

Université Constantine 1 - Frères Mentouri Faculté des Sciences Exactes Département de Physique

N° de Série : 02/phy/2024 N° d'ordre : 21/D3C/2024

Contribution à l'Etude Théorique du Comportement Thermique et Hydrodynamique d'un Nanofluide Hybride dans un Conduit Incliné Soumis à un Rayonnement Solaire

THÈSE

Présentée pour l'Obtention du Diplôme de Doctorat de Troisième Cycle

Par

Chidouah WAFA

Devant le jury composé de :

Président	Pr. Chaker ABLA	Université Constantine 1
Directeur	Pr. Boufendi TOUFIK	Université Constantine 1
Examinateur	Pr. Djezzar MAHFOUD	Université Constantine 1
Examinatrice	Dr. Laouer ABDELGHANI	Université de Jijel
Examinateur	Dr. Tabet ISMAIL	Université de Skikda
Examinateur	Dr. Touahri SOFIANE	Université Constantine 1

Soutenue publiquement Le : 04/06/2024

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers Dieu pour avoir dirigé mes pas tout au long de ce parcours académique et pour m'avoir guidé et soutenu dans la réalisation de ma thèse de Doctorat.

L'achèvement de ce travail a été rendu possible grâce à la contribution précieuse de nombreuses personnes, que je tiens à remercier chaleureusement.

Je tiens à adresser mes remerciements à Mr. **Boukedjane Mouloud,** maitre de conférences B à l'université de 20Aout 1955 Skikda, pour sa contribution exceptionnelle à mon travail. Sa guidance et son soutien inestimables ont été cruciaux pour la réussite de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse Mr. **Boufendí Toufík**, professeur à l'université 20Aout 1955 Skíkda. Votre expertise et vos précieux commentaires ont grandement enrichi mon travail de recherche.

Je souhaite également remercier chaleureusement la présidente du jury Mme. **CHAKER Abla**, professeur à l'Université Frères Mentouri Constantine 1, ainsi que les membres de jury, Mr. **TOUAHRI Sofiane**, maître de conférences A, à l'Université Frères Mentouri Constantine 1, Mr. **DJEZZAR Mahfoud**,

professeur à l'Université Frères Mentouri Constantine 1, Mr. **LAOUER Abdelghani** maitre de conférences A, à l'université Mohamed Seddik Benyahia, Jijel et Mr. **Tabet Ismail**, maitre de conférences A, à l'université 20 Août 1955 Skikda, pour avoir examiné et évalué ma thèse avec tant d'attention et de bienveillance.

Je suis honoré d'avoir pu bénéficier de l'expertise et du mentorat de chacun d'entre vous, et je suis reconnaissante pour cette précieuse expérience. Votre engagement envers l'avancement de la recherche et de l'éducation a eu un impact significatif sur mon parcours académique.

Je remercie mes très chers parents, mes sœurs et mon frère qui ont toujours été là pour moi.

Avec tout mon respect et ma reconnaissance

Melle. CHIDOUAH Wafa

Nomenclature

Lettres latines

Ср	Chaleur spécifique	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
d	Diamètre d'un volume élémentaire représentatif	Å
D	Diamètre	m
D_h	Diamètre hydraulique	m
E _c	Énergie cinétique	J
F _{T sph}	Force de trainée	Ν
G	Grandeur physique quelconque	
g	Accélération de pesanteur	m. s ⁻²
h	Coefficient de transfert convectif	W.m ⁻² .K ⁻¹
k _b	Constante de Boltzman	J.K ⁻¹
l	Libre parcours moyen du transport diffusif de la chaleur	Å
L	Profondeur de l'espace annulaire	m
L _c	Longueur caractéristique	m
т	Masse	kg
ṁ	Débit massique	Kg.s ⁻¹
Q_{v}	Débit volumique	$m^3.s^{-1}$
Ż	Quantité de chaleur par unité de temps	J.s ⁻¹
Т	Temps	S
t _c	Temps caractéristique de cisaillement	S
r	Coordonnée radiale	m
R	Rayon	m
<i>R</i> ₁	Rayon externe	m
<i>R</i> ₂	Rayon interne	m
S	Source de chaleur massique	J.kg ⁻¹
\overrightarrow{p}	Quantité de mouvement	kg.m.s ⁻¹

p	Pression	Ра
p_e	Pression d'entrée	Pa
p_s	Pression de sortie	Pa
\overrightarrow{T}	Densité surfacique des efforts de surface	Pa
Т	Température	К
T_m	Température de fusion	К
q	Densité de flux thermique	W. m ⁻²
<i>q_{rad}</i>	Rayonnement solaire	W. m ⁻²
u	Vitesse	m.s ⁻¹
u _{rel}	Vitesse relative	m.s ⁻¹
u _r	Composante radiale de la vitesse	m.s ⁻¹
$u_{ heta}$	Composante azimutale de la vitesse	m.s ⁻¹
u _z	Composante axiale de la vitesse	m.s ⁻¹
v_{Stokes}	Vitesse de Stokes	m.s ⁻¹
Ζ	Coordonnée axiale	m
Lettre gro	ecques	
α	Angle d'inclinaison	o
ρ	Masse volumique	kg.m ⁻³
μ	Viscosité dynamique	kg.m ⁻¹ .s ⁻¹
v	Viscosité cinématique	$m^2.s^{-1}$
τ	Contrainte de cisaillement	Pa
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W.m ⁻² .K ⁻⁴
λ	Conductivité thermique	W. m ⁻¹ . K ⁻¹
ϕ	Concentration volumique des nanoparticules	0⁄0
Λ	Libre parcours moyen	Å
Ϋ́	Taux de cisaillement	s ⁻¹
$\overline{\overline{ au}}$	Tenseur des contraintes visqueuses	Pa

Nombres adimensionnels

C_f	Coefficient de frottement
C_{μ}	Coefficient d'amélioration de la viscosité dynamique
C_{λ}	Coefficient d'amélioration de la conductivité thermique
F	Facteur de frottement
Gr	Nombre de Grashof
Kn	Nombre de Knudsen
M_0	Nombre Mouromtseff.
Nu	Nombre de Nusselt
Pe	Nombre de Peclet
Pr	Nombre de Prantdl
Re	Nombre de Reynolds
Ri	Nombre de Richardson
θ	Coordonnée azimutale

Indices

fb	Fluide de base
l	Liquide
nf	Nanofluide
nfh	Nanofluide hybride
np	Nanoparticule
p	Particule

Liste des figures

Figure 1. 1 : Techniques d'intensification des échanges convectifs fluide/paroi [1]	18
Figure 1. 2 : Effet des de la nature du matériau sur la conductivité thermique [9]	20
Figure 1. 3 : Différence entre l'utilisation des microparticules et nanoparticules [9]	21
Figure 1. 4 : Structure d'un nanofluide.	22
Figure 1. 5 : (a) Nanoparticules sphériques, (b) nanotubes de carbone [11]	22
Figure 1. 6 : Morphologie des nanopoudres d'Al ₂ O ₃ et le fluide de base EG/H ₂ O, (a) plaq	uettes,
(b) lames, (c) cylindres, (d) cubes [14].	22
Figure 1. 7 : Nanopoudre de ZnO et TiO2 et nanofluides hybrides EG/ZnO-TiO2 [15]	24
Figure 1.8 : Fluide intelligent.	27
Figure 1. 9 : Test de la sédimentation des nanoparticules d'Al ₂ O ₃ dans l'eau [36]	32
Figure 1. 10 : (a) Stabilisation stérique des nanoparticules, (b) Répulsion électrostatique	ue des
nanoparticules par des ions [1]	33
Figure 1. 11: Potentiel Zêta des nanofluides [11].	35
Figure 1. 12: Potentiel zêta d'une solution [11].	35
Figure 1. 13 : Libre parcours moyen [49].	40
Figure 1. 14 : Régimes d'écoulements en fonction du nombre de Knudsen [49]	41
Figure 1. 15 : Représentation du mouvement Brownien [51].	42
Figure 1. 16: (a) Nano-couche à l'interface liquide/nanoparticules, (b) Conductivité then	mique
effective [13].	44
Figure 1. 17: (a) Schéma représentant le phénomène de clustering. (b) Rapport de condu	ctivité
thermique dû à l'augmentation du volume effectif des agglomérats [13].	44
Figure 1. 18: Caractéristique de conductivité thermique des nanofluides hybrides MWCNT-	Fe ₃ O ₄
[67]	50
Figure 1. 19: Comparaison de la conductivité thermique du nanofluide eau/TiO ₂ et son h	ybride
eau/Ag-TiO ₂ en fonction de la concentration volumique de TiO ₂ [68]	51
Figure 1. 20 : Effets du pH sur la conductivité thermique de nanosuspensions eau-Al ₂ O ₃ et e	eau Cu
avec des dispersants SDBS (dodécylbenzène sulfonate de sodium) [70].	52
Figure 1. 21: Effet du fluide de base sur la conductivité thermique ; (a) éthylène glycol, (b) eau
[71]	54
Figure 1. 22 : Sphère plongée dans un liquide visqueux, animée d'une vitesse urel et sou	mise à
une force de traînée (lignes de courant obtenues par simulation sur le logiciel Comsol) [73]	55
Figure 1. 23: Temps de cisaillement.	56
Figure 1. 24: Processus d'agrégation/sédimentation [73].	56
Figure 2, 1 · Schéma de l'espace annulaire incliné [83]	61
Figure 2. 2 Schéma du problème et distributions des éléments du maillage dans une se	ections
transversale [85]	62
Figure 2. 3 · Modèle physique du problème considéré [88]	63
Figure 2. 4 : Schéma de l'espace annulaire [89].	63
Figure 2. 5 · Schéma de l'espace annulaire incliné	73
Figure 2. 6 : Nanoparticules d'Ag et de ZnO [99]	74
Figure 2. 7 : Présentation et validation des modèles de l'eau/Ag-ZnO · (a) viscosité dyna	mique
(b) conductivité thermique.	

Figure 2. 8 : Présentation et validation des modèles de l'eau/ZnO : (a) viscosité dynamique,	, (b)
conductivité thermique	76
Figure 3. 1 . Déscritisation bidimensionel d'un domaine en volumes élémentaires	81
Figure 3. 2: Volume de contrôle à travers lequel se fait l'intégration	
Figure 3. 3: Fenêtre principale du logiciel Ansys 20 R1	85
Figure 3. 4. Projet de simulation sous Ansys-Fluent	87
Figure 3. 5 : Procédure de résolution en utilisant le solveur Ansys Fluent	
Figure 3. 6 : Schéma du problème étudié.	93
Figure 3. 7 : (a) Vitesse radiale, (b) chute de pression	96
Figure 3. 8 : (a) Température radiale, (b) Température axiale.	96
Figure 3. 9 : Validation du modèle numérique [113, 114].	97
Figure 3. 10 : Conduite annulaire.	98
Figure 3. 11 : Conduite annulaire inclinée : (a) 30°, (b) 60°	98
Figure 3. 12 : Maillage choisis.	99
Figure 3. 13 : Paramètres du maillage choisi (a) Qualité orthogonale, (b) Rapport de jacob	bien
(points de Gauss)	100
Figure 4 1 · Effet de la concentration volumique sur la variation de la température · (a) aviale	(b)
regine 4.1. Effet de la concentration volumque sur la variation de la temperature : (a) axiale reginal ($P_i = 0.2$, $P = 0.0^{\circ}$, $\alpha = 2.0^{\circ}$)	, (U) 105
Figure 4.2: Effet de la concentration volumique sur la variation de la température : (a) aviale	(b)
radiale (Ri=1 $A=90^{\circ} \alpha=30^{\circ}$)	, (U) 105
Figure 4 3 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la température : (a) axiale	(h)
radiale (Ri=2, θ =90° α =30°)	105
Figure 4. 4 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la température : (a) <i>axi</i>	iale.
(b) radiale (Ri=0.3, θ =90°, α =60°).	106
Figure 4.5 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la température : (a) axiale	, (b)
radiale (Ri=1, θ =90°, α =60°).	107
Figure 4. 6 : Effet de la concentration volumique sur la variation la température : (a) axiale.	, (b)
radiale (Ri=2, θ =90°, α = 60°).	107
Figure 4. 7 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la vitesse : (a) axiale,	, (b)
radiale (Ri=0.3, θ =90°, α =30°).	108
Figure 4.8 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la vitesse : (a) axiale,	, (b)
radiale (Ri=1, θ =90°, α =30°).	108
Figure 4. 9 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la vitesse : (a) axiale,	, (b)
radiale (Ri=2, θ =90°, α =30°).	109
Figure 4. 10 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la vitesse : (a) axiale,	, (b)
radiale (Ri=0.3, θ =90°, α = 60°)	109
Figure 4. 11 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la vitesse : (a) axiale,	, (b)
radiale (Ri=1, θ =90°, α = 60°)	109
Figure 4. 12 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la vitesse : (a) axiale,	, (b)
radiale (Ri=2, θ =90°, α = 60°)	110
Figure 4. 13 : Effet de la concentration volumique sur la variation du coefficient de frotteme	ent :
(a) $\alpha = 30^{\circ}$, (b) $\alpha = 60^{\circ}$, (Ri=0.3, $\theta = 90^{\circ}$)	110

Figure 4. 14 : Effet de la concentration volumique sur la variation du coefficient de frottement :
(a) $\alpha = 30^{\circ}$, (b) $\alpha = 60^{\circ}$, (Ri=1, $\theta = 90^{\circ}$)
Figure 4. 15 : Effet de la concentration volumique sur la variation du coefficient de frottement :
(a) $\alpha = 30^{\circ}$, (b) $\alpha = 60^{\circ}$, (Ri=1.7, $\theta = 90^{\circ}$)
Figure 4. 16 : Effet de la concentration volumique sur la variation du nombre de Nu : (a) $\alpha = 30^{\circ}$,
(b) $\alpha = 60^{\circ}$, (Ri=0.3, $\theta = 90^{\circ}$)112
Figure 4. 17 : Effet de la concentration volumique sur la variation du nombre de Nu : (a) $\alpha = 30^{\circ}$,
(b) $\alpha = 60^{\circ}$, (Ri=1, $\theta = 90^{\circ}$)112
Figure 4. 18 : Effet de la concentration volumique sur la variation du nombre de Nu : (a) $\alpha = 30^{\circ}$,
(b) $\alpha = 60^{\circ}$, (Ri=1.7, $\theta = 90^{\circ}$)
Figure 4. 19 : Effet du nombre de Ri sur le profil de vitesse : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-
ZnO ($\varphi = 1\%$, $\theta = 90^{\circ}$, $\alpha = 30^{\circ}$)
Figure 4. 20 : Effet du nombre de Ri sur le profil de la température : (a) axiale, (b) radiale de
l'eau/Ag-ZnO ($φ$ =1%, θ=90°, α=30°)113
Figure 4. 21 : Effet du nombre de Ri sur le profil de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-
ZnO ($\varphi = 2\%$, $\theta = 90^{\circ}$, $\alpha = 30^{\circ}$)
Figure 4. 22 : Effet du nombre de Ri sur le profil de la température : (a) axiale, (b) radiale de
l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, θ =90°, α =30°)
Figure 4. 23 : Effet du nombre de Ri sur le profil de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-
ZnO ($\varphi = 1\%$, $\theta = 90^{\circ}$, $\alpha = 60^{\circ}$)
Figure 4. 24 : Effet du nombre de Ri sur le profil de la température : (a) axiale, (b) radiale de
l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, θ =90°, α = 60°)115
Figure 4. 25 : Effet du nombre de Ri sur le profil de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-
ZnO ($\varphi = 2\%$, $\theta = 90^{\circ}$, $\alpha = 60^{\circ}$)
Figure 4. 26 : Effet du nombre de Ri sur le profil de la température : (a) axiale, (b) radiale de
l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, θ =90°, α = 60°)116
Figure 4. 27 : Effet du nombre de Ri sur la variation du coefficient de frottements de l'eau/Ag-
ZnO : (a) $\varphi = 1\%$, (b) $\varphi = 2\%$, ($\theta = 90^{\circ}, \alpha = 30^{\circ}$)
Figure 4. 28 : Effet du nombre de Ri sur la variation du coefficient de frottements de l'eau/Ag-
ZnO : (a) $\varphi = 1\%$, (b) $\varphi = 2\%$, ($\theta = 90^{\circ}, \alpha = 60^{\circ}$)
Figure 4. 29 : Effet du nombre de R1 sur la variation du nombre de Nu de l'eau/Ag-ZnO : (a)
$\varphi = 1\%$, (b) $\varphi = 2\%$, ($\theta = 90^{\circ}$, $\alpha = 30^{\circ}$)
Figure 4. 30: Effet du nombre de R1 sur la variation du nombre de de l'eau/Ag-ZnO (a) $\varphi = 1\%$,
(b) $\varphi = 2\%$, ($\theta = 90^{\circ}$, $\alpha = 60^{\circ}$)
Figure 4. 31 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=0.3, α =30°)
Figure 4. 32 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =
1% , R ₁ =0.3, α =30°)
Figure 4. 33 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la
vitesse, (b) la temperature de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=0.3, α =30°)
Figure 4. 54 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la (4) l
vitesse, (b) la temperature de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=1, α =30°)
Figure 4. 35 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO ($\varphi = 100$
1%, K1=1, α =30°)

Figure 4. 36 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=1, α =30°)
Figure 4. 37 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=1.7, α =30°)
Figure 4. 38 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO
$(\varphi = 1\%, \text{Ri} = 1.7, \alpha = 30^{\circ}).$
Figure 4. 39 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=1.7, α =30°)
Figure 4. 40 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=0.3, α =30°)
Figure 4. 41 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO
$(\varphi=2\%, Ri=0.3, \alpha=30^{\circ}).$ 122
Figure 4. 42 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=0.3, α =30°)
Figure 4. 43 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=1, α =30°)
Figure 4. 44 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO
$(\varphi=2\%, Ri=1, \alpha=30^{\circ}).$ 123
Figure 4. 45 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=1, α =30°)
Figure 4. 46 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=1.7, α =30°)
Figure 4. 47 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO
$(\varphi=2\%, Ri=1.7, \alpha=30^{\circ}).$
Figure 4. 48: Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=1.7, α =30°)125
Figure 4. 49 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=0.3, α = 60°)125
Figure 4. 50 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO
$(\varphi = 1\%, Ri = 0.3, \alpha = 60^{\circ}).$
Figure 4. 51 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=0.3, α = 60°)
Figure 4. 52 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=1, α = 60°)126
Figure 4. 53 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO
$(\varphi = 1\%, Ri = 1, \alpha = 60^{\circ}).$
Figure 4. 54 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=1, α = 60°)127
Figure 4. 55 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=1.7, α = 60°)
Figure 4. 56: Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO
$(\varphi = 1\%, \text{Ri} = 1.7, \alpha = 60^{\circ}).$
Figure 4. 57 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la

Figure 4. 58 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=0.3, α = 60°)128
Figure 4. 59 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO
$(\varphi = 2\%, \text{Ri} = 0.3, \alpha = 60^{\circ}).$ 129
Figure 4. 60 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=0.3, α = 60°)129
Figure 4. 61 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=1, α = 60°)129
Figure 4. 62 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO
$(\varphi = 2\%, \text{Ri} = 1, \alpha = 60^\circ).$ 130
Figure 4. 63 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=1, α = 60°)130
Figure 4. 64 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=1.7, α = 60°)
Figure 4.65 : Contours des variations de la vitesse et la température du nanofluide hybride eau/Ag-
ZnO (ϕ =2%, Ri=1.7, α = 60°)
Figure 4. 66 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la
vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=1.7, α = 60°)
Figure 4. 67 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation du nombre de Nu
de l'eau/Ag-ZnO : (a) : Ri=0.3, (b) : Ri=1.7 (φ =1%, α = 30°)
Figure 4. 68 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation du nombre de Nu
de l'eau/Ag-ZnO : (a) : Ri=0.3, (b) : Ri=1.7 (φ =2%, α = 30°)
Figure 4. 69 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation du nombre de Nu
de l'eau/Ag-ZnO : (a) : Ri=0.3, (b) : Ri=1.7 (φ =1%, α = 60°)
Figure 4. 70 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation du nombre de Nu
de l'eau/Ag-ZnO : (a) : Ri=0.3, (b) : Ri=1.7 (φ =2%, α = 60°)
Figure 4. 71 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la température : (a) axiale. (b) radiale de
$1' eau/Ag-ZnO (\varphi = 1\%, \theta = 90^{\circ}, Ri = 0.3)$
Figure 4. 72 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la température : (a) axiale. (b) radiale de
$1^{\circ} eau/Ag-ZnO (\varphi = 1\%, \theta = 90^{\circ}, Ri = 1)$
Figure 4. 73 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la température : (a) axiale. (b) radiale de
$1'eau/Ag-ZnO$ ($\varphi=1\%$, $\theta=90^{\circ}$, Ri=1.7)
Figure 4. 74 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la température : (a) axiale. (b) radiale de
$1^{\circ} eau/Ag-ZnO$ ($\varphi=2\%$, $\theta=90^{\circ}$, $Ri=0.3$).
Figure 4. 75 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la température : (a) axiale. (b) radiale de
$l^{2}eau/Ag-ZnO (\omega = 2\% \theta = 90^{\circ} Ri=1)$ 135
Figure 4. 76 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la température : (a) axiale. (b) radiale de
$\frac{1}{2} e_{au}/Ag - ZnO (\omega = 2\% \theta = 90^{\circ} Ri = 1.7)$ 135
Figure 4. 77 · Effet de l'inclinaison sur la variation de la vitesse · (a) axiale. (b) radiale de l'eau/Ag-
$Z_{\rm nO}$ (ω =1% θ =90° Ri=0.3) 135
Figure 4. 78 Effet de l'inclinaison sur la variation de la vitesse : (a) axiale. (b) radiale de l'eau/A σ -
$Z_{\rm nO} (\omega = 1\% \theta = 90^{\circ} \text{ Ri}=1)$ 136
Figure 4. 79 Effet de l'inclinaison sur la variation de la vitesse : (a) axiale. (b) radiale de l'eau/A σ -
$Z_{\rm nO} (\omega = 1\% \theta = 90^{\circ} \text{ Ri}=1.7)$ 136
$= (\tau - \tau, $

Figure 4.80 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-
ZnO (φ=2%, θ=90°, Ri=0.3)
Figure 4.81 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-
ZnO (φ=2%, θ=90°, Ri=1)
Figure 4.82 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-
ZnO (φ=2%, θ=90°, Ri=1.7)
Figure 4. 83 : Effet de l'inclinaison sur la variation du coefficient de frottement de l'eau/Ag-ZnO :
(a) $\varphi = 1\%$, (b) $\varphi = 2\%$, (Ri=0.3, $\theta = 90^{\circ}$)
Figure 4. 84 : Effet de l'inclinaison sur la variation du coefficient de frottement de l'eau/Ag-ZnO
: (a) $\varphi = 1\%$, (b) $\varphi = 2\%$, (Ri=1, $\theta = 90^{\circ}$)
Figure 4. 85 : Effet de l'inclinaison sur la variation du coefficient de frottement de l'eau/Ag-ZnO
: (a) $\varphi = 1\%$, (b) $\varphi = 2\%$, (Ri=1.7, $\theta = 90^{\circ}$)
Figure 4.86 : Effet de l'inclinaison sur la variation du nombre de Nu de l'eau/Ag-ZnO : (a) $\varphi = 1\%$,
(b) $\varphi = 2\%$, (Ri=0.3, $\theta = 90^{\circ}$)
Figure 4. 87 : Effet de l'inclinaison sur la variation du nombre de Nu de l'eau/Ag-ZnO : (a) $\varphi = 1\%$,
(b) $\varphi = 2\%$, (Ri=1, $\theta = 90^{\circ}$)
Figure 4. 88 : Effet de l'inclinaison sur la variation du nombre de Nu de l'eau/Ag-ZnO : (a) $\varphi = 1\%$,
(b) $\varphi = 2\%$, (Ri=1.7, $\theta = 90^{\circ}$)

Listes des tableaux

Tableau 2.1 : Autres modèle de la conductivité thermique des nanofluides [66]	
Tableau 2. 2 : Propriétés géométriques des nanoparticules de ZnO et d'Ag [99]	74
Tableau 2.3 : Propriétés thermophysiques de l'eau, Ag, ZnO	74
Tableau 2. 4 : Densité, chaleur spécifique et coefficient d'expansion thermique des r	nanofluide
étudiés	75
Tableau 2. 5 : Nombres adimensionnels et significations physiques [103].	
Tableau 3. 1: Les différentes étapes d'une simulation sous Ansys-Fluent	
Tableau 3. 2: Dimensions caractéristiques.	94
Tableau 3. 3: Propriétés thermophysiques de l'eau.	
Tableau 3. 4 : Analyse de l'effet du maillage.	
Tableau 3. 5 : Paramètres du maillage.	
Tableau 3. 6 : Paramètres de la position géographique	
Tableau 3. 7 : Valeurs du flux radiatifs (W. m ⁻²).	

Tables des matières

Remercíements	1
Nomenclature	2
Liste des figures	5
Listes des tableaux	11
Tables des matières	12
Introduction générale	15
Chapitre 1 : Etat de l'art	17
1.1. Introduction	17
1.2. Avant les nanofluides	17
1.2.1. Techniques actives d'intensification des transferts de chaleur	18
1.2.2. Techniques passives d'intensification des transferts de chaleur	18
1.3. Nanofluides	22
1.4. Nanofluides hybrides	24
1.4.1. Domaines d'application	26
1.4.2. Méthodes de fabrication	31
1.4.3. Agglomération et sédimentation dans les nanofluides	32
1.4.4. Paramètres affectant les performances des nanofluides	33
1.4.4.1. Stabilité des nanofluides hybrides	33
1.4.4.2. Coefficient de frottement	36
1.4.5. Critère de performance des nanofluides	37
1.5. Comportement thermique	39
1.5.1. Notion de milieu continu et d'échelle d'observation	39
1.5.2. Hypothèse de continuité et modèle du milieu continu	40
1.5.2.1. Déséquilibre thermique et équilibre thermodynamique local (E.T.L.)	41
I.5.3. Phénomènes physiques associés au transfert thermique dans les nanofluides hybrides	42
1.5.4. Propriétés thermiques	46
1.5.4.1. Chaleur spécifique	46
1.5.4.2. Conductivité thermique	47
1.5.4.3. Paramètres influençant la conductivité thermique des nanofluides hybrides	49
1.6. Comportement hydrodynamique	55
1.6.1. Comportement rhéologique des nanofluides	55
1.6.2. Propriétés physiques des nanofluides	57
1.6.2.1. Masse volumique	57

1.6.2.2. Viscosité dynamique	
1.7. Conclusion	
Chapitre 2 : Formulation mathématique	
2.1. Introduction	
2.2. Recherche bibliographique : Transfert thermique à travers les écoulements annu horizontales	l aires 59
2.3. Mécanique des fluides numérique (CFD)	
2.3.1. Définition de la CFD (Computational Fluid Dynamics)	
2.3.2. Approches de la CFD	65
2.3.2.1. Approche monophasique	65
2.3.2.2. Approche eulérienne-lagrangienne	65
2.3.2.3. Approches eulériennes	66
2.4. Équations gouvernantes pour les simulations CFD	
2.4.1. Equation de la continuité	
2.4.2. Equation de conservation de quantité de mouvement	
2.4.3. Equation de conservation de l'énergie	69
2.5. Présentation du problème	
2.5.1. Domaine physique	
2.5.2. Propriétés thermophysiques	
2.5.3. Forme adimensionnelle	
2.5.4. Conditions aux limites	
2.6. Conclusion	
Chapitre 3 : Résolution numérique	
3.1. Introduction	
3.2. Analyse numérique	
3.2.1. Méthode des volumes finis	80
3.2.2. Principe de la méthode des volumes finis	
3.2.3. Utilisation de la CFD	
3.3. Présentation du solveur ANSYS Fluent (procédure de calcul)	85
3.3.1. Procédure de résolution numérique par « Fluent »	
3.4. Vérification et validation du modèle numérique	
3.4.1. Concept de Vérification et de Validation (V&V)	
3.4.1.1. Interet de la vérification	
3.4.1.2. Méthode de la solution exacte	
3.4.2. Vérification du solveur Ansys Fluent	

3.4.2.1. Résolution analytique	
3.4.2.2. Résolution numérique	
3.4.3. Validation	
3.5. Simulation	
3.5.1. Présentation de la géométrie	
3.5.2. Réalisation du maillage	
3.5.3. Configuration fluent	
3.6. Conclusion	
Chapitre 4 : Résultats : discussion et interprétation	
4.1. Introduction	
4.2. Présentation des résultats et interprétation	
4.2.1. Effet de la concentration volumiques des nanoparticules	
4.2.2. Effet du nombre de Ri	
4.2.3. Effet de la distribution des rayonnements solaires	
4.2.4. Effet de l'angle d'inclinaison	
4.3. Conclusion	
Conclusion générale	
Bibliographie	
ملخص	153
Résumé	
Abstract	

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La convection thermique est une discipline très importante qui représente le transfert thermique associé à l'écoulement d'un fluide caloporteur. Elle joue un rôle très intéressant dans de nombreuses applications tel que le refroidissement des dispositifs électroniques, les systèmes de climatisation, les systèmes d'énergie solaire... Dans la majorité de ces applications, le transfert de chaleur est réalisé à l'aide de certains dispositifs appropriés à l'évacuation ou le transport de l'énergie thermique ; tels que les échangeurs de chaleur, les évaporateurs, les condenseurs et les dissipateurs de chaleur. L'amélioration du processus de transfert de chaleur dans de tels systèmes est un problème très intéressant ; le but est toujours d'intensifier les échanges thermiques et d'obtenir les meilleures performances.

De nombreuses investigations ont été menées en vue de développer de nouvelles techniques pour intensifier les transferts de chaleur, ainsi que pour améliorer les techniques existantes. Diverses méthodes sont disponibles pour augmenter l'efficacité des échanges thermiques. Certaines concernent l'augmentation de la surface d'échange, l'application de vibrations à ces surfaces, l'utilisation de microcanaux... L'efficacité du transfert de chaleur peut également être améliorée en augmentant la conductivité thermique du fluide de travail. Les fluides caloporteurs couramment utilisés tels que l'eau, l'éthylène glycol et l'huile moteur ont des conductivités thermiques relativement faibles, par rapport à la conductivité thermique des solides. L'une des méthodes efficaces consiste à remplacer ces fluides par des nanofluides en tant que nouvelle stratégie pour améliorer les caractéristiques de transfert de chaleur des fluides. Les nanofluides sont une nouvelle génération de fluides caloporteurs qui se caractérise par des propriétés thermophysiques améliorées. Le terme 'nanofluide' fait référence à des solutions colloïdales constituées de nanoparticules solides de même type, dispersées dans un liquide de base. Si deux types de nanoparticules ou plus, ou bien des nanocomposites sont utilisés on parle dans ce cas de nanofluide hybride qui représente un type amélioré des nanofluides. L'idée de mélanger différents types de nanoparticules (deux ou plus) ou bien des nanocomposites dans un fluide de base vise exploiter les effets synergiques pour obtenir une amélioration prometteuse des propriétés thermophysiques en choisissant la combinaison appropriée de nanoparticules.

La présente étude s'intéresse à la simulation numérique du comportement thermique et dynamique du nanofluide hybride eau/Ag-ZnO dans un espace annulaire incliné soumis à des rayonnements solaires. L'outil numérique utilisé est le solveur Ansys Fluent 20. R1. L'estimation de la viscosité dynamique et la conductivité thermique qui représentent le point essentiel lorsque l'on parle de nanofluides, est basée sur des modèles linéaires en fonction de la température,

développés à partir des données expérimentales. Pour mieux comprendre le sujet et arriver au but recherché dans ce travail, cette thèse est organisée en quatre chapitres.

Dans le 1^{er} chapitre, un état de l'art sur les nanofluides est présenté. En commençant par les techniques classiques d'intensifications des transferts thermiques, la présentation des nanofluides, et des nanofluides hybrides ainsi que leurs applications et méthodes de fabrication dans un deuxième lieu, donne plus de valeur en termes de compréhension du sujet. Dans la deuxième partie du chapitre, on présente les fondements et les notions de base de la mécanique des fluides ainsi que les transferts thermiques. De tels points présentent un intérêt majeur dans l'analyse du comportement thermique et dynamique des nanofluides et facilitent la compréhension et l'interprétation des résultats obtenus plus tard.

Le 2^{ème} chapitre est consacré à la présentation du modèle mathématique et numérique approprié à la résolution du problème d'étude. Les différentes approches utilisées pour étudier le comportement dynamique et thermique des nanofluides avec les équations gouvernantes sont présentées. Par la suite le problème d'étude est donné en détail.

Le 3^{ème} chapitre est destiné à la présentation du cadre numérique du travail. Le principe de la méthode des volumes finis, utilisée dans notre cas est présenté en détail au début du chapitre. Ensuite le processus de résolution par le solveur Ansys fluent qu'on a utilisé pour réaliser la simulation de notre problème est présenté. En plus, des études de vérification et de validation du solveur sont réalisées et visent à vérifier et prouver la fiabilité du solveur. Enfin, les différentes étapes de la simulation du problème d'étude à savoir la création de la géométrie, la réalisation du maillage et la configuration fluent sont présentées en détails à la fin du chapitre.

La présentation des résultats est l'étape la plus importante du travail. Une bonne présentation conduit à une compréhension approfondie des phénomènes physiques mise en jeu. Le 4^{ème} chapitre est destiné à la présentation des résultats obtenus de la simulation du problème détaillé dans le 2^{ème} chapitre. Pour bien visualiser le développement des phénomènes physiques dans l'espace annulaire étudié, plusieurs types de présentations ont été choisis : courbes, contours et vecteurs, pour présenter les quantités physiques à savoir : la vitesse, la température, le coefficient de frottement et le nombre de Nu. Ces résultats sont accompagnés avec les interprétations qui analysent les variations des quantités physiques citées ci-dessus.

La conclusion de ce travail résume les grands axes de l'étude en donnant un récapitulatif des différents chapitres de la thèse et maitre l'accent sur les résultats obtenus tout au long du travail ainsi que les futures perspectives du sujet.

CHAPITRE 1. ETAT DE L'ART

Chapitre 1 : Etat de l'art

1.1. Introduction

L'amélioration des performances thermiques des systèmes manipulant des fluides caloporteurs est devenue une préoccupation essentielle dans l'industrie contemporaine. Les fluides caloporteurs couramment employés dans les applications de chauffage ou de refroidissement présentent souvent des conductivités thermiques très limitées, ce qui peut restreindre leurs performances thermiques. L'utilisation des nanofluides, des solutions colloïdales de propriétés thermiques particulières, constituées de nanoparticules solides, dispersées dans un liquide de base a le potentiel de considérables améliorations en termes de performances thermiques. De nombreuses recherches ont été menées ces dernières années sur cette nouvelle génération de fluides. Afin de mettre au point l'intérêt des nanofluides hybrides, la première section de ce chapitre s'intéresse à la présentation des techniques classiques utilisées pour améliorer les échanges thermiques. Dans la deuxième section, l'accent sera mis sur la présentation des nanofluides hybrides, leurs domaines d'application, techniques de fabrication ainsi que les paramètres affectant leurs performances. Dans l'objectif de favoriser une meilleure compréhension des mécanismes physiques impliqués dans l'utilisation des nanofluides, la troisième section du chapitre sera destinée à la présentation du comportement thermique des nanofluides hybrides à savoir les phénomènes physiques associés au transferts thermiques dans les nanofluides hybrides et les paramètres affectants la conductivité thermique des nanofluides hybrides. Enfin, la dernière section s'intéresse au comportement hydrodynamique des nanofluides. Vue le but de notre travail, une description du comportement rhéologique ainsi que les propriétés physiques des nanofluides hybrides à savoir la masse volumique et la viscosité dynamique est fortement demandée.

1.2. Avant les nanofluides

Avec l'augmentation des taux de transfert de chaleur requis par les équipements de chauffage ou de refroidissement industriels, certains dispositifs tels que les microprocesseurs à grande vitesse, les appareils d'application au laser, les aimants supraconducteurs et l'optoélectronique nécessitent des systèmes de refroidissement plus performant. Techniquement, améliorer les performances des systèmes de chauffage ou de refroidissement revient à intensifier le transfert convectif entre un fluide caloporteur et une surface d'échange. Dans une approche macroscopique, en régime stationnaire, le transfert thermique convectif à l'interface paroi-fluide caloporteur peut être représenté par une analogie électrique où la résistance est inversement proportionnelle au coefficient d'échange convectif à la surface d'échange, (figure 1.1). Par conséquent, toutes les techniques d'intensification des échanges convectifs visent à augmenter l'un de ces deux paramètres, Mammeri [1].



Figure 1.1 : Techniques d'intensification des échanges convectifs fluide/paroi [1].

De nombreuses recherches ont été menées afin de proposer de nouvelles techniques d'intensification des transferts convectifs ainsi que pour améliorer celles existantes. Les auteurs suivants Ouattaraces [2], Leal [3] et Sauret [4], ont subdivisé ces techniques en deux catégories : techniques actives et les techniques passives.

1.2.1. Techniques actives d'intensification des transferts de chaleur

Si la surface d'échange est immobile, l'ensemble des techniques actives s'appuie sur l'utilisation des forces électro hydrodynamiques, des jets et des sprays qui sont des techniques actives sans déformation de paroi. Ces trois techniques agissent directement sur le fluide. Si dans la surface d'échange il y'a au moins un élément solide mobile ou bien déformé dynamiquement, trois techniques principales d'intensification des transferts de chaleur sont utilisées [2] :

- Les ondes acoustiques résultant de l'oscillation à haute fréquence d'une membrane ;
- Les jets synthétiques où l'écoulement est provoqué par le mouvement d'un diaphragme obstruant une cavité ;
- La déformation dynamique d'un solide à des amplitudes élevées.

Comme l'utilisation des nanofluides hybrides est compris dans les techniques passives, on est obligé de les bien détaillées pour pouvoir tirer l'importance de l'utilisation des nanofluides hybrides au lieu des autres techniques passives.

1.2.2. Techniques passives d'intensification des transferts de chaleur

Historiquement, les premières techniques proposées étaient de nature passive, et elles demeurent largement employées de nos jours. Ces approches visent à intensifier les transferts de chaleur par convection [2]:

- En altérant la surface d'échange thermique et ses caractéristiques ;
- En perturbant les couches limites thermiques ;
- En modifiant les propriétés du fluide.

L'extension de la surface d'échange est la technique d'intensification la plus couramment utilisée et la plus facile à mettre en œuvre. Elle implique d'augmenter la zone de contact entre le fluide caloporteur et la paroi ou l'élément à refroidir. Souvent, des ailettes de diverses formes sont employées à cet effet. Avec l'avènement des systèmes miniaturisés, les microcanaux sont devenus une autre méthode d'augmentation de la surface d'échange.

Le deuxième facteur affectant le taux de transfert thermique est le coefficient d'échange convectif. Généralement, l'ajout des turbulateurs, les régimes convectifs en ébullition, la rugosité de la surface et la conductivité du liquide caloporteur sont les techniques les plus utilisées pour l'améliorer. Puisqu'il dépend étroitement de la couche limite (principalement son épaisseur), toutes les techniques d'intensification auront tendance à détruire ou au moins perturber cette couche. La première technique consiste à exploiter la dynamique du fluide caloporteur. L'approche consiste à augmenter le débit du fluide de manière à atteindre un régime d'écoulement propice au transfert de chaleur, notamment le régime turbulent. Les techniques de refroidissement qui reposent sur l'ébullition nucléée d'un fluide caloporteur sont réputées pour leur coefficient d'échange convectif très élevé. Ceci est dû à l'exploitation de la chaleur latente d'évaporation, mais surtout à l'intensification du mélange provoqué par la formation de bulles de vapeur. Ces bulles ont tendance à perturber, voire à éliminer la couche limite thermique, favorisant ainsi le transfert de chaleur. [1]. Cependant, cette technique souffre de plusieurs inconvénients tels que l'énergie électrique fournit au système de pompage ainsi que l'encombrement créé par le régime turbulent. Le deuxième facteur qui peut influencer la couche limite thermique concerne les caractéristiques de la surface d'échange, à la fois à l'échelle macroscopique et microscopique. Agir sur l'aspect macroscopique implique la création artificielle de turbulence par l'insertion de turbulateurs ou de rainures à l'intérieur même de la paroi. En revanche, influencer l'aspect microscopique consiste à introduire artificiellement de la rugosité sur cette paroi [1]. La présence de rugosité à la surface contribue à améliorer le coefficient de transfert convectif en renforçant la turbulence et en réduisant l'épaisseur des couches limites [2]. L'augmentation du coefficient de transfert de chaleur est relativement faible dans le cas de la convection naturelle, car les rugosités n'affectent pas de manière significative l'écoulement. Pour intensifier les transferts de chaleur, qu'il y ait un changement d'état ou non, les techniques les plus couramment utilisées incluent l'utilisation de tubes et de plaques à ailettes, d'inserts poreux ou fibreux [2].

L'inconvénient des méthodes précédemment mentionnées réside dans l'accroissement des pertes hydrauliques au sein du circuit de refroidissement. L'augmentation de ces pertes peut être préjudiciable, car elle peut entraîner une augmentation significative de la taille du système de pompage. À titre d'illustration, doubler le débit de circulation équivaut à multiplier par quatre la

perte de charge et par huit la puissance de pompage [1]. Les limites atteintes à chaque fois dans les techniques citées précédemment font orienter l'attention des chercheurs vers le seul et le dernier facteur qui peut améliorer le taux de transfert convectif : le fluide caloporteur, d'où on parle de ses propriétés thermophysiques (conductivité, chaleur massique, masse volumique, chaleur latente). La chaleur massique et la conductivité thermique jouent un rôle essentiel dans les systèmes de refroidissement où le vecteur d'énergie est un fluide caloporteur monophasique. En revanche, dans les systèmes impliquant un processus de changement de phase, le point d'ébullition et la chaleur latente d'évaporation revêtent une importance cruciale.

Pour qu'un fluide soit performant, il doit présenter des valeurs élevées de pouvoir calorifique "*Cp*" et de conductivité thermique. Cependant, selon la littérature, les fluides de refroidissement conventionnels tels que l'eau, l'éthylène glycol et l'huile présentent des performances limitées [5, 6]. Par exemple, l'eau satisfait la première condition avec une chaleur massique ""*Cp*" de 4185.5 J.kg⁻¹.K⁻¹ à 15°C, mais sa conductivité thermique est relativement faible, soit 0.6 W.m⁻¹.K⁻¹ à 20°C. Étant donné que les matériaux en phase solide ont une conductivité thermique beaucoup plus élevée que celle de la phase fluide (voir figure 1.2), une méthode efficace pour améliorer la conductivité thermique dans les nanofluides, Das *et al.* [7] ont revenu un petit peu en arrière et confirment que cette idée est venue aux esprits il y a plus d'un siècle. D'après eux, Maxwell [8] a été un pionnier dans ce domaine et a présenté une base théorique pour calculer la conductivité thermique effective des suspensions. Ses efforts ont été suivis par de nombreuses études théoriques et expérimentales et les modèles développés fonctionnent très bien pour prédire la conductivité thermique des suspensions. Cependant, toutes ces études étaient limitées à la suspension de micro à macroparticules.



Figure 1. 2 : Effet des de la nature du matériau sur la conductivité thermique [9].

Suresh *et al.* [10] ainsi que Das *et al.* [7] ont résumé les problèmes rencontrés en utilisant des suspensions faisant intervenir des particules de taille micro ou macroscopiques (de l'ordre du micro jusqu'à millimètre) comme suit :

- Les particules se déposent rapidement, formant une couche à la surface et réduire la capacité de transfert de chaleur du fluide ;
- Si le débit de circulation du fluide augmente, la sédimentation est réduite, mais l'érosion des dispositifs de transfert de chaleur augmente rapidement ;
- La grande taille des particules a tendance à obstruer les canaux d'écoulement, particulièrement les microcanaux ;
- La perte de charge dans le fluide augmente considérablement.

En raison de ces limitations, l'utilisation de suspensions liquide-solide pour améliorer les transferts thermiques avait perdu de sa préférence, jusqu'à l'apparition des nanofluides. Les nanofluides sont constitués de particules de taille nanométrique présentant une conductivité thermique extrêmement élevée en suspension dans un fluide porteur. Cette innovation offre la possibilité d'obtenir des améliorations significatives des performances thermiques. De nombreuses recherches ont été menées sur cette nouvelle génération de fluides dans le but de mieux comprendre les mécanismes physiques en jeu lors de leur utilisation et de développer les liquides caloporteurs les plus performants [11].



Figure 1. 3 : Différence entre l'utilisation des microparticules et nanoparticules [9].

1.3. Nanofluides

Le terme « nanofluide » a été proposé par Choi [12] dans le Laboratoire Nationale d'Argonne en 1995 [13]. Il fait référence à des solutions colloïdales de propriétés thermiques particulières, constituées de nanoparticules solides de même type, dispersées dans un liquide de base. Les nanoparticules sont l'assemblage de quelques centaines à quelques milliers d'atomes, conduisant à un objet dont au moins l'une des dimensions est de taille nanométrique ($D_{np} < 100 nm$) [13].



Figure 1. 4 : Structure d'un nanofluide.



Figure 1. 5 : (a) Nanoparticules sphériques, (b) nanotubes de carbone [11].

Le plus souvent, des nanoparticules de forme sphérique ou cylindrique sont utilisées, mais ça n'empêche pas que d'autre formes de nanoparticules existe dans la littérature, la figure 1.6 montre des nanoparticules de forme cubique, plaquettes, lames [14].



Figure 1. 6 : Morphologie des nanopoudres d'Al₂O₃ et le fluide de base EG/H₂O, (a) plaquettes, (b) lames, (c) cylindres, (d) cubes [14].

La taille nanométrique des particules est un choix intelligent et bien étudié. La grande surface d'échange, le moment faibles et la grande mobilité sont des caractéristiques biens spécifiques aux nanoparticules par rapport aux particules de grandes dimensions. D'après [7], si les nanoparticules sont bien dispersées dans le fluide de base, les nanofluides offrent plusieurs avantages :

- Conduction thermique plus élevée : l'ajout des nanoparticules offre une surface d'échange plus grandes par conséquent une augmentation de transfert de chaleur. Les particules de diamètre inférieure à 20 nm portent 20% de leurs atomes sur leur surface, ce qui les rend instantanément disponibles pour les interactions thermiques. Ainsi, la mobilité des nanoparticules provoque la micro-convection au sien du fluide et par conséquent un transfert de chaleur accru. Ces deux paramètres peuvent également augmenter la propagation de la chaleur au sien du nanofluide rapidement.
- Stabilité : Plus la taille des particules est petite, plus la probabilité de sédimentation est faible. La taille réduite des nanoparticules impose un pois assez faible vers négligeable, ce qui réduit les risques de sédimentation qui sont également moindres si on les compare avec les suspension liquide-solide a grandes particules.
- Limitation de l'obstruction des microcanaux : généralement, des charges thermiques élevées sont rencontrées dans les applications à microcanaux. La combinaison de microcanaux et de nanofluides fournira des fluides hautement conducteurs et une grande surface d'échange. Cela ne peut pas être atteint avec des méso ou microparticules car elles obstruent les microcanaux. Les nanoparticules, qui ne représentent que quelques centaines, voire milliers d'atomes, ont des ordres de grandeur plus petits que les microcanaux.
- *Réduction d'érosion* : l'utilisation des nanofluides réduit aussi les risques d'érosion, les nanoparticules sont très petites et la quantité de mouvement qu'elles peuvent donner aux parois des équipements est plus faible.
- *Réduction de la puissance de pompage* : pour augmenter le transfert de chaleur d'un fluide conventionnel par un facteur de deux, la puissance de pompage doit généralement être multipliée par dix. On peut montrer que, si on peut multiplie la conductivité par un facteur de trois, le transfert de chaleur dans le même appareil double. L'augmentation requise de la puissance de pompage sera très modérée, à moins d'une forte augmentation de la viscosité du fluide. Ainsi, une très grande économie de puissance de pompage peut être obtenue si une augmentation importante de la conductivité thermique peut être obtenue avec une petite fraction volumique de particules.

1.4. Nanofluides hybrides

Le nanofluide hybride est un nouveau type de nanofluides, synthétisé en dispersant deux types de nanoparticules ou plus, ou bien des nanocomposites dans un fluide caloporteur (figure 1.7). C'est un domaine de recherche en plein expansion qui suscite un nombre considérable de travaux au cours de ces dernières années [5].



Figure 1. 7 : Nanopoudre de ZnO et TiO₂ et nanofluides hybrides EG/ZnO-TiO₂ [15].

En les comparants avec les fluides utilisés généralement dans les applications de transfert thermique et en raison des effets synergiques, Sidik et al. [5] affirment que les nanofluides hybrides offrent de meilleures performances de transfert de chaleur et de meilleures propriétés thermophysiques par rapport aux fluides conventionnels (huile, eau et éthylène glycol) et aux nanofluides avec un seul type de nanoparticules. Lorsque les matériaux sont bien choisis, la combinaison entre deux types de nanoparticules ou plus peut améliorer les caractéristiques de chaque composant et surmonter les inconvénients du nanofluide normale. Zainal et al. [6] et Takabi et al. [16] ont pris l'exemple d'Al₂O₃, d'après eux sa nature céramique lui offre beaucoup de qualité. En plus de sa stabilité considérable, il est inerte chimiquement. Cependant, sa conductivité thermique est assez faible par rapport aux nanoparticules métalliques. Ces dernières (l'aluminium, le zinc, le cuivre...) se caractérisent par une conductivité thermique plus élevée, mais leur stabilité et leur réactivité limitent son utilisation dans les applications de nanofluides. Selon les propriétés des uns et des autres, on peut dire que l'ajout de nanoparticules métalliques dans un nanofluides à base de nanoparticules d'Al₂O₃ puisse améliorer les propriétés thermophysiques du mélange. Un tel résultat confirme l'utilisation des nanofluides hybrides au lieu des nanofluides normales et des liquides purs.

Plusieurs résultats de la littérature montrent que les nanofluides hybrides sont plus performant que les nanofluides conventionnels. Nimmagadda et Venkatasubbaiah [17] ont étudié le transfert thermique dans les nanofluides eau/Ag, eau/Al₂O₃ ainsi que le nanofluide hybride eau/Ag-Al₂O₃. D'après leurs résultats, les valeurs du coefficient de transfert convectif moyen associé au nanofluide hybride sont plus grand que celle des nanofluide eau/Ag, eau/Al₂O₃ ainsi que l'eau pur.

Afin de déterminer l'effet du fluide de base ainsi que celui du nanofluide hybride sur le transfert thermique par convection forcée, Labib *et al.* [18] ont réalisé une étude numérique et résultent que la dispersion de (0.05% CNTs+0.6% Al₂O₃) dans l'eau augmente le coefficient de transfert convectif de 22.8% par rapport à la dispersion de 0.05% de *CNTs* dans le même fluide de base. Pour une concentration volumique de (0.05% CNTs+1.6% Al₂O₃), le coefficient de transfert convectif a augmenté de 59.86% par rapport au nanofluide eau/ *CNTs* avec une concentration de 0.05%. Dans une autre étude, Selvakumar et Suresh [19] ont testé expérimentalement l'utilisation du nanofluide hybride eau/Al₂O₃-CuO dans pour la dissipation de la chaleur dans les dispositifs électronique. Ils ont conclu que le nanofluide hybride étudié est bien adapté pour le refroidissement des composants électroniques. Leurs résultats montrent que le coefficient de transfert convectif moyen du nanofluide hybride au lieu de l'eau a augmenté la puissance de pompage de 12.61% qui est inférieur à l'augmentation du coefficient de transfert convectif.

Dans une revue théorique sur l'effet et le mécanisme de la conductivité thermique des nanofluides normales et des nanofluides hybrides, Das [13] a divisé les matériaux hybrides selon leur nature en trois types :

- *Nanocomposites à matrice métallique* : Al₂O₃/Cu, Al₂O₃/Ni, MgO/Fe, Al/CNT, Al₂O₃/Fe-Cr et ND/Ni, les matériaux utilisés pour les fabriqués sont: Ag, Al, Au, Cu, Fe, ND, Ni, Mg...
- Nanocomposites à matrice céramique : Al₂O₃/SiO₂, Al₂O₃/TiO₂, SiO₂/Ni, CNT/Fe₃O₄, Al₂O₃/SiC et Al₂O₃/CNT, les matériaux utilisés pour synthétiser les nanocomposites à matrice céramique sont : Al₂O₃, CuO, Fe₂O₃, NiO, SiC, SiO₂, TiO₂, ZnO...
- Nanocomposites à matrice polymère : polymère / couches double hydroxydes, polymère / CNT, polymère thermoplastique / thermodurcissable / couches de silicates, et polyester / TiO2... les matériaux utilisés pour les nanocomposites à matrice polymère sont: polymère de vinyle, éthylène-alcool vinylique, polychlorure de vinyle, polyéthylène, et poly propylène. Les matériaux utilisés pour les nanocomposites à base de carbone sont : les nanotubes de carbone à paroi simple, les nanotubes de carbone à parois multiples ...

Depuis la découverte des nanofluides, de nombreuses recherches ont été menées sur ses domaines d'applications. Parmi ces domaines on peut citer le refroidissement électronique, les caloducs, les liquide de refroidissement pour le soudage et l'usinage, les centrales nucléaires, les échangeurs de chaleur, le chauffage solaire... A cause de leur haute performance, Il est prévu que les nanofluides hybrides peuvent remplacer les nanofluides avec succès. Ils ont une grande capacité à améliorer le transfert de chaleur par rapport à fluides de travail usuels [20].

1.4.1. Domaines d'application

Les nanofluides présentent une combinaison sans précédent des quatre caractéristiques souhaitées dans les systèmes énergétiques (systèmes fluidiques et thermiques) ; Augmentation de la conductivité thermique à faible concentrations de nanoparticules, forte dépendance entre la conductivité thermique et la température, augmentation non linéaire de la conductivité thermique avec la concentration en nanoparticules et augmentation du flux de chaleur critique à l'ébullition. Ces caractéristiques distinctives élargissent la plage des applications des nanofluide dans les domaines industriels et d'ingénierie [9].

1.4.1.1. Transfert de chaleur

• Refroidissement industriel

Généralement, les liquides de refroidissement industriels sont utilisés dans beaucoup de domaines tel que, l'industrie pétrolière et gazière, l'industrie de la transformation des aliments, l'industrie des produits chimiques, conversion de l'énergie solaire en électricité...Selon Routbort *et al.* [21], l'utilisation de nanofluides pour le refroidissement industriel entraînera de grandes économies d'énergie. Prenons l'exemple des usines de fabrication de pneumatiques, où la productivité de nombreuses étapes du processus industriel est entravée par l'absence de moyens efficaces pour refroidir le caoutchouc pendant son traitement. L'utilisation de nanofluides à base d'eau peut réduire les coûts de production des pneumatiques et entraîner une augmentation des marges bénéficiaires. Nelson *et al.* [22] ont étudié expérimentalement la performance de refroidissement du nanofluides de poly-alpha-oléfines contenant des fibres de graphite. Ils ont montré que la chaleur spécifique des nanofluides était 50% plus élevée et que le transfert convectif était augmenté de 10% par rapport à ceux de la poly-alpha-oléfine. Ainsi la capacité thermique et le taux de transfert de chaleur augmentaient avec l'augmentation de la température.

• Les fluides intelligents

L'augmentation de l'utilisation des dispositifs fonctionnant sur piles, tels que les téléphones portables et les ordinateurs portables, exige la nécessité d'une gestion technologique intelligente des ressources énergétiques. Les matériaux intelligents ont des propriétés bien spécifiques. Parlant de la viscosité, ils peuvent passer d'un fluide qui s'écoule facilement à un solide. Il a été démontré que les nanofluides sont capables de gérer ce rôle dans certains cas. Son fonctionnement est assimilé à une vanne thermique pour contrôler le flux de chaleur, où le transfert de chaleur peut être réduit ou amélioré à volonté. Ils peuvent être facilement configuré soit dans un état -low, où il conduit mal la chaleur, soit dans un état -highl, où la dissipation est plus efficace. En particulier, les matériaux magnéto-rhéostatiques sont des nanofluides constitués de nanoparticules de fer en suspension dans l'huile. Ils passent d'un fluide épais (semblable à l'huile

de moteur) à une substance presque solide en une milliseconde lorsqu'il est exposé à un champ magnétique et son comportement est complètement inversé lorsque le champ est retiré. Ce type de matériaux est développé pour l'utiliser dans les appareils d'exercice, le polissage des surfaces de pièces de machine, l'amortissement des vibrations des machines à laver... [9].



Figure 1.8 : Fluide intelligent.

• Extraction de l'énergie géothermique

Lors de l'extraction d'énergie de la croûte terrestre, où les profondeurs peuvent varier de 5 à 10 km et les températures peuvent atteindre entre 500 °C et 1000 °C, les nanofluides offrent une solution pour le refroidissement des tuyaux exposés à de telles conditions extrêmes. Pendant les opérations de forage, les nanofluides peuvent jouer un rôle crucial en contribuant au refroidissement des machines et des équipements qui opèrent dans des environnements caractérisés par des frottements et des températures élevées. De plus, en tant que fluides supraconducteurs, les nanofluides pourraient être utilisés comme fluides de travail pour extraire de l'énergie à partir du noyau terrestre. Ces nanofluides pourraient être intégrés dans un système de centrale électrique à réacteur à eau pressurisée (REP), ce qui permettrait de produire d'importantes quantités d'énergie à partir de ces sources géothermiques. Dans la technologie de forage, l'utilisation de nanofluides permettre aussi d'améliorer les capteurs et les équipements électroniques fonctionnant à haute température ce qui permettront d'accéder à des régions plus profondes et plus chaudes [9].

1.4.1.2. Applications de l'électronique

• Refroidissement des ordinateurs personnels et des micropuces

Le problème de la dissipation de la chaleur constitue l'un des principaux obstacles au développement de dispositifs électroniques plus performants. Ce problème peut être surmonté en recherchant une géométrie optimale de refroidissement ou en augmentant la capacité de transfert de chaleur. Les nanofluides peuvent être utilisés en raison de leur conductivité thermique élevée

et de leur coefficient de transfert de chaleur accru [9]. Une étude de Jang et Choi [23] a montré qu'un dissipateur thermique à microcanaux associé à des nanofluides pouvait potentiellement servir de dispositifs de refroidissement de nouvelle génération pour éliminer les flux de chaleur élevés.

Avec l'augmentation des quantités de chaleur de l'unité de traitement informatique (CPU), la dissipation thermique est plus difficile. L'une des méthodes employées pour surmonter ce problème consiste à utiliser des caloducs contenant des nanofluides pour améliorer les performances thermiques. A même volume de charge, il existe une réduction significative de la résistance thermique du caloduc avec des nanofluides contenant des nanoparticules d'or par rapport à l'eau [24]. Des recherches sur diverses nanoparticules ont montré que des nanofluides contenant des

• La microfluidique

La manipulation de petits volumes de liquide est nécessaire dans les dispositifs d'affichage numérique fluidique, les dispositifs optiques et les systèmes micro électromécaniques (MEMS) tels que les systèmes d'analyse de laboratoire sur puce. Cela peut être réalisé par électromouillage, ou en réduisant l'angle de contact par une tension appliquée, les petits volumes de liquide [9]. Vafaei *et al.* [25] ont découvert que les nanofluides sont efficaces pour la détermination de la mouillabilité de la surface et éventuellement la tension superficielle. Etant donné que l'angle de contact des gouttelettes de nanofluides peut être modifié, il peut être utilisé pour déplacer efficacement des liquides dans des microsystèmes, ce qui permet de nouvelles méthodes de focalisation des lentilles dans les caméras miniatures ainsi que de refroidissement des puces informatiques [9].

1.4.1.3. Applications automobiles

• Liquide de refroidissement

Afin d'améliorer l'aérodynamisme des véhicules, et donc les économies de carburant, les constructeurs doivent réduire la quantité d'énergie nécessaire pour surmonter la résistance au vent sur la route. À grande vitesse, environ 65% de la production totale d'énergie d'un camion est utilisée pour surmonter la traînée aérodynamique [26]. Ce fait est en partie dû au grand radiateur situé à l'avant du moteur, positionné pour maximiser l'effet de refroidissement de l'air venant en sens inverse. L'utilisation de nanofluides comme liquides de refroidissement permettrait une taille plus petite et un meilleur positionnement des radiateurs. Du fait de l'efficacité accrue, les pompes de liquide de refroidissement pourraient être rétrécies et les moteurs de camion pourraient fonctionner à des températures plus élevées, ce qui permettrait de disposer de plus de puissance

tout en respectant des normes d'émission strictes. Avec un moteur à nanofluides, les composants seraient plus petits, ce qui permet de réduire la consommation de carburant, économiser de l'argent aux consommateurs et réduire les émissions pour un environnement plus propre. L'utilisation de nanofluides entraîne également une réduction des frottements et de l'usure, des pertes parasites, du fonctionnement de composants tels que des pompes et des compresseurs, d'où une économie de carburant de plus de 6% [9].

• Nanofluide dans le carburant

Les nanoparticules d'aluminium recouvertes de fines couches d'oxyde d'aluminium, créent une plus grande surface de contact avec l'eau du fait de la forte activité d'oxydation de l'aluminium pur et permettant une décomposition accrue de l'hydrogène à processus de combustion. Au cours de ce processus, l'alumine joue le rôle de catalyseur et les nanoparticules d'aluminium servent ensuite à décomposer l'eau pour produire plus d'hydrogène. Il a été démontré que la combustion de carburant diesel mélangée à un nanofluide d'aluminium aqueux augmentait la chaleur totale de combustion tout en diminuant la concentration de fumée et d'oxyde nitreux dans les émissions d'échappement du moteur diesel [27, 28].

• Fluides de freins

Au fur et à mesure que l'aérodynamisme des véhicules est amélioré et que les forces de traînée sont réduites, les systèmes de freinage utilisant des mécanismes de dissipation de la chaleur plus efficaces tels que le nanofluide de freinage, sont plus demandés. L'énergie cinétique d'un véhicule est dispersée dans la chaleur produite lors du freinage et est transmise à l'ensemble du liquide de frein dans le système de freinage hydraulique. Si le liquide de frein arriverait à son point d'ébullition, il se crée un blocage de vapeur empêchant le système hydraulique de disperser la chaleur produite par le freinage. Un tel problème entraînera à son tour un disfonctionnement des freins et un problème de sécurité. Puisque l'huile de frein est facilement affectée par la chaleur générée par le freinage, les nanofluides optimiseront les performances de transfert thermique et élimineront les problèmes de sécurité [26].

1.4.1.4. Applications biomédicales

• Ciblage magnétique des médicaments

Le magnétisme joue un rôle important dans le métabolisme. Par exemple, l'hémoglobine dans notre sang est un complexe de fer et est de nature magnétique. La magnétite, Fe₃O₄, est une structure biocompatible. C'est donc l'un des biomatériaux les plus utilisés pour différentes applications biologiques et médicales, telle que la séparation cellulaire, l'hyperthermie et l'administration de médicaments [29]. L'un des principaux problèmes de la chimiothérapie est l'incapacité de délivrer et de concentrer les médicaments avec précision dans les zones touchées ce qui augmente les effets toxiques sur les organes et les tissus voisins. Une méthode prometteuse pour réaliser un ciblage précis est la délivrance magnétique de médicaments. Le médicament est lié à des particules magnétiques (ferrofluides) biologiquement compatibles et injectées dans le sang. Les zones ciblées sont soumises à un champ magnétique externe capable d'affecter le flux sanguin en réduisant son débit. Dans ces régions, le médicament est lentement libéré des supports magnétiques. Par conséquent, des quantités relativement faibles d'un médicament ciblé magnétiquement sur le site localisé de la maladie peuvent remplacer de grandes quantités du médicament en circulation libre. Lorsque des fluides magnétiques sont utilisés comme système d'administration d'agents anticancéreux dans le cadre d'une thérapie tumorale localisée, cela permet de minimiser les effets secondaires indésirables dans l'organisme et d'augmenter son efficacité localisée [30]. Des résultats très encourageants ont récemment été rapportés dans l'application clinique du ciblage magnétique des médicaments, y compris chez les patients atteints d'un cancer ou d'un sarcome avancé et non traité au préalable [31].

• Nanocryochirurgie

La cryochirurgie est une procédure qui utilise la congélation pour détruire les tissus indésirables. Elle est en train de devenir une alternative populaire aux thérapies traditionnelles en raison de ses avantages cliniques. Selon Yan et Liu [32], le chargement intentionnel de nanoparticules à conductivité thermique élevée dans les tissus cibles peut réduire la température finale, augmenter le taux de congélation maximum et agrandir le volume de glace obtenu en l'absence de nanoparticules. En outre, l'introduction de la congélation améliorée par nanoparticules pourrait rendre la cryochirurgie plus flexible dans de nombreux aspects, tels que l'interférence artificielle dans la taille, la forme, l'image et la direction de la formation de la boule de glace. Les concepts de Nanocryochirurgie pourraient offrir de nouvelles opportunités pour le traitement des tumeurs. La magnétite (Fe₃O₄) et le diamant sont peut-être le choix le plus approprié pour améliorer la congélation en raison de leur bonne compatibilité biologique [9].

1.4.1.5. Optimisation du filtre optique à base de nanofluides pour les systèmes PV/T

Les filtres optiques peuvent être créés à partir de suspensions de nanoparticules spécialisées, par exemple des filtres à base de nanofluides pour des applications solaire hybrides photovoltaïque/thermique (PV/T) ou les nanofluides peuvent être utilisés à la fois comme absorbeurs solaires volumétriques et fluides caloporteurs [9]. Des systèmes PV/T bien conçus permettent de réaliser d'importantes économies financières pour les applications résidentielles et industrielles où les demandes d'énergie électrique et thermique sont présentées. Le plus souvent, les systèmes PV/T mettent le fluide de travail directement en contact avec le système PV, éliminant

ainsi l'excès de chaleur. Ce type de conception nécessite un compromis entre la baisse d'efficacité en température des cellules PV et la valeur des températures de sortie plus élevées du système thermique. Cependant, l'utilisation de nanofluides apporte une solution à ce problème et améliore ainsi les performances des systèmes thermiques solaires. L'avantage d'utiliser des nanofluides est qu'ils peuvent facilement être pompés dans un système ou contrôlés par des champs magnétiques / électriques, ce qui les rend idéaux pour les applications dans lesquelles une commutation optique dynamique est souhaitée. Ceci est particulièrement avantageux pour les applications de récupération d'énergie solaire, car un filtre à base de nanofluides peut également être utilisé comme moyen de transfert de chaleur et de stockage thermique. Ainsi, avec un filtre à nanofluides, il est possible de découpler les systèmes PV et thermique afin que chacun puisse fonctionner à une température optimale [9].

1.4.2. Méthodes de fabrication

D'une manière générale, la dispersion des nanoparticules dans un liquide de base peut être effectuée selon deux méthodes : méthodes en une seul étape et méthode à deux étapes.

1.4.2.1. Méthode en une seule étape

La méthode de Pulvérisation par Impulsion de Fil (PWE : Pulse Wire Evaporation method) consiste à générer des nanoparticules en faisant évaporer un matériau solide sous vide, suivi de la condensation immédiate de la vapeur résultante dans un liquide. Cette méthode présente l'avantage d'éviter l'oxydation des particules, mais elle est associée à des coûts élevés et n'est pas largement adaptée à des applications industrielles en raison de sa complexité et de son coût. [20].

L'appareil utilisé dans ce processus est composé d'une série de condensateurs, d'une source d'alimentation haute tension en courant continu, d'une chambre de condensation et d'un interrupteur à haute tension. Le procédé lui-même commence par l'application d'une impulsion de haute tension (environ 300 V) à travers un fil fin. Ce fil, en raison d'un chauffage non équilibré, se vaporise en quelques microsecondes pour former un plasma. Ensuite, ce plasma est mis en contact avec un gaz inerte tel que l'argon (Ar) ou l'azote (N₂), ce qui provoque la condensation du plasma en particules nanométriques. Enfin, le nanofluide, contenant une concentration volumique spécifique, est versé dans un récipient hermétique contenu dans l'appareil PWE, puis mélangé avec la poudre nanométrique obtenue pour créer un nanofluide hybride [33].

1.4.2.2. Méthode à deux étapes

Elle consiste tout d'abord à fabriquer une nanopoudre sèche, puis le mélange de celle-ci et la dispersion dans le liquide de base. Dans cette méthode, la poudre nanométrique hybride est d'abord produite par : procédé chimique, physique ou mécanique tel que le grinding, milling, le procédé sol-gel et la méthode en phase vapeur. La poudre nanométrique hybride préparée est dispersée dans le fluide de base en utilisant un équipement de mélange à cisaillement élevé ou un ultrason en utilisant un vibrateur à ultrasons. Ce procédé est très bon marché pour la production de grandes quantités de nanofluide hybride [20]. La méthode en deux étapes est la méthode la plus largement utilisée en industrie car la production en série est possible ; cependant, des problèmes liés à l'agglomération et la sédimentation des nanoparticules apparaissent [34].

1.4.3. Agglomération et sédimentation dans les nanofluides

L'agglomération et la sédimentation des nanoparticules est un problème majeur dans le domaine des nanofluides. Les nanoparticules ont tendance à s'agglomérer sous l'action des forces de Van Der Waals. Ces agglomérats sédimentent au cours du temps à cause de la gravité (figure 1.9). L'origine de l'agglomération de nanoparticules est la somme des forces attractives et répulsives entre elles. Si les forces d'attraction prévalent sur celles de répulsion, les nanoparticules se rassemble et forme des agglomérats [35].

Théoriquement, éviter le phénomène d'agglomération et améliorer l'état de dispersion des nanoparticules dans le fluide de base consiste à renforcer les forces répulsives par rapport aux forces d'attraction. Le plus souvent, l'ajout de composés chimiques inorganiques ou organiques est courant. Ces deux mécanismes appelés stabilisation électrostatique et stabilisation stérique seront discutés brièvement [35].



Figure 1. 9 : Test de la sédimentation des nanoparticules d'Al₂O₃ dans l'eau [36].

1.4.3.1. Stabilisation électrostatique

L'existence d'une charge électrique à la surface des nanoparticules est une source majeure de stabilité cinétique [35]. On peut créer une répulsion électrostatique entre les nanoparticules en ajoutant un additif dont les ions se fixent à leur surface. L'adsorption des ions crée une double/multicouche électrique qui se traduit par une force de répulsion entre les nanoparticules (figure 1.10 (b)). La stabilisation électrostatique est une méthode sensible au pH et d'utilisation limitée [35].

1.4.3.2. Stabilisation stérique

La stabilisation stérique des nanoparticules est obtenue par la fixation des molécules organiques à longue chaîne telles que des polymères ou des tensioactifs à la surface des

nanoparticules (figure 1.10 (a)). Les molécules adsorbées à la surface des nanoparticules jouent un rôle essentiel en formant une sorte de barrière complexe qui s'étend dans toutes les directions. Cette barrière a pour effet de restreindre la proximité des nanoparticules entre elles, empêchant ainsi les forces de Van der Waals cohésives de les agglomérer [1]. Par exemple, la stabilité des nanofluides de graphite est due au rôle protecteur de la PVP, car elle empêche l'agglomération des nanoparticules sous l'effet stérique [35].



Figure 1. 10 : (a) Stabilisation stérique des nanoparticules, (b) Répulsion électrostatique des nanoparticules par des ions [1].

L'agglomération et la sédimentation des nanoparticules réduisent la stabilité des nanofluides ce qui peut limiter les applications pratiques. Elles ont également un impact négatif sur la conductivité thermique et puis sur les performances des nanofluides [1].

1.4.4. Paramètres affectant les performances des nanofluides

1.4.4.1. Stabilité des nanofluides hybrides

La stabilité est l'un des facteurs critiques qui influent sur les performances du nanofluide hybride. Les nanofluides hybrides peuvent perdre leur potentiel de transfert de chaleur en raison de leur tendance à l'agglomération. L'instabilité peut altérer les propriétés thermophysiques des nanofluides hybrides et se traduire par des performances optimales dans les applications de transfert de chaleur [5].

1.4.4.1.1. Procédures d'amélioration de la stabilité

• Techniques de modification de surface

Cette technique présente la méthode sans tensioactif. L'injection de nanoparticules fonctionnelles dans les fluides de base peut assurer la stabilité à long terme des nanofluides. Il existe un certain nombre d'exemples de telles techniques de modification. Yang *et al.* [37] ont greffé des silanes directement à la surface de nanoparticules de silice dans les solutions de nanoparticules d'origine. La particularité de ces nanofluides est l'absence de couche de dépôt formée sur la surface chauffée après un processus d'ébullition en piscine. La stabilité des nanotubes de carbone peut être augmentée en introduisant des groupes hydroxyle à la surface des NTC [38].
Un traitement au plasma peut être appliqué pour modifier la surface des nanoparticules de diamant afin d'améliorer leur propriété de dispersion dans l'eau [39].

• Contrôle du pH des nanofluides hybrides

La stabilité du nanofluide hybrides est directement liée à ses propriétés électrocinétiques. Par conséquent, le contrôle de leur pH peut augmenter la stabilité en raison de fortes forces répulsives [5].Comme par exemple, un simple traitement à l'acide pourrait provoquer une bonne stabilité des NTC dans l'eau [35]. Fovet *et al.* [40] ont étudié diverses valeurs de pH du nanofluide d' Al₂O₃ et observé la diminution ou augmentation de l'agglomération en modifiant le pH. Enfin, il convient de noter que la valeur optimisée du pH est différente d'un échantillon à l'autre. Par exemple, les valeurs de pH appropriées pour l'alumine, le cuivre et le graphite dispersés dans l'eau sont d'environ 8, 9,5 et 2 respectivement [41].

• Agitation ultrasonique

L'intensité de l'ultrasonication est un autre facteur qui peut agir sur la stabilité des nanofluides hybrides. Elle joue un rôle important dans la modification des caractéristiques morphologiques et dimensionnelles des nanoparticules. L'augmentation de l'intensité des ultrasons augmente les cavitations phénoménales, de sorte que la cavité effondrée dans la solution crée une onde de choc dans la solution, ce qui réduit la taille des particules et améliore la stabilité du nanofluide [20].

De ce qui précède, on peut dire que l'étude et l'analyse de la stabilité ne peuvent être ignorées dans le domaine des nanofluides. Les chercheurs ont mis au point plusieurs méthodes d'analyse de stabilité, telles que la méthode de centrifugation, la méthode de sédimentation, l'analyse du potentiel zêta, la méthode d'analyse spectrale, la microscopie électronique et la diffusion de la lumière.

1.4.4.1.2. Techniques d'évaluation de la stabilité des nanofluides

• Procédés de sédimentation et centrifugation

Le procédé de sédimentation et centrifugation est basé sur l'application d'un champ de force externe. Sous l'effet du champ appliqué, les agglomérats se sédimentent suivant leur masse volumique et leur taille. Les nanofluides sont considérés comme stables si la concentration des nanoparticules surnageâtes reste constante avec le temps [35]. Cette méthode est facile à mettre en œuvre, mais elle nécessite une période d'observation plus longue par rapport à d'autres méthodes. [5].

Analyse de potentiel zêta

Le potentiel zêta est la différence de potentiel entre le fluide de base et les nanoparticules. Il indique le degré de répulsion entre les particules chargées de manière similaire dans la dispersion. Généralement, les suspensions à fort potentiel zêta (négatif ou positif) sont stables alors que ceux à faible teneur en zêta ont tendance à coaguler [5].



Figure 1. 11: Potentiel Zêta des nanofluides [11].

Dans leur étude sur la préparation et la stabilité des nanofluides, Mukherjee et Paria [35] supposent qu'un potentiel zêta limité entre 40 et 60 mV donne une excellente stabilité. Cependant, selon Halelfadl [11], la stabilité est observée lorsque le potentiel à la surface des particules est inférieur à une valeur critique de -30 mV ou supérieur à +30 mV (figure 1.12), car les forces répulsives inter-particules sont prédominantes.



Figure 1. 12: Potentiel zêta d'une solution [11].

Au niveau des nanoparticules, le potentiel électrostatique résultant de la charge de surface subit une variation graduelle au sein d'une région connue sous le nom de double couche électrique. Le modèle le plus largement utilisé pour décrire la structure de cette double couche électrique, appelé modèle Gouy-Chapman-Stern-Grahame, suggère que cette réorganisation conduit à la formation de deux zones distinctes : la couche compacte et la couche diffuse (voir figure 1.11). L'épaisseur de la couche diffuse varie notamment en fonction de la force ionique de la solution et diminue à mesure que la force ionique augmente [11].

• Microscopie Electronique à Transmission MET ou à balayage MEB

La microscopie électronique à transmission ou à balayage offre la possibilité d'examiner des éléments à l'échelle atomique, en mettant l'accent sur leurs dimensions, leurs configurations et leur répartition [11]. Des microscopes à très haute résolution tels que TEM et SEM, connues sous le nom de micrographie électronique sont utilisés pour capturer l'image numérique des nanoparticules [5, 35]. Ces méthodes ne sont généralement pas adaptées à la mesure en conditions réelles de nanoparticules en suspension dans un liquide de base, car les mesures sont habituellement effectuées sur des échantillons préalablement séchés. Toutefois, ces techniques fournissent des données précieuses concernant la structure des nanoparticules et la manière dont elles peuvent s'agencer pour former un réseau [11]. La microscopie électronique cryogénique peut être utilisée dans le même but si la microstructure des nanofluides n'est pas modifiée pendant la cryoaction [11].

Absorbance UV-Visible spectrophotométrie

L'analyse spectrale à l'aide d'un spectrophotomètre UV-visible est une autre méthode utilisée pour évaluer la stabilité des nanofluides. Cette technique quantitative consiste à mesurer l'absorbance d'un milieu en variant la longueur d'onde et en étudiant son évolution dans le temps. L'intensité du rayonnement absorbé dépend de la concentration de la solution ; plus la solution est concentrée, plus l'intensité du rayonnement absorbé est élevée. Cette relation entre la concentration et l'absorbance est décrite par la loi de Beer-Lambert [11].

Dans le cas des nanofluides, la spectrophotométrie UV-visible est utilisée pour évaluer l'état de dispersion des particules ainsi que la présence éventuelle d'agglomérats en se basant sur l'intensité du faisceau absorbé ou transmis [11]. Une absorption élevée indique une dispersion efficace des nanoparticules dans le liquide de base [5]. En effet, la mesure de l'absorbance des suspensions permet de détecter les variations de concentration et de taille des particules au fil du temps.

1.4.4.2. Coefficient de frottement

Du fait de l'application de nanofluides hybrides, en particulier dans les écoulements de fluide, les nanoparticules hybrides avaient tendance à résister à l'écoulement de fluide, ce qui augmentait le coefficient de frottement et réduisait le débit. Madhesh et al. [80] ont étudié les

propriétés rhéologiques de nanoparticules hybrides Cu-TiO₂. Selon les résultats expérimentaux, le coefficient de frottement et la perte de charge ont tous deux augmenté par rapport aux concentrations volumiques. Cependant, on a observé que ces propriétés augmentaient avec le nombre de Reynolds. De plus, une augmentation du le coefficient de frottement et de la chute de pression pourrait être liée aux effets de traînée visqueuse et au gradient de densité de nanoparticules hybrides en suspension dans le fluide de base.

1.4.5. Critère de performance des nanofluides

Comme on a vu précédemment, le coefficient de transfert de chaleur n'est plus une propriété intrinsèque du fluide. Il dépend de la géométrie, du régime d'écoulement (laminaire, turbulent, en développement, complètement développé), des conditions aux limites thermiques (flux de chaleur en surface constant, température de surface constante) et des propriétés thermophysiques du fluide (la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la masse volumique et la viscosité) [42]. L'ajout des nanoparticules dans le fluide assure une augmentation des propriétés thermiques et hydrodynamiques en parallèle [11]. Pratiquement, l'augmentation de la viscosité et la masse volumique dans un circuit hydraulique est défavorable puisqu'elle influence la puissance nécessaire au pompage et donc le bilan énergétique de l'installation [1]. L'évaluation des performances des nanofluides en terme du régime d'écoulement a suscité un grand nombre de recherche dans la littérature, puisque les performances du fluide dépendent essentiellement de régime d'écoulement.

Pour déterminer si l'utilisation de nanofluides en régime laminaire est bénéfique ou non [11], des modèles empiriques ont été développés pour prédire l'évolution linéaire de la conductivité thermique relative et de la viscosité dynamique relative en fonction de la fraction volumique des nanoparticules. Ces modèles empiriques sont applicables indépendamment de la forme, de la taille et de la qualité de la dispersion des nanoparticules dans le liquide de base [11].

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{fb}} = 1 + C_{\lambda}\varphi_V \tag{1.1}$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{fb}} = 1 + C_{\mu}\varphi_{V} \tag{1.2}$$

Où C_{λ} et C_{μ} sont respectivement le coefficient d'amélioration de la conductivité thermique et le coefficient d'amélioration de la viscosité dynamique du nanofluide.

D'après les résultats de la littérature, en régime laminaire établi le nanofluide est plus avantageux si C_{μ} valant $4C_{\lambda}$ (dans le cas d'un tube de section cylindrique). Autrement dit, l'utilisation des nanofluides est favorable si la condition de l'équation (1.3) est vérifiée [11] :

$$\frac{C_{\mu}}{C_{\lambda}} < 4 \tag{1.3}$$

Pour un écoulement en micro-canal à section rectangulaire, la valeur critique devient $3C_{\lambda}$.

En plus de la conductivité thermique et la viscosité dynamique, en régime turbulent le taux de transfert de chaleur dépend aussi de la chaleur thermique massique et de la masse volumique du fluide [11]. Pour pouvoir évaluer l'efficacité d'un nanofluide en régime turbulent, Timofeeva *et al.* [14], Singh *et al.* [43] ainsi que Bergles *et al.* [44] ont utilisé le nombre Mouromtseff. C'est un facteur de mérite défini par la formule de l'équation (1.4):

$$M_0 = \frac{\rho^{0.8} \lambda^{0.67} C_P^{0.33}}{\mu^{0.47}} \tag{1.4}$$

Le nanofluide est considéré avantageux par rapport au fluide de base si la condition de l'équation (1.5) est vérifiée.

$$\frac{M_{0_{nf}}}{M_{0_{fb}}} > 1 \tag{1.5}$$

Plusieurs exemples de calcul du nombre de Mouromtseff d'un certain nombre de nanofluides, montrent une forte dépendance de ce nombre de la température. Les données de la littérature indiquent qu'il existe une plage de température où les nanofluides sont plus performants que les liquides de base, mais aussi des plages de température où l'utilisation d'un nanofluide n'est pas avantageuse. Il semble que le nombre de Mouromtseff soit un critère de comparaison pertinent entre différents nanofluides [14] [43].

Cette première méthode ne permet pas une évaluation précise des avantages offerts par les nanofluides. Cependant, elle peut servir comme étape initiale pour prédire les conditions expérimentales optimales et les concentrations de particules qui pourraient potentiellement conduire à un bilan énergétique favorable. [11].

Haghighi [42] a traité l'idée en terme du nombre de Re. D'après elle, le transfert de chaleur dans le nanofluide peut être comparé à celui de fluide de base avec le même nombre de Reynolds. Pour obtenir le même nombre de Reynolds (Re) dans le nanofluide que dans leurs fluide base (Re_{nf} = Re_{fb}), l'augmentation de la viscosité doit être compensée par une augmentation de la vitesse. Ceci est vu comme suit : au même Re

$$\frac{u_{nf}}{u_{fb}} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{fb}} \times \left(\frac{\rho_{nf}}{\rho_{fb}}\right)^{-1}$$
(1.6)

Comme normalement :

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{fb}} \gg \frac{\rho_{nf}}{\rho_{fb}} \tag{1.7}$$

 $u_{nf} > u_{fb} \tag{1.8}$

Cela signifie que, pour le même nombre de Re, la perte de charge et la puissance de pompage de l'écoulement du nanofluide sont beaucoup plus élevées que celles du fluide de base correspondant. Une telle comparaison ne prend pas en considération le « coût » des pertes de charge accrue (ou de la puissance de pompage). Ainsi, elle peut donner l'impression qu'une simple augmentation de la viscosité (sans augmenter la conductivité thermique) serait favorable au transfert de chaleur. L'amélioration constatée au même nombre de Re doit être comparée au coût en termes d'augmentation de la puissance de pompage. Cette augmentation pourrait tout aussi bien, ou mieux, être utilisée pour augmenter la vitesse du fluide de base, augmentant ainsi le nombre de Reynolds, le nombre de Nusselt et le coefficient de transfert de chaleur. Les comparaisons à nombres de Reynolds égaux – même bien qu'ils dominent dans la littérature- ne permettent pas de séparer l'effet de la vitesse de l'effet des nanoparticules sur le coefficient de transfert de chaleur et peuvent être très trompeuses.

1.5. Comportement thermique

1.5.1. Notion de milieu continu et d'échelle d'observation

Le concept de milieu continu est une approche de modélisation physique qui émerge de notre expérience quotidienne. Sa pertinence dépend des problèmes à résoudre et de l'échelle des phénomènes impliqués. En substance, il suggère que certains problèmes peuvent être traités à une échelle macroscopique en considérant la matière comme un milieu continu, sans remettre en question les modèles de la physique microscopique [45].

L'identification d'un domaine matériel comme un milieu continu ou non dépend de l'échelle d'observation. Par exemple, lorsque l'on regarde de l'air enfermé dans un bocal à une échelle macroscopique, il apparaît comme un milieu continu. A titre d'exemple la mesure de champ de vitesse par un vélocimètre laser donne une vitesse nulle partout, et la pression semble uniforme. Cependant, à une échelle microscopique, l'observateur verrait des molécules se déplaçant de manière chaotique et rapide dans le vide, ce qui est connu sous le nom de mouvement brownien. À cette échelle, la notion de milieu continu disparaît. La vitesse moyenne observée à l'échelle macroscopique est en réalité une moyenne statistique des mouvements browniens. De même, la notion de pression constante dans le bocal perd son sens à l'échelle microscopique. La pression macroscopique que nous mesurons est le résultat statistique moyen de l'impact des mouvements browniens sur la surface du manomètre. Si nous disposions d'un micromanomètre à l'échelle moléculaire, nous mesurerions occasionnellement des impacts, ce qui est très éloigné de la notion de pression constante. La mécanique des milieux continus est un modèle mathématique qui nous permet de "moyenner" cette réalité complexe, nous permettant ainsi de développer un modèle traitable analytiquement ou numériquement [46].

1.5.2. Hypothèse de continuité et modèle du milieu continu

L'hypothèse principale de la mécanique des milieux continus est l'hypothèse de continuité. Elle stipule que les propriétés de la matière (densité, propriétés mécaniques, etc.) sont continues. Ceci implique qu'elles peuvent êtres décrits par des objets mathématiques continus et dérivables (au moins par morceaux) : des champs, et ils dépendront à la fois de l'espace et du temps [47].

Le modèle du milieu continu repose sur l'idée que la matière est composée de particules matérielles ou de volumes élémentaires ayant une dimension caractéristique d. Ces éléments sont considérés comme étant en état local homogène de quasi-équilibre thermodynamique. Cette condition implique que ces éléments sont suffisamment grands pour contenir un nombre significatif d'atomes ou de molécules, de sorte que la notion de quasi-équilibre puisse être définie et comprise du point de vue de la physique statistique [48].

- d >> Λ : échelle des hétérogénéités atomiques ou moléculaires, suffisamment petits pour qu'ils méritent le titre de particules ; (1)
- $d \ll L_c$: échelle des hétérogénéités « macroscopiques » $\simeq 1 cm$.

Dans le cas de liquides simples, $\Lambda \simeq 10$ Å donc (1) est satisfaite si $d \simeq 1 \,\mu m$. Dans le cas de gaz, on introduit la notion de libre parcours moyen des atomes ou molécules, définis comme étant la distance moyenne parcourue par une molécule entre deux chocs successifs (figure 1.13) [49]. Il est donc lié au nombre de molécules dans un volume donné.



Figure 1. 13 : Libre parcours moyen [49].

Pour distinguer les différents régimes de comportement possibles (régime de l'écoulement en termes de continuité spatiale), on introduit en conséquence le nombre de Knudsen, du nom du physicien et océanographe Martin Knudsen (1871 - 1949) [5], dont la définition générale est :

$$Kn = \frac{\Lambda}{L_c} \tag{1.9}$$

Où L_c représente une dimension caractéristique du volume dans lequel sont contenues les molécules et Λ est le libre parcours moyen.



Figure 1. 14 : Régimes d'écoulements en fonction du nombre de Knudsen [49].

Selon les régimes d'écoulements (Figure 1.14), les méthodes numériques de résolution diffèrent :

- Lorsque Kn ≤ 0.001, le régime est considéré comme continu. Dans cette situation, les équations de conservation de la mécanique des milieux continus, accompagnées de leurs conditions aux limites classiques, décrivent le problème ;
- Lorsque 0.001 ≤ Kn ≤ 0.1, le régime demeure continu, mais les équations de conservation doivent être adaptées en modifiant leurs conditions aux limites pour tenir compte du glissement dynamique et des sauts de température aux parois.
- Lorsque le régime devient transitoire avec 0.1 ≤ Kn ≤ 10, ou qu'il atteint le régime de molécules libres avec Kn ≥ 10, l'hypothèse de continuité n'est plus valable. Dans de telles situations, les modèles basés sur les équations de Boltzmann ou les simulations directes utilisant la méthode de Monte Carlo sont plus appropriés pour la description du phénomène [49].

1.5.2.1. Déséquilibre thermique et équilibre thermodynamique local (E.T.L.)

L'équilibre thermique, l'une des conditions essentielles de l'Équilibre Thermodynamique Parfait (E.T.P.), se caractérise par l'isothermie à la température absolue T (*en K*) dans tout le système, ce qui signifie qu'il n'y a pas de flux thermique net à l'intérieur du système [50]. Cependant, en raison des interactions avec le milieu extérieur, de nombreux mécanismes à l'échelle élémentaire tendent à ramener le système vers un état d'équilibre thermique. Ces mécanismes comprennent des collisions molécule-molécule ou molécule-paroi, transitions molécule-photon, interactions phonon-phonon, phonon-électron, électron-photon, phonon-photon et bien d'autres. L'évolution énergétique globale du système résulte de la combinaison à l'échelle macroscopique de ces processus élémentaires de transfert thermique, qui sont responsables des phénomènes de conduction thermique et de rayonnement thermique, ainsi que du transfert de chaleur associé à un éventuel déplacement macroscopique de matière, connu sous le nom de convection [50]. La base de la physique des transferts dans les milieux continus repose sur l'hypothèse de l'équilibre thermodynamique local (E.T.L), qui décrit une situation de faible déséquilibre. En d'autres termes, pendant un intervalle de temps dt et dans un petit élément de volume dV, bien que ces éléments soient très petits à l'échelle macroscopique, le système matériel se trouve très proche d'un état d'équilibre tangent. Cet état d'équilibre est caractérisé par des valeurs bien définies des grandeurs physiques intensives et extensives, telles que la température T(r, t), à chaque point r et à chaque instant t. En pratique, cela signifie que les degrés de liberté internes du système matériel sont suffisamment thermalisés. Un critère simple pour vérifier si les conditions de l'E.T.L. sont valables dans un petit élément de volume dV est que le libre parcours moyen des porteurs responsables de la thermalisation soit beaucoup plus petit que la dimension caractéristique L de cet élément (c'est-à-dire que le nombre de Knudsen soit beaucoup plus petit que 1) [50].

I.5.3. Phénomènes physiques associés au transfert thermique dans les nanofluides hybrides

1.5.3.1. Mouvement brownien

Le mouvement brownien représente le comportement dynamique d'une microparticule immergée dans un fluide [51]. Ce phénomène célèbre est découvert pour la première fois en 1827 par les travaux du botaniste anglais Robert Brown (1773-1858) [51]. En faisant ses études sur des petits grains de pollen en suspension dans l'eau, il a remarqué qu'ils subissent un mouvement continu et irrégulier. Pour valider ses résultats, il a repris ces expériences avec des petites particules minérales, ou il a confirmé que ce phénomène est indépendant d'une particularité des organismes vivants [52]. D'un point de vue physique, le comportement des particules de pollen est le résultat des collisions avec les molécules d'eau qui sont animées d'un mouvement désordonné et continu appelé agitation moléculaire ou thermique (figure 1.22). D'une autre manière on peut dire que le mouvement brownien est le moteur principal du mouvement des particules de faible inertie [53].



Figure 1. 15 : Représentation du mouvement Brownien [51].

Lorsqu'on considère les nanofluides, Le mouvement brownien des nanoparticules aux niveaux moléculaire et nanométrique est considéré comme le principal mécanisme d'amélioration de la conductivité thermique [54]. L'agitation thermique entraîne la dispersion des nanoparticules

dans toutes les directions, ce qui donne lieu à des collisions entre les nanoparticules elles-mêmes ainsi qu'entre les nanoparticules et le liquide environnant. La chaleur transportée par le mouvement des nanoparticules (effet direct) ajoutée à la convection induite par ce mouvement (microconvection dû au mélange fluide autour des nanoparticules) est l'origine de cette amélioration. Ce résultat est prouvé par l'augmentation de la conductivité thermique des nanofluides avec la température (indice du niveau d'agitation au sien des fluides) [54]. La majorité des études présentes dans la littérature des nanofluides concluent que l'effet du mouvement brownien sur l'augmentation de la conductivité thermique est négligeable. Cependant, un grand nombre de travaux affirment qu'il a un effet très marqué sur la conductivité thermique [13]. En utilisant le modèle monophasé dynamique (DSPM), qui pris en considération le mouvement brownien des nanoparticules, Guo et al. [55] ont étudié numériquement les caractéristiques thermiques et hydrauliques de l'écoulement du nanofluide eau/ZnO, d'où une comparaison avec le modèle monophasé statique (SSPM) (mouvement brownien des nanoparticules négligeable). Le modèle monophasé dynamique se traduit mathématiquement par un terme dynamique ajouté au terme statique (modèle de Maxwell) dans la relation de la conductivité thermique. Pour une concentration volumique $\varphi = 3$ %, les résultats montrent que le coefficient de transfert de chaleur pour le modèle dynamique augmente de 4300 à 11470 W / (m²/K), soit 25,6% à 38,3% plus élevés que ceux de l'eau pure, respectivement. De plus le DSPM a des performances de transfert de chaleur supérieures à celles du SSPM, ce qui indique que la prise en compte de l'effet de mouvement brownien peut obtenir des performances de transfert de chaleur bien supérieures.

1.5.3.2. Couche interfaciale

Plusieurs études ont démontré que les phénomènes de surface peuvent jouer un rôle significatif dans l'amélioration de la conductivité thermique, en particulier pour les nanoparticules dont le diamètre est inférieur à 10 nm [56]. À l'interface entre le solide et le liquide, il est connu que les molécules liquides forment des structures en couches ordonnées [54] (figure 1.16), qui ont un comportement plus proche de celui des molécules solides des nanoparticules [1] et une conductivité thermique effective supérieure à celle de la matrice liquide [57]. À la suite de cette observation, il est proposé que les structures en couches qui se forment autour des nanoparticules solient responsables de l'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides.



Figure 1. 16: (a) Nano-couche à l'interface liquide/nanoparticules, (b) Conductivité thermique effective [13].

1.5.3.3. Clustering

La question de l'impact des clusters sur la conductivité thermique des nanofluides suscite un débat dans la littérature scientifique. Les avis sont mitigés, et différentes études ont abouti à des conclusions divergentes. Selon Özerinç [57], la formation de clusters est plus probable dans les nanofluides contenant de petites particules à des concentrations élevées. Plus les particules sont petites en taille et nombreuses, plus elles ont tendance à se rapprocher en raison des forces de Van der Waals, ce qui peut favoriser la formation de clusters [11]. Cependant, des travaux de recherche menés par Hong et al. [58] ainsi que par Karthikeyan et al. [59] ont montré que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la taille des clusters (voir figure 1.17.a). Ces clusters pourraient entraîner divers problèmes tels que l'agglomération des particules, l'abrasion des surfaces, le blocage des canaux capillaires et l'augmentation des pertes de charge.



Figure 1. 17: (a) Schéma représentant le phénomène de clustering. (b) Rapport de conductivité thermique dû à l'augmentation du volume effectif des agglomérats [13].

Il existe également des arguments affirmant que la conductivité thermique pourrait augmenter avec la taille des clusters en raison d'un transfert de chaleur potentiellement plus rapide à travers ces structures [60]. La concentration volumique peut augmenter la fraction volumique effective ϕe de nanofluide en raison du liquide qui pénètre dans l'espace entre les nanoparticules en grappe [54]. Evans *et al.* [61] ont suggéré que l'agglomération peut entraîner un transport rapide de la chaleur sur des distances relativement grandes, car la chaleur peut être conduite beaucoup plus rapide par les particules solides par rapport à la matrice liquide (figure 1.17.b).

La courbe mentionnée dans la figure 1.17.b montre l'amélioration de la conductivité thermique en fonction de la fraction volumique des agglomérats. L'origine de cette amélioration revient au volume effectif des agglomérats possédant une conductivité thermique plus élevée. La diminution de φ impose l'augmentation du volume effectif de l'agglomérat, ce qui améliore la conductivité thermique. Même pour un agglomérat de particules sphériques étroitement compactées, environ 25% du volume (l'espace entre les particules) est rempli de liquide, ce qui augmente le volume effectif de la région à haute conductivité thermique d'environ 30% par rapport à un système de nanoparticules dispersées. Pour les agglomérats peu compactées, l'augmentation du volume effectif sera supérieure à celle des agglomérats très compactées. Quatre positions différentes sont décrites sur cette figure ; (i) arrangement compacté de particules, (ii) arrangement cubique simple, (iii) structure de particules en contact directe compacté d'une façon irrégulière, et (iv) agglomérats de particules séparées par des couches liquides suffisamment minces pour permettre un écoulement thermique rapide entre les particules. Pour augmenter la conductivité thermique, les particules ne doivent pas nécessairement être en contact directe, mais à une distance spécifique, permettant ainsi un flux de chaleur rapide entre elles. En raison du rapport surface/volume plus important, les nanoparticules peuvent être réactives de manière exothermique.

1.5.3.4. Transfert thermique par phonon balistique

La théorie de la conductivité thermique, aux échelles macroscopique et microscopique, repose sur l'hypothèse d'un transport de la chaleur de manière diffusive. Dans les solides cristallins, deux mécanismes principaux sont responsables du transport de chaleur : les phonons (quantités d'énergie de vibration) et les électrons libres, surtout présents dans les métaux. Ces particules de chaleur se déplacent à travers le matériau en suivant des trajectoires aléatoires, et lorsqu'elles entrent en collision entre elles ou avec des défauts de la structure, elles modifient leur trajectoire [62]. Cependant, lorsqu'il s'agit de particules de petite taille, le chemin parcouru par un phonon ou un électron devient relativement court, ce qui, du point de vue statistique, réduit la probabilité de collision. Par conséquent, l'augmentation de la conductivité thermique effective des nanofluides ne peut pas être expliquée par le simple transport diffusif de la chaleur. Le concept du libre

parcours moyen, défini par Debye, s'applique au transport diffusif de la chaleur et représente la distance moyenne que parcourt une particule de chaleur avant de subir une collision :

$$l = \frac{10aT_m}{\gamma T} \tag{1.10}$$

a la constante de réseau, T_m la température de fusion, γ le paramètre de Gruneisen et T la température du matériau.

Il est intéressant de noter que la valeur du libre parcours moyen "*l*" pour une nanoparticule d'alumine " Al₂O₃" est de 35 nm, tandis que le diamètre de la nanoparticule est seulement de 10 nm. Dans de telles conditions, le transport de chaleur selon le modèle diffusif classique devient impossible, car le libre parcours moyen est plus court que le diamètre de la particule. Cela suggère que le transport d'énergie se produit de manière "balistique" plutôt que diffusive, et on parle alors de "phonons balistiques". Il est important de noter que les modèles de calcul de la conductivité thermique classiques, tels que celui développé par Hamilton et Crosser, étaient initialement conçus pour des particules de taille macroscopique et ne prennent pas en compte le fait que le transfert de chaleur puisse se produire de manière balistique dans des nanoparticules de cette taille [13, 63].

1.5.4. Propriétés thermiques

Pour évaluer les performances de tout système thermique fonctionnant avec les nanofluides, des informations précises sur les propriétés thermophysiques sont nécessaires. Ces propriétés dépendent fortement de la concentration volumique des nanoparticules. La quantité de nanoparticules requise pour préparer le nanofluide à une concentration volumique donnée peut être estimée à l'aide de l'équation [64] :

$$\phi = \frac{V_{np}}{V_{np} + V_{fb}} \tag{1.11}$$

Pour déduire les propriétés thermophysiques du nanofluide de manière analytique ou expérimentale, les nanoparticules ont été supposées être uniformément dispersées dans le fluide de base [64]. Cette section a comme but de présenter les modèles théoriques permettant d'estimer les propriétés thermiques (la chaleur spécifique et la conductivité thermique) des nanofluides hybrides qui concordent bien avec les résultats expérimentaux. Les propriétés dynamiques seront détaillées dans la section 1.5.2.

1.5.4.1. Chaleur spécifique

La chaleur spécifique, également connue sous le nom de capacité thermique massique et notée C_p (J/kg.K), représente la quantité d'énergie nécessaire pour augmenter la température d'une unité de masse d'une substance d'un degré Kelvin [11]. Cette grandeur est un élément clé dans l'équation de l'énergie et doit donc être déterminée de manière précise. La plupart des études

effectuées dans la littérature utilise la loi du mélange avec l'hypothèse de l'équilibre thermique entre les nanoparticules et le fluide de base, pour déterminer la chaleur spécifique des nanofluides avec un seul type de nanoparticules [64].

$$c_{p,nf} = \frac{\left[\phi \,\rho_{np} \,c_{p,np} + (1 - \phi) \,\rho_{fb} c_{p,fb}\right]}{\rho_{nf}} \tag{1.12}$$

En utilisant la même logique, la chaleur spécifique d'un nanofluide hybride peut être déduite :

$$c_{p,nfh} = \frac{\left[\phi_{np1}C_{p,np1} + \phi_{np2}C_{p,np2} + (1 - \phi_h)C_{p,fb}\right]}{\rho_{nfh}}$$
(1.13)

1.5.4.2. Conductivité thermique

La conductivité thermique, notée λ (en W/m. K), représente la capacité d'un matériau à conduire et à transmettre la chaleur, et elle revêt une grande importance pour améliorer les performances thermiques d'un fluide caloporteur. La création de nanofluides vise justement à augmenter et à optimiser la conductivité thermique des liquides [11]. Afin de quantifier cette amélioration, divers chercheurs ont tenté de corréler les variations de la conductivité thermique avec plusieurs paramètres physico-chimiques caractérisant les nanofluides, tels que la fraction volumique des nanoparticules (φ), leur taille, la température, la viscosité du fluide caloporteur, etc. À ce jour, aucune loi générale n'a été établie pour expliquer le comportement thermique de chaque type de nanofluides. Cependant, plusieurs modèles théoriques ont été développés en se basant sur des considérations physiques et en prenant en compte les différents modes de transfert thermique possibles, tels que la conduction, la convection et le rayonnement, entre les nanoparticules et le fluide de base [65].

En **1881**, **Maxwell** a été le premier à développer un modèle pour estimer la conductivité thermique d'une suspension contenant des particules. Le modèle de Maxwell s'avère adéquat pour les suspensions renfermant des particules sphériques à des concentrations volumiques relativement faibles, mais il ne prend pas en compte l'influence de la taille ni de la forme des particules. De plus, il néglige les interactions entre les particules [11, 65]. La formule de Maxwell est ainsi formulée [66]:

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{fb}} = \frac{\lambda_{np} + 2\lambda_{fb} - 2\phi(\lambda_{fb} - \lambda_{np})}{\lambda_{np} + 2\lambda_{fb} + \phi(\lambda_{fb} - \lambda_{np})}$$
(1.14)

 λ_{nf} , λ_{fb} , λ_{np} désignent respectivement les conductivités thermiques du nanofluide, du fluide de base et des nanoparticules. Pour un nanofluide hybride ce modèle prend la forme suivante [64, 66]:

$$\frac{\lambda_{nfh}}{\lambda_{fb}} = \frac{\frac{\phi_{np1}\lambda_{np1} + \phi_{np2}\lambda_{np2}}{\phi_{nfh}} + 2\lambda_{fb} + 2(\phi_{np1}\lambda_{np1} + \phi_{np2}\lambda_{np2}) - 2\phi\lambda_{fb}}{\frac{\phi_{np1}\lambda_{np1} + \phi_{np2}\lambda_{np2}}{\phi_{nfh}} + 2\lambda_{fb} - 2(\phi_{np1}\lambda_{np1} + \phi_{np2}\lambda_{np2}) + \phi\lambda_{fb}}$$
(1.15)

Le modèle de *Bruggeman (1935)* complète celui de Maxwell ; c'est un modèle implicite qui permet de prévoir la conductivité thermique des nanofluides contenant des nanoparticules sphériques sans limitation sur la concentration volumique [65, 66]:

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{fb}} = \frac{1}{4} (3\phi - 1)\frac{\lambda_{np}}{\lambda_{fb}} + [2 - 3\phi]\frac{\lambda_{fb}}{4}\sqrt{\Delta}$$
(1.16)

Avec :

$$\Delta = \left[(3\phi - 1)^2 \left(\frac{\lambda_{np}}{\lambda_{fb}} \right)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2) \left(\frac{\lambda_{np}}{\lambda_{fb}} \right) \right]$$
(1.17)

Le modèle de *Hamilton-Crosser*, développé en 1962 et dérivé du modèle de Maxwell, considère la forme des particules. Pour tenir compte de la non-sphéricité des particules, ce modèle intègre un facteur géométrique appelé coefficient de sphéricité, noté Ψ , qui reflète la géométrie de la particule par rapport à une sphère de même volume. Plus précisément, ce coefficient est défini comme le rapport de l'aire d'une sphère ayant le même volume que la particule sur l'aire de la particule elle-même [11, 65, 66].

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{fb}} = \frac{\lambda_{np} + (n-1)\lambda_{fb} - (n-1)(\lambda_{fb} - \lambda_{np})\phi}{\lambda_{np} + (n-1)\lambda_{fb} + (n-1)(\lambda_{fb} - \lambda_{np})\phi}$$
(1.18)

n est un facteur de forme empirique donné par : $n = \frac{3}{\Psi}$. Quand n = 3 on retrouve le cas des particules sphériques et du modèle de Maxwell. Le cas n = 6 correspond à des particules cylindriques.

D'autre modèles théoriques décrivant la conductivité thermique des nanofluides présent dans la littérature, sont résumés dans le tableau ci-dessous [66] :

Modèles	Corrélation	Information complémentaires
Wasp (1977)	$\lambda_{eff} = rac{\lambda_p + 2\lambda_f + 2\phi(\lambda_p - \lambda_f)}{\lambda + 2\lambda_f - \phi(\lambda_p + \lambda_f)}\lambda_f$	Le modèle de Hamilton-Crosser pour $n = 3$
Davis (1986)	$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_f} = 1 + \frac{3(k-1)}{(k-2) - \phi(k-1)} [\phi + f(k)\phi^2 + 0\phi^3]$	k = 10, f(k) = 2.5 $k = \infty, f(k) = 0.5$
Lu and Lin (1996)	$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_f} = 1 + a\phi + b\phi^2$	Particules sphériques et non sphériques k = 10: a = 2.25, b = 2.27. $k = \infty: a = 3.00,$ b = 4.51.

Bhattacharya et al (2004)	$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_f} = \frac{\lambda_{np}}{\lambda_{fb}}\phi + (1-\phi)$ $\lambda_{np} = \frac{1}{k_B T^2 V} \sum_{j=0}^n (Q(0)Q(j\Delta T))\Delta T$	Dynamique brownienne
Koo and Kleinstreuer (2004,	$\lambda_{eff} = \frac{\lambda_{np} + 2\lambda_{fb} + 2\phi(\lambda_{np} - \lambda_{bf})}{\lambda_{np} + 2\lambda_{fb} - \phi(\lambda_{np} - \lambda_{fb})} + 5$ $\times 10^4 \beta \rho_p c_p \sqrt{\frac{k_B T}{\rho_p d_p}} f(T, \phi)$ $f(T, \phi) = (-134.63 + 1722.3\phi)$	CuO/éthylène glycol CuO/huile Liquide environnant Considéré
(2005)	$\beta = \begin{cases} 0.0137(100\phi)^{-0.8229}\phi < 0.01\\ 0.0011(100\phi)^{-0.7272}\phi > 0.01 \end{cases}$	Mouvement aléatoire des nanoparticules
Prasher et al (2005)	$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_{fb}} = (1 + ARe^m Pr^{0.333}\phi) \left(\frac{\lambda_{np} + 2\lambda_{fb} + 2\phi(\lambda_{np} - \lambda_{fb})}{\lambda_{np} + 2\lambda_{fb} - \phi(\lambda_{np} - \lambda_{fb})}\right)$	Effet de la convection du liquide à proximité de la particule incluse A et m sont des constants
Xue (2005)	$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_{fb}} = \frac{1 - \phi + 2\phi \frac{\lambda_{np}}{\lambda_{np} - \lambda_{bf}} ln \frac{\lambda_{np} + \lambda_{fb}}{2\lambda_{fb}}}{1 - \phi + 2\phi \frac{\lambda_{fb}}{\lambda_{np} - \lambda_{fb}} ln \frac{\lambda_{np} + \lambda_{fb}}{2\lambda_{fb}}}$	Nanosphères avec couche interfaciale

Tableau 2.1 : Autres modèle de la conductivité thermique des nanofluides [66].

1.5.4.3. Paramètres influençant la conductivité thermique des nanofluides hybrides

• Concentration volumique des nanoparticules

Le paramètre principal susceptible d'affecter fortement la conductivité thermique du nanofluide est la concentration ou la fraction volumique des nanoparticules. Ce paramètre a été étudié dans presque toutes les études expérimentales et les résultats obtenus sont généralement concordants sur le plan qualitatif. La plupart des chercheurs ont signalé une augmentation linéaire de la conductivité thermique avec l'augmentation de la concentration volumique. Cependant, certaines études indiquent un comportement non linéaire [57].

• Température

A cause de la dépendance de la conductivité thermique des deux phases de la température dans les suspensions solide-liquide conventionnels, la conductivité thermique du mélange dépend uniquement de la température. Concernant les nanofluides, les variations de température affectent directement le mouvement brownien et l'agglomération des nanoparticules d'où un effet non négligeable sur la conductivité thermique.

$$D_b = \frac{\lambda_p T}{3\pi\mu d_p} 10^9 \tag{1.19}$$

Selon la formule du coefficient de diffusion brownien [57], lorsque la température augmente, le mouvement brownien de la nanoparticule augmente et, par conséquent, la conductivité thermique augmente. Ce résultat est validé dans de nombreuses études expérimentales [64].

L'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température pour plusieurs nanofluides présente une augmentation significative par rapport à l'augmentation naturelle observée pour les liquides porteurs. Cette particularité peut s'avérer très bénéfique dans un circuit de refroidissement où la température du fluide augmente progressivement. Avec une conductivité thermique améliorée, le processus de refroidissement devient plus efficace, notamment dans les zones soumises à des températures élevées. Par conséquent, nous émettons des réserves quant à l'efficacité d'un nanofluide dans un circuit de refroidissement à basse température. Dans l'ensemble, les propriétés thermophysiques d'un nanofluide à des températures élevées sont plus avantageuses pour le transfert de chaleur [1].



Figure 1. 18: Caractéristique de conductivité thermique des nanofluides hybrides MWCNT-Fe₃O₄ [67].

• Nature du matériau des nanoparticules

La nature du matériau des nanoparticules est un facteur critique en ce qui concerne la conductivité thermique des nanofluides hybrides. Pour un fluide de base déterminé, l'effet de la nature des nanoparticules sur la conductivité thermique de la suspension est très marqué [13]. Il est prévu que l'utilisation des nanoparticules de conductivité thermique élevé conduit à un nanofluide de conductivité thermique plus élevée [57]. La comparaison des conductivités thermiques obtenues avec des nanofluides à base de nanoparticules métalliques, oxydées et non oxydées, montre que l'amélioration est plus importante avec des nanoparticules non oxydées à cause de leurs taille réduite par rapport au nanoparticules oxydées. Lors de l'oxydation, l'oxygène

réagit avec le métal et augmente la taille de la particule d'environ 50%. Par exemple le rayon atomique du cuivre (Cu) est de 140 pm et passe à 200 pm dans sa forme oxydée (CuO). En hybridant les nanoparticules de conductivité thermique élevée avec des nanoparticules inertes chimiquement, on favorisera la conductivité thermique effective du nanofluide hybride, qui peut être le paramètre déterminant pour améliorer le taux de transfert de chaleur [64].



Figure 1. 19: Comparaison de la conductivité thermique du nanofluide eau/TiO₂ et son hybride eau/Ag-TiO₂ en fonction de la concentration volumique de TiO₂ [68].

• Taille des nanoparticules

D'après la littérature, il y'en a une forte dépendance entre la taille des nanoparticules et la conductivité thermique des nanofluides hybrides. Un grand nombre d'études expérimentales, montre que la diminution de la taille des nanoparticules augmente la conductivité thermique des nanofluides [69]. L'interprétation physique de ces remarques fait référence au mouvement brownien des nanoparticules : lorsque la taille des particules diminue, celles-ci se déplacent plus rapidement et par conséquent, le mouvement colloïdal augmente, ce qui est responsable de l'amélioration du transport d'énergie dans le milieu liquide [64]. Cette relation peut être traitée en terme du coefficient de diffusion brownien qui augmente en réduisant la taille des particules ; plus les particules sont petites plus la probabilité de collision entre elles augmente et meilleure est la conductivité thermique [1]. En plus du mouvement brownien, d'autres travaux rendent l'augmentation de la conductivité thermique avec la diminution de la taille des nanoparticules au mécanisme de la couche interfaciale solide-liquide, D'autres études prétendent une relation linéaire entre la conductivité thermique et la taille des nanoparticules ; plus les nanoparticules sont petites plus la probabilité de collision de la taille des nanoparticules au mécanisme de la couche interfaciale solide-liquide, D'autres études prétendent une relation linéaire entre la conductivité thermique et la taille des nanoparticules ; plus les nanoparticules sont grandes plus la conductivité thermique augmente. Özerinç [57] explique cela par l'effet du phénomène d'agglomération ; plus les nanoparticules sont petites plus cet effet est important.

• Forme des nanoparticules

Dans le domaine des nanofluides, les résultats présents dans la littérature montrent que l'amélioration de la conductivité thermique est très influencée par la forme des nanoparticules. Les nanoparticules utilisées généralement sont de forme sphérique ou cylindrique. Un grand nombre d'étude montre que les nanoparticules de forme cylindrique améliorent la conductivité thermique mieux que la forme sphérique. Ceci est dû à la longueur des nanotubes qui est de l'ordre du micromètre généralement. Une telle caractéristique offre la rapidité de transport de chaleur le long du nanotube [13]. Cependant, il faut noter que les nanofluides avec des nanoparticules cylindriques se caractérisent par une gamme de viscosité dynamique assez large par rapport au nanoparticules sphériques. Par conséquent, l'énergie de pompage associée à ce type de nanofluides est plus grande et elle affecte son utilisation.

• Ph du fluide

Des travaux de la littérature montrent que le nombre des études sur l'effet du pH sur la conductivité thermique des nanofluides est limité. Cependant, le pH est un facteur très important qui affecte la conductivité thermique des nanofluides [13]. Quand une particule d'oxyde métallique entre en contact avec de l'eau, un radical hydroxyle (OH-) s'est formé à la surface.



Figure 1. 20: Effets du pH sur la conductivité thermique de nanosuspensions eau-Al₂O₃ et eau Cu avec des dispersants SDBS (dodécylbenzène sulfonate de sodium) [70].

L'interaction entre l'eau et la particule dépend du pH de l'eau. La surface de la particule a une charge positive sous forme d'ion hydrogène (H⁺) dans l'eau acide pour se combiner avec un radical hydroxyle (OH⁻) ; dans l'eau alcaline, il présente une charge négative due à l'élimination des ions hydrogène. À une certaine valeur de pH, le mélange de particules et d'eau atteint un point où le nombre d'ions positifs et les ions négatifs sont égaux. Cet état du mélange est appelé point isoélectrique. Ce point dépend du type de nanoparticules d'oxyde métallique utilisées [13]. Les forces de répulsion électrostatiques des nanoparticules dépendent de la valeur du pH du nanofluide. Lorsque la valeur s'éloigne du point statique isoélectrique, les forces de répulsion augmentent, ce qui augmente la stabilité ainsi que la conductivité thermique [64].

Wang *et al.* [70] ont étudié la relation entre les rapports de conductivité thermique et les valeurs du pH des nanofluides eau/CuO et eau/Al₂O₃ (figure 1.20). Pour les faibles valeurs du pH $(pH_{Al_2O_3} < 7:5, pH_{cu} < 9:0)$, le rapport de conductivité thermique augmente lorsque le pH augmente pour tous les valeurs de concentration volumique φ , tandis qu'aux valeurs du pH plus élevé $(pH_{Al_2O_3} > 8:0, pH_{cu} > 9:5)$, le rapport de conductivité thermique diminue avec le pH pour toutes les valeurs de concentration volumique φ , comme le montre la Figure (1.20) [13].

• Fluide de base

La conductivité thermique du fluide de base affecte également l'amélioration du transfert de chaleur des nanofluides. Selon les modèles de conductivité thermique classiques tels que le modèle de Maxwell, lorsque la conductivité thermique d'un mélange diminue, le rapport de conductivité thermique (conductivité thermique du nanofluide λ_{nf} divisé par la conductivité thermique du fluide de base λ_f) augmente [9, 57]. En ce qui concerne les nanofluides, la situation est plus compliquée du fait que la viscosité du fluide de base affecte le mouvement brownien des nanoparticules et, à son tour, la conductivité thermique du nanofluide. Les résultats théoriques montrent que la conductivité thermique effective est presque indépendante de la conductivité thermique du fluide de base. Cependant, il faut noter que plusieurs résultats expérimentaux confirment ceux obtenu par le modèle de Maxwell qualitativement [57]. Il a été observé que le rapport de conductivité thermique diminuait avec l'augmentation de la conductivité thermique du fluide de base.

De plus, Lee [72] a examiné l'effet de la formation d'une double couche électrique autour de nanoparticules sur la conductivité thermique de nanofluides et a montré que la conductivité thermique et l'épaisseur de la couche dépendaient du fluide de base. Il est difficile de conclure sur l'effet quantitatif du fluide de base sur l'amélioration de la conductivité thermique, en raison des contradictions et du nombre réduit d'études [13, 57].



53

Figure 1. 21: Effet du fluide de base sur la conductivité thermique ; (a) éthylène glycol, (b) eau

1.6. Comportement hydrodynamique

1.6.1. Comportement rhéologique des nanofluides

Le comportement d'une suspension est gouverné par une multitude d'interactions, tant entre les particules elles-mêmes qu'entre les particules et le fluide environnant. Ces interactions incluent des forces hydrodynamiques, des forces électrostatiques attractives et répulsives, ainsi que des effets capillaires entre les particules. Il est important de noter que ces interactions au niveau microscopique ont des répercussions significatives à l'échelle macroscopique. Elles influent sur le mouvement relatif des particules par rapport au liquide, favorisant ainsi leur diffusion dans la suspension. Parallèlement, ces interactions peuvent entraîner l'agrégation des particules, leur arrangement en agglomérats, voire la sédimentation et la séparation des phases. Dans le cadre de cette étude, nous nous concentrerons principalement sur les interactions hydrodynamiques.

Dans une suspension, lorsque des particules se déplacent à une vitesse relative u_{rel} par rapport au liquide, elles induisent un flux de liquide autour d'elles. Cela crée une force de traînée qui s'oppose au mouvement des particules. Dans ce contexte, étant donné que les dimensions caractéristiques sont généralement petites, les nombres de Reynolds (*Re*) associés à ces écoulements restent dans la plage des écoulements laminaires.

$$Re = \frac{2a\rho u_{rel}}{\mu} \tag{1.20}$$

Où μ est la viscosité dynamique du milieu, *a* la dimension caractéristique de l'écoulement (à savoir le rayon de la particule) et ρ la masse volumique du liquide. Pour ordre de grandeur, on a $Re \approx$ 0,01 pour une particule de 10 μm évoluant à 1 mm/s dans de l'eau [73].



Figure 1. 22 : Sphère plongée dans un liquide visqueux, animée d'une vitesse u_{rel} et soumise à une force de traînée (lignes de courant obtenues par simulation sur le logiciel Comsol) [73].

La déformation des lignes de courant provoquée dans ce liquide par la présence de la particule a pour conséquence l'existence d'une force de traînée ralentissant la sphère [73].

$$F_{T \, sph} = 6\pi\mu a u_{rel} \tag{1.21}$$

Dans un écoulement fortement laminaire, les forces d'inertie peuvent être négligées par rapport aux forces visqueuses. Cela simplifie les équations de Navier-Stokes, les ramenant aux équations de Stokes. De plus, à une certaine distance, qui est approximativement égale au diamètre de la sphère, l'écoulement n'est plus perturbé par la sphère(figure 1.22). Par conséquent, on peut considérer que l'ordre de grandeur du gradient de vitesse, également appelé taux de cisaillement $\dot{\gamma}$, est égal au rapport entre la vitesse de la particule et son diamètre [73].

$$\dot{\gamma} = \frac{u_{rel}}{2a} \ et \ F_{T \ sph} = 12\pi\mu a^2 \dot{\gamma} \tag{1.22}$$

On définit également le temps caractéristique de cisaillement t_c tel que :

$$t_c = \frac{1}{\dot{\gamma}} = \frac{2a}{u_{rel}} \tag{1.23}$$

Ce temps correspond au temps mis par deux particules distantes de 2a et situées sur deux proches lignes de courant pour se rapprocher (figure I.23).



Figure 1. 23: Temps de cisaillement.

Les particules subissent également l'influence de la gravité et de la poussée d'Archimède. Plus les particules sont grandes et plus leur densité est élevée par rapport au liquide, plus l'effet de sédimentation est rapide. Un phénomène de vieillissement courant dans les suspensions consiste en une phase d'agrégation des particules, suivie d'une sédimentation de ces agrégats (voir figure 1.24) [73].



Figure 1. 24: Processus d'agrégation/sédimentation [73].

Supposons une suspension de particules sphériques ayant un volume V_p , une masse m_p , et une masse volumique ρ_s . Chaque particule est soumise à des forces visqueuses, à son propre poids, ainsi qu'à la poussée d'Archimède. En projetant les forces sur l'axe z (dirigé en sens inverse du vecteur de l'accélération due à la pesanteur, \vec{g}), et en négligeant l'effet brownien, nous pouvons écrire le principe fondamental de la dynamique comme suit :

$$m_p \frac{du_{rel}}{dt} = \rho_s g V_s - \rho_l g V_p - 6a\pi \mu u_{rel}$$
(1.24)

La résolution de cette équation aboutit à l'obtention d'une vitesse limite v_{Stokes} appelée vitesse de Stokes et au temps de sédimentation t_s correspondant au temps mis par une particule descendant à la vitesse V_{Stokes} pour parcourir une distance égale à son rayon sous l'effet de la pesanteur :

$$t_{s} = \frac{a}{v_{s}} = \frac{9\mu}{2(\rho_{s} - \rho_{l})ga}$$
(1.25)

Pour des particules de taille suffisamment réduite, l'agitation thermique devient un facteur prépondérant qui prévient la sédimentation. Cette agitation se manifeste par un mouvement aléatoire des particules et des molécules, qui augmente avec la température. Toutefois, ce mouvement est soumis à une limitation due à la viscosité du liquide porteur, comme c'est le cas pour tout mouvement au sein d'un liquide. Cette limitation devient d'autant plus significative lorsque les particules sont de petite taille, et elle favorise la diffusion spontanée des particules dans toute la suspension. Le coefficient de diffusion des particules dans la suspension, exprimé en (m²/s), peut être calculé en utilisant la formule de Stokes-Einstein :

$$D_p = \frac{k_b T}{6\pi\mu a} \tag{1.26}$$

Avec k_b la constante de Boltzmann et T la température absolue. Pour une particule de 10 μm dans de l'eau à 20 °C, il vaut 2. $10^{-14} m^2/s$. On définit également le temps t_d mis par une particule pour se déplacer d'une distance a par agitation brownienne.

$$t_d = \frac{a^2}{D_p} \tag{1.27}$$

Pour déterminer la taille critique ou limite colloïdale a_c des particules en deçà de laquelle, on ne peut pas obtenir de séparation de phase par sédimentation du fait de l'agitation thermique, on doit avoir égalité entre t_s et t_d .

$$a_{c} = \left(\frac{3k_{b}T}{4\pi(\rho_{s} - \rho_{l})g}\right)^{1/4}$$
(1.28)

Pour comparer les effets browniens aux effets hydrodynamiques, on définit le nombre de Peclet en effectuant le rapport entre le temps de déplacement d'une particule par diffusion et celui par cisaillement.

$$Pe = \frac{t_d}{t_c} = \frac{6\pi\mu a^3\dot{\gamma}}{k_b T}$$
(1.29)

Pour $t_d > t_c$, on a Pe > 1 ce qui signifie que les effets hydrodynamiques l'emportent sur les interactions browniennes. La convection est le mouvement de transport dominant. Typiquement, pour $a = 1 \ \mu m$, la transition $Pe \approx 1$ est franchie pour $\dot{\gamma} = 0.01 \ s^{-1}$ [73].

1.6.2. Propriétés physiques des nanofluides

1.6.2.1. Masse volumique

La masse volumique des nanofluides est directement liée à la fraction volumique des particules, et elle augmente en conséquence avec l'ajout de nanoparticules. En l'absence de données expérimentales, la masse volumique des nanofluides est fréquemment estimée en utilisant la loi de mélange, qui suppose une distribution homogène des nanoparticules dans le fluide de base [1].

$$\rho_{nf} = \phi \rho_{np} + (1 - \phi) \rho_{fb} \tag{1.30}$$

1.6.2.2. Viscosité dynamique

L'application d'un nanofluide dans un système d'écoulement de fluide nécessite une connaissance des propriétés d'écoulement du fluide, en particulier de sa viscosité. Par conséquent, les chercheurs ont commencé des recherches sur la viscosité des nanofluides afin de calculer la puissance de pompage requise pour les applications de nanofluides dans les échangeurs de chaleur [74, 75]. Bien que, comparé aux études sur la conductivité thermique, le volume d'études menées sur la viscosité ait été beaucoup plus faible ; mais récemment, en ce qui concerne l'importance du paramètre coût-efficacité de l'utilisation des nanofluides, les études sur la viscosité ont augmenté parallèlement à celles sur la conductivité thermique [76].

La viscosité caractérise l'aptitude d'un fluide à s'écouler [11, 77]. C'est un paramètre important et sa connaissance est fondamentale pour les applications pratiques car elle affecte directement la chute de pression en convection forcée [57]. L'ajout des nanoparticules permet d'augmenter et d'améliorer la conductivité thermique du nanofluide mais cela peut aussi conduire à une augmentation défavorable de la viscosité dynamique [11]. Par conséquent, pour permettre l'utilisation de nanofluides dans des applications pratiques, il convient d'étudier de manière approfondie l'augmentation de la viscosité des nanofluides par rapport aux fluides purs [57]. Il existe également de nombreuses disparités de mesure et incohérences entre les données expérimentales sur la viscosité des nanofluides [78]. Même pour un type de nanofluide, la viscosité obtenue à partir des mesures de différents chercheurs est très différente l'une de l'autre, ce qui sera abordé dans les sections suivantes. Cependant, cette incohérence et cette disparité dans les résultats peuvent être dues à différents problèmes, par exemple, l'application de différents degrés de pureté de taille et de nanoparticules, d'appareils de mesure ou de géométrie respective, la plage de taux de cisaillement, l'échelle d'accumulation, la disparité et la préparation des échantillons et des matériaux [76].

De nombreuses recherches tant théoriques qu'expérimentales ont été entreprises pour évaluer ou mesurer la viscosité dynamique des nanofluides et pour déterminer l'impact des principaux paramètres qui la modifient [77]. Dans la suite, on s'intéresse aux modèles théoriques les plus utilisés dans le cas des nanofluides, développés spécialement pour prédire l'évolution de la viscosité dynamique des suspensions sous certaines conditions (nature des nanoparticules, diamètre, gamme de température, ...).

L'étude d'*Einstein* en *1906* a marqué une avancée significative dans la compréhension de l'évolution de la viscosité des suspensions diluées en fonction de la fraction volumique de solides. En se basant sur l'idée que l'énergie est linéairement liée à la viscosité, Einstein a calculé l'énergie

dissipée autour d'une unique particule sphérique et rigide se déplaçant dans un fluide en considérant le travail nécessaire pour déplacer cette particule par rapport au fluide. À partir de ces calculs, Einstein a formulé une relation simple qui était valable uniquement pour les suspensions très diluées $\varphi \leq 0.02$ [65]:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{fb}} = (1 + 2.5\phi) \tag{1.31}$$

Le modèle de *Brinkman (1952)* complète celui d'Einstein jusqu'à une concentration volumique inférieure à 4% [65].

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{fb}} = \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}} \tag{1.32}$$

La relation décrit une évolution non linéaire de la viscosité dynamique avec la concentration volumique mais ne tient pas compte de la collision entre les particules. En effet, l'écoulement autour de chaque particule est influencé par la présence éventuelle d'autres particules à proximité et par les collisions entre particules [57].

Afin de prendre en considération l'effet de la présence éventuelle d'autres particules à proximité et les collisions entre particules sur l'écoulement, *Batchelor (1976)* a traduit cet effet par la prise en compte d'un terme ϕ^2 , [57].

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} (1 + 2.5 \phi + 6.2 \phi^2 + \cdots)$$
(1.33)

1.7. Conclusion

Après une étude théorique détaillée sur le comportement dynamique et thermique des nanofluides et des nanofluides hybrides, le prochain chapitre sera consacré à la modélisation mathématique de l'écoulement et du transfert de chaleur au sein des nanofluides hybrides. Le cadre mathématique de ces phénomènes sera basé sur l'approche monophasique. Il s'agit d'une étape très importante visant à simplifier la compréhension de la modélisation mathématique du problème d'étude dans la deuxième partie du chapitre 2.

CHAPITRE 2. FORMULATION MATHEMATIQUE

Chapitre 2 : Formulation mathématique

2.1. Introduction

Dans les simulations CFD (Computational Fluid Dynamics) pour toutes sortes de fluides, les pincipes de conservation sont toujours la base la plus importante pour décrire le comportement des fluides. Pour les simulations de fluides monophasiques (tels que l'eau pure et l'air) ou de mélanges uniformes (tels que les nanofluides avec une approche monophasique), les équations de conservation consistent généralement en un ensemble d'équations de continuité, d'équation de quantité de mouvement et d'équation d'énergie. Dans le cadre de ce travail, nous n'étudierons le comportement dynamique et thermique du nanofluide hybride eau/Ag-ZnO dans un éspace annulaire incliné soumis à des rayonnements solaires. La première partie du chapitre est consacrée à une étude bibliographique sur les transferts thermiques des nanofluides s'écoulant dans des conduites annulaires horizantale. Afin de modéliser ce problème mathématiquement, ce chapitre s'intéresse en premier lieu a la présentation des différentes approches utilisées géneralement pour la modélisation des écoulemts et transferts thermiques dans les nanofluides. En choisisant l'approche monophasique pour la simulation de notre problème, on s'interessera dans la 3^{ème} partie du chapitre à la présentation et la démonstration des équations de conservations (conservation de masse, conservation de quantité de mouvement et conservation de l'énergie). Le problème étudié sera détaillé à la fin du chapitre en donnant les différentes hypothèses adoptées et le modèle mathématique (équations de conservation et conditions aux limites) sous forme adimendionnelle. Comme il y'aura de nouvelles expressions développées dans cette étude, pour calculer la viscosité dynamique et la conductivité thermique du nanofluides eau/ZnO et son hybride eau/Ag-ZnO, une comparaison entre les expressions développées et les données experimentales sera donnée dans cette dernière partie du chapitre.

2.2. Recherche bibliographique : Transfert thermique à travers les écoulements annulaires horizontales

Le transfert de chaleur par convection issu de l'écoulement annulaire horizontal des nanofluides est un problème particulièrement intéressant. Son importance technique considérable est due à sa capacité de transfert de chaleur des surfaces internes et externes, qui peuvent transférer la chaleur indépendamment. Il s'agit d'une géométrie commune et essentielle pour les dispositifs d'écoulement de fluide et de transfert de chaleur. L'écoulement annulaire a également de nombreuses applications d'ingénierie telles que l'échangeur de chaleur, les turbines à gaz, les réacteurs nucléaires, les turbomachines, les systèmes de stockage thermique, les systèmes d'énergie solaire... [2]. Par conséquent, de nombreuses études ont été effectuées sur les

caractéristiques de transfert de chaleur entre deux tubes concentriques. Avec une meilleure compréhension du champ d'écoulement, il est possible de concevoir des méthodes d'amélioration du transfert de chaleur.

Abu-Nada et al. [79] ont étudié le transfert de chaleur dans un écoulement annulaire horizontale en utilisant des nanofluides à base d'eau. Plusieurs types de nanoparticules métallique (Cu, Ag) et céramiques (Al_2O_3, TiO_2) pour différentes valeurs de la concentration volumiques ont été utilisé. Cette étude était basée sur la résolution des équations de Navier-Stokes et l'équation de l'énergie avec la méthode des volumes finis. L'étude est basée sur la variation de trois paramètres principaux : la concentration volumique des nanoparticules ($0 \le \phi \le 0.1$), le nombre de Ra $(10^3 \le Ra \le 10^5)$ et le rapport *L/D* $(0.2 \le \frac{L}{D} \le 0.8)$. Les résultats obtenus montrent une amélioration du transfert thermique en utilisant les nanoparticules métalliques même à faible nombre de Ra. Ainsi, l'addition des nanoparticules d'Al₂O₃ a augmenté le nombre de Nu tout au long de la paroi du cylindre interne. Cependant, pour des valeurs intermédiaires du nombre de Ra, les nanoparticules céramiques (Al₂O₃, TiO₂) entraînent une réduction du transfert de chaleur, particulièrement pour L/D = 0.4. Pour les valeurs élevées du nombre de Ra et du rapport L/D, les nanoparticules métalliques (Cu, Ag) ont amélioré considérablement les caractéristiques de transfert de chaleur. Dans une étude similaire, Abu-Nada [80] a orienté son attention vers l'étude du transfert de chaleur dans un écoulement annulaire du nanofluide eau/Al_2O_3 . Dans cette étude, le but était de développer d'autre corrélations pour estimer la conductivité thermique et la viscosité dynamique, en se basant sur le modèle de Chon et al et les résultats expérimentaux de Nguyen et *al* respectivement. En faisant varier le nombre de Ra entre 10³ et 10⁵, la fraction volumique entre 0% et 9% et le rapport d'aspect L/D entre 0.2 et 0.8, la résolution des équations gouvernante le problème par volumes finis a montré que la relation entre la concentration volumique et le nombre de Nu moyen est inversement proportionnelle pour $Ra \ge 10^4$ et $\phi > 5\%$. Cependant, des fluctuations du nombre de Nusselt sont constatée pour $\phi \leq 5\%$. Pour $Ra = 10^3$, l'augmentation de la concentration volumique a entrainé une augmentation du nombre de Nu moyen. D'une manière générale, pour $Ra \ge 10^4$, les résultats montrent la réduction du nombre de Nusselt locale autour de la surface du cylindre, en particulier pour les valeurs élevées du rapport L/D. La comparaison entre les modèles de Maxwell Garnett [81] et Chon et al [82] a montré une légère différence en terme de conductivité thermique pour $Ra \ge 10^4$. Pour $Ra = 10^3$, la comparaison montre une petite déviation qui devient plus importante pour les valeurs élevées de la concentration volumique. Les données de Nguyen et le modèle de Brinkman donnent des prévisions complètement différentes pour $Ra \ge 10^4$, où la différence du nombre de Nusselt pourrait dépasser 30%. Dans une autre étude, Shahi et al. [83] ont traité le problème de transfert de chaleur par convection naturelle associé à l'écoulement annulaire verticale du nanofluide *eau/CuO*. Une source de chaleur interne de forme cylindrique solide est utilisée. L'étude est réalisée pour différentes valeurs d'angle d'inclinaison. Les équations qui régissent le problème ont été résolus en utilisant la méthode des volumes finis.



Figure 2.1 : Schéma de l'espace annulaire incliné [83].

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que le nombre de Nusselt moyen augmente avec la concentration volumique des nanoparticules. Cependant, la température moyenne a montré un comportement inverse. Les résultats ont montré aussi que de l'effet la concentration volumique sur le nombre de Nusselt moyen est considérable pour les grandes valeurs du nombre de Ra. Considérant l'effet de l'angle d'inclinaison, les résultats ont montré que le nombre de Nu moyen a pris des valeurs maximales tandis que la valeur de la température a pris des valeurs minimales pour $\gamma = 0^{\circ}$. Sultan [84] a réalisé une étude théorique du transfert de chaleur par convection mixte issue de l'écoulement laminaire d'un nanofluide dans la région totalement développée, en considérant une géométrie annulaire horizontal et incliné. L'effet du nombre de Ra ainsi que la concentration volumique des nanoparticules sont pris en considération dans cette étude. En faisant varier le nombre de Ra (10³, 10⁵ et 10⁶) et la concentration volumique des nanoparticules ϕ (0.5%, 2% et 4%), les résultats obtenus ont montré que l'écoulement secondaire créé par la convection naturelle avait un effet significatif sur le processus de transfert de chaleur. L'augmentation du nombre de Ra pour une valeur déterminée de la concentration volumique entraine une augmentation du nombre de Nusselt ainsi, l'augmentation de la concentration volumique pour une valeur déterminée du nombre de *Ra* entraine l'augmentation du nombre de Nusselt. L'effet de la concentration des nanoparticules sur l'écoulement secondaire, la vitesse axiale et le coefficient de frottement moyen est négligeable. Ainsi, le coefficient de frottement augmente avec l'inclinaison de la conduite. L'effet du type des nanoparticules sur les performances des nanofluides est un facteur de grande utilité. L'étude a montré que les nanoparticules métalliques, en raison d'une

conductivité thermique plus élevée, donnent un transfert de chaleur mieux que les nanoparticules non métalliques. *Izadi et al.* [85] ont étudié numériquement un problème de convection mixte issue de la circulation du nanofluide eau/Al_2O_3 dans un espace annulaire. Ce travail porte essentiellement sur l'étude approfondie de l'effet de la fraction volumique des nanoparticules et le nombre de Ri sur les paramètres thermiques et hydrodynamiques. L'ensemble des équations régissantes le problème, y compris les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie, a été discrétisé par volumes finis.



Figure 2. 2 : Schéma du problème et distributions des éléments du maillage dans une sections transversale [85].

Les résultats montrent que la vitesse adimensionnelle est légèrement augmentée du côté supérieur de l'espace annulaire et est diminuée du côté inférieur par rapport aux variations de la concentration volumique. L'effet du nombre de Ri est faible sur le coefficient de frottement et considérable sur le coefficient de transfert convectif. En plus, l'augmentation de la concentration volumique favorise les écoulements secondaires ainsi que le coefficient de transfert convectif. Ce dernier a atteint des valeurs maximales. Dawood et al. [86] ont réalisé la simulation numérique du transfert de chaleur par convection mixte laminaire dans un écoulement annulaire de section elliptique. En utilisant l'eau comme fluide de base, quatre types de nanoparticules : Al₂O₃, CuO, SiO₂ et ZnO, de différentes tailles (20 nm, 40 nm, 60 nm et 80 nm) et fractions volumiques allant de 0% à 4% ont été utilisés. Parlant de l'effet de la concentration volumique et la taille des nanoparticules, le nombre de Nu augmente avec la concentration volumique et le nombre de Re et diminue avec l'augmentation du diamètre des nanoparticules. Les résultats ont révélé aussi que les valeurs maximales du nombre de Nu ont été obtenu dans le cas où les nanoparticules de SiO₂ de 20 nm de diamètre sont utilisées avec une concentration volumique de 4% et dans un écoulement caractérisé par Re=1000. L'effet de type des nanoparticules sur le nombre de Nu est très clair. En utilisant l'eau comme fluide de base, le nanofluide eau/SiO2 présentait le nombre de Nusselt le plus élevé, suivi de eau/Al2O3, eau/ZnO, eau/CuO et l'eau pure. De leur côté, Benkhedda et Boufendi [87] ont étudié numériquement la convection mixte laminaire de l'écoulement du nanofluide eau/Ag entre deux tubes concentrique horizontales.

De cette étude, les auteurs on conclus que l'augmentation de la concentration volumique des nanoparticules augmente le nombre de Nu ainsi que le coefficient de transfert convectif. Les résultats montrent aussi que l'augmentation de la concentration volumique avait un effet significatif sur les températures du nanofluide et de la paroi. Dans une autre étude, *Benkhedda et al.* [88] ont procédé à une simulation numérique du transfert de chaleur par convection forcée et mixte due à l'écoulement annulaire du nanofluides eau/Al₂O₃. L'intérêt de cette recherche est d'améliorer le transfert de chaleur en utilisant un nanofluide au lieu d'un fluide classique.



Figure 2. 3 : Modèle physique du problème considéré [88].

Les résultats sont obtenus pour différentes valeurs des nombres de *Re* (500 *et* 1000), de *Gr* (0, 10^4 , 10^5) et de la concentration volumique des nanoparticules (1%, 4%, 8%). En augmentant le nombre de *Gr*, les résultats montrent que le nombre de *Nu* dans le cas de la convection mixte est plus grand que celui de la convection forcée. De plus, pour la même concentration des nanoparticules, les températures au sein du nanofluide sont fortement influencées par le nombre de Reynolds. Elles diminuent avec l'augmentation de ce dernier. Ce travail a confirmé aussi que l'utilisation des nanofluides augmentent le transfert de chaleur par rapport au fluide pur. Récemment, *Benkhedda et al.* [89] ont traité le cas de la convection mixte laminaire dans un écoulement annulaire horizontal en utilisant deux types de fluide caloporteur : un nanofluide d'eau / TiO₂ et un nanofluide hybride d'eau / Ag-TiO₂. La simulation numérique est effectuée en faisant varier la fraction volumique des nanoparticules entre 0 % et 8 % et le nombre de Grashof entre 10^5 et 10^6 avec un nombre de Reynolds égal 800.



Figure 2. 4 : Schéma de l'espace annulaire [89].

De cette simulation numérique, *Benkhedda et al.* [89] ont conclu que les nombres de *Nu*, local et moyen, et la température du mélange augmentent avec l'augmentation de la concentration volumique et le nombre de *Gr* pour toutes les valeurs du nombre de *Gr* étudiées. En faisant la comparaison entre le nanofluide eau/ TiO₂ et le nanofluide hybride eau/Ag- TiO₂ les auteurs ont constaté que le nanofluide hybride améliore mieux le transfert de chaleur. En exploitant les résultats, les auteurs ont aussi développé deux corrélations pour estimer le nombre de *Nu* moyen pour le nanofluide eau/TiO₂ et le nanofluide hybride eau/Ag-TiO₂ respectivement.

2.3. Mécanique des fluides numérique (CFD)

La résolution d'un problème de mécanique des fluides comme tout problème physique, nécessite l'utilisation de l'un des trois approches : analytique, expérimentale ou numérique. La méthode analytique offre des solutions exactes, mais elle est limitée à quelques problèmes typiques (exemple : l'écoulement de Poiseuille) puisque les solutions analytiques ne s'obtiennent que pour des équations différentielles très particulières. La méthode expérimentale est sûrement l'approche qui représente le mieux la réalité. En contrepartie elle est souvent difficile à mettre en œuvre et que son coût est parfois, sinon toujours, élevé. En plus , si on se sert à une étude paramétrique, le plus souvent est impossible. Parlant de l'approche numérique, elle est flexible, universelle et n'est pas aussi chère que l'approche expérimentale. Son défaut est qu'elle n'offre pas une solution exacte, comparée à la solution analytique lorsqu'elle est possible. De plus, elle est limitée par l'ordre des méthodes numériques utilisées, la précision du modèle et les moyens de calcul mis en œuvre. Cependant, elle donne une description raisonnable pouvant être utile pour l'analyse expérimentale. En mécanique des fluides, les approches CFD sont largement utilisées. Elles utilisent les principes fondamentaux de la mécanique des fluides et du transfert de chaleur et de masse.

2.3.1. Définition de la CFD (Computational Fluid Dynamics)

La CFD, i.e. "Computational Fluid Dynamics" (Dynamique des Fluides Numérique), est un ensemble de méthodes numériques permettant d'obtenir une solution approximative d'un problème de dynamique des fluides et/ou de transfert thermique en résolvant les équations qui le gouvernent. La solution est approximative pour plusieurs raisons :

- La discrétisation des équations ;
- Limitation de la puissance de calcul et de la mémoire ;
- L'utilisation des modèles empiriques dans certains cas qui ne sont pas exacts .

Cependant, la CFD permet d'avoir des solutions très satisfaisantes, grâce au développement des méthodes numériques et à des calculateurs de plus en plus puissants avec une grande capacité de

mémoire. Dans la plupart des domaines de l'industrie, une prédiction de l'ordre de grandeurs de valeurs moyennes est amplement suffisante [90].

2.3.2. Approches de la CFD

Généralement, toutes les approches de simulation des phénomènes associées aux écoulements des nanofluides peuvent être résumées en approche monophasique et multiphasique. Bien que la première considère le nanofluide comme une seule phase fluide stable et homogène, la deuxième peut être réalisée de manières complètement différentes. Elle peut être encore divisée en deux catégories en termes de cadres théoriques de base : une approche basée sur la description lagrangienne et l'autre sur la description eulérienne. Dans cette section, nous allons aborder les différentes approches de simulation de l'écoulement et le transfert de chaleur dans les nanofluides, à savoir l'approche monophasique, l'approche eulérienne-lagrangienne et les approches eulériennes .

2.3.2.1. Approche monophasique

Comme il est mentionné précédemment, l'approche monophasique suppose le nanofluide comme une seule phase stable et homogène avec des propriétés physiques améliorées, à condition que le diamètre des nanoparticules doit être inférieur à 40 nm. De plus, la vitesse de glissement et l'écart de température entre le fluide de base et les nanoparticules sont négligeables. Pour les propriétés thermophysiques telles que la conductivité thermique et la viscosité dynamique, des modèles de prédiction sont toujours utilisés avant les simulations, dépendants de plusieurs facteurs tels que la fraction volumique, la température et la taille des nanoparticules [91]. Avec les hypothèses ci-dessus, le comportement des nanofluides est comparable à celui des fluides conventionnels approximativement [92] et peut-être décrit en utilisant les équations de la mécanique des fluides classique.

2.3.2.2. Approche eulérienne-lagrangienne

Si le mouvement du nanofluide est traité comme un écoulement diphasique, on considérera qu'il comporte deux phases : le fluide de base et les nanoparticules. L'approche la plus simple consiste à résoudre les équations qui régissent le comportement dynamique et thermique du fluide de base comme première étape. Les informations obtenues sur l'écoulement du fluide servent à prédire le mouvement des nanoparticules en se basant sur la seconde loi de Newton. Des termes supplémentaires sont ajoutés aux équations régissantes le mouvement du fluide de base pour prendre en considération les interactions dynamique et thermique entre les deux phases. Si le nanofluide est simulé dans un cadre eulérien-lagrangien, il s'agit d'un moyen réellement pratique, car les nanoparticules peuvent être traitées comme de vraies particules en suspension dans le fluide de base. Cependant, dans la plupart des travaux CFD antérieurs sous le cadre eulérien-lagrangien, la force de traînée est le seul type de force à compter pour les nanoparticules. Cela peut ignorer de nombreux détails lorsque les caractéristiques du mouvement des nanoparticules sont prises en compte. De plus, dans une approche typiquement eulérienne-lagrangienne, l'accent est mis principalement sur les interactions entre fluide de base continu et particules discrètes, mais les interactions entre particules discrètes ne sont pas prises en compte, ce qui peut conduire à des informations manquantes pour les études sur les nanofluides.

2.3.2.3. Approches eulériennes

Dans le cadre de la description eulérienne, on distingue trois approches généralement : l'approches eulérienne-eulérienne, l'approche VOF (volume of fluid) et l'approche de mélange. L'hypothèse commune entre ces approches consiste à considérer les nanoparticules comme un pseudo-fluide. Dans chaque élément du maillage du domaine d'étude, il y'a la possibilité de l'existence des deux phases. Avec cette hypothèse, les trois approches doivent répondre à un critère exprimé par $\phi f + \phi n = 1$, c'est-à-dire que la somme de la fraction volumique du fluide de base et la fraction volumique des nanoparticules est de 100%. Avec cette considération, l'approche eulérienne-eulérienne consiste à résoudre deux systèmes d'équations décrivant l'écoulement et le transfert de chaleur pour les deux phases. Des termes supplémentaires sont encore nécessaires pour décrire les échanges de quantités de mouvement et d'énergie entre eux [93].

L'approche VOF (volume of fluid) résout un seul système d'équations de quantité de mouvement et d'énergie pour les deux phases et suit leurs fractions volumiques dans tout le domaine d'étude [94]. Les propriétés thermophysiques peuvent être calculées en fonction des concentrations volumiques dans chaque élément. Dans cette approche, la vitesse, la pression et la température sont partagées par fluide de base et les nanoparticules. Cependant, il faut noter que l'approche VOF est basée sur le principe qu'il n'y a pas interpénétration entre les phases. Pour chaque élément, elle doit avoir une fraction volumique $\phi n = 0$ ou = 1. Si $0 < \phi n < 1$, il faut suivre les informations relatives à l'interface entre les deux phases [95].

L'approche de mélange peut modéliser l'écoulement multiphasique et le transfert de chaleur associé en résolvant un système d'équations composé de l'équation de continuité, de quantité de mouvement, de l'énergie et de la fraction volumique pour le mélange. Cette procédure nécessite la modélisation mathématique de la vitesse relative entre les différentes phases. Ainsi, il est possible de définir certains paramètres, en particulier pour la sédimentation des nanoparticules (basé sur des investigations expérimentales). La différence entre le modèle mélange et le modèle VOF est que le suit de l'interface n'est pas nécessaire. Cette nature du modèle de mélange permet d'économiser beaucoup de ressources de calcul lorsque le maillage numérique est correct.

2.4. Équations gouvernantes pour les simulations CFD

Pour décrire le comportement de tous types de fluides, les simulations CFD sont toujours basées sur les lois de conservation. Que ce soit une simulation monophasique (eau, air...) ou polyphasique (comme le nanofluide avec une hypothèse monophasée dans le cadre eulérien) les équations de conservation consistent généralement les équations de : continuité, quantité de mouvement et d'énergie. Le but de cette section et de dégager ces équations [96] qui ont été obtenues par l'expérience et ne sont jamais mises en défaut si l'on reste dans les hypothèses de la physique classique [46, 47]:

- L'échelle du problème est très grande devant la taille des particules élémentaires : la mécanique des milieux continus n'est donc pas quantique ;
- La vitesse de la matière est très faible devant celle de la lumière : la mécanique des milieux continus n'est donc pas quantique n'est donc pas relativiste.

2.4.1. Equation de la continuité

L'axiome de conservation de masse traduit le fait que la masse d'un volume matériel V(t) est une constante dans le temps (permanence de la matière qui ne peut disparaître ou apparaître spontanément). Elle ne dépend donc pas des différentes positions occupées par ce domaine au cours du temps [47]. Lorsqu'un milieu continu est homogène, la présence de matière au sein du volume V(t) est décrite localement par la seule variable ' masse volumique ρ ' [96] :

$$m(t) = \int_{V(t)} \rho(\vec{x}, t) dV$$
(2.1)

Le principe de conservation de la masse impose que la masse m(t) doit rester constante au cours du temps. On a donc :

$$\frac{dm(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho(\vec{x}, t) dV = 0$$
(2.2)

En appliquant le Lemme de la dérivée temporelle d'intégrales volumiques eulériennes :

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c} \rho(\vec{x}, t) dV = \int_{V(t)} \frac{\partial \rho(\vec{x}, t)}{\partial t} dV + \int_{S(t)} \rho(\vec{x}, t) \vec{v}(\vec{x}, t) \cdot \vec{n} ds = 0$$
(2.3)

En appliquant le théorème d'Ostrogradski à l'équation (2.3), on obtient :

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho dV = \int_{V(t)} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{V(t)} div(\rho \vec{v}) dV = 0$$
(2.4)

A partir de l'équation (2.4), on tire la forme suivante :

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \vec{v}) \right] dV = \int_{V(t)} \left[\frac{d\rho}{dt} + \rho div(\vec{v}) \right] dV = 0$$
(2.5)
Cette équation devant être vérifiée quel que soit le volume d'intégration *V*, il faut donc que l'intégrant soit identiquement nul. La relation exprimant l'annulation de cet intégrant est l'*équation de continuité* qui constitue la forme locale du principe de conservation de la masse et peut prendre l'une des deux formes équivalentes suivantes [96]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho \vec{v}) = 0 \tag{2.6}$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho div(\vec{v}) = 0 \tag{2.7}$$

L'équation (2.6) est dite la forme eulérienne de l'équation de continuité tandis que l'équation (2.7) est la forme lagrangienne de cette équation.

2.4.2. Equation de conservation de quantité de mouvement

Le principe de conservation de la quantité de mouvement, s'obtient en appliquant la $2^{\text{ème}}$ loi de Newton où loi fondamentale de la dynamique a un domaine matériel [96]. Cette loi énonce que pour tout référentiel galiléen, le torseur dynamique associé à un domaine matériel *D* est égal au torseur des efforts extérieurs s'appliquant sur *D* [47].

Considérons un domaine matériel D occupant au cours du temps le volume variable V(t). Par définition, la quantité de mouvement de la matière contenue dans ce volume s'écrit à chaque instant t sous la forme :

$$\vec{p} = \int_{V(t)} \vec{v} dm = \int_{V(t)} \rho \vec{v} dV$$
(2.8)

Vu le théorème de Reynolds, le taux de variation de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\frac{d\overrightarrow{p}}{dt} = \int_{V(t)} \rho \frac{d\overrightarrow{v}}{dt} dV$$
(2.9)

L'ensemble des efforts extérieures qui s'appliquent à ce volume peut être scindé en les efforts de volume $\overrightarrow{F_V}$ et les efforts de surface $\overrightarrow{F_s}$. On a donc :

$$\overrightarrow{F} = \overrightarrow{F_s} + \overrightarrow{F_V} = \int_{S(t)} \overrightarrow{T} \, ds + \int_{V(t)} \rho \overrightarrow{g} \, dV$$
(2.10)

Où \vec{T} désigne la densité surfacique des efforts de surface.

Par définition du tenseur des contraintes, les efforts de surfaces peuvent se récrire sous les formes suivantes :

$$\int_{S(t)} \vec{T} \, ds = \int_{S(t)} \bar{\Sigma} \cdot \vec{n} \, ds = \int_{V(t)} div(\bar{\sigma}) dV \tag{2.11}$$

En égalant le taux de variation de la quantité de mouvement à la somme des efforts, il vient :

$$\int_{V(t)} \rho \frac{d\vec{v}}{dt} dV = \int_{V(t)} div(\overline{\sigma}) dV + \int_{V(t)} \rho \vec{g} dV \qquad (2.12)$$

Cette équation (forme globale du principe de conservation de quantité de mouvement) est valable quel que soit le volume V(t). On peut donc en déduire une loi d'évolution « locale » pour les champs physiques :

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = div(\overline{\sigma}) + \rho \overline{g}$$
(2.13)

Cette équation (eulérienne), appelée habituellement « Première loi du mouvement de Cauchy », constitue la loi du mouvement d'un milieu continu. On rappelle que le tenseur des contraintes se décompose en tenseur des pressions $-p\overline{I}$ et un tenseur des contraintes visqueuses $\overline{\tau}$:

$$\overline{\overline{\sigma}} = -p\overline{\overline{l}} + \overline{\overline{\tau}} \tag{2.14}$$

Le tenseur des contraintes visqueuses $\overline{\tau}$ est donné par la relation :

$$\overline{\overline{\tau}} = \mu \left(-\frac{2}{3} div \left(v \overline{\overline{I}} \right) + 2 \overline{\overline{D}} \right)$$
(2.15)

Où $\overline{\overline{D}}$ est le tenseur des taux de déformation et sa formule est :

$$\overline{\overline{D}} = \frac{1}{2} \left(\overline{\nabla} v + \overline{\nabla} v^T \right)$$
(2. 16)

En remplaçant les relations (2.14) (2.15) et (2.16) dans l'équation (2.13), on obtient :

$$\rho \frac{d\overline{v}}{dt} = div \left(-p\overline{\overline{I}} + \mu \left(-\frac{2}{3} div \left(v\overline{\overline{I}} \right) + 2\overline{\overline{D}} \right) \right) + \rho \overline{g}$$
(2.17)

Après calculs et réarrangement on arrive à l'équation finale de conservation de quantité de mouvement appelée équation de Navier-Stokes :

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\overline{grad}p + div(2\mu\overline{\overline{D}}) - \frac{2}{3}\overline{grad}(\mu \, div \, \vec{v}) + \rho \overline{g}$$
(2.18)

Cette équation représente la forme générale des équations de Navier-Stokes pour un fluide compressible et non newtonien en régime variable.

2.4.3. Equation de conservation de l'énergie

La loi de conservation de l'énergie, également connue sous le nom du premier principe de la thermodynamique, énonce que l'énergie totale d'un système isolé reste constante au fil du temps. Cela signifie que l'énergie ne peut être ni créée ni détruite, mais elle peut seulement changer de forme ou être transférée d'un endroit à un autre pendant l'évolution d'un système continu [96].

Dans un système de référence donné, on peut évidemment associer une énergie cinétique à tout milieu continu, définit par la somme des énergies cinétiques de ses particules matérielles :

$$E_{c} = \int_{V(t)} \frac{1}{2} \rho \|\vec{v}\|^{2} dV$$
 (2.19)

Outre cette énergie due au mouvement, l'expérience a montré qu'un autre type d'énergie, appelée l'*énergie interne U (u* est sa densité massique), devait être associé à tout milieu macroscopique :

$$U = \int_{V(t)} \frac{1}{2} \rho u dV \tag{2.20}$$

Afin d'exprimer la conservation de l'énergie, il faut décrire les échanges d'énergie avec le milieu extérieur. Il est clair tout d'abord que le travail des forces extérieures peut engendrer des modifications de l'énergie du milieu continu. Pour le volume V(t), la puissance des forces extérieures peut s'écrire :

$$P_S + P_V = \int_{S(t)} \overline{\overline{\sigma}} \cdot \overline{v} \, ds + \int_{V(t)} \rho \overline{g} \cdot \overline{v} \, dV \tag{2.21}$$

L'énergie échangée avec le milieu extérieur se faire aussi au travers de *transferts de chaleur*, qui se répartissent aussi en transferts en surface et transferts dans le volume. La quantité de chaleur fournie par unité de temps par le milieu extérieur est donc exprimée comme suit :

$$\dot{Q} = -\int_{S(t)} \vec{q} \cdot \vec{n} \, ds + \int_{V(t)} \rho \cdot s \, dV \tag{2.22}$$

Le vecteur \vec{q} est le vecteur *flux de chaleur* qui traduit les apports calorifiques en surface par le phénomène de *conduction thermique* définit par $\vec{q} = \lambda \nabla T$. La source massique de chaleur *s* rend compte des apports de chaleur directement dans le sein du milieu continu.

Le premier principe de la thermodynamique, permet alors d'affirmer que le taux de variation de l'énergie totale d'un milieu continu, est égal à la puissance des forces extérieures appliquées au milieu étudié augmentée de la quantité de chaleur reçue par unité de temps [96]:

$$\frac{d}{dt}E = \frac{d}{dt}(E_c + U) = P_V + P_S + \dot{Q}$$
(2.23)

En explicitant les différents termes, la conservation de l'énergie totale s'écrit :

$$\frac{d}{dt}\int_{V(t)}(\rho E)dV = \int_{V(t)}\rho \overrightarrow{g}.\overrightarrow{v}dV + \int_{S(t)}\overline{\sigma}.\overrightarrow{v}ds - \int_{S(t)}\overrightarrow{q}.\overrightarrow{n}ds + \int_{V(t)}\rho.sdV$$
(2.24)

La forme locale de l'équation qui précède est :

$$\frac{d(\rho E)}{dt} = \rho \overrightarrow{g} \cdot \overrightarrow{v} + \nabla \cdot (\overline{\overline{\sigma}} \cdot \overrightarrow{v}) - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \rho s \qquad (2.25)$$

Les équations de conservation de la masse (2.6), de la quantité de mouvement (2.18) et de l'énergie (2.25) développées précédemment, représente le comportement d'un fluide compressible non newtonien en régime laminaire et instationnaire. Dans la suite de ce chapitre, on considérera des écoulements tridimensionnels en régime laminaire et permanents. Tenant en compte l'effet des

forces de gravité à cause de l'inclinaison de la conduite, le système d'équations (2.6), (2.18) et (2.24) se réécrivent en coordonnées cylindriques :

Équation de continuité :

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(ru_r) + \frac{1}{r}\frac{\partial u_{\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$
(2.26)

Equations de conservation de la quantité de mouvement :

Direction radiale :

$$\rho_{hnf} \left(u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_{\theta}}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_{\theta}^2}{r} \right)$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu_{hnf} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) \right\} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_{\theta}}{\partial \theta} \right]$$

$$+ \rho_{hnf} g \cos\theta \cos\alpha \qquad (2.27)$$

Direction azimutale :

$$\rho h_{nf} \left(u_r \frac{\partial u_{\theta}}{\partial r} + \frac{u_{\theta}}{r} \frac{\partial u_{\theta}}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_{\theta}}{\partial z} - \frac{u_r u_{\theta}}{r} \right)$$

$$= -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu_{hnf} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_{\theta}) \right\} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_{\theta}}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_{\theta}}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_{\theta}}{\partial z^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right] \quad (2.28)$$

$$+ \rho_{hnf} g \sin\theta \cos\alpha$$

Direction axiale :

$$\rho_{hnf} \left(u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu_{hnf} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] + \rho_{hnf} g \sin \alpha$$
(2.29)

Équation de conservation de l'énergie :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial T}{\partial z}\right) = \alpha_{hnf} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right]$$
(2.30)

Le système d'équations précédent est composé de 5 équations aux dérivées partielles, nonlinéaires et couplées :

- L'équation de continuité (une équation scalaire)
- L'équation de quantité de mouvement (trois équations scalaires),
- L'équation de l'énergie (une équation scalaire).

Ces équations relient les inconnues suivantes en fonctions des variables indépendantes x, y et z: la vitesse (3 quantités) 3 inconnues, La pression 1 inconnue, le tenseur symétrique des

contraintes visqueuses (6 quantités), l'énergie interne massique 1 inconnue, le flux de chaleur par unité de surface (3 quantités) 3 inconnues.

La résolution par une méthode analytique ou numérique de ces équations de conservation nécessite la détermination des conditions initiales et spatiales (aux limites). Il existe fondamentalement trois types de conditions aux limites. Par ailleurs, la nature de l'équation, elliptique ou parabolique, par rapport aux différentes variables d'espace et de temps, impose la nécessité de ces conditions. Nous allons tout d'abord passer en revue les différentes catégories des conditions aux limites, puis nous examinerons les exigences mathématiques de l'équation aux dérivées partielles en ce qui concerne ces conditions aux limites. Les trois sortes de conditions aux limites à la frontière du système étudié, la densité de flux thermique de densité normale que nous noterons φ est donnée par l'une des trois conditions aux limites suivantes :

4 Condition de Dirichlet

On parle de condition de Dirichlet imposée à une équation différentielle ou une équation aux dérivées partielles, lorsque l'on spécifie les valeurs que la solution doit vérifier sur toute ou partie de la frontière du domaine [97].

Cette condition aux limites se rencontre classiquement :

- En transport de chaleur, lorsque des mesures de température sont disponibles, ou pour exprimer un contact parfait avec un milieu dont la température est connue ;
- En mécanique des fluides, pour simuler une vitesse imposée, ou une vitesse nulle en un point au contact d'une paroi solide immobile...

4 Condition de Neumann

On parle de condition de Neumann imposée à une équation différentielle ou une équation aux dérivées partielles, lorsque l'on spécifie les valeurs des dérivées que la solution doit vérifier sur la frontière du domaine (flux, contraintes, ...) [97].

Par conséquent, dans la littérature de physique et d'ingénierie, la condition aux limites de Neumann est souvent appelée condition aux limites de flux. Pour l'exemple de transfert de chaleur, une condition aux limites de Neumann équivaut à une condition aux limites de flux de chaleur imposé.

4 Condition de Fourier

On parle de condition de Fourier imposée à une équation différentielle ou une équation aux dérivées partielles, lorsque l'on spécifie une relation linéaire entre les valeurs de la fonction et les

valeurs de la dérivée de la fonction qui est solution du problème sur toute ou partie de la frontière du domaine. C'est donc une pondération de conditions de Dirichlet et de Neumann [97]. Un exemple de transfert de chaleur à la surface d'une solide pure convection de l'atmosphère ambiante. La densité de flux de chaleur sortant du solide peut s'exprimer sous la forme :

$$\varphi = h(T - T_{ext})$$

2.5. Présentation du problème

2.5.1. Domaine physique

La convection thermique est un mode de transfert de chaleur de grande importance dans de nombreuses applications de l'ingénierie. La convection mixte, c'est-à-dire la combinaison simultanée de la convection libre et forcée, est le phénomène de transfert de chaleur le plus général et a reçu une attention considérable ces dernières années. Un tel processus se produit lorsque l'effet des forces de gravités en convection forcée ou l'effet de l'écoulement forcé en convection libre devient significatif. Dans les écoulements de convection mixte, les effets de convection forcée et les effets de convection libre peuvent être de grandeurs comparables. Le présent travail s'intéresse à l'étude de la convection mixte dans une conduite annulaire inclinée. La convection mixte et l'écoulement de fluide dans les géométries annulaires est un phénomène important dans les systèmes d'ingénierie car il s'agit d'une géométrie commune et essentielle pour les dispositifs d'écoulement de fluide et de transfert de chaleur. L'une des méthodes efficaces d'amélioration des performances de tels équipements consiste à remplacer les fluides de travail, utilisés usuellement, par des nanofluides hybrides en tant que nouvelle stratégie [98]. Dans ce contexte, nous avons choisi d'étudier la convection mixte associée à l'écoulement du nanofluide eau/ZnO ainsi que son hybride eau/Ag-ZnO avec des concentrations volumiques de 0%, 1% et 2%, dans une conduite annulaire inclinée d'un angle α (30° et 60°) par rapport à l'horizon.



Figure 2. 5 : Schéma de l'espace annulaire incliné.

Comme il est illustré dans la figure 2.1, la partie supérieure de la paroi externe est soumise à des rayonnements solaires tandis que la partie inférieure et la paroi interne sont considérées adiabatiques. La modélisation mathématique du problème est basée sur l'approche

monophasiques. Les simulations sont réalisées pour une valeur fixe du nombre de Re (Re=300) et six valeurs du nombre de Ri (0.3, 0.7, 1, 1.3, 1.7 et 2). Afin de simplifier le problème, le nanofluide est considéré newtonien et incompressible en écoulement laminaire et stationnaire. La dissipation visqueuse, les pertes de pression, les pertes convectives et radiatives sont négligeables. L'approximation de Boussinesq est adoptée pour évaluer l'évolution de la densité au sein du fluide.

Sur la base des travaux expérimentales de Ruhani et al. [99], les propriétés géométriques des nanoparticules d'argent et d'oxide de zinc sont résumées dans le tableau 2.2. Concernant les propriétés thermophysiques de l'eau et des nanoparticules considérées, elles sont données dans le tableau 2.3.



Figure 2. 6 : Nanoparticules d'Ag et de ZnO [99].

Particule	Couleur	Forme	Surface spécifique (m ² .g ⁻¹)	Taille (nm)	Pureté
ZnO	Beige	Sphérique	20-60	10-30	+99%
Ag	Noire	Sphérique	16-20	30-50	+99%

Tableau 2.2 : F	Propriétés géométric	ques des nanoparticule	s de ZnO et d'Ag [99]
------------------------	----------------------	------------------------	-----------------------

Matériau	Masse volumique (Kg/m ³)	Viscosité dynamique (Kg/m/s)	Chaleur spécifique (J/(kg.K)	Conductivité thermique (W/m.K)
Eau	998	0.001002	4180	0.613
Ag	10500	/	235	429
ZnO	5606	/	502.7	13

Tableau 2.3 : Propriétés thermophysiques de l'eau, Ag, ZnO.

2.5.2. Propriétés thermophysiques

Tenant compte de l'équilibre thermique entre le fluide de base et les nanoparticules, l'estimation de la densité, la chaleur spécifique et le coefficient d'expansion thermique du nanofluide hybride eau/Ag-ZnO est basée sur les relations usuelles des mélanges diphasiques (2.31, 2.32 et 2.33), en absence de travaux expérimentales qui s'intéresse à leurs estimation [100] :

$$\rho_{hnf} = \phi_{Ag} \rho_{Ag} + \phi_{Zn0} \rho_{Zn0} + (1 - \phi) \rho_{bf}$$
(2.31)

$$Cp_{hnf} = \phi_{Ag}Cp_{Ag} + \phi_{ZnO}Cp_{ZnO} + (1-\phi)\rho_{bf}$$
(2.32)

$$(\rho\beta)_{hnf} = \phi_{Ag}\rho_{Ag}\beta_{Ag} + \phi_{Zn0}\rho_{Zn0}\beta_{Zn0} + (1-\phi)(\rho\beta)_{bf}$$
(2.33)

$$\phi = \phi_{Ag} + \phi_{ZnO} \tag{2.34}$$

Pour le nanofluide eau/ZnO, les expressions (2.35), (2.36) et (2.37) exposées ci-dessous ont été utilisées pour calculer les propriétés thermophysiques citées dans le paragraphe précédent :

$$\rho_{nf} = \phi \rho_{Zn0} + (1 - \phi) \rho_{bf} \tag{2.35}$$

$$(\rho C p)_{nf} = \phi(\rho_{Zn0} C p_{Zn0}) + (1 - \phi)\rho_{bf}$$
(2.36)

$$(\rho\beta)_{nf} = \phi(\rho_{Zn0}\beta_{Zn0}) + (1-\phi)(\rho\beta)_{bf}$$
(2.37)

Fluide	Concentration	Densité	Chaleur spécifique	Coefficient d'expansion
	volumique (%)	(Kg.m- ³)	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	thermique (K ⁻¹)
Eau/Ag-	1	1067.6	4140.9	1,95.10 ⁻⁴
ZnO	2	1138.2	4102.8	1,82.10 ⁻⁴
Eau/ZnO	1	1043.2	3981.4	1,99.10 ⁻⁴
	2	1089.3	3800.6	1,89.10 ⁻⁴

 Tableau 2. 4 : Densité, chaleur spécifique et coefficient d'expansion thermique des nanofluide étudiés.

Afin d'estimer la viscosité dynamique et la conductivité thermique de l'eau/Ag-ZnO (50%– 50%), les données expérimentales de de Ruhani et al. [99] et Esfahani et al. [101] ont été utilisées pour développer de nouvelles expressions linéaires en fonctions de la température. Selon les données expérimentales utilisées, ces expressions interpolées peuvent être utilisées si $\phi_{Ag} = \phi_{ZnO}$ et : 298 $K \le T \le$ 323. Les expressions développées sont données par la suite :

$$\phi = 0\%$$
 $\mu_{eau} = 4,33.10^{-3} - 1,11.10^{-5} T$ (2.38)

$$\lambda_{eau} = 0,301 + 0,00107 T \tag{2.39}$$

$$\phi = 1 \%$$
 $\mu_{hnf} = 5,61.10^{-3} - 1,44.10^{-5} T$ (2.40)

$$\lambda_{nfh} = -0.244 + 0.003 T \tag{2.41}$$

$$\phi = 2\%$$
 $\mu_{hnf} = 8,23.10^{-3} - 2,20.10^{-5} T$ (2.42)

 $\lambda_{nfh} = -0.86 + 0.0051 \, T \tag{2.43}$

Pour le nanofluide eau/ZnO (1%, 2%), les données expérimentales de Colla et al. [102] ont été utilisées pour développer les expressions présentées ci-dessous. Ces expressions sont valables si $298 K \le T \le 323$.

$$\phi = 1\%$$
 $\mu_{nf} = 5,37.10^{-3} - 1,5.10^{-5} T$ (2.44)

$$\lambda_{nf} = -0,208 + 0,00265 T \tag{2.45}$$

$$\phi = 2\%$$
 $\mu_{nf} = 5.38.10^{-3} - 1.5.10^{-5} T$ (2.46)

$$\lambda_{nf} = -0,179 + 0,00259 \, T \tag{2.47}$$

Ces expressions sont validées et représentées dans les figures ci-dessous :



Figure 2. 7 : Présentation et validation des modèles de l'eau/Ag-ZnO : (a) viscosité dynamique,

(b) conductivité thermique.



Figure 2. 8 : Présentation et validation des modèles de l'eau/ZnO : (a) viscosité dynamique, (b) conductivité thermique.

2.5.3. Forme adimensionnelle

La simulation numérique de notre problème est basée sur l'approche monophasique. Cette approche considère le nanofluide comme une seule phase stable et homogène, avec des propriétés thermophysiques différentes par rapport à son fluide de base. Elle repose sur les conditions de

non-glissement et d'équilibre thermique entre le fluide de base et les nanoparticules. Suivant ces hypothèses, le comportement des nanofluides et fluides conventionnels est comparable [92] et peut être décrit en utilisant les équations classiques de la mécanique des fluides. Le modèle mathématique décrivant le phénomène étudié est formé des équations de la continuité, la quantité de mouvement et l'énergie. Les variables sans dimensions présentés par la suite, sont utilisés pour arriver à la forme adimensionnelle de ces équations :

$$r^{*} = \frac{2(r - R_{2})}{D_{h}}, z^{*} = \frac{z}{D_{h}}, u_{r}^{*} = \frac{u_{r}}{u_{max}}, u_{\theta}^{*} = \frac{u_{\theta}}{u_{max}}, u_{z}^{*} = \frac{u_{z}}{u_{max}}, T^{*} = \frac{T - T_{0}}{\frac{q_{rad}}{k}}, p_{d}^{*} = \frac{p_{d}}{\rho_{0}u_{0}^{2}}, q^{*} = \frac{q}{q_{rad}}, D_{h} = D_{1} - D_{2},$$

Equation de continuité:

$$\frac{1}{r^*}\frac{\partial}{\partial r^*}(r^*u_r^*) + \frac{1}{r^*}\frac{\partial u_\theta^*}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z^*}{\partial z^*} = 0$$
(2.48)

Equations de conservation de quantité de mouvement :

Direction radiale

$$\frac{1}{r^{*}}\frac{\partial}{\partial r^{*}}(r^{*}u_{r}^{*}u_{r}^{*}) + \frac{1}{r^{*}}\frac{\partial}{\partial \theta}(u_{r}^{*}u_{\theta}^{*}) + \frac{\partial}{\partial z^{*}}(u_{r}^{*}u_{z}^{*}) - \frac{u_{\theta}^{*2}}{r^{*}}$$

$$= -\frac{\partial p_{d}^{*}}{\partial r} + Ri\cos\theta\cos\alpha T^{*}$$

$$+ \frac{1}{Re}\left[\frac{1}{r^{*}}\frac{\partial}{\partial r^{*}}\left(r^{*}\frac{\partial u_{r}^{*}}{\partial r^{*}}\right) + \frac{1}{r^{*2}}\frac{\partial^{2}u_{r}^{*}}{\partial \theta^{2}} + \frac{\partial^{2}u_{r}^{*}}{\partial z^{2}} - \frac{u_{r}^{*}}{r^{*2}} - \frac{2}{r^{*2}}\frac{\partial u_{\theta}^{*}}{\partial \theta}\right]$$
(2.49)

Direction azimutale:

$$\frac{1}{r^{*}}\frac{\partial}{\partial r^{*}}(r^{*}u_{r}^{*}u_{\theta}^{*}) + \frac{1}{r^{*}}\frac{\partial}{\partial \theta}(u_{\theta}^{*}u_{\theta}^{*}) + \frac{\partial}{\partial z^{*}}(u_{z}^{*}u_{\theta}^{*}) - \frac{u_{\theta}^{*2}}{r^{*}}$$

$$= -\frac{1}{r^{*}}\frac{\partial p_{d}^{*}}{\partial \theta} - Ri\cos\alpha\sin\theta T^{*}$$

$$+ \frac{1}{Re}\left[\frac{1}{r^{*}}\frac{\partial}{\partial r^{*}}\left(r^{*}\frac{\partial u_{\theta}^{*}}{\partial r^{*}}\right) + \frac{1}{r^{*2}}\frac{\partial^{2}u_{\theta}^{*}}{\partial \theta^{2}} + \frac{\partial^{2}u_{\theta}^{*}}{\partial z^{2}} - \frac{u_{\theta}^{*}}{r^{*2}} - \frac{2}{r^{*2}}\frac{\partial u_{r}^{*}}{\partial \theta}\right]$$
(2.50)

Direction axiale:

$$\frac{1}{r^{*}}\frac{\partial}{\partial r^{*}}(r^{*}u_{r}^{*}u_{z}^{*}) + \frac{1}{r^{*}}\frac{\partial}{\partial \theta}(u_{\theta}^{*}u_{z}^{*}) + \frac{\partial}{\partial z^{*}}(u_{z}^{*}u_{z}^{*}) - \frac{u_{\theta}^{*2}}{r^{*}}$$

$$= -\frac{\partial p_{d}^{*}}{\partial z} - Ri\sin\alpha T^{*} + \frac{1}{Re}\left[\frac{1}{r^{*}}\frac{\partial}{\partial r^{*}}\left(r^{*}\frac{\partial u_{z}^{*}}{\partial r^{*}}\right) + \frac{1}{r^{*2}}\frac{\partial^{2}u_{z}^{*}}{\partial \theta^{2}} + \frac{\partial^{2}u_{z}^{*}}{\partial z^{2}}\right]$$
(2.51)

Equation de conservation de l'énergie :

$$\frac{1}{r^*}\frac{\partial}{\partial r^*}(r^*u_r^*T^*) + \frac{1}{r^*}\frac{\partial}{\partial \theta}(u_{\theta}^*T^*) + \frac{\partial}{\partial z^*}(u_z^*T^*)$$
$$= \frac{1}{Re.Pr}\left[\frac{1}{r^*}\frac{\partial}{\partial r^*}\left(r^*\frac{\partial T^*}{\partial r^*}\right) + \frac{1}{r^{*2}}\frac{\partial^2 T^*}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial z^2}\right]$$
(2.52)

Nombre adimensionnel	Expression	Signification physique
Re	$Re = \frac{\rho_{hnf} \ u_0 \ D_h}{\mu_{hnf}}$	Le nombre de Re est le rapport des forces d'inertie aux forces visqueuses agissant sur un élément de fluide.
Pr	$Pr = \frac{\mu_{hnf} \ Cp_{hnf}}{\lambda_{hnf}}$	Le nombre de Prandtl représente le rapport entre diffusion cinématique et diffusion thermique
Gr	$Gr = \frac{g \beta_{hnf} q_{rad} D_h^4 \rho_{hnf}^2}{\lambda_{hnf} \mu_{hnf}^2}$	Le nombre de Grashof représente le rapport entre les forces de gravité et les forces visqueuses agissant sur le fluide.
Ri	$Ri = \frac{Gr}{Re^2}$	Le nombre de Richardson est défini par le rapport entre le nombre de Grashof et le nombre de Re.
Nu	$Nu = \frac{h_{hnf}D_h}{\lambda_{hnf}}$	Le nombre de Nusselt est le rapport entre le flux de chaleur transféré par convection et le flux de chaleur par conduction.

Les nombres adimensionnels présents dans le système d'équations précédent sont : le nombre de Reynolds *Re*, le nombre de Prandtl *Pr*, le nombre de Grashof *Gr* et le nombre de Richardson *Ri*.

Tableau 2. 5 : Nombres adimensionnels et significations physiques [103].

2.5.4. Conditions aux limites

Le système d'équation précédent est soumis à un certain nombre de conditions aux limites. A l'entrée du domaine d'étude, le nanofluide pénètre la conduite avec une vitesse constante et une température uniforme (2.53). La partie supérieure de la paroi externe est soumis à des rayonnement solaires comme il décrit par l'expression (2.54), avec une valeur maximale de la température aux points décrits par l'expression (2.55). La partie inférieure ainsi que la paroi interne sont considérées adiabatiques (2.56, 2.57). En plus des conditions thermiques imposées aux parois, les conditions d'adhérence traduisant des vitesses nulles aux parois (2.54, 2.56, 2.57) sont prises en considération. A la sortie de l'espace annulaire l'écoulement est totalement développé comme il est décrit par l'équation (2.58).

$$z^* = 0: u_r^* = u_{\theta}^* = 0, u_z^* = 1, T^* = 0$$
 (2.53)

$$r^* = 1, 0 \le \theta \le \pi : u_r^* = u_{\theta}^* = u_z^* = 0, \frac{\partial T^*}{\partial r^*} = q^*$$
 (2.54)

$$\theta = \frac{\pi}{2}; \ \frac{\partial u_r^*}{\partial \theta} = \frac{\partial u_\theta^*}{\partial \theta} = \frac{\partial u_z^*}{\partial \theta} = \frac{\partial T^*}{\partial \theta} = u_\theta^* = 0$$
 (2.55)

$$r^* = 0: \ u_r^* = u_{\theta}^* = u_z^* = 0, \frac{\partial T^*}{\partial r^*} = 0$$
 (2.56)

$$r^* = 1, \pi \le \theta \le 2\pi : u_r^* = u_{\theta}^* = u_z^* = 0, \frac{\partial T^*}{\partial r^*} = 0$$
 (2.57)

2.6. Conclusion

La matière de ce 2^{ème} chapitre a eu comme but principal de présenter le problème d'étude, et le modéliser mathématiquement. La méthode numérique, le solveur utilisés ainsi que les différentes étapes suivies dans la simulation de ce problème seront donnés dans le 3^{ème} chapitre qui représente la procédure de résolution.

CHAPITRE 3. RESOLUTION NUMERIQUE

Chapitre 3 : Résolution numérique

3.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation de la procédure suivie dans la simulation du problème d'étude. La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation de la méthode numérique (méthode des volumes finifs) ainsi que le solveur (Ansys fluent) utilisés. Ensuite une étude de vérification semblée nécessaire dans notre cas, afin de prouver la fiabilité du solveur utilisé et du modèle mathématique y intégré. Une autre étude de validation sera fourni ou on va comparer nos résultats avec des résultats présents dans la litératture. La simulation d'un problème en utilisant Ansys fluent passe par 3 étapes : conception de la géométrie, réalisation et géneration du maillage et configuration et résolution avec le soleveur fluent. Ces trois étape seront présentées et détaillées dans ce 3^{ème} chapitre.

3.2. Analyse numérique

Les équations de conservation qui décrivent le mouvement du fluide sont des équations différentielles aux dérivées partielles fortement couplées et non linéaires. En général, Ces équations n'admettent pas de solutions analytiques sauf dans des cas très simplifiés. C'est pourquoi le recours aux méthodes de résolution numériques s'avère nécessaire. Chaque méthode de résolution numérique d'un problème continu comporte une phase de maillage et une phase de discrétisation. La phase de maillage consiste à diviser le domaine d'étude en de petits volumes appelés volumes de contrôle. La phase de discrétisation transforme le problème continu en un problème discret. Les équations ainsi que les conditions aux limites sont approchées par des équations et conditions discrètes. Il existe deux grandes familles de méthodes de discrétisation :

- Les méthodes d'approximation des équations : selon ces méthodes, on cherche une solution exacte des équations approchées car les opérateurs différentiels sont discrétisés sur un maillage (la méthode des différences finies et la méthode des volumes finis);
- Les méthodes d'approximation des solutions : Selon ces méthodes on cherche une solution approchée à partir des équations exactes. Les solutions sont écrites comme des séries de fonctions tronquées aux ordres de précisions désirées (les méthodes spectrales et la méthode des éléments finis) [104].

3.2.1. Méthode des volumes finis

La popularité de la méthode des volumes finis (MVF) [105] en CFD découle de la grande flexibilité qu'elle offre en tant que méthode de discrétisation. Bien qu'elle ait été précédée pendant de nombreuses années par les méthodes des différences finies [106] et des éléments finis [107], la

MVF a assumé un rôle particulièrement important dans la simulation des problèmes d'écoulement des fluides et des phénomènes de transport associés. La MVF renvoie une grande partie de sa flexibilité au fait que la discrétisation est effectuée directement dans l'espace physique sans avoir besoin d'aucune transformation entre le système de coordonnées physique et informatique. De plus, son adoption d'un arrangement colocalisé l'a rendu approprié pour résoudre des écoulements dans des géométries complexes [108]. Ces développements ont élargi la plage l'application de la MVF tout en conservant la simplicité de sa formulation mathématique. Un autre aspect important de la MVF est que ses valeurs numériques reflètent la physique et les principes de conservation qu'elle modélise, tels que la propriété intégrale des équations gouvernantes et les caractéristiques des termes qu'elle discrétise.

3.2.2. Principe de la méthode des volumes finis

Le principe de la méthode des volumes finis est basé sur la transformation de l'ensemble d'équations aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques linéaires. La procédure de discrétisation utilisée dans la méthode des volumes finis est particulière et implique deux étapes de base. Dans la première étape, les équations aux dérivées partielles sont intégrées et transformées en équations algébriques sur un élément. Cela implique de changer les intégrales de surface et de volume en relations algébriques discrètes sur les éléments et leurs surfaces en utilisant une quadrature d'intégration d'un ordre de précision spécifié. Le résultat est un ensemble d'équations semi-discrétisées. Dans la deuxième étape, des profils d'interpolation sont choisis pour approcher la variation des variables au sein de l'élément et relier les valeurs de surface des variables à leurs valeurs de cellule et ainsi transformer les relations algébriques en équations algébriques [109].

Considérant la grille de calcul présentée dans la figure 3.1. L'application de la méthode des volumes finis consiste à décomposer le domaine d'étude en un nombre fini de sous-domaines V_i (*i* = 1, ..., *N*), appelés volumes de contrôle (V_C), de telle manière que chaque volume entoure un nœud principal P.



Figure 3. 1: Déscritisation bidimensionel d'un domaine en volumes élémentaires.

Où :

E: nœud « East »; *W*: nœud « West »; *N* : nœud «North »; *S* : nœud « South »; *P*: nœud considéré ; *w* : interface « West » du volume de contrôle (V_C) ; *e*: interface « East » du V_C; *n*: interface « North » du volume de contrôle (V_C) ; *s*: interface « South » du volume de contrôle (V_C) ; Δx : largeur du V_C étudié ; Δy : longueur du V_C étudié.

Chaque volume est délimité par : deux interfaces dans le cas monodimensionnel noté (e, w), quatre interfaces dans le cas bidimensionnel (e, w, s, n) et six interfaces dans le cas tridimensionnel (e, w, s, n, t, b). Chaque nœud principal P et limité par des nœuds voisins (E,W) dans le cas monodimensionnel, (E,W,S,N) dans le cas bidimensionnel, et (E,W,S,N,T,B) dans le cas tridimensionnel. En général, les V_C peuvent se chevaucher, mais comme cela entraîne des complications inutiles, nous considérons ici le cas de non-chevauchement [110].

On considère l'équation différentielle suivante, écrite pour un grandeur physique quelconque *G*. L'équation différentielle est intégrée dans chaque volume élémentaire finis. Pour calculer l'intégrale dans ce volume élémentaire l'inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, de puissance etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. Le résultat de discrétisation donne une équation algébrique qui est constituée par les valeurs nodales. Chaque V_C donne une équation pour calculer les valeurs nodales. Le nombre final (c'est-à-dire, après l'incorporation des conditions aux limites) de ces équations devrait être égal au nombre de V_C. Il s'ensuit que l'union de tous les volumes de contrôles couvre l'ensemble du domaine de calcul. Cette propriété fondamentale va permettre la mise en évidence des propriétés de conservation des flux de chaleur [110].



Où : *G* représente la grandeur à calculer (vitesse, pression...), *Γ* indique le coefficient de diffusion.
Si nous considérons le cas d'un écoulement axisymétrique et en absence du terme source S_φ,
l'équation s'écrira sous la forme suivante (avec φ = T) :

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(uG - \Gamma_G \frac{\partial G}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(vG - \Gamma_G \frac{\partial G}{\partial y} \right) = 0$$
(3.1)

Ou encore :

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = 0$$
(3.2)

Avec :

$$J_x = uG - \Gamma_G \frac{\partial G}{\partial x}$$
 et $J_y = vG - \Gamma_G \frac{\partial G}{\partial y}$ (3.3)

Nous allons l'intégrer à travers le volume de contrôle et par rapport au temps t.

$$\int_{s}^{n} \int_{w}^{e} \int_{t_{1}}^{t_{2}} \frac{\partial G}{\partial t} dt \, dx \, dy + \int_{s}^{n} \int_{w}^{e} \int_{t_{1}}^{t_{2}} \frac{\partial J_{x}}{\partial x} dt \, dx \, dy + \int_{s}^{n} \int_{w}^{e} \int_{t_{1}}^{t_{2}} \frac{\partial J_{y}}{\partial y} dt \, dx \, dy = 0$$
(3.4)

Pour intégrer cette équation, on suppose que :

- Á un instant donné, la température est uniforme à travers le volume de contrôle ;
- Pour un 'x ' donné ou un 'y ' donné, le flux est uniforme le long de la face ;
- On prend un schéma implicite pour assurer une stabilité de ce schéma dans le temps.



Figure 3. 2: Volume de contrôle à travers lequel se fait l'intégration.

Après intégration, on aboutit à :

$$\left[(G)_p - (G)_p^0 \right] \Delta x \, \Delta y + \int_s^n (J_e - J_w) dy \, \Delta t + \int_w^e (J_e - J_w) dx \, \Delta t = 0$$
(3.5)

Soit :

$$\left[(G)_p - (G)_p^0 \right] \frac{\Delta V}{\Delta t} + (J_e - J_w) + (J_n - J_s) = 0$$
(3.6)

Avec :

 ΔV : volume entourant le nœud $P(\Delta V = \Delta x \Delta y)$;

 $(G)_p$: valeur au temps $t + \Delta t$;

 $(G)_p^0$: valeur au temps t.

$$J_e = \int_{s}^{n} J_e dy = \left[uG - \Gamma_G \frac{\partial G}{\partial x} \right]_e \Delta y$$
(3.7)

$$J_{w} = \int_{s}^{n} J_{w} dy = \left[uG - \Gamma_{G} \frac{\partial G}{\partial x} \right]_{w} \Delta y$$
(3.8)

$$J_n = \int_{w}^{e} J_n dx = \left[vG - \Gamma_G \frac{\partial G}{\partial y} \right]_n \Delta x$$
(3.9)

$$J_{s} = \int_{w}^{e} J_{s} dx = \left[vG - \Gamma_{G} \frac{\partial G}{\partial y} \right]_{s} \Delta x$$
(3.10)

3.2.3. Utilisation de la CFD

Les logiciels de simulation numérique utilisés en dynamique des fluides numérique (CFD) sont conçus autour d'algorithmes numériques qui permettent de résoudre des problèmes liés à l'écoulement des fluides. Pour rendre leur utilisation plus conviviale et efficace, les logiciels commerciaux de CFD intègrent des interfaces sophistiquées qui permettent aux utilisateurs d'entrer les paramètres du problème à résoudre et d'examiner les résultats obtenus. En général, ces logiciels se composent de trois éléments principaux : un préprocesseur, un solveur et un post-processeur [111].

3.2.3.1. Préprocesseur

Le préprocesseur consiste à créer un modèle représentatif du domaine physique avant sa résolution numérique. Cette étape comprend les étapes suivantes :

- Créer le domaine d'étude;
- Discrétiser le domaine : le maillage ;
- Choisir le phénomène physique qui nécessite d'être résolu ;
- Définir les propriétés du fluide ;
- Spécifier les conditions aux limites .

Dans la phase de préprocesseur, la géométrie et la taille des éléments utilisés dans un domaine d'écoulement revêtent une importance cruciale tant pour la précision des résultats que pour le temps de calcul nécessaire à la résolution du problème. A titre d'exemple, dans une simulation en trois dimensions (3D) avec des éléments hexaédriques, le nombre d'éléments est plus faible que si les éléments utilisés sont des tétraèdres et les éléments peuvent être alignés avec l'écoulement. En conséquence, le temps de simulation est réduit, et les résultats sont plus précis.[112].

3.2.3.2. Solveur

Cette étape porte sur la résolution des équations gouvernantes le problème en prenant en considération les hypothèses et les conditions aux limites déterminées dans la phase précédente.

ANSYS Fluent utilise l'approche du volume de contrôle. L'algorithme numérique de cette méthode consiste en trois étapes [112]:

- Les équations de l'écoulement du fluide sont intégrées sur l'ensemble des volumes de contrôle du domaine ;
- Les équations non linéaires sont linéarisées et les équations résultantes sont converties en équations algébrique ;
- Les équations sont solutionnées algébriquement grâce à une méthode itérative.

3.2.3.3. Post-processeur

C'est un moyen pour visualiser les résultats et produire les images et animations CFD. Il existe plusieurs méthodes pour présenter les résultats tels que les tracés des vecteurs, des contours et des surfaces 2D et 3D. Afin de prouver la fiabilité du solveur et s'assurer la précision des résultats obtenus, il est demandé de valider la démarche poursuivie en comparant les résultats obtenus avec d'autres résultats analytiques, numériques ou expérimentaux. Pour cette raison, la dernière partie de ce chapitre s'intéresse à la vérification et la validation du solveur Ansys fluent en comparant les résultats numériques à des résultats analytique et d'autres expérimentales.

3.3. Présentation du solveur ANSYS Fluent (procédure de calcul)

Le logiciel utilisé dans notre cas 'Ansys 20.R1' est un outil moderne bien adapté à la modélisation de l'écoulement de fluides et de transfert thermique dans des géométries complexes. Dans ce qui suit une petite présentation de ce dernier sembler importante pour simplifier au lecteur la compréhension de la suite du travail.



Figure 3. 3: Fenêtre principale du logiciel Ansys 20.R1.

La plupart des simulations dans ANSYS Workbench sont définies par trois caractéristiques principales : type physique, type d'analyse, et type du solveur. La méthode utilisée pour lancer l'application de maillage détermine les paramètres par défaut de l'analyse et du solveur. Dans le cadre de ce projet on définit les paramètres d'une analyse en mécanique des fluides. Le solveur '' Fluent'' sera définit par défaut.

Ansys 20.R1 est destiné à la résolution numérique d'une large variété de problèmes physique en général et de mécanique en particulier, vont de l'automobile au biomédical en passant par l'aérospatial, les procédés chimiques et de matériaux, l'électronique... Pour la simulation numérique de notre problème, la présente étude utilise le solveur Ansys-Fluent intégré dans le logiciel global Ansys 20.R1, développé pour la simulation numérique des problèmes en mécanique des fluides.

Ansys Fluent est un solveur destiné à la résolution numérique des problèmes de la mécanique des fluides en utilisant la méthode des volumes finis. Grâce au différents modèles physiques et schémas numériques y intégrés, le solveur permet de modéliser et simuler la quasitotalité des problèmes de base de la mécanique des fluides, telle que les phénomènes de transfert de chaleur, la turbulence et les réactions. Il permet aussi d'adapter ou d'augmenter au besoin l'interface en écrivant des macros et des fonctions de menu, afin d'automatiser certaines procédures, qui permettent par exemple de spécifier des conditions initiales et les conditions aux limites, d'ajouter des termes sources à certaines équations, de modifier des lois de comportement au niveau des parois. Parlant des performances du solveur, Ansys Fluent fournit l'exactitude, la fiabilité, la vitesse et la flexibilité dans des domaines d'écoulement potentiellement complexes. A cause de ses hautes capacités de calcul, il peut modéliser les différents régimes d'écoulements des différents types des fluides.

Généralement, la simulation d'un problème en mécanique des fluides par Ansys Fluent se fait de la manière suivante :

- Géométrie : création et modélisation de la géométrie qui représente le domaine d'écoulement.
- Maillage : Discrétiser le domaine, c'est-à-dire le découper en mailles de calcul.
- Configuration : Choisir les modèles physiques, les hypothèses adaptées au problème et les conditions aux limites.
- Solutions : les équations aux dérivées partielles sont résolues par le solveur après avoir y discrétisée et mise sous forme algébrique. Cette résolution se fait par un algorithme itératif jusqu'à la convergence.
- Résultats : Visualiser et analyser les résultats.

Les applications utilisées dans chaque étape sont données dans le tableau 3.1.

Création de la géométrie	Ansys Design Modeler	
Maillage	Ansys Meshing	
Mise en données et simulation	Ansys Fluent	
Résultats CFD		
Post-traitement	CFD Post	





Figure 3. 4: Projet de simulation sous Ansys-Fluent.

Comme il a été mentionné précédemment, le solver Ansys Fluent utilise la méthode des volumes finis pour la discrétisation et la résolution des équations de conservation. La procédure se fait de la manière suivante :

- Division du domaine en volumes de contrôle discrets en utilisant une grille de calcul ;
- Intégration des équations gouvernantes sur les volumes de contrôle individuels afin d'obtenir un système d'équations algébriques en fonction des variables dépendantes discrètes (inconnues) (vitesses, pression, température ...);
- Linéarisation des équations discrétisées et résolution du système d'équations linéaire résultant.

3.3.1. Procédure de résolution numérique par « Fluent »

Afin d'utiliser le solveur Ansys fluent pour la discrétisation et la résolution numérique des équations intégrales (équations de conservation de masse, de quantité de mouvement et de l'énergie), les frontières du domaine d'étude (géométrie crée dans une étape précédente) doivent être bien définis comme première étape. Pour le maillage du domaine d'étude, on a le choix de le générer dans une étape indépendante en utilisant Ansys Meshing ou bien d'utiliser le solveur Ansys fluent lui-même. Une fois que les étapes citées précédemment sont réalisées, le problème peut être configuré et résolus facilement. Le schéma ci-dessous résume la procédure de résolution suivis en utilisant le solveur Ansys Fluent.



Figure 3. 5: Procédure de résolution en utilisant le solveur Ansys Fluent.

3.3.1.1. Choix de la formulation du solveur

En utilisant Ansys Fluent, on a le choix entre deux types de solveurs: le solveur basé sur la pression et le solveur basé sur la densité. Le premier est destiné à la simulation des problèmes traitant les écoulements incompressibles où légèrement compressibles tandis que le deuxième a été conçu pour les écoulements compressibles à grande vitesse.

a) Solveur basé sur la pression « Pressure-based solver »

En choisissant le solveur basé sur la pression, deux types d'algorithme peuvent être exploité selon la nature du problème étudié. '' The Pressure-Based Segregated Algorithm '' est basé sur la résolution séquentielle des équations gouvernantes qui sont séparées les unes des autres. ''The Pressure-Based Coupled Algorithm '' est un deuxième algorithme qui résout les équations gouvernantes couplées les unes aux autres. L'efficacité en mémoire est l'avantage principale de l'algorithme séparé puisqu'il stocke les équations discrétisées une seule fois en mémoire [70]. Par contre, la convergence de la solution est relativement lente car les équations sont résolues de manière découplée. L'algorithme couplé nécessite plus d'espace mémoire, mais la convergence est améliorée par rapport au solveur couplé.

b) Solveur basé sur la densité «Density-based solver »

En utilisant le solveur basé sur la densité, les équations gouvernantes peuvent être résolues avec soit une formulation couplée implicite, soit une formulation couplée-explicite. La première formulation utilise les valeurs existantes et inconnues des éléments voisines pour calculer la valeur inconnue dans un élément particulier, pour une variable donnée. Les équations doivent ensuite être résolues simultanément car les différentes valeurs apparaissent dans plusieurs équations du système. La deuxième formulation n'utilise que les valeurs existantes les valeurs existantes, ce qui signifie que les équations ne doivent pas être résolues simultanément.

3.3.1.2. Schéma de discrétisation

En utilisant le solveur « Fluent », les variables stockées au centre de chaque cellule du maillage sont interpolées aux faces du volume de contrôle. Plusieurs schémas sont proposés pour la discrétisation des termes convectifs des équations gouvernantes. Pour les termes visqueux, la discrétisation se fait d'une manière implicite avec un schéma du second ordre pour augmenter la précision. Généralement, le schéma du second ordre « Upwind » est le plus adapté pour les écoulements convectifs, néanmoins plusieurs choix existent :

- Le schéma « QUICK » (Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinetics), ce schéma est plus précis que le schéma du second ordre pour les écoulements rotationnels et tourbillonnaires (Swirling) dans le cas d'un maillage structuré. Cependant, il ne s'applique pas aux maillages non structurés.
- Le schéma « Power Law » : pour les écoulements à très bas nombre de Reynolds, ce schéma est plus précis que le « First Order Upwind Scheme ». Sinon il procure généralement le même degré de précision
- Schéma Upwind du premier ordre « First-Order Upwind »
- Schéma Upwind du second ordre « Second-Order Upwind »
- Schéma «Bounded Central Differencing »
- Schéma MUSCL « Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Laws»

3.3.1.3. Méthodes d'interpolation de la pression sur les faces

Pour l'interpolation de la pression, Fluent fournit une liste variée de méthodes d'interpolation. Cependant, pour tout type d'écoulement le schéma « standard » est le plus utilisé généralement. Les schémas d'interpolation proposés par le solveur Fluent sont résumés cidessous :

• Le schéma force de volume pondéré « Body-Force-Weighed » est recommandé pour les écoulements avec des forces de volume importantes (ex. convection naturelle).

- Le schéma « PRESTO » (Pressure Staggering Option) est adapté pour les écoulements hautement tourbillonnaires, à grande vitesse de rotation ou des écoulements fortement courbés.
- Le schéma au second ordre convient aux écoulements compressibles, il peut améliorer la précision dans le cas des écoulements incompressibles.
- Le schéma « Standard »
- Le schéma linéaire« Linear ».

3.3.1.4. Méthodes d'interpolations (Gradients)

Pour des schémas de discrétisation d'ordre élevé, l'évaluation des flux diffusifs et des dérivées de vitesse nécessite la détermination des gradients des variables sur les faces des éléments du maillage. Ces gradients sont calculés en utilisant une série de Taylor multidimensionnelle. Dans le cas du solveur ANSYS Fluent, les gradients sont calculés selon les méthodes suivantes :

- Green-Gauss Cell-Based;
- Green-Gauss Node-Based;
- Least-Squares cell-Based.

3.3.1.5. Méthode de couplage Pression-Vitesse

Si les vitesses sont définies aux nœuds d'un volume de contrôle ordinaire (comme les autres scalaires, pression, température), il est démontré qu'un champ de pression hautement non uniforme agira comme un champ uniforme sur les équations de quantité de mouvement discrétisées, Versteeg (1995). La solution passe par la définition des vitesses sur une grille décalée « Staggered grid » et l'emploi d'algorithmes tels que « SIMPLE » sert à assurer ce lien ou couplage entre la pression et la vitesse.

La famille d'algorithmes « SIMPLE » est réellement une procédure d'estimation et correction pour le calcul de la pression sur la grille décalée des composantes de la vitesse. Le solveur Fluent propose trois méthodes pour le couplage pression-vitesse dans le cas de la formulation « isolé ».

 Les deux premières, très similaires, sont la méthode « SIMPLE » (Semi-Implicit Method for a pressure Linked Equation) et la méthode « SIMPLEC » (Simple Consistent), cette dernière méthode se différencie de la première par le fait qu'on peut lui assigner un facteur de relaxation (correction) de pression proche de 1, ce qui accélère la convergence dans la plupart des cas, mais peut conduire à des instabilités de la solution si elle n'est pas choisie judicieusement.

- Méthode « PISO » (Pressure-Implicit with Splitting of Operation) qui fait partie des algorithmes de la famille "SIMPLE". Elle est recommandée pour les écoulements instationnaires ou pour les maillages à éléments très déformés.
- FSM « Fractional Step Method »: est recommandé pour des écoulements instationnaires. Elle est utilisée avec le schéma NITA et présente des caractéristiques similaires à celles du schéma PISO.

3.3.1.6. Initialisation

Le choix adéquat des conditions initiales et aux limites permet d'atteindre une solution stable et une convergence accélérée.

3.3.1.7. Critère de convergence

La convergence d'une solution itérative est déterminée à partir d'une condition spécifique pour les résidus appelée critère de convergence. On parle de convergence de la solution si la valeur des résidus d'équations normalisées pour les équations de la quantité de mouvement, de la continuité, de la turbulence et de la fraction volumique attient une valeur inférieure à 10⁻⁶. Cependant, ce critère ne suffit pas pour juger de la validité de la solution. Dans certains cas, le critère résiduel peut ne jamais être rempli même si la solution est valide et pour d'autres, la solution peut être incorrecte même si les résidus sont faibles.

L'équation ci-dessous représente le résidu de calcul Res :

$$Res = \sum_{ensemble \ des \ volumes} |a_W \phi_W + a_E \phi_E + S_u - a_P \phi_P|$$

Si le calcul converge complètement, la valeur de *Res* tend vers zéro. On essaie d'avoir une bonne convergence tout au long de la simulation et donc les critères sont rendus stricts afin d'obtenir un résultat précis. Le suivi de la convergence se fait avec les résidus.

Des instabilités numériques peuvent apparaître avec un problème mal posé, un maillage de mauvaise qualité et/ou des paramètres de solveur inappropriés et présentés comme des résidus en augmentation (divergents) ou «bloqués». Les résidus divergents impliquent un déséquilibre croissant dans les équations de conservation. Les principales solutions pour surmonter ces problèmes sont :

- Vérifier que le problème est bien posé ;
- Calculer une solution initiale en utilisant un schéma de discrétisation de premier ordre ;
- Diminuer les facteurs de sous-relaxation ;
- Remailler ou raffiner les cellules de la géométrie.

3.4. Vérification et validation du modèle numérique

Avec l'avènement du calcul numérique et de l'ingénierie assistée par ordinateur, ainsi qu'avec la sophistication croissante des outils associés au calcul numérique tels que le maillage et la visualisation, la nécessité de valider les méthodes de calcul numérique et de simulation est devenue de plus en plus cruciale, en particulier dans des secteurs présentant un risque élevé d'utilisation, tels que l'énergie nucléaire et l'aéronautique. Les préoccupations liées à l'évaluation et à la caractérisation des erreurs de prédiction des solutions, ainsi qu'au contrôle de la qualité des algorithmes et des codes de calcul, ont pris une importance croissante.

3.4.1. Concept de Vérification et de Validation (V&V)

Dans l'usage courant, les termes vérification et validation peuvent souvent être considérés comme des synonymes. Cependant dans le contexte de "Vérification" et 'Validation", il s'agit de deux termes techniques représentant deux concepts différents. La validation implique la comparaison entre les résultats d'un code de simulation et des données expérimentales du phénomène réel étudié. Son objectif est de déterminer si le code résout correctement les équations physiques pertinentes pour le problème en question. En revanche, la vérification consiste à comparer les résultats produits par un code à ceux d'une solution analytique ou d'un autre code déjà validé. Cette étape vise à confirmer que le modèle numérique intégré dans le code est en adéquation avec la méthode numérique spécifiée, et elle se concentre principalement sur la cohérence mathématique entre le code et le modèle analytique ou numérique.

3.4.1.1. Interet de la vérification

Bien que l'appellation 'Vérification' ne nomme qu'une seule activité, en réalité elle englobe deux activités distinctes de quantification d'erreurs et d'incertitudes.

- La vérification des codes : elle consiste à évaluer si le code converge bien vers la solution du modèle. Une procédure d'évaluation d'erreur est requise à partir d'une solution connue;
- La vérification des calculs : cette démarche utilise l'estimation d'erreur numérique afin d'associer un intervalle de confiance au résultat d'une simulation. Pour ce faire l'estimation d'erreur est faite, la plupart du temps dans un contexte où la solution exacte est inconnue, à partir de deux solutions de précisions différentes. Cette estimation numérique nécessite une vérification préalable du code et que le bon fonctionnement du code soit assuré;

3.4.1.2. Méthode de la solution exacte

Pour vérifier ou valider un logiciel, plusieurs méthodes ont été développées : méthode de la solution exacte, la comparaison à deux des solutions connues d'EDP, la méthode des solutions manufacturées et la méthode de comparaison des codes .

92

La méthode de la solution exacte utilisée dans ce travail consiste à comparer les résultats obtenus par le solveur numérique avec une solution analytique exacte lorsque celle-ci est disponible. Cette approche permet d'évaluer la précision de la résolution numérique en calculant la différence entre la solution numérique et la solution exacte. Elle présente l'avantage de servir de vérification pour s'assurer que les équations sont correctement résolues par le solveur, identifiant ainsi toute erreur potentielle dans le code qui pourrait affecter la solution ou la convergence. Cependant, il convient de noter que l'obtention d'une solution analytique exacte n'est pas toujours possible, car elle est limitée à un nombre restreint de problèmes pour lesquels de telles solutions existent. Dans la plupart des cas, l'obtention d'une solution analytique nécessite des approximations simplificatrices. Malgré cela, cette méthode demeure très fiable, notamment lors de la phase de programmation et comme première étape de vérification. Elle réduit le caractère subjectif de l'analyse des résultats et permet de calculer une estimation de l'erreur en comparant la solution analytique à la solution numérique. De plus, elle est particulièrement pertinente lors de la familiarisation avec un nouveau code, notamment pour la formation des utilisateurs. Les tests effectués visent à garantir que le modèle numérique se comporte de manière adéquate par rapport au modèle symbolique, en vérifiant des aspects tels que la conservation de la masse, la conservation de la quantité de mouvement et la conservation de l'énergie sur l'ensemble du domaine, ainsi que l'application correcte des conditions aux limites spécifiées.

3.4.2. Vérification du solveur Ansys Fluent

3.4.2.1. Résolution analytique

Afin de réaliser l'étape de la vérification, nous avons choisi d'étudier le problème de Poiseuille. C'est un problème bien connu en mécanique des fluides qui décrit l'écoulement d'un fluide visqueux dans une conduite cylindrique horizontale. On considère la géométrie illustrée dans la figure 3.6, dont les dimensions sont résumées dans le tableau 3.2. A cause de la différence de température entre la paroi (exposée à un flux de chaleur) et le fluide, les transferts thermiques sont mis en jeux.



Figure 3. 6 : Schéma du problème étudié.

D _h	L	Е
0.1 mm	10 mm	0.01 mm

Tableau 3. 2: Dimensions caractéristiques.

Le problème de Poiseuill est connu parmi les problèmes qui ont une solution analytique bien défini. Donc comme première étape il est nécessaire de trouver cette solution à partir des équations qui le décrivent, afin de la comparer avec la solution numérique ultérieurement. Avant d'établir les équations décrivantes le problème, il faut poser un certain nombre d'hypothèses pour les simplifier :

- ↓ Le fluide est newtonien et incompressible ;
- 4 L'écoulement est laminaire, permanent et totalement développé.
- 4 Les forces de pesanteur sont négligeables.

Selon ces hypothèses, les équations de la dynamique régissantes le problème en coordonnées cylindriques prennent la forme suivante :

Equation de continuité :

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(ru_r) + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$
(3.11)

Equations de Navier-Stokes :

$$\rho\left(u_r\frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z\frac{\partial u_r}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(ru_r)\right) + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2}\right]$$
(3.12)

$$\rho\left(u_r\frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z\frac{\partial u_z}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u_z}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2}\right]$$
(3.13)

A partir des equations (3.11, 3.12 et 3.13), le profil de la vitesse est obtenu en appliquant un certain nombre de conditions aux limites. En raison de la symétrie autour de l'axe centrale (z) on a :

$$\left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \tag{3.14}$$

A cette conditions s'ajoute la condition de non-glissement à la paroi (condition d'adhérance) :

$$u(R) = 0 \tag{3.15}$$

La résoltion analytique du système d'équations précédent, donne un profile parabolique de la vitesse selon la direction radiale :

$$u(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{\partial p}{\partial z} (R^2 - r^2) = \frac{p_e - p_s}{4\mu L} (R^2 - r^2)$$
(3.16)

 p_e : pression d'entrée ;

 p_s : pression de sortie.

Le débit volumique dans la conduite est le flux du vecteur vitesse à travers une section transverse quelconque :

$$Q_V = \int_0^R v(r) 2\pi r dr = \int_0^R \frac{p_e - p_s}{4\mu L} (R^2 - r^2) 2\pi r dr$$
(3.17)

D'où l'expression du débit volumique :

$$Q_V = \frac{\pi R^4}{8\mu L} (p_e - p_s)$$
(3.18)

La différence de pression $\Delta p = p_e - p_s$ est le « moteur » de l'écoulement. Encore appelée ' perte de charge ', elle est proportionnelle au débit volumique (c'est la loi de Poiseuille) :

$$\Delta p = 8\mu \frac{Q_V}{\pi R^4} L \tag{3.19}$$

La résolution complète de ce problème nécéssite l'adition de l'équation de la chaleur afin de décrire l'aspect thermique du phénomène. Selon les approximations citées dans la section précédente, l'équation de la chaleur s'écrit de la manière suivante :

$$u\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\alpha}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)$$
(3.20)

En écoulement totalement développé dans une conduite de section circulaire soumise à un flux de chaleur constant, le gradient de température est indépendant de z et la forme du profil de température ne change donc pas le long de la conduite.

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\varphi_p P}{\dot{m} C_p} = \frac{2\varphi_p}{\rho u_m C_p R} = cst \qquad (3.21)$$

Si la conduction thermique dans la direction z est prise en considération dans la dérivation de l'equation (3.20), cela donnerait un terme supplémentaire $\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$, qui serait égal à zéro puisque $\frac{\partial T}{\partial z}$ est constant et donc T = f(r). Par conséquent, l'hypothèse selon laquelle il n'y a pas de conduction thermique axiale est vérifiée exactement dans ce cas.

$$\frac{4\varphi_p}{\lambda R} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right)$$
(3.22)

La solution souhaitée est obtenue en appliquant les conditions aux limites suivantes :

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{r=0} = 0 \ et \quad T(R) = T_s \tag{3.23}$$

On obtient le profile de température selon la direction radiale :

$$T(r) = T_s - \frac{\varphi_p R}{\lambda} \left(\frac{3}{4} - \frac{r^2}{R^2} + \frac{r^4}{4R^4} \right)$$
(3.24)

3.4.2.2. Résolution numérique

Afin de simuler le problème de Poiseuill dans la géométrie présentée dans la figure 3.6, on a choisit l'eau comme fluide de travail. Ses propriétés thermophysiques sont citées dans le tableau 3.3. L'eau pénètre la conduite avec une vitesse de 0,006009 m/s et une température uniforme (298 K). Les parois de la conduite sont maintenu à une condition de flux de chaleur constant (2486,896 W/m²). Le but de choisir une vitesse faible traduisant un nombre de Re=1 est

de minimiser la longueur d'entrée et réaliser l'hypothèse de l'écoulement totalement développé pour obtenir la solution numérique la plus proche de la solution analytique.

$ ho (kg/m^3)$	$\mu \left(kg/m.s\right)$	$c_p(J/kg.K)$	$\lambda(W/m.K)$
990, 1	0,595.10 ⁻³	4180	0,637

Tableau 3. 3: Propriétés thermophysiques de l'eau.

3.4.2.3. Résultats

Les résultats obtenus de la simulation du problème présenté dans la section 3.4.2.2 sont présentés et comparés avec ceux obtenus analytiquement dans cette partie. En plus, les résultats sont présenté sous forme de courbes et contours des grandeurs physiques classiques : vitesse, pression et température. Les courbes analytiques sont tracées à partir des formules obtenues précédement.



Figure 3. 7 : (a) Vitesse radiale, (b) chute de pression.

D'après les figures 3.7 et 3.8, on peut tirer qu'il y'a un bon accord entre les résultats analytiqus et ceux obtenus en utilisant le solveur Ansys fluent. La différence entre les courbes peut étre considérée comme négligeable. Cet accord indique la fiabilité du sloveur et assure que le modèle numérique implémenté dans le code correspond à la description formelle de la méthode numérique.



Figure 3.8: (a) Température radiale, (b) Température axiale.

3.4.3. Validation

En plus de l'étude de vérification réalisée et présentée ci-dessus, une autre étude de validation est réalisée afin de s'assurer de l'exactitude de nos résultats et renforcer notre travail. Pour valider le modèle numérique, nos résultats ont été comparés à ceux obtenus par Ben Mansour et al. [113] dans leur étude expérimentale, pour le cas de la convection mixte d'eau dans un tube circulaire incliné, pour une alimentation de P = 298 W et un débit massique de m' = 1.8 g/s. Les résultats sont également comparés à ceux obtenus par Ben Mansour et al. [114] dans leur étude numérique, pour développer la convection mixte laminaire de l'eau, à l'intérieur d'un tube incliné soumis à un flux de chaleur uniforme ($Re = 100, Gr = 10^4$). La figure 3.9 présente les résultats comparés en termes de température de mélange Tb et température. D'une part, d'après la figure 3.9.a, on remarque une légère différence entre nos résultats et ceux obtenus expérimentalement, plus précisément dans les courbes de température de paroi Tw. Cependant, on voit qu'il y a un bon accord entre les courbes de température de mélange Tb.

La comparaison de la température *Tb* avec les résultats numériques de Ben Mansour et al. [114] montre une légère différence pour $0 < z^* < 0.05$ (figure 3.9.b). Cependant, la différence est remarquable pour $z^* < 0.05$ (zone d'entrée). Cette différence est dû à la condition de vitesse imposée à l'entrée de la conduite : au contraire à notre cas où on a imposé une vitesse constante, le régime est totalement développé dans l'étude de Ben Mansour et al. [114]. Mais, en général les courbes *Tb* et *Tw* montrent la même tendance que celles obtenues dans le travail numérique de Ben Mansour et al. [114].



Figure 3. 9 : Validation du modèle numérique [113, 114].

3.5. Simulation

3.5.1. Présentation de la géométrie

Cette section présente la géométrie réalisée et utilisée dans toutes les simulations de cette étude. Comme il est mentionné précédemment, la géomètrie du problème est un éspace annulaire inclinée d'un angle α par rapport au plan horizantale (plus de tétails sur la géométrie sont donnés dans la section 2.5.1). Il s'agit d'une géométrie commune et essentielle pour les dispositifs d'écoulement de fluide et de transfert de chaleur dans les systèmes d'ingénierie. Elle a beaucoup d'applications telles que dans les échangeurs de chaleur, les turbines à gaz, les réacteurs nucléaires, les systèmes d'énergie solaire...Comme le problème étudié est un phénomène de la convection mixte, la géométrie réalisé représente la zone fluide uniquement. Les phénomènes de la conduction dans les parois sont négligeables. Le modèle géométrique est réalisé à l'aide de 'Design Modeler'. C'est un espace annulaire incliné avec un angle de 30° (figures 3.11.a). Afin de déterminer l'effet de l'angle d'inclinaison sur les grandeures physiques, une deuxieme géométrie dont l'angle d'inclinaison est 60° est encore réalisée (figure 3.11.b).



Figure 3. 10 : Conduite annulaire.



Figure 3. 11 : Conduite annulaire inclinée : (a) 30°, (b) 60°.

3.5.2. Réalisation du maillage

La qualité de maillage joue un rôle très important dans la précision et la stabilité des calculs numériques. L'optimisation du maillage consiste à choisir celui qui converge et qui consomme le moins possible de temps CPU. Pour cette raison, l'étude de l'effet du maillage est une étape très intéressante dans n'importe quel processus de simulation, pour assurer l'indépendance entre les résultats obtenus et le maillage choisi. Le problème adopté pour étudier l'effet du maillage est un problème de convection mixte dans la géométrie considéré avec une condition de rayonnement solaire imposé à la paroi externe correspondant à un nombre de Richardson égal à 0.5 (Ri=0.5). Un maillage structuré, à base d'éléments hexaédriques, a été choisi et utilisé lors des différentes simulations effectuées dans ce travail. Le maillage hexaédrique est le maillage le plus adéquat à la géométrie annulaire.



Figure 3. 12 : Maillage choisis.

Comme il est indiqué dans le tableau 3.12, les valeurs du nombre de Nu et du coefficient de frottement moyens, calculées à la paroi externe sont adoptées pour examiner l'effet du maillage. Le maillage (20×46×400) est celui utilisé dans tous les simulations réalisées (figure 3.11).

Taille du maillage	$r imes \theta imes z$	<u>C</u> f	Nu
Maillage 1	$5 \times 20 \times 400$	0,106	4,687
Maillage 2	$8 \times 46 \times 400$	0,110	4,690
Maillage 3	$10 \times 46 \times 400$	0,112	4,614
Maillage 4	20 imes 46 imes 400	0,112	4,614
Maillage 5	$20 \times 46 \times 500$	0,112	4,614
Maillage 6	$25 \times 46 \times 500$	0,113	4,602

Tableau 3. 4 : Analyse de l'effet du maillage.

En plus de l'étude de l'effet du maillage, on peut réaliser une vérification de la qualité du maillage dans le solveur Fluent, en faisant le calcul de deux paramètres bien précis : la qualité orthogonale et le Jacobien. La qualité orthogonale est un critère très important, calculée pour chaque cellule à l'aide du vecteur normal de face $\vec{A_i}$, pour chaque face ; le vecteur du centre de la cellule au centre de chacune des cellules adjacentes, $\vec{c_i}$; et le vecteur du centre de la cellule à chacune des faces $\vec{f_i}$. Pour chaque face, les cosinus des angles $(\vec{A_i}, \vec{c_i})$ et $(\vec{A_i}, \vec{f_i})$, sont calculés. Et la plus petite valeur des cosinus calculées représentent l'orthogonalité de la cellule. Enfin, la qualité orthogonale est la même que l'orthogonalité. La plage de la qualité orthogonale est de 0 à 1, on parle de bon maillage si la qualité orthogonale est proche de 1. Si cette dernière est proche de 0, le maillage est mauvais. Le schéma de la Figure 3.12.a ainsi que le tableau 3.5 représentent la qualité orthogonale du maillage choisis. D'après le tableau 3.5, on trouve qu'elle est dans la moyenne de 0,99793 pour tous les éléments du domaine d'étude.

Un autre critère de validité nécessaire pour la simulation est le jacobien mis à l'échelle, qui varie entre 0 et 1 pour les éléments valides. Le rapport jacobien est une mesure de la forme d'un élément donné par rapport à celle d'un élément idéal. Il s'agit du minimum du déterminant de la matrice jacobienne divisé par la norme des trois vecteurs colonnes. L'objectif est d'avoir des hexaèdres dont le jacobien mis à l'échelle tend vers 1, ce qui correspond à un pavé (tous les angles sont droits). Il existe deux façons de calculer le rapport jacobien : soit en fonction des nœuds d'angle (points nodaux), soit en fonction des points de Gauss (points d'intégration). D'après la figure 3.13.b et le tableau 3.5, on remarque que la valeur de ce paramètre est dans la moyenne de 0,9688 pour tous les éléments du domaine. La valeur de ces deux paramètres montre une excellente qualité du maillage.



Figure 3. 13 : Paramètres du maillage choisi (a) Qualité orthogonale, (b) Rapport de jacobien (points de Gauss).

Paramètres du maillage	Qualité orthogonale	Rapport de jacobien (points de Gauss)		
Min	0.9975	0.9465		
Max	0.9855	0.9806		
Moyenne	0.9979	0.9688		
Ecart type	2.6315e-004	9.8765e-03		

Tableau 3. 5 : Paramètres du maillage.

3.5.3. Configuration fluent

Le solveur Fluent est utilisé pour simuler le problème présenté dans la section 2.5. Comme l'écoulement est supposé incompressible et permanant, le solveur basé sur la pression "Pressurebased solver" est chois et utilisé pour déterminer le champ de pression à partir de la résolution des équations de continuité et de quantité de mouvement en régime permanant. Parmi les modèles offerts par le solveur Fluent, le régime laminaire est choisi et l'équation de l'énergie est activée afin d'introduire les phénomènes de transfert thermique dans le processus de calcul.

Afin de modéliser les rayonnements solaires, l'algorithme ' Solar Ray Tracing ' est choisi parmi les modèles 'Solar Load' intégrés dans le solveur. Comme première étape, l'utilisation de cet algorithme nécessite l'introduction de la position du soleil, la direction du faisceau solaire et les valeurs de l'irradiation solaire directe et diffuse. Ces paramètres sont calculés à l'aide du calculateur solaire couplé au solveur Ansys Fluent en introduisant l'heure, la date, la position géographique (tableau 3.6) et l'orientation du maillage. Après, les paramètres calculés par le calculateur solaire sont utilisés comme données d'entrée dans l'algorithme Solar Ray Tracing, utilisé pour estimer l'énergie d'illumination directe résultant du rayonnement solaire incident. Cet algorithme prend un faisceau modélisé à l'aide du vecteur de position du soleil et des paramètres d'éclairage, l'applique à la partie supérieure de la paroi externe, effectue une analyse d'ombrage face à face et calcule le flux de chaleur sur la face limite à l'aide de l'expression du flux radiatif. Le flux de chaleur résultant (tableau 3.7) est ajouté au processus de calcul par Fluent comme un terme source dans l'équation d'énergie.

Longitude	Latitude	Fuseau horaire		
3,78 °	32,9 °	G+1		

Tableau 3. 6 : Paramètres de la position géographique.

Lors de la configuration du problème, la chaleur spécifique et le coefficient d'expansion thermique sont pris comme des valeurs constantes. La variation de la densité est estimée en utilisant l'approximation de Boussinesq. Concernant la conductivité thermique et la viscosité dynamique, elles sont introduites sous forme de polynômes de degré 1 en utilisant les modèles présentés dans la section 2.5.2.

Suivant les hypothèses choisis, les rayonnements solaires sont imposés à la partie supérieure de la paroi externe uniquement, le reste du domaine (section d'entrée, section de sortie, partie inferieur de la paroi externe et la paroi interne) est isolé de ces rayonnements.

Tenant en compte les conditions aux limites, l'entrée du domaine de calcul est décrite avec des valeurs constantes de la vitesse (vitesse correspondante à Re=300) et la température (298 K). La paroi interne ainsi que la partie inférieure de la paroi externe sont maintenues adiabatiques, traduisant un flux thermique nulle à ces endroits. Sur la partie supérieure de la paroi externe, la modélisation de la condition du rayonnement solaire implique l'introduction de l'émissivité externe et la température du rayonnement (correspondante au nombre de Ri choisi). En plus, la paroi doit être choisie comme un corps 'semi transparent' et les propriétés radiatives de la paroi à savoir l'absorptivité et la transmitivité sont déterminées. A la sortie, la pression est considérée nulle. Les valeurs du flux thermique imposé à la paroi externe sont données dans le tableau 3.7.

L'algorithme SIMPLE est sélectionné pour résoudre les équations de continuité et de quantité de mouvement. L'équation exige aussi que la valeur de la pression soit à la face entre les cellules donc on doit faire une interpolation en utilisant le schéma "PRESTO" (Pressure Staggering Option). Le schéma PRESTO ! utilise l'équation de continuité discrète pour un volume de contrôle "décalé" de la face pour calculer la pression "décalée". Le principe de cette procédure est similaire aux schémas de grille décalées utilisées avec des mailles structurées [115, 116]. Cet algorithme est le plus adéquat dans les problèmes de convection naturelle et mixte [117].

Le schéma d'interpolation 'Second Order Upwind' est sélectionné pour la discrétisation spatiale des équations de la quantité de mouvement et de l'énergie. Le critère de convergence est égal à 10⁻⁶ pour la continuité et les composantes de vitesse et l'énergie.

F	Ri	0.3	0.7	1	1.3	1.7	2
Eau pure	<i>φ</i> =0%, <i>α</i> =30°	852,507	1985,82	2838,12	3686,03	4819,51	5669,74
	<i>φ</i> =0%, α=60°	852,449	1985,06	2835,98	3685,78	4818,85	5670,23
	<i>φ</i> =1%, <i>α</i> =30°	600,656	1399,29	1999,26	2598,02	3397,2	3996,55
Eau/ZnO	<i>φ</i> =1%, <i>α</i> =60°	600,884	1399	2000,82	2597,58	3396,72	3995,86
Luu/Liit	<i>φ</i> =2%, α=30°	605,035	1409,36	2012,21	2615,06	3419,01	4021,82
	<i>φ</i> =2%, <i>α</i> =60°	603,92	1407,86	2011,6	2614,76	3418,51	4022,64
Eau/Ag-ZnO	<i>φ</i> =1%, <i>α</i> =30°	1404,21	3274,2	4676,23	6078,86	7947,42	9357,98
	<i>φ</i> =1%, <i>α</i> =60°	1404,32	3273,28	4677,46	6079,38	7947,56	9350,53
	<i>φ</i> =2%, <i>α</i> =30°	2150,7	5015,03	7162,38	9310,52	12175,2	14324,1
	<i>φ</i> =2%, <i>α</i> =60°	2150,22	5014,28	7161,97	9311,35	12174,9	14324,2

Tableau 3.7 : Valeurs du flux radiatifs (W. m⁻²).
3.6. Conclusion

L'enchainement suivi dans ce 3^{ème} chapitre a visé à prouver la fiabilité du solveur Ansys Fluent en tant qu'outil numérique commercial, dans la résolution des problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques. Les différentes étapes de simulation (réalisation de la géométrie, génération du maillage et configuration fluent) ont été détaillées afin de simplifier aux lecteurs la compréhension des résultats obtenues qui représentent la matière du 4^{ème} chapitre.

CHAPITRE 4. RESULTATS : DISCUSSION ET INTERPRETATION

Chapitre 4 : Résultats : discussion et interprétation 4.1. Introduction

Le présent chapitre est consacrée à la représentation des résultats obtenus de la simulation du problème présentée dans la partie 2.7 avec les interprétations qui conviennent. Il s'agit du phénomène de la convection mixte associée à l'écoulement du nanofluide eau/ZnO ainsi que son hybride eau/Ag-ZnO avec des concentrations volumiques de 0%, 1% et 2%, dans une conduite annulaire inclinée d'un angle α (30° et 60°). La partie supérieure de la paroi externe est soumise à des rayonnements solaires tandis que la partie inférieure et la paroi interne sont considérées adiabatiques. Pour mieux comprendre le comportement dynamique et thermique des nanofluides étudiés, les grandeurs physiques à savoir la vitesse, la température, le coefficient de frottement et le nombre de Nu, sont présentés sous forme de courbes, contours et vecteurs. L'effet de la concentration volumique des nanoparticules est présenté en premier lieu. Ensuite, pour chaque nanofluide hybride utilisé (1% et 2%), les effets du nombre de Ri et de la distribution des rayonnements solaires sont présentés pour les deux angles d'inclinaison 30° et 60°. Enfin nous présentons l'effet de l'angle d'inclinaison sur les grandeurs physiques pour trois valeurs du nombre de Ri (0.3, 1 et 1.7). Les variations radiales sont présentées pour z*=0.8 tandis que les variations axiales (suivant z^{*}) sont présentées pour r^{*}=0.5. En plus, seul le nanofluide hybride eau/Ag-ZnO et considéré dans cette représentation.

4.2. Présentation des résultats et interprétation

4.2.1. Effet de la concentration volumiques des nanoparticules

La figure (4.1) représente la variation axiale ($r^{*}=0.5$) et radiale ($z^{*}=0.8$) de la température pour un nombre de Ri=0.3. Les rayonnements solaires imposés à la partie supérieure de la paroi externe créent une différence de température considérable entre la paroi et le fluide qui pénètre la conduite avec une température uniforme. Cet écart de température génère un échange thermique par convection le long de la conduite ainsi que le développement d'une couche limite thermique. D'après les courbes de la figure (4.1), on remarque que la température est variable dans les deux sens axial (axe z^{*}) et radial de l'écoulement. De plus, on constate que la relation entre la température et la concentration volumique est directement proportionnelle, c'est-à-dire l'augmentation de la concentration volumique entraine une augmentation de la température. Les figures montrent aussi une forte liaison entre la température et le type des nanoparticules dispersées dans le fluide de base. A la sortie de l'espace annulaire, le nanofluide eau/ZnO a atteint la température la plus faible suivie de l'eau pure puis son hybride eau/Ag-ZnO. La signification de cet ordre de température est interprétée par le sens des propriétés thermophysiques ; pour les faibles concentrations (1%, 2%), la conductivité thermique de l'eau/ZnO est comparable à celle de l'eau pure [102].



Figure 4. 1 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la température : (a) axiale,



Figure 4. 2 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la température : (a) axiale,



Figure 4.3 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la température : (a) axiale, (b) radiale (Ri=2, θ =90°, α =30°).

Pour des valeurs plus élevées du nombre de Ri (1 et 2), les figures (4.2) et (4.3) montrent que l'effet de ce dernier est plus important sur le profile axiale de la température. D'après les figures, cet effet est plus clair sur la température de l'eau pure et l'eau/Ag-ZnO. Pour $z^* > 0.1$, on remarque que la pente des courbes augmente avec l'augmentation du nombre de Ri. Ce résultat indique que l'effet de la convection naturelle est de plus en plus important en augmentant le nombre de Ri. Concernant la température radiale, on remarque que le comportement thermique des différents fluides utilisés est conservé suivant le sens radiale de l'écoulement ; l'effet du nombre de Ri est faible.

Le changement de l'angle d'inclinaison de la conduite de 30° à 60° montre que son effet sur les quantités thermique est très important. Pour $0.1 < z^* < 0.425$, la figure (4.4.a) montre que la température de l'eau/ZnO est plus élevée à celle de l'eau et l'eau/Ag-ZnO respectivement. Pour $z^* = 0.425$, on remarque l'intersection de toutes les courbes, les températures des différents types de fluide s'égalisent dans cet endroit. Après ($z^* > 0.425$) le comportement thermique s'inverse, la température du nanofluide hybride eau/Ag-ZnO est la plus élevée à celle de l'eau et l'eau/ZnO respectivement. En augmentant le nombre de Ri (figures 4.5 et 4.6), on remarque que la deuxième zone ($0.1 < z^* < 0.425$) décrite dans la figure (4.6.a) est plus courte pour les valeurs les plus élevées du nombre de Ri (figures 4.5.a et 4.6.a). Ce comportement peut être interprété par l'effet de la convection naturelle. Pour Ri=1, 2, l'effet la convection naturelle est plus important vu la quantité de chaleur imposé par les rayonnements solaires qui devient plus élevée en augmentant le nombre de Ri. Concernant l'effet de ce dernier sur la température radiale de l'écoulement, le comportement est similaire à celui remarqué dans le cas d'inclinaison $\alpha = 30^\circ$.



Figure 4. 4 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la température : (a) *axiale,* (b) radiale (Ri=0.3, θ =90°, α =60°).



Figure 4. 5 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la température : (a) axiale,



Figure 4. 6 : Effet de la concentration volumique sur la variation la température : (a) axiale, (b) radiale (Ri=2, θ =90°, α = 60°).

Les courbes illustrées dans la figure (4.7.b) représentent le profil radial de la vitesse. A cause des contraintes de cisaillement, la vitesse passe d'une valeur nulle aux parois à une valeur maximale au centre ($r^*=0.5$), sous forme parabolique. Comme la section de la conduite est constante, cette progression de la vitesse depuis les parois jusqu'au centre maintient le débit massique conservé le long du domaine nanofluide. Ce profil peut être expliqué en termes de forces visqueuses. Il s'agit des forces surfaciques dont l'effet est très marqué à la paroi de la conduite est négligeable au centre. Les forces visqueuses tendent à freiner les particules fluides au niveau de la paroi ce qui se traduit par une vitesse nulle. Allant vers le centre de la conduite, leurres effet diminuent ce qui se traduit par une vitesse maximale.

Concernant le profil de la vitesse axiale ($z^*=0.8$) (figure 4.7.a), on remarque une accélération linéaire du fluide dans la zone d'entrée hydrodynamique, suivie d'un petit ralentissement résultant de la naissance de l'écoulement secondaire. L'origine de ces courants secondaires est le flux de chaleur déposé par le rayonnement solaire qui tend à créer des écarts de masse volumique au sien du nanofluide à cause des écarts de température entre la paroi externe et la paroi interne de l'espace

annulaire. Dans la dernière partie de la courbe, le nanofluide reprend son comportement cinétique et la vitesse augmente de nouveau. L'origine de cette augmentation est toujours les écarts de masse volumique.

Parlant de l'effet de la concentration volumique des nanoparticules, on remarque que l'addition des nanoparticules hybrides au fluide de base entraine une augmentation de la vitesse moyenne de l'écoulement. D'après la définition du nombre de Re, l'augmentation de la vitesse moyenne pour un nombre de Re constant (Re=300) et dans une conduite de section constante est le résultat de la variation du rapport viscosité dynamique/masse volumique définit par la viscosité cinématique :

$$u = \frac{Re.\mu}{D.\rho} = cst.\frac{\mu}{\rho} = cst.\nu$$

On remarque qu'il y a une relation directement proportionnelle entre la vitesse et la viscosité cinématique, l'augmentation de la concentration volumique entraine l'augmentation simultanée de la viscosité cinématique et la vitesse. De plus, on remarque que la vitesse la plus faible est celle du nanofluide eau/ZnO qui représente la viscosité cinématique la plus faible.



Figure 4. 7 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la vitesse : (a) axiale, (b)



Figure 4. 8 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale (Ri=1, θ =90°, α =30°).



Figure 4. 9 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale (Ri=2, θ =90°, α =30°).

En augmentant l'angle d'inclinaison à 60° (figures 4.10.a, 4.11.a et 4.12.a), on remarque que l'effet de la convection naturelle sur le profile axiale de la vitesse est plus faible par rapport au cas de 30° d'inclinaison, l'écoulement est engendré par convection forcée pour les différentes valeurs du nombre de Ri. Concernant le profil de la vitesse radiale, les figures (4.10.b, 4.11.b et 4.12.b) indiquent une similarité entre le comportement dynamique dans le sens radial de l'écoulement pour $\alpha = 30^\circ$ et celui du cas $\alpha = 60^\circ$.



Figure 4. 10 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale



Figure 4. 11 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale

$$(\text{Ri=1}, \theta=90^\circ, \alpha=60^\circ)$$



Figure 4. 12 : Effet de la concentration volumique sur la variation de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale (Ri=2, θ =90°, α = 60°).

La figure (4.13) représente la variation du coefficient de frottement local. Comme le montre les courbes, les valeurs les plus élevées se trouvent à l'entrée de la conduite où l'épaisseur de la couche limite dynamique est nulle et diminuent linéairement jusqu'à une valeur minimale spécifique pour chaque valeur du nombre de Ri. Après cette diminution, on remarque que les courbes demeurent constantes (développement de la couche limite dynamique). En faisant la comparaison entre les trois figures (4.13, 4.14 et 4.15), on trouve que cette zone de stabilité est plus courte pour les valeurs plus élevées du nombre de Ri et pour l'inclinaison avec un angle de 60°. Après, l'écoulement secondaire altère cette stabilité et le coefficient de frottement reprend son augmentation jusqu'à la sortie. Cette augmentation est plus importante pour les valeurs élevées du nombre de Ri avec un angle de 60°. Ceci est bien clair dans la figure (4.15) (Ri=1.7). Ce comportement est dû à l'augmentation des pertes d'énergie cinétique à cause des courants de l'écoulement secondaire.



Figure 4. 13 : Effet de la concentration volumique sur la variation du coefficient de frottement : (a) $\alpha = 30^{\circ}$, (b) $\alpha = 60^{\circ}$, (Ri=0.3, θ =90°).



Figure 4. 14 : Effet de la concentration volumique sur la variation du coefficient de frottement :



(a) $\alpha = 30^{\circ}$, (b) $\alpha = 60^{\circ}$, (Ri=1, θ =90°).

Figure 4. 15 : Effet de la concentration volumique sur la variation du coefficient de frottement : (a) $\alpha = 30^{\circ}$, (b) $\alpha = 60^{\circ}$, (Ri=1.7, θ =90°).

Concernant l'effet de la concentration volumique des nanoparticules sur le coefficient de frottement, les figures montrent qu'il est négligeable à l'entrée de la conduite, les mêmes valeurs sont obtenues pour les différents fluides utilisés pour chaque valeur du nombre de Ri. Cependant, on remarque que les courbes divergent les unes des autres traduisant une différence remarquable entre le coefficient de frottement de l'eau pure, l'eau/ZnO et l'eau/Ag-ZnO. Cette différence est bien claire pour Ri=1.7. Pour $\varphi = 2\%$, l'eau/Ag-ZnO représente le coefficient de frottement le plus faible, tandis que les valeurs s'égalisent pour l'eau pure et l'eau/ZnO (1% et 2%). Vue la relation mathématique utilisée pour calculer le coefficient de frottement, ce comportement est plus logique. Car les valeurs de la masse volumique et la viscosité dynamique de l'eau/Ag-ZnO sont les plus élevées par rapport à celles de l'eau pure et l'eau/ZnO.

L'effet de la concentration volumique sur le nombre de Nu est très marqué. D'après les figures (4.16, 4.17 et 4.18), le nanofluide hybride eau/Ag-ZnO (1% et 2%) représente le nombre de Nu le plus élevé suivi de l'eau et l'eau/ZnO (1% et 2%) respectivement. Comme premier facteur, le nombre de Nu élevé de l'eau/Ag-ZnO peut être référé à sa conductivité thermique élevée

par rapport à celle de l'eau pure et l'eau/ZnO ; l'addition des nanoparticules d'argent augmente la conductivité thermique du mélange et améliore le transfert thermique. Deuxièmement, pour une valeur fixe du nombre de Ri, la quantité de chaleur reçue par l'eau/Ag-ZnO est plus grandes que celle reçue par l'eau et l'eau/ZnO respectivement.



Figure 4. 16 : Effet de la concentration volumique sur la variation du nombre de Nu : (a) $\alpha = 30^{\circ}$, (b) $\alpha = 60^{\circ}$, (Ri=0.3, $\theta = 90^{\circ}$).



Figure 4. 17 : Effet de la concentration volumique sur la variation du nombre de Nu : (a) $\alpha =$





Figure 4. 18 : Effet de la concentration volumique sur la variation du nombre de Nu : (a) α =

30°, (b)
$$\alpha = 60^{\circ}$$
, (Ri=1.7, θ =90°).

4.2.2. Effet du nombre de Ri

Pour bien déterminer l'effet du nombre de Ri, on a étudié le comportement dynamique et thermique des différents fluides utilisés pour six valeurs du nombre de Ri : 0.3, 0.7, 1, 1.3, 1.7, et 2. En augmentant l'intensité des rayonnements solaires (augmentations de la température externe des rayonnements solaires) à la paroi, qui se traduit par l'augmentation du nombre de Ri (0.3, 0.7, 1, 1.3, 1.7, 2), on remarque une augmentation de la vitesse comme il est montré dans la figure (4.19). L'augmentation de la vitesse du nanofluide hybride eau/Ag-ZnO peut être interprétée par l'augmentation de la température (figure 4.20) qui tend à diminuer la masse volumique et la viscosité dynamique. De plus, on constate que le ralentissement du nanofluide dans la zone 0.05 < $z^* < 0.15$ est de plus en plus important en augmentant le nombre de Ri (augmentation de la quantité de chaleur reçue).



Figure 4. 19 : Effet du nombre de Ri sur le profil de vitesse : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-



Figure 4. 20 : Effet du nombre de Ri sur le profil de la température : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, θ =90°, α =30°).

Suivant les figures (4.19), (4.20), (4.21) et (4.22), on peut dire que l'augmentation de la concentration volumique de 1% à 2% n'a pas un grand effet sur le comportement dynamique et thermique du nanofluide hybride eau/Ag-ZnO. Les profils de vitesse et température sont similaires

est l'allure des courbes est presque la même. Par contre, l'effet de l'angle d'inclinaison sur le profile axiale de la vitesse est très marqué.



Figure 4. 21 : Effet du nombre de Ri sur le profil de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-ZnO



Figure 4. 22 : Effet du nombre de Ri sur le profil de la température : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, θ =90°, α =30°).

Que ce soit la concentration volumique 1% ou 2% (figures 4.23.a et 4.25.a), pour α =60° on constate que les courbes de la vitesse axiale se coïncident pour les six valeurs du nombre de Ri dans la zone 0 < z^* < 0.1. Pour z^* > 0.1, les courbes se divergent les unes des autres et la vitesse augment avec l'augmentation du nombre de Ri. L'effet de ce dernier sur le profile radiale de la vitesse est bien déterminé aussi. Pour les valeurs les plus élevées, on remarque un décalage du profile de la vitesse radiale vers la paroi externe de l'espace annulaire pour les deux valeurs de la concentration volumique 1% et 2% (figures 4.23.b et 4.25.b).

Parlant du profil de température, les figures (4.24.b) et (4.26.b) indiquent l'augmentation de la température avec l'augmentation du nombre de Ri pour $\varphi = 1\%$, 2%. Ce comportement est plus logique vu l'augmentation de la quantité de chaleur imposé à la paroi externe avec l'augmentation du nombre de Ri.



Figure 4. 23 : Effet du nombre de Ri sur le profil de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, θ =90°, α = 60°).



Figure 4. 24 : Effet du nombre de Ri sur le profil de la température : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, θ =90°, α = 60°).



Figure 4. 25 : Effet du nombre de Ri sur le profil de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, θ =90°, α = 60°).



Figure 4. 26 : Effet du nombre de Ri sur le profil de la température : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, θ =90°, α = 60°).

Les courbes représentées dans la figure (4.27) représentent l'effet du nombre de Ri sur la variation axiale du coefficient de frottement. Les courbes de la figure (4.27.a) indiquent que l'effet du nombre de Ri sur le nanofluide hybride eau/Ag-ZnO de concentration volumique de 1% est négligeable dans la zone $0 \le z^* < 0.1$. Cependant, cet effet devient plus clair pour $z^* > 0.1$, ou on remarque que le coefficient de frottement augmente avec le nombre de Ri. Pour $\varphi = 2\%$ (figure 4.27.b), les courbes indiquent que l'effet du nombre de Ri pour $z^* < 0.15$ est faible. Cependant, pour $z^* > 0.15$, on remarque l'augmentation du coefficient de frottement avec le nombre de Ri. L'impact des courants secondaires est plus important pour les valeurs élevées de quantité de chaleur reçue par l'eau/Ag-ZnO. De plus, pour Ri > 1 la figure montre que les courbes se coïncident et cette différence entre les valeurs du coefficient de frottement tend vers zéro.



Figure 4. 27 : Effet du nombre de Ri sur la variation du coefficient de frottements de l'eau/Ag-ZnO : (a) $\varphi=1\%$, (b) $\varphi=2\%$, ($\theta=90^{\circ}, \alpha=30^{\circ}$).



Figure 4. 28 : Effet du nombre de Ri sur la variation du coefficient de frottements de l'eau/Ag-ZnO : (a) $\varphi = 1\%$, (b) $\varphi = 2\%$, ($\theta = 90^{\circ}, \alpha = 60^{\circ}$).

En changeant le nombre de Ri (0.3, 0.7, 1, 1.3, 1.7, 2) pour les deux valeurs de la concentration volumique (1% et 2%), les courbes représentées dans les figures (4.29.a) et (4.29.b) indiquent que l'effet du nombre de Ri est très marqué dans la région d'entrée thermique, la différence entre les valeurs du nombre de Nu est remarquable. Après le développement de la couche limite thermique, l'effet du nombre de Ri est faible. On remarque la coïncidence des courbes correspondantes aux différentes valeurs du nombre de Ri. De plus, d'après les figures (4.29.a) et (4.25.b), on constate que le nanofluide hybride eau/Ag-ZnO conserve son comportement thermique malgré les variations de concentration volumique considérées dans cette étude (1% et 2%).



Figure 4. 29 : Effet du nombre de Ri sur la variation du nombre de Nu de l'eau/Ag-ZnO : (a) $\varphi = 1\%$, (b) $\varphi = 2\%$, ($\theta = 90^{\circ}$, $\alpha = 30^{\circ}$).



Figure 4. 30: Effet du nombre de Ri sur la variation du nombre de de l'eau/Ag-ZnO (a) φ =1%, (b) φ =2%, (θ =90°, α = 60°).

4.2.3. Effet de la distribution des rayonnements solaires

Pour bien illustrer le comportement dynamique et thermique du nanofluide hybride dans la conduite, on a choisi de représenter les grandeurs dynamiques et thermiques à savoir la vitesse et la température (et le nombre de Nu ultérieurement) dans différentes zones de l'espace annulaire (changement de la direction azimutale θ), pour trois valeurs du nombre de Ri (0.3, 1 et 1.7) et deux valeurs de la concentration volumique (1% et 2%). En plus de la représentation par courbes, une représentation par vecteurs pour la vitesse et par contours pour la température, dans une section droite ($z^{*}=0.8$) est fournie. D'après la figure (4.31.a), le profil de la vitesse radiale révèle l'asymétrie par rapport à l'axe passant par le centre du rayon ($r^{*}=0.5$). La surface de la parois interne est plus petite que celle de la paroi externe, ceci impose le décalage des maximas de la vitesse vers cette dernière. Ce comportement indique que les effets de la viscosité à la paroi externe sont prépondérants.



Figure 4. 31 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=0.3, α =30°).



Figure 4. 32 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO $(\varphi = 1\%, \text{Ri}=0.3, \alpha=30^\circ).$

D'après la représentation vectorielle dans les figures (4.32.a), (4.35.a) et (4.38.a) on observe que l'écoulement secondaire favorise l'asymétrie du profil de vitesse. Lorsque on prend en considération les variations de masse volumique au sein du fluide, les forces de viscosité, d'inertie et la poussée d'Archimède sont de grande importance et leur effet sur la structure de l'écoulement est considérable. Pour Ri=0.3, la figure (4.32.a) montre que les effets de la convection naturelle commencent à apparaître à proximité de la paroi. Les vecteurs vitesse sont en mouvement ascendant près de la paroi et descendant dans le centre créant ainsi deux petits tourbillons dans le sens anti-horaire. Les courbes de la figure (4.31.a) montrent aussi que les maximas de vitesse sont déplacés légèrement vers la paroi interne.



Figure 4. 33 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=0.3, α =30°).

A cause de la distribution non homogène des rayonnements solaires sur la partie supérieure de la paroi, on remarque que la température augmente avec l'augmentation de l'angle θ dans l'intervalle [0°, 90°] pour les trois valeurs du nombre de Ri représentées (figure 4.31.b, 4.33.b, 4.34.b, 4.36.b, 4.37.b et 4.38.b). En plus, d'après les contours de la température (figures 4.28.b, 4.31.b et 4.34.b), on remarque que la distribution de la température est symétrique par rapport au

diamètre vertical. Le même comportement est observé sur les variations de la vitesse dans l'intervalle $[0^{\circ}, 90^{\circ}]$. Pour $\theta \in [90^{\circ}, 360^{\circ}]$ on remarque une décélération de l'eau/Ag-ZnO par rapport à la vitesse dans la partie supérieure du diamètre horizontal à cause des courants secondaires. Ce comportement apparait clairement dans les figures (4.31.a), (4.33.a), (4.34.a), (4.36.a), (4.34.a) et (4.39.a).

Pour Ri=1 et 1.7, on observe une intensification remarquable des courants secondaires qui se traduit par un mouvement ascendant très fort (figures 4.35.a et 4.38.a) occupant une couche plus large que dans le cas de Ri=0,3 (figure 4.26.a). Tenant en compte le champ thermique, pour Ri=0,3 on remarque que les isothermes sont quasiment horizontales (figure 4.32.b) et l'effet des courants secondaires sur le champ de température est faible. Cet effet est de plus en plus important pour Ri=1, 1.7; la stratification occupe un espace de plus en plus large (figures 4.35.b et 4.38.b).



Figure 4. 34 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=1, α =30°).



Figure 4. 35 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO $(\varphi = 1\%, \text{Ri=1}, \alpha=30^\circ).$



Figure 4. 36 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=1, α =30°).



Figure 4. 37 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=1.7, α =30°).



Figure 4. 38 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO $(\varphi=1\%, Ri=1.7, \alpha=30^\circ).$



Figure 4. 39 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=1.7, α =30°).

Pour $\varphi=2\%$, le nanofluide hybride eau/Ag-ZnO conserve son comportement et les profils de vitesse et température ressemblent à ceux du premier cas ($\varphi=1\%$). Seuls les deux tourbillons issus des écoulements secondaires sont plus forts. Ce résultat est plus clair dans les figures (4.44.a) et (4.43.a). Parlant du champ thermique, les profils de température pour les deux valeurs de la concentration volumique sont similaires (figures 4.40.b, 4.42.b, 4.43.b, 4.45.b, 4.46.b et 4.48.b).



Figure 4. 40 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=0.3, α =30°).



Figure 4. 41 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO $(\varphi=2\%, Ri=0.3, \alpha=30^\circ).$

122



Figure 4. 42 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=0.3, α =30°).









Figure 4. 44 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO $(\varphi=2\%, Ri=1, \alpha=30^\circ)$.



Figure 4. 45 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=1, α =30°).



Figure 4. 46 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=1.7, α =30°).



Figure 4. 47 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO $(\varphi=2\%, Ri=1.7, \alpha=30^\circ).$



Figure 4. 48: Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=1.7, α =30°).

La partie suivante s'intéresse à la représentation de l'effet de l'intensité des rayonnements solaires pour une angle d'inclinaison de 60°. D'après les figures (4.49.b), (4.51.b), (4.52.b), (4.54.b), (4.55.b) et (4.57.b), on constate que l'effet du changement de l'angle de 30° à 60° sur la température du nanofluide hybride eau/Ag-ZnO d'une concentration de 1% est faible. Les profils de températures sont similaires et le comportement thermique est conservé pour les deux angles. Cependant, les figures de la vitesse fait apparaître une légère différence dans le profil de la vitesse axiale (figures 4.51.a, 4.54.a et 4.57.a). D'après les figures, on remarque que l'effet des écoulements secondaire sur le profile axiale de la vitesse est faible. D'une manière générale, l'écoulement est engendré par convection forcée. Les figures montrent aussi que les profils de vitesse et température pour une concentration volumique de 1% sont similaires à ceux de la concentration de 2% (figures 4.58, 4.59, 4.60, 4.61, 4.62, 4.63, 4.64, 4.65 et 4.66).



Figure 4. 49 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=0.3, α = 60°).



Figure 4. 50 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO



Figure 4. 51 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=0.3, α = 60°).



Figure 4. 52 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=1, α = 60°).



Figure 4. 53 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO



Figure 4. 54 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=1, α = 60°).



Figure 4. 55 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=1.7, α = 60°).

 $(\varphi = 1\%, Ri = 1, \alpha = 60^{\circ}).$



Figure 4. 56: Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO $(\varphi = 1\%, Ri = 1.7, \alpha = 60^{\circ}).$



Figure 4. 57 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, Ri=1.7, α = 60°).



Figure 4. 58 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=0.3, α = 60°).



Figure 4. 59 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO $(\varphi=2\%, Ri=0.3, \alpha=60^\circ).$



Figure 4. 60 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=0.3, α = 60°).



Figure 4. 61 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=1, α = 60°).



Figure 4. 62 : Contours des variations de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO



 $(\phi = 2\%, Ri = 1, \alpha = 60^{\circ}).$

Figure 4. 63 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=1, α = 60°).



Figure 4. 64 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation radiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=1.7, α = 60°).



Figure 4. 65 : Contours des variations de la vitesse et la température du nanofluide hybride eau/Ag-ZnO



Figure 4. 66 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation axiale de : (a) la vitesse, (b) la température de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, Ri=1.7, α = 60°).

L'effet de l'intensité des rayonnements solaires sur le nombre de Nu est représenté dans les figures (4.67, 4.68, 4.69, 4.70). Les phénomènes d'échange thermique sont symétriques par rapport au diamètre vertical. Pour un nombre de Ri donné, on remarque que le nombre de Nu augmente dans l'intervalle [0°, 90°].



Figure 4. 67 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation du nombre de Nu de l'eau/Ag-ZnO : (a) : Ri=0.3, (b) : Ri=1.7 (φ =1%, α = 30°).

Comme les rayonnements solaires sont plus intenses aux points (R, $\theta = 90^{\circ}, z$), l'échange convectif est plus important dans cette zone par rapport aux autres, où l'augmentation du taux d'échange convectif est proportionnelle à l'angle θ dans l'intervalle [0°, 90°] et inversement proportionnelle dans l'intervalle [90°, 180°].



Figure 4. 68 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation du nombre de Nu de l'eau/Ag-ZnO : (a) : Ri=0.3, (b) : Ri=1.7 (φ =2%, α = 30°).



Figure 4. 69 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation du nombre de Nu de l'eau/Ag-ZnO : (a) : Ri=0.3, (b) : Ri=1.7 (φ =1%, α = 60°).



Figure 4. 70 : Effet de la distribution des rayonnements solaires sur la variation du nombre de Nu de l'eau/Ag-ZnO : (a) : Ri=0.3, (b) : Ri=1.7 (φ =2%, α = 60°).

4.2.4. Effet de l'angle d'inclinaison

Pour mieux montrer l'effet de l'inclinaison sur les variations des grandeurs physiques, nous avons choisi de présenter chaque grandeur pour les deux valeurs de l'angle d'inclinaison (30° et 60°) dans un seul repère. Les grandeurs sont représentées pour trois valeurs du nombre de Ri (0.3, 1, 1.7) et deux valeurs de la concentration volumique (1%, 2%). Seul le nanofluide hybride eau/Ag-ZnO et considéré dans cette représentation. D'après la figure (4.71.a), on remarque que la température axiale du nanofluide hybride eau/Ag-ZnO (1%) pour Ri=0.3 et α =30° est légèrement grande à celle trouvé pour α =60° dans la zone $0.2 \le z^* \le 0.5$. Pour $z^* \ge 0.5$, le comportement thermique s'inverse ; la température du cas 30° est inférieur à celle du cas 60°.



Figure 4. 71 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la température : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, θ =90°, Ri=0.3).



Figure 4. 72 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la température : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, θ =90°, Ri=1).

Pour Ri=1, 1.7 (figures 4.72.a et 4.73.a), la température axiale de l'eau/Ag-ZnO pour l'inclinaison 30° et supérieur à celle de l'inclinaison 60°. Concernant la variation radiale, pour Ri=0.3 (figure 4.71.b) le cas 30° présente une température inférieure à celle du cas 60° pour $z^* \ge$ 0.5. Pour des valeurs plus élevées de nombre de Ri (Ri=1.7) (figures 4.72.b et 4.73.b), la

température radiale pour 30° et plus élevée à celle trouvée dans le cas 60°. Lorsque les phénomènes de la convection naturelle et forcée sont parallèles (Ri=1), on remarque que la température de l'eau/Ag-ZnO pour les deux angles d'inclinaison est comparable. Seul une légère différence est constatée.



Figure 4. 73 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la température : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, θ =90°, Ri=1.7).

Le changement de la concentration volumique du nanofluide hybride eau/Ag-ZnO de 1% à 2% n'a pas un grand effet sur les variations axiale et radiale de la température (figures 4.74, 4.75 et 4.76). En faisant la comparaison entre les figures, on remarque que le comportement thermique pour $\varphi=1\%$ est similaire à celui du cas $\varphi=2\%$.



Figure 4. 74 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la température : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, θ =90°, Ri=0.3).



Figure 4. 75: Effet de l'inclinaison sur la variation de la température : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, θ =90°, Ri=1).



Figure 4. 76 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la température : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, θ =90°, Ri=1.7).

Dans les figures (4.77), (4.78) et (4.79) on constate que la vitesse du nanofluide hybride eau/Ag-ZnO (1%) pour une inclinaison de 60° et supérieur celle du cas 30°. De plus, on remarque que l'effet des écoulements secondaires sur la variation axiale de la vitesse est plus important pour l'inclinaison 30°.



Figure 4. 77 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale de

l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, θ =90°, Ri=0.3).



Figure 4. 78 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, θ =90°, Ri=1).

Concernant les figures (4.80), (4.81) et (4.82) qui représentent la vitesse axiale et radiale pour une concentration volumique de $\varphi=2\%$, on remarque qu'il n'y a pas une grande différence entre ces profils et ceux obtenus pour $\varphi=1\%$; la vitesse trouvée pour une inclinaison de 30° reste inférieur à celle trouvée pour 60°.



Figure 4. 79 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-ZnO (φ =1%, θ =90°, Ri=1.7).





l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, θ =90°, Ri=0.3).



Figure 4. 81 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, θ =90°, Ri=1).



Figure 4. 82 : Effet de l'inclinaison sur la variation de la vitesse : (a) axiale, (b) radiale de l'eau/Ag-ZnO (φ =2%, θ =90°, Ri=1.7).

Tenant en compte de l'influence de l'inclinaison de la conduite sur le coefficient de frottement (figures 4.83, 4.84 et 4.85), les courbes montrent que l'effet de l'inclinaison est faible à l'entrée de la conduite ($z^* < 0.02$). Cependant, l'apparition des courants secondaires affectent la variation du coefficient de frottement ($z^* > 0.02$); on remarque que les frottements sont plus importants pour $\alpha = 60^\circ$ et pour es valeurs élevées du nombre de Ri (figures 4.84 et 4.85).



Figure 4. 83 : Effet de l'inclinaison sur la variation du coefficient de frottement de l'eau/Ag-ZnO : (a) $\varphi = 1\%$, (b) $\varphi = 2\%$, (Ri=0.3, $\theta = 90^{\circ}$).


Figure 4. 84 : Effet de l'inclinaison sur la variation du coefficient de frottement de l'eau/Ag-ZnO : (a) $\varphi = 1\%$, (b) $\varphi = 2\%$, (Ri=1, $\theta = 90^{\circ}$).



Figure 4. 85 : Effet de l'inclinaison sur la variation du coefficient de frottement de l'eau/Ag-ZnO : (a) $\varphi = 1\%$, (b) $\varphi = 2\%$, (Ri=1.7, $\theta = 90^{\circ}$).

Concernant le comportement thermique, la figure (4.86.a) montre que le nombre de Nu de l'eau/Ag-ZnO de concentration $\varphi = 1\%$ et pour $\alpha = 30\%$ est plus élevé à celui obtenu pour 60°. Cette différence est remarquée à l'entrée de la conduite uniquement. Dans le reste de la conduite, les courbes se coïncident et les valeurs s'égalisent.







Figure 4. 87 : Effet de l'inclinaison sur la variation du nombre de Nu de l'eau/Ag-ZnO : (a) $\varphi = 1\%$, (b) $\varphi = 2\%$, (Ri=1, $\theta = 90^{\circ}$).

Cependant, cette différence est de plus en plus faible en augmentant le nombre de Ri, d'après la figure (4.88.a), la différence en terme du nombre de Nu est négligeable. Pour 2%, les figures (4.86.b), (4.87.b) et (4.88.b) montrent que les phénomènes sont comparables et l'allure des courbes est similaire à ceux du 1%.



Figure 4. 88 : Effet de l'inclinaison sur la variation du nombre de Nu de l'eau/Ag-ZnO : (a) $\varphi = 1\%$, (b) $\varphi = 2\%$, (Ri=1.7, $\theta = 90^{\circ}$).

4.3. Conclusion

Les résultats exposés dans ce chapitre fournissent une confirmation solide de la fiabilité des nanofluides hybrides en tant que technologie émergente prometteuse pour l'amélioration significative du taux d'échange thermique et, par conséquent, pour l'optimisation des performances des dispositifs de transfert de chaleur. Ces solutions colloïdales, contenant des nanoparticules minutieusement sélectionnées, ont démontré une capacité impressionnante à améliorer considérablement les échanges thermiques, même à de faibles concentrations volumiques de nanoparticules, telles que 1% ou 2%.

Cela signifie que même de petites quantités de ces nanofluides hybrides peuvent avoir un impact significatif sur l'efficacité des systèmes de transfert de chaleur. Leur capacité à améliorer le transfert de chaleur à des concentrations aussi faibles ouvre la voie à des applications variées dans divers domaines de l'ingénierie thermique et des technologies de refroidissement. En résumé, les nanofluides hybrides représentent une avancée majeure dans la quête d'efficacité énergétique et de performances accrues des systèmes de transfert de chaleur, offrant ainsi des perspectives prometteuses pour l'avenir de la thermique appliquée.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Ce travail de thèse porte sur l'étude du comportement thermique et dynamique du nanofluide hybride eau/Ag-ZnO dans un espace annulaire (R_1 =1.5 cm, R_2 =0.5 cm et L=1m) incliné d'un angle α (30° et 60°) par rapport au plan horizontal. La partie supérieure de la paroi externe est soumise à des rayonnements solaires tandis que la partie inférieure et la paroi interne sont maintenues adiabatiques. Afin de simplifier le problème, le nanofluide est considéré newtonien et incompressible en écoulement laminaire et stationnaire. La dissipation visqueuse et les pertes de pression sont négligeables. L'approximation de Boussinesq est adoptée pour évaluer l'évolution de la densité en fonction de la température. Dans notre cas, la viscosité dynamique et la conductivité thermique sont estimées en utilisant des modèles linéaires dépendants de la température, développés à partir des données expérimentales présentes dans la littérature. La chaleur spécifique et le coefficient d'expansion thermique sont considérés constants. Les phénomènes ont été étudiés numériquement à l'aide du solveur Ansys Fluent. Dans le but de vérifier la fiabilité du nanofluide hybride eau/Ag-ZnO en tant que fluide caloporteur, des calculs supplémentaires en utilisant une fois l'eau et une autre fois l'eau/ZnO ont été réalisés afin de comparer les performances thermiques des trois fluides caloporteurs.

Dans la première partie de cette thèse, une revue bibliographique sur les écoulements et transferts thermiques associés dans des conduites annulaires horizontales a été fourni. Le premier chapitre a été destiné à la présentation d'un état de l'art sur les nanofluides hybrides, leurs méthodes de fabrications, domaines d'applications. Les phénomènes physiques associés aux écoulements et transferts thermiques des nanofluides sont présentés en détails à la fin du chapitre. Le deuxième chapitre a visé la formulation mathématique, la méthode numérique ainsi que l'outils numérique utilisé dans la simulation du problème d'étude. Premièrement, les approches utilisées pour modéliser les écoulements des nanofluides, les équations de conservations, les conditions aux limites ainsi que leurs écritures adimensionnelles sont exposées. Le chapitre présente aussi une partie descriptive de la méthode numérique ainsi que le solveur utilisé.

Le chapitre 3 a été consacré à la présentation des différents étapes suivis dans la simulation du problème. La première partie du chapitre a visé une étude de vérification du solveur Ansys fluent. Les résultats numériques obtenus ont été comparu avec des résultats analytique. La comparaison a montré une bonne entre les résultats analytiques et ceux obtenus numériquement. Dans la deuxième partie du chapitre 3, ont été intéressé à la présentation de la procédure suivie dans la simulation du problème. En commençant par la présentation de la géométrie qui représente le domaine de calcul, la deuxième étape consiste à la réalisation du maillage ; une étude de l'effet du maillage a été réalisé afin de prouver l'indépendance entre le maillage choisi et les résultats obtenus. Ensuite une étude de validation a été fourni, montrant la fiabilité du modèle numérique utilisé. Dans cette étude nos résultats ont été comparé avec des résultats numériques et d'autres expérimentales de la littérature. Les résultats obtenus avec les interprétations qui conviennent sont donnés dans la dernière partie du chapitre. Les effets de la concentration volumique, le nombre de Ri, la distribution des rayonnements solaire ainsi que l'effet de l'angle d'inclinaison ont été étudié dans ce travail. D'après ces résultats, le nanofluide hybride eau/Ag-ZnO présente le nombre de Nu le plus élevé par rapport à l'eau pure et l'eau/ZnO pour toutes les valeurs étudiées du nombre de Ri (0.3, 0.7, 1, 1.3, 1.7, 2) et de la concentration volumique (1% et 2%). L'effet de cette dernière sur le coefficient de frottement est négligeable lorsque $z^* < 0.15$. La distribution non homogène des rayonnements solaires à la paroi de la conduite a un effet très marqué sur la variation des grandeurs dynamiques et thermiques. De plus, l'écoulement secondaire a un effet direct sur la variation de la vitesse. Cet effet se traduit par l'apparition de deux tourbillons au-dessus du diamètre horizontal.

Les résultats de cette recherche ouvrent la voie à plusieurs perspectives intéressantes dans le domaine de l'amélioration du taux d'échange thermique et des applications des nanofluides hybrides. Voici quelques-unes de ces perspectives :

- Applications industrielles étendues : Les nanofluides hybrides pourraient être largement adoptés dans l'industrie pour améliorer l'efficacité des échangeurs de chaleur, des réfrigérants et des systèmes de refroidissement. Cela pourrait conduire à des économies d'énergie significatives et à une réduction des coûts opérationnels.
- Refroidissement électronique avancé : Les nanofluides hybrides pourraient être utilisés pour le refroidissement de composants électroniques de pointe, tels que les processeurs et les puces, où le contrôle précis de la température est essentiel pour des performances optimales.
- Applications médicales : Les nanofluides hybrides pourraient trouver des applications dans le domaine médical pour le refroidissement de dispositifs médicaux, comme les IRM, où la régulation de la température est cruciale.
- Énergie solaire : Ces nanofluides pourraient également être utilisés dans les systèmes de captation solaire pour améliorer l'efficacité de la conversion d'énergie solaire en électricité ou en chaleur.
- Recherche spatiale : Dans le domaine spatial, où le refroidissement des équipements est un défi majeur, les nanofluides hybrides pourraient être une solution efficace pour maintenir des températures optimales.

- Optimisation des procédés industriels : L'optimisation des procédés industriels, tels que la production de produits chimiques et la métallurgie, pourrait bénéficier de l'utilisation de ces nanofluides pour un meilleur contrôle des températures de réaction.
- Développement de nouveaux nanomatériaux : Cette recherche pourrait également stimuler le développement de nouveaux nanomatériaux hybrides avec des propriétés thermiques encore améliorées, ouvrant ainsi la voie à des avancées continues.

En résumé, les perspectives d'application des nanofluides hybrides sont vastes et promettent d'apporter des améliorations significatives dans divers domaines, allant de l'industrie à la médecine en passant par l'énergie et l'espace. Ces perspectives témoignent de l'importance de cette recherche et de son potentiel pour avoir un impact durable sur de nombreuses industries et domaines technologiques.

Bibliographie

- [1] A. Mammeri, "Amélioration des performances énergétiques des systèmes de refroidissement industriels : Application aux serveurs informatiques ", l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris Tech, 2014.
- [2] B. OUATTARA, "Prise en compte des caractéristiques thermophysiques des parois dans le processus de séparation des constituants d'un mélange binaire ou d'un nanofluide par diffusion thermogravitationnelle en milieu poreux ", Université Toulouse III Paul Sabatier, 2012.
- [3] L. Léal, " Etude des mécanismes de nucléation par action simultanée de l'ébullition et de la cavitation ", Université de Toulouse III Paul Sabatier, 2012.
- [4] O. B. Sauret, " Étude expérimentale de l'intensification des transferts thermiques par les ultrasons en convection forcée ", Communauté Université Grenoble Alpes, 2016.
- [5] N. A. Che Sidik, M. M. Jamil, W. M. A. Aziz Japar, I. M. Adamu, "A review on preparation methods, stability and applications of hybrid nanofluids ", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 80, pp. 1112–1122, 2017.
- [6] C. Tan, S. Zainal, C. J. Sian et T. J. Siang, "ANSYS simulation for Ag/HEG hybrid nanofluid in turbulent circular pipe, Journal of Advanced Research in Applied Mechanics ", vol. 23, n° 1, pp. 20-35, 2020.
- [7] S. K. Das, S.U.S. Choi et H. E. Patel, " Heat transfer in nanofluids—A Review ", Heat Transfer Engineering, vol. 27, n° 10, pp. 3-19, 2006.
- [8] J. C. Maxwell, " A treatise on electricity and magnetism ", 3 rd ed, Dover, New York: Oxford University Press, 1954.
- [9] W. N. Mutuku, Analysis of hydromagnetic boundary layer flow and heat transfer of nanofluids, Cape Cape Peninsula: University of Technology, 2014.
- [10] S. Suresh, M. Chandrasekar et S. C. Sekhar, " Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of CuO/water nanofluid under turbulent flow in a helically dimpled tube ", Experimental Thermal and Fluid Science journal, vol. 35, n° 3, pp. 542-549, 2011.
- [11] S. Halelfadl, " Caractérisation des propriétés thermophysiques et d'échanges de chaleur des nanofluides à base de nanotubes de carbone ", INSA de Rennes, 2014.
- [12] S. U. S. Choi, " Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in developments and applications of non-newtonian flows", American Society of Mechanical Engineers, New York, pp. 99–105, San Francisco, CA, 1995.
- [13] P. Kumar Das, " A review based on the effect and mechanism of thermal conductivity of normal nanofluids and hybrid nanofluids ", Journal of molecular liquids, vol. 240, pp. 420– 446, 2017.

- [14] E. Timofeeva, J. L. Routbort et D. Singh, " Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids ", Journal of applied physics, vol. 106, pp. 014304, 2009.
- [15] D. Toghraie, V. A. Chaharsoghi et M. Afrand, "Measurement of thermal conductivity of ZnO–TiO2/EG hybrid, Effects of temperature and nanoparticles concentration", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 125, pp. 527–535, 2016.
- [16] B. Takabi, A. M. Gheitaghy et P. Tazraei, "Hybrid water-based suspension of Al2O3 and Cu nanoparticles on laminar convection effectiveness ", Journal of thermophysics and heat transfer, vol. 30, n° 3, 2016.
- [17] R. Nimmagadda et K. Venkatasubbaiah, " Conjugate heat transfer analysis of microchannel using novel hybrid nanofluids (Al2O3 + Ag/Water) ", European Journal of Mechanics B/Fluids, vol. 52, pp. 19-27, 2015.
- [18] L. M. N. Jeong, Md. J. Nine, H. Afrianto, H. Chung et H. Hyomin, "Numerical investigation on effect of base fluids and hybrid nanofluid in forced convective heat transfer ", International Journal of Thermal Sciences, vol. 73, pp. 163-171, 2013.
- [19] P. Selvakumar et S. Suresh, "Use of Al2O3–Cu/water hybrid nanofluid in an electronic heat sink ", IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology, vol. 40, pp. 57-63, 2012.
- [20] N. A. Che Sidik, I. M. Adamu, M. M. Jamil, G. H. R. Kefayati, R. Mamat et G. Najafi, " Recent progress on hybrid nanofluids in heat transfer applications: A comprehensive review ", International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 78, pp. 68–79, 2016.
- [21] J. W. Y. Routbort, D. M. France, Y, D. Singh, E. V. Timofeeva et D. S. Smith, Argonne National Lab, Michellin North America, St. Gobain Corp, 2009. [En ligne]. Available: <u>http://www1.eere.energy.gov/industry/nanomanufacturing/pdfs/nanofluids/industrial</u> cooling.pdf.
- [22] I. C. Nelson, D. Banerjee et R. Ponnappan, "Flow loop experiments using polyalphaolefin nanofluids ", Journal of Thermophysics and Heat Transfer, vol. 23, n° 4, pp. 752-761, 2009.
- [23] S. P. Jang et S. U. S. Choi, " Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids ", Applied Thermal Engineering, vol. 26, n° 17-18, pp. 2457–2463, 2006.
- [24] Y. T. Chen, W. Wei, S. W. Kang et C. S. Yu, "Effect of nanofluid on flat heat pipe thermal performance ", in Proceedings of the 24th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, San Jose, CA, USA, pp. 16-19, 2006.
- [25] S. Vafaei, T. Borca-Tasciuc, M. Z. Podowski, A. Purkayastha, G. Ramanath et P. M. Ajayan, "Effect of nanoparticles on sessile droplet contact angle ", Nanotechnology, vol. 17, n° 10, pp. 2523-2527, 2006.
- [26] V. W. Kaufui et L. Omar D, "Applications of Nanofluids: Current and Future, Advances in Mechanical Engineering ", pp. 11 pages, 2010.

- [27] M. J. Kao, C. H. Lo, T. T. Tsung, Y. Y. Wu, C. S. Jwo et H. M. Lin, "Copper-oxide brake nanofluid manufactured using arc- submerged nanoparticle synthesis system ", Journal of Alloys and Compounds, vol. 434–435, pp. 672–674, 2007.
- [28] M. J. Kao, H. Chang, Y. Y. Wu, T. T. Tsung et H. M. Lin, "Producing aluminum oxide brake nanofluids using plasma charging system ", Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, vol. 28, n° 2, pp. 123–131, 2007.
- [29] M. Răcuciu, "Recent Advances in Biological and Medical Applications of Magnetic Fluids ", Tomul II, s. Biofizică, Fizică medicală și Fizica mediului, 2006.
- [30] C. Alexiou, W. Arnold, R. J. Klein, F. G. Parak, P. Hulin, C. Bergemann, W. Erhardt, S. Wagenpfeil et A. S. Lübbe, "Locoregional cancer treatment with magnetic drug targeting ", Cancer Res, vol. 60, n° 23, pp. 6641-6648, 2000.
- [31] R. Digest et D. Digest, "Using Magnetic Fluids to Repair Damaged Retinas ", MDDI, New Technologies, vol. 39, 2002.
- [32] J. F. Yan et J. Liu, "Nanocryosurgery and its mechanisms for enhancing freezing efficiency of tumor tissues ", Nanomedicine, vol. 4, n° 1, pp. 79-87, 2008.
- [33] G. H. Lee, "Fabrication of Al nano powders by Pulsed Wire Evaporation (PWE) Method ", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, vol. 9, n° 1, pp. 71-75, 2003
- [34] W. Yu, D. France, S. Choi et J. Routbort, "Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other applications ", Argonne National Laboratory (ANL), 2007.
- [35] S. Mukherjee et S. Paria, "Preparation and Stability of Nanofluids-A Review ", IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), vol. 9, n° 2, pp. 63-69, 2013.
- [36] S. Witharana, C. Hodges, D. Xu, X. Lai et Y. Ding, "Aggregation and settling in aqueous polydisperse alumina nanoparticle suspensions ", Journal of Nanoparticle Research, vol. 14, pp. 1-11, 2012.
- [37] X. Yang et Z. H. Liu, " A kind of nanofluid consisting of surface-functionalized nanoparticles ", Nanoscale Research Letters, vol. 5, pp. 1324–1328, 2010.
- [38] L. Chen et H. Xie, " Surfactant-free nanofluids containing double- and single-walled carbon nanotubes functionalized by a wet-mechanochemical reaction ", Thermochimica Acta, vol. 497, n° 1-2, pp. 67–71, 2010.
- [39] Q. Yu, Y. J. Kim et H. Ma, "Nanofluids with plasma treated diamond nanoparticles ", Applied Physics Letters, vol. 92, pp. 103111, 2008.
- [40] Y. Fovet, J. Y. Gal et C. F. Toumelin, " Influence of pH and fluoride concentration on titanium passivating layer: stability of titanium dioxide ", Talanta, vol. 53, pp. 1053–1063, 2001.

- [41] H. Xie, H. Lee, W. Youn et M. Choi, "Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities ", J. Appl. Phys, vol. 94, pp. 4967– 4971, 2003.
- [42] E. B. Haghighi, "Single Phase Convective Heat Transfer with Nanofluids: An Experimental Approach ", Stockholm: Royal Institute of Technology, (2015).
- [43] D. Singh, E. Timofeeva, W. Yu, J. Routbort, D. France, D. Smith et J, Lopez-Cepero, " An investigation of silicon carbide-water nanofluid for heat transfer application ", Journal of Applied Physics, vol. 105, pp. 064306, 2009.
- [44] E. Bergles A, " Evolution of Cooling Technology for Electrical, Electronic, and Microelectronic Equipment ", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, vol. 26, n° 1, pp. 6-15, 2003.
- [45] J. Salençon, " Mécanique des milieux continus ", Tome 1, concepts généraux, Palaiseau Cedex: Ecole polythechnique, 2016.
- [46] N. MOËS, "Mécanique des milieux continus ", Nantes: École centrale de Nantes.
- [47] G. MOLLON, "Introduction à la mécanique des milieux continues ", Edition 1, Polytech Grenoble, 2012-2013.
- [48] E. Plaut, "Mécanique des fluides : des bases à la turbulence ", Mines Nancy, 2018.
- [49] C. Tchekiken, " Modélisations et simulations numériques d'écoulements compressibles dans des microconduites planes ", université Paris-Est, 2014.
- [50] J. Taine, F. Enguehard et E. Lacona, "Transferts thermiques introduction aux transferts d'énergie ", Cours et exercices d'application, 5e édition, 5 rue Laromiguière, 75005 Paris, (2014).
- [51] A. Dehaoui, "Viscosité de l'eau surfondue ", Université Claude Bernard Lyon I, (2015)
- [52] F. Mondiot, " Comportement de particules colloïdales dans des solvants nématiques : influence de la forme et de la taille ", Université Bordeaux 1 Sciences et Technologies au service de l'Homme et de l'environnement, 2011.
- [53] M. Mohaupt, " Modélisation et simulation de l'agglomération des colloïdes dans un écoulement turbulent ", Institut National Polytechnique de Lorraine, 2011.
- [54] X. Meng, "Coupling of nanofluid flow, heat transfer and nanoparticles sedimentation using Open foam, School of Mathematics ", Computer Science & Engineering City, University of London, 2017.
- [55] W. Guo, G. Li, Y. Zheng et C. Dong, "Numerical study of nanofluids thermal and hydraulic characteristics considering Brownian motion effect in micro fin heat sink ", Journal of Molecular Liquids, vol. 264, pp. 38-47, 2018.
- [56] P. Tillman et J. M. Hill, " Determination of nanolayer thickness for a nanofluid ", International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 34, n° 4, pp. 399–407, 2007.

- [57] S. Özerinç, "Heat transfer enhancement with nanofluids ", The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, (2010).
- [58] S. Hong K, K. Hong T et H. S. Yang, "Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles ", Applied Physics Letters, vol. 88, pp. 031901, 2006.
- [59] N. Karthikeyan, J. Philip et B. Raj, "Effect of clustering on the thermal conductivity of nanofluids ", Materials Chemistry and Physics, vol. 109, n° 1, pp. 50-55, 2008.
- [60] M. Batmunkh, M. R. Tanshen, M. J. Nine, M. Myekhlai, H. Choi, H. Chung et H. Jeong, " Thermal conductivity of TiO2 nanoparticles based aqueous nanofluids with an addition of a modified silver particle ", Industrial and Engineering Chemistry Research, vol. 53, pp. 8445–8451, 2014.
- [61] W. Evans, R. Prasher, J. Fish, P. Meakin, P. Phelan et P. Keblinski, "Effect of aggregation and interfacial thermal resistance on thermal conductivity of nanocomposites and colloidal nanofluids ", International Journal of Heat Mass Transfer, vol. 51, pp. 1431-1438, 2008.
- [62] D. David, "Nanofluides, l'efficacité à la hause ", 2008. [En ligne]. Available: www.cooling-masters.com.
- [63] P. Keblinski, S. R. Phillpot, S. U. S. Choi et J. A. Eastman, "Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids) ", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 45, pp. 855–863, 2002.
- [64] J. A. Ranga Babu, K. K. Kumar et S. S. Rao, "State-of-art review on hybrid nanofluids ", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 77, pp. 551–565, 2017.
- [65] A. Hadaoui, "Effets de taille et de concentration sur les propriétés réhologiques des nanofluides ", écoles doctorales sciences et téchnologies, CRMD-Orléans/LPSCM et ENS-Marrakech, 2010.
- [66] G. Huminic et A. Huminic, "Application of nanofluids in heat exchangers: A review ", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, n° 8, pp. 5625–5638, 2012.
- [67] L. S. Sundar, M. K. Singh et A. C. M. Sousa, "Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT–Fe3O4/water hybrid nanofluids ", Int. Commun. Heat Mass Transfer, vol. 52, pp. 73-83, 2014.
- [68] M. Batmunkh, Md. R. Tanshen, Md. J. Nine, M. Myekhlai, H. Choi, H. Chung et H. Jeong,
 "Thermal conductivity of TiO2 nanoparticles based aqueous nanofluids with an addition of a modified silver particle ", Ind. Eng. Chem. Res, vol. 53, pp. 8445–8451, 2014.
- [69] M. Gupta, V. Singh, S. Kumar, S. Kumar et N. Dilbaghi, " Up to date review on the synthesis and thermophysical properties of hybrid nanofluids ", Journal of Cleaner Production, vol. 190, pp. 169-192, 2018.
- [70] X. J. Wang, D. S. Zhu et S. Yang, "Investigation of pH and SDBS on enhancement of thermal conductivity in nanofluids ", Chem. Phys. Lett, vol. 470, pp. 107–111, 2009.

- [71] N. Jha et S. Ramaprabhu, " Synthesis and thermal conductivity of copper nanoparticle decorated multiwalled carbon nanotubes based nanofluids ", J. Phys. Chem. C., vol. 112, pp. 9315–9319, 2008.
- [72] D. Lee, "Thermophysical Properties of Interfacial Layer in Nanofluids ", Langmuir, vol. 23, pp. 6011-6018, 2007.
- [73] J. Chevalier, " Etude de la rhéologie de nanofluides soumis à de très forts taux de cisaillement à l'aide de microsystèmes fluidiques ", Université Grenoble I – Joseph Fourier, 2008.
- [74] M. R. Safaei, H. K. Togun, S. N. Kazi Vafai et A. Badarudin, "Investigation of Heat Transfer Enhancement in a Forward-Facing Contracting Channel Using FMWCNT Nanofluids ", Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, vol. 66, n° 12, pp. 997-1012, 2014.
- [75] M. Hemmat Esfe, A. A. Nadooshan, A. Arshi et A. Alirezaie, "Convective heat transfer and pressure drop of aqua based TiO2 nanofluids at different diameters of nanoparticles: Data analysis and modeling with artificial neural network ", Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, vol. 97, pp. 155-161, 2018.
- [76] H. Khodadadi, S. Aghakhani, H. Majd, R. Kalbasi et S. Wongwises, "A comprehensive review on rheological behavior of mono and hybrid nanofluids: Effective parameters and predictive correlations ", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 127, pp. 997–1012, 2018.
- [77] P. Estellé, S. Halelfadl, N. Doner et T. Maré, " Shear history effect on the viscosity of carbon nanotubes water based nanofluid ", Current Nanoscience, vol. 9, n° 2, pp. 225-230, 2013.
- [78] M. Hemmat Esfe, S. Saedodin, M. Rejvani et J. Shahram, "Experimental investigation, model development and sensitivity analysis of rheological behavior of ZnO/10W40 nanolubricants for automotive applications ", Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, vol. 90, pp. 194-203, 2017.
- [79] E. Abu-Nada, Z. Masoud et A. Hijazi, "Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric ", International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 35, pp. 657–665, 2008.
- [80] E. Abu-Nada, "Effects of variable viscosity and thermal conductivity of Al2O3–water nanofluid on heat transfer enhancement in natural convection ", International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 30, pp. 679–690, 2009.
- [81] J. C. Maxwell-Garnett, " Colours in metal glasses and in metallic films", Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 203, 1904.
- [82] C. H. Chon, K. D. Kihm, S. P. Lee et S. U. S. Choi, "Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al2O3) thermal conductivity enhancement ", Applied Physics Letters, vol. 87, pp. 153107, 2005.

- [83] M. Shahi, A. H. Mahmoudi et F. Talebi, " A numerical investigation of conjugated-natural convection heat transfer enhancement of a nanofluid in an annular tube driven by inner heat generating solid cylinder ", International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 38, pp. 533–542, 2011.
- [84] K. F. Sultan, "Numerical estimation of mixed convection heat transfer of nannofluids flowing in horizontal and an inclined concentric annuli ", Journal of Engineering and Development, vol. 17, n° 6, pp. 44-66, 2013.
- [85] M. Izadi, M. M. Shahmardan, M. J. Maghrebi et A. Behzadmehr, " Numerical study of developled laminar mixed convection of Al2O3/water nanofluid in an annulus ", Chemical Engineering Communications, vol. 200, pp. 878-894, 2013.
- [86] H. K. Dawood, H. A. Mohammed et K. M. Munisamy, "Heat transfer augmentation using nanofluids in an elliptic annulus with constant heat flux boundary condition ", Case Studies in Thermal Engineering, vol. 4, pp. 32–41, 2014.
- [87] M. Benkhedda et T. Boufendi, "Computational study of the mixed convection heat transfer of Ag-water nanofluid in an annular duct ", Renew Sust Energy Conf 2016 International, IRSEC Conf., pp. 14–17, 2016.
- [88] M. Benkhedda, T. Boufendi et S. Touahri, " Prediction of nanofluid forced and mixed convection heat transfer through an annular pipe ", International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, vol. 5, n° 2, pp. 87-91, 2017.
- [89] M. Benkhedda, T. Boufendi et S. Touhri, " Laminar mixed convective heat transfer enhancement by using Ag-TiO2-water hybrid Nanofluid in a heated horizontal annulus ", Heat and Mass Transfer Wärmeund Stoffübertragung, vol. 54, n° 9, pp. 2799-2814, 2018.
- [90] H. Nouri et F. Ravelet, " Introduction à la simulation numérique des écoulements. Application au transfert thermique sur plaque plane avec StarCCM+", Paris: DynFluid -Arts et Metiers ParisTech, 2013.
- [91] M. Kalteh, A. Abbassi, M. Saffar-Avval, A. Frijns, A. Darhuber et J. Harting, " Experimental and numerical investigation of nanofluid forced convection inside a wide microchannel heat sink ", Applied Thermal Engineering, vol. 36, pp. 260-268, 2012.
- [92] Y. Xuan et W. Roetzel, " Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids ", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 43, n° 19, pp. 3701–3707, 2000.
- [93] M. Akbari, N. Galanis et A. Behzadmehr, "Comparative assessment of single and twophase models for numerical studies of nanofluid turbulent forced convection ", International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 37, pp. 136-146, 2012.
- [94] M. K. Moraveji et R. M. Ardehali, " CFD modeling (comparing single and two-phase approaches) on thermal performance of Al 2 o 3/water nanofluid in mini-channel heat sink ", International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 44, pp. 157-164, 2013.

- [95] C. W. Hirt et B. D. Nichols, "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries ", Journal of computational physics, vol. 39, pp. 201-225, 1981.
- [96] P. C. Dauby, " Mécanique des milieux continus, Notes du cours ", université de Liège, 2007.
- [97] V. Manet, "Méthode des éléments finis ", France, 2015.
- [98] E. Bellos et C. Tzivanidis, "Thermal analysis of parabolic trough collector operating with mono and hybrid nanofluids ", Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 26, pp. 105-115, 2018.
- [99] N. N. Esfahani, D. Toghraie et M. Afrand, " A new correlation for predicting the thermal conductivity of ZnO–Ag (50%–50%)/water hybrid nanofluid: An experimental study ", Powder technology, vol. 323, pp. 367-373, 2017.
- [100] B. Pak et Y. Cho, " Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. Experiment ", Heat Transfer, vol. 11, n° 2, pp. 151– 170, 1998.
- [101] B. Ruhani, D. Toghraie, M. Hekmatifar et M. Hadian, "Statistical investigation for developing a new model for rheological behavior of ZnO–Ag (50%–50%)/Water hybrid Newtonian nanofluid using experimental data ", Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. 525, pp. 741-751, 2019.
- [102] L. Colla, L. Marinelli, L. Fedele, S. Bobbo et O. Manca, "Characterization and Simulation of the Heat Transfer Behaviour of Water-Based ZnO Nanofluids ", Nanoscience and Nanotechnology, vol. 15, n° 5, pp. 3599–3609, 2015.
- [103] Y. A. Cengel, "Heat transfer a practical approach ", Hill Boston: WBC McGraw, 1998.
- [104] P. LOAN C, "Modélisation numérique du transfert thermique-méthode des volumes finies ", Universitaria Craiova, 2002, pp. 36-43.
- [105] J. Blazek, " Computational fluid dynamics: principles and applications ", Amsterdam: Elsevier, 2005.
- [106] J. Crank et P. Nicolson, "A practical method for numerical integration of solution of partial differential equations of heat-conduction type ", Proc Cambridge Philos Soc, vol. 43, pp. 50-67, 1947.
- [107] R. W. Clough, "The finite element method in plane stress analysis ", Proceedings of second ASCE conference on electronic computation, vol. 8, pp. 345–378, 1960.
- [108] C. M. Rhie et W. L. Chow, "A numerical study of the turbulent flow past an isolated airfoil with trailing edge separation ", AIAA J, vol. 21, pp. 1525–1532, 1983.
- [109] F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish, " The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics ", Fluid Mechanics and Its Applications, vol. 113, 2016.

- [110] Y. Attou, " Etude numérique et thermique d'un écoulement turbulent dans un espace annulaire d'un rotor stator ", Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, 2019.
- [111] H. K. Versteeg et W. Malalasekera, " An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite volume method ", Longman Scientific and Technical, 1995.
- [112] M. Boukadida, "Etude numérique de l'écoulement dans un collecteur solaire à tubes sous vide ouverts des deux côtés ", Montréal, 2015.
- [113] R. Ben Mansour, N. Galanis et C. T. Nguyen, "Experimental study of mixed convection with watereAl2O3 nanofluid in inclined tube with uniform wall heat flux ", International Journal of Thermal Sciences, vol. 50, pp. 403-410, 2011.
- [114] R. Ben Mansour, N. Galanis et C. T. Nguyen, "Developing laminar mixed convection of nanofluids in an inclined tube with uniform wall heat flux ", International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, vol. 19, pp. 146 - 164, 2009.
- [115] S. V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow ", Washington, DC: Hemisphere, 1980.
- [116] Ansys Fluent theory guide, Release 2020 R1, Canonsburg: Southpointe 2600 ANSYS Drive, 2020.
- [117] ANSYS Fluent user's guide Release 2020 R1, Canonsburg: Southpointe 2600 ANSYS Drive, 2020.

ملخص

النقل الحراري هو تخصص مهم للغاية يمثل نقل الحرارة المرتبط بتدفق وسيط حراري. يلعب دورًا مثيرًا للاهتمام في العديد من التطبيقات (تبريد الأجهزة الإلكترونية، أنظمة تكييف الهواء، أنظمة الطاقة الشمسية) حيث الهدف دائمًا هو زيادة التبادل الحراري والحصول على أداء مثالي. واحدة من الأساليب الفعّالة تتمثل في استبدال الموائع المستخدمة عادة بنوع جديد من الموائع يُسمى موائع النانو كاستر اتيجية جديدة لتحسين خصائص نقل الحر ارة الموائع. موائع النانو هي جيل جديد من وسائل نقل الحرارة تتميز بخصائص حرارية محسنة. لقد استقطبوا عدد كبير من الأبحاث على مر السنوات القليلة الماضية. في هذا السياق، يركز هذا العمل على دراسة السلوك الحراري والديناميكي لمائع النانو الهجين الناتج عن مزج الماء مع جسيمات الفضة (Ag) و أكسيد الزنك (ZnO) داخل فضاء حلقي مائل، حيث يتم تعريض الجزء العلوي منه لأشعة الشمس. استنادًا إلى بيانات تجريبية ،قمنا بتطوير عبارات رياضية جديدة بدلالة درجة الحرارة لحساب اللزوجة الديناميكية والناقلية الحرارية. تم حل المعادلات المنمذجة باستخدام Ansys Fluent القائم على طريقة الأحجام المحدودة. يتم تحليل السلوك الديناميكي والحراري تحت تأثير 4 مقادير رئيسية: تركيز اليحجم للجسيمات النانوية، عدد ريتشاردسون (Ri)، توزيع أشعة الشمس وزاوية ميلان الفضاء الحلقي. تُعرض النتائج على شكل منحنيات و أشعة لتصور الظواهر الفيزيائية الناتجة بوضوح. تشير النتائج إلى أن ماء/ ZnO-Ag المختلطة تظهر أعلى عدد نووسلت بالمقارنة مع الماء النقي و سائل النانو ماء/ZnO لجميع القيم المدروسة لعدد Ri (0.7، 0.7، 1، 1.3، 1.7، 2) والتركيز الحجمي (1٪ و2٪). تأثير هذا الأخير على معامل الاحتكام يكاد يكون معدوما من أجل z * 0.15> * z. تؤثر توزيعات الإشعاع الشمسي غير المتجانس على الجدار الخارجي للفضاء الحلقي بشكل كبير على تغير الخصائص الديناميكية والحرارية. بالإضافة إلى ذلك، له تأثير مباشر على تغير السرعة. يتجلى هذا التأثير في ظهور دوامتين متناظرتين فوق القطر الأفقي.

الكلمات المفتاحية : الحمل الحراري المختلط، المائع النانوي الهجين، الإشعاع الشمسي، عدد غراشوف، عدد ريشار دسون.

Résumé

La convection thermique est une discipline très importante qui représente le transfert thermique associé à l'écoulement de fluide caloporteur. Elle joue un rôle crucial dans de nombreuses applications (le refroidissement des dispositifs électroniques, les systèmes de climatisation, les systèmes d'énergie solaire), où le but est toujours d'intensifier les échanges thermiques et d'obtenir les meilleures performances. L'une des méthodes efficaces consiste à remplacer les fluides couramment utilisés par un nouveau type de fluide appelé nanofluide, en tant que nouvelle stratégie pour améliorer les caractéristiques de transfert de chaleur des fluides. Les nanofluides sont une nouvelle génération de fluides caloporteurs qui se caractérisent par des propriétés thermophysiques améliorées. Ils ont suscité un nombre considérable de recherches au cours des dernières années. Dans ce contexte, le présent travail s'intéresse à l'étude du comportement thermique et dynamique du nanofluide hybride eau/Ag-ZnO dans un espace annulaire incliné, dont la partie supérieure est exposée à des rayonnements solaires. Sur la base des données expérimentales, de nouveaux modèles dépendant de la température ont été développés dans ce travail pour calculer la viscosité dynamique et la conductivité thermique. Les équations gouvernantes ont été résolues à l'aide du solveur Ansys Fluent basé sur la méthode des volumes finis. Les comportements dynamique et thermique sont analysés sous les effets de quatre paramètres principaux : la concentration volumique des nanoparticules, le nombre de Richardson (Ri), la distribution des rayonnements solaires et l'angle d'inclinaison du conduit. Les résultats sont exposés sous forme de courbes, de contours et de vecteurs, afin de bien visualiser les phénomènes physiques résultants. Les résultats montrent que le nanofluide hybride eau/Ag-ZnO présente le nombre de Nusselt (Nu) le plus élevé par rapport à l'eau pure et au nanofluide eau/ZnO pour toutes les valeurs étudiées du nombre de Ri (0,3, 0,7, 1, 1,3, 1,7, 2) et de la concentration volumique (1 % et 2 %). L'effet de cette dernière sur le coefficient de frottement est négligeable lorsque $z^* < 0.15$. La distribution non homogène des rayonnements solaires sur la paroi de la conduite a un effet très marqué sur la variation des grandeurs dynamiques et thermiques. De plus, l'écoulement secondaire a un effet direct sur la variation de la vitesse. Cet effet se traduit par l'apparition de deux tourbillons au-dessus du diamètre horizontal.

Mots clés : convection mixte, nanofluide hybride, rayonnement solaire, nombre de Grashof, nombre de Richardson.

Abstract

Thermal convection is a very important discipline, representing the heat transfer associated with the flow of heat transfer fluid. It plays a crucial role in many applications (cooling of electronic devices, air-conditioning systems, solar energy systems), where the goal is always to intensify the heat exchange and obtain the best performance. One of the effective methods is to replace commonly used fluids with nanofluids as a new strategy to improve the heat transfer characteristics of fluids. Nanofluids are a new generation of heat transfer fluids characterized by improved thermophysical properties. They have attracted a considerable amount of research in recent years. In this context, the present work focuses on the study of the thermal and dynamic behavior of the Ag-ZnO/water hybrid nanofluid in an inclined annular space, the upper part of which is exposed to solar radiation. Based on the experimental data, new temperature-dependent models were developed in this work to calculate the dynamic viscosity and thermal conductivity. The governing equations were solved using the Ansys Fluent solver based on the finite volume method. Four effects on the dynamic (axial and radial velocity and friction coefficient) and thermal (axial and radial temperature and Nusselt number) quantities were investigated: the effect of nanoparticle volume concentration, Ri number, solar radiation distribution on the wall, and tilt angle. The results are presented in the form of curves, contours, and vectors in order to visualize the resulting physical phenomena. The results show that the Ag-ZnO/water hybrid nanofluid exhibits the highest Nu number compared to pure water and water/ZnO for all studied values of Ri number (0.3, 0.7, 1, 1.3, 1.7, 2) and volume concentration (1% and 2%). The effect of the latter on the friction coefficient is negligible when $z^* < 0.15$. The inhomogeneous distribution of solar radiation at the pipe wall has a very strong effect on the variation of dynamic and thermal quantities. In addition, the secondary flow has a direct effect on the variation of the velocity. This effect is reflected in the appearance of two vortices above the horizontal diameter.

Keywords : Mixed convection, hybrid nanofluid, solar radiation, Grashof number, Richardson number.