.19: Démonstration schématique de l'installation expérimentale. [7]	38
Figure 1.20: Géométrie de l'artère sténosée et conique. [18]	39
Figure 1.21: Schéma du dispositif expérimental . [19].....	39
Figure 1.22: Illustration de (a) l'appareil expérimental PIV [20]	40
Figure 1.23 : Schéma de dynamique des fluides numériques montrant les domaines de simulation et toutes les zones séparément. [21].....	41
Figure 1.24: Deux configurations du canal plan et du canal rétréci avec un rétrécissement unilatéral.. [22]	42
Figure 1.25: Modèle géométrique. [23].....	42
Figure 1.26: Schéma du modèle géométrique. [24].....	43
Figure 2.27: Préparation d'un nanofluide par la méthode de dépôt en phase vapeur en une seule étape. [25]	49
Figure 2.28: Préparation de nanofluide à l'aide d'une méthode en deux étapes. [26].....	50
Figure 2.29: Variations du potentiel zêta en fonction des concentrations de nanofluide Al ₂ O ₃ /eau à différents temps de sonication sans ajout d'acide/base. [27]	51
Figure 3.30: Schéma bidimensionnel de la section d'essai du canal sinusoïdal à plaques ondulées. ...	58

Figure 3.31: Profils de la vitesse axiale en fonction de la position pour différentes tailles de maillage	63
Figure 3.32: Évolution détaillée des profils de vitesse dans l'intervalle $0.4 \leq x \leq 0.55$	64
Figure 4.33: Comparaison avec les travaux de Nazım Kurtulmuş et Besir Sahin [7] , de Nombre de Nusselt moyen , en fonction du nombre de Strouhal St.	68
Figure 4.34: Profile de vitesse axiale de l'eau pure pour sept nombre de Strouhal à $x=L/2$	69
Figure 4.35: Profils de température de l'eau pure pour les sept nombres de Strouhal	69
Figure 4.36: Profils de vitesse axiale en fonction de la position pour le nanofluide à 1% de fraction volumique.....	70
Figure 4.37: Profils de température de nanofluide Al_2O_3 -eau ($\phi = 1\%$) pour différents nombres de Strouhal.	70
Figure 4.38: Comparaison de profils de température pour $St=0,206$ entre l'eau pure et le nanofluide Al_2O_3 -eau à 1%.....	71
Figure 4.39: Comparaison des profils de vitesse axiale entre l'eau pure et le nanofluide Al_2O_3 -eau (1 %) pour un nombre de Strouhal $St=0,206$	72
Figure 4.40: Évolution du nombre de Nusselt moyen Nu en fonction du nombre de Strouhal St pour l'eau pure et différentes fractions volumiques de nanofluide Al_2O_3 -eau (1%, 3 % et 5 %).	74
Figure 4.41: Évolution du coefficient de convection h ($W/m^2 \cdot K$) en fonction du nombre de Strouhal St pour l'eau pure et les nanofluides Al_2O_3 -eau à 1 %, 3 % et 5 %.	73
Figure 4.42: Évolution du facteur de frottement f en fonction du nombre de Strouhal St pour différentes fractions volumiques de nanofluide Al_2O_3 -eau ($\phi = 1\%$, 3 % et 5 %) et de l'eau pur	75
Figure 4.43: Évolution de l'indice de performance thermo-hydraulique η en fonction du nombre de Strouhal St pour les nanofluides Al_2O_3 -eau à 1 %, 3 % et 5 % et eau pure (référence : eau pure dans un canal lisse)	76
Figure 4.44: Évolution temporelle ($t = 10, 20, 30, 50$ s) des contours de température dans la 7 ^{ème} ondulation du canal sinusoïdal pour $St=0,206$ – comparaison entre l'eau pure et nanofluides Al_2O_3 -eau à 1 %, 3 % et 5 %.	77
Figure 4.45: Évolution temporelle ($t = 10, 20, 30, 50$ s) des contours de vitesse axiale (m/s) dans la 7 ^{ème} ondulation du canal sinusoïdal pour $St=0,206$, avec une comparaison entre l'eau pure et nanofluides Al_2O_3 -eau à 1%, 3% et 5%.....	79
Figure 4.46: Évolution temporelle ($t = 10, 20, 30, 50$ s) des vecteurs de vitesse axiale dans la 7 ^{ème} ondulation du canal sinusoïdal pour $St=0,206$ – comparaison entre l'eau pure et les nanofluides Al_2O_3 -eau à 1 %, 3 % et 5 % (même échelle de vitesse).	81
Figure 4.47: Lignes de courant (pathlines) colorées par le débit massique (kg/s) dans la 7 ^{ème} ondulation du canal sinusoïdal pour $St=0,206$ avec une comparaison entre l'eau pure et les nanofluides Al_2O_3 -eau à 1 %, 3 % et 5 %, aux instants $t=30, 50, 70$ et 90 secondes.	82

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Paramètres géométriques du canal sinusoïdal utilisé dans l'étude.	58
Tableau 3.2 : Propriétés thermo-physiques de l'eau à et de nanoparticules à 20°C.....	61

Nomenclature

Symboles latins

A : Amplitude de pulsation

a : Amplitude de l'onde sinusoïdale (m)

C_p : Capacité calorifique massique (chaleur spécifique) (J/kg·K)

D_h : Diamètre hydraulique (m)

f : Fréquence de pulsation (Hz)

F_f : Facteur de frottement

F₁, F₂ : Fonctions de mélange du modèle *k- ω SST*

H : Hauteur du canal (m)

H_{max} : Hauteur maximale du canal (m)

H_{min} : Hauteur minimale du canal (m)

H_{moy} : Hauteur moyenne du canal (m)

h : Coefficient de transfert thermique par convection (W/m²·K)

I : Intensité turbulente (%)

K : Énergie cinétique turbulente (m²/s²)

L : Longueur totale (m)

l : Longueur d'onde

Nu_{moy} : Nombre de Nusselt moyen

P : Pression (Pa)

P_k : Terme de production d'énergie cinétique turbulente (m²/s³)

Pr : Nombre de Prandtl

q_w : Flux de chaleur constant (W/m²)

R_e : Nombre de Reynolds

S_t : Nombre de Strouhal

T : Température (K ou °C)

T_b : Température « bulk » du fluide (K)

T_w : Température de paroi (K)

t : Temps (s)

u, v : Composantes de la vitesse selon x et y (m/s)

u', v' : Fluctuations turbulentes de vitesse (m/s)

u_{moy} : Vitesse moyenne (m/s)

W : Largeur du canal (m)

ρ_{nf} : Densité nanofluide

r : Coordonnée radiale (m)

u_x : Vitesse axiale (m/s)

X : Coordonnée axiale (m)

$u(t)$: vitesse de pulsation

V : Volume (m³)

ΔP : chute de pression (Pa)

S : Taux de déformation (module, $S=2S_{ij}S_{ij}$) — Unité : 1/s

S_{ij} : Tenseur du taux de déformation moyen — Unité : 1/s

y : Distance à la paroi la plus proche — Unité : m

P_k : Production limitée de k

β^* : Constante de destruction de k (valeur fixe : 0,09)

β : Constante de destruction de ω

γ : Constante de production pour l'équation de ω

a_1 : Constante de Bradshaw (valeur fixe : 0,31)

σ_k : Nombre de Prandtl turbulent pour le transport de k

σ_ω : Nombre de Prandtl turbulent pour le transport de ω (modèle $k\omega$)

$\sigma_{\omega 2}$: Nombre de Prandtl pour ω dans le modèle k (utilisé pour le mélange)

F_1 : Fonction de mélange principale

F_2 : Deuxième fonction de mélange (utilisée pour limiter la viscosité turbulente dans la couche limite)

Φ_1 : Argument de la fonction de mélange F_1

$CD_{k\omega}$: Terme de diffusion croisée limitée (borné inférieurement à 10^{-10})

Symboles grecs

α : Diffusivité thermique (m^2/s)

β, σ, α_1 : Constante du modèle de turbulence SST

η : Indice de performance thermo-hydraulique

λ : Conductivité thermique ($W/m \cdot K$)

μ : Viscosité dynamique ($Pa \cdot s$)

μ_t : Viscosité turbulente ($Pa \cdot s$)

ν : Viscosité cinématique (m^2/s)

ρ : Masse volumique (kg/m^3)

ϕ : Fraction volumique de nanoparticules (%)

τ_{ij} : Tenseur des contraintes de Reynolds (Pa)

ω : Fréquence spécifique de dissipation (s^{-1})

Ω : Module de la vorticité (s⁻¹)

Abr vations

2D : Bidimensionnel

CFD : Mécanique des fluides numérique (Computational Fluid Dynamics)

FVM : Méthode des volumes finis (Finite Volume Method)

LES : Simulation des grandes échelles (Large Eddy Simulation)

PEC : Critère de performance énergétique (Performance Evaluation Criterion)

PIV : Vélocimétrie par images de particules (Particle Image Velocimetry)

RANS :  quations de Navier-Stokes moyennées (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)

SIMPLEC : Algorithme de couplage pression-vitesse

SST : Modèle de turbulence Shear Stress Transport

TPF : Facteur de performance thermique (Thermal Performance Factor)

UDF : Fonction définie par l'utilisateur (User Defined Function)

URANS :  quations de Navier-Stokes moyennées instationnaires

Indices

in : Entrée (inlet)

moy : Moyen

nf : Nanofluide

np : NanoParticule

w : Paroi (wall)

eff : effective

Introduction générale

L'amélioration des performances thermiques des systèmes énergétiques et industriels représente aujourd'hui un enjeu majeur dans le contexte de la transition énergétique, de la réduction des consommations et de la compacité croissante des équipements. Face à l'augmentation constante des densités de flux thermiques à évacuer, les échangeurs de chaleur, les systèmes de refroidissement et les conduites industrielles doivent faire l'objet d'une optimisation continue du transfert de chaleur.

Parmi les techniques d'intensification thermo-hydraulique, l'association de méthodes actives (comme les écoulements pulsés) et de méthodes passives (comme l'utilisation de géométries ondulées et de nanofluides) constitue une voie particulièrement prometteuse. Les écoulements pulsés permettent de perturber périodiquement la couche limite dynamique et thermique, favorisant ainsi le mélange radial du fluide et l'amélioration du transfert de chaleur, même à faible nombre de Reynolds. Parallèlement, les canaux sinusoïdaux génèrent naturellement des tourbillons de recirculation qui renforcent ces mécanismes. Enfin, les nanofluides, suspensions de nanoparticules dans un fluide de base, offrent une augmentation significative de la conductivité thermique effective tout en restant compatibles avec les écoulements pulsés.

Malgré les avancées individuelles dans chacun de ces domaines, les études combinant simultanément écoulement pulsé, géométrie sinusoïdale et nanofluides restent encore limitées, particulièrement en régime turbulent. C'est dans ce cadre que s'inscrit la présente étude, qui vise à analyser numériquement l'effet synergique de ces trois éléments sur les performances thermo-hydrauliques d'un canal sinusoïdal.

Objectif principal de ce travail : évaluer l'influence de la fraction volumique des nanoparticules (Al_2O_3 -eau), de la fréquence et de l'amplitude de pulsation sur le nombre de Nusselt, le facteur de frottement et l'indice de performance thermo-hydraulique (η).

La mémoire est structurée en quatre chapitres complémentaires :

Le premier chapitre présente l'état de l'art bibliographique sur les écoulements pulsés dans les canaux, avec un accent particulier sur les géométries sinusoïdales. Il définit les concepts fondamentaux, les différents types de canaux, les mécanismes d'intensification thermique (actives et passives) ainsi que les principaux paramètres adimensionnels (Reynolds, Strouhal, amplitude, etc.). Une revue détaillée des travaux antérieurs met en lumière les acquis et les limites de la littérature.

Le deuxième chapitre est consacré aux nanofluides. Il expose leur définition, leurs classifications (selon la nature des nanoparticules, du fluide de base, de la forme géométrique et du comportement rhéologique), les méthodes de préparation, les problèmes de stabilité, ainsi que les modèles des propriétés thermophysiques (conductivité thermique, viscosité, densité, chaleur spécifique). Ce chapitre souligne le potentiel des nanofluides tout en rappelant les défis liés à leur mise en œuvre.

Le troisième chapitre décrit le problème physique étudié et la modélisation numérique. Il détaille la géométrie du canal sinusoïdal (inspirée de l'étude expérimentale de Kurtulmuş et Şahin), les hypothèses simplificatrices, les équations gouvernantes (URANS), le modèle de turbulence $k-\omega$ SST, les conditions aux limites, la génération du signal pulsé via UDF, ainsi que l'étude d'indépendance du maillage.

Le quatrième chapitre est consacré à la validation du modèle numérique développé ainsi qu'à l'analyse détaillée des résultats obtenus. Dans un premier temps, le modèle est validé par comparaison avec des données expérimentales issues de la littérature. Ensuite, des simulations sont réalisées pour différentes fractions volumiques de nanofluide Al_2O_3 -eau et pour plusieurs conditions de pulsation. L'influence de ces paramètres sur les performances thermo-hydrauliques est étudiée à travers l'évolution du nombre de Nusselt, du coefficient de convection, du facteur de frottement et de l'indice de performance. Enfin, une analyse des conditions optimales de fonctionnement est présentée afin de mettre en évidence les configurations les plus favorables au transfert de chaleur.

Cette démarche apporte une contribution numérique à l'étude couplée des écoulements pulsés et des nanofluides dans les canaux sinusoïdaux. Elle permet d'approfondir la compréhension des mécanismes physiques mis en évidence par les résultats de simulation, tout en proposant des pistes d'optimisation des performances thermo-hydrauliques. Ainsi, elle contribue à l'identification des configurations les plus favorables au développement de futurs échangeurs de chaleur compacts et efficaces.

Chapitre 1

Etude bibliographique des écoulements pulsés dans les canaux

1.1 Introduction

L'étude des écoulements pulsés dans les géométries canalisées constitue aujourd'hui un domaine important en mécanique des fluides et en transfert thermique. Dans de nombreuses applications industrielles et énergétiques, les écoulements internes ne sont pas strictement stationnaires mais présentent des variations périodiques de vitesse, de pression ou de débit au cours du temps. Ces oscillations, appelées pulsations, modifient profondément la structure de l'écoulement et influencent les phénomènes thermo-hydrauliques.

Parmi les différentes configurations étudiées, les canaux sinusoïdaux occupent une place particulière en raison de leur capacité à perturber l'écoulement et à favoriser le mélange du fluide. La géométrie ondulée génère des zones de recirculation, des structures tourbillonnaires et des variations locales de vitesse qui intensifient les échanges thermiques et améliorent les performances hydrodynamiques. Ces géométries sont largement utilisées comme modèles simplifiés dans l'étude des écoulements internes rencontrés dans plusieurs systèmes thermiques tels que les échangeurs de chaleur compacts, les conduites ondulées et les dispositifs de refroidissement.

L'ajout d'une composante pulsatoire à l'écoulement principal représente une méthode active d'intensification thermique particulièrement prometteuse. Les pulsations permettent de perturber périodiquement la couche limite dynamique et thermique, d'augmenter le mélange radial du fluide et d'améliorer le transfert de chaleur, même pour des régimes d'écoulement à faible nombre de Reynolds. Les performances de ce type d'écoulement dépendent fortement de plusieurs paramètres tels que la fréquence de pulsation, l'amplitude, le nombre de Reynolds, le nombre de Strouhal et la géométrie du canal.

Grâce au développement des méthodes numériques et de la mécanique des fluides numérique (CFD), il est désormais possible d'analyser avec précision le comportement des écoulements pulsés dans des géométries complexes. Les simulations numériques permettent d'étudier l'évolution temporelle des champs de vitesse, des structures tourbillonnaires et des caractéristiques thermiques afin de mieux comprendre les mécanismes responsables de l'amélioration du transfert thermique.

Dans ce contexte, l'étude des écoulements pulsés dans un canal sinusoïdal représente une approche importante pour comprendre l'interaction entre la pulsation et la géométrie ondulée, ainsi que leur influence sur les performances thermo-hydrauliques du système.

1.2 Définition des canaux :

Un canal est un conduit ou un passage géométrique permettant la circulation d'un fluide liquide ou gazeux dans une direction déterminée. En mécanique des fluides et en transfert thermique, les canaux sont utilisés pour guider les écoulements internes dans différents systèmes thermiques et hydrauliques tels que les échangeurs de chaleur, les systèmes de refroidissement, les conduites industrielles et les dispositifs énergétiques.

La géométrie du canal joue un rôle essentiel dans le comportement hydrodynamique et thermique de l'écoulement. Elle influence directement la distribution de vitesse, la formation des zones de recirculation, les pertes de charge, le développement de la turbulence ainsi que les mécanismes de transfert thermique entre le fluide et les parois.

Chapitre 1 : Etude bibliographique des écoulements pulsés dans les canaux

Les canaux peuvent présenter différentes formes géométriques telles que les canaux rectangulaires, circulaires, ondulés ou sinusoïdaux. Parmi ces configurations, les canaux sinusoïdaux sont particulièrement étudiés car leur géométrie ondulée favorise la perturbation de l'écoulement, améliore le mélange du fluide et intensifie les échanges thermiques.

Dans les études numériques et expérimentales, les canaux sont souvent utilisés comme modèles simplifiés pour représenter les écoulements internes présents dans les échangeurs de chaleur et les systèmes thermo-hydrauliques complexes. Leur utilisation permet d'analyser plus précisément les phénomènes de convection, de turbulence et d'intensification thermique associés aux écoulements pulsés.

1.2.1 Principe Fondamental :

Un canal sinusoïdal est un conduit dont la paroi suit un profil ondulé périodique, en forme de sinus. Contrairement à un canal droit où la section reste constante, le canal sinusoïdal présente une succession de rétrécissements (sections convergentes) et d'élargissements (sections divergentes).

Lorsque le fluide s'écoule dans ce type de géométrie, il accélère dans les sections convergentes et décélère dans les sections divergentes. Cette variation périodique de vitesse génère, dans les creux des ondes, des tourbillons de recirculation. Ces tourbillons jouent un rôle clé : ils aspirent le fluide près de la paroi, le mélangent avec le fluide du cœur de l'écoulement, puis le rejettent au contact de la paroi.

Ce mécanisme perturbe efficacement la couche limite thermique, qui constitue la principale résistance au transfert de chaleur. En brisant cette couche limite à chaque cycle d'onde, le canal sinusoïdal améliore significativement le coefficient d'échange thermique par rapport à un canal droit.

Cependant, cette amélioration a un prix : la génération des tourbillons augmente les pertes de charge. Le fluide subit davantage de frottements en suivant un chemin ondulé. L'objectif est donc de trouver un compromis entre le gain thermique et la pénalité hydraulique.

1.2.2 Types des canaux :

1.2.2.1 Selon la forme de la section transversale

- A. **Canal circulaire** : Un canal circulaire est une conduite de section ronde, généralement un tube, dans laquelle s'écoule un fluide. C'est la géométrie la plus courante dans l'industrie en raison de sa robustesse, de sa facilité de fabrication et de sa capacité à supporter de fortes pressions. L'écoulement y est bien connu : parabolique en laminaire, plus plat en turbulent. Le diamètre intérieur est le paramètre géométrique principal qui contrôle les performances hydrauliques et thermiques du système.

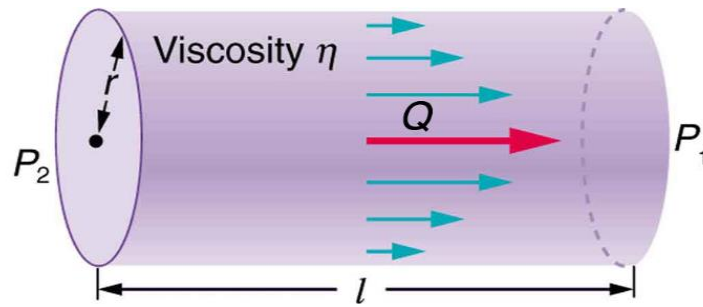


Figure 1.1: Ecoulement dans un canal circulaire. [1]

- B. **Canal rectangulaire** : Un canal rectangulaire est une conduite dont la section transversale est un rectangle, caractérisé par une largeur et une hauteur. Ce type de canal est largement utilisé dans les échangeurs de chaleur compacts, notamment les échangeurs à plaques et les micro-canaux, car sa géométrie permet d'empiler plusieurs canaux côte à côte pour augmenter la surface d'échange thermique par unité de volume. Du point de vue hydraulique, la présence d'angles droits crée des zones de recirculation dans les coins où la vitesse du fluide est plus faible. Les canaux rectangulaires sont également appréciés dans les études numériques car leur géométrie simple facilite le maillage et la résolution des équations.

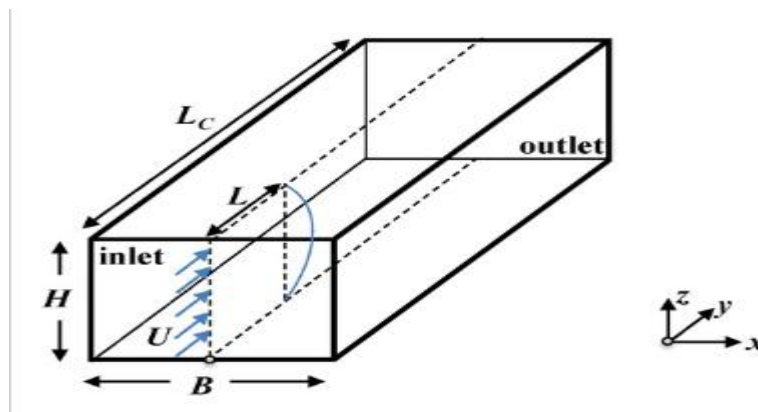


Figure 1.2: Ecoulement laminaire dans un canal rectangulaire. [2]

- C. **Canal elliptique** : Un canal elliptique est une conduite dont la section transversale a la forme d'une ellipse, c'est-à-dire un cercle aplati selon un axe. Il constitue un compromis entre le canal circulaire et le canal rectangulaire. Il offre une meilleure résistance mécanique que le canal rectangulaire grâce à l'absence d'angles vifs, et permet d'augmenter la surface d'échange thermique par rapport à un tube circulaire de même section. L'écoulement dépend du rapport d'aplatissement (grand axe/petit axe). Plus l'ellipse est aplatie, plus le transfert thermique est amélioré, mais les pertes de charge augmentent. Les canaux elliptiques sont utilisés dans les condenseurs et les réacteurs chimiques.

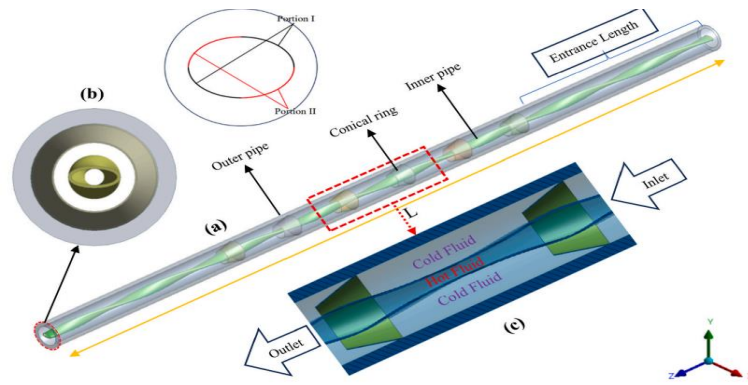


Figure 1.3: Un canal elliptique. [3]

1.2.2.2 Selon le profil longitudinal de la paroi

- A. **Canal droits** : Un canal droit est une conduite dont la section transversale reste constante sur toute la longueur et dont la paroi est rectiligne, sans courbure ni variation. L'écoulement y est uniforme et la couche limite se développe progressivement le long de la paroi. C'est la géométrie de référence pour comparer l'efficacité des autres types de canaux.

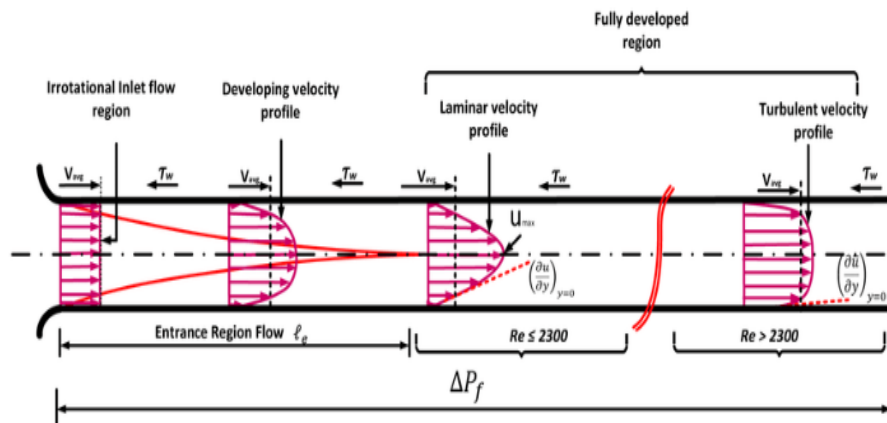


Figure 1.4: Schéma d'une conduite rectiligne avec profils de vitesse pleinement développés en régimes d'écoulement laminaire et turbulent. [4]

- B. **Canal convergents** : Un canal convergent est une conduite dont la section transversale diminue progressivement le long de l'écoulement. Cette réduction de section accélère le fluide et amincit la couche limite près de la paroi, ce qui améliore le transfert thermique. On le trouve dans les tuyères et les systèmes d'accélération d'écoulement.

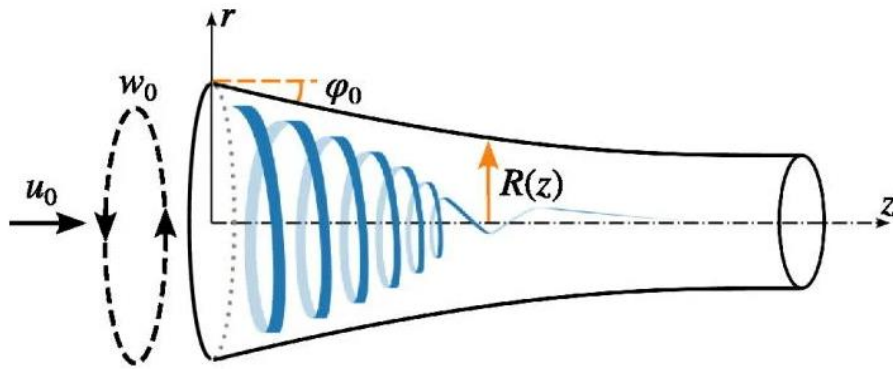


Figure 1.5: Représentation schématique d'un écoulement convergent et tourbillonnaire dans un tuyau mince. [5]

- C. **Canal divergents** : Un canal divergent est une conduite dont la section transversale augmente progressivement le long de l'écoulement. Cette augmentation de section décélère le fluide et peut provoquer un décollement de la couche limite ainsi que la formation de tourbillons de recirculation. On le trouve dans les diffuseurs et les systèmes de ralentissement d'écoulement.

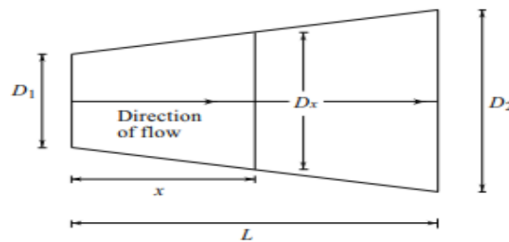


Figure 1.6 : Ecoulement à travers un conduit divergent. [6]

- D. **Canal ondulés (ou sinusoïdaux)** : Un canal ondulé est une conduite dont la paroi suit un profil périodique en forme de vague, alternant sections convergentes et divergentes. Cette géométrie génère des tourbillons de recirculation dans les creux des ondes, ce qui perturbe la couche limite, favorise le mélange du fluide et améliore significativement le transfert thermique, au prix d'une augmentation des pertes de charge.

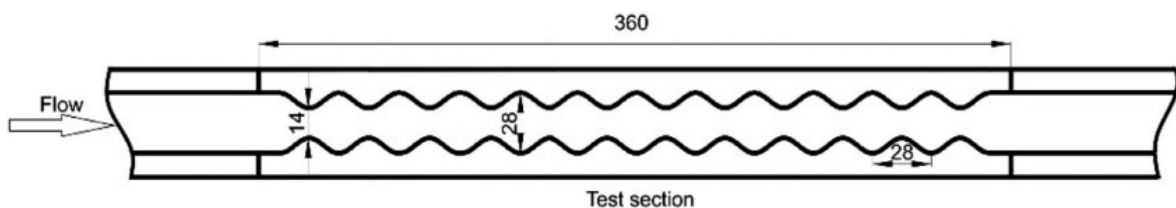


Figure 1.7: Ecoulement dans un canal ondulé. [7]

1.2.2.3 Selon le nombre de fluides

- A. **Canal simple (mono-fluide)** : Un canal monofluide est une conduite dans laquelle circule un seul fluide. Ce fluide peut être chauffé ou refroidi à travers la paroi du canal par un milieu extérieur (air ambiant, eau, résistance électrique, etc.). Ce type de configuration est utilisé pour étudier le comportement thermique d'un fluide seul, sans interaction directe avec un autre fluide. La majorité des études fondamentales sur les écoulements pulsés ou les canaux ondulés sont réalisées en configuration monofluide.

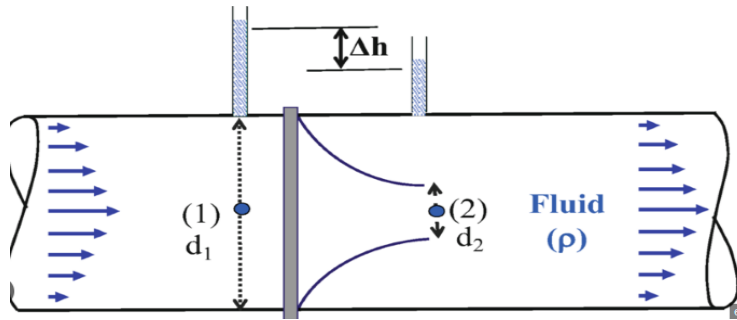


Figure 1.8: Ecoulement de l'eau dans un canal simple. [8]

- B. **Canal double flux (bi-fluide)** : Un canal bifluide est un système composé de deux canaux distincts, séparés par une paroi solide (généralement métallique), dans lesquels circulent deux fluides différents à des températures distinctes. La chaleur est transférée d'un fluide à l'autre à travers la paroi de séparation, sans mélange direct. C'est le principe de base des échangeurs de chaleur à plaques ou à double tube. Le fluide chaud cède sa chaleur au fluide froid, permettant ainsi de réchauffer ou de refroidir un fluide selon le besoin.

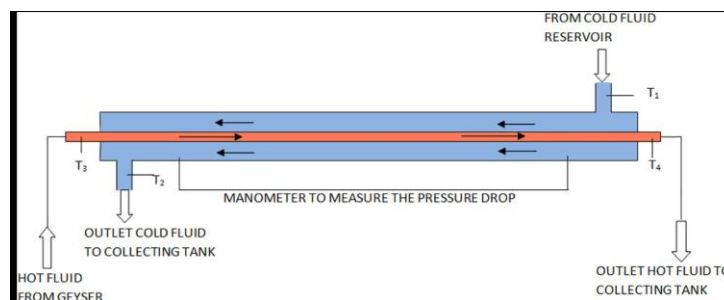


Figure 1.9: Schéma de principe d'un échangeur de chaleur à double tube. [9]

1.3 Matériaux de Construction

Les matériaux de construction des échangeurs de chaleur sont choisis en fonction de plusieurs critères essentiels tels que la conductivité thermique, la résistance à la corrosion, la résistance mécanique, le coût et les conditions de fonctionnement (température, pression, nature des fluides).

1.3.1 métaux

Les métaux sont privilégiés grâce à leur bonne conductivité thermique et leur résistance mécanique.

A. Acier au carbone

Utilisé dans les applications industrielles courantes pour son faible coût et sa bonne résistance mécanique. Cependant, il est sensible à la corrosion.

B. Acier inoxydable

Très utilisé lorsque les fluides sont corrosifs ou dans les industries alimentaires et chimiques. Il offre une excellente résistance à la corrosion mais une conductivité thermique plus faible que certains autres métaux.

C. Cuivre et alliages de cuivre

Très bonne conductivité thermique, ce qui améliore les performances de l'échange. Utilisé dans les échangeurs compacts, mais plus coûteux et parfois sensible à certains environnements corrosifs.

D. Aluminium

Léger, avec une bonne conductivité thermique. Très utilisé dans les échangeurs compacts (radiateurs, aéroréfrigérants), mais moins résistant à la corrosion que l'acier inoxydable.

E. Titane

Matériau haut de gamme, utilisé dans des environnements très corrosifs (eau de mer, industrie chimique). Il combine excellente résistance à la corrosion et bonne durabilité, mais son coût est élevé.

1.3.2 matériaux non métalliques

A. Plastiques (polymères)

Utilisés pour des applications à basse température et faible pression. Ils offrent une bonne résistance chimique, mais une faible conductivité thermique.

B. Céramiques

Utilisées dans des environnements à très haute température. Elles résistent bien à la corrosion et à la chaleur, mais sont fragiles mécaniquement.

C. Composites

Matériaux modernes combinant plusieurs propriétés (légèreté, résistance chimique). Leur utilisation est encore limitée mais en développement

1.4 Ecoulement pulsée:

1.4.1 Définition de l'écoulement pulsé :

Un écoulement pulsé dans un canal est un écoulement interne dans lequel la vitesse, la pression ou le débit du fluide varie périodiquement au cours du temps à l'intérieur d'un conduit ou d'un canal. Contrairement à un écoulement stationnaire où les caractéristiques du fluide restent constantes, l'écoulement pulsé est caractérisé par une succession d'accélération et de décélérations provoquées par une composante oscillatoire superposée à l'écoulement moyen.

Dans un canal, ces pulsations modifient la structure de l'écoulement en perturbant la couche limite et en favorisant la formation de tourbillons et de zones de recirculation. Elles peuvent améliorer le mélange du fluide et intensifier le transfert thermique, notamment dans les canaux ondulés ou sinusoïdaux. Les performances de l'écoulement pulsé dépendent principalement de la fréquence de pulsation, de l'amplitude des oscillations, du nombre de Reynolds et de la géométrie du canal.

1.4.2 Types d'écoulements pulsés

Les écoulements pulsés peuvent être classés selon plusieurs critères :

1.4.2.1 Selon la forme du signal de pulsation

- A. **Pulsation sinusoïdale** : variation régulière et périodique (la plus utilisée en études numériques)
- B. **Pulsation carrée** : alternance brutale entre deux niveaux de débit ou de vitesse
- C. **Pulsation triangulaire** : variation linéaire montante et descendante

1.4.2.2 Selon le paramètre modulé

- A. **Pulsation de vitesse** : variation de la vitesse du fluide
- B. **Pulsation de pression** : variation de la pression imposée
- C. **Pulsation de débit** : variation du débit volumique

1.4.2.3 Selon le régime d'écoulement

- A. **Écoulement pulsé laminaire** : généralement à faible nombre de Reynolds
- B. **Écoulement pulsé turbulent** : à fort nombre de Reynolds, avec des interactions complexes entre turbulence et pulsation.

1.4.3 Méthodes d'intensification dans un canal

Les techniques d'amélioration du transfert thermique dans les canaux peuvent être classées en deux (02) grandes catégories :

Chapitre 1 : Etude bibliographique des écoulements pulsés dans les canaux

- 1 Méthodes actives (nécessitent un apport d'énergie externe).
- 2 Méthodes passives (modification géométrique sans énergie externe).

1.4.3.1 Méthodes Actives : L'écoulement pulsé

Les méthodes actives sont des techniques qui visent à améliorer le transfert thermique en appliquant une action extérieure au système, nécessitant un apport d'énergie externe. Ces méthodes modifient de manière dynamique les caractéristiques de l'écoulement, ce qui permet de désorganiser la couche limite, d'intensifier le mélange et d'augmenter les échanges thermiques.

$$u(t) = u_{moy} (1 + A \sin(2\pi f t)) \quad 1.1$$

La pulsation perturbe la couche limite thermique, favorise le mélange radial et améliore le coefficient de convection.

1.4.3.1.1 Écoulement monophasique pulsé

Un **écoulement monophasique pulsé** est un régime d'écoulement dans lequel un seul fluide, sous une seule phase physique (liquide ou gaz), circule dans une conduite ou un canal avec une vitesse et une pression qui varient périodiquement au cours du temps. Contrairement à un écoulement stationnaire où le débit reste constant, l'écoulement pulsé est caractérisé par des oscillations successives provoquant des accélérations et des décélérations du fluide.

Ce type d'écoulement apparaît naturellement dans plusieurs systèmes industriels et biologiques, comme les moteurs thermiques, les pompes alternatives, les compresseurs ou encore la circulation sanguine. Les pulsations modifient la structure de l'écoulement et influencent fortement les phénomènes de transfert thermique, les pertes de charge et la turbulence.

L'étude des écoulements monophasiques pulsés est particulièrement importante dans les domaines du génie thermique et de la mécanique des fluides, car les variations temporelles du débit peuvent améliorer les performances d'échange thermique ou, au contraire, générer des instabilités selon les conditions de fonctionnement.

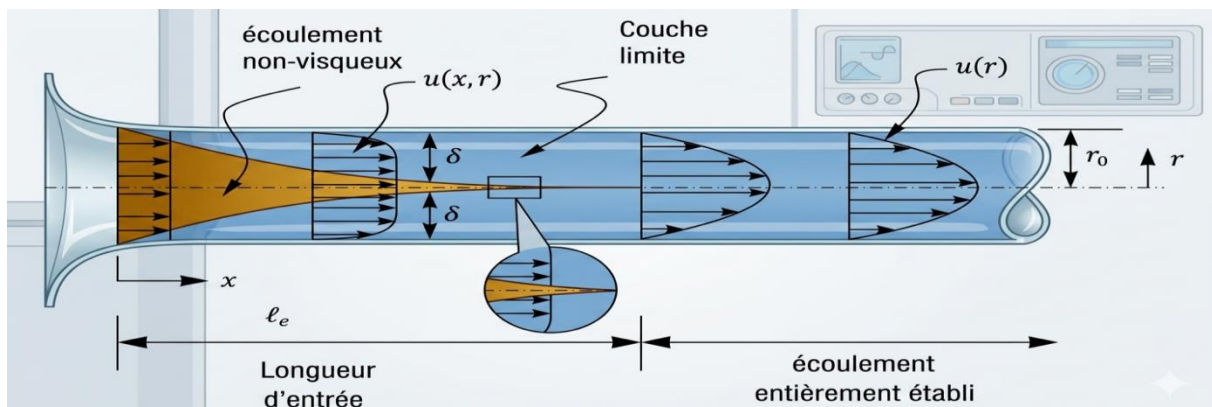


Figure 1.10: Schéma conceptuel d'un écoulement monophasique pulsé dans un tube. [10]

1.4.3.1.2 Écoulement diphasique pulsé

Un **écoulement diphasique pulsé** est un régime d'écoulement dans lequel deux phases différentes, généralement un liquide et un gaz, circulent simultanément dans une conduite ou un canal avec des variations périodiques de vitesse, de pression ou de débit au cours du temps. Les pulsations créent une évolution instationnaire de l'écoulement, provoquant des alternances d'accélération et de ralentissement des deux phases.

Ce type d'écoulement est plus complexe qu'un écoulement monophasique en raison des interactions permanentes entre les phases, telles que les échanges de quantité de mouvement, les phénomènes d'interface et les changements de distribution des bulles ou des poches de gaz. Les pulsations peuvent modifier la structure de l'écoulement et influencer fortement les performances thermiques et hydrodynamiques du système.

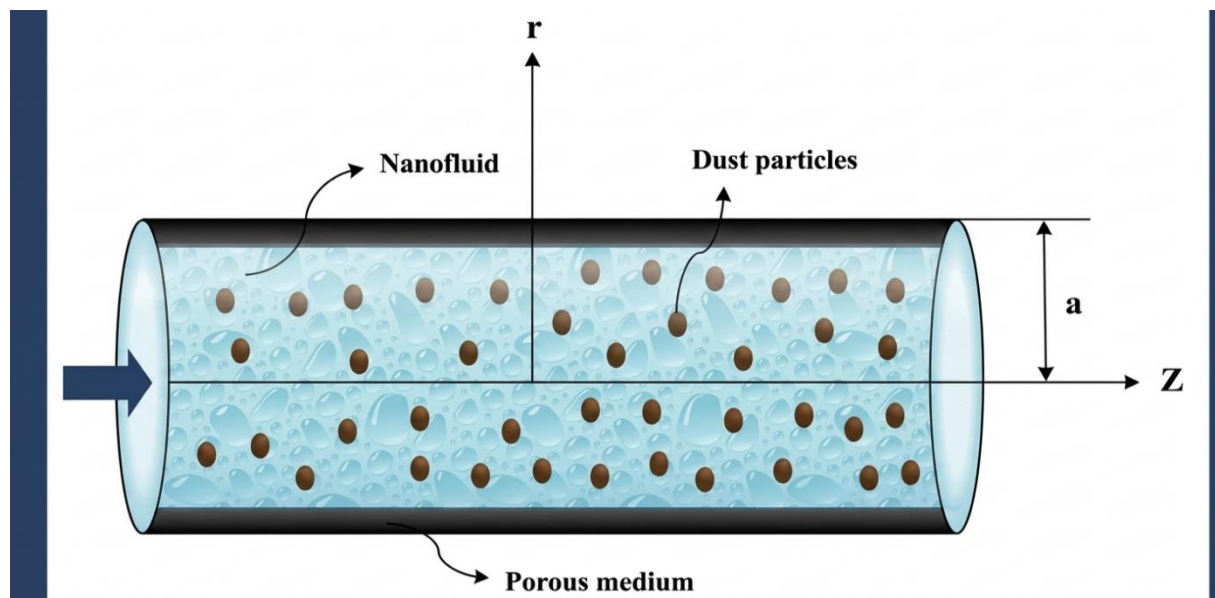


Figure 1.11: Schéma conceptuel d'un écoulement diphasique pulsé (liquide et gaz) dans un tube. [11]

1.4.3.1.3 Pulsations mécaniques

Une pulsation mécanique est une variation périodique produite par le mouvement répétitif d'un système mécanique. Elle apparaît lorsqu'un dispositif en fonctionnement génère des oscillations régulières de pression, de vitesse, de force ou de débit au cours du temps. Ce phénomène est généralement causé par des éléments mobiles tels que les pistons, les pompes ou les organes rotatifs.

Dans les systèmes fluidiques et thermiques, la pulsation mécanique crée un écoulement non uniforme caractérisé par une succession d'accélération et de ralentissements. Elle influence directement le comportement dynamique du système, notamment les vibrations, la stabilité de l'écoulement et les performances de transfert thermique.

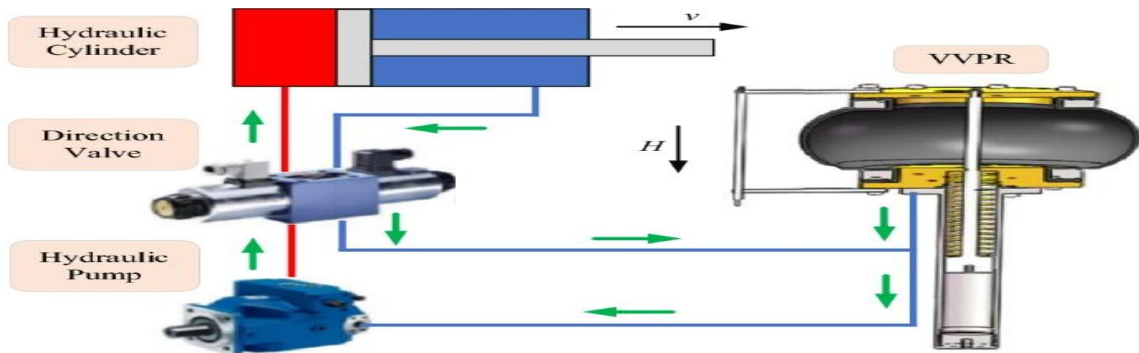


Figure 1.12 : Schémas conceptuels des dispositifs de génération de pulsations mécaniques [12]

1.4.3.1.4 Pulsation par paroi/tube flexible

Une **pulsation par paroi tubulaire** est un phénomène dans lequel les oscillations sont générées par le mouvement périodique de la paroi d'un tube ou d'un conduit contenant un fluide. La déformation ou la vibration de la paroi provoque des variations successives de pression et de vitesse à l'intérieur du fluide, créant ainsi un écoulement pulsé.

Ce type de pulsation modifie la structure de l'écoulement en perturbant continuellement la couche fluide au voisinage des parois. Il peut améliorer le mélange du fluide et intensifier les échanges thermiques à l'intérieur du tube. Les pulsations par paroi sont étudiées dans plusieurs domaines du génie thermique et de la mécanique des fluides, notamment dans les échangeurs de chaleur, les systèmes biomécaniques et les dispositifs de refroidissement avancés.

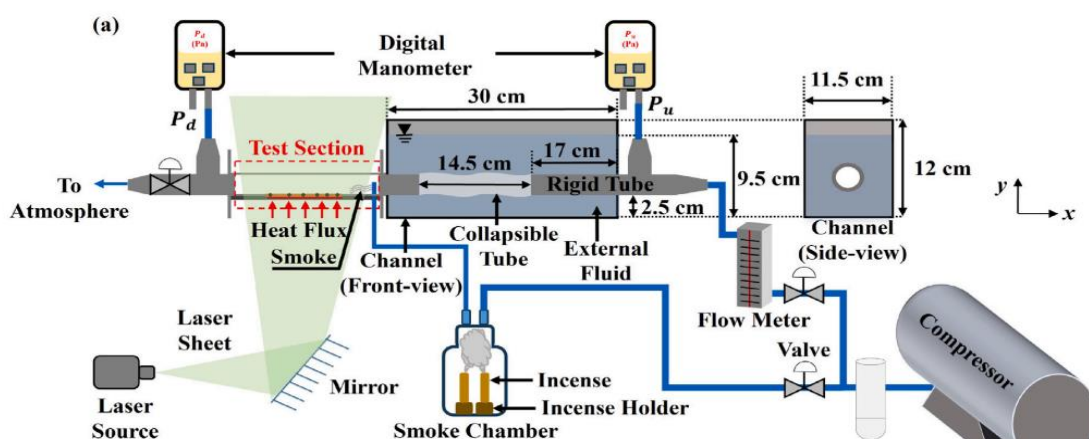


Figure 1.13: Principe de génération de pulsations par tube collable. [13]

Chapitre 1 : Etude bibliographique des écoulements pulsés dans les canaux

1.4.3.2 Méthodes Passives

Les méthodes passives consistent à changer la surface ou le cheminement de l'écoulement, par exemple en ajoutant des inserts, en rendant la surface rugueuse, en utilisant des tubes hélicoïdaux ou des ailettes, ou en modifiant le fluide avec des additifs comme les nanofluides. Elles créent plus de mélange et de turbulence, augmentent la surface d'échange ou perturbent la couche limite thermique, ce qui accroît le coefficient de transfert de chaleur. Contrairement aux méthodes actives, elles ne nécessitent aucune alimentation électrique ou mécanique supplémentaire.

1.5 Synthèse des travaux antérieurs (Revue de la littérature et synthèse bibliographique)

Ji Tao Ho et al. (2007) ont mené une étude expérimentale pour analyser l'amélioration du transfert thermique autour d'un cylindre carré chauffé placé dans un canal soumis à un écoulement pulsé. Le dispositif expérimental a été réalisé avec une amplitude de pulsation fixe de ($A=0,05$), en faisant varier le nombre de Reynolds basé sur la vitesse moyenne d'écoulement ($Re=350$ et 540), la fréquence de pulsation ($0\text{ Hz} < f_p < 60\text{ Hz}$) et le taux de blocage du cylindre carré ($\beta=1/10, 1/8$ et $1/6$). Les résultats ont montré que l'écoulement pulsé modifie significativement les caractéristiques de lâcher tourbillonnaire derrière le cylindre carré, avec des nombres de Strouhal mesurés dépendant des paramètres testés. L'étude a permis de quantifier l'influence de la fréquence de pulsation et du taux de blocage sur le transfert thermique convectif, démontrant que la combinaison de ces paramètres peut améliorer les échanges thermiques par rapport au cas stationnaire, en fonction des conditions opératoires.

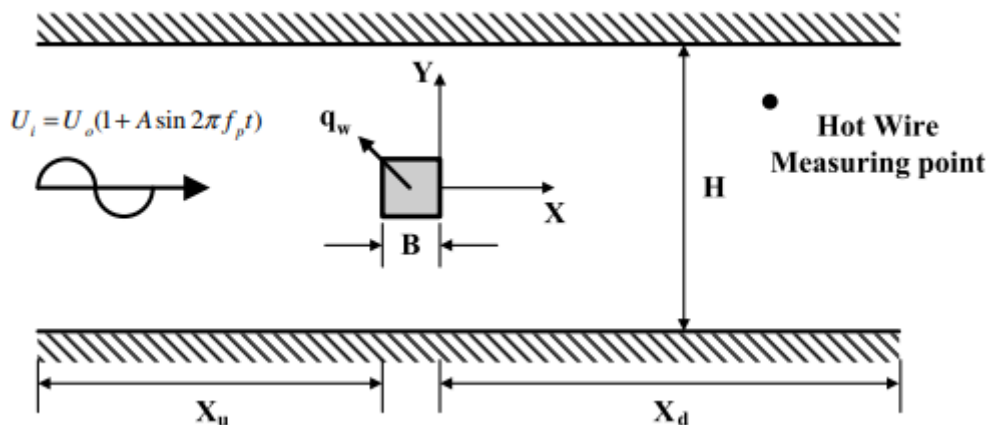


Figure 1.14: Schéma d'un cylindre carré chauffé dans un canal. [14]

Akdağ Unal et al. (2014) ont mené une étude numérique pour analyser les caractéristiques de transfert thermique d'un nanofluide à base d'eau et de particules d'alumine (Al_2O_3) dans un mini-canal ondulé soumis à un écoulement pulsé à l'entrée. Les simulations ont été réalisées à l'aide d'un solveur CFD basé sur la méthode des volumes finis, en faisant varier la fraction volumique de nanoparticules, la fréquence et l'amplitude de pulsation, les parois du canal étant maintenues à température constante. Les résultats ont montré que l'utilisation de nanoparticules sous écoulement pulsé améliore significativement les performances thermiques, avec un effet favorable combiné de la pulsation et des nanoparticules sur l'augmentation du nombre de Nusselt par rapport au cas stationnaire. La

Chapitre 1 : Etude bibliographique des écoulements pulsés dans les canaux

performance thermique augmente considérablement avec la fraction volumique de nanoparticules et avec l'amplitude de pulsation, tandis que la fréquence de pulsation a un effet plus faible. De plus, l'écoulement pulsé présente l'avantage de prévenir la sédimentation des nanoparticules dans le fluide de base, confirmant le potentiel prometteur de cette méthode active pour l'intensification thermique dans les mini-canaux ondulés.

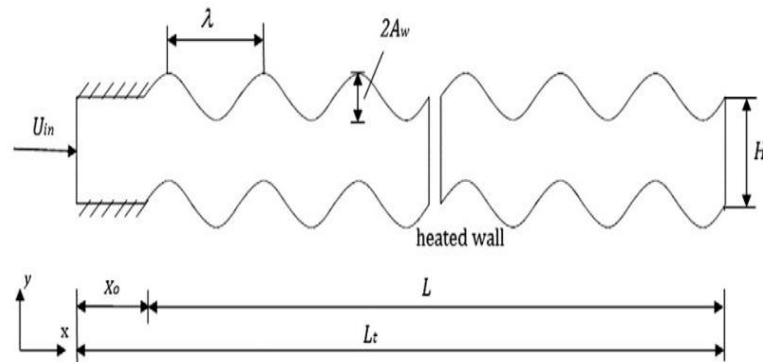


Figure 1.15: La géométrie d'un mini-canal ondulé. [15]

Zontul H. et Sahin B. (2015) ont étudié expérimentalement l'effet d'un écoulement pulsé sur le transfert de chaleur et l'hydrodynamique dans un canal rectangulaire à rainures. Des mesures thermiques sous flux de chaleur constant et des visualisations PIV ont été réalisées pour des nombres de Reynolds de 2 000 à 6 500 et des fréquences de pulsation de 0 à 5 Hz. Les résultats montrent que l'amélioration maximale du transfert de chaleur atteint un facteur $E = 1,77$ (soit +77 %) pour $Re = 2\,000$ et $F = 1,5$ Hz. La pulsation favorise la pénétration de l'écoulement principal dans les rainures, renouvelant périodiquement le fluide et améliorant le mélange. Il existe une fréquence optimale dépendante du Reynolds : à faible Re , l'optimum se situe à basse fréquence (1-1,5 Hz), tandis qu'à haut Re , il se décale vers des fréquences plus élevées (jusqu'à 5 Hz). L'indice de performance thermohydraulique (TPF) est supérieur à 1 à faible Reynolds, mais peut devenir inférieur à 1 à haut Reynolds si la perte de charge prédomine.

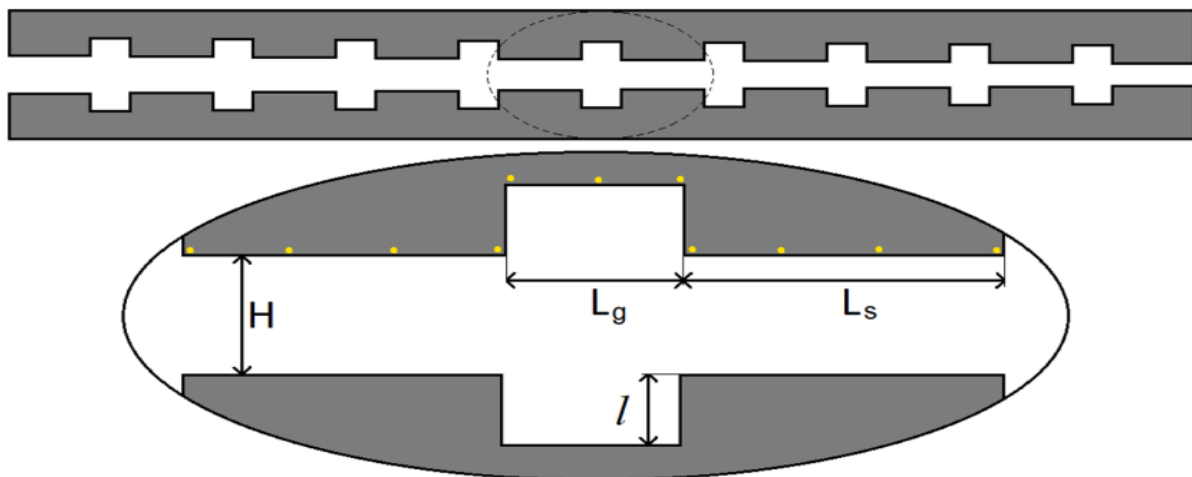


Figure 1.16 : La géométrie du canal. [16]

Khosravi-Bizhaem Hamed et al. (2018) ont évalué expérimentalement l'efficacité de la pulsation dans quatre tubes hélicoïdaux en cuivre de diamètres de bobine différents (155, 181, 218 et 275 mm) et de diamètre intérieur constant 7,5 mm. L'étude a été menée avec de l'eau distillée dans une boucle fermée, des pulsations étant générées par une

Chapitre 1 : Etude bibliographique des écoulements pulsés dans les canaux

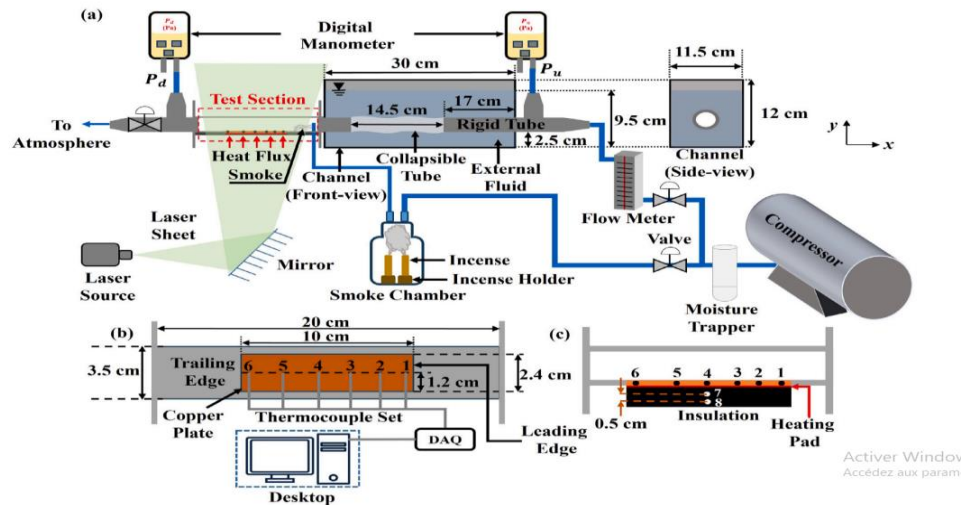


Figure 1.18: Principe de génération de pulsations auto-entretenues par tube collabable [13]

Kurtulmuş Nazım et Sahin Besir (2020) ont mené une étude expérimentale pour analyser l'effet d'un écoulement pulsé sur les structures d'écoulement et le transfert de chaleur dans un canal sinusoïdal (longueur d'onde 28 mm, amplitude 7 mm, hauteur minimale 14 mm). Des expérimentations en soufflerie hydraulique avec des mesures PIV (Particle Image Velocimetry) ont été réalisées pour des nombres de Reynolds de 4 000 à 7 000 et des nombres de Strouhal de 0,11 à 2,07. Les résultats montrent que la pulsation améliore significativement le transfert de chaleur, surtout à faible Reynolds, avec un taux d'amélioration maximal $\eta = 1,5$ (soit +50 %) pour $Re = 4\,000$ et $St = 1,03$. Les observations PIV ont révélé que la pulsation force l'interaction entre le cœur de l'écoulement et les zones de recirculation dans les sections divergentes/convergentes, tout en augmentant les contraintes de Reynolds le long des couches cisillées.

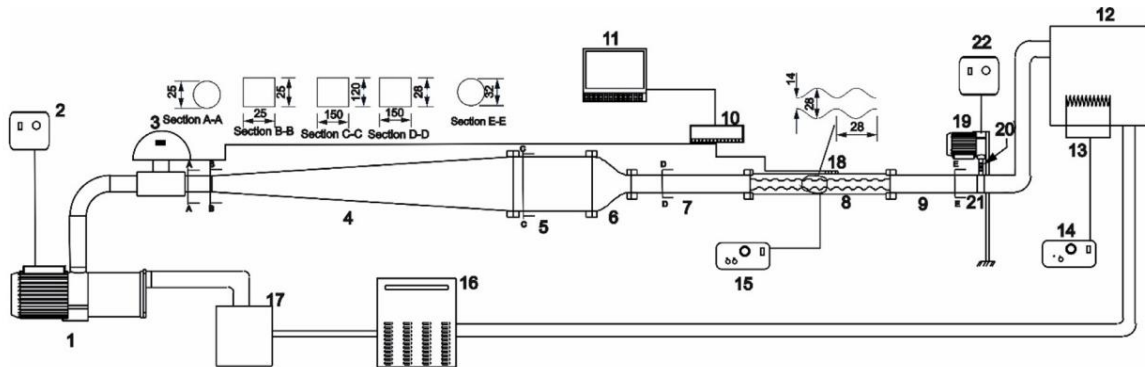


Figure 1.19: Démonstration schématique de l'installation expérimentale. [7]

Ye Qianhao et al. (2021) ont réalisé une synthèse bibliographique approfondie classifiant les écoulements pulsés en trois catégories : monophasiques, diphasiques et jets intermittents. Leur étude, basée sur l'analyse d'études théoriques, numériques et expérimentales, souligne que les écoulements alternatifs (réversibles) sont plus stables et efficaces que les flux unidirectionnels, avec des gains pouvant atteindre 20 % en monophasique et jusqu'à 2,5 fois pour les jets intermittents (les ondes carrées étant les plus efficaces). Dans les écoulements diphasiques, les pulsations haute fréquence (période < 2 s) améliorent le coefficient de transfert thermique et le flux critique, tandis

Chapitre 1 : Etude bibliographique des écoulements pulsés dans les canaux

que les basses fréquences peuvent dégrader les performances. Les auteurs concluent que l'optimisation fine de la fréquence, de l'amplitude et de la forme d'onde est cruciale pour l'application industrielle.

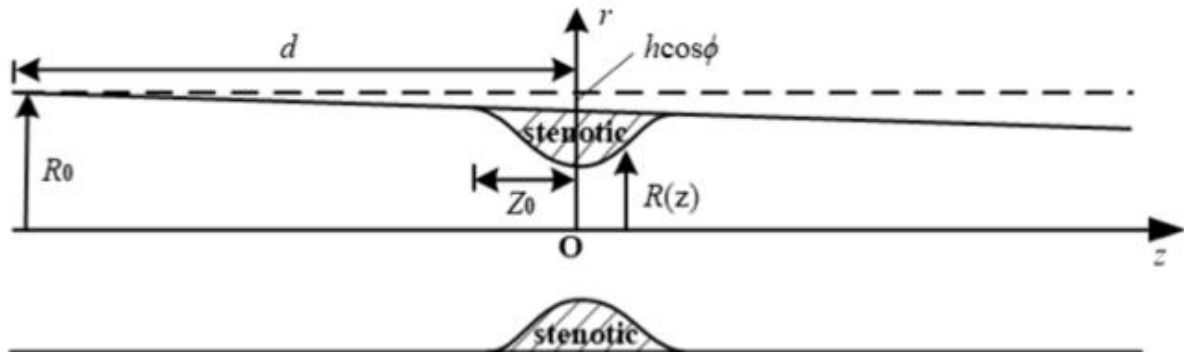


Figure 1.20: La géométrie de l'artère sténosée et conique. [18]

Yin Ying-de et al. (2021) ont analysé expérimentalement et numériquement les performances d'un tube elliptique torsadé générant des écoulements secondaires hélicoïdaux. L'étude a porté sur l'influence du rapport d'aspect (A/B de 1,2 à 2,1) et du pas de torsion (P de 100 à 250 mm) pour des nombres de Reynolds allant de 2 500 à 60 000. Les résultats montrent que l'augmentation du rapport d'aspect A/B de 1,2 à 2,1 accroît le nombre de Nusselt de 23 %, tandis qu'une diminution du pas de torsion P de 250 mm à 100 mm l'augmente de 11 %. Un rapport d'aspect supérieur ou égal à 1,5 est identifié comme le seuil critique pour obtenir un gain thermo-hydraulique net ($PEC > 1$), atteignant des valeurs optimales de 1,3 à 1,5. Les auteurs ont également proposé des corrélations empiriques pour prédire Nu et f avec un coefficient de détermination R^2 de 0,987 pour Nu .

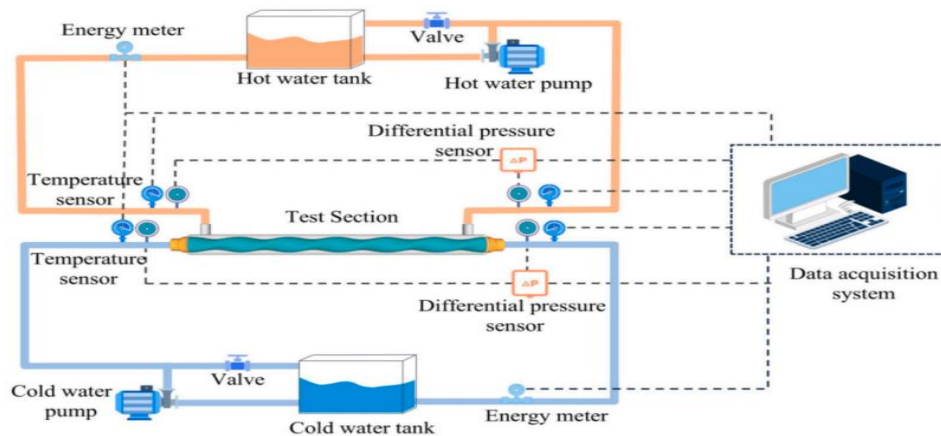


Figure 1.21: Schéma du dispositif expérimental. [19]

Wang Chun-Sheng et al. (2022) ont mené une étude expérimentale pour explorer pour la première fois l'effet combiné d'un écoulement pulsé turbulent et de turbulateurs en forme d'aile dans un canal en serpentin. Le dispositif expérimental a permis de mesurer le transfert thermique et les pertes de charge pour différentes conditions d'écoulement. Les résultats ont montré que la pulsation améliore les tourbillons de Fujiwara générés par les turbulateurs, augmentant le nombre de Nusselt moyen normalisé (Nu/Nu_0) de 13 % par rapport au cas sans pulsation. La meilleure performance est obtenue pour un nombre de Strouhal de $St=0.67$, avec un rapport (Nu/Nu_0) atteignant 5.2 et un facteur de performance thermique (TPF) de 1,39, indiquant un gain

Chapitre 1 : Etude bibliographique des écoulements pulsés dans les canaux

thermique supérieur à la pénalité hydraulique. L'étude identifie la vitesse fluctuante normalisée (W_p) rms/ (U_b) comme l'un des principaux mécanismes de transfert de chaleur, avec un coefficient de corrélation élevé de $R=0.82$. Enfin, les auteurs proposent des corrélations empiriques permettant de prédire Nu/Nu_0 et f/f_0 en fonction du nombre de Reynolds, de l'amplitude de pulsation, de la géométrie des ailettes et du nombre de Strouhal.

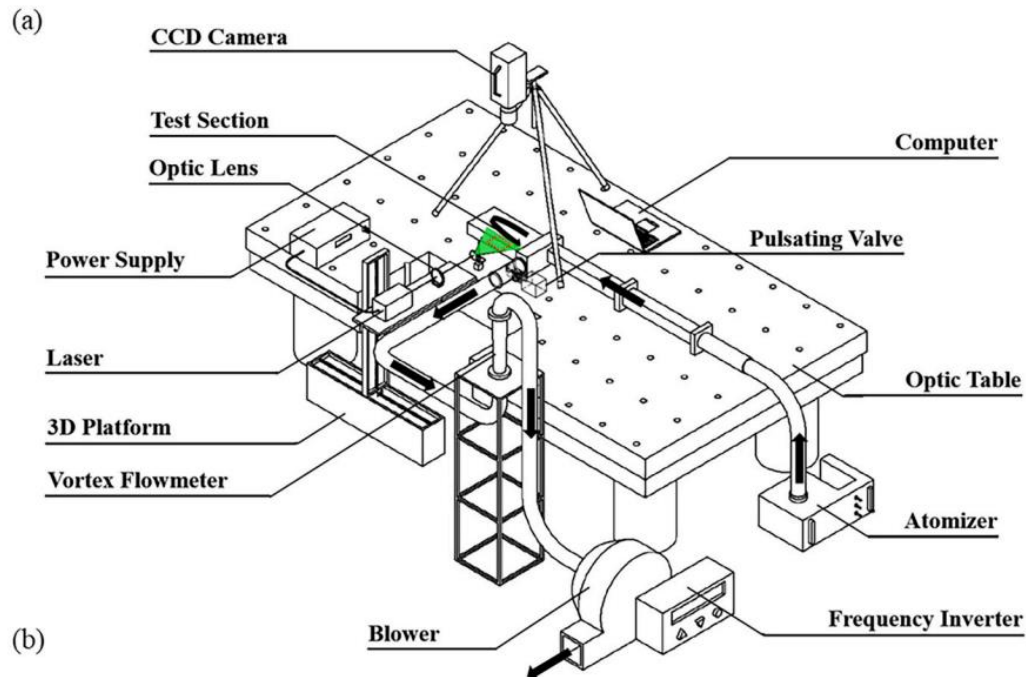


Figure 1.22: Illustration de (a) l'appareil expérimental PIV [20]

Ponnore Joffin Jose et Moria Hazim (2022) ont proposé une géométrie innovante où le tube interne se divise en 4 puis 16 canaux avant de se rejoindre. Leur étude numérique, réalisée avec ANSYS Fluent 2022 R2 en utilisant le modèle de turbulence SST $k-\omega$, a été validée par comparaison avec des données expérimentales (écart absolu moyen de 0,9 % pour le nombre de Nusselt). Les résultats montrent que cette configuration améliore l'efficacité thermique de 42,1 % par rapport à un tube droit classique en configuration contre-courant (efficacité passant de 0,195 à 0,277). Cependant, la complexité de la structure entraîne une hausse de la chute de pression considérable, passant de 172,5 Pa à 7 140 Pa (soit une augmentation de plus de 4 000 %), nécessitant des optimisations pour réduire les pertes énergétiques.

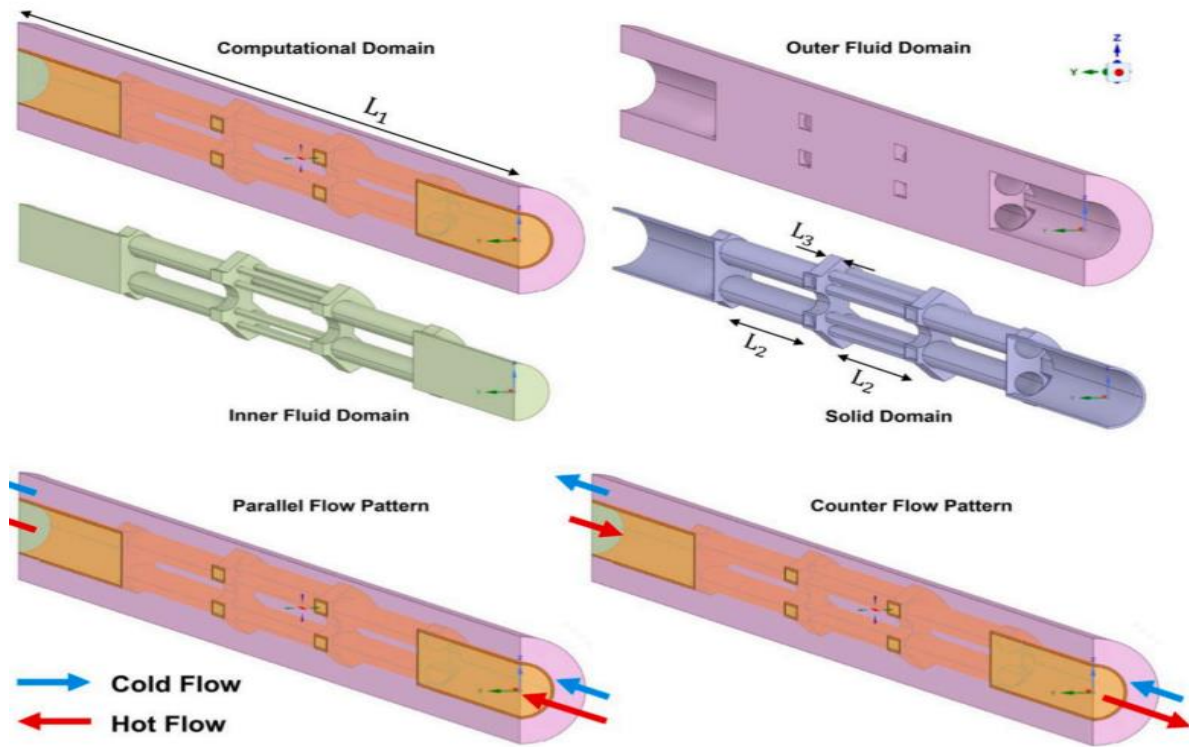


Figure 1.23 : Schéma de dynamique des fluides numériques montrant les domaines de simulation et toutes les zones séparément. [21]

Zhou Liang et al. (2025) ont mené une étude numérique pour évaluer l'impact d'un écoulement de séparation sur le transfert thermique pulsé en comparant les caractéristiques thermiques d'un canal plan et d'un canal rétréci. Les simulations ont été réalisées à l'aide de la méthode LES (Large Eddy Simulation) résolue aux parois, implémentée dans OpenFOAM-8, pour un nombre de Reynolds turbulent fixe de $Re = 350$ et une gamme de fréquences de pulsation $ls+=3,2$ à 14 . Les résultats ont montré que, pour le canal plan, l'écoulement pulsé améliore le transfert thermique jusqu'à $7,49\%$ à $ls+=4,4$ avec un déphasage de 45 degrés observé entre le comportement de l'écoulement près de la paroi et la contrainte de cisaillement pariétale aux fréquences moyennes et élevées. En revanche, le canal rétréci présente une augmentation du nombre de Nusselt de plus de 40% par rapport au canal plan en régime stationnaire, avec un gain maximal de $19,235\%$ à $ls+=4,4$. L'amélioration des performances thermiques est localisée au niveau du bord d'attaque et de la zone de décollement aval. Le coefficient d'amélioration thermique η est plus sensible à la pulsation dans le canal rétréci, augmentant significativement pour $ls+=3,2$ à 14 tandis qu'il reste stable dans le canal plan. Les auteurs concluent que l'écoulement pulsé, en particulier aux fréquences moyennes, offre des performances supérieures dans les canaux présentant un écoulement séparé, fournissant des perspectives précieuses pour les futures conceptions énergétiques.

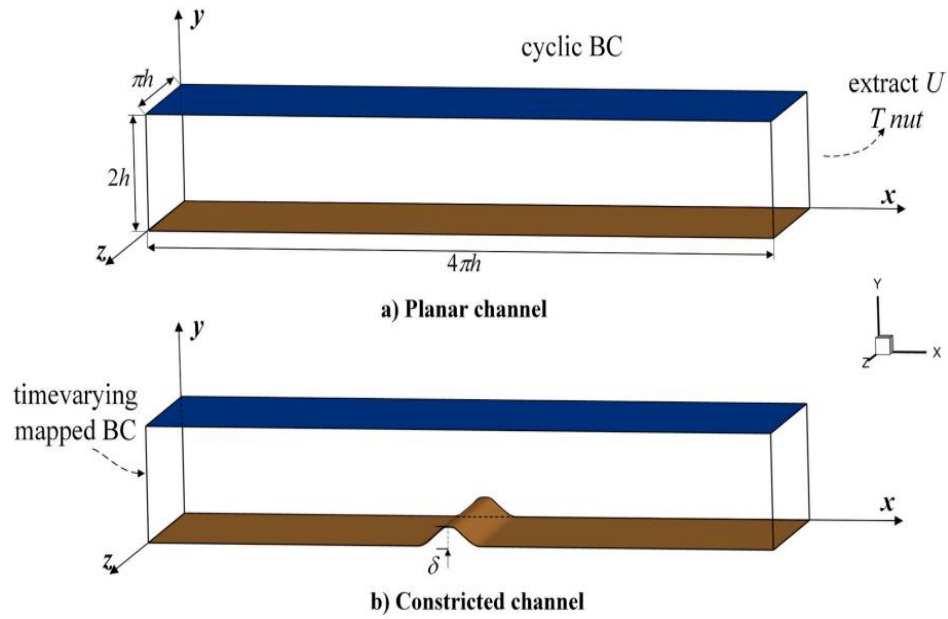


Figure 1.24: Deux configurations du canal plan et du canal rétréci avec un rétrécissement unilatéral. [22]

Zhou Liang et al. (2025) ont mené une étude par simulations numériques instationnaires pour analyser les effets de la fréquence et de l'amplitude de pulsation sur la dynamique des fluides et les performances thermiques dans un canal à nervures inclinées à 45 degrés (rapport d'aspect $AR = 3$). L'étude a couvert une gamme de fréquences de pulsation allant de 0,02 à 0,14 et d'amplitudes de 0,1 à 0,7. Les résultats ont révélé que l'écoulement pulsé provoque un décollement plus précoce du fluide entre les nervures des tourbillons transversaux et sa fusion avec l'écoulement principal. À basse fréquence ($STf=0,02$), la pulsation induit des fluctuations drastiques de l'énergie cinétique turbulente et de la distribution de température dans le canal, tandis qu'à fréquence moyenne ($STF=0,1$), la courte période de pulsation fragmente davantage les tourbillons, bien que les variations sur un seul cycle soient moins prononcées. Pour une amplitude constante $A=0,3$, la fréquence optimale est située près de $STF=0,06$, où le rapport du nombre de Nusselt et le facteur de performance thermique (TPF) atteignent leurs maximums avec des améliorations respectives de 15,77 % et 12,53 %. La perte de charge reste relativement peu sensible aux variations de fréquence. Pour $STf=0,02$ et 0,1, le transfert thermique et la perte de charge augmentent tous deux avec l'amplitude, mais leurs taux de croissance dépendent de la fréquence de forçage. À la basse fréquence $StF=0,03$, le rapport du nombre de Nusselt et le TPF présentent une croissance presque linéaire avec l'amplitude

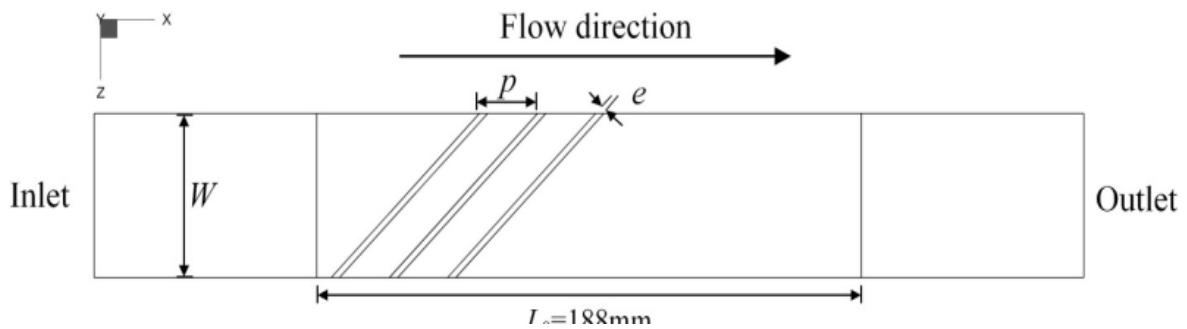


Figure 1.25: Modèle géométrique. [23]

Feng Jiachen et al. (2025) ont mené une étude numérique pour optimiser structurellement un canal rainuré et analyser l'effet combiné d'un écoulement pulsé sur l'amélioration du transfert thermique. Les auteurs ont développé un workflow automatisé en boucle fermée intégrant des modules de CAO, de maillage, de CFD et d'optimisation, permettant une exploration itérative complète des conceptions. La flexibilité de ce cadre méthodologique a été démontrée par son support de multiples algorithmes d'optimisation dans un paradigme "CFD-in-the-loop". Les résultats ont abouti à la proposition d'une stratégie d'amélioration synergique combinant l'optimisation géométrique passive avec une pulsation à fréquence naturelle. Cette approche intégrée permet d'exploiter conjointement les bénéfices d'une géométrie optimisée et d'un forçage pulsé pour maximiser les performances thermo-hydrauliques des canaux rainurés, démontrant la transférabilité de ce cadre méthodologique pour la conception thermique avancée.

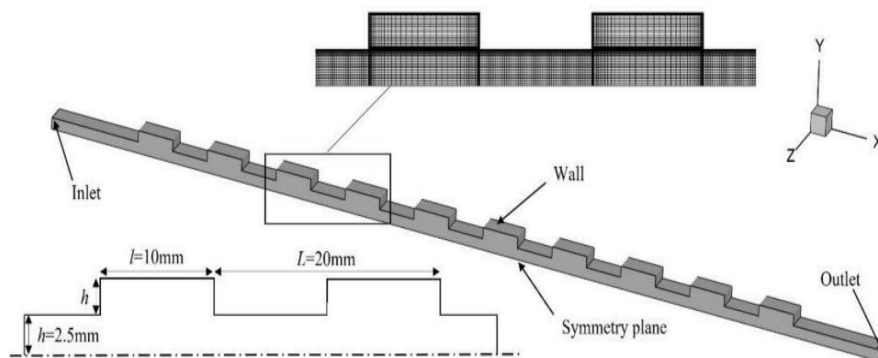


Figure 1.26: Schéma du modèle géométrique. [24]

1.6 Conclusion

Ce premier chapitre a présenté une étude bibliographique détaillée sur les écoulements pulsés dans les canaux, avec un focus particulier sur les géométries sinusoidales.

Les notions fondamentales ont été définies, notamment celle d'écoulement pulsé, caractérisé par une composante oscillatoire (vitesse, pression ou débit) superposée à l'écoulement moyen. Les différents types de pulsations (sinusoïdale, carrée, triangulaire), les méthodes actives et passives d'intensification thermique, ainsi que les principaux paramètres gouvernant ces écoulements (fréquence de pulsation, amplitude, nombre de Reynolds, nombre de Strouhal) ont été exposés.

Les canaux sinusoïdaux ont été décrits comme des géométries particulièrement intéressantes en raison de leur capacité à générer naturellement des tourbillons de recirculation dans les sections divergentes, perturbant ainsi la couche limite thermique et favorisant le mélange du fluide. Cette combinaison entre une géométrie passive (ondulée) et un forçage actif (pulsation) apparaît comme une stratégie prometteuse d'amélioration des performances thermo-hydrauliques.

La revue de la littérature a mis en évidence un intérêt croissant pour ce domaine, avec des travaux expérimentaux et numériques portant sur diverses configurations et différents régimes d'écoulement. Les études récentes

Chapitre 1 : Etude bibliographique des écoulements pulsés dans les canaux

confirment que les pulsations permettent généralement d'améliorer le transfert de chaleur, particulièrement aux faibles nombres de Reynolds. Cependant, cette amélioration s'accompagne souvent d'une augmentation des pertes de charge, rendant essentiel l'évaluation du facteur de performance thermohydraulique.

Malgré les avancées significatives, plusieurs limites persistent dans les travaux existants : la majorité des études se concentre sur des géométries simples ou des régimes laminaires, tandis que les données relatives aux écoulements pulsés turbulents dans les canaux sinusoïdaux restent relativement limitées. Les mécanismes d'interaction détaillés entre la pulsation et la géométrie ondulée en régime turbulent ne sont pas encore totalement élucidés.

Dans ce contexte, la présente étude s'inscrit dans la continuité de ces travaux en proposant une analyse numérique approfondie des écoulements pulsés dans un canal sinusoïdal en régime turbulent. Elle vise à mieux comprendre l'interaction complexe entre la fréquence et l'amplitude de pulsation d'une part, et la géométrie ondulée d'autre part, afin d'optimiser les performances thermo-hydrauliques du système.

Chapitre 2

Etude sur les Nanofluides

2.1 Introduction

L'optimisation des systèmes thermiques modernes repose sur deux leviers principaux : l'amélioration de la dynamique de l'écoulement (méthodes actives) et l'amélioration des propriétés du fluide lui-même (méthodes passives). Si l'écoulement pulsé permet de perturber la couche limite pour favoriser les échanges, l'efficacité globale reste limitée par les faibles propriétés thermiques des fluides conventionnels comme l'eau ou l'huile. C'est dans ce contexte que l'introduction des nanofluides devient une solution technologique majeure pour booster les performances de transfert de chaleur.

2.2 Définition et Composition

Un nanofluid est défini comme une suspension colloïdale stable constituée d'un fluide caloporteur de base (eau, éthylène glycol, huiles) dans lequel sont dispersées des particules de taille nanométrique (typiquement entre 1 et 100 nm). Contrairement aux suspensions de microparticules, les nanofluides présentent une meilleure stabilité et ne provoquent pas d'érosion ou de colmatage important des conduits, ce qui est essentiel dans des systèmes soumis à des cycles de pressions variables comme les écoulements pulsés.

2.2.1 Pourquoi utiliser les nanofluides ?

L'utilisation des nanofluides dans cette étude s'explique par plusieurs raisons fondamentales liées aux limites des fluides conventionnels (eau, huile, glycol) :

A. Amélioration significative de la conductivité thermique

Les fluides classiques ont une conductivité thermique très faible. L'ajout de nanoparticules (comme l' Al_2O_3) dont la conductivité est plusieurs dizaines ou centaines de fois supérieure permet d'augmenter notablement la conductivité thermique effective du fluide. Cela se traduit par une augmentation du coefficient de transfert de chaleur (h) et du nombre de Nusselt (Nu).

B. Amélioration du transfert de chaleur

Les nanoparticules génèrent plusieurs mécanismes bénéfiques :

- Mouvement brownien $\rightarrow$ micro-convection locale
- Couche interfaciale liquide-particule
- Meilleur mélange radial du fluide
- Perturbation de la couche limite thermique

Ces mécanismes permettent d'améliorer le transfert de chaleur même à faible nombre de Reynolds.

Chapitre 2 : Etude sur les Nanofluides

C. Meilleure stabilité par rapport aux microparticules

Contrairement aux suspensions de microparticules qui sédimentent rapidement et provoquent l'érosion ou le colmatage des conduits, les nanoparticules (1-100 nm) restent en suspension plus longtemps et causent moins de problèmes d'usure.

D. Effet synergique avec l'écoulement pulsé

- L'écoulement pulsé crée des accélérations et décélérations qui empêchent la sédimentation des nanoparticules.
- La pulsation renforce l'agitation brownienne et le mélange induit par les nanoparticules.
- La combinaison **pulsation + nanofluide + géométrie sinusoïdale** crée un effet synergique qui maximise le transfert thermique tout en contrôlant les pertes de charge.

2.3 Classification des nanofluides

La classification des nanofluides consiste à les organiser en différentes catégories selon des critères liés à leur composition, leur structure ou leur comportement. Cette organisation systématique permet de comprendre, comparer et prédire les propriétés des nanofluides en fonction de leurs constituants.

2.3.1 Classification selon la nature des nanoparticules

Ce critère est le plus fondamental car les propriétés thermophysiques dépendent fortement du matériau constitutif des nanoparticules.

- A. **Nanoparticules métalliques pures** : Il s'agit de particules composées d'un seul métal, comme le cuivre (Cu), l'argent (Ag), l'or (Au), l'aluminium (Al) ou le fer (Fe). Ces nanoparticules possèdent une conductivité thermique très élevée, ce qui les rend très efficaces pour améliorer le transfert de chaleur. Leur principal inconvénient est leur tendance à l'oxydation, sauf pour l'or et l'argent qui sont plus stables chimiquement.
- B. **Nanoparticules d'oxydes métalliques** : Ce sont des particules formées d'un métal combiné à l'oxygène, comme l'alumine (Al_2O_3), l'oxyde de cuivre (CuO), le dioxyde de titane (TiO_2), la silice (SiO_2), l'oxyde de zinc (ZnO) ou la magnétite (Fe_3O_4). Ces oxydes sont chimiquement très stables, faciles à synthétiser et relativement peu coûteux. Leur conductivité thermique est cependant inférieure à celle des métaux purs.
- C. **Nanoparticules carbonées** : Cette famille inclut les nanotubes de carbone (à simple paroi ou à multiparois), le graphène et les nanofibres de carbone. Ces matériaux possèdent une conductivité thermique exceptionnelle, parmi les plus élevées connues. Leur principal défi est la difficulté à les disperser uniformément dans les fluides de base en raison de leur forte tendance à l'agrégation et de leur nature hydrophobe.

Chapitre 2 : Etude sur les Nanofluides

- D. **Nanoparticules de nitrures ou carbures** : On trouve par exemple le nitrure de silicium (Si_3N_4), le carbure de silicium (SiC) ou le nitrure d'aluminium (AlN). Ces matériaux allient une bonne conductivité thermique à une excellente stabilité chimique et mécanique, mais leur coût de production est généralement plus élevé.
- E. **Nanoparticules hybrides** : Il s'agit d'associer deux types différents de nanoparticules (exemple : cuivre associé à l'alumine, ou nanotubes de carbone associés à l'oxyde de cuivre) ou bien des nanoparticules composites cœur-coquille. L'objectif est de combiner les avantages de chaque matériau pour obtenir des performances supérieures.

2.3.2 Classification selon la nature du fluide de base

Le fluide de base dans lequel les nanoparticules sont dispersées détermine en grande partie le domaine d'application du nanofluide.

- A. **Nanofluides aqueux** : Ils utilisent l'eau comme fluide de base. L'eau est peu coûteuse, non toxique et possède une capacité calorifique élevée. Ces nanofluides sont principalement utilisés dans les systèmes de refroidissement, les échangeurs de chaleur domestiques et certaines applications solaires thermiques.
- B. **Nanofluides organiques** : Ils emploient des fluides comme l'éthylène glycol, les huiles de transformateur, les huiles motrices, le méthanol ou l'éthanol. Ces fluides sont adaptés aux températures plus élevées ou aux environnements électriques. Par exemple, les nanofluides à base d'éthylène glycol sont utilisés dans les systèmes antigel, tandis que les nanofluides à base d'huiles sont employés dans le refroidissement des transformateurs électriques ou des moteurs.
- C. **Nanofluides à base de fluides caloporteurs industriels** : Ce sont des fluides spécialement conçus pour le transfert thermique dans l'industrie, comme les huiles synthétiques, les fluides de Dowtherm ou les fluides de Therminol. Ces nanofluides sont destinés aux applications à haute température (jusqu'à 400°C).
- D. **Nanofluides à base de liquides ioniques** : Les liquides ioniques sont des sels fondus à température ambiante. Ils sont utilisés pour des applications très spécifiques nécessitant une stabilité électrochimique exceptionnelle.

2.3.3 Classification selon le nombre de types de nanoparticules

Cette classification distingue les nanofluides selon la diversité des nanoparticules qu'ils contiennent.

- A. **Nanofluides simples** : Ils ne contiennent qu'une seule espèce de nanoparticules (par exemple, uniquement des nanoparticules d'alumine dispersées dans l'eau). C'est la configuration la plus étudiée et la mieux maîtrisée.
- B. **Nanofluides hybrides** : Ils contiennent deux types ou plus de nanoparticules différentes (par exemple, un mélange de nanoparticules d'alumine et d'oxyde de cuivre, ou un mélange de nanotubes de carbone et de nanoparticules de magnétite). L'intérêt est d'obtenir des effets synergiques : un matériau apporte une haute conductivité thermique tandis que l'autre assure une bonne stabilité de dispersion.

2.3.4 Classification selon la forme géométrique des nanoparticules

La forme des particules influence fortement le comportement rhéologique et thermique du nanofluide.

- A. **Nanoparticules sphériques ou quasi-sphériques** : C'est la forme la plus courante (exemple : alumine, silice, oxyde de titane). Elles offrent une bonne stabilité et des propriétés isotropes.
- B. **Nanoparticules allongées** : Il s'agit des nanotubes, nanofibres, nanobâtonnets (exemple : nanotubes de carbone, nanobâtonnets d'or). Elles peuvent améliorer la conductivité thermique de façon plus spectaculaire que les sphères, mais elles augmentent davantage la viscosité et sont plus difficiles à disperser.
- C. **Nanoparticules lamellaires** : Comme le graphène ou les nanoplaquettes d'alumine. Leur forme en feuillets leur confère des propriétés anisotropes intéressantes.
- D. **Nanoparticules poreuses** : Des particules présentant une structure interne poreuse, qui peuvent modifier le comportement du fluide à l'intérieur même des pores.

2.4 Méthodes de Préparation

La préparation des nanofluides est une étape critique car les propriétés thermophysiques finales dépendent de la qualité de la dispersion. On distingue généralement deux méthodes principales :

2.4.1 Méthode en une étape (One-step method)

On fabrique les nanoparticules directement au sein du fluide de base. Les atomes du métal ou du matériau sont vaporisés (par exemple par chauffage intense sous vide), puis cette vapeur se condense sous forme de nanoparticules au contact du fluide de base froid. Les nanoparticules ainsi formées sont immédiatement dispersées sans jamais n'être séchées ni stockées sous forme de poudre.

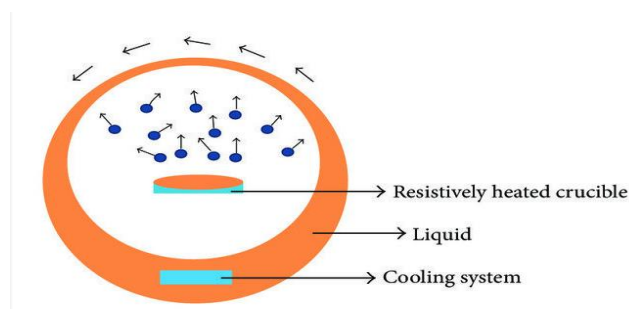


Figure 2.27:Préparation d'un nanofluide par la méthode de dépôt en phase vapeur en une seule étape. [25]

2.4.2 Méthode en deux étapes (Two-step method)

Chapitre 2 : Etude sur les Nanofluides

Les nanoparticules sont d'abord synthétisées sous forme de poudre sèche (première étape), puis cette poudre est dispersée dans le fluide de base (deuxième étape). La première étape utilise des procédés classiques de fabrication de nanopoudres, comme la synthèse chimique, le broyage mécanique ou la condensation en phase vapeur. Ces poudres sont disponibles dans le commerce, ce qui rend la méthode accessible et peu coûteuse.

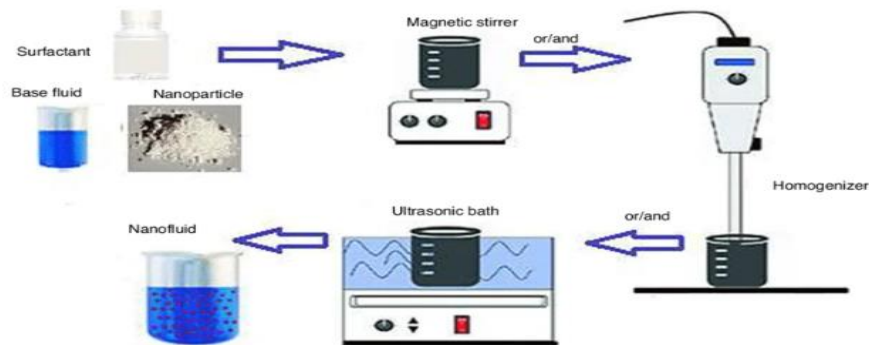


Figure 2.28: Préparation de nanofluides à l'aide d'une méthode en deux étapes. [26]

2.5 Stabilité des Nanofluides

La stabilité est le principal verrou technologique des nanofluides. En raison des forces de Van der Waals, les nanoparticules ont tendance à s'attirer, formant des agrégats (agglomération) qui sédimentent prématurément. Dans un écoulement pulsé, la stabilité est encore plus cruciale pour éviter que les particules ne se déposent lors des phases de faible vitesse.

2.5.1 Pourquoi la stabilité est-elle essentielle ?

Une mauvaise stabilité entraîne plusieurs problèmes. Les nanoparticules qui s'agglomèrent forment des amas de plus en plus gros, ce qui diminue fortement la surface d'échange thermique et réduit l'amélioration de la conductivité thermique. Ces amas finissent par sédimenter (déposer au fond du récipient) ou par se déposer sur les parois des échangeurs, ce qui encrasse les circuits et peut obstruer les canaux étroits. De plus, un nanofluid instable perd ses propriétés thermo-physiques dans le temps, ce qui le rend inutilisable pour des applications industrielles nécessitant une fiabilité sur le long terme.

2.5.2 Méthodes de caractérisation de la stabilité

Pour évaluer la stabilité d'un nanofluid, on dispose de plusieurs techniques.

- A. **Mesure du potentiel zêta** est la méthode la plus courante. Une valeur élevée en valeur absolue indique une bonne stabilité électrostatique. Cette mesure est rapide et non destructive.

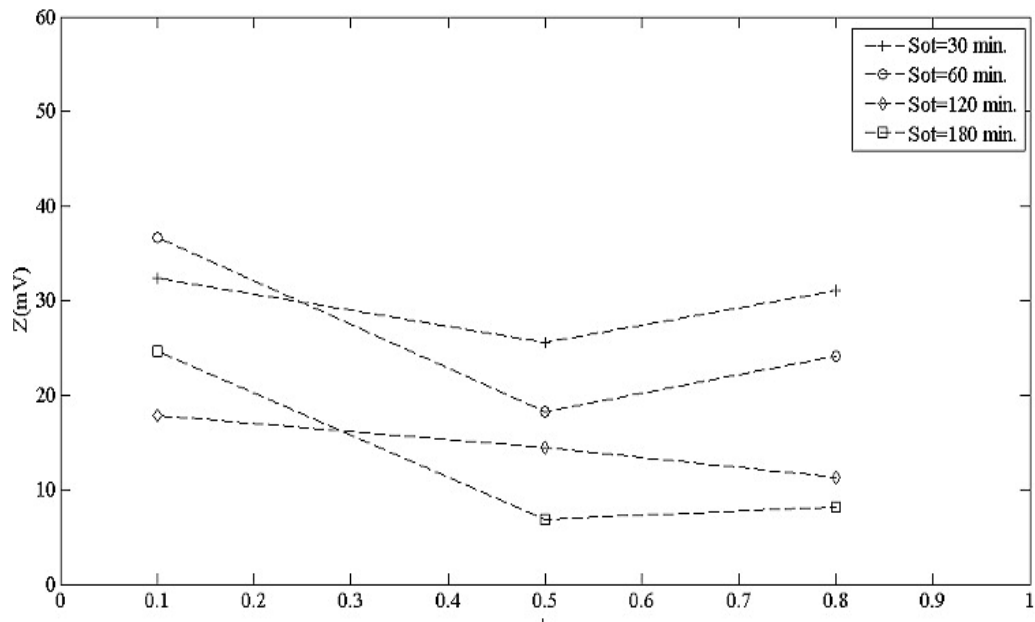


Figure 2.29: Variations du potentiel zêta en fonction des concentrations de nanofluides $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{eau}$ à différents temps de sonication sans ajout d'acide/base. [27]

- B. **Spectroscopie UV-Visible** consiste à mesurer l'absorbance d'une lumière à une longueur d'onde spécifique. Une dispersion stable présente une absorbance élevée et constante dans le temps. Une diminution de l'absorbance indique une sédimentation. Cette méthode permet un suivi quantitatif dans le temps.
- C. **Diffusion dynamique de la lumière** permet de mesurer la taille hydrodynamique moyenne des particules et des agrégats. Une taille qui augmente dans le temps révèle une agglomération progressive.
- D. **Observation visuelle** est la méthode la plus simple. Un nanofluid stable reste homogène, sans dépôt visible, pendant des semaines ou des mois. Un dépôt au fond du récipient indique une sédimentation. Cette méthode est qualitative mais très utile pour un premier diagnostic.
- E. **Microscopie électronique** (à transmission ou à balayage) permet d'observer directement la taille et la forme des particules ainsi que leur degré d'aggrégation. Cependant, cette méthode nécessite une préparation d'échantillon et ne donne qu'une image instantanée.

2.6 Propriétés Thermophysiques

Les propriétés thermo-physiques désignent les grandeurs physiques qui caractérisent le comportement thermique et fluide d'un nanofluide. L'ajout de nanoparticules modifie ces propriétés par rapport au fluide de base pure.

2.6.1 Fraction volumique (ϕ)

La **fraction volumique**, notée ϕ , est une grandeur qui exprime la concentration des nanoparticules en suspension dans un nanofluide. Elle est définie comme le rapport entre le volume occupé par les nanoparticules et le volume total du nanofluide.

$$\phi = \frac{V_{np}}{V_{nf}} \quad 2.2$$

2.6.2 Diffusivité thermique

La diffusivité thermique est une propriété composite qui représente la rapidité avec laquelle un matériau propage un front de température. Elle s'exprime comme le rapport de la conductivité thermique au produit de la masse volumique par la chaleur spécifique.

L'effet des nanoparticules sur la diffusivité thermique n'est pas systématiquement positif : si la conductivité augmente, la masse volumique augmente et la chaleur spécifique diminue. Le bilan dépend donc du nanofluide considéré. Dans la plupart des cas, la diffusivité augmente modérément.

$$\alpha = \frac{\lambda_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \quad 2.3$$

2.6.3 Masse volumique (densité)

La masse volumique du nanofluide augmente avec l'ajout de nanoparticules, car les solides sont généralement plus denses que les liquides. Cette augmentation est directement proportionnelle à la fraction volumique et suit la loi des mélanges. Elle influence les phénomènes de convection naturelle et le dimensionnement des pompes.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_{np} \quad 2.4$$

2.6.4 Chaleur spécifique (capacité calorifique massique)

La chaleur spécifique représente l'énergie nécessaire pour élever d'un degré la température d'un kilogramme de fluide. Contrairement à la conductivité, elle diminue généralement avec l'ajout de nanoparticules.

Cette diminution suit approximativement la loi des mélanges : les nanoparticules solides ayant une chaleur spécifique bien inférieure à celle des fluides de base, leur présence réduit la capacité du nanofluide à stocker de l'énergie thermique. Cet effet est d'autant plus marqué que la fraction volumique est élevée.

$$C_{p_{nf}} = (1 - \phi)C_{p_f} + \phi(C_p)_{np} \quad 2.5$$

2.6.5 Conductivité thermique

La conductivité thermique mesure la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur. Les fluides de base (eau, huile, glycol) ont une faible conductivité thermique, tandis que les nanoparticules solides (métaux, oxydes, carbone) possèdent une conductivité bien plus élevée. Leur ajout améliore donc la conductivité effective du nanofluide.

Cette amélioration dépend de plusieurs facteurs : la fraction volumique des nanoparticules (plus elle est élevée, meilleure est la conductivité), leur forme (les particules allongées comme les nanotubes sont plus efficaces que les sphériques), la température (qui augmente l'agitation brownienne) et le degré d'aggrégation. Les mécanismes expliquant ce phénomène incluent la micro-convection induite par le mouvement brownien et la formation d'une couche liquide ordonnée à l'interface particule-fluide.

A. Modèle de Patel [28] (valable pour $1\% \leq \phi \leq 8\%$, $293 \leq T \leq 323K$) :

$$\lambda_{nf} = \lambda_f \left(\frac{\lambda_{np} + 2\lambda_f - 2\phi(\lambda_f - \lambda_{np})}{\lambda_{np} + 2\lambda_f + \phi(\lambda_f - \lambda_{np})} \right) \quad 2.6$$

B. Modèle de Yu et Choi [29]

Prend en compte la couche nanoliquide autour des particules

$$\lambda_{eff} = \lambda_f \frac{\lambda_{np} + 2\lambda_f + 2\phi(\lambda_{np} - \lambda_f)(1+\beta)^3}{\lambda_{np} + 2\lambda_f - \phi(\lambda_{np} - \lambda_f)(1+\beta)^3} \quad 2.7$$

C. Modèle de Bruggeman [30]

Modèle symétrique adapté aux fractions volumiques plus élevées

$$(1 - \phi) \left(\frac{\lambda_f - \lambda_{eff}}{\lambda_f + 2\lambda_{eff}} \right) + \phi \left(\frac{\lambda_{np} - \lambda_{eff}}{\lambda_{np} + 2\lambda_{eff}} \right) = 0 \quad 2.8$$

D. Modèle de Hamilton-Crosser [31]

Extension du modèle de Maxwell pour les particules non sphériques

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_f} = \frac{\lambda_{np} + (n-1)\lambda_f - (n-1)\phi(\lambda_f - \lambda_{np})}{\lambda_{np} + (n-1)\lambda_f + \phi(\lambda_f - \lambda_{np})} \quad 2.9$$

Avec n = facteur de forme (shape factor) :

- $n=3$ pour particules sphériques
- $n=6$ pour cylindres (nanotubes)
- $n=4.5$ environ pour plaquettes

2.6.6 Viscosité dynamique

La viscosité mesure la résistance d'un fluide à l'écoulement. L'ajout de nanoparticules augmente presque toujours la viscosité du fluide de base, ce qui constitue l'inconvénient majeur des nanofluides car cela accroît les pertes de charge et la consommation énergétique.

L'augmentation de viscosité dépend de la fraction volumique (plus la concentration est élevée, plus la viscosité augmente, surtout au-delà d'un certain seuil), de la forme des particules (les particules allongées augmentent davantage la viscosité que les sphériques) et de la température (une élévation de température diminue la viscosité). La présence d'agrégats accentue également cet effet.

1. Modèle de Brinkman : [32]

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad 2.10$$

2. Modèle de Batchelor [33] :

Domaine de validité : particules sphériques, effets des interactions entre particules

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2,5\varphi + 6,2\varphi^2) \quad 2.11$$

3. Modèle d'Einstein [34]:

Domaine de validité : particules sphériques, faible concentration volumique ($\varphi < 2\%$)

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2,5\varphi) \quad 2.12$$

4. Modèle Maïga et al [35]

Domaine de validité : nanofluide Al_2O_3 -eau

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 7,3\varphi + 123\varphi^2) \quad 2.13$$

2.7 Effet des nanofluides sur l'amélioration du transfert de chaleur

L'ajout de nanoparticules dans un fluide de base permet d'améliorer significativement le transfert de chaleur grâce à plusieurs mécanismes physiques :

- A. **Augmentation de la conductivité thermique effective** : Les nanoparticules possèdent une conductivité thermique très supérieure à celle des fluides conventionnels, créant des chemins de conduction plus efficaces au sein du fluide.
- B. **Agitation brownienne** : Le mouvement aléatoire des nanoparticules génère une micro-convection locale qui perturbe la couche limite thermique.
- C. **Formation de couches interraciales** : Une couche de liquide ordonnée autour des nanoparticules facilite le transfert d'énergie.

Chapitre 2 : Etude sur les Nanofluides

- D. **Effet de mélange** : Les nanoparticules favorisent le mélange radial du fluide, particulièrement bénéfique dans les écoulements pulsés où elles empêchent également la sédimentation.

De nombreuses études expérimentales et numériques ont démontré que l'amélioration du nombre de Nusselt peut atteindre 10 % à 40 % selon la nature, la concentration et la température du nanofluide. Cependant, cet accroissement du transfert thermique s'accompagne généralement d'une augmentation de la viscosité dynamique, entraînant une hausse des pertes de charge. Le compromis entre gain thermique et pénalité hydraulique est généralement évalué à l'aide du facteur de performance thermo-hydraulique (TPF ou PEC).

L'utilisation combinée des nanofluides avec un écoulement pulsé dans des géométries ondulées (comme le canal sinusoïdal) représente une approche prometteuse, car la pulsation peut améliorer la dispersion des nanoparticules et renforcer l'effet de micro-convection.

2.8 Conclusion

Ce deuxième chapitre a présenté une étude bibliographique détaillée sur les nanofluides, en tant que méthode passive d'intensification thermique complémentaire aux écoulements pulsés.

Les notions fondamentales ont été exposées, notamment la définition des nanofluides comme des suspensions colloïdales stables de nanoparticules (1-100 nm) dans un fluide de base. Les différentes classifications (selon la nature des nanoparticules, du fluide de base, du nombre de types de particules, de la forme géométrique et du comportement rhéologique) ont été détaillées. Les méthodes de préparation (one-step et two-step), les enjeux de stabilité, ainsi que les propriétés thermophysiques principales (conductivité thermique, viscosité, chaleur spécifique, densité, diffusivité thermique et fraction volumique) ont été analysées, avec les principaux modèles théoriques et empiriques associés.

La revue de la littérature a mis en évidence les acquis significatifs dans le domaine : l'ajout de nanoparticules permet d'améliorer notablement la conductivité thermique effective du fluide, particulièrement avec les nanoparticules métalliques et carbonées. Cependant, cet avantage s'accompagne d'une augmentation de la viscosité et de défis liés à la stabilité à long terme (agglomération et sédimentation). La majorité des études se concentre sur des conditions stationnaires et des faibles fractions volumiques, tandis que les travaux portant sur l'interaction entre nanofluides et écoulements pulsés (surtout en régime turbulent dans des géométries complexes comme les canaux sinusoïdaux) restent encore limités.

Dans ce contexte, la présente étude s'inscrit dans la continuité de ces travaux en combinant l'utilisation d'un nanofluide avec un écoulement pulsé dans un canal sinusoïdal. Elle vise à explorer l'effet synergique entre ces deux techniques d'intensification (active et passive) afin d'optimiser les performances thermo-hydrauliques du système, tout en tenant compte des contraintes de stabilité et de pertes de charge.

Chapitre 3

Description du problème physique étudié

3.1 Introduction

Cette étude numérique porte sur l'écoulement pulsé de nanofluides dans un canal sinusoïdal, en vue d'analyser l'impact de la fraction volumique des nanoparticules sur les performances thermo-hydrauliques. Elle s'inscrit en complémentarité avec l'étude expérimentale de référence de Kurtulmuş et Şahin (2020) sur les écoulements pulsés dans les canaux sinusoïdaux, tout en intégrant l'utilisation des nanofluides pour améliorer davantage le transfert de chaleur.

Les nanofluides, suspensions de nanoparticules dans un fluide de base (eau dans ce cas), permettent d'augmenter significativement la conductivité thermique et le coefficient de transfert de chaleur grâce à une meilleure interaction entre les zones de recirculation générées par la géométrie sinusoïdale et l'écoulement pulsé. La modélisation numérique permet d'accéder à des champs détaillés (vitesse, pression, contraintes de Reynolds, température) difficilement mesurables expérimentalement.

3.2 Description du problème étudié :

D'après la littérature, de nombreuses études ont été consacrées à l'amélioration du transfert de chaleur dans les canaux sinusoïdaux en régime permanent. Oyakawa et al. [1], Rush et al. [2], Gradeck et al. [3] et Oviedo-Tolentino et al. [4,5] ont notamment mis en évidence l'influence de la géométrie (longueur d'onde, amplitude, angle de convergence/divergence) sur les performances thermiques et les structures d'écoulement. Parallèlement, Kurtulmuş et Şahin [6] ont étudié expérimentalement l'écoulement pulsé dans un canal sinusoïdal en utilisant l'eau comme fluide de base.

Dans leur travail, les auteurs ont considéré un canal sinusoïdal constitué de deux plaques ondulées en vis-à-vis sous un flux de chaleur constant. À la différence de ces études qui se limitent généralement au fluide de base (eau), d'autres travaux ont intégré l'utilisation des nanofluides pour renforcer les performances thermo-hydrauliques.

Dans le présent travail, nous avons étudié, l'écoulement pulsé dans un canal sinusoïdal, mais en considérant un nanofluide Al_2O_3 -eau à différentes fractions volumiques. L'étude est réalisée numériquement en supposant un écoulement bidimensionnel, incompressible et turbulent, afin d'analyser l'effet combiné de la pulsation, de la géométrie sinusoïdale et de la présence des nanoparticules sur les performances thermo-hydrauliques du système.

L'étude est basée sur la section d'essai qui est formée d'un canal sinusoïdal muni d'ondulations sinusoïdales comme le montre la Figure 3.30. L'écoulement du fluide est supposé bidimensionnel, incompressible et turbulent. Il circule entre deux plaques ondulées en vis-à-vis et deux parois latérales planes. Le canal est composé de trois zones : les premières et dernières zones sont supposées adiabatiques, tandis que la zone centrale munie d'ondulations sinusoïdales est soumise à un flux de chaleur constant.

Chapitre 3 : description du problème physique étudié

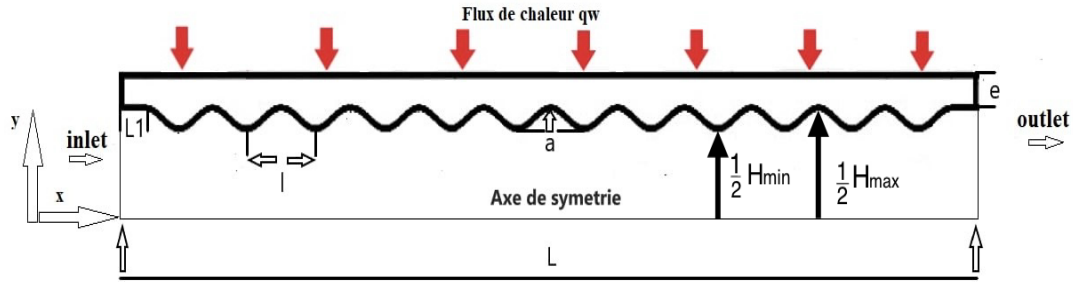


Figure 3.30: Géométrie du canal sinusoïdal Axisymétrique

Les plaques sinusoïdales comportent 12 ondulations avec les caractéristiques géométriques suivantes :

Tableau 3.1 : Paramètres géométriques du canal sinusoïdal utilisé dans l'étude.

Paramètres	Symbole	Valeur	Unité
Longueur d'une onde	l	28	mm
Amplitude de l'onde	a	7	mm
Hauteur minimale	H_{min}	14	mm
Hauteur maximale	H_{max}	28	mm
Hauteur moyenne du canal	H_{moy}	21	mm
Diamètre hydraulique moyen	$D_h = 2H_{moy}$	42	mm
Longueur totale	L	360	mm
Epaisseur du canal	e	8	mm
Paroi lisse	$L1$	14	mm

3.3 Formulation mathématique :

3.3.1 Hypothèses de calcul :

Pour la résolution numérique de l'écoulement au sein du canal sinusoïdal, les hypothèses simplificatrices suivantes sont retenues :

- Régime instationnaire (URANS) : L'écoulement est traité en régime instationnaire pour prendre en compte la nature pulsée du flux à l'entrée.
- Fluide Newtonien et Incompressible
- Écoulement Axisymétrique.
- Écoulement Turbulent
- Propriétés constantes : Les propriétés thermo-physiques de l'eau et de nanofluide sont supposées constantes.
- Négligence de la pesanteur : Les forces de volume liées à la gravité sont négligées devant les forces de pression et d'inertie.

Chapitre 3 : description du problème physique étudié

3.3.2 Équations gouvernantes :

En raison de la nature instationnaire de l'écoulement pulsé à l'entrée du canal sinusoïdal, l'approche URANS (Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes) est adoptée pour capturer l'évolution cyclique des structures tourbillonnaires.

A. . Équation de continuité :

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} = 0 \quad 3.14$$

B. Équation de quantité de mouvement (selon x) :

$$\rho_{nf} \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_x}{\partial r} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \mu_{eff} \frac{\partial u_x}{\partial r})}{\partial r} + \frac{\partial (\mu_{eff} \frac{\partial u_x}{\partial x})}{\partial x} \quad 3.15$$

C. Équation de quantité de mouvement (selon r) :

$$\rho_{nf} \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_x \frac{\partial u_r}{\partial x} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \mu_{eff} \frac{\partial u_r}{\partial r})}{\partial r} + \frac{\partial (\mu_{eff} \frac{\partial u_r}{\partial x})}{\partial x} \quad 3.16$$

D. Équation de conservation de l'énergie :

$$(pC_p)_{nf} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_r \frac{\partial T}{\partial r} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial (\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial r})}{\partial r} + \frac{\partial (\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x})}{\partial x} \quad 3.17$$

3.3.3 Modélisation de la turbulence (Modèle k- ω SST) :

Pour fermer le système d'équations de Navier-Stokes moyennées (URANS), il est nécessaire d'introduire un modèle de turbulence pour exprimer les tensions de Reynolds. Dans ce travail, nous utilisons le modèle k- ω SST (Shear Stress Transport) développé par Menter. Ce modèle est particulièrement adapté à l'étude d'un canal sinusoïdal pour les raisons suivantes :

- Précision près des parois : Il utilise la formulation k- ω dans les zones proches des parois sinusoïdales, ce qui permet une prédiction très précise du point de décollement du fluide et des zones de recirculation dans les cavités.
- Robustesse en champ libre : Il bascule automatiquement sur une formulation k- ϵ loin des parois pour éviter la sensibilité excessive du modèle k- ω standard aux conditions de l'écoulement libre.
- Adaptabilité à l'instationnaire : Il s'intègre parfaitement dans le formalisme URANS requis pour l'étude du caractère pulsé de l'écoulement.

Chapitre 3 : description du problème physique étudié

a) Équation de transport de l'énergie cinétique turbulente k :

$$\rho_{nf} \frac{\partial k}{\partial t} + \rho_{nf} \left(u \frac{\partial k}{\partial r} + v \frac{\partial k}{\partial x} \right) = P_k - \beta^* \rho_{nf} k \omega + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu_{nf} + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r (\mu_{nf} + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial r} \right] \quad 3.18$$

b) Équation de transport de la fréquence spécifique de dissipation ω :

$$\rho_{nf} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho_{nf} \left(u \frac{\partial \omega}{\partial r} + v \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) = \frac{\gamma}{\nu_t} P_k - \beta \rho_{nf} \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu_{nf} + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r (\mu_{nf} + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial r} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho_{nf} \sigma_{\omega 2}}{\omega} \left(\frac{\partial k}{\partial r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) \quad 3.19$$

$$P_k = \min(\mu_t S^2, 10\beta^* \rho_{nf} k \omega) \quad , S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad 3.20$$

c) Viscosité turbulente – formulation SST

$$\mu_t = \frac{\rho_{nf} a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad 3.21$$

$$F_2 = \tanh \left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu_{nf}}{y^2\omega} \right)^2 \right] \quad 3.22$$

d) Fonction de mélange F_1 (passage $k-\epsilon \leftrightarrow k-\omega$)

$$F = \tanh(\Phi^4_1) \quad 3.23$$

$$\Phi_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu_{nf}}{y^2\omega} \right), \frac{4\rho_{nf}\sigma_{\omega 2}k}{CD_{kw}y^2} \right] \quad 3.24$$

$$CD_{kw} = \max \left(2\rho_{nf}\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, 10^{-10} \right) \quad 3.25$$

3.3.4 Propriétés thermo-physiques du fluide :

Le fluide de travail utilisé dans cette étude est l'eau. Le choix de l'eau est justifié par sa disponibilité, son coût réduit, ses propriétés thermo-physiques bien connues, ainsi que par sa correspondance directe avec l'étude expérimentale de référence de Kurtulmuş et Şahin (2020).

Toutes les propriétés thermo-physiques sont évaluées à la température moyenne d'entrée de 20°C et sont considérées constantes sur toute la plage de température étudiée (hypothèse justifiée par la faible variation de température dans l'écoulement).

Le tableau suivant résume les principales propriétés thermo-physiques de l'eau et de nanoparticules à 20 °C

Tableau 3.2 : propriétés thermo-physiques de l'eau à et de nanoparticules à 20°C

Propriétés thermo-physiques	ρ (kg/m³)	C_p (J/kgK)/	λ (W/mK)	μ (kg/
Eau	998.2	4182	0.6103	0.001003
Al ₂ O ₃	3600	765	36	-

3.3.5 Grandeurs caractéristiques du système

Afin de caractériser les performances thermo-hydrauliques du canal sinusoïdal sous écoulement pulsé, plusieurs grandeurs adimensionnelles et dimensionnelles ont été définies :

a) Coefficient de transfert de chaleur par convection (h) :

$$h = \frac{q_w}{T_w - T_b} \quad 3.26$$

b) Nombre de Nusselt moyen (Nu) :

$$Nu = \frac{h D_h}{\lambda} \quad 3.27$$

c) Nombre de Prandtl (Pr) :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad 3.28$$

d) Facteur de frottement (f) :

$$F_f = \frac{2 \Delta P D_h}{\rho u_{moy}^2 L} \quad 3.29$$

e) Indice de performance thermo-hydraulique (η) :

$$\eta = \frac{Nu / Nu_0}{(f/f_0)^{1/3}} \quad 3.30$$

Cet indice permet d'évaluer le compromis entre gain thermique et pénalité hydraulique.

3.4 Conditions aux limites :

Les conditions aux limites sont définies comme suit :

- Entrée du canal :

la vitesse de coulement pulsée : vitesse de fluide qui varie périodiquement dans le temps, elle est définie par la loi suivante :

$$u(t) = u_{moy}(1 + A \sin(2\pi f t)) \quad 3.31$$

Nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{U_{moy} \rho_n f H_{moy}}{\mu_n f} \quad 3.32$$

Vitesse moyenne :

$$U_{moy} = \frac{Re \mu_n f}{\rho H_{moy}} \quad 3.33$$

Nombre de Strouhal :

$$St = \frac{f_f H_{moy}}{U_{moy}} \quad 3.34$$

Intensité turbulente :

$$I = 0,16 Re^{\{-\frac{1}{8}\}} \quad 3.35$$

- La température est supposée uniforme :

$$T_{in} = 290K$$

- Zone chauffée (Parois supérieure et inférieure) :

$$q_w : \begin{cases} 0 \leq x \leq L \\ y = e + H_{max}/2 \end{cases}$$

$$q_w = 2000 \text{ W/m}^2$$

- Sortie du canal:

La sortie du domaine de calcul est modélisée par une condition de type outflow

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad \frac{\partial p}{\partial n} = 0$$

- Interface paroi-fluide :

$$u = v = 0$$

- Les parois du canal sont en aluminium

3.5 Étude du maillage :

Le maillage permet de représenter de manière discrète une variable continue sur un domaine de calcul. Il joue un rôle essentiel dans la modélisation numérique d'un problème physique. La solution numérique dépendant du type et de la finesse du maillage, une étude préliminaire d'indépendance de maillage est nécessaire pour valider les résultats.

Dans le présent travail, un maillage structuré (quadrilatère en 2D) a été utilisé pour analyser l'indépendance de la solution dans la configuration du canal sinusoïdal étudiée. Plusieurs grilles ont été examinées. Pour le canal sinusoïdal, quatre maillages ont été choisis : 41910, 44600, 48837 et 55494 cellules.

Les résultats présentés sur la figure ci-dessous montrent l'évolution de la vitesse transversale moyenne en fonction de la position transverse pour une section donnée du canal.

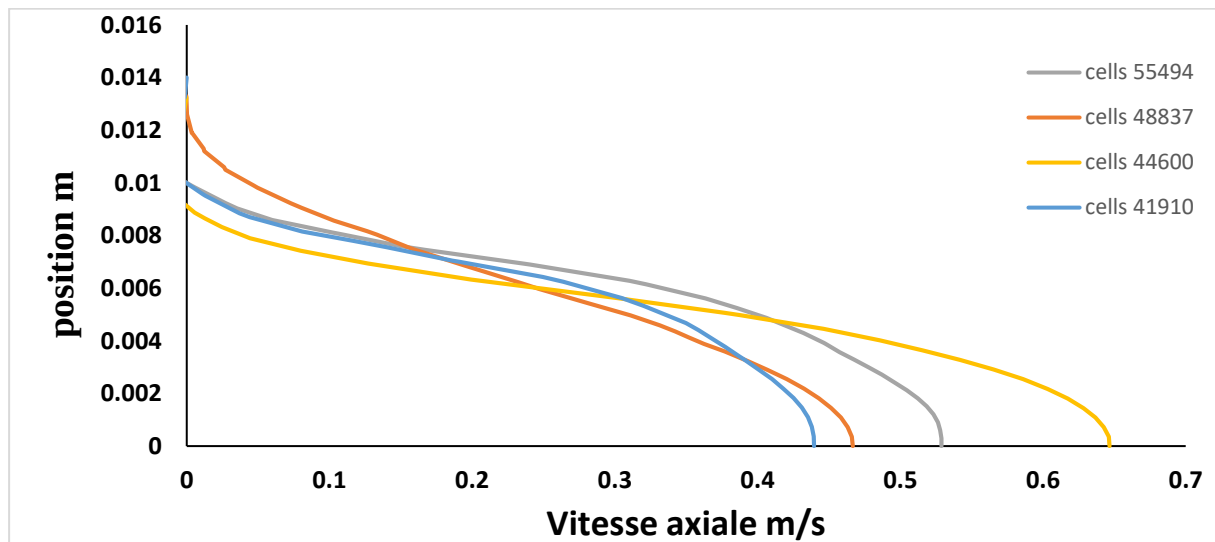
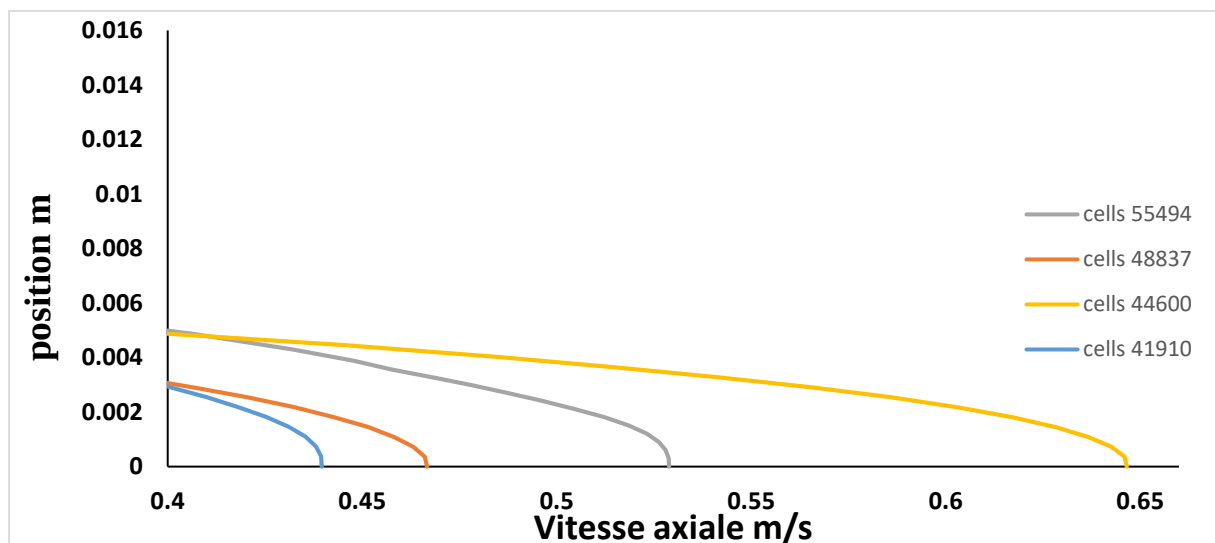


Figure 3.31: Profils de la vitesse axiale en fonction de la position pour différentes tailles de maillage



Chapitre 3 : description du problème physique étudié

Figure 3.32:Évolution détaillée des profils de vitesse dans l'intervalle $0.4 \leq x \leq 0.66$

L'analyse d'indépendance de maillage démontre que le maillage de **48 837 cellules** offre une précision suffisante. Les profils de vitesse et de température obtenus avec ce maillage sont pratiquement identiques à ceux du maillage le plus fin (55 494 cellules), avec des écarts relatifs inférieurs à 1 % sur toute la section du canal. Cela confirme que la solution numérique est indépendante du maillage à partir de 48 837 cellules.

Ce maillage permet de capturer correctement les forts gradients de vitesse près des parois et dans les zones de recirculation des ondulations, sans lisser excessivement les structures physiques. Les maillages plus grossiers montrent des écarts notables dans l'épaisseur de la couche limite et les pics de vitesse, ce qui affecterait la précision du nombre de Nusselt et du facteur de frottement.

Compte tenu du caractère instationnaire de l'étude (écoulement pulsé URANS avec plusieurs nombres de Strouhal, fractions volumiques et instants simulés), le maillage de 48 837 cellules représente le meilleur compromis entre précision et coût de calcul. Passer au maillage plus fin augmenterait significativement le temps CPU (environ 15-20 %) pour un gain négligeable en précision.

Enfin, ce maillage a été utilisé pour la validation avec les données expérimentales de Kurtulmuş et Şahin, où un bon accord a été obtenu sur les nombres de Nusselt et les profils de vitesse. Il assure également une excellente stabilité numérique pour le modèle $k-\omega$ SST en régime pulsé, avec une bonne convergence des résidus.

En conclusion, le maillage de 48 837 cellules est optimal : il garantit à la fois l'indépendance du maillage, la fidélité physique et une gestion raisonnable du temps de calcul pour l'ensemble de l'étude.

3.6 Condition d'entrée pulsée via UDF :

La reproduction fidèle de l'écoulement pulsé constitue un élément essentiel de la modélisation numérique. Afin d'imposer à l'entrée du domaine une vitesse instationnaire reproduisant les conditions expérimentales de Kurtulmuş et Şahin (2020), une User Defined Function (UDF) programmée en langage C a été développée et intégrée dans ANSYS Fluent. Cette fonction est chargée dynamiquement dans le solveur et est exécutée à chaque pas de temps pour calculer la composante longitudinale de la vitesse en fonction du temps physique simulé. Elle permet non seulement d'appliquer la loi de pulsation sinusoïdale, mais aussi de contrôler les grandeurs turbulentes à l'entrée (intensité turbulente et longueur de turbulence). L'utilisation d'une UDF offre une grande flexibilité et assure une correspondance précise entre la simulation numérique et le signal de pulsation généré expérimentalement par le volet rotatif. Cette approche est particulièrement adaptée aux études d'écoulements pulsés où les conditions d'entrée classiques (vitesse constante ou profil fixe) sont insuffisantes.

3.7 Principe de la méthode des volumes finis et critère de convergence :

La résolution des équations gouvernantes (équations de continuité, de Navier-Stokes moyennées et de l'énergie) est effectuée à l'aide du logiciel commercial Fluent, qui repose sur la méthode des volumes finis (Finite Volume Method - FVM). Cette méthode est l'une des techniques les plus utilisées en mécanique des fluides numérique (CFD).

Chapitre 3 : description du problème physique étudié

Principe de la méthode des volumes finis : Le domaine de calcul est subdivisé en un nombre fini de petits volumes de contrôle (maillage). Les équations de conservation sont intégrées sur chaque volume de contrôle. En appliquant le théorème de la divergence, les termes de flux (convectifs et diffusifs) aux faces de chaque volume sont convertis en intégrales de surface. Le système d'équations intégrales est ensuite transformé en un système d'équations algébriques linéaires, résolu de manière itérative.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle physique étudié et les équations utilisées dans notre étude pour résoudre le problème dynamique et thermique d'un canal sinusoïdal traversé par un écoulement pulsé de nanofluide Al_2O_3 -eau à différentes fractions volumiques. L'écoulement est décrit par les équations de Navier–Stokes moyennées (URANS) associées aux conditions classiques de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie, complétées par le modèle de turbulence $k-\omega$ SST.

Les grandeurs caractéristiques de l'écoulement telles que le coefficient de transfert de chaleur par convection, le nombre de Nusselt, le facteur de frottement et l'indice de performance thermo-hydraulique ont été définies afin d'évaluer les performances thermiques et hydrauliques du système sous l'effet combiné de la pulsation et de la présence des nanoparticules.

Dans une seconde phase, nous avons décrit en détail le problème physique étudié, la géométrie du canal sinusoïdal, les hypothèses simplificatrices, les conditions aux limites spécifiées (incluant la génération de l'écoulement pulsé via UDF), ainsi que l'étude d'indépendance du maillage. Les premiers résultats de cette étude ont permis de valider le maillage adopté (48837 cellules) et de confirmer la convergence des simulations.

Ce chapitre constitue ainsi une base solide pour la validation numérique et l'analyse détaillée des champs d'écoulement et de transfert de chaleur qui seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Résultats et Discussion

4.1 Introduction

L'écoulement pulsé dans les canaux sinusoïdaux constitue une technique active efficace pour améliorer le transfert thermique en perturbant la couche limite et en favorisant le mélange du fluide. Cependant, l'efficacité de cette méthode reste limitée par les faibles propriétés thermiques des fluides conventionnels comme l'eau.

L'utilisation de nanofluides permet d'augmenter significativement la conductivité thermique effective du fluide caloporteur. Ainsi, la combinaison d'un écoulement pulsé et d'un nanofluide représente une approche prometteuse pour intensifier davantage les échanges thermiques.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier numériquement l'effet combiné d'un écoulement pulsé et d'un nanofluide (Al_2O_3 -eau) dans un canal sinusoïdal. Nous analyserons l'influence de la fraction volumique des nanoparticules, de la fréquence et de l'amplitude de pulsation sur le transfert thermique, les pertes de charge et l'indice de performance thermo-hydraulique.

4.2 Validation du modèle numérique

Afin de vérifier la fiabilité de notre approche numérique, nous avons comparé nos résultats avec ceux de l'étude expérimentale de **Nazım Kurtulmuş, Besir Sahin** réalisée dans un canal sinusoïdal soumis à un écoulement pulsé. La **Figure 4.1** présente l'évolution du nombre de Nusselt moyen Nu en fonction du nombre de Strouhal St . On observe un bon accord entre nos résultats numériques et les données expérimentales de [7], ce qui valide notre modèle CFD pour l'étude des écoulements pulsés dans les canaux sinusoïdaux. La comparaison entre les résultats numériques et les données expérimentales de Kurtulmuş et Şahin montre un très bon accord. L'erreur relative moyenne est d'environ 6 %, avec un écart maximal de 8,9 % à basse fréquence ($St=0,11$ à $St=0,11$) et un écart minimal de 2,7 % à haute fréquence ($St=2,07$ à $St=2,07$). Ces faibles écarts, inférieurs à 10 %, confirment la fiabilité de notre modèle CFD (maillage, modèle de turbulence $k-\omega k-\omega$ SST, conditions aux limites) pour reproduire fidèlement les phénomènes thermo-hydrauliques dans un canal sinusoïdal soumis à un écoulement pulsé. Cette validation nous autorise à étendre l'étude à l'analyse des nanofluides.

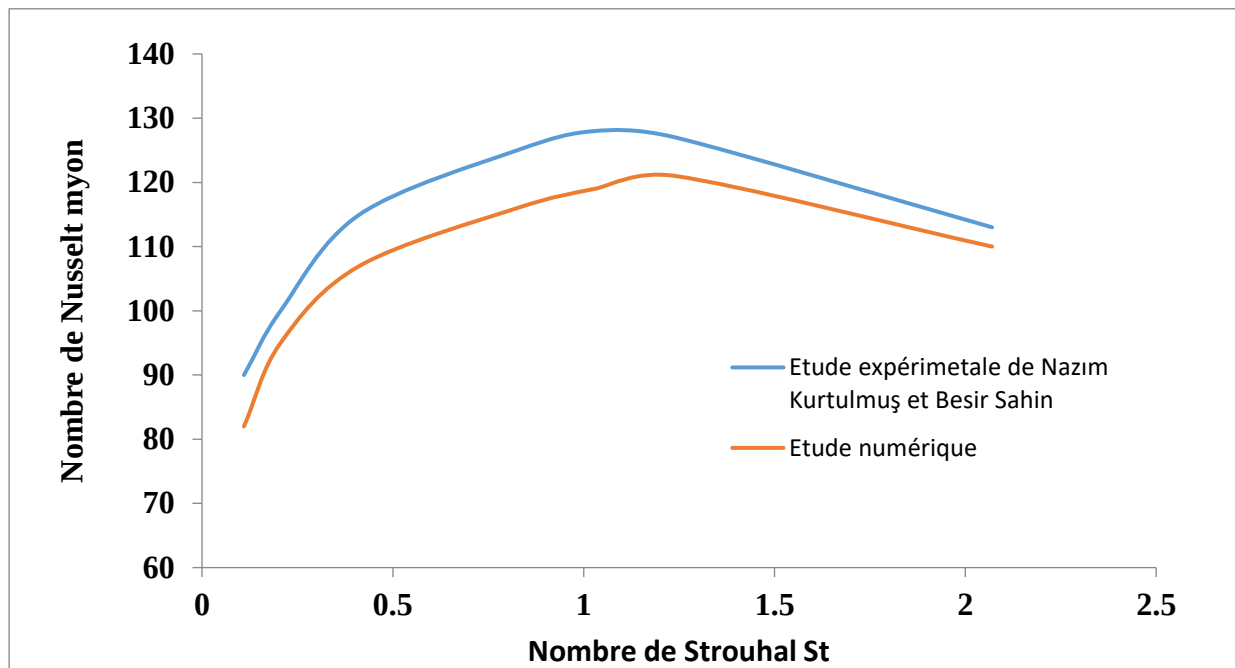


Figure 4.33 : Comparaison avec les travaux de Nazım Kurtulmuş et Besir Sahin [7] , de Nombre de Nusselt moyen, en fonction du nombre de Strouhal St. .

4.3 Résultats et discussions

4.3.1 Cas de fraction volumique pour l'eau pure

4.3.1.1 Profil de vitesse pour l'eau pure à $x=L/2$

La figure 4.34 illustre l'évolution du profil de vitesse longitudinale, mesurée à $x = L/2$, pour sept nombres de Strouhal ($St = 0,11$ à $2,07$). On constate que plus St est faible, plus le profil est évasé et aplati au centre, traduisant une répartition plus homogène de la vitesse sous l'effet dominant de la viscosité. À l'inverse, pour les valeurs élevées de St ($\geq 0,806$), le profil s'affine et présente un gradient de vitesse plus prononcé près de la paroi, signe d'une inertie croissante. Le nombre de Strouhal $St = 0,206$, retenu pour la suite de l'étude, correspond à un régime intermédiaire où le profil conserve une forme relativement pleine tout en présentant déjà une légère courbure caractéristique. Par ailleurs, les essais réalisés avec les nanofluides (1 %, 3 % et 5 %) – non représentés ici – montrent une diminution de la vitesse centrale par rapport à l'eau pure, attribuée à l'augmentation de la viscosité effective qui tend à raidir le gradient pariétal.

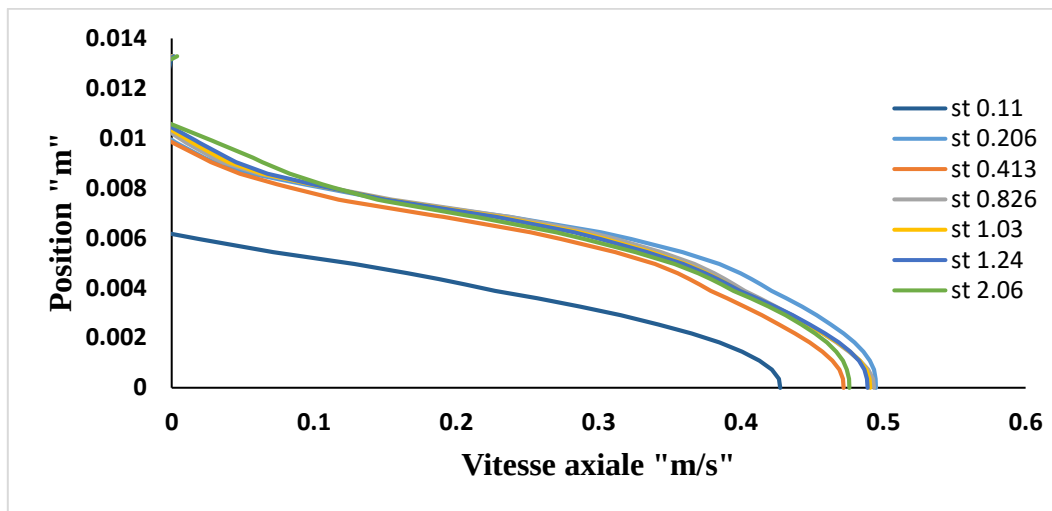


Figure 4.34 : Profile de vitesse axiale de l'eau pure pour sept nombre de Strouhal à $x=L/2$.

4.3.1.2 Profil de température pour l'eau pure à $x= L /2$

La figure 4.35 présente l'évolution du profil de température longitudinale, mesurée à $x = L/2$, pour les sept nombres de Strouhal étudiés (de 0,11 à 2,06). On constate que deux courbes se distinguent nettement par des températures plus élevées et des profils particulièrement bien développés : il s'agit de $St = 0,206$ (notre condition de référence) et $St = 2,06$ (fréquence la plus élevée). Ces deux profils atteignent des températures supérieures à 291 K, voire proches de 292 K pour $St = 2,06$, avec une répartition thermique très régulière sur toute la section. Ce comportement traduit une meilleure efficacité des échanges thermiques pour ces deux régimes, probablement due à un mélange plus efficace du fluide sous l'effet des oscillations. Les autres nombres de Strouhal (0,11 ; 0,413 ; 0,826 ; 1,03 et 1,24) présentent des profils moins élevés, avec des températures plafonnant autour de 290–290,5 K, ce qui indique un transfert de chaleur moins performant.

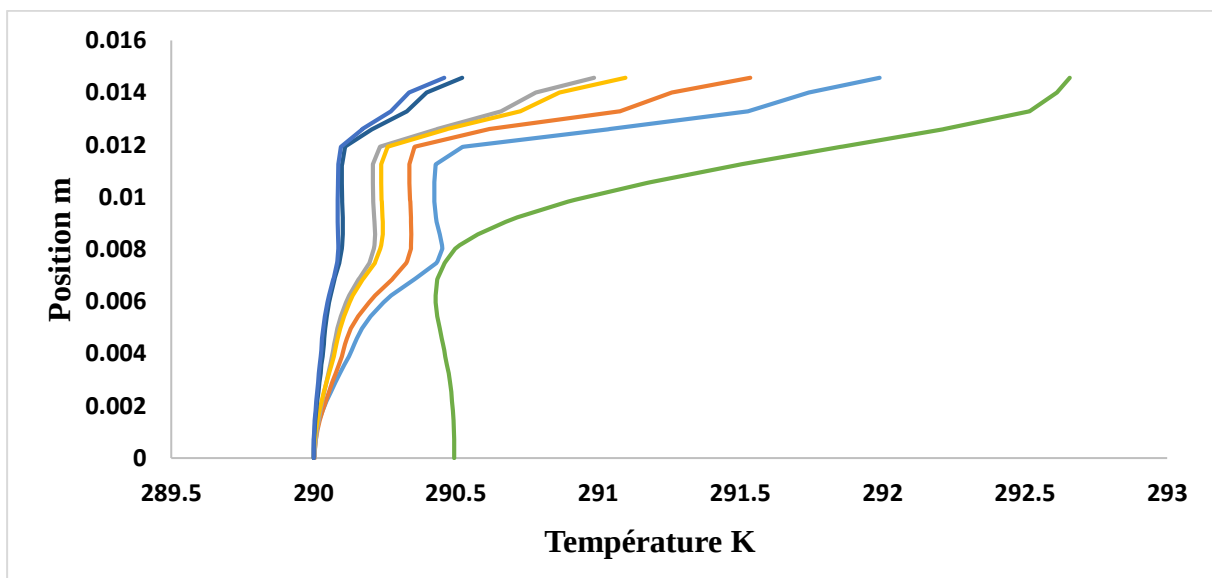


Figure 4.35 : les profils de température de l'eau pure pour les sept nombres de Strouhal.

4.3.2 Impact de la fraction volumique des Nanoparticules

4.3.2.1 Profils de vitesse pour la fraction volumique 1% à $x=L/2$

La Figure 4.36 montre les profils de vitesse adimensionnelle pour le nanofluide Al_2O_3 -eau à 1% de fraction volumique. Pour les faibles nombres de Strouhal ($St=0,206$ et $0,413$), les profils présentent une forme parabolique caractéristique d'un écoulement laminaire établi. À mesure que St augmente ($St=0,826$ à $2,06$), les profils s'aplatissent au centre et deviennent plus raides près des parois, traduisant un meilleur mélange du fluide sous l'effet des pulsations. Pour les fréquences encore plus élevées, les profils tendent à s'arrondir à nouveau, indiquant que des pulsations trop rapides atténuent l'effet bénéfique sur la dynamique de l'écoulement. Comparés aux profils de l'eau pure, les profils du nanofluide à 1% sont très similaires, avec une légère diminution de la vitesse au centre due à l'augmentation modérée de la viscosité. L'effet des nanoparticules sur la dynamique reste donc limité à cette concentration.

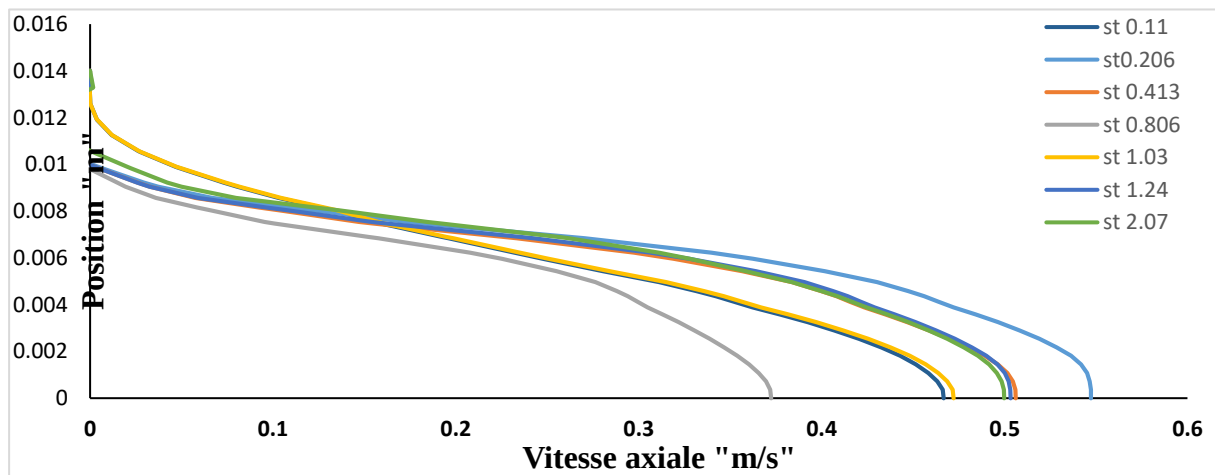


Figure 4.36 : Profils de vitesse axiale en fonction de la position pour le nanofluide à 1% de fraction volumique.

4.3.2.2 Profils de température pour la fraction volumique 1% à $x=L/2$

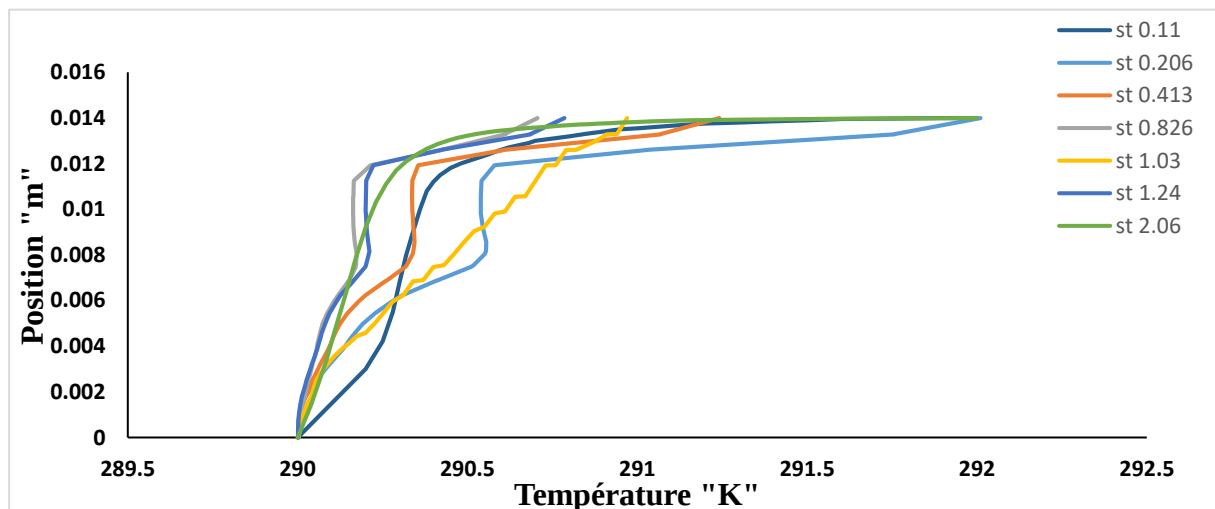


Figure 4.37 : Profils de température de nanofluide Al_2O_3 -eau ($\phi = 1\%$) pour différents nombres de Strouhal.

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

La Figure 4.37 présente les profils de température pour le nanofluide Al_2O_3 -eau à 1% de fraction volumique. On observe que l'augmentation du nombre de Strouhal favorise une meilleure homogénéisation de la température dans la section du canal.

Pour les faibles valeurs de St (0,11 et 0,206), le gradient de température est plus marqué près des parois, avec un cœur de l'écoulement encore relativement froid. Cela indique que la couche limite thermique est peu perturbée et que le transfert de chaleur reste limité.

À mesure que St augmente (0,413 à 1,03), les profils s'adoucissent et la température devient plus uniforme au centre du canal. Les pulsations améliorent le mélange radial du fluide, transportant efficacement la chaleur depuis la paroi chauffée vers le cœur de l'écoulement.

Pour la fréquence la plus élevée ($St=2,07$), on observe une tendance au retour vers un profil plus stratifié, suggérant qu'une pulsation trop rapide atténue l'effet bénéfique sur le mélange thermique, comme déjà observé pour les profils de vitesse.

Comparé à l'eau pure, le nanofluide à 1% montre une meilleure conduction thermique, ce qui se traduit par des températures globalement plus homogènes et une réduction des gradients près de la paroi

4.3.2.3 Comparaison de profil de température entre l'eau pure et la fraction volumique 1% pour $St=0.206$

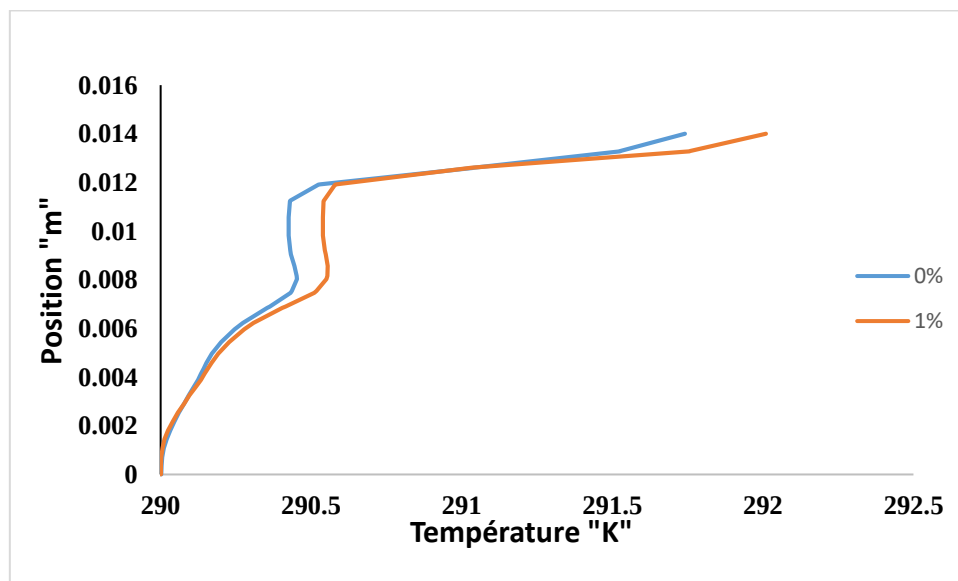


Figure 4.38: Comparaison de profils de température pour $St=0,206$ entre l'eau pure et le nanofluide Al_2O_3 -eau à 1%.

L'étude compare les profils de température à $St = 0,206$ entre l'eau pure et le nanofluide Al_2O_3 -eau à 1 %.

- Dans le cœur de l'écoulement, les températures sont quasi identiques (290–291 K) pour les deux fluides, grâce au mélange turbulent intense qui homogénéise le champ thermique.

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

- Près des parois chauffantes (zone 291,5–292,5 K), le nanofluid présente des températures légèrement inférieures (écart maximal d'environ 0,5 K). Par exemple, là où l'eau pure atteint 292 K, le nanofluid n'est qu'à 291,5 K.

Cette différence s'explique par la meilleure conductivité thermique du nanofluid (+1,5 %), qui permet une évacuation plus efficace de la chaleur depuis les parois. Le gradient thermique est donc moins abrupt avec le nanofluid, signe d'une couche limite thermique mieux maîtrisée et d'une efficacité de refroidissement supérieure.

Même à faible concentration (1 %), l'ajout de nanoparticules améliore le transfert thermique, ce qui est cohérent avec l'augmentation du nombre de Nusselt observée.

4.3.2.4 Comparaison de profil de vitesse entre l'eau pure et la fraction volumique 1 % pour $St=0.206$

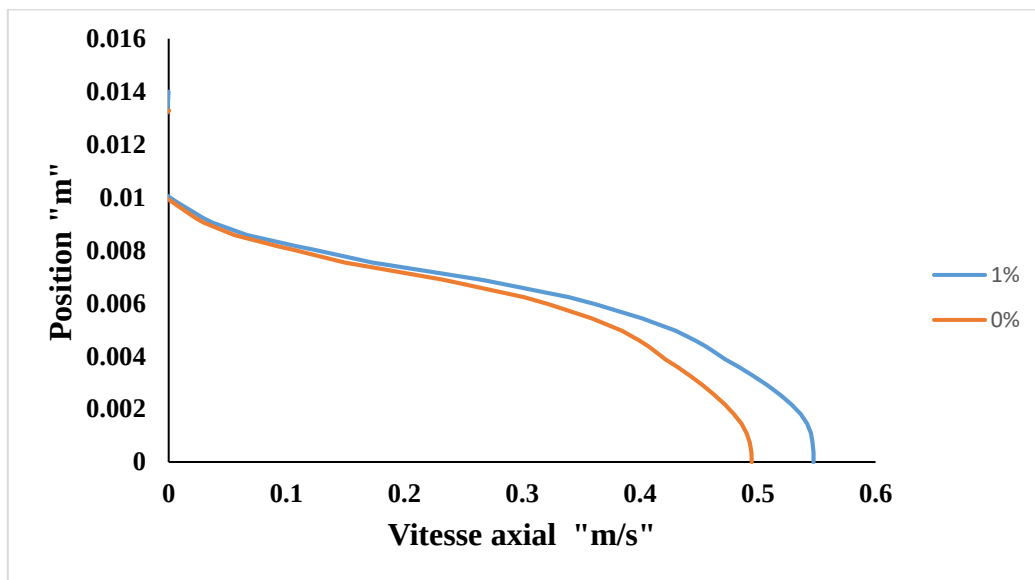


Figure 4.39: Comparaison des profils de vitesse axiale entre l'eau pure et le nanofluid Al_2O_3 -eau (1 %) pour un nombre de Strouhal $St=0,206$

A partir de ces courbes on remarque que :

- Les deux fluides conservent le profil classique d'un écoulement en canal : vitesse nulle aux parois et maximale au centre.
- Dans la zone centrale (positions 0,2 à 0,4), la vitesse maximale est d'environ 0,015 m/s pour l'eau pure, contre 0,0135 m/s pour le nanofluid. Cette réduction est due à l'augmentation de la viscosité dynamique provoquée par les nanoparticules, qui augmente la résistance à l'écoulement et aplatit légèrement le profil de vitesse.
- Près des parois (positions $< 0,1$ et $> 0,5$), les profils sont quasiment superposés, indiquant que l'effet des nanoparticules est faible dans la couche limite dynamique.

Globalement, l'ajout de 1 % de nanoparticules d'alumine réduit modérément la vitesse au centre du canal tout en pouvant stabiliser l'écoulement dans les zones de fort cisaillement (réduction des fluctuations turbulentes).

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

Cet effet hydrodynamique est cohérent avec les observations antérieures (structures tourbillonnaires moins intenses) et complète l'amélioration du transfert thermique déjà constatée : les nanoparticules influencent donc à la fois le comportement thermique et la dynamique de l'écoulement, même à faible concentration.

4.3.3 Coefficient de transfert de chaleur par convection (h)

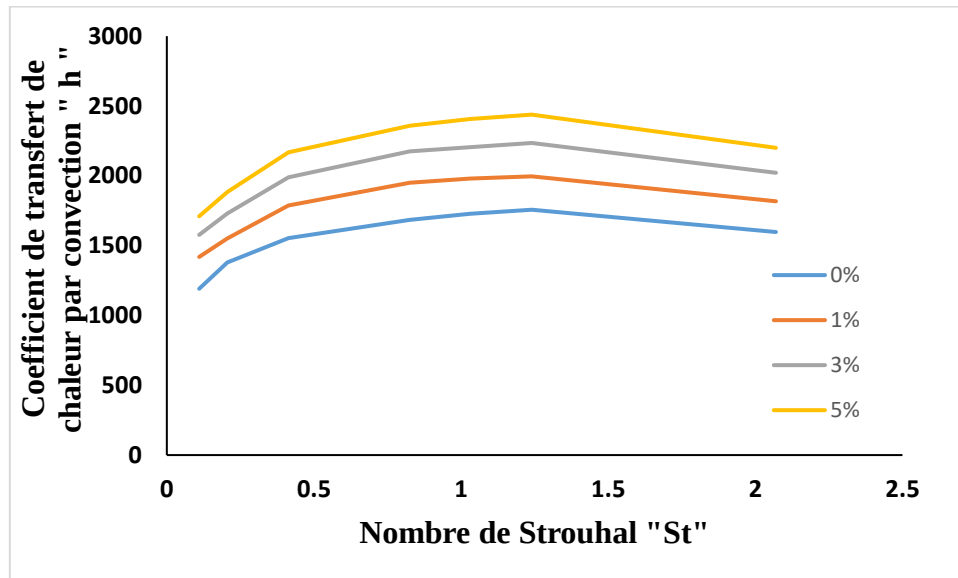


Figure 4.40 : Évolution du coefficient de convection h ($W/m^2 \cdot K$) en fonction du nombre de Strouhal St pour l'eau pure et les nanofluides Al_2O_3 -eau à 1 %, 3 % et 5 %.

La Figure 4.41 présente l'évolution du coefficient de transfert de chaleur par convection h en fonction du nombre de Strouhal St pour l'eau pure et les nanofluides Al_2O_3 -eau à 1 %, 3 % et 5 % de fraction volumique. On observe que, pour chaque valeur de St , le coefficient de convection augmente avec la fraction volumique, ce qui confirme l'effet bénéfique des nanoparticules sur le transfert thermique grâce à l'amélioration de la conductivité thermique effective du fluide. Pour toutes les fractions volumiques, h croît avec St jusqu'à atteindre un maximum situé entre $St=1S$ et $St=1,5$, puis diminue légèrement pour les fréquences plus élevées ($St=2$). Cette tendance met en évidence l'existence d'une fréquence de pulsation optimale pour laquelle le mélange radial du fluide est le plus efficace. La meilleure performance est obtenue pour la fraction volumique la plus élevée ($\phi=5\%$) à $St=1,5$, avec $h=2450 W/m^2 \cdot K$, soit une amélioration par rapport à l'eau pure ($h=1700 W/m^2 \cdot K$). L'écart entre 0 % et 1 % est très marqué, tandis que les gains entre 1 % et 3 %, puis entre 3 % et 5 %, deviennent progressivement plus faibles, ce qui suggère un effet de seuil au-delà duquel l'augmentation de la concentration apporte un bénéfice thermique marginal. Ces résultats confirment que la combinaison d'un écoulement pulsé et d'un nanofluide permet d'intensifier significativement les échanges thermiques dans un canal sinusoïdal, avec une fraction volumique optimale autour de 3 à 5 %.

4.3.4 Nombre de Nusselt moyen

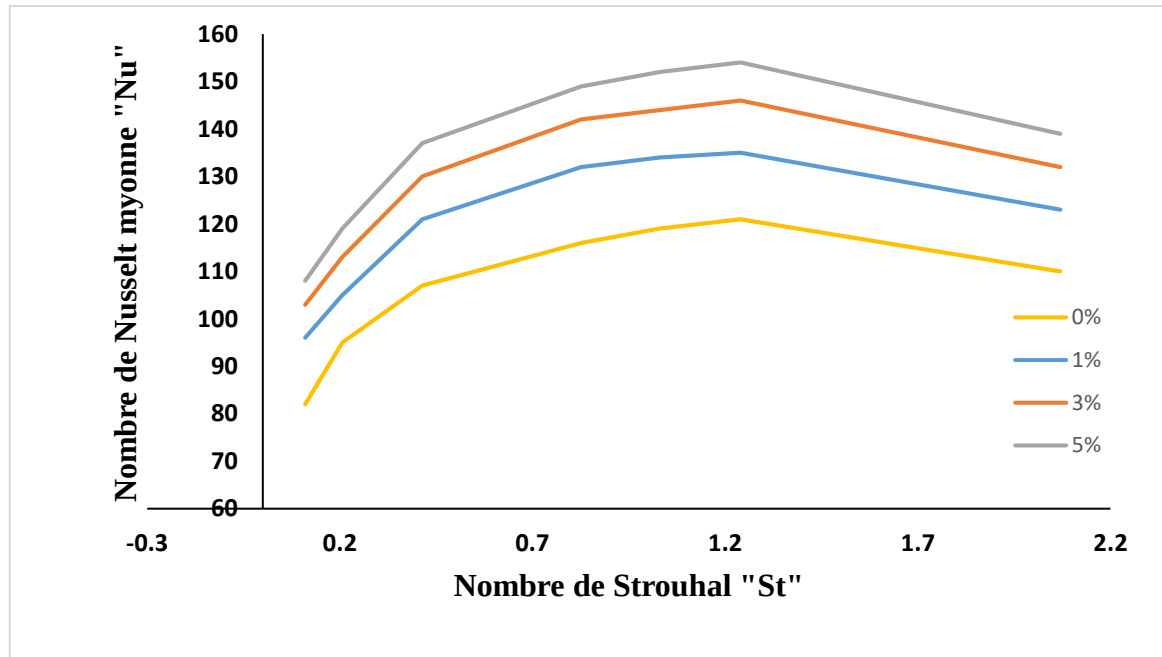


Figure 4.41 : Évolution du nombre de Nusselt moyen Nu en fonction du nombre de Strouhal St pour l'eau pure et différentes fractions volumiques de nanofluide Al_2O_3 -eau (1%, 3 % et 5 %).

La Figure 4.40 illustre l'évolution du nombre de Nusselt moyen (Nu) en fonction du nombre de Strouhal (St) pour l'eau pure et les nanofluides Al_2O_3 -eau aux fractions volumiques de 1 %, 3 % et 5 %.

Principales observations :

- Pour un même St , le nombre de Nusselt augmente avec la concentration en nanoparticules. Cela confirme l'amélioration de la conductivité thermique effective du fluide et donc du transfert thermique.
- Quel que soit le fluide, Nu croît avec St , atteint un maximum entre $St = 1,2$ et $1,5$, puis diminue légèrement aux fréquences plus élevées (ex. $St = 2,07$).
- Cette évolution révèle l'existence d'une fréquence de pulsation optimale qui maximise le mélange radial du fluide.

Explications selon les régimes :

- À faible St ($< 0,5$) : les pulsations sont trop lentes $\rightarrow$ effet négligeable sur la couche limite thermique (comportement quasi stationnaire).
- À St optimal ($\approx 1,2-1,5$) : les pulsations génèrent des tourbillons qui transportent efficacement la chaleur de la paroi vers le cœur de l'écoulement.
- À St élevé : les variations de vitesse sont trop rapides $\rightarrow$ le mélange devient moins efficace.

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

Performance maximale : obtenue avec la fraction volumique $\phi = 5 \%$ à $St = 1,24$, où Nu atteint 154, représentant une amélioration significative par rapport à l'eau pure

4.3.5 Facteur de frottement

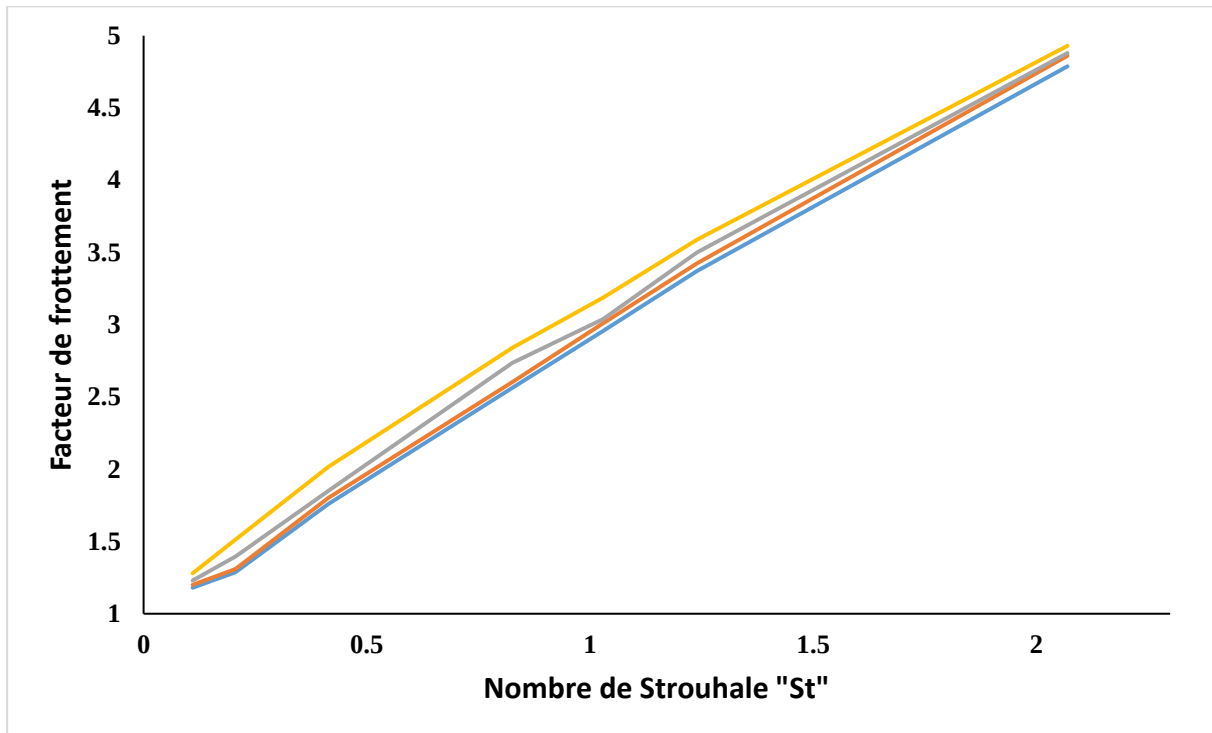


Figure 4.42 : Évolution du facteur de frottement F_f en fonction du nombre de Strouhal St pour différentes fractions volumiques de nanofluide Al_2O_3 -eau ($\phi = 1 \%$, 3% et 5%) et de l'eau pur

Pour toutes les fractions volumiques, le facteur de frottement F_f augmente avec le nombre de Strouhal (St). Cette évolution traduit l'accroissement des pertes de charge lorsque la fréquence de pulsation s'élève, en raison des effets inertiels et des accélérations/décélérations plus marquées du fluide.

À St fixe, le facteur de frottement augmente avec la concentration en nanoparticules. La valeur la plus faible est observée pour l'eau pure, tandis que la plus élevée est obtenue avec le nanofluide à 5% . Ce comportement s'explique par l'augmentation de la viscosité dynamique du fluide due à l'ajout de nanoparticules, qui accroît les pertes de charge.

L'écart entre l'eau pure et le nanofluide à 5% diminue progressivement avec l'augmentation de St . Il devient quasiment nul à $St = 2,07$, où toutes les courbes convergent vers une valeur commune ($f \approx 4,82$). À très haute fréquence, les pertes inertielles dominent largement les pertes visqueuses, rendant l'effet de la viscosité négligeable. Ainsi, le comportement de l'écoulement est alors principalement gouverné par l'inertie du fluide, indépendamment de la concentration en nanoparticules.

En conclusion, l'ajout de nanoparticules accroît le facteur de frottement, mais cet effet s'atténue fortement aux hautes fréquences de pulsation. La meilleure performance hydraulique (pertes de charge les plus faibles) est

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

obtenue avec l'eau pure, alors que le nanofluide à 5 % présente les pertes les plus élevées, particulièrement aux basses et moyennes fréquences.

4.3.6 Indice de performance thermo-hydraulique η

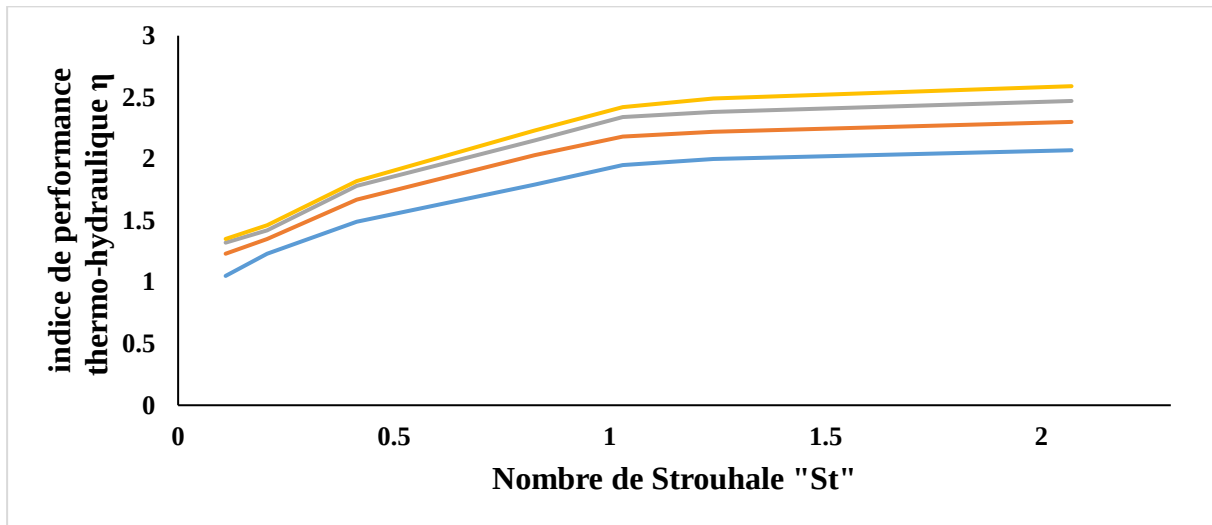


Figure 4.43 : Évolution de l'indice de performance thermo-hydraulique η en fonction du nombre de Strouhal St pour les nanofluides Al_2O_3 -eau à 1 %, 3 % et 5 % et eau pure (référence : eau pure dans un canal lisse)

La Figure 4.43 présente l'indice de performance η , qui mesure le compromis entre le gain en transfert thermique (Nu) et la pénalité hydraulique (facteur de frottement f). Une valeur $\eta > 1$ indique que l'amélioration thermique compense largement les pertes de charge supplémentaires.

Principaux résultats :

Pour toutes les fractions volumiques et tous les nombres de Strouhal, l'indice de performance thermo-hydraulique est largement supérieur à 1 (entre 1,2 et 2,6)

Effet de la fraction volumique : l'indice de performance thermo-hydraulique augmente avec la concentration de nanoparticules. Les meilleures performances sont obtenues à $\phi = 5\%$.

L'association canal sinusoïdal + nanofluides offre d'excellentes performances thermo-hydrauliques, même à hautes fréquences de pulsation. Le gain thermique compense très largement l'augmentation des pertes de charge, avec une efficacité optimale à 5 % de nanoparticules.

4.4 Contours de température

St=0.206

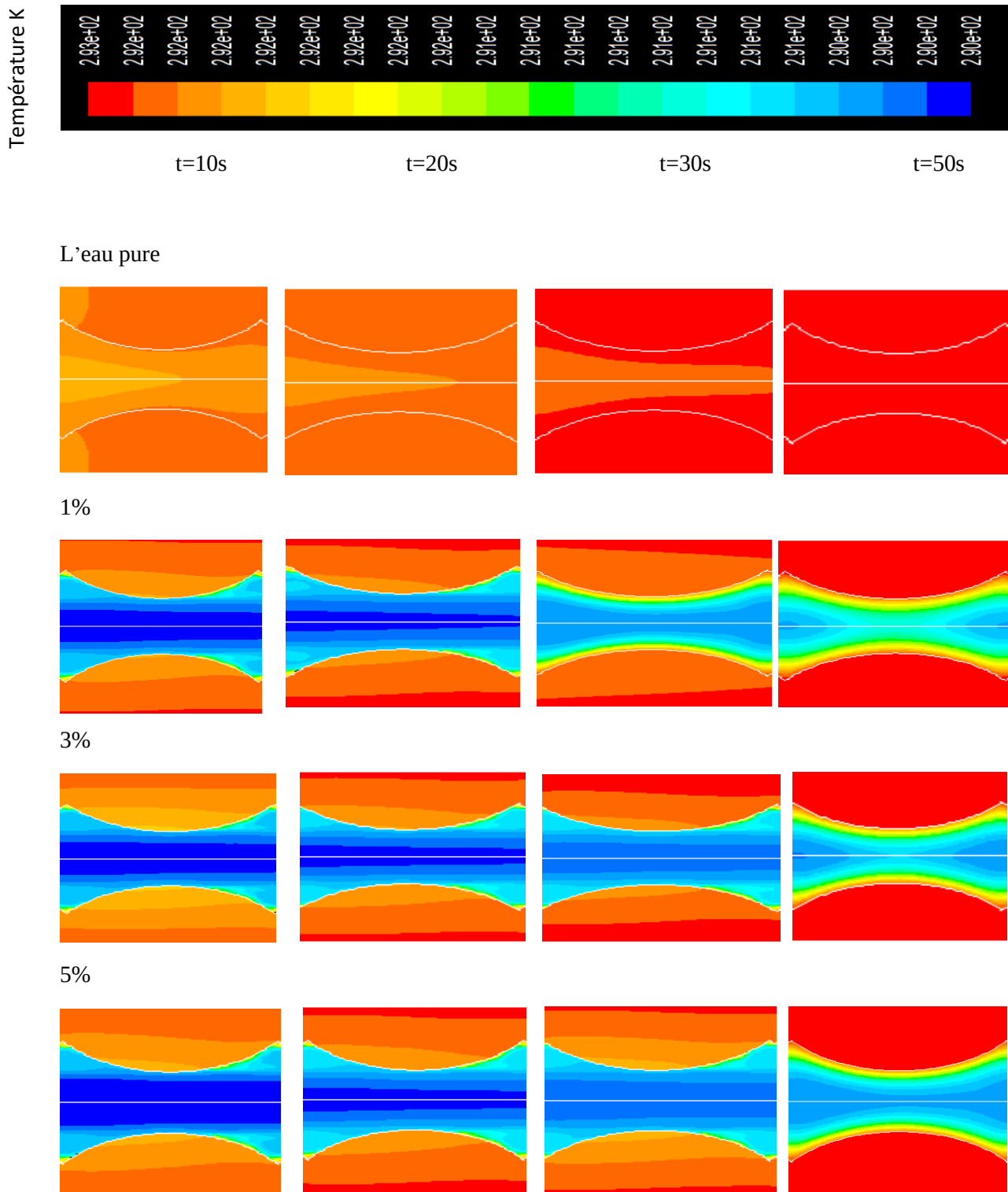


Figure 4.44 : Évolution temporelle ($t = 10, 20, 30, 50$ s) des contours de température dans la 7^{ème} ondulation du canal sinusoïdal pour $St=0,206$ – comparaison entre l'eau pure et nanofluides Al_2O_3 -eau à 1 %, 3 % et 5 %.

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

La Figure 4.44 présente une série de contours de température (zoom sur une ondulation numéro 7) pour $St=0,206$, aux fractions volumiques 0 %, 1 %, 3 % et 5 %, et aux instants $t=10, 20, 30$ et 50 secondes.

À chaque instant, l'augmentation de la fraction volumique réduit l'étendue des zones chaudes. L'eau pure présente une zone chaude largement développée dans le creux de l'ondulation. Dès 1 %, cette zone se rétracte ; à 3 % elle est encore plus localisée ; à 5 % elle est minimale. Cela confirme le rôle bénéfique des nanoparticules sur l'évacuation de la chaleur.

- **L'eau pure** : La zone chaude s'étend progressivement de $t=10$ s à $t=50$ s. À $t=50$ s, presque tout l'espace de l'ondulation est chaud, signe d'un mauvais refroidissement.
- **Nanofluide 1 %** : L'extension est ralentie par rapport à l'eau pure. À $t=50$ s, la zone chaude reste limitée près de la paroi.
- **Nanofluide 3 %** : L'extension est encore plus faible. Dès $t=20$ s, la zone chaude est bien circonscrite.
- **Nanofluide 5 %** : Pratiquement pas d'évolution visible entre $t=10$ s et $t=50$ s. La chaleur reste confinée à une fine couche près de la paroi ; le cœur de l'écoulement reste froid.

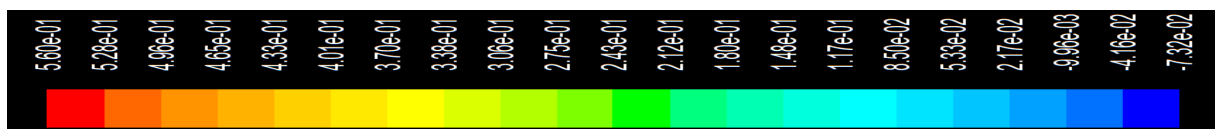
À $t=50$ s, l'eau pure montre une température quasi homogène dans toute l'ondulation. Pour $\phi=5$ %, seuls les points proches de la paroi sont chauds ; le reste du domaine est à une température proche de l'entrée. La transition est progressive : 1 % encore assez chaud, 3 % déjà très bien refroidi, 5 % optimal.

L'ensemble des instants confirme que les nanofluides, en particulier à 5 %, permettent de maintenir un cœur d'écoulement froid même après 50 secondes de chauffage, tandis que l'eau pure se réchauffe rapidement. La supériorité des fortes fractions volumiques est nette pour le refroidissement des zones critiques (creux des ondulations)

4.5 Contours de vitesse axiale

$St=0.206$

Vitesse axiale m/s



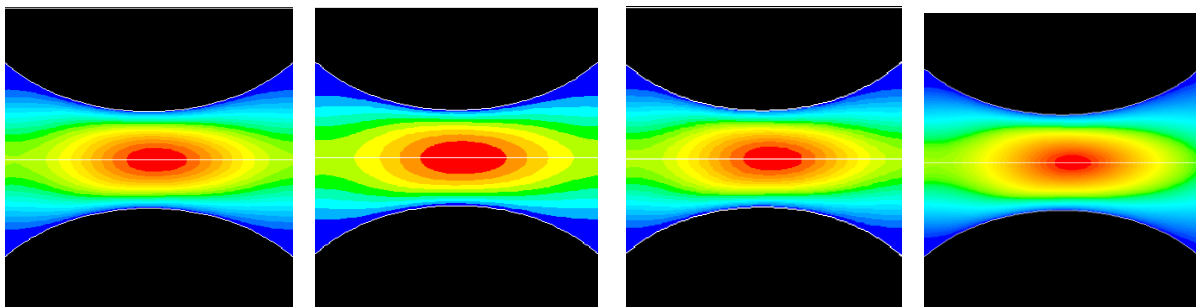
$t=10s$

$t=20s$

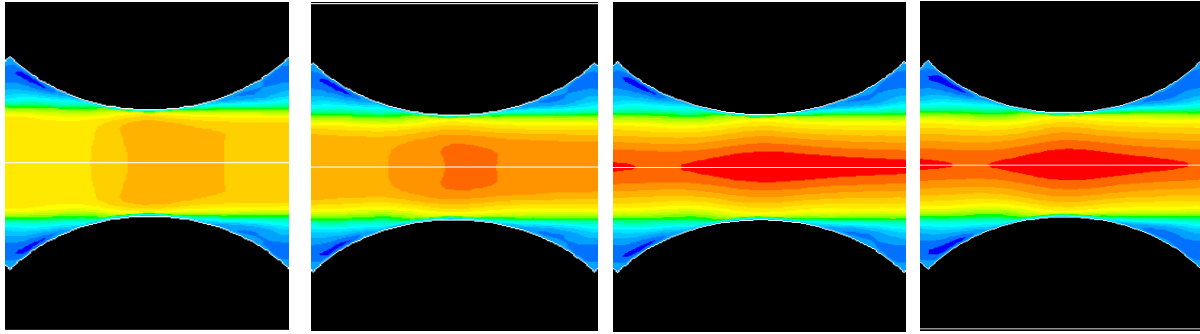
$t=30s$

$t=50s$

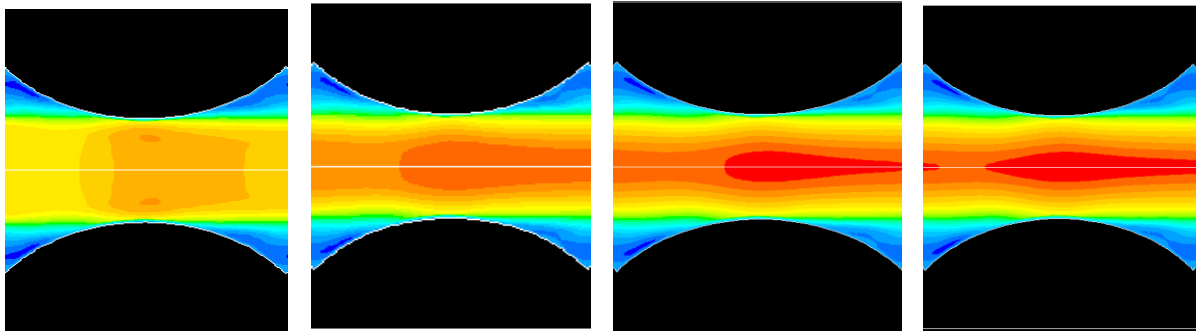
L'eau pure



1%



3%



5%

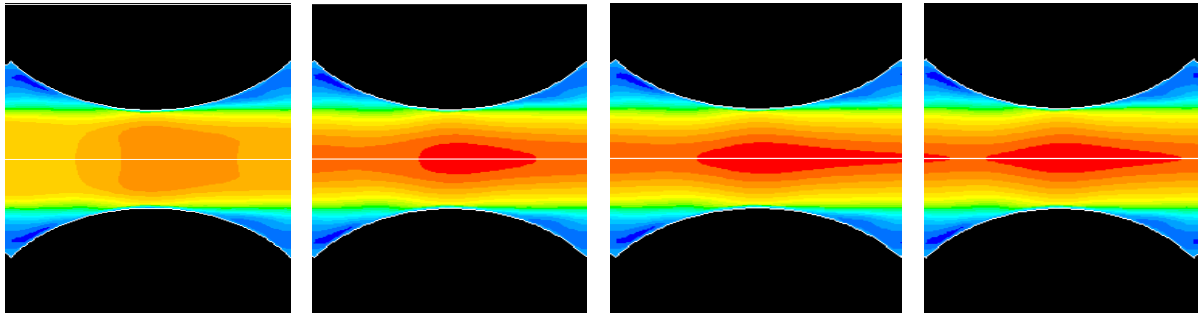


Figure 4.45 : Évolution temporelle ($t = 10, 20, 30, 50$ s) des contours de vitesse axiale (m/s) dans la 7^{ème} ondulation du canal sinusoïdal pour $St=0,206$, avec une comparaison entre l'eau pure et nanofluides Al_2O_3 -eau à 1%, 3% et 5%.

La figure 4.45 présente les contours de vitesse dans la 7^{ème} ondulation du canal sinusoïdal pour un nombre de Strouhal fixé à 0,206 (écoulement turbulent URANS – $k-\omega$ SST).

Effet de la fraction volumique de nanoparticules :

- **L'eau pure :** Large zone centrale de vitesse élevée (rouge) et présence de tourbillons de recirculation marqués dans les creux (zones bleues). Fort mélange radial.
- **1 % :** Zone rouge centrale légèrement réduite, tourbillons moins intenses.
- **3 % :** Vitesse maximale plus faible, structures turbulentes nettement atténuées.
- **5 % :** Zone rouge presque disparue, vitesses plus modérées (teintes orange/jaune), tourbillons non discernables → écoulement plus homogène et quasi laminaire.

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

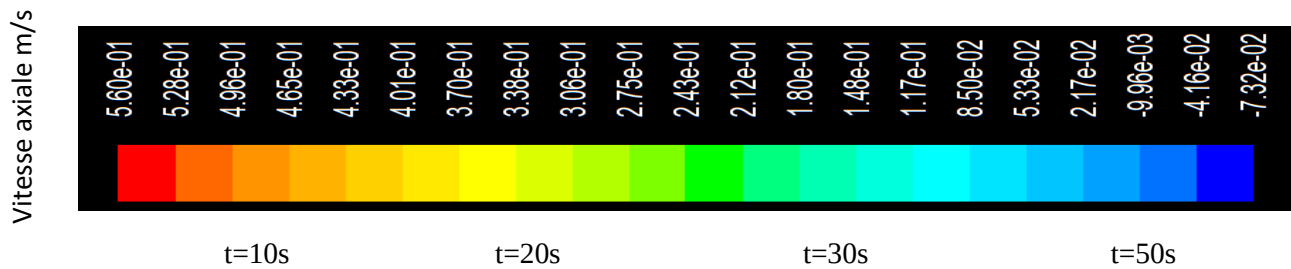
Interprétation physique : L'ajout de nanoparticules augmente la viscosité du fluide, diminue le nombre de Reynolds et produit un effet laminarisant qui atténue les fluctuations turbulentes et les tourbillons.

Évolution temporelle : Pour toutes les fractions, l'écoulement passe d'un état désorganisé à $t = 50$ s à un régime périodique stable vers $t = 30$ s, pleinement établi à $t = 50$ s (régime permanent oscillatoire).

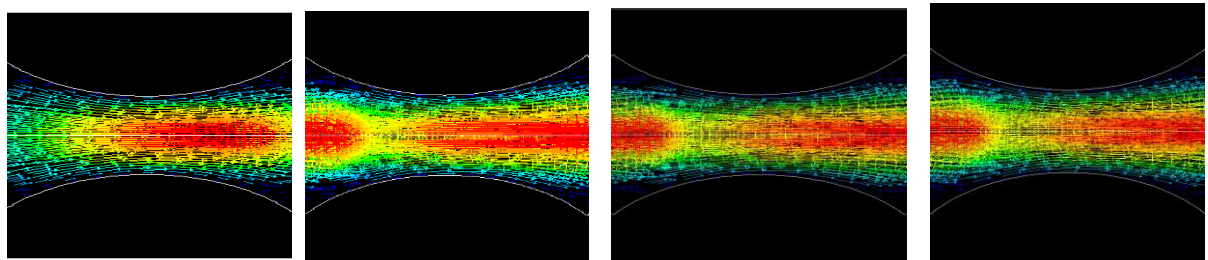
L'augmentation de la fraction volumique réduit progressivement l'intensité des structures tourbillonnaires et rend l'écoulement plus laminaire. Bien que le mélange convectif diminue, cette évolution, combinée à l'amélioration de la conductivité thermique, contribue à un refroidissement globalement plus efficace du canal.

4.6 Vecteur de vitesse axiale

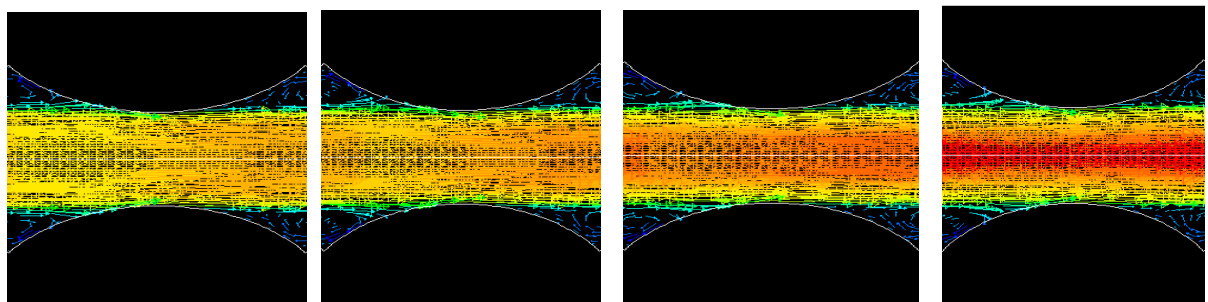
$St=0.206$



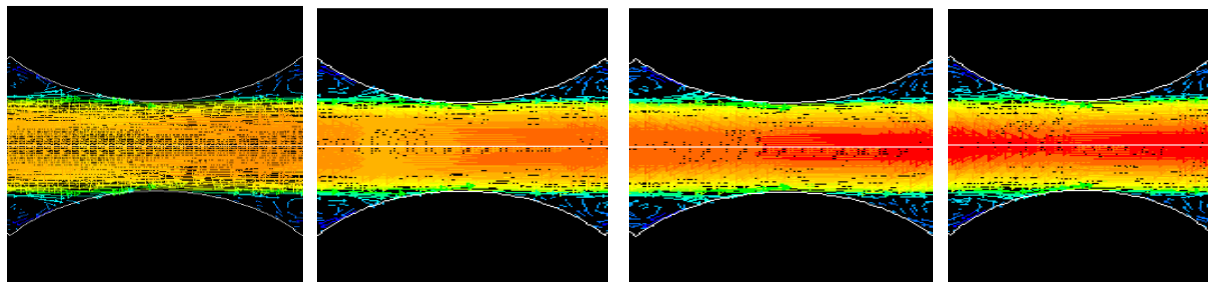
L'eau pure



1%



3%



5%

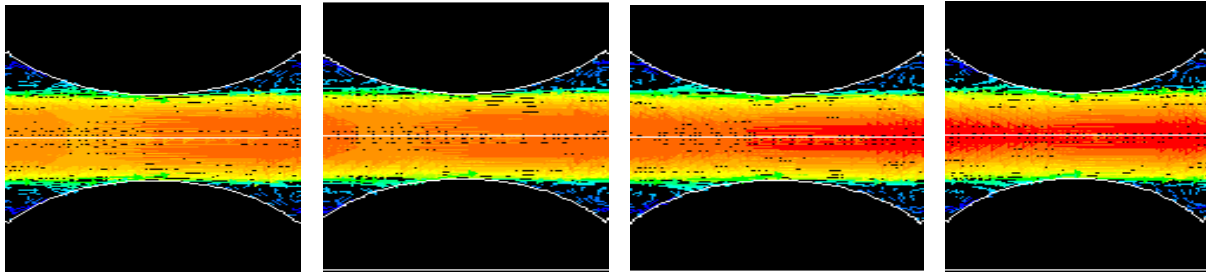


Figure 4.46 : Évolution temporelle ($t = 10, 20, 30, 50$ s) des vecteurs de vitesse axiale dans la 7^{ème} ondulation du canal sinusoïdal pour $St=0,206$ – comparaison entre l’eau pure et les nanofluides Al_2O_3 -eau à 1 %, 3 % et 5 % (même échelle de vitesse).

L’analyse des vecteurs de vitesse montre un effet important de la fraction volumique de nanoparticules à $t = 20$ s.

- **L’eau pure :** Vecteurs longs et bien orientés, tourbillons de recirculation marqués dans les creux, zone de haute vitesse étendue.
- **1 % :** Vecteurs légèrement plus courts, tourbillons moins intenses.
- **3 % :** Vecteurs encore plus courts, tourbillons fortement atténués.
- **5 % :** Vecteurs très courts, écoulement quasi laminaire, tourbillons disparus, vitesses faibles et homogènes.

Interprétation physique : L’ajout de nanoparticules augmente la viscosité du fluide, réduit le nombre de Reynolds et provoque un effet « laminarisant » qui atténue les structures turbulentes et les recirculations.

Évolution temporelle (l’eau pure) : À $t = 10$ s, l’écoulement est encore désorganisé. Il s’organise progressivement pour atteindre un régime périodique stable vers $t = 30$ s, pleinement établi à $t = 50$ s avec des tourbillons synchronisés à la pulsation.

Au régime établi ($t = 50$ s) : L’augmentation de la fraction volumique réduit fortement l’intensité des vecteurs et fait disparaître les tourbillons. L’eau pure présente un mélange turbulent actif, tandis que le nanofluide à 5 % donne un écoulement très lisse.

L’ajout de nanoparticules d’alumine atténue progressivement les tourbillons et rend l’écoulement plus laminaire. Bien que le mélange convectif diminue, l’augmentation de la conductivité thermique contribue globalement à un meilleur refroidissement. Le régime périodique est atteint vers $t = 30$ s pour toutes les fractions.

4.7 Lignes de courants

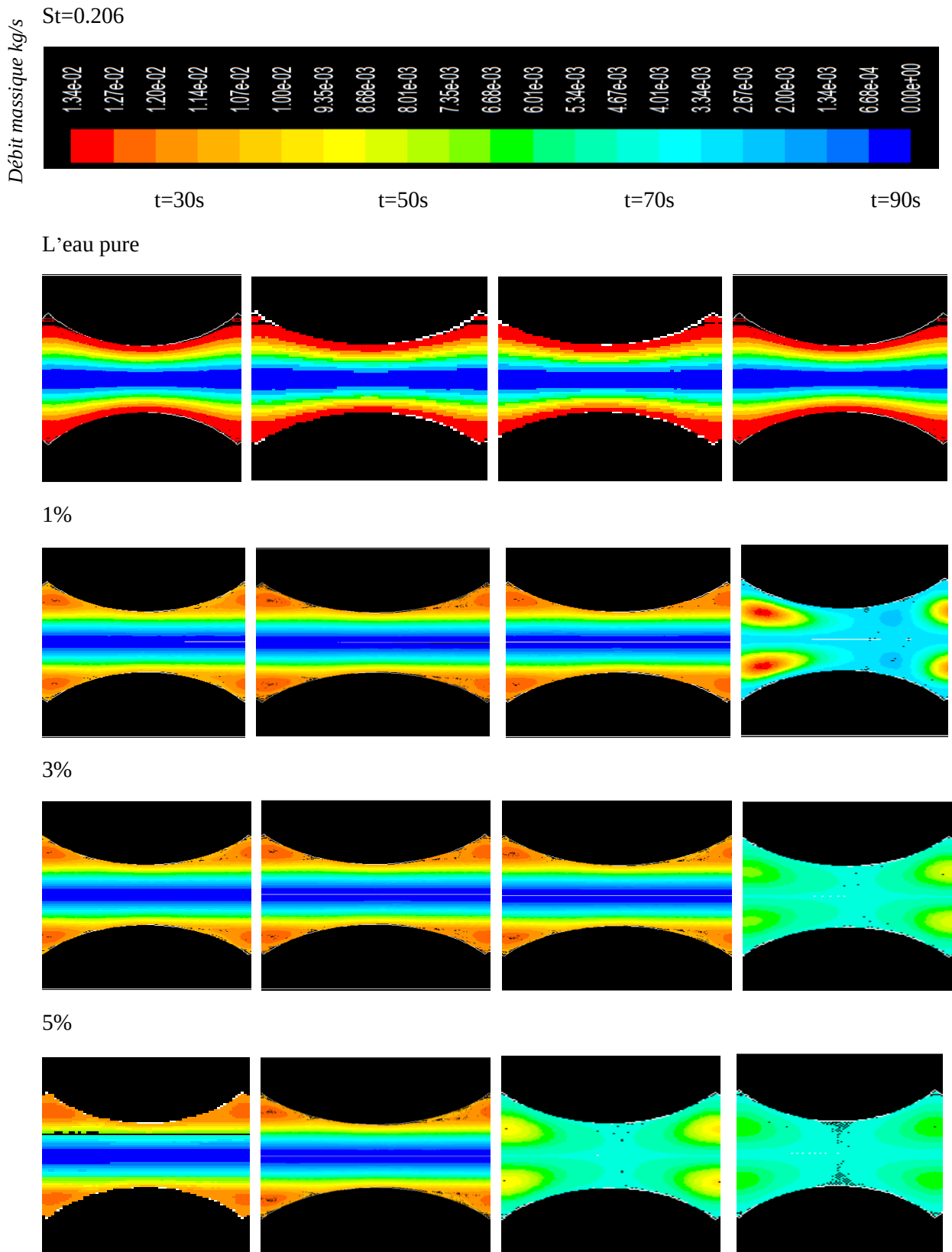


Figure 4.47 : Lignes de courant (pathlines) colorées par le débit massique (kg/s) dans la 7^{ème} ondulation de canal sinusoïdal pour St=0,206 avec une comparaison entre l'eau pure et les nanofluides Al₂O₃-eau à 1 %, 3 % et 5 %, aux instants t=30, 50, 70 et 90 secondes.

Chapitre 4 : Résultats et Discussion

L'analyse des lignes de courant colorées selon le débit massique à $St = 0,206$ révèle une échelle allant de $0,00 \times 10^{-2}$ kg/s (couleur sombre, bleu foncé) à $1,34 \times 10^{-2}$ kg/s (couleur claire, rouge/orange). Les couleurs claires correspondent aux zones de fort débit massique dans le cœur de l'écoulement à haute vitesse, tandis que les couleurs sombres indiquent les régions de faible débit associées à la stagnation ou à la recirculation.

Pour l'eau pure ($\phi = 0 \%$), on observe un fort contraste de couleurs : des lignes très claires au centre du canal contrastent avec des lignes très sombres dans les creux des ondulations, signe de tourbillons de recirculation intenses où le fluide est en grande partie piégé. Lorsque la fraction volumique de nanoparticules augmente ($\phi = 1 \%$, 3% puis 5%), les lignes de courant deviennent plus homogènes. Les zones de recirculation s'atténuent, les tourbillons sont moins intenses et moins étendus. Ce lissage de l'écoulement s'explique par l'augmentation de la viscosité dynamique qui dissipe l'énergie cinétique des structures tourbillonnaires et rend l'écoulement plus régulier.

Sur le plan temporel, l'écoulement évolue de $t = 30$ s à $t = 90$ s : irrégulier et en développement au début, il se stabilise progressivement pour atteindre un régime périodique oscillatoire bien établi vers $t = 90$ s.

En conclusion, l'ajout de nanoparticules atténue les tourbillons de recirculation et homogénéise la répartition du débit massique le long des lignes de courant. L'eau pure présente un écoulement plus contrasté et turbulent, alors que le nanofluide à 5% génère un écoulement plus lisse et uniforme. Ces observations sont cohérentes avec les champs de vitesse et confirment l'influence stabilisatrice de la viscosité accrue.

Conclusion et perspective

Ce travail de recherche avait pour objectif principal d'étudier numériquement l'effet synergique d'un **écoulement pulsé** et d'un **nanofluide Al_2O_3 -eau** dans un **canal sinusoïdal**, en vue d'améliorer les performances thermo-hydrauliques des systèmes d'échange de chaleur.

À travers une démarche progressive, nous avons d'abord réalisé une étude bibliographique approfondie (Chapitre 1) sur les écoulements pulsés et les canaux ondulés, puis détaillé les propriétés et les mécanismes d'amélioration des nanofluides (Chapitre 2). Le Chapitre 3 a été consacré à la modélisation physique et numérique du problème, en s'inspirant de la configuration expérimentale de référence de Kurtulmuş et Şahin (2020). Enfin, le Chapitre 4 a porté sur la validation du modèle et l'analyse détaillée des résultats.

Les simulations numériques, réalisées en régime instationnaire turbulent (URANS) avec le modèle de turbulence $k-\omega$ SST, ont permis de reproduire fidèlement les résultats expérimentaux de référence, validant ainsi la fiabilité de l'approche CFD adoptée.

Les principaux résultats obtenus montrent que :

- L'ajout de nanoparticules d'alumine (Al_2O_3) améliore significativement le transfert de chaleur. Le nombre de Nusselt moyen augmente avec la fraction volumique, atteignant une amélioration d'environ **25 %** pour $\phi = 5 \%$ par rapport à l'eau pure.
- Il existe une fréquence de pulsation optimale (correspondant à un nombre de Strouhal compris entre 1,0 et 1,5 selon la concentration), pour laquelle le mélange radial du fluide et le renouvellement de la couche limite thermique sont maximisés.
- L'indice de performance thermo-hydraulique η reste supérieur à 1 pour les faibles et moyennes fréquences de pulsation ($St < 1$), confirmant que le gain thermique compense la pénalité hydraulique dans cette gamme de fonctionnement.
- L'effet bénéfique des nanoparticules est plus prononcé aux faibles nombres de Strouhal, tandis qu'à très haute fréquence, l'écoulement tend à se comporter comme un régime quasi-stationnaire, réduisant l'intérêt de l'ajout de nanofluides.

Ce travail apporte une contribution originale en combinant trois techniques d'intensification (géométrie sinusoïdale passive, pulsation active et nanofluide passif) dans une configuration peu étudiée en régime turbulent. Il démontre le potentiel de cette approche hybride pour le développement de systèmes de refroidissement et d'échangeurs de chaleur plus compacts et plus performants.

Cependant, certaines limitations subsistent : l'étude étant bidimensionnelle et basée sur des propriétés thermo-physiques constantes, elle ne prend pas pleinement en compte les effets

tridimensionnels, la variation des propriétés avec la température, ni les phénomènes de sédimentation à long terme des nanoparticules.

Perspectives de travaux futurs :

- Extension de l'étude en 3D et prise en compte de la variation des propriétés du nanofluide avec la température.
- Étude expérimentale de la configuration pulsée + nanofluide pour valider les résultats numériques.
- Optimisation géométrique du canal sinusoïdal (amplitude, longueur d'onde) couplée à une optimisation multi-paramétrique (fraction volumique, fréquence, amplitude de pulsation).
- Investigation d'autres types de nanofluides hybrides ou à base de carbone pour des performances encore supérieures.

En conclusion, ce mémoire a permis de démontrer que la combinaison d'un écoulement pulsé et d'un nanofluide dans un canal sinusoïdal constitue une solution prometteuse pour l'intensification thermo-hydraulique. Les résultats obtenus ouvrent des perspectives intéressantes pour les applications industrielles nécessitant un transfert de chaleur efficace sous contrainte de compacité et de consommation énergétique

Références bibliographiques

Références

- [1] Available: <https://openbooks.lib.msu.edu/collegephysics1/chapter/viscosity-and-laminar-flow-poiseuilles-law-2/>.

- [2] Available: <https://www.mdpi.com/2311-5521/6/7/240>.
- [3] Rizvi Arefin Rinik, «Enhancement of heat transfer using elliptical twisted inner pipe with convergent conical ring turbulator for turbulent flow in double pipe heat exchanger,» *International Journal of Thermal Sciences*, 2025.
- [4] Nura Makwashi, « Investigation of the Severity of Wax Deposition in Bend Pipes Under Subcooled Pipelines Conditions,» 2019.
- [5] Vinicius Sauer, « Laminar swirling slender pipe flows,» *Physics of Fluids*, 2024.
- [6] Available: <https://www.transtutors.com/questions/a-fluid-is-flowing-at-a-constant-volume-flow-rate-of-q-through-a-divergent-pipe-havi-6844689.htm>.
- [7] Nazim Kurtulmuş, « Experimental investigation of pulsating flow structures and heat transfer characteristics in sinusoidal channels,» *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020.
- [8] Rizvi, Fluid mechanics: Applications, 2024.
- [9] R. G. S. V. T. Naga Sarada Somanchi, «Experimental investigations on heat transfer enhancement in a double pipe heat exchanger using hybrid nanofluids,» 2023.
- [10] M. TIENTCHEU NSIEWE, *Étude de la convection naturelle turbulente dans une enceinte à paroi chauffée*, 2013.
- [11] EL-Dabe, «Two-phase nanofluid flow exhibiting Brownian motion and thermophoretic diffusion via a horizontal circular pipe: numerical simulation,» *JMST Advances*, 2024.
- [12] Available: <https://link.springer.com/article/10.1186/s10033-022-00711-6>.
- [13] Aashish Ranjan, «Heat transfer augmentation using collapsible tube-induced pulsating flow,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2025.
- [14] Tao Ho Ji, « Experiments on heat transfer enhancement from a heated square cylinder in a pulsating channel flow,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008.
- [15] Unal Akdag, « Heat transfer enhancement with laminar pulsating nanofluid flow in a wavy channel,» *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2014.
- [16] Zontul, « Experimental investigation of convective heat transfer performance and hydrodynamics of pulsating flow through the rectangular grooved channel,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2023.

- [17] Hamed Khosravi-Bizhaem, «Heat transfer enhancement and pressure drop by pulsating flow through helically coiled tube: An experimental study,» *Applied Thermal Engineering*, 2019.
- [18] Qianhao Ye, «A comprehensive review of pulsating flow on heat transfer enhancement,» *Applied Thermal Engineering*, 2021.
- [19] Yin Ying-de, « Shell-side flow resistance and enhanced heat transfer for a novel twisted elliptical tube double-pipe heat exchanger,» *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2026.
- [20] Chun-Sheng Wang, « Experimental studies of turbulent pulsating flow and heat transfer in a serpentine channel with winglike turbulators,» *International Communications in Heat and Mass Transfer*.
- [21] Joffin Jose Ponnore, « A numerical study on an innovative multi-branched inner tube design for double-pipe heat exchangers in high efficiency renewable energy application,» *International Journal of Thermal Sciences*, 2026.
- [22] Liang Zhou, « Numerical analysis of pulsating turbulent flow in planar and constricted channels,» *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2025.
- [23] Liang Zhou, « A comprehensive analysis of frequency and amplitude effects on pulsating flow heat transfer over a 45-degree ribbed channel,» *Applied Thermal Engineering*, 2025.
- [24] Jiachen Feng, « Numerical simulation of grooved channel heat transfer enhancement: Structural optimization and pulsating flow,» *Case Studies in Thermal Engineering*, 2026.
- [25] Naser Ali, « A review on nanofluids: Fabrication, stability, and thermophysical properties,» *Journal of Nanomaterials*, 2018.
- [26] Duygu Y. Aydın, « Nanofluids: preparation, stability, properties, and thermal performance in terms of thermo-hydraulic, thermodynamics and thermo-economic analysis,» *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021.
- [27] Rajesh Choudhary, «Stability analysis of Al₂O₃/water nanofluids,» *Journal of Experimental Nanoscience*, 2017.
- [28] Available: <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Hrishikesh-E-Patel-29991070#:~:text=Hrishikesh%20E>.
- [29] Available: <https://www-sciencedirect-com.www.snd11.arn.dz/science/article/pii/S0017931013009514>.
- [30] Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X25004551>.

- [31] Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X21002148>.
- [32] Available: https://www.researchgate.net/publication/325268774_Nanofluid_flow_and_heat_transfer_in_a_Brinkman_porous_channel_with_variable_porosity.
- [33] Available: https://www.researchgate.net/publication/368568140_Analyse_statistique_de_la_viscosite_dynamique_des_nanofluides.
- [34] Available: <https://www.umc.edu.dz/images/69-DAAS.pdf#:~:text=La%20viscosit%C3%A9%20dynami,suspensions%20dilu%C3%A9s%20de>.
- [35] Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0735193309001924>.
- [36] Aidar Hayrullin, « Experimental study of the in-line tube bundle thermal performance in pulsating flow,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 231, 2024.
- [37] Yangjian Ren, « Numerical study of pulsating pipe flows and enhanced heat transfer of supercritical CO₂,» *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2025.