

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département Génie Mécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par

- **Okba Salah Eddine**
- **Benaissa Amina**

Intitulé

***Effet d'un champ magnétique externe sur la convection mixte d'un fluide
magnétique dans un canal ondulé***

Soutenu le :

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Dr. Gouidmi Hamza</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr. TAYEBI Tahar</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.Belfaggas Billal</i>	<i>....</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

Je veux remercier tout d'abord mon dieu Allah le tout puissant de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

J'ai le grand plaisir que j'ai eu l'occasion de réaliser mon mémoire de Master sous la direction de Dr. TAYEBI Tahar qui je précise le premier et le très grand remerciement à lui, j'ai particulièrement apprécié ses encouragements, ses conseils, et sa disponibilité durant la réalisation de ce travail.


Mes remerciements s'adressent aussi Et ...pour avoir accepté d'examiner ce travail et participer au jury.

J'exprime mes sincères remerciements s'adressent également aux responsables de laboratoire de génie mécanique Mr. Kamel Zitouni et Mr. Amer Briki pour ses aides et ces conseils.


Enfin, je veux remercier toute personne ayant aidé de près ou loin pour la réalisation de ce travail.



Dédicaces



Je profite l'occasion pour exprimer mon grand respect à mon encadreur **Dr. TAYEBI Tahar**. Pour son aide indéfectible et surtout sa patience. Et je le remercie de m'avoir orientée pour la réalisation de ce travail.



Je dédie ce modeste travail à mon très cher père et ma très chère mère qui m'a toujours entouré de sa confiance, amour et encouragement tout le long de ma vie.

A mon frère, A ma sœur et A tous les membres de ma famille, petits et grands.

A tous mes camarades de la section du master génie mécanique énergétique.



Benaissa Amina



Dédicaces

Avant tout je dédie ce modeste travail, spécialement

*À notre encadreur **Dr. TAYEBI Tahar** qui donnent la force, le courage et la patience de mettre ce petit projet.*

À mes chers parents, qui m'est toujours les plus chères, Je lance un appel à Allah pour qu'il vous accorde une bonne santé et une longue vie.

À ma sœur et mes frères Fares, Hicham, Abdel hakim et abd elhak , A tous les membres de ma famille, grands et petits À tous mes amis, surtout mon chère amie farouk

Okba Salah Eddine

Nomenclatures

Lettres latines

\vec{B}	<i>Champ magnétique (T).</i>
C_p	<i>Chaleur spécifique à pression constante, (J/kg. K).</i>
\vec{g}	<i>Accélération de la pesanteur (m/s²).</i>
D	<i>Diamètre de la conduite (m).</i>
f	<i>Coefficient de frottement</i>
k	<i>Conductivité thermique (W/m K).</i>
K^*	<i>Le rapport de conductivité thermique de fluide à celle de solide.</i>
K_f	<i>Conductivité thermique du fluide (W/m K).</i>
K_s	<i>Conductivité thermique du solide (W/m K).</i>
K_{nf}	<i>Conductivité thermique du nano fluide.</i>
p	<i>Pression (N/m²).</i>
P	<i>Pression dimensionnelle.</i>
T_0	<i>Température de référence (K).</i>
u, v, w	<i>Composantes de vitesse en coordonnées cartésiennes (m/s).</i>
U, V, W	<i>Composantes adimensionnelles des vitesses.</i>
x, y, z	<i>Coordonnées d'espace dimensionnelles (m).</i>
X, Y, Z	<i>Coordonnées d'espace adimensionnelles.</i>
q''	<i>Flux impose</i>
V''	<i>Un champ de vitesse</i>
S_φ	<i>Un terme de source</i>

Symboles Grecs

α	Diffusivité thermique (m^2/s)
β	Coefficient de dilatation du fluide à pression constante (K^{-1}).
θ	Température adimensionnelle $\theta = \frac{T-T_c}{\Delta T}$
φ	La fraction volumique des nanoparticules dans le fluide.
ρ	La masse volumique (Kg /m^3).
μ	Viscosité dynamique ($kg/m^2.s$).
ν_{nf}	La viscosité dynamique du nanofluide
ν	Viscosité cinématique (m^2/s).
σ	Conductivités électrique ($\Omega^{-1}m^{-1}$).
Γ_φ	Coefficient de diffusion

Nombres adimensionnels

Pr	Nombre de Prandtl, $Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}$
Ra	Nombre de Rayleigh, $Ra = \frac{g(T_c - T_f)\beta_f H^3}{\nu_f \alpha_f}$
Ha	Nombre de Hartmann, $Ha = HB_0 \sqrt{\sigma_f / \mu_f}$
Nu	Nombre de Nusselt
Ri	Nombre de Richardson
Gr	Nombre de Grashof
Re	Nombre de Reynolds

Indices

"	Estimation initiale.
p	particule.
nf	nanofluide.
0	référence.

Liste des figures

Figure 2.1. Présentation des configurations étudiées.	31
Figure 3.1. Volume de contrôle pour la résolution en volumes finis.	41
Figure 3.2. Schéma représentatif de l'algorithme SIMPLE	45
Figure 4.1. Maillage de conduit ondulée $N=02$	52
Figure 4.2. Maillage de conduit lisse	52
Figure 4.3. Comparaison entre les résultats obtenus avec l'équation de Shah.[1] résultats numériques de Bayat et al.[2] et les résultats expérimentaux de Kim et al.[3].	53
Figure 4.4. Champ de vitesse magnitude pour différents nombres de Ha et γ , $N=0$ $Ri=1, (\varphi=0.02)$	55
Figure 4.5. Champ de Vitesse magnitude pour différents nombres de Ha et γ , $N=2$ $Ri=1, (\varphi=0.02)$	56
Figure 4.6. Champ de Vitesse magnitude pour différents nombres de Ha et γ , $N=3$ $Ri=1, (\varphi=0.02)$	58
Figure 4.7. Champ de Vitesse magnitude pour différents nombres de Ha et γ , $N=4$ $Ri=1, (\varphi=0.02)$	59
Figure 4.8. Champ de vitesse magnitude pour différents nombres de Ha et $Ri=0.1$ $N=04$ $(\varphi=0.02)$	61
Figure 4.9. Champ de vitesse magnitude pour différents nombres de Ha et $N=04$ $Ri=1 (\varphi=0.02)$	62
Figure 4.10. champ de vitesse magnitude pour différents nombres de Ha et $N=04$ $Ri=10 (\varphi=0.02)$	64
Figure 4.11. Champ de Température magnitude pour différents nombres de Ha et, $Ri=1$ $N=0 (\varphi=0.02)$	65
Figure 4.12. Champ de Température magnitude pour différents nombres de Ha et $N=02$, $Ri=1 (\varphi=0.02)$	67
Figure 4.13. Champ de Température magnitude pour différents nombres de Ha et $N=02$, $Ri=1 (\varphi=0.02)$	68
Figure 4.14. Champ de Température magnitude pour différents nombres de Ha et, $Ri=1$ $(\varphi=0.02)$	70
Figure 4.15. Champ de Température magnitude pour différents nombres de Ha et $N=04$, $Ri=0.1 (\varphi=0.02)$	71

Figure 4.16. Champ de Température magnitude pour différents nombres de Ha et N=04, Ri=1 ($\phi=0.02$)	73
Figure 4.17. Champ de Température magnitude pour différents nombres de Ha et N=04, Ri=10 ($\phi=0.02$)	74
Figure 4.18. Variation du Nusselt local le long de la surface du canal en fonction de Ri pour différentes valeurs de Ha., N=04, $\phi=0.02$.	76
Figure 4.19. Variation du nombre du Nusselt local le long de la surface de conduite en fonction de N pour différentes valeurs de Ha, ($\phi=0.02$, Ri=1).	78
Figure 4.20. Evolution de coefficient de frottement le long de la surface du canal en fonction de N pour différentes valeurs de Ha. Pour $\phi=0.02$.Ri=1 et et pour : a) sans champs magnétique b) avec champs magnétique : $\gamma=90^\circ$	80
Figure 4.21. Evolution de coefficient de frottement le long de la surface du en fonction de Ri pour différentes valeurs de Ha. (N=04, $\phi =0.02$).	82
Figure 4.22. Variation de nombre de Nusselt Moyen le long de la paroi de la conduite en fonction de Ri et pour différentes valeurs de N et $\phi=0.02$.	83
Figure 4.23. Variation du coefficient de frottement moyen en fonction du nombre de Richardson pour différentes valeurs de N, Ha et Ri $\phi=0,02$.	84
Figure 4.24. Variation du frottement moyen pour différentes valeurs de Ha, Ri N=04 ($\phi = 0.02$)	85
Figure 4. 25. <i>Variation de l'efficacité pour différentes valeurs de N et Ri, $\gamma=(0^\circ,90^\circ)\phi=0.02$.</i>	87
Figure 4. 26. Variation de l'efficacité en fonction de Ri pour différentes valeurs de Ha N=04, $\phi=0.02$.	87
Figure 4. 27. Variation de l'efficacité en fonction de Ri pour différentes valeurs de ϕ et Ha ,N=04	89

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : <i>Résumé des travaux théoriques, numérique et expérimentaux de la convection mixte des nanofluides dans les conduites.</i>	27
Tableau 2.1: <i>Les conditions aux limites pour le cas du canal horizontal.</i>	32
Tableau 2.2: <i>Propriétés thermophysiques (eau, Fe₃O₄)</i>	34
Tableau.4.1 : <i>Etude du maillage pour N=0</i>	50
Tableau.4.2 : <i>Etude du maillage pour N=02</i>	51
Tableau.4.3 : <i>Etude du maillage pour N=03</i>	51
Tableau.4.4 : <i>Etude du maillage pour N=04</i>	51

T able des matières

Remerciements		
Dédicaces		
Nomenclature		
Liste des figures		
Liste des tableaux		
Table des matières		
Introduction	1	
<i>Chapitre 1 : Étude bibliographique</i>		
1.1	Introduction	4
1.2	Synthèse bibliographique	5
1.3	Bibliographies	18
<i>Chapitre 2 : Modélisation du problème</i>		
2.1	Introduction	30
2.2	Modèle physique	30
2.3	Hypothèses simplificatrice	31
2.4	Conditions aux limites	32
2.5	Modèle mathématique et équations dimensionnelles	32
	2.5.1 Equations dimensionnelles	32
	✓ Equation de continuité	32
	✓ Equation de quantité de mouvement	34
	✓ Equation d'énergie	35
2.6	Nombre de Nusselt	35
2.7	Nombre de Richardson	36
2.8	Nombre de Grashof	36
2.9	Bibliographie	37

Chapitre 3 : Méthode Numérique et Présentation du Code Fluent

3.1	Introduction	39
	3.1.1 Méthode des différences finis	39
	3.1.2 Méthode des éléments finis	39
	3.1.3 Méthode spectrale	40
	3.1.4 Méthode des volumes finis	40
3.2	Utilisation du GAMBIT	40
3.3	Utilisation du FLUENT	40
3.4	Méthode de résolution des équations de transport	41
	3.4.1 Schéma de discrétisation	41
	3.4.2 Choix du schéma d'interpolation de la pression	42
	3.4.3 Choix de la méthode de couplage pression-vitesse	43
3.5	Résolution numérique	45
	3.5.1 Paramètre de contrôle de la convergence	45
	3.5.1.1 Critère de convergence	46
	3.5.1.2 Sous-relaxation	46
3.6	Etapes de résolution du problème	47
3.7	Bibliographies	48

Chapitre 4 : Résultat et discussion

4.1	Introduction	50
4.2	Test du maillage	50
4.3	Validation des résultats	52
4.4	Discussion des résultats	
	4.4.1 Champ de vitesse	52
	4.4.2 2 ^{ème} Cas (N=04 ($\varphi = 0.02$)) Pour différent Ri)	53
	4.4.2.1 Champ de vitesse	60
	4.4.2.2 Champ température	64
	4.4.2.3 2 ^{ème} Cas (N=04 ($\varphi = 0.02$)) Pour différent Ri)	70
4.5	Effets de Ri, Ha, B, γ et sur de nombre de Nusselt local	74
	Conclusion	91

Introduction

La convection mixte avec les nanofluides et la MHD sont des sujets d'investigation intéressants. La plupart des applications de la convection mixte se trouvent dans les flux atmosphériques, l'énergie solaire stockage, échangeurs de chaleur, technologies de lubrification et refroidissement des appareils électroniques.

Plusieurs investigations ont été menées sur la convection mixte, notamment avec nanofluides et MHD, à travers canaux et cavités.

Une étude numérique des phénomènes de transfert et d'écoulement d'un ferrofluide sous l'effet d'un champ magnétique dans des différentes conduites horizontaux lisses et a parois ondulés ont été étudiés. La paroi de la conduite est maintenue à un flux de chaleur constant. L'écoulement est en régime laminaire hydrodynamiques et thermiquement établis. Le ferrofluide est de type Newtonien incompressible et obéit à l'approximation de Boussinesq.

Ce mémoire est structuré comme suit :

Le Premier chapitre est consacré à une revue bibliographique contenant une grande partie des travaux théoriques, numériques et expérimentaux effectués dans la littérature basée sur la convection avec écoulement du nanofluide, en présence d'un champ magnétique de diverses configurations, paramètres et résultats.

Dans **le premier chapitre**, une étude bibliographique a été présentée pour citer les différents travaux théoriques, numériques et expérimentaux sur la convection naturelle dans des conduites

Introduction

Le deuxième chapitre présentera la configuration géométrique étudiée (model physique) ainsi que le modèle mathématique traduisant les équations régissant le phénomène de la convection mixte laminaire au sein de la conduite lisse et a parois ondulée.

Le troisième chapitre s'intéresse à la description de la méthode des volumes finis, ainsi que la discrétisation numérique de l'équation générale de transport, et une présentation du code de calcul FLUENT et le logiciel qui réalise la géométrie et le maillage GAMBIT.

Le quatrième chapitre, la partie la plus importante de ce mémoire, On rassemble la validation de nos simulations, les principaux résultats numériques ainsi les commentaires et interprétations des résultats obtenus.

Enfin, notre mémoire est clôturé par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.

Chapitre 1

Etude bibliographique

Sommaire

1.1	Introduction.....	04
1.2	Synthèse bibliographique05

1.1 Introduction

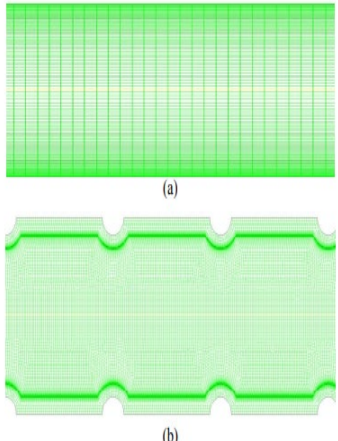
La magnétohydrodynamique (MHD) est un phénomène physique qui étudie les mouvements des fluides électriquement conducteurs en présence d'un champ magnétique (champ de force externe).

Le transfert de chaleur par convection mixte dans un canal ondulé en présence d'un champ magnétique occupe une place importante de son application dans divers processus industriels comme le refroidissement d'équipements électroniques, la technologie solaire, et la sûreté des réacteurs nucléaires, la métallurgie.

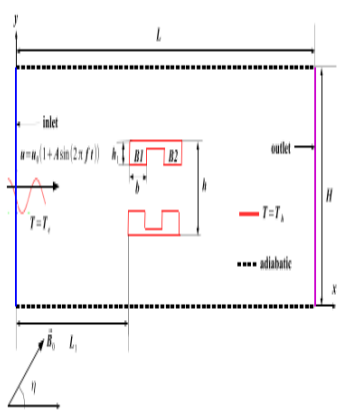
Les nanofluides sont des nouveaux types des fluides caloporteurs contenant des nanoparticules qui sont uniformément et stablement distribuées dans un fluide de base comme (l'eau, l'éthylène glycol et l'huile). Ces nanoparticules sont généralement des particules métalliques, de céramique, d'oxyde, des nanotubes de carbone, des nano-flocons de graphène.

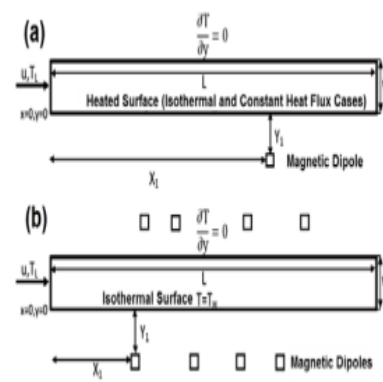
Dans cette revue bibliographique on citera les différents travaux réalisés par les chercheurs sur la convection mixte dans les cavités de diverses configurations et pour différentes conditions aux limites set remplie de divers fluides sous l'effet d'un champ magnétique.

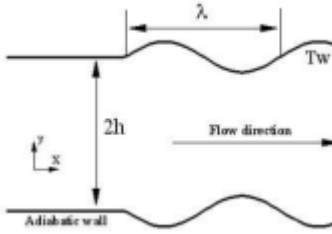
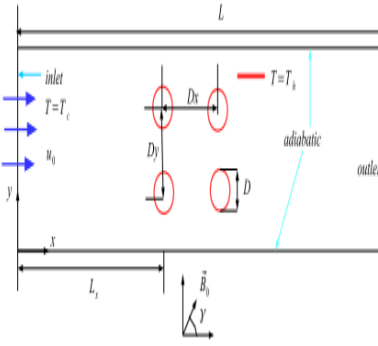
1.2 Synthèse bibliographique

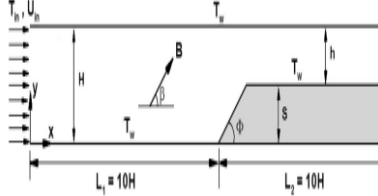
Auteurs	Configuration	Paramètres d'étude	Méthodes	Forme	MHD	Observation
<p>Guze et al. (2018) [1]</p>	 <p>(a)</p> <p>(b)</p>	<p>ZrO₂ $Re = 3000,$ $7000.$</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Canal lisse (a) et d'un canal avec moletages annulaires (b).</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Diminue la précision de détermination de l'hydrodynamique et du transfert de chaleur du nanofluide puisque les propriétés du nanofluide dépendent essentiellement de la concentration en nanoparticules, et le modèle homogène ne tient pas compte des changements de concentration dans l'écoulement.

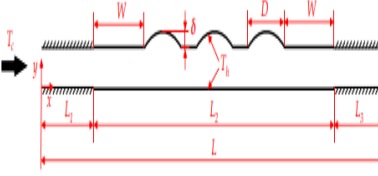
<p>Selimefen digi et al. (2019) [2]</p>		<p>Fe_3O_4-eau $Ha=0,1,0.5,3$ $Re=100,300,500$ $\phi = 0.02$</p>	<p>Méthodes d'éléments finies</p>	<p>Canal bifurquant</p>	<p>Avec</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Il a été observé que des changements importants dans l'emplacement et la taille des zones de recirculation établies dans les parois des canaux existants du canal de bifurcation. • La présente étude peut être étendue pour inclure les effets de divers types de nanoparticules, les effets de forme des nanoparticules, l'emplacement de la source de dipôle magnétique, le rapport d'aspect des canaux et les effets de convection naturelle, ce qui enrichirait l'applicabilité de la résultats numériques pour diverses applications de canaux bifurquants rencontrés dans la pratique.
---	--	---	---	-------------------------	-------------	--

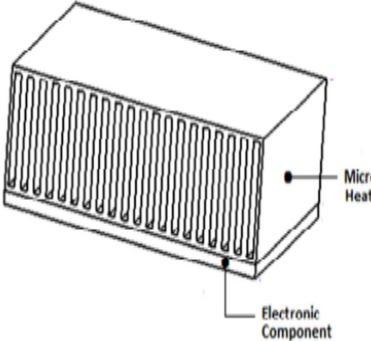
<p>Selimefen digil et Öztop (2019) [3]</p>		<p>CuO-eau $Re=100,500$ $\phi = 0.04,$ $Ha=0,15$ $\eta = 0, 45^\circ, 90^\circ$ $N=1,4,8,12$ $b=$ $0.125h, 0.5h, 0.875h$</p>	<p>Méthodes d'éléments finies</p>	<p>Bloc de canaux</p>	<p>Avec</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Le nombre de Nusselt moyen augmente avec des valeurs plus élevées du nombre de Reynolds, de l'angle d'inclinaison magnétique, du nombre de Hartmann et de la fraction volumique des particules solides tandis que le nombre d'onde et la hauteur de l'ondulation ont l'effet inverse en configuration d'écoulement stable. • Les contributions des différents blocs de la plaque chauffante au nombre de Nusselt global sont significativement affectées par la variation de hauteur de l'ondulation. • Dans un écoulement pulsé, l'impact de la fréquence de pulsation est de réduire la valeur maximale du nombre de Nusselt moyenné dans l'espace. • Les nombres de Nusselt moyennés dans l'espace pour les parois chaudes du mini canal sont plus élevés en écoulement pulsé par rapport à l'écoulement constant en absence ou en présence de champ magnétique. • L'utilisation de nanoparticules avec le fluide de base entraîne un déphasage entre le taux de transfert de chaleur spatial moyen pour le fluide de base et le nanofluide.
--	---	--	-----------------------------------	-----------------------	-------------	---

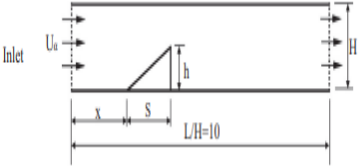
<p>Goharkha h et al. (2018) [4]</p>		<p>(Ferrofluide)</p> <p>W= 2mm L=20mm Pr = 5.5 Re=300 cp=4000j/kg $\beta=5.6 \times 10^{-4} 1/k$ k=0.7273 x0=0.06 $\rho=1180 \text{ kg/m}^3$ $\mu=10^{-3} \text{ Ns/m}^2$</p>	<p>Méthode des Volumes finis</p>	<p>Canal bidimensionnel</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Les résultats montrent que placer un champ magnétique en un point arbitraire près du canal ne conduit pas nécessairement à une amélioration du transfert de chaleur par convection. • D'autre part, pour certains endroits, l'augmentation du transfert de chaleur se traduit en termes d'augmentation du transfert de chaleur total et de diminution de la température moyenne de la surface chauffée pour des conditions isothermes et de flux de chaleur constant, respectivement. • Il a également été montré que contrairement au cas isotherme, le transfert de chaleur ne diminue pas toujours avec la distance du champ magnétique à la surface chauffée pour une condition de flux de chaleur constant • Il est démontré que les champs d'écoulement et de température peuvent être manipulés par l'application de plusieurs sources de champ magnétique.
---	---	--	--	---------------------------------	-------------	---

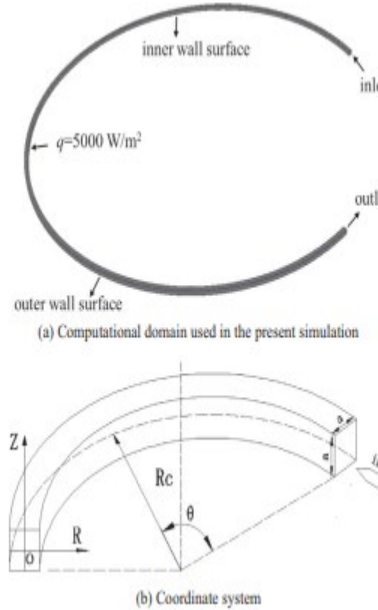
<p>Aboukaze mpour et al. (2016) [5]</p>		<p>Al₂O₃-eau Re = 100,500 Pr = 6.5 α = 0.0,0.3 φ = 0.0 λ = 1,12</p>	<p>Méthodes d'éléments finies</p>	<p>Canal ondulé</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Les effets des longueurs d'onde, du déphasage entre les ondes des parois opposées, du nombre de Reynolds et de la fraction volumique des nanoparticules sur le transfert de chaleur local et total ont été étudiés. L'ajout de nanoparticules au flux de base a eu un effet important sur le transfert de chaleur • D'augmenter le transfert de chaleur était de diminuer la longueur d'onde ; cependant, cela peut ne pas être une réponse directe aux problèmes industriels en raison de la chute de pression.
<p>Selimefen digil et Öztop (2018) [6]</p>		<p>CuO-eau Ra=100,500 ,10 00 Ha=0, 2.5,5,10 φ = 0,0.4 Dx=0.5=8 H Lx = 10H Gr=2 × 10⁴ ,2 × 10⁵</p>	<p>Méthodes d'éléments finies</p>	<p>Canal avec cylindres circulaires</p>	<p>Avec</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Des pics secondaires du nombre de Nusselt local sont établis pour tous les cylindres en l'absence de champ magnétique pour des valeurs modérées et supérieures du nombre de Reynolds. • Les valeurs de crête diminuent progressivement avec l'augmentation du nombre de Hartmann et disparaissent à la valeur la plus élevée de l'intensité du champ magnétique.

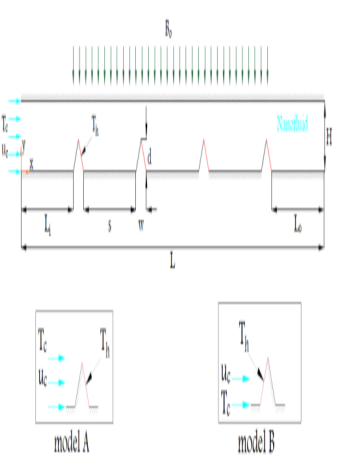
<p>Atashafrooz et al. (2019) [7]</p>		<p>Cu-eau $Ha = (0-100)$ $\beta = (0^{Ao} - 90^{Ao})$ $\phi = (0-0.06)$</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Micro canal rainuré.</p>	<p>Avec</p>	<ul style="list-style-type: none"> • L'influence du paramètre β sur les taux de transfert de chaleur le long des parois des conduits est positive et croissante, de sorte que les valeurs les plus élevées de N_{UB}^- et N_{UT}^- sont liées au champ magnétique vertical. • Les effets de Ha sur la magnitude de N_{UB}^- sont négatifs et décroissants, de sorte que les valeurs les plus élevées de N_{UB}^- se produisent en l'absence de champ magnétique ($Ha = 0$). • Une augmentation des valeurs des paramètres β et Ha entraîne une augmentation significative des quantités d'irréversibilité de l'écoulement. • Les effets des paramètres Ha et β sur le taux d'augmentation de $(N_{SM})_t$ sont supérieurs à leurs influences sur $(N_{SH})_t$ et $(N_{SV})_t$ • La fraction volumique des nanoparticules a un effet croissant sur les taux de transfert de chaleur et le degré d'irréversibilité du flux.
--------------------------------------	---	---	----------------------------------	-----------------------------	-------------	--

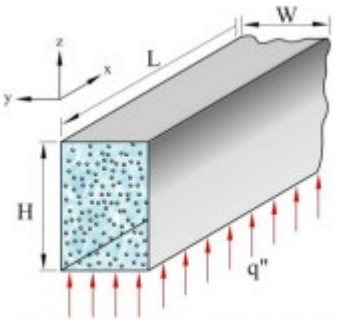
<p>Zheng et al. (2019) [8]</p>		<p>Al₂O₃-eau Al₂O₃- Ethylène Glycol Re = 25 $\phi = 0.05$ L = 500 μm H = 25 μm T_h = 303 K x = 0 μm</p>	<p>Méthodes d'éléments finies</p>	<p>Micro canal</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Il a été prouvé que l'IM peut prédire avec précision et efficacité les bornes des paramètres concernés. Ensuite, le problème de la convection forcée incertaine sous des incertitudes d'intervalle dans la fraction volumique solide, la profondeur des rainures et leur combinaison sont étudiés numériquement. • Les résultats montrent que les incertitudes ont des influences remarquables sur la température simulée, la vitesse et le nombre de Nusselt local du problème de convection forcée.
---------------------------------------	---	--	---	--------------------	-------------	--

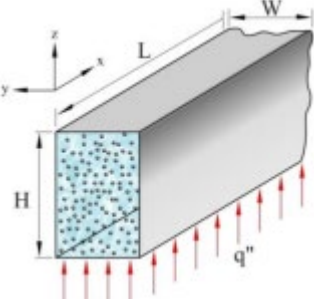
<p>Krishna et Kumar. (2019) [9]</p>	 <p>The diagram shows a 3D perspective of a rectangular micro-channel heat sink. It features a series of vertical, parallel channels. On the right side, there is a circular feature labeled 'Micro Heat'. At the bottom left, there is a rectangular area labeled 'Electronic Component'.</p>	<p>(Al₂O₃-eau) $Re=10^4, 2 \times 10^4$ $\phi = 0.01, 0.025$</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Micro canal</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • En augmentant le nombre de Reynolds, la perte de charge augmente mais la perte de charge n'est pas significative avec l'ajout de nanoparticules à l'eau par rapport à l'eau pure car les nanoparticules sont petites et la fraction volumique des particules est faible. • Il a été observé qu'avec l'augmentation de la température d'entrée du fluide de travail, le taux de transfert de chaleur augmente. • Il a également été observé qu'il y avait une augmentation du transfert de chaleur à une température de base plus élevée de 1000 C par rapport à 800 C. • On peut donc conclure que les nanofluides TiO₂- H₂O et Al₂O₃-H₂O appliqués au MCHS ont une amélioration significative du taux d'évacuation de la chaleur des équipements électroniques.
--	---	--	----------------------------------	--------------------	-------------	--

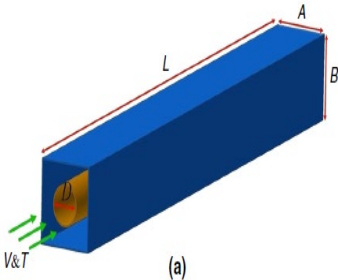
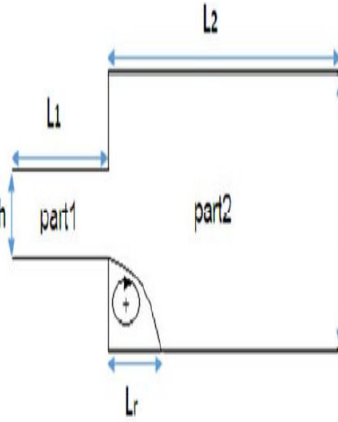
<p>Ahmed et al. (2018) [10]</p>		<p>Al₂O₃-EG $Re = (4 \times 10^3 - 32 \times 10^3)$ $\phi = 0.01, 0.06$ $Nu = 0.8445$</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Nervure triangulaire</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • L'amélioration du transfert de chaleur la plus élevée est obtenue avec le nanofluide SiO₂-EG. • Le nombre de Nusselt augmente relativement avec les concentrations de nanoparticules tandis qu'une légère augmentation du coefficient de frottement cutané est observée. • La contrainte de cisaillement augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules et la diminution du diamètre des nanoparticules. • Lorsque le diamètre des nanoparticules diminue, le nombre de Nu augmente avec une légère augmentation du coefficient de frottement.
--	---	---	----------------------------------	-----------------------------	-------------	--

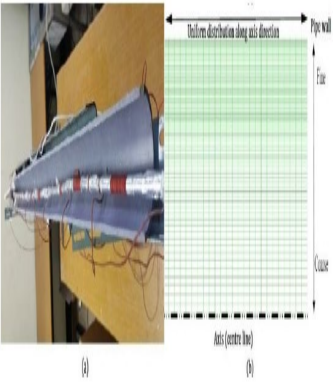
<p>Fang Liu et al. (2018) [11]</p>	 <p>(a) Computational domain used in the present simulation</p> <p>(b) Coordinate system</p>	<p>Al₂O₃-eau $\phi = 0.005$, $Re = 1550, 2200, 2250-2370$ $De = 219.2, 311.1, 318.2, 335.2$ $u = (0.7-0.25)$ m/s</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Conduits courbes</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • À mesure que le nombre de Dean augmente, les nombres de Nusselt local et moyen augmentent, tandis que les facteurs de friction local et moyen diminuent. • Une amélioration significative du transfert de chaleur par convection dans les nanofluides peut être obtenue au prix d'une légère augmentation du frottement d'écoulement dans les conduits carrés incurvés en changeant les solutions.
---	---	--	----------------------------------	-------------------------	-------------	---

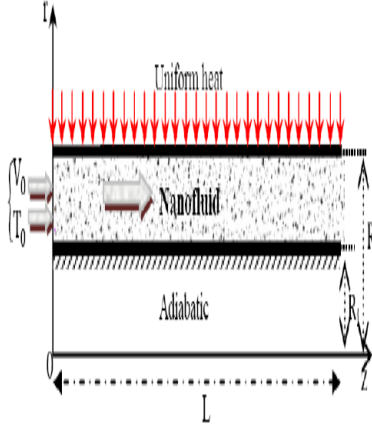
<p>Shiriny et al. (2019) [12]</p>		<p>(FMWCNT /eau) $Re=20$ $Ha=0,40$ $\phi=0, 0.0025$ $B=0.005, 0.01$ $w = 0.5 \mu m$ $d = 0.5 \mu m$ $s=2.5 \mu m$ $L_i=10 \mu m$ $L_o=15.5 \mu m$.</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Côtes triangulaires</p>	<p>Avec</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Les principaux résultats obtenus sont les suivants : Une augmentation de Re entraîne une augmentation de la vitesse de glissement Nu_x et Nu_m. • Il a été trouvé que Nu_x et Nu_m augmentent avec Ha et ϕ. • À mesure que us augmente, le transfert de chaleur augmente pour le modèle B et diminue pour le modèle A. • L'amélioration de Nu_m pour le modèle A est plus petite que celle du modèle B lorsque Re augmente
--	---	--	----------------------------------	----------------------------	-------------	--

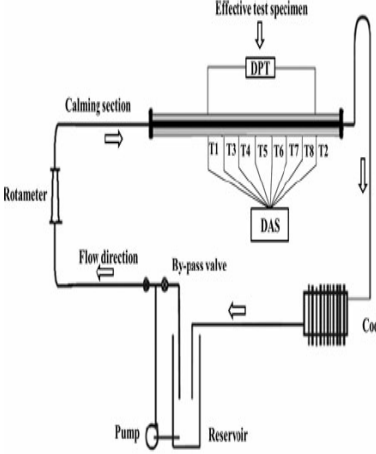
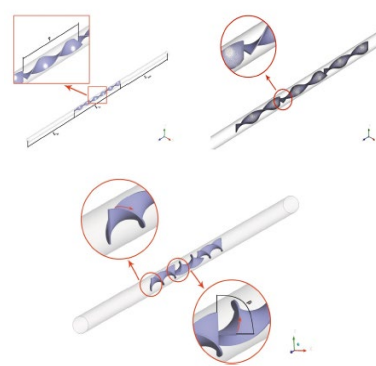
<p>Uysal et al. (2018) [13]</p>	 <p>Fig. 1. Schematic view of minichannel.</p>	<p>Diamond- Fe₃O₄/water hybrid Re=100,600,80 0,1000 $\phi = (0.05-0.2\%)$ $q'' = 10000$ W/m² L=50 mm W=1 H=1.5 mm</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Mini canal rectangulaire</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cela signifie que la génération d'entropie due au frottement du fluide peut être dominante à des nombres de Reynolds inférieurs pour le nanofluide hybride diamant-Fe₃O₄/eau par rapport à celui du diamant/eau et du nanofluide Fe₃O₄/eau. • Bien que ce taux de génération d'entropie minimum soit lié aux propriétés thermo physiques des nanofluides, il est également affecté par le diamètre hydraulique du canal étudié • Il est bien connu que le taux de génération d'entropie dû au frottement des fluides est une propriété dominante des micro canaux précisément en raison de leurs très petits diamètres hydrauliques.
---------------------------------	---	--	--	-------------------------------------	-------------	--

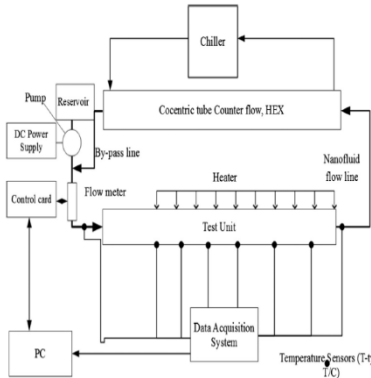
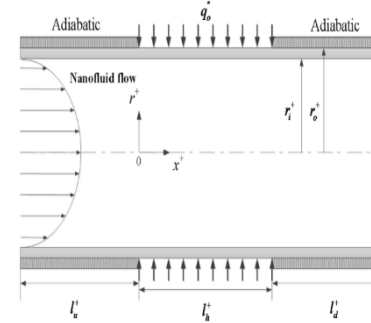
<p>Uysa al. (2017) [14]</p>		<p>ZnO-Ethylene Glycol Nanofluid ranged $Re=100$ $\phi_p=(0.01-0.04)$ $q'' = 23010.79W/m^2$ K</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Micro canal carré</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • L'ajout de nanoparticules de ZnO à l'EG pur entraîne une diminution de la température de la paroi, ce qui entraîne une augmentation du coefficient de transfert de chaleur par convection et du nombre de Nusselt. • Cela peut être dû au fait que les nanoparticules à l'intérieur du flux ont détruit la couche limite. • La génération d'entropie due au transfert de chaleur diminue avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules du nanofluide ZnO-EG, tandis que la génération d'entropie due au frottement du fluide augmente
-------------------------------------	---	--	----------------------------------	--------------------------	-------------	---

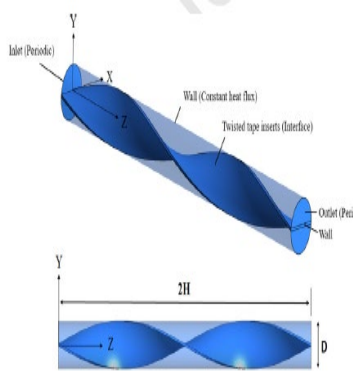
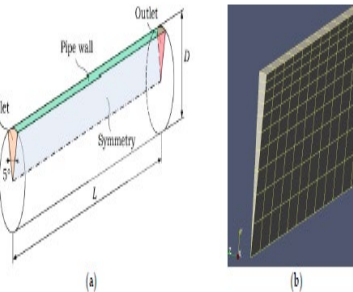
<p>Ahmdi et al. (2017) [15]</p>		<p>Al₂O₃- H₂O Re=100, 250, 500, 750,1000 φ = 1% dp=25-35mm</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Circulaire</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Les résultats montrent que l'augmentation du nombre de Reynolds et la concentration volumique des nanoparticules a des effets considérables, effets sur l'amélioration du coefficient de transfert de chaleur. • Le coefficient de transfert de chaleur diminue lorsque le diamètre des nanoparticules augmente.
<p>Abbassi Amiri et al. (2017) [16]</p>		<p>CuO-H₂O Al₂O₃ et H₂O φ p=0.01 Re= 50, 100, 150,200</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Micro canal</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • On peut observer que le modèle eulérien à deux phases du nanofluide CuO améliore le transfert de chaleur au lieu d'utiliser de l'eau pure comme liquide de refroidissement le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds et la concentration volumique des nanoparticules, tandis que l'augmentation de la perte de charge est faible. • Nombre de Reynolds et concentration volumique des nanoparticules augmenter le Nombre de Nusselt moyen, tandis que la

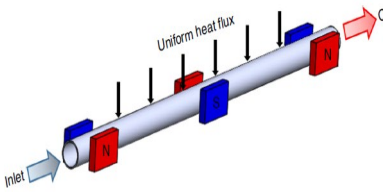
						<p>chute de pression n'augmente que légèrement.</p>
<p>Kitae Yu et al (2017) [17]</p>		<p>$Al_2O_3 - H_2O$ $Re = 1050$ $\phi = 0\%$, <i>1%, 2%, 3% et 4%</i></p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Un tuyau compact</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Expériences numériques entières ont été traitées sous les modèles $Re = 1050$ et nano-fluide ont été faites par la fraction volumique d'alumine. • L'amélioration du transfert de chaleur augmentait avec la concentration de volume de particules. • L'inclusion de nanoparticules a produit des quantités considérables transfert de chaleur par rapport au fluide de base.

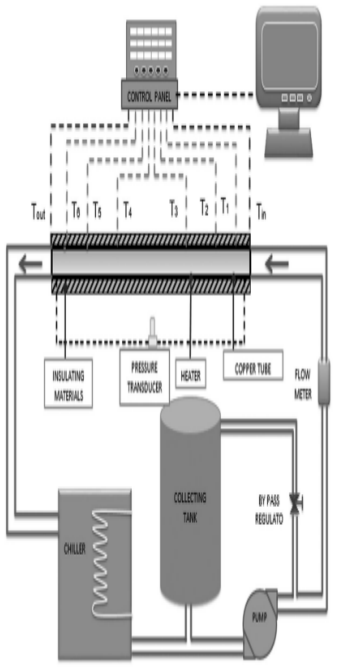
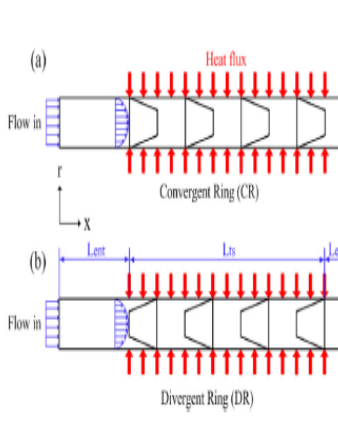
<p>Benkheda, et al (2017) [18]</p>		<p>Al₂O₃-eau $500 \leq Re \leq 2000$ $Gr = 0, 10^4, 10^5$ $Pr = 6.69$ $\phi = 1\%, 4\%, 8\%$</p>	<p>Méthode Des volumes finis</p>	<p>Tuyau annulaire</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Lorsque la concentration est fixée, la température à l'intérieur du nanofluid est fortement influencée par le nombre de Reynolds. Ils diminuent avec l'augmentation du nombre de Reynolds. • L'augmentation Grashof augmente le transfert de chaleur quantifié par la croissance numéro de Nusselt. • Pour une même concentration de nanoparticules, les températures au sein du nanofluid sont fortement influencées par le nombre de Reynolds. Ils diminuent avec l'augmentation de Reynolds numéro. • Lorsque le de Reynolds est fixé, les températures subissent une variation circonstancielle influence du N° Grashof.
---	---	--	----------------------------------	------------------------	-------------	---

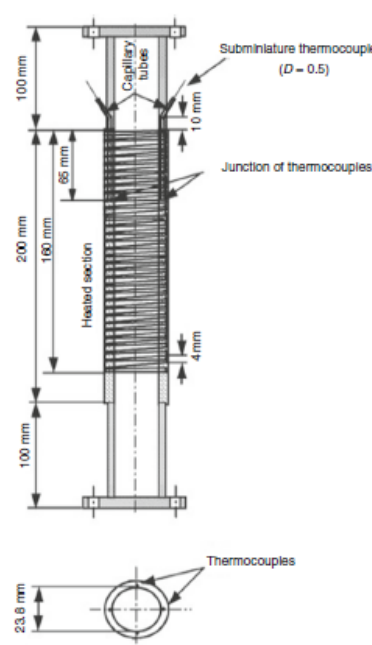
<p>Sandesh et al. (2018) [19]</p>		<p>Al₂O₃/water Fe₃O₄ nanofluide $\varphi =$ 0.15%, 0.45%, 0.60%, 1%. Tr=1.5, 2.3 et 3 Pe=4900- 13300 Re=840-2280</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Ruban torsadé hélicoïdal</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> On constate que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation du nombre de Peclet et de la concentration de nano fluide
<p>Sheikholeslami et al. (2018) [20]</p>		<p>Cu-eau $\varphi = 0.05$ Re = 20000 $\beta = 0, 0.785,$ 1.57</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Hélicoïdaux</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> La performance de la deuxième loi est fonction croissante de l'angle de révolution. La perte d'énergie augmente avec la diminution de l'angle de révolution et du nombre de Reynolds.

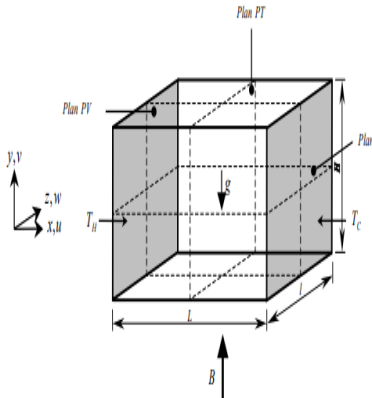
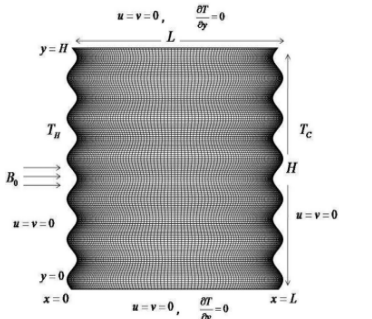
<p>Beybin _Ilhan et Ertürk. (2017) [21]</p>		<p>hBN-eau $\varphi=0\%,0.5\%,$ 1% $Re=800,900,$ $1200,1600,$ 1700</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Circulaire</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • On observe que le renforcement de la convection le coefficient de transfert de chaleur des nano fluides hBN-eau est proportionnel à la conductivité thermique observée renforcement. • On constate qu'à nombre de Reynolds constant, le rehaussement dans le coefficient de transfert de chaleur par convection est similaire à l'augmentation de la conductivité thermique dans l'incertitude de mesure
<p>Ho et al. (2017) [22]</p>		<p>Al_2O_3 - eau $T=25-50$ $\theta_{IN}=0-20$ $Q=5.51*10^2-$ $1.23*10^4W/m^2$ $Re=120-2000$</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Circulaire</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La pression annoncée la chute est diminuée et le nombre de Nusselt prédit est augmenté.

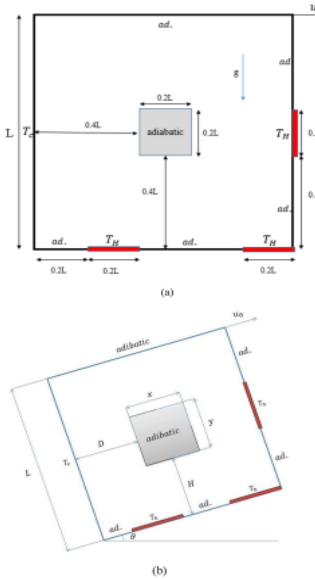
<p>Tehrani et al. (2019) [23]</p>		<p>CMC/CuO $Re=2500-20000$ $H/D=5-10-15-83$ $\varphi=0.1\%-0.5\%-1\%-1.5\%$</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Tube avec inserts en ruban torsadé</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aux plus petites valeurs $h=d$, le tourbillon 593 le débit est plus fort, ce qui entraîne une vitesse plus élevée dans les 594 régions proches de parois. • Seul un écoulement axial est observé dans le tube lisse alors que les deux 588 les écoulements axiaux et giratoires sont détectés dans le tube avec divers 589 inserts de ruban torsadé. • L'énergie cinétique de turbulence dans le tube à rubans torsadés est sig-36 nettement plus élevé que celui du simple, ce qui est utile pour les fluides non newtoniens à viscosité plus élevée.
<p>Berberovic et Bikić. (2019) [24]</p>		<p>EG-Si₃N₄ $Re=965$ $Nu=4.36$ $D=4\text{mm}$ $L=2\text{m}$ $T_{in}=293\text{K}$</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Traingulaire</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • L'obtenu des résultats des simulations numériques montrent de très bonnes capacités de prédiction des modèles de calcul pour le flux laminaire couplé au transfert de chaleur par convection forcée. • Les fonctionnalités existantes du logiciel pour simuler un écoulement monophasique sont étendus en mettant en œuvre le transport d'énergie couplé à l'écoulement de fluide et interaction de l'écoulement

						de fluide avec la paroi environnante du tuyau via la paroi appliquée flux de chaleur.
<p>Alsarraf et al. (2019) [25]</p>		<p>Fe₃O₄/water CNT Re= (500-2000) X/D=0-250 φ =1% x = 0.16, x =0.36, x = 0.56, x = 0.76, x = 0.96, x = 1.16 m 0.9%FF+1.35% CNT</p>	<p>Méthode des différences finis</p>	<p>Circulaire</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Il a été constaté que le nombre de Nusselt et la chute de pression du les échantillons de nanofluides étudiés augmentent significativement sous le champ magnétique. • L'influence du champ magnétique augmente avec une augmentation des concentrations de nanoparticules et de l'intensité du champ magnétique et une diminution de nombre de Reynolds.

<p>Kumait et al. (2019) [26]</p>		<p>TiO₂/eau Re= (5000–40000) ϕ = (0.25%, 0.5% 0.75%, 1%) β=(0°-45°-90°) Nu= (3%et2%)</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Tube nervuré</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pour les tubes nervurés, le facteur de frottement tend à diminuer avec les augmentations du nombre de Reynolds alors que le nombre de Nusselt tend à augmenter. • Le tube à nervures hélicoïdales démontre une impressionnante amélioration des performances thermiques par rapport au Tube lisse avec 2,0% (PEC), selon la distance du terrain.
<p>Mohamed et al. (2019) [27]</p>		<p>Al₂O₃, CuO, SiO₂, et ZnO Re= (2000–10000) ϕ=1500w/m²</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Circulaire</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Parmi les quatre nano fluides testés, ceux avec SiO₂ les particules ont atteint la plus grande amélioration du transfert de chaleur en termes de nombre de Nusselt et de facteur de friction. • Le modèle de mélange diphasique est plus précis que le modèle monophasé. • Le nombre de Nusselt est amélioré avec l'augmentant de la fraction volumique des particules et du

						<p>nombre de Reynolds et avec diminution de diamètres des nano particules.</p>
<p>Karimi et al. (2019) [28]</p>		<p>MgO/CuO/Al₂O₃- eau) Re= 5000-50000 $\phi = 500w/m^2$ $\varnothing=0.02, 0.05, 0.07, 0.09\%v$</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Circulaire</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • L'augmentation de la concentration en nano particules améliore le transfert de chaleur dans les faibles valeurs, tandis que l'agrégation des nanoparticules à des concentrations élevées conduit à diminuer la capacité de transfert de chaleur du nanofluide en raison de la diminution du coefficient de transfert de chaleur. • Le coefficient de transfert de chaleur augmente due à l'augmentation du nombre de Reynolds et de la nano particule concentration volumique.

<p>Berrahil et al. (2007) [29]</p>		<p>$X=4$ $Z=0,5$ $Gr = 10^6$ (a) $Ha=25$ et (b) $Ha=100$</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Rectangle</p>	<p>Avec</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Une diminution dans le transfert de chaleur et réduit considérablement les vitesses. • L'application d'un champ magnétique sur la convection naturelle selon la direction y entraîne des changements importants sur la structure de l'écoulement et le transfert de chaleur.
<p>Afsana et al. (2021) [30]</p>		<p>(Fe_2O_3 et Fe_3O_4) $Re = 10^3, 10^4, 10^5$ $Ha = 0, 10, 20$ $n = 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4$ $\phi = 0, 0.05, 0.1$ $Pr = 6.8377$</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Sinusoidal</p>	<p>Avec</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Avec l'augmentation de l'indice de loi de puissance et du nombre de Hartmann, le transport convectif s'affaiblit et la magnitude de ψ_{max} diminue. • Le nombre de Rayleigh montre une proportionnalité directe avec les valeurs d'entropie, tandis que le nombre de Hartmann montre une relation inverse. • Le nombre de Nusselt moyen montre une proportionnalité directe avec le nombre de Rayleigh

<p>Chenqi Fu et al. (2021) [31]</p>		<p>Fe-ethylene $Ra = 10^4$ $Pr = 0.71$ $Ri = 0.1$</p>	<p>La méthode de Lettice Boltzmann (LBM)</p>	<p>Carré</p>	<p>Sans</p>	<ul style="list-style-type: none"> • L'augmentation de ϕ conduit à une augmentation de la conductivité thermique du liquide de refroidissement et du mécanisme de transfert de chaleur à l'échelle microscopique. • La croissance des graphiques du nombre de Nusselt montre une amélioration du transfert de chaleur à un ϕ plus élevé. • La présence de nanoparticules de diamètres inférieurs conduit à une augmentation de la puissance de refroidissement due à une augmentation de la stabilité du fluide de refroidissement • L'amélioration de ϕ conduit à l'augmentation de la force de flottabilité avec une meilleure répartition de la température.
--	---	---	--	--------------	-------------	---

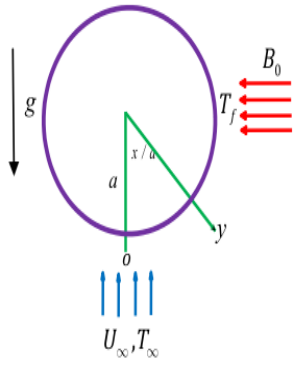
<p>Zahar et al. (2020) [32]</p>		<p>Al₂O₃-eau $0 \leq \xi \leq 180^\circ$ Ha = 1 $\Phi = 0.1$</p>	<p>Méthode des volumes finis</p>	<p>Circulaire</p>	<p>Avec</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Le nombre de Biot et le paramètre de rayonnement accélèrent le mouvement du nanofuide hybride tandis que le nombre de Hartmann le ralentit. • La température du nanofuide hybride augmente pour le flux d'assistance avec le paramètre de rayonnement, les nombres de Biot et de Hartmann, mais la tendance contraire est observée pour le flux d'assistance. • Le coefficient de traînée s'améliore pour aider le flux avec le paramètre de rayonnement, les nombres de Biot et de Hartmann, mais la tendance contraire est notée pour la fraction volumique solide. • Le nombre de Nusselt se produit plus rapidement avec le nombre de Biot et le paramètre de rayonnement et ralentit avec Hartmann nombre et fraction volumique solide. • Le frottement cutané et le nombre de Nusselt ont une amplitude plus élevée pour l'eau Cu suivie du nanofluid hybride et Al₂O₃-eau.
--	---	---	----------------------------------	-------------------	-------------	---

Tableau.1.1 : Résumé des travaux théoriques, numérique et expérimentaux de la convection mixte des nanofluides dans les conduites.

Bibliographies

- [1] Guzei, D. V., A. V. Minakov, and I. A. Popov. "Experimental and numerical study of nanofluid forced convection in a channel with artificial roughness." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1105. No. 1. IOP Publishing, 2018.
- [2] Selimefendigil, Fatih, et al. "Forced convection of Fe₃O₄-water nanofluid in a bifurcating channel under the effect of variable magnetic field." *Energies* 12.4 (2019): 666.
- [3] Selimefendigil, Fatih, and Hakan F. Öztop. "MHD Pulsating forced convection of nanofluid over parallel plates with blocks in a channel." *International Journal of Mechanical Sciences* 157 (2019): 726-740.
- [4] Goharkhah, Mohmmad, Mostafa Esmacili, and Mehdi Ashjaee. "Numerical simulation and optimization of forced convection heat transfer of magnetic nanofluid in a channel in the presence of a non-uniform magnetic field." *Journal of Space Science and Technology* 11.2 (2018): 11-19.
- [5] Abokazempour, Esmacil, et al. "Flow and heat transfer investigation of forced convection of nanofluid in a wavy channel at different wavelengths and phase difference." *Boletim da Sociedade Paranaense de Matemática* 36.2 (2018): 137-150.
- [6] Selimefendigil, Fatih, and Hakan F. Öztop. "Magnetic field effects on the forced convection of CuO-water nanofluid flow in a channel with circular cylinders and thermal predictions using ANFIS." *International Journal of Mechanical Sciences* 146 (2018): 9-24.
- [7] Atashafrooz, M., et al. "Interaction effects of an inclined magnetic field and nanofluid on forced convection heat transfer and flow irreversibility in a duct with an abrupt contraction." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 478 (2019): 216-226.
- [8] Zheng, Zhaoli, et al. "An investigation on the forced convection of Al₂O₃-water nanofluid laminar flow in a microchannel under interval uncertainties." *Applied Sciences* 9.3 (2019): 432.
- [9] Krishna, V. Murali, and M. Sandeep Kumar. "Numerical analysis of forced convective heat transfer of nanofluids in microchannel for cooling electronic equipment." *Materials Today: Proceedings* 17 (2019): 295-302.
- [10] Ahmed, Hamdi E., B. H. Salman, and A. Sh Kerbeet. "Heat transfer enhancement of turbulent forced nanofluid flow in a duct using triangular rib." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 134 (2019): 30-40.

- [11] Liu, Fang, et al. "Multiplicity of forced convective heat transfer of nanofluids in curved ducts." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 129 (2019): 534-546.
- [12] Shiriny, Afshin, et al. "Forced convection heat transfer of water/FMWCNT nanofluid in a microchannel with triangular ribs." *SN Applied Sciences* 1.12 (2019): 1-11.
- [13] Uysal, C. Ü. N. E. Y. T., E. Gedik, and A. J. Chamkha. "A numerical analysis of laminar forced convection and entropy generation of a diamond-Fe₃O₄/water hybrid nanofluid in a rectangular minichannel." *J. Appl. Fluid Mech* 12.2 (2019): 391-402.
- [14] Uysal, C. Ü. N. E. Y. T., K. A. M. İ. L. Arslan, and H. Kurt. "Laminar Forced Convection and Entropy Generation of ZnO-Ethylene Glycol Nanofluid Flow through Square Microchannel with using Two-Phase Eulerian-Eulerian Model." *Journal of Applied Fluid Mechanics* 12.1 (2019): 1-10.
- [15] AA Ahmadi, E Khodabandeh, H Moghadasi. "Numerical study of flow and heat transfer of water-Al₂O₃, nanofluid inside a channel with an inner cylinder using Eulerian-Lagrangian approach ." *Journal of Thermal ...*, (2018) – Springer.
- [16] FA Amiri, M Nazari, MM Shahmardan." Numerical Investigation of Heat Transfer of CuO Nanofluid Using Eulerian-Eulerian Two Phase Model." *Int J Mech Eng Appl*, - (2017) ; 5(5) :259-268 - researchgate.net.
- [17] K Yu, C Park, S Kim, H Song. "CFD Analysis of nanofluid forced convection heat transport in laminar flow a compact pipe." *Journal of Physics ...*,2017- iopscience.iop.org.
- [18] F Benkhedda, T Boufendi, S Touahri . "Prediction of Nanofluid Forced and Mixed Convection Heat Transfer through an Annular Pipe." *International Journal of Materials ...*,2017- ijmmm.org.
- [19] SS Chougule, VV Nirgude, SK Sahu. " Experimental Study on Laminar Forced Convection of Al₂O₃/Water and Multiwall Carbon Nanotubes/ Water Nanofluid of Varied Particle Concentration with Helical Twisted Tape Inserts in Pipe Flow. "- *Heat Transfer Engineering*, 2018 - Taylor & Francis.
- [20] M Sheikholeslami, M Jafaryar, DD Ganji, Z Li. " Exergy loss analysis for nanofluid forced convection heat transfer in a pipe with modified turbulators. " *journal of Molecular Liquids*, 262 (2018) 104-110.
- [21] B Ilhan, H Ertürk. " Experimental characterization of laminar forced convection of hBN-water nanofluid in circular pipe." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 111 (2017) 500-507.

- [22] CJ Ho, CY Chang, WM Yan, P Amani. " A combined numerical and experimental study on the forced convection of Al₂O₃-water nanofluid in a circular tube. " - ... Journal of Heat and Mass Transfer 120 (2018) 66-75.
- [23] F Bazdidi-Tehrani, SM Khanmohamadi..." Evaluation of turbulent forced convection of non-Newtonian aqueous solution of CMC/CuO nanofluid in a tube with twisted tape inserts." - Advanced Powder ..., (2020)- Elsevier.
- [24] E Berberović, S Bikić."Computational Study of Flow and Heat Transfer Characteristics of EG-Si₃N₄ Nanofluid in Laminar Flow in a Pipe in Forced Convection Regime +." - Energies, (2020) - mdpi.com.
- [25] J Alsarraf, R Rahmani, A Shahsavari, M Afrand..." Effect of magnetic field on laminar forced convective heat transfer of MWCNT–Fe₃O₄/water hybrid nanofluid in a heated tube. "- Journal of Thermal ..., (2019) 137 :1809-1825-
- [26] AAR Al Kumait, TK Ibrahim..." Experimental and numerical study of forced convection heat transfer in different internally ribbed tubes configuration using TiO₂ nanofluid. "- Heat Transfer—Asian ..., 2019 - Wiley Online Library.
- [27] HA Mohammed, IAMA Abuobeida, HB Vuthaluru..." Two-phase forced convection of nanofluids flow in circular tubes using convergent and divergent conical rings inserts. "- International Communications in Heat and Mass Transfer 101(2019) 10-20.
- [28] Y Karimi, AR Solaimany Nazar, M Motevasel. " CFD simulation of nanofluid heat transfer considering the aggregation of nanoparticles in population balance model. "- Journal of Thermal Analysis ..., (2021) – Springer.
- [29] Berrahil, Farid, et al. "Effet d'un champ magnétique externe sur la convection naturelle dans une enceinte rectangulaire tridimensionnelle." *JITH 2007*. ENSTIMAC, 2007.
- [30] Afsana, Sadia, et al. "MHD natural convection and entropy generation of non-Newtonian ferrofluid in a wavy enclosure." *International Journal of Mechanical Sciences* 198 (2021): 106350.
- [31] Fu, Chenqi, et al. "Comprehensive investigations of mixed convection of Fe–ethylene-glycol nanofluid inside an enclosure with different obstacles using lattice Boltzmann method." *Scientific Reports* 11.1 (2021): 1-16.
- [32] El-Zahar, E. R., et al. "Magneto-hybrid nanofluids flow via mixed convection past a radiative circular cylinder." *Scientific Reports* 10.

Chapitre 2

Modélisation du problème

Sommaire

2.1.	Introduction	30
2.2.	Modèle physique.....	30
2.3.	Hypothèses simplificatrices.....	31
2.4.	Conditions aux limites.....	32
2.5.	Modèle mathématique et équations dimensionnelles.....	32
2.6.	Nombre de Nusselt	35
2.7.	Nombre de Richardson	36
2.8.	Nombre de Grashof	36
2.9.	Le coefficient de frottement.....	36
2.10.	Efficacité.....	36
	Bibliographie	37

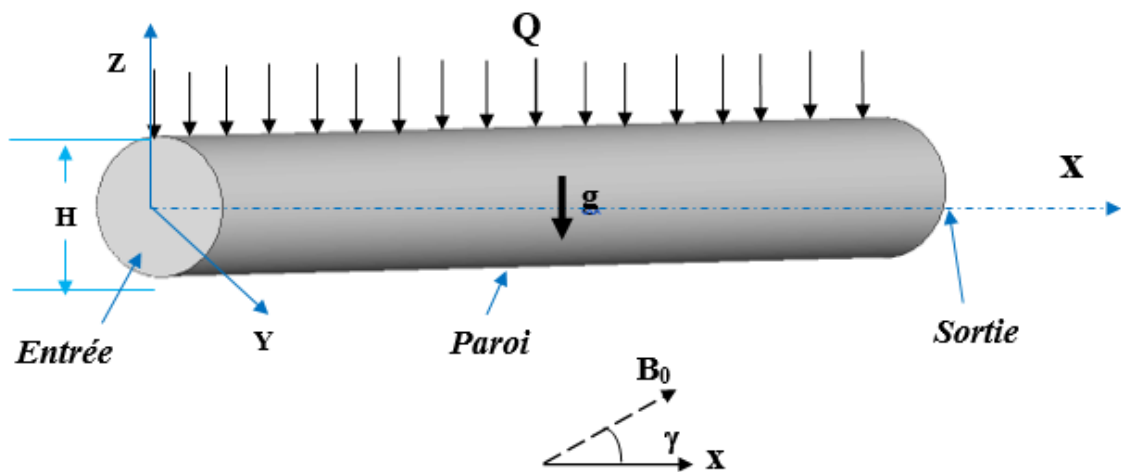
2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la géométrie et le système d'équations qui régit l'écoulement, le transfert de chaleur dans un canal horizontal ondulé en présence d'un champ magnétique, soumise à un flux de chaleur constant.

Des paramètres de gouvernance efficaces sont le nombre de Grashof, le nombre de Richardson, le nombre de Nusselt, le nombre de Hartmann, le nombre de Reynolds et la fraction volumique des nanoparticules.

2.2. Modèle physique

Dans ce chapitre, nous présentons la géométrie et la modélisation de système d'équations qui régit l'écoulement et le transfert de chaleur par convection mixte d'un Ferrofluide (eau- Fe_3O_4) dans un canal horizontal tridimensionnel de longueur L et de diamètre D soumis d'un champ magnétique externe, uniforme de force B_0 et incliné d'un angle γ et un flux de chaleur constant appliqué sur la surface latérale du canal.



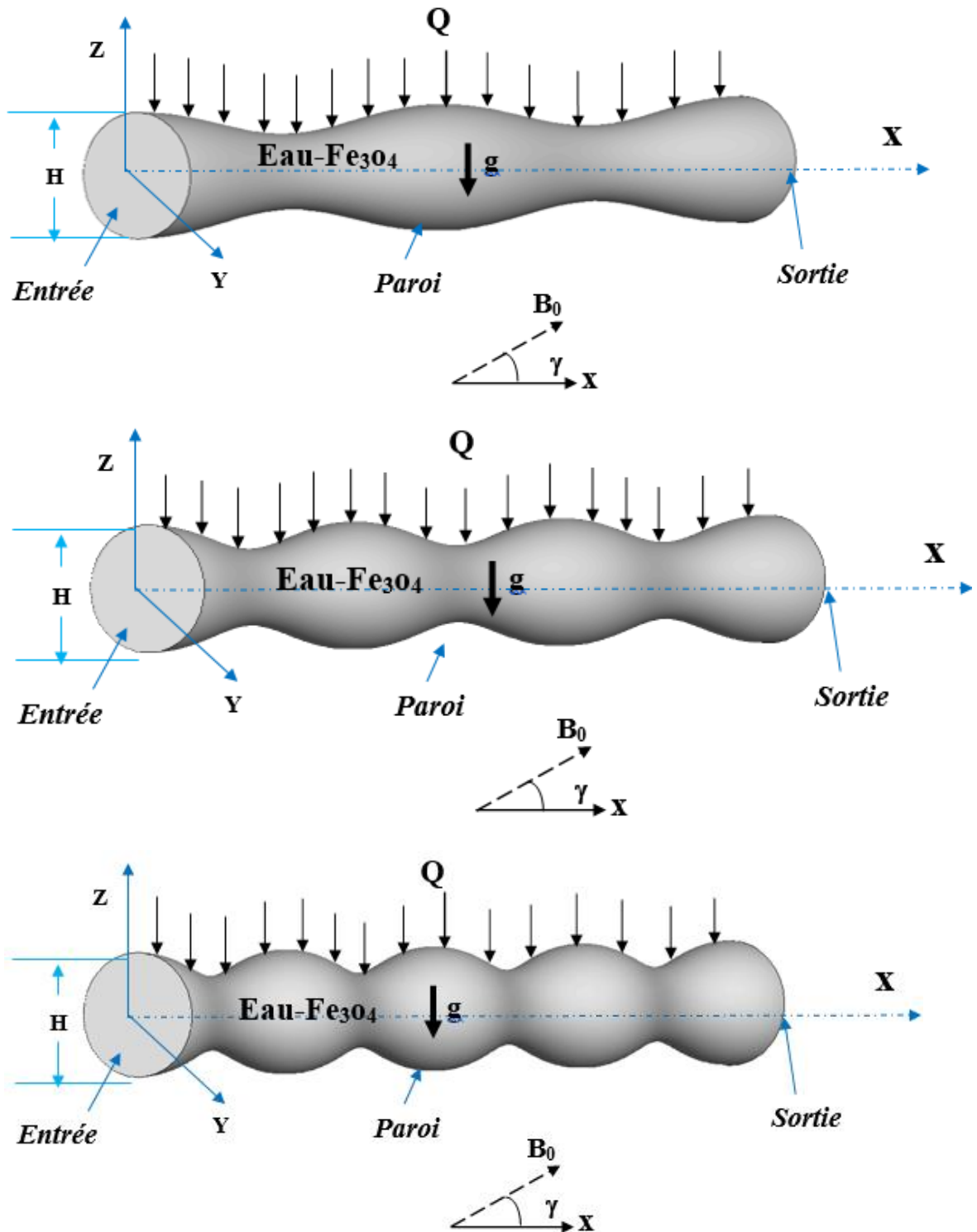


Figure2.1 Présentation des configurations étudiées

2.3. Hypothèses simplificatrices

Pour simplifier la résolution du problème physique, des hypothèses simplificatrices sont introduites au niveau de la modélisation. Nous nous limitons donc aux hypothèses couramment retenues dans les études de la convection mixte qui est les suivantes :

- Le nanofluide est supposé incompressible et l'écoulement est laminaire, stationnaire et tridimensionnel.
- Les propriétés thermophysiques du nanofluide sont constantes, sauf pour la variation de la masse volumique, qui est estimée par l'hypothèse de Boussinesq.
- Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.
- La dissipation visqueuse et le terme de pression dans l'équation de la chaleur sont négligeables.
- Le fluide de base utilisé est un fluide newtonien, incompressible et qui satisfait l'hypothèse de Boussinesq.

2.4. Conditions aux limites

Les conditions aux limites du problème considéré sont illustrées dans le (Tableau 2.1).

Parois	Définition	Conditions hydrodynamiques	Condition thermique
Entrée du canal	Inlet (entrée) Velocity-inlet (Vitesse à l'entrée)	$u = u_0, v = 0, w = 0, T = T_c$	Vitesse et température d'entrée imposées
Sortie du canal	Outlet (sortie) Pression	$P = P_0$ $T = T_c$	Pression absolue
Paroi externe	Wall (Paroi)	$u = v = w = 0$ $q'' = \frac{(Grkv^2)}{(\beta D_h^4 g)}$	Flux imposé
Domaine intérieur		Ferrofluide (Fe ₃ O ₄ -eau)	

Tableau. (2.1) Les conditions aux limites pour le cas du canal horizontal.

2.5. Modèle mathématique et équations dimensionnelles

➤ **Equation de continuité**

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{2.1}$$

➤ Equation de quantité de mouvement

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + v_{nf} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ + \frac{\sigma_{nf} B_0^2}{\rho_{nf}} (v \sin(\gamma) \cos(\gamma) - u (\sin(\gamma))^2) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + v_{nf} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial z} + v_{nf} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + g\beta (T - T_c) \\ + \frac{\sigma_{nf} B_0^2}{\rho_{nf}} (u \sin(\gamma) \cos(\gamma) - v \cos(\gamma))^2 \end{aligned} \quad (2.4)$$

➤ Equation d'énergie

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.5)$$

Où les propriétés du nanofluide peuvent être définies comme :

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_f \quad (2.6)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = \phi (\rho C_p)_p + (1 - \phi) (\rho C_p)_f \quad (2.7)$$

$$(\rho \beta)_{nf} = \phi (\rho \beta)_p + (1 - \phi) (\rho \beta)_f \quad (2.8)$$

$$\sigma_{nf} = 1 + \frac{3 \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_p} - 1 \right) \phi}{\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_f} + 2 \right) - \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_f} - 2 \right) \phi} \quad (2.9)$$

La viscosité dynamique du nanofluide est définie comme suite [1] :

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

Concernant la conductivité thermique effective du nanofluide, nous avons considéré le modèle de Maxwell [2] pour le nanofluide Fe₃O₄-eau :

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{(K_p + 2K_f) - 2\phi(K_f - K_p)}{(K_p + 2K_f) + \phi(K_f - K_p)} \quad (2.11)$$

Les propriétés thermophysiques de nanofluide utilisé sont résumées dans le (tableau 2.2) [3]

Propriété	Eau pure	Fe ₃ O ₄
$\rho(Kg.m^{-3})$	997.1	5200
$C_p(J.Kg^{-1}.m^{-3})$	4179	670
$K(W.m^{-1}.K^{-1})$	0.613	6
$\mu(kg.s^{-1}.m^{-1})$	$Pr=6.2$	-
$\beta(k^{-1})$	21×10^{-5}	1.3×10^{-5}
$\sigma(\Omega^{-1}k^{-1})$	0.05	25000

Tableau2.2 : Propriétés thermophysiques (eau, Fe₃O₄)

Pour obtenir la formulation adimensionnelle de ce problème on introduit les paramètres sans dimension suivants en fonction des grandeurs dimensionnelles :

$$U = \frac{u}{u_0}, V = \frac{v}{v_0}, W = \frac{w}{w_0}, X = \frac{x}{D_h}, Y = \frac{y}{D_h}, Z = \frac{z}{D_h}, P = \frac{p}{\rho_f u_0^2}, \theta = \frac{T - T_C}{\Delta T}, \Delta T = \frac{q D_h}{k_f}, Re = \frac{u_0 D_h}{\nu_f}, Ha = B_0 D_h \sqrt{\frac{\sigma_f}{\mu_f}}, Ri = \frac{g \beta \Delta T L}{U^2}, Re = \frac{U D_h}{\nu_f}, Ri = \frac{Gr}{Re^2}, Gr = \frac{g \beta \Delta T D_h^3}{\nu_f^2}, Pr = \frac{\mu_f C_p}{K_f}$$

Les équations sans dimension sont exprimées par :

➤ **Equation de continuité**

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (2.12)$$

➤ Equation de quantité de mouvement

$$\begin{aligned}
 U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + W \frac{\partial U}{\partial Z} \\
 = -\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial X} + \frac{v_{nf}}{v_f} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) \\
 + \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\sigma_{nf}}{\sigma_f} \frac{Ha^2}{Re} (V \sin(\gamma) \cos(\gamma) - U (\sin(\gamma))^2)
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + W \frac{\partial V}{\partial Z} = -\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial Y} + \frac{v_{nf}}{v_f} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right) \tag{2.14}$$

$$\begin{aligned}
 U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} + W \frac{\partial W}{\partial Z} \\
 = -\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial Z} \\
 + \frac{v_{nf}}{v_f} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} \right. \\
 \left. + \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} \right) \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\sigma_{nf}}{\sigma_f} \frac{Ha^2}{Re} (U \sin(\gamma) \cos(\gamma) - V (\cos(\gamma))^2) \\
 + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}\beta_f} Ri \theta
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

➤ Equation d'énergie

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} + W \frac{\partial \theta}{\partial Z} = \frac{1}{PrRe} \frac{K_{nf}}{K} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{Cp_f}{Cp_{nf}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \right) \tag{2.16}$$

2.6. Nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt local le long de la paroi latérale peut être s'exprimé par :

$$Nu_l = \frac{qD_h}{K_f(T_w - T_m)} \tag{2.17}$$

Le nombre de Nusselt moyen est calculé comme suit :

$$Nu_m = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_L dA \quad (2.18)$$

2.7. Nombre de Richardson

Le nombre de Richardson est défini comme le rapport entre le nombre de Grashof sur le carré du nombre de Reynolds, Il peut être exprimé comme :

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (2.19)$$

$$Ri = \frac{g\beta\Delta TL}{U^2} \quad (2.20)$$

Si : $Ri < 1$ c'est la convection forcée qui domine.

Si : $Ri = 1$ c'est le domaine de la convection mixte (naturelle et forcée).

Si : $Ri > 1$ c'est la convection naturelle qui domine

2.8. Nombre de Grashof

Le nombre de Grashof est défini comme le rapport entre les forces de gravité par les forces visqueuse, Il peut être exprimé comme :

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T\rho L^3}{\mu^2} \quad (2.21)$$

2.9. Le coefficient de frottement

Le coefficient de frottement (de friction) peut calculer par :

$$f = \frac{2\Delta P \left(\frac{D}{L}\right)}{\rho u_0^2} \quad (2.19)$$

Le coefficient de frottement moyen est calculé comme suit :

$$f_m = \frac{1}{L} \int_0^L f dA \quad (2.20)$$

2.10. Efficacité

Efficacité est définie comme le rapport entre le nombre de Nusselt en fonction de champ magnétique par les frottements, Il peut être exprimé comme :

$$\eta_{Ha} = \frac{\frac{Nu_{Ha}}{Nu_{Ha=0}}}{\left(\frac{f_H}{f_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (2.22)$$

Efficacité est défini comme le rapport entre le nombre de Nusselt en fonction de concentration de nanofluid par les frottements, Il peut être exprimé comme :

$$\eta_{\varphi} = \frac{\frac{Nu_{\varphi}}{Nu_{\varphi=0}}}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (2.23)$$

Efficacité est défini comme le rapport entre le nombre de Nusselt en fonction de nombre des ondes par les frottements, Il peut être exprimé comme :

$$\eta_N = \frac{\frac{Nu_N}{Nu_{N=0}}}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (2.24)$$

Bibliographie

- [1] H. C. Brinkman, "The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions," The Journal of Chemical Physics, vol.10, 1952.
 - [2] J.C.Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism. Clarendon Press,Oxford, 1873
 - [3] Sadeghi, M. S., Tayebi, T., Dogonchi, A. S., Nayak, M. K., & Waqas, M. (2021). Analysis of thermal behavior of magnetic buoyancy-driven flow in ferrofluid–filled wavy enclosure furnished with two circular cylinders. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 120, 104951
-

Chapitre 3

Méthode Numérique et Présentation Du Code Fluent

Sommaire

3.1	Introduction.....	39
3.1.1	Méthode des différences finis.....	39
3.1.2	Méthode des éléments finis.....	39
3.1.3	Méthode spectrales.....	40
3.1.4	Méthode des volumes finis.....	40
3.2	Utilisation du GAMBIT.....	40
3.3	Utilisation du FLUENT.....	40
3.4	Méthode de résolution des équations de transport.....	41
3.4.1	Schéma de discrétisation.....	41
3.4.2	Choix du schéma d'interpolation de la pression.....	42
3.4.3	Choix de la méthode de couplage Pression-Vitesse.....	43
3.5	Résolution numérique.....	45
3.5.1	Paramètre de contrôle de la convergence.....	45
3.5.1.1	Critère de convergence.....	46
3.5.1.2	Sous-relaxation.....	46
3.6	Etapes de résolution du problème.....	47
3.7	Bibliographies.....	48

3.1. Introduction

Les équations décrites au deuxième chapitre sont des équations différentielles aux dérivées partielles non linéaires, elliptiques et couplées. En raison de leur complexité, ces équations sont résolues à l'aide d'une méthode numérique. Plusieurs méthodes numériques sont disponibles dans la littérature. On peut distinguer les méthodes suivantes :

- Méthode des différences finis (MDF).
- Méthode des éléments finis (MEF).
- Méthode spectrales (MS).
- Méthode des volumes finis (MVF).

3.1.1. Méthode des différences finies

C'est la méthode la plus ancienne, le principe fondamental de cette méthode consiste au domaine d'étude un maillage en nœuds dont la finesse permet de donner une approximation des contours du domaine. Ensuite, en appliquant le développement dans chaque nœud du maillage, ce qui permet d'obtenir un nombre d'équation algébrique égale au nombre des valeurs d'inconnues des grandeurs étudiées.

3.1.2. Méthode des éléments finis

La méthode consiste à mailler l'espace en régions élémentaires dans lesquelles on représente la grandeur recherchée par une approximation polynomiale. Le maillage peut être constitué de triangles ou de rectangles aux sommets desquels on recherche des volumes de l'inconnue en supposant que, dans ce domaine, l'inconnue varie linéairement en fonction des coordonnées. Une telle méthode nécessite donc de mailler tout l'espace étudié. Elle conduit à des tailles importantes en mémoire des calculateurs et à des temps de calcul longs qui nécessitent souvent des stations de travail pour la résolution des problèmes industriels.

3.1.3. Méthode spectrale

L'inconnue est approchée par des séries Fourier tronquées ou par des séries de polynômes Chébishev. Par rapport aux méthodes des différences finies et des éléments finis l'approximation n'est pas locale mais elle est valide sur tout le domaine de calcul. On utilise également le concept du résidu pondéré comme dans la méthode des éléments finis

où en imposant que l'approximation doit correspondre à la solution exacte pour les points du maillage.

3.1.4. Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est caractérisée par son avantage à satisfaire la conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie dans tous les volumes finis ainsi que dans tout le domaine de calcul. Elle facilite la linéarisation des termes non linéaires dans les équations de conservation tel que le terme source par exemple. La méthode consiste à partager le domaine de calcul en plusieurs volumes, où chaque volume entoure un nœud.

3.2. Utilisation du GAMBIT

Le maillage est conçu par l'utilisateur à l'aide du mailleur GAMBIT. Celui-ci permet de construire trois types de grille de calcul, structurée, non structurée ou hybride.

- Maillage structuré (quadrilatères/hexagones), il est plus facile de le générer en utilisant à multi bloc.
- Maillage non structuré (tri/tétra), les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.
- Maillage hybride, maillage généré par un mélange d'éléments de différents types (structuré et non structuré).

Dans ce travail nous avons utilisé un maillage structuré, car il présente les avantages suivants :

- Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent.
- Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage.

3.3. Utilisation du FULENT

Pour réaliser nos simulations, nous avons choisi d'utiliser le code de calcul FLUENT, ce code est développé pour modéliser les écoulements des fluides et transfert thermique, est écrit en langage de programmation C. Ce logiciel utilise la méthode des volumes finis pour résoudre les équations.

Le solveur FLUENT permet de définir numériquement les conditions opératoires (gravité, pression...) dans lesquelles, est effectuée la simulation, ainsi que la spécification des conditions aux limites, il permet de choisir le processus itératif, en proposant plusieurs schémas numériques pour la discrétisation spatiale et temporelle, et pour le couplage de vitesse et de pression.

3.4. Méthode de résolution des équations de transport

3.4.1. Schéma de discrétisation

Notre code emploie la méthode des volumes finis pour la résolution des systèmes d'équations utilisés pour modéliser les mouvements des fluides. En fait, avec la méthode des volumes finis, un problème physique donné est résolu suivant trois principales étapes :

- Division du domaine de calcul en volumes de contrôle via un maillage.
- Intégration des équations sur chaque volume de contrôle afin de les transformer en équations algébriques,
- Résolution des équations ainsi discrétisées.

Ces équations sont mises sous la forme générale suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i\varphi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right] + S_\varphi \quad (3.1)$$

où φ représente une grandeur intensive telle que T^* et ψ^* .

Γ_φ Est un coefficient de diffusion et S_φ un terme de source. Sous cette forme générale, tous les termes non-convectifs ou non-diffusifs sont inclus dans le terme source S_φ .

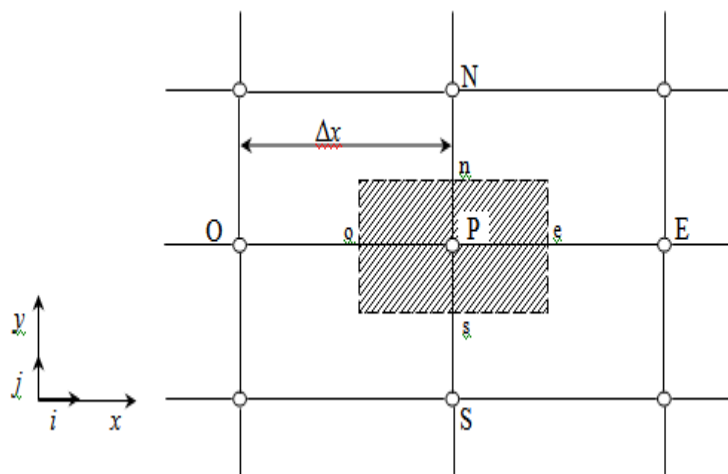


Figure.3.1 : Volume de contrôle pour la résolution en volumes finis

La **Figure.3.1** représente la discrétisation en volumes finis des équations de transport. Les différentes grandeurs de l'écoulement sont calculées au centre de chaque volume de contrôle, aux points P , E , O , N et S . L'intégration de l'équation 3.1 dans un volume de contrôle fait intervenir les valeurs, ainsi que les flux de diffusion et de convection et de conservation de ces grandeurs aux frontières du volume de contrôle. Ainsi, pour le calcul des grandeurs au point P , leurs valeurs aux interfaces e , o , n et s sont également nécessaires. Plusieurs méthodes d'interpolation peuvent alors être utilisées connaissant leurs valeurs au centre des volumes de contrôle adjacents.

FLUENT propose plusieurs schémas de discrétisation dépend de la nature d'écoulement et la géométrie adoptée.

- Schéma du Premier Ordre Upwind : Ce schéma permet une certaine stabilité dans les calculs mais est responsable de diffusion numérique. Il est fortement recommandé dans les écoulements de dominance convective.

- Schéma de Seconde Ordre Upwind : est à utiliser pour les écoulements compressibles et pour améliorer la précision en écoulements incompressibles

- Le schéma « QUICK » (Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinetics) : Il procure une meilleure précision que le schéma au Second Ordre pour les écoulements rotationnels et tourbillonnaires (Swirling) avec un maillage régulier. Cependant, il ne s'applique pas à un maillage triangulaire.

- Le schéma « Power Law » est plus précis que le Schéma du premier ordre pour les écoulements à très bas nombres de Reynolds. Sinon, il procure en général le même degré de précision.

- Le schéma « third-order MUSCL » : il donne plus de précision que les autres schémas

Pour notre étude, le schéma Seconde Ordre Upwind est utilisé [1].

3.4.2. Choix du schéma d'interpolation de la pression

Pour la plupart des cas, le schéma « Standard » est acceptable. Pour des écoulements spécifiques, on peut choisir parmi les options suivantes :

- Le schéma force de volume pondéré « BodyForceWeighted » est recommandé dans les cas où l'effet des forces de gravité sont importantes.
- Le schéma « PRESTO ! » (Pressure Staggering Option) est approprié pour les

écoulements hautement tourbillonnaires, à grande vitesse de rotation ou les écoulements dans des domaines fortement courbés.

- Le schéma au second ordre est à utiliser pour les écoulements compressibles et pour améliorer la précision en écoulements incompressibles.
- Le schéma linéaire « Linear » est disponible comme alternative au cas où les autres options ont des difficultés de convergence ou génèreraient des comportements non physiques.
- Le schéma « Standard » est choisi pour notre cas.

3.4.3. Choix de la méthode de couplage Pression-Vitesse

Trois algorithmes sont disponibles dans le logiciel de calcul :

- SIMPLE : le plus robuste.
- SIMPLEC : il donne une convergence plus rapide pour les problèmes simples.
- PISO : il est utile pour des problèmes des écoulements instables.

L'algorithme choisit dans notre étude est l'algorithme SIMPLE [2]. A l'initialisation du calcul, un champ de pression fixé a priori est introduit dans l'équation de bilan de la quantité de mouvement, permettant de calculer un premier champ de vitesse. La combinaison des équations de bilan de masse et de quantité de mouvement permet ensuite de corriger ces premiers champs de pression et de vitesse. Les autres équations de transports sont ensuite résolues et le champ de pression corrigé est utilisé pour initialiser le calcul à l'itération suivante. Cette succession d'opération est répétée jusqu'à ce que les critères de convergences soient atteints.

➤ Algorithme SIMPLE

La discrétisation d'une équation de transport diffusion sur un volume de contrôle par la méthode des volumes finis fait intervenir les valeurs des vitesses aux interfaces des volumes (U_e , U_w , U_n , U_s). Il est donc intéressant de calculer ces vitesses directement sur les interfaces (sans avoir à effectuer d'interpolations). D'autre part, la discrétisation de l'équation de continuité et du gradient de pression avec l'utilisation d'une interpolation linéaire peut induire des erreurs importantes du fait qu'une répartition de pression ou de vitesse en "damier" est vue comme un champ uniforme. Pour contourner ces difficultés on préfère utiliser des grilles décalées "staggeredgrid". Une grille principale est construite sur

laquelle on calcule la pression, la température et la concentration. Deux grilles décalées vers la droite et vers le haut respectivement sont utilisées pour le calcul des vitesses horizontale et verticale.

L'algorithme SIMPLE, acronyme pour « Semi-Implicite Méthode for Pressure Linked-Equations » permet de résoudre le système d'équations discrétisées. Cet algorithme stipule l'existence d'une relation entre les vitesses corrigées et les pressions corrigées, en vue de vérifier l'équation de conservation de la masse.

La séquence des opérations de calcul de la méthode SIMPLE est la suivante :

1. Estimer un champ de pression P' .
2. Résoudre les équations de quantité de mouvement pour en tirer les champs de vitesses V'' (vitesse estimée).
3. Résoudre l'équation de correction de pression P' .
4. Corriger la pression $P = P' + P''$.
5. Corriger les champs de vitesses.
6. Prendre le champ P comme une nouvelle estimation et recommencer la séquence à partir de l'étape 2, jusqu'à la convergence.

Le schéma représentatif de ce processus itératif est le suivant

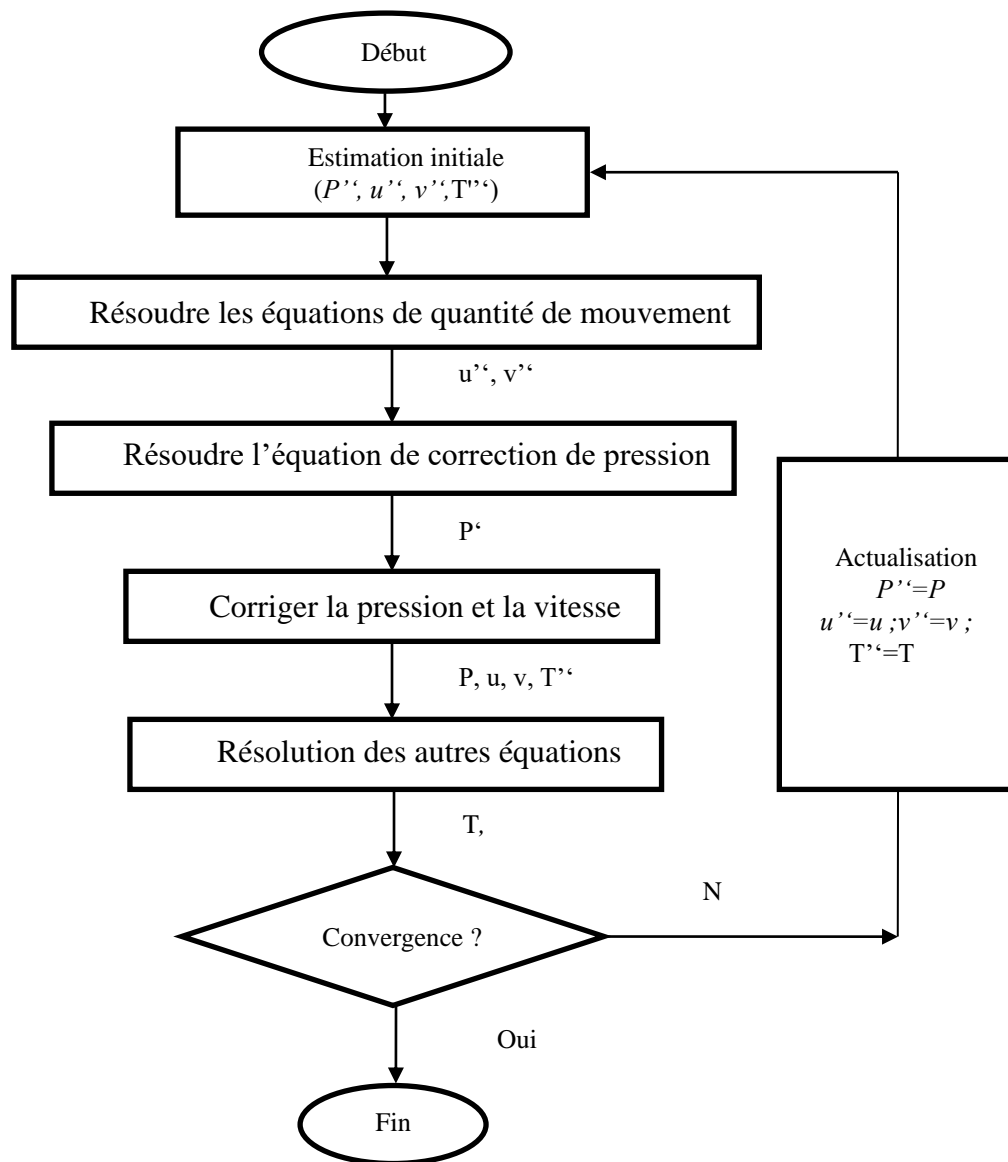


Figure.3.2. Schéma représentatif de l'algorithme SIMPLE

3.5. Résolution numérique

3.5.1. Paramètre de contrôle de la convergence

La façon d'obtenir une solution convergée est un des éléments essentiels de prédiction d'écoulement au moyen des codes CFD. Le code "FLUENT" propose différentes techniques pour accélérer le processus de convergence est augmentée si une bonne estimation de la solution est donnée comme condition initiale. Nous avons recours à plusieurs techniques décrites ci-dessous :

3.5.1.1. Critère de convergence

La résolution numérique des problèmes de type CFD nécessite un processus itératif. Pour apprécier la convergence du processus itératif, des critères de convergence doivent être pris en compte. Ainsi, la convergence du processus itératif est déterminée par le concept de résidu.

Après l'étape de discrétisation, l'équation de conservation d'une variable ϕ donnée sur une cellule de centre P peut s'exprimer comme suit :

$$a_p \phi_p = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (3.2)$$

Où : a_p et a_{nb} représentent la contribution convectives et diffusives, l'indice nb est lié aux centres de cellules adjacentes.

b : Représente la contribution de partie constante du terme source Φ_ϕ .

Le résidu normalisé a alors pour expression

$$R_\phi = \frac{\sum_{\text{Domaine}} |\sum \alpha_{nb} \times \phi_{nb} + b - \alpha_p \times \phi_p|}{\sum_{\text{Domaine}} |\alpha_p \times \phi_p|} \quad (3.3)$$

Ces expressions des résidus sont valables pour toutes les grandeurs sauf la pression, dans le cas de cette grandeur, le résidu est déterminé à partir de l'équation de continuité :

$$R^c = \sum_{\text{Domaine}} |\text{taux de création de matière dans le domaine}| \quad (3.4)$$

3.5.1.2. Sous-relaxation

A cause de la non linéarité des équations résolues, il est possible, pour atténuer les fluctuations de la solution, de réduire les variations des variables d'une itération à une autre en introduisant une sous-relaxation. Il n'existe pas des règles générales concernant des meilleures valeurs des coefficients de sous-relaxation, mais il existe des recommandations pour chacune des grandeurs, généralement basé sur des connaissances empiriques.

3.6. Etapes de résolution du problème

Les principales étapes utilisées dans notre simulation sont les suivantes :

1. Détermination du domaine de calcul (construction de la géométrie).
2. Discrétisation du domaine de calcul (maillage).
3. Identification des conditions aux limites.
4. Choix du modèle mathématique.
5. Choix de l'algorithme de solution.
6. Solution du modèle mathématique.
7. Visualisation et interprétation des résultats.

Bibliographies

- [1] H. K. Versteeg, and W Malalasekra. An introduction to computational fluid dynamics. Essex : Longman Scientific & Technical, 257 p. (ISBN 0 58221884 5), 1995.
- [2] S. V. Patankar. Numerical Heat transfer and Fluid Flow. McGraw-Hill Book Company, 1980.
-

Chapitre 4

Résultats et Discussions

Sommaire

4.1. Introduction.....	50
4.2. Test du maillage.....	50
4.3 Validation des résultats.....	52
4.4. Discussion des résultats.....	53
4.4.1. Champ de vitesse.....	53
4.4.2. 2 ème Cas (N=04 ($\varnothing=0.02$ Pour déférent Ri) :.....	60
4.4.2.1 Champ de vitesse :.....	60
4.4.2. Champ de température.....	64
4.4.2.3 2 ème Cas (N=04 ($\varnothing=0.02$ Pour déférent Ri) :.....	71
4.5. Effets de Ri, Ha, B . γ sur de nombre de Nusselt local:.....	75
4.6. Effets de Ri, Ha, B . γ sur du coefficient de Nusselt local:.....	78
4.7. Effets de Ha, B . γ sur de nombre de frottement local en fonction.....	80
4.8. Effets de Ha, B . γ sur de nombre de frottement moyen en fonction de Ri.....	82
4.9. Effets de Ha, B . γ sur de nombre de N moyen en fonction de Ri.....	84
4.10. Effets de Ri, Ha, B . γ sur de nombre de moyen en fonction de N.....	84
4.11. Effets de nombre de frottement moyen en fonction de Ri.....	86
4.12 Efficacité EFN.....	87
4.13 Efficacité EFHa.....	89
4.14 Efficacité EFnf.....	90
Bibliographies.....	92

4.1. Introduction

Nous allons présenter, le long de ce chapitre des résultats obtenus numériquement, sur l'influence d'un champ magnétique axial et transversal sur la convection mixte dans la géométrie considérée. Le ferrofluide est caractérisé par un nombre d'onde $0 \leq N \leq 4$. Une étude de la sensibilité au maillage et une comparaison et une validation des résultats avec la littérature seront abordées, puis nous procédons à la validation des résultats de la simulation obtenus à l'aide du logiciel FLUENT, L'objectif principal consiste à étudier l'effet des paramètres de contrôle tels que le nombre de Reynolds, le nombre de Richardson, le nombre d'onde et les fractions volumiques sous l'effet de champ magnétique sur les champs dynamique et thermique. Les résultats seront présentés en termes de lignes de courant, d'isothermes, des profils des coefficients de frottement locaux et moyens, des profils des nombres de Nusselt locaux et moyens. Les effets des paramètres de contrôle du problème, à savoir le nombre de Hartmann Ha et le nombre la structure de l'écoulement ont été aussi discutés.

4.2. Test du maillage

✓ 1ère cas Pour conduite lisse

Pour examiner et évaluer l'indépendance du maillage sur la solution numérique, cinq maillages uniformes sont considérés : 25x100, 50x200, 75x300, 200x400, 250x500 nœuds, pour $N = 4$, $Re = 200$, $\phi = 0,02$, $Ri=10$ et $Ha = 50$. Les résultats de la variation du maillage sont présentés dans le tableau (III.2). on constate que la variation du nombre de Nusselt reste presque constante a compter du maillage 75x300 nœuds ,Par conséquent ,le maillage 75x300 nœuds sera adopté pour tous nos calculs.

Grille de 1 mm ³	Num
100x25	11.8134748
200x50	13.530776
300x75	13.4784996
200x400	13.3686019
250x500	11.8134748

Tableau.4.1. Etude du maillage pour $N=0$

Pour examiner et évaluer l'indépendance du maillage sur la solution numérique, cinq maillages uniformes sont considérés : 25x100, 50x200, 75x300, 200x400, 250x500

nœuds, pour $N = 4$, $Re = 200$, $\phi = 0,02$, $Ri=10$ et $Ha = 50$. Les résultats de la variation du maillage sont présentés dans le tableau (III.2). On constate que la variation du nombre de Nusselt reste presque constante à compter du maillage 75x300 nœuds, Par conséquent, le maillage 75x300 nœuds sera adopté pour tous nos calculs.

✓ 2^{ème} cas pour conduite ondulé

N=02

Grille de 1 mm ³	Num
50*100	17.73495603
100*200	18.15208875
150*300	16.98531357
200*400	16.57876502
250*500	15.62038296
50*100	17.73495603

Tableau.4.2 : Etude du maillage pour $N=02$

N=03

Grille de 1 mm ³	Num
50*100	18.12637098
100*200	19.86178706
150*300	18.27034786
200*400	18.03497553
250*500	19.02973412
50*100	18.12637098

Tableau.4.3. Etude du maillage pour $N=03$

N=04

Grille de 1 mm ³	Num
50*100	17.93883251
100*200	19.88735287
150*300	19.10626449
200*400	18.40332708
250*500	17.93883251
50*100	17.5925144

Tableau.4.4. Etude du maillage pour $N=04$

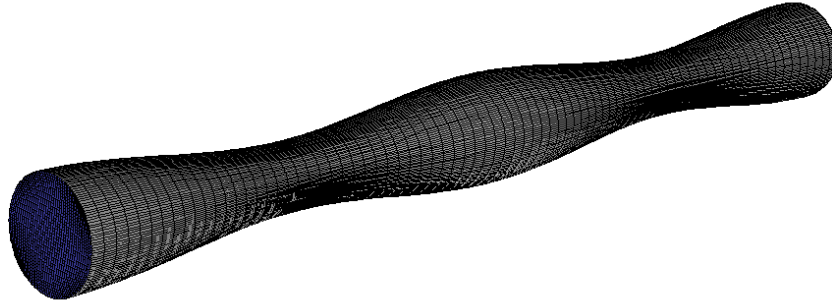


Figure 4.1. Maillage de conduit ondulée N=02

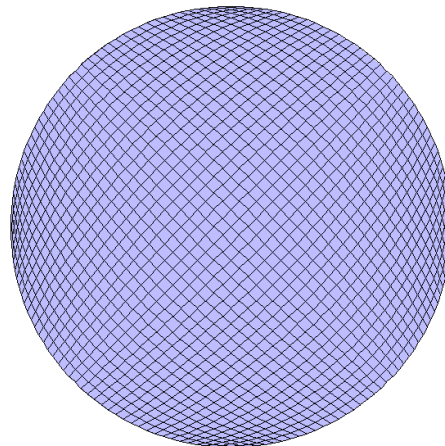


Figure 4.2. Maillage de conduite lisse

4.3 Validation des résultats

De manière à vérifier l'exactitude des résultats numériques obtenus dans le présent travail, une validation de notre simulation numérique a été faite en comparant nos résultats avec d'autres travaux numériques de l'équation de Shah. [1] résulte numériques de Bayat et al. [2] et les résultats expérimentaux de Kim et al. [3].

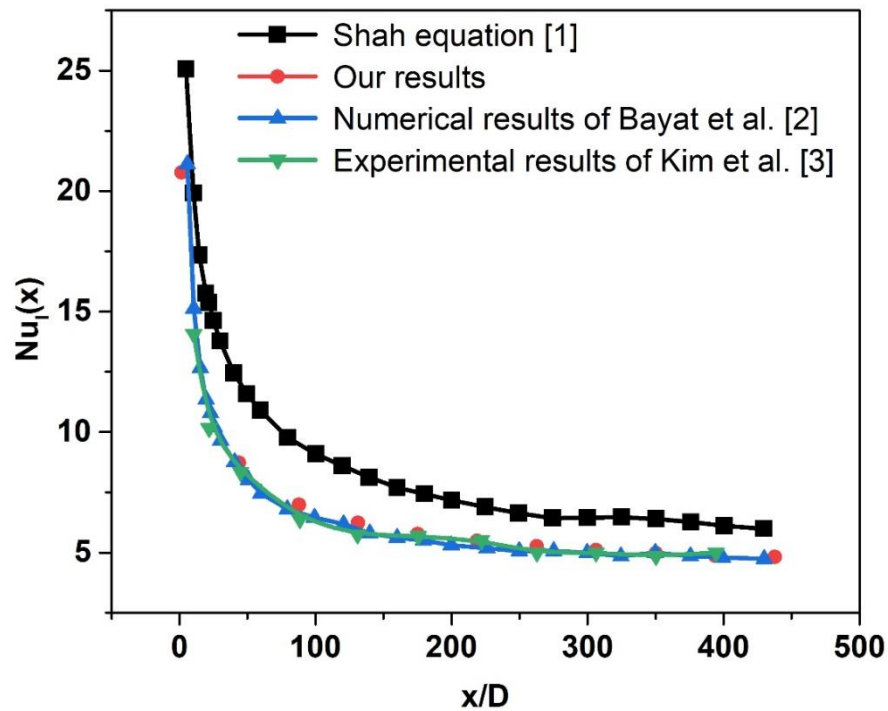


Figure 4.3. Comparaison entre les résultats obtenus avec l'équation de Shah. [1] résultats numériques de Bayat et al. [2] et les résultats expérimentaux de Kim et al. [3].

4.4. Discussion des résultats

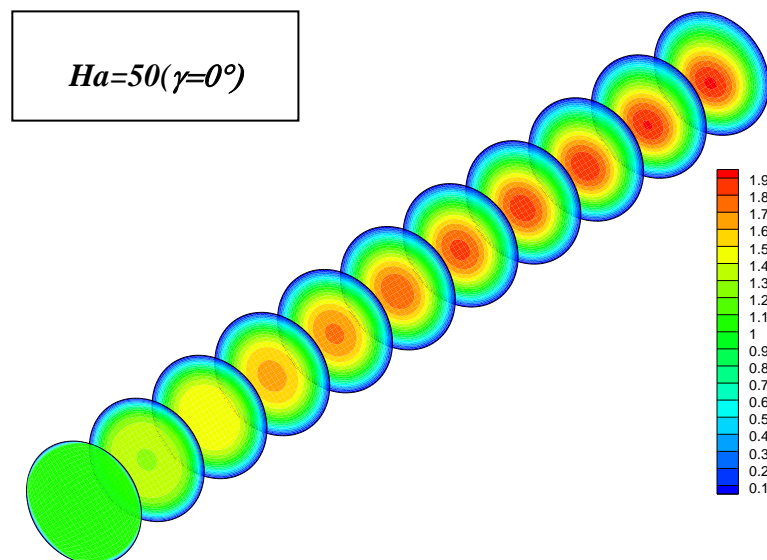
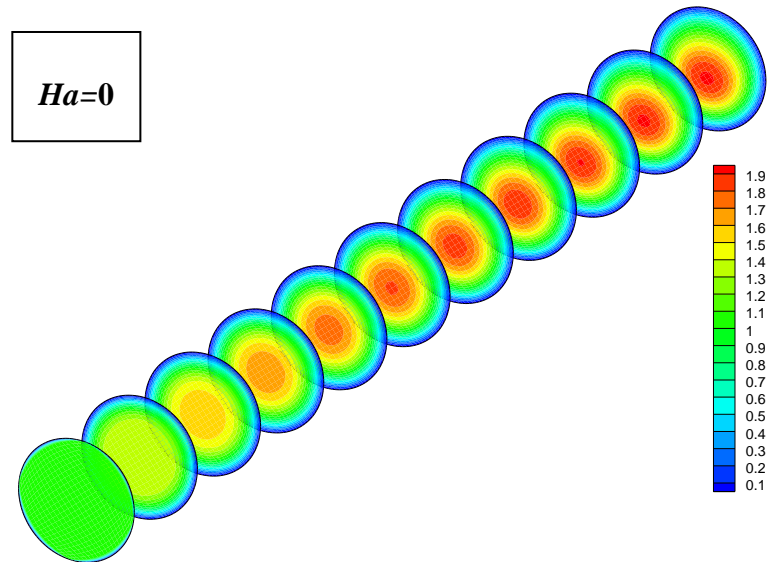
4.4.1. Champ de vitesse

Le flux mixte d'un ferrofluide induit par le champ magnétique modifie les distributions de vitesse dans les conduites lisse et ondulée pour $(0 \leq N \leq 4)$, $(0.1 \leq Ri \leq 10)$, et avec une densité de flux de chaleur externe constant ($Q=10000$), l'effet du champ magnétique sur la variation de vitesse sur à différentes sections transversales des conduites lisse et ondulée est illustré dans les figures 4. (4, 5, 6, 7, 8, 9, 10). Pour $0 \leq Ha \leq 50$, $Re=200$, et $\phi = 0.02$, et l'absence de champ magnétique $Ha=0$ ou l'application de champs magnétiques axial $Ha=50$, les isolignes de vitesse axiale se forment cercles dont les centres, Nous pouvons voir que l'application de champs magnétiques axial n'a aucun impact sur la vitesse.

Lorsqu'on applique un champ magnétique perpendiculairement à la direction de l'écoulement (l'axe Z) dans la conduite simple et ondulée, les isolignes de vitesse axiale

ne sont plus symétriques, Cela se produit en raison de la présence du champ magnétique, générant la force de Lorentz, qui tente à retarder l'écoulement convectif.

Les effets de ce dernier et de la force de flottabilité sont dominé la convection naturelle qui apparaît avec l'augmentation du nombre de Richardson.



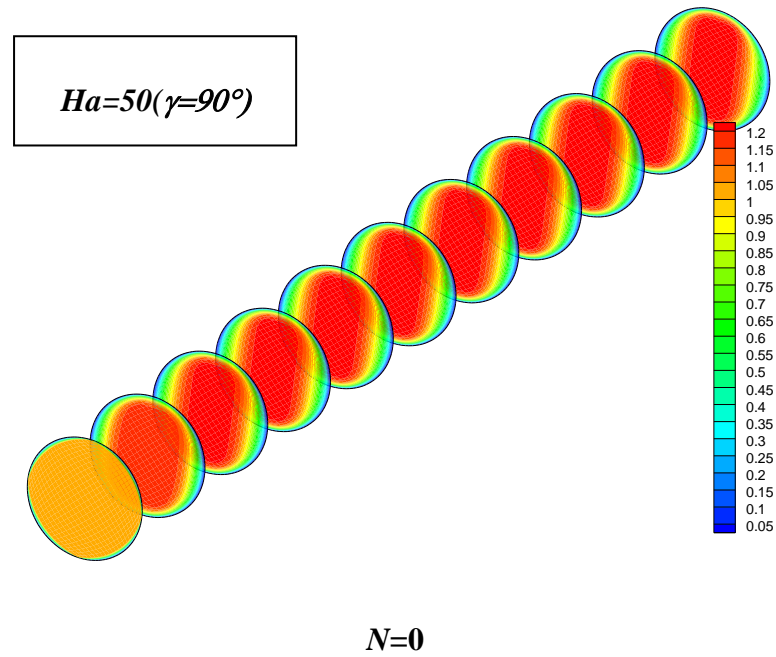
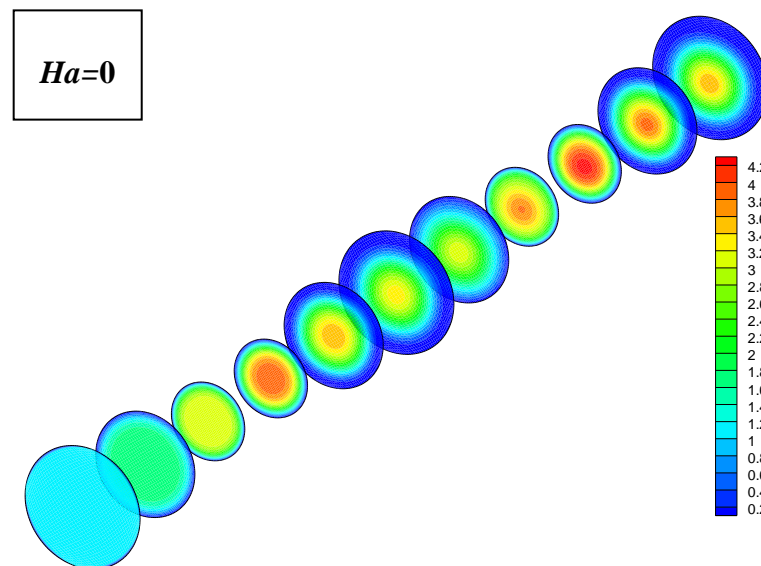
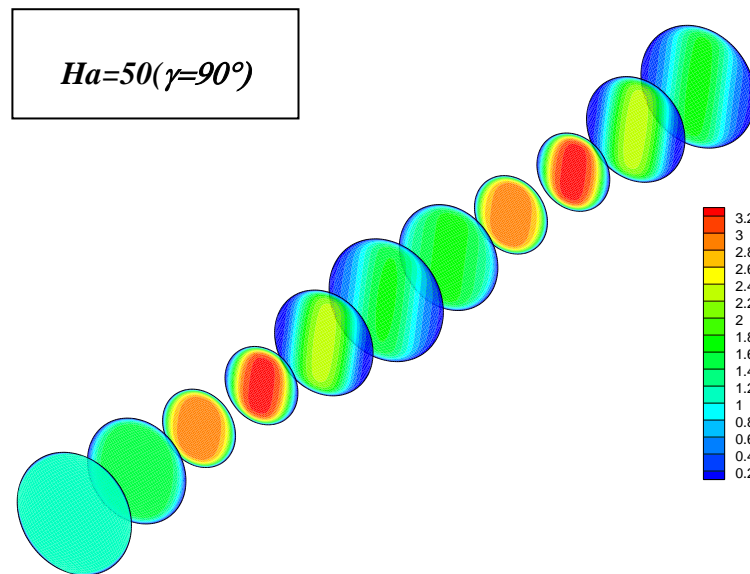
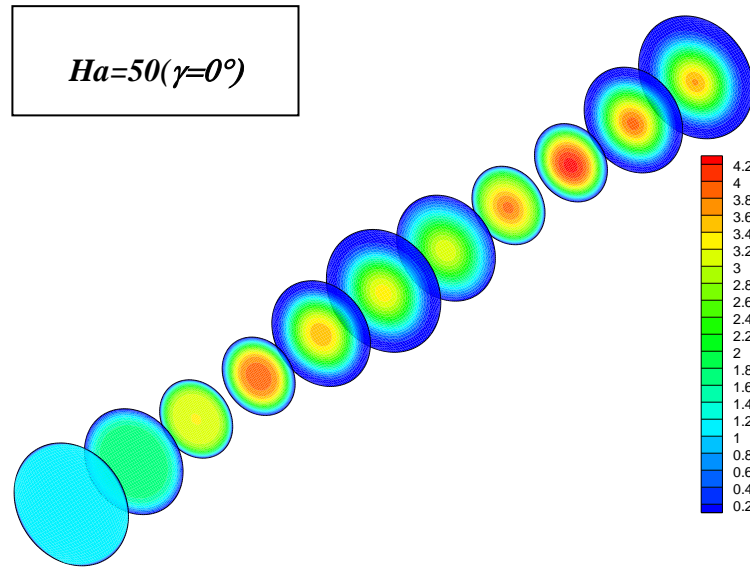


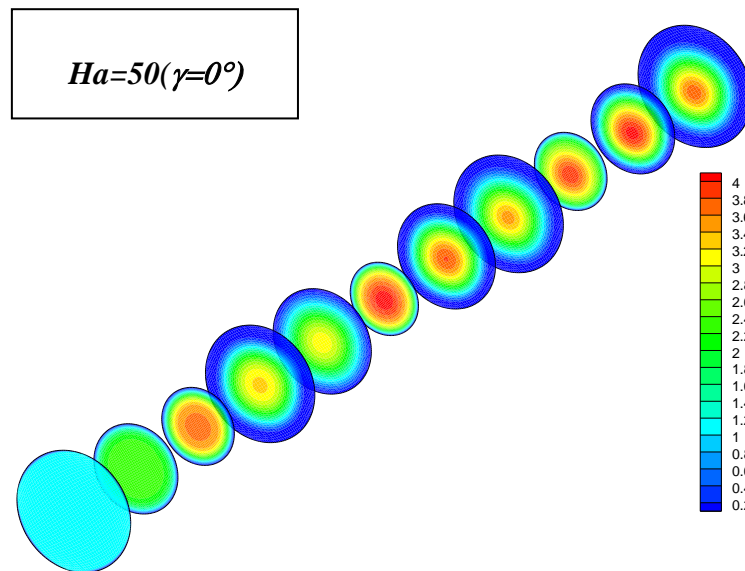
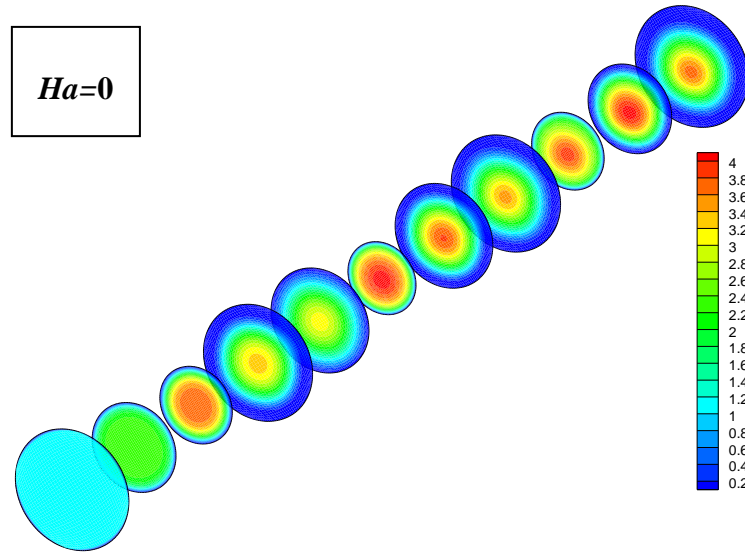
Figure 4.4. *Champ de vitesse magnitude pour différents nombres de Ha et γ , $N=0$
 $Ri=1, (\varphi=0.02)$*





$N=02$

Figure 4.5. *Champ de vitesse magnitude pour différents nombres de Ha et γ , $N=2$
 $Ri=1, (\varphi=0.02)$*



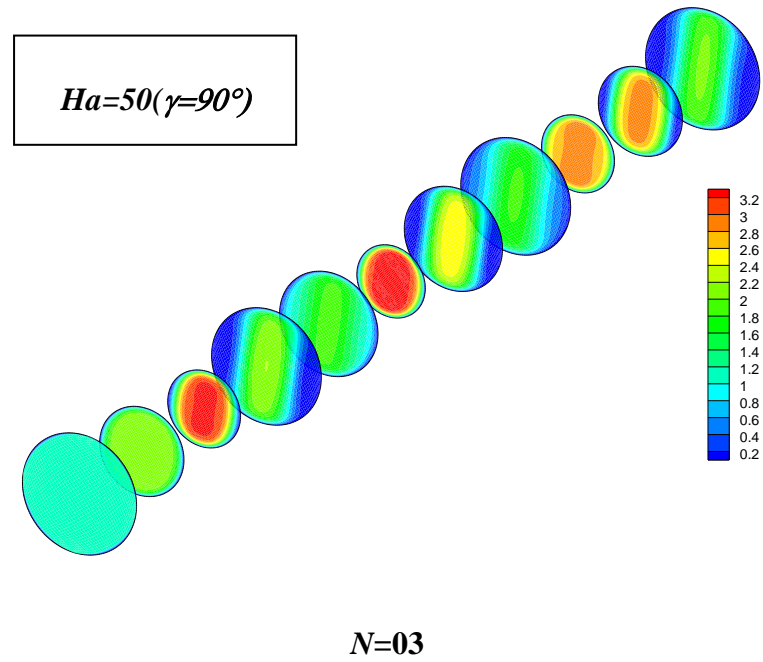
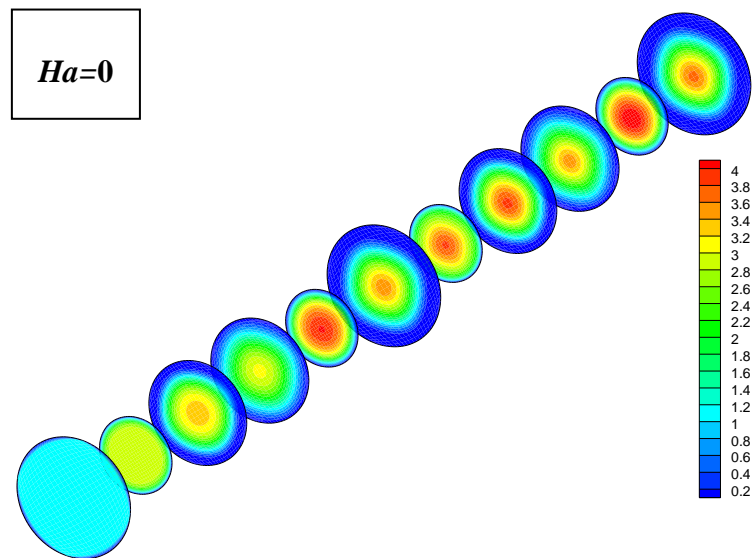
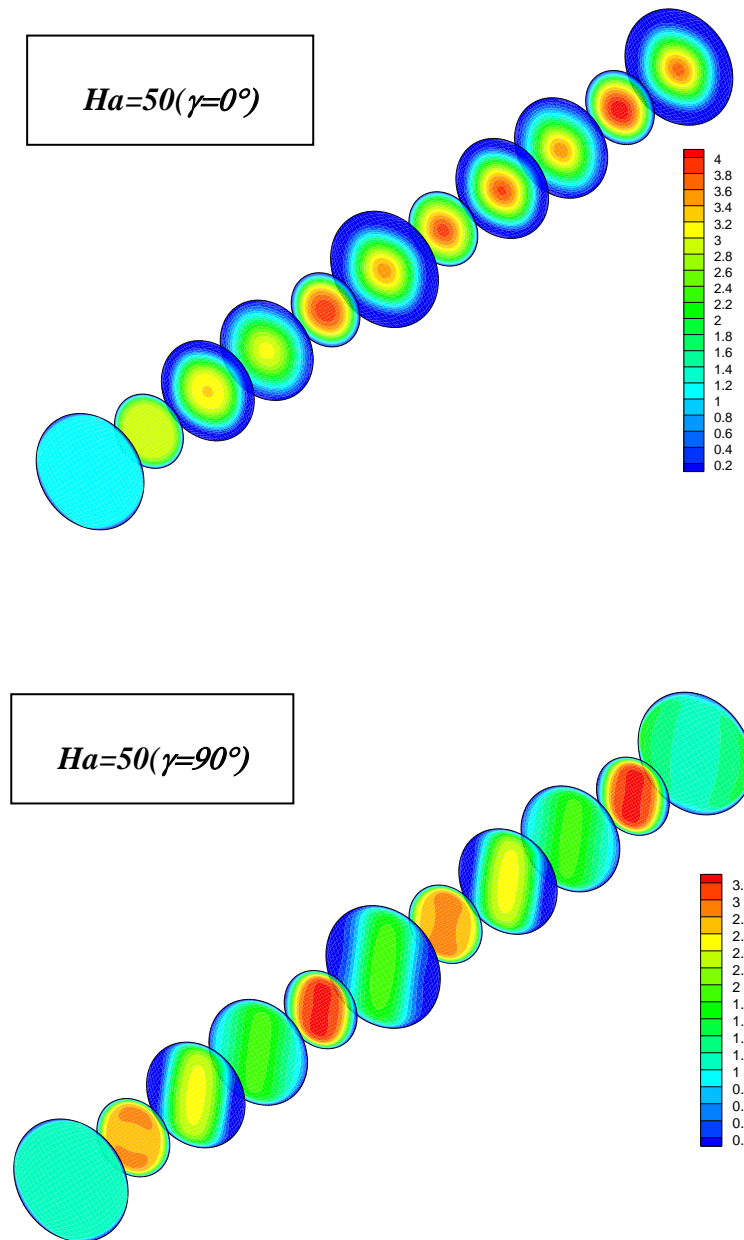


Figure 4.6. *Champ de vitesse magnitude pour différents nombres de Ha et γ , $N=3$
 $Ri=1, (\varphi=0.02)$*



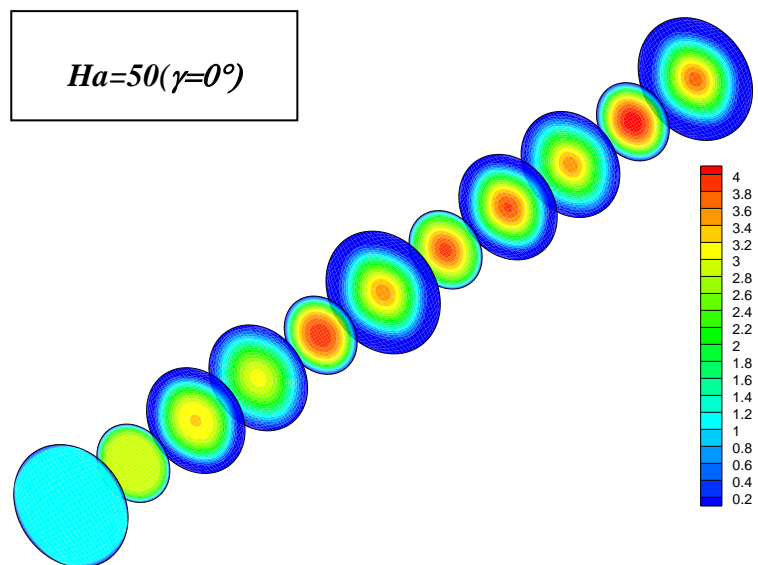
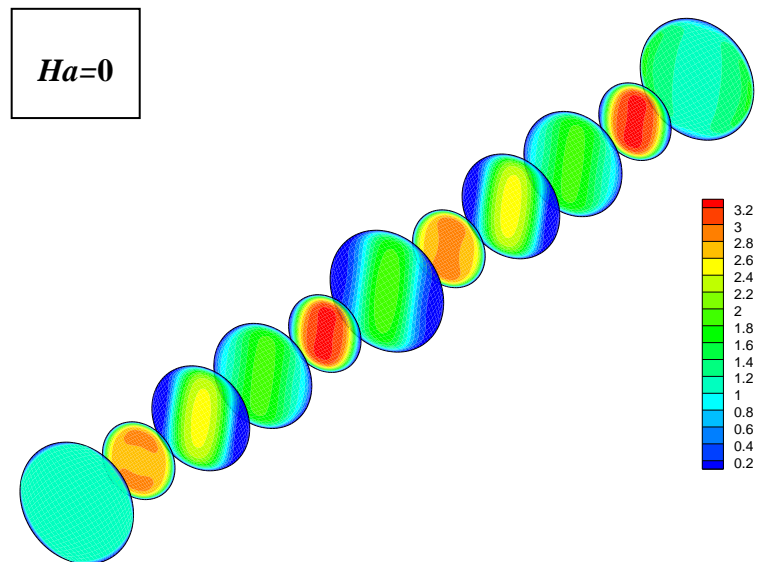


$N=4$

Figure 4.7. *Champ de vitesse magnitude pour différents nombres de Ha et γ , $N=4$
 $Ri=1, (\varphi=0.02)$*

4.4.2. 2^{ème} Cas (N=04 ($\varphi=0.02$) Pour différent Ri):

4.4.2.1 Champ de vitesse :



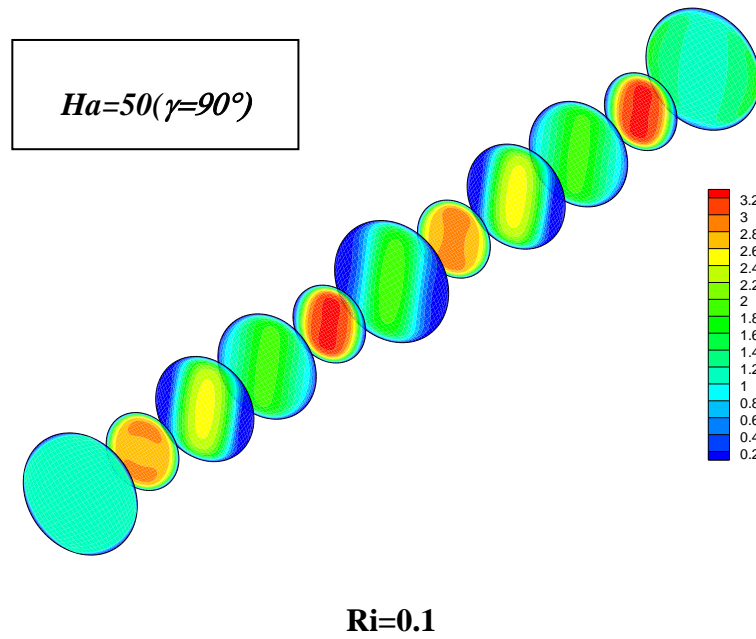
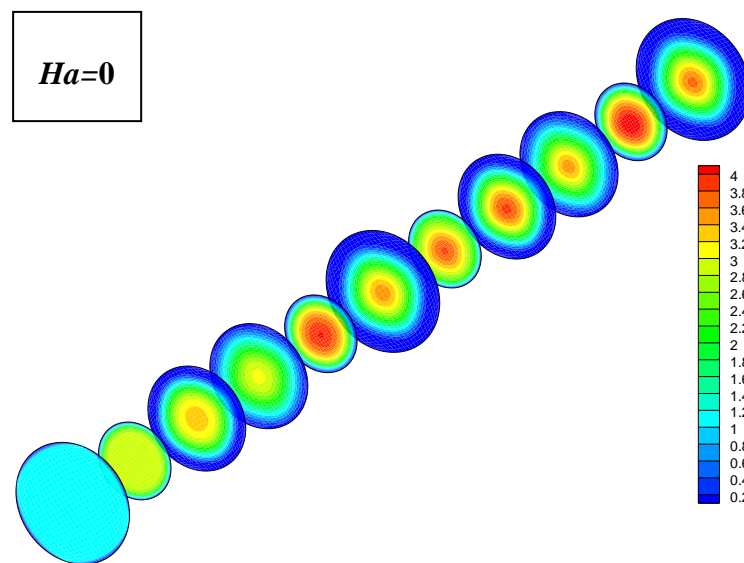
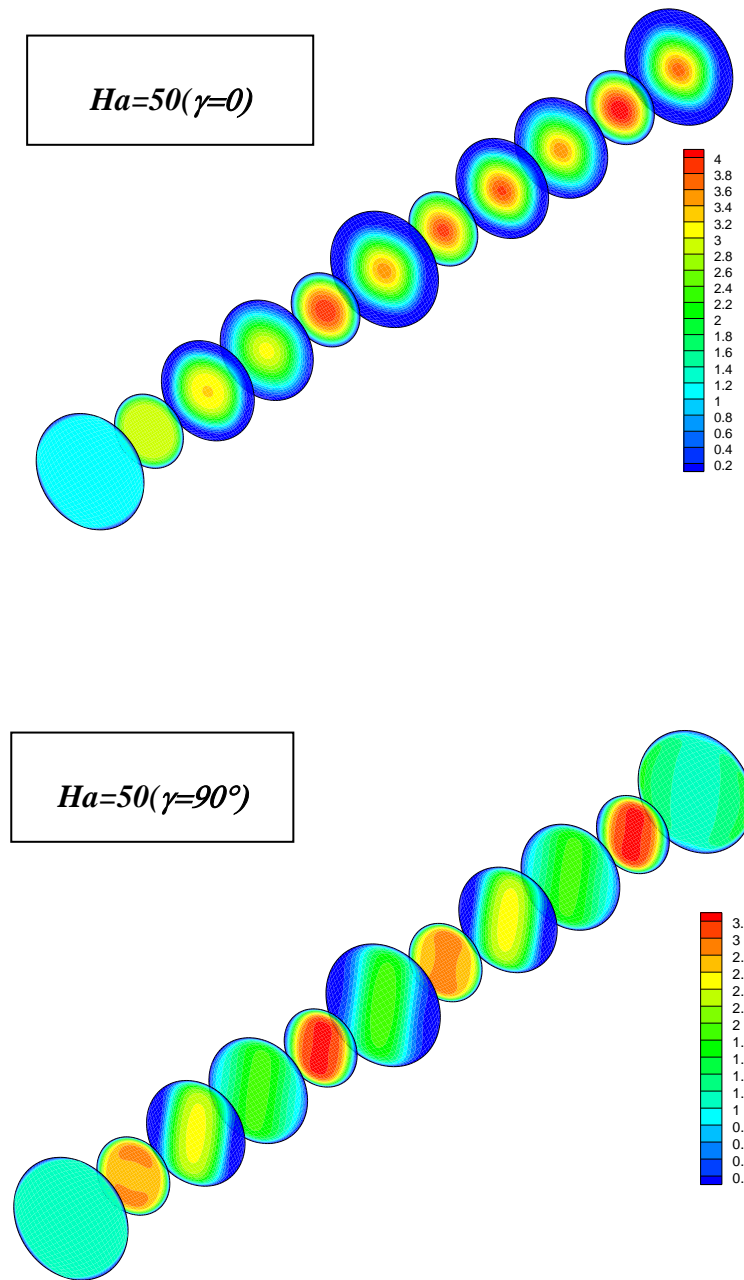


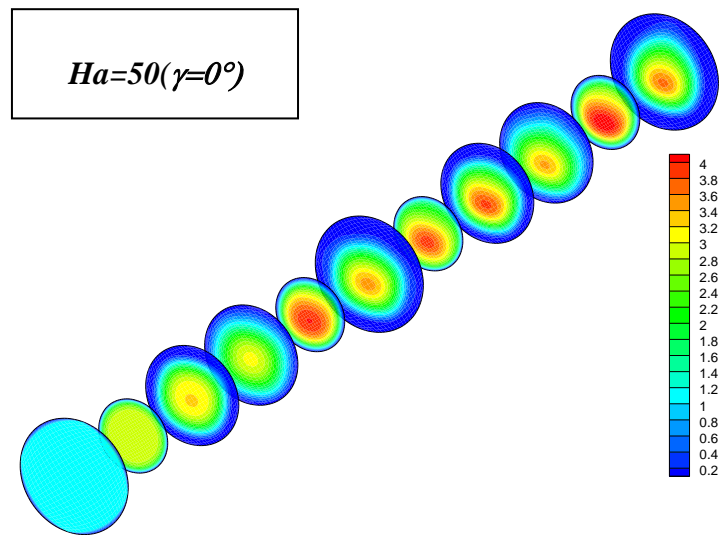
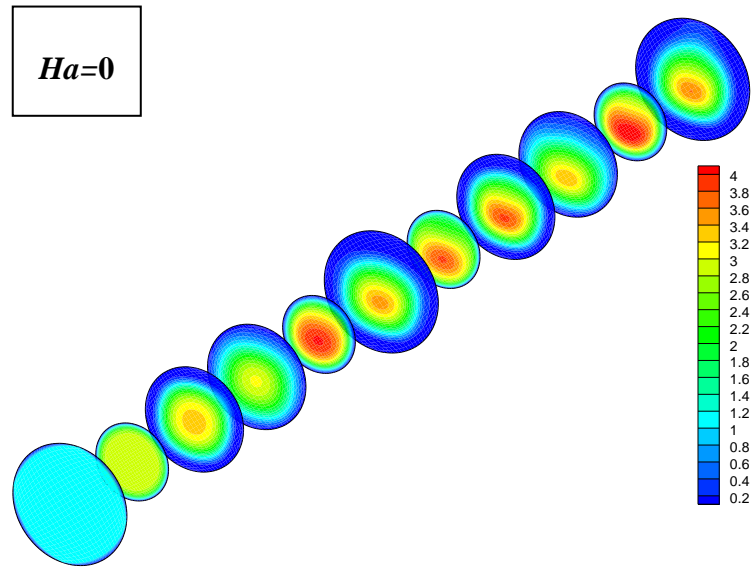
Figure 4.8. *Champ de vitesse magnitude pour différents nombres de Ha et Ri=0.1
N=04 ($\varphi=0.02$)*

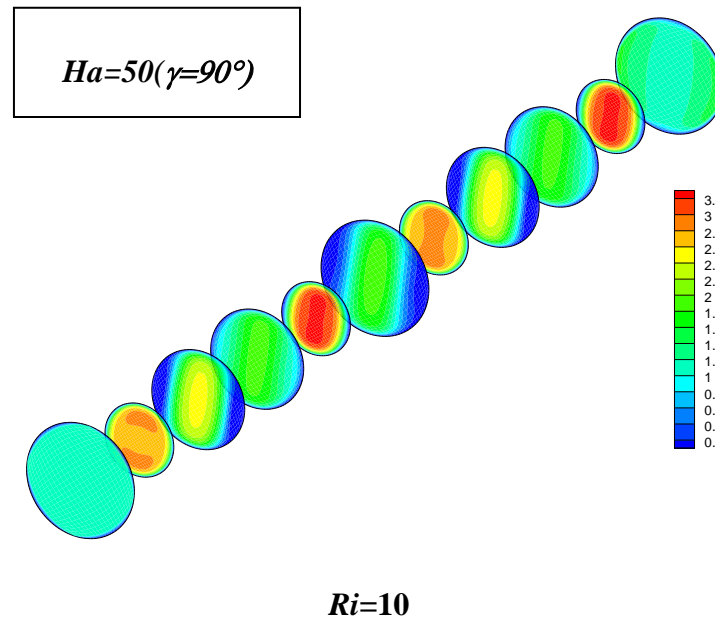




$Ri=01$

Figure 4.9. *Champ de vitesse magnitude pour différents nombres de Ha et $N=04$
 $Ri=1(\varphi=0.02)$*



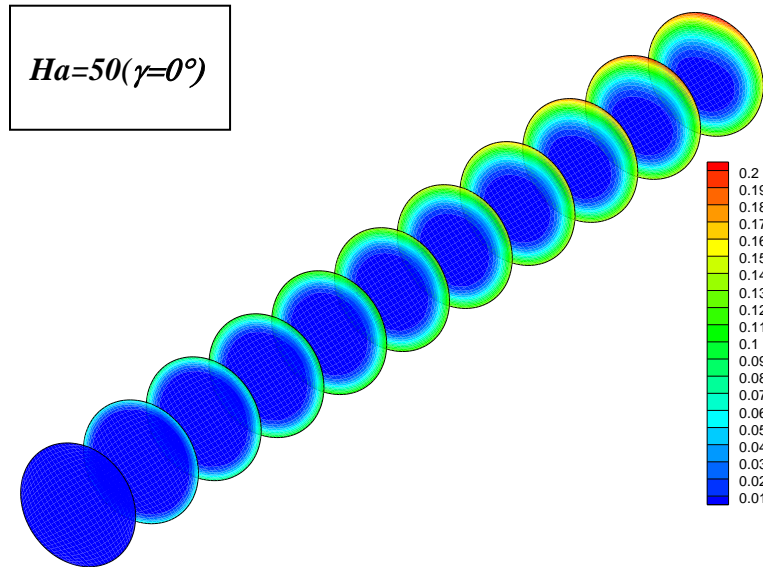
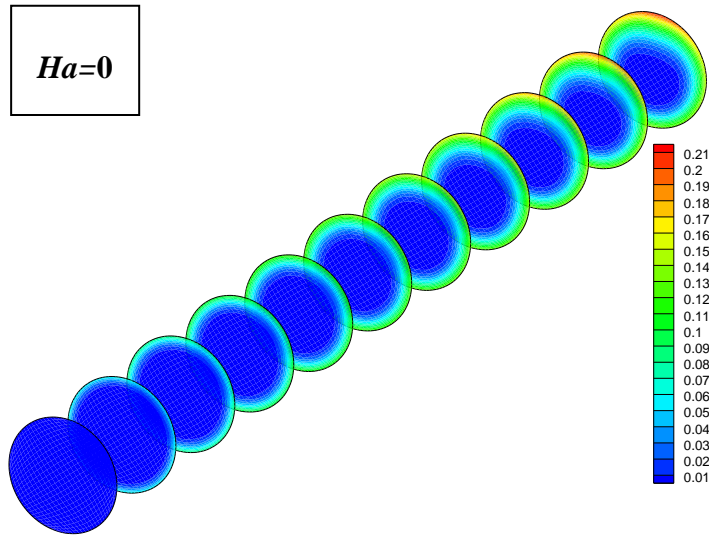


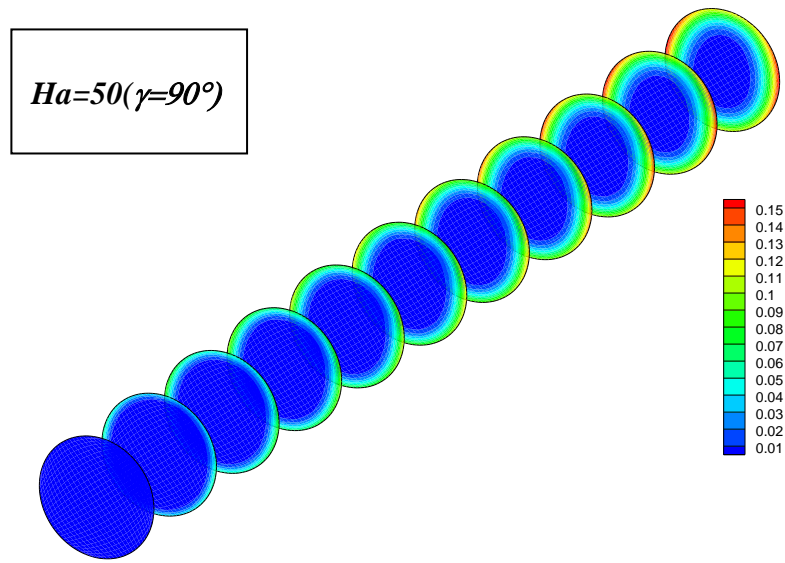
$Ri=10$

Figure 4.10. *Champ de vitesse magnitude pour différents nombres de Ha et $N=04$
 $Ri=10(\varphi=0.02)$*

4.4.2. Champ de température

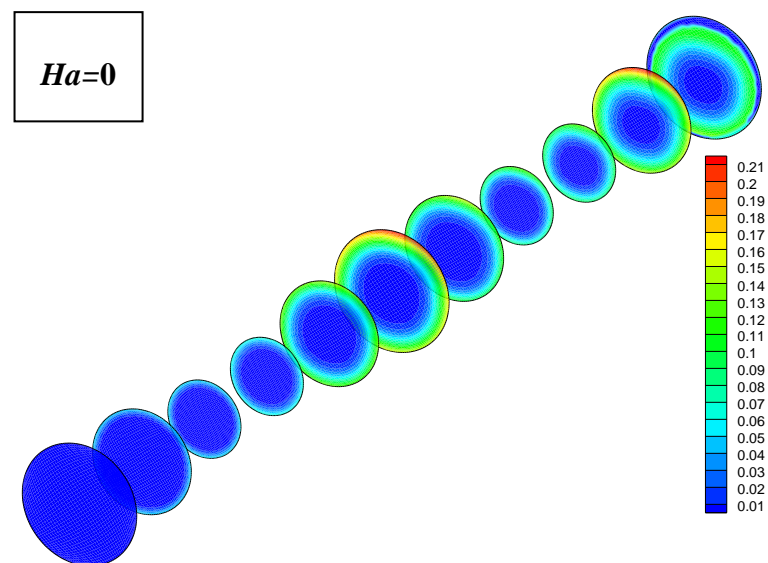
Les figures 4. (11,12, 13, 14, 15, 16 et 17) Montent les champs températures pour divers Ri , Ha , γ et N à $\varphi = 0,04$, $Re = 200$ sous l'effet de l'application du champ magnétique sur la structure des champs thermiques, et avec une densité de flux de chaleur externe constant ($Q=10000$). En absence d'un champ magnétique ou lorsqu'il est appliqué un champ magnétique axial, pour toutes les configurations envisagées ($Ri = 0.1$, $Ri=1$ et $2 \leq N \leq 3$), les isothermes correspondant à des vortex circulaires et régulières (les cellules circulatoires sont plus proches et poussent vers le centre du conduite), l'écoulement est symétrique à l'intérieur du conduite, ceci est principalement dû à la symétrie de la conduite à paroi ondulé et aux conditions aux limites (la convection forcé est dominé). Avec l'augmentation du nombre de Richardson ($Ri=10$ et $2 \leq N \leq 3$), et Lorsqu'il applique d'un champ magnétique transversal, les cellules circulatoires sont poussées vers le bas et deviennent plus grandes, en raison de l'augmentation des gradients de température. Lorsque, ce qui indique la convection naturelle est dominé en raison de l'effet de la force magnétique et force de flottabilité.





$N=0$

Figure 4.11. Champ de Température magnitude pour différents nombres de Ha et, $Ri=1$ $N=0$ ($\varphi=0.02$)



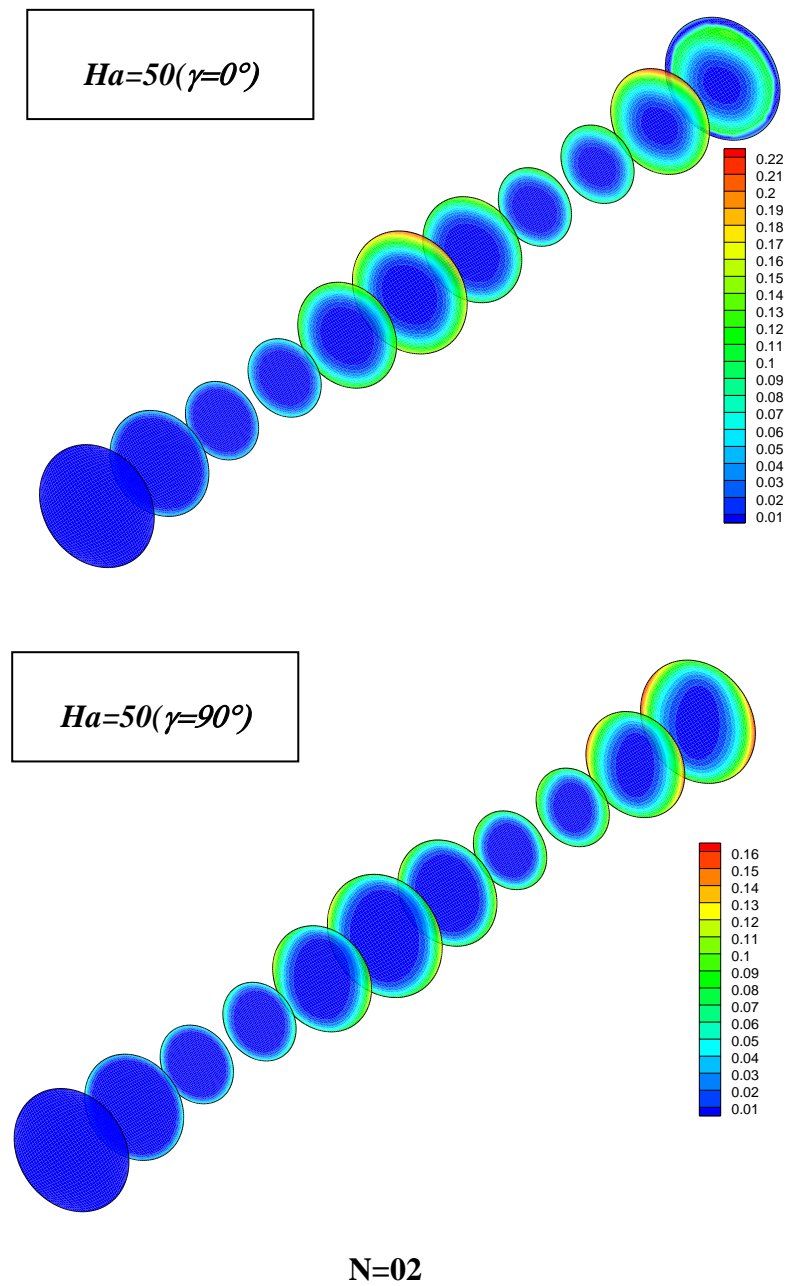
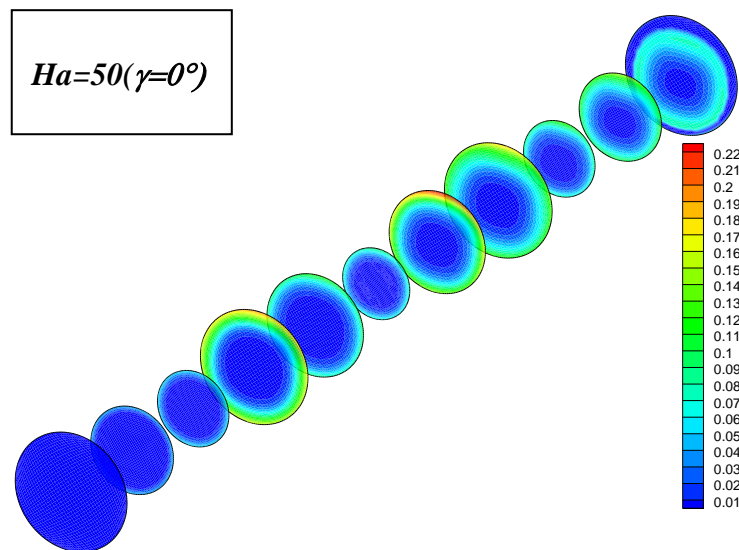
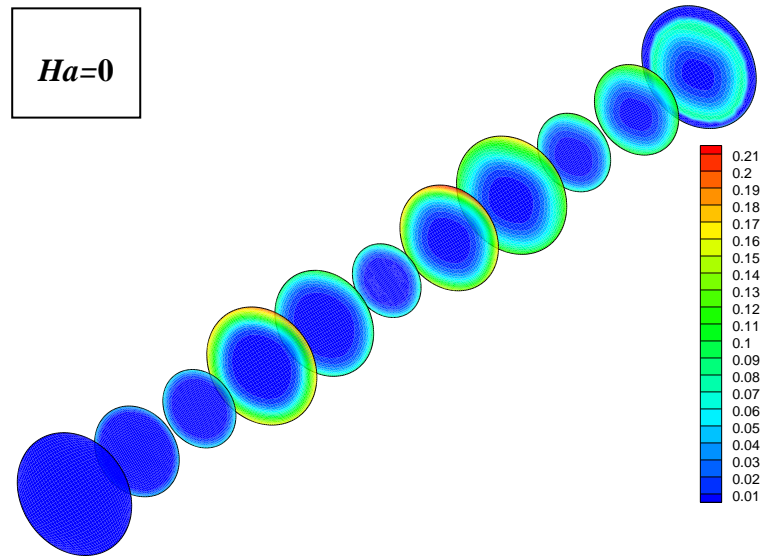


Figure 4.12. *Champ de Température magnitude pour différents nombres de Ha et $N=02$, $Ri=1$ ($\varphi=0.02$)*



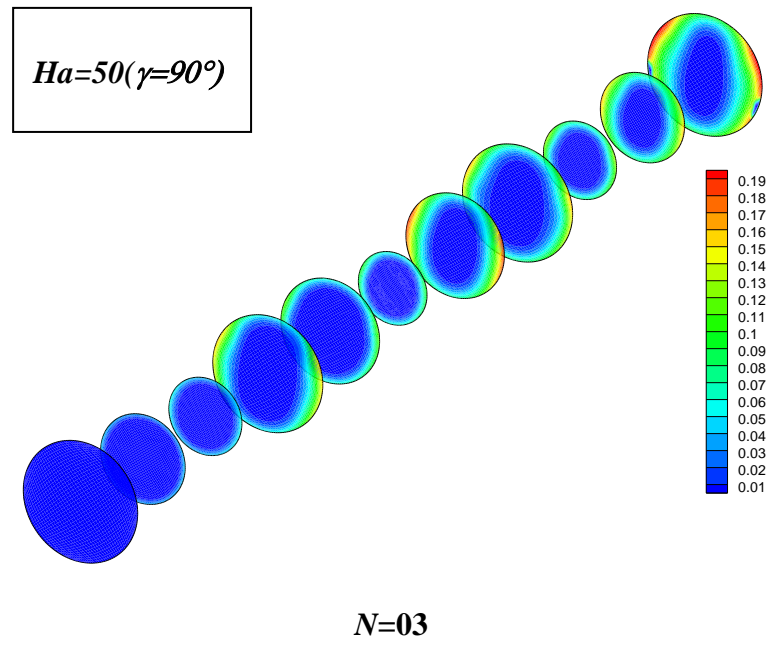
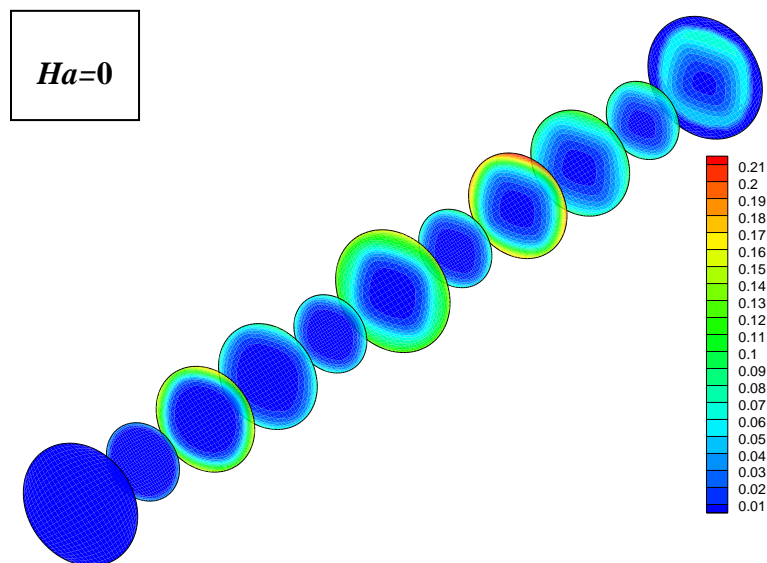
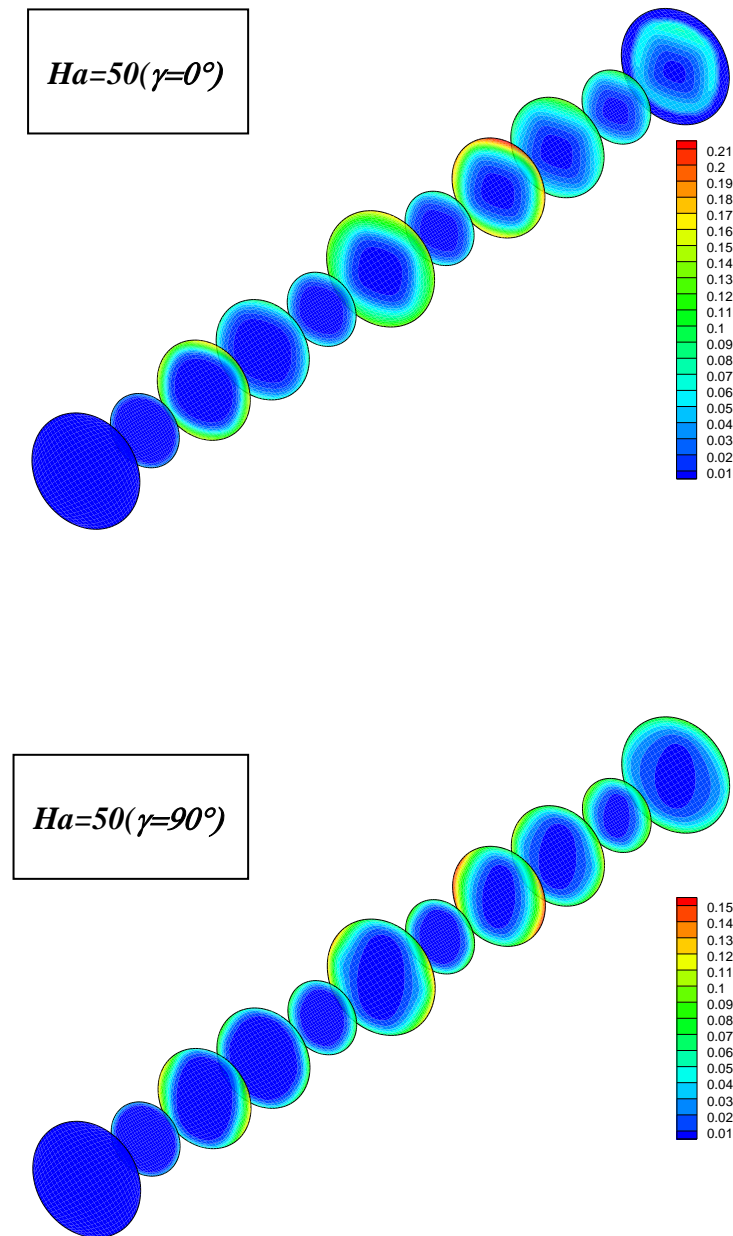


Figure 4.13. *Champ de Température magnitude pour différents nombres de Ha et $N=02, Ri=1$ ($\varphi=0.02$)*



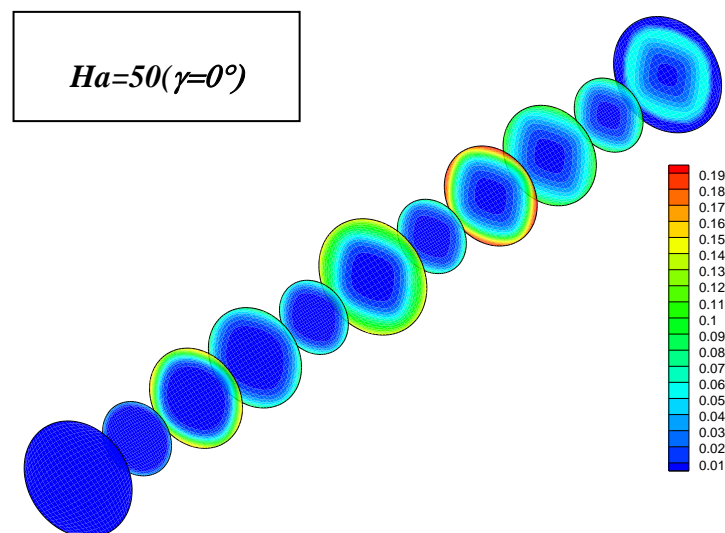
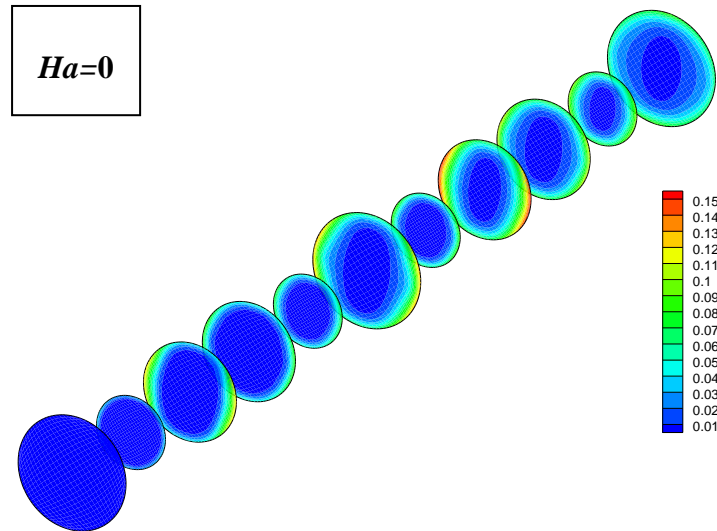


$N=04$

Figure 4.14. *Champ de Température magnitude pour différents nombres de Ha et, $Ri=1$ ($\varphi=0.02$)*

4.4.2.3 2^{ème} Cas (N=04 ($\varphi=0.02$) Pour différent Ri):

- Champ température :



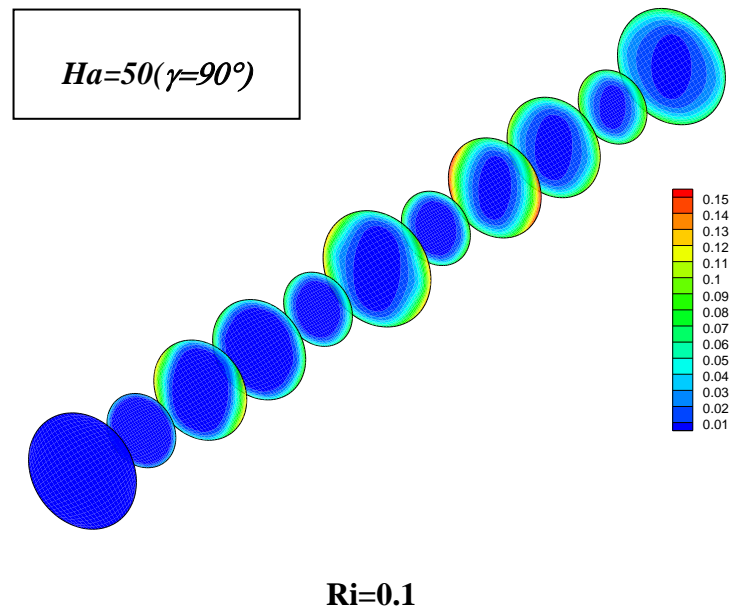
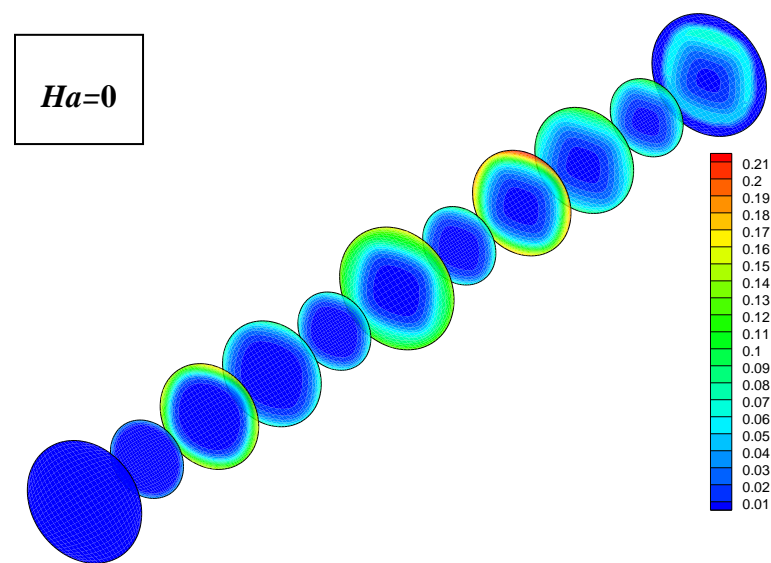
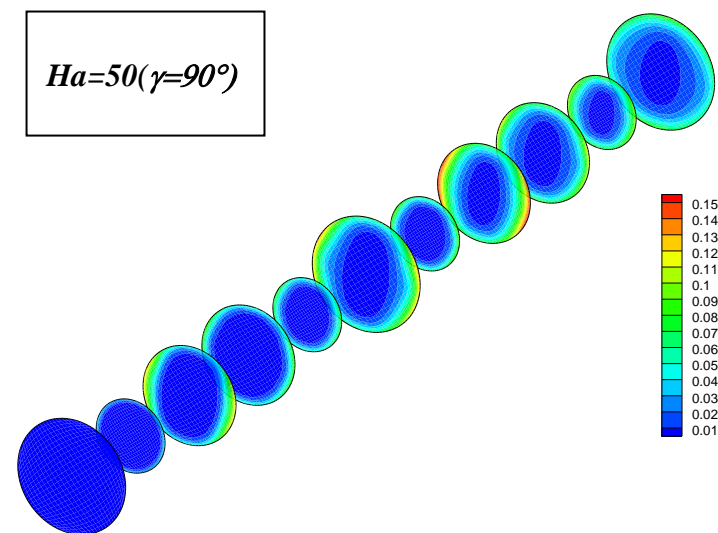
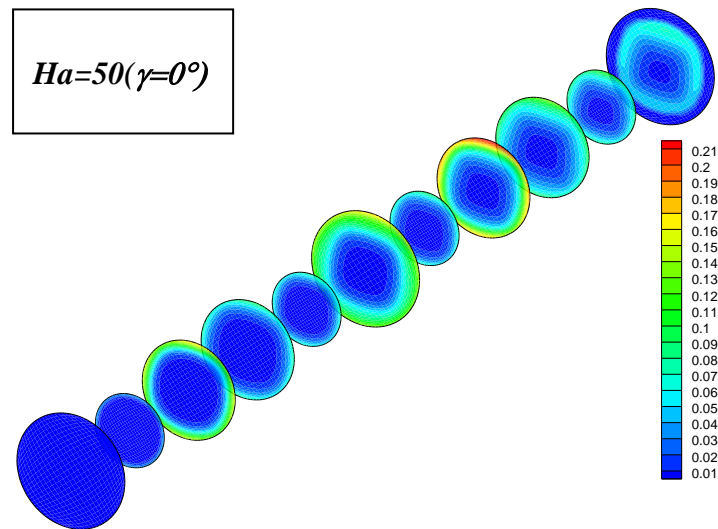


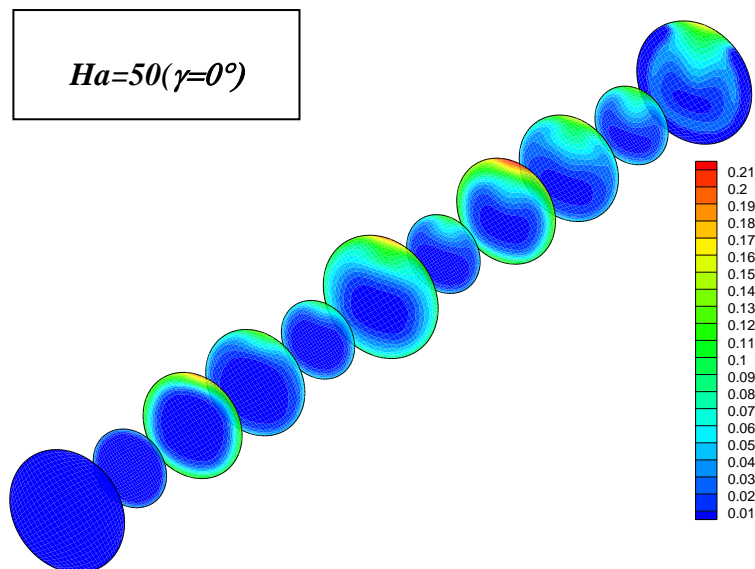
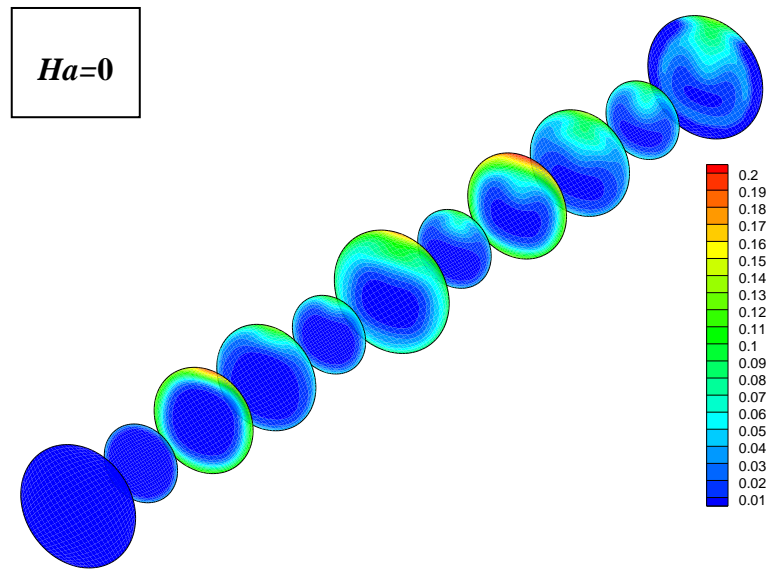
Figure 4.15: *Champ de Température magnitude pour différents nombres de Ha et $N=04$, $Ri=0.1$ ($\varphi=0.02$)*





Ri=1

Figure 4.16. *Champ de Température magnitude pour différents nombres de Ha et $N=04$, $Ri=1$ ($\varphi=0.02$)*



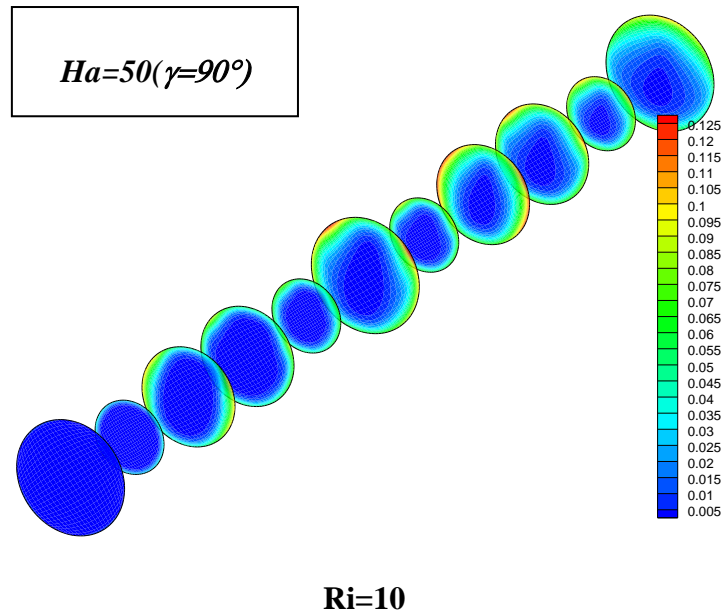


Figure 4.17. Champ de Température magnitude pour différents nombres de Ha et $N=04$, $Ri=10$ ($\varphi=0.02$)

4.5. Effets de Ri , Ha , B , γ sur de nombre de Nusselt local:

La distribution du nombre de Nusselt local caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

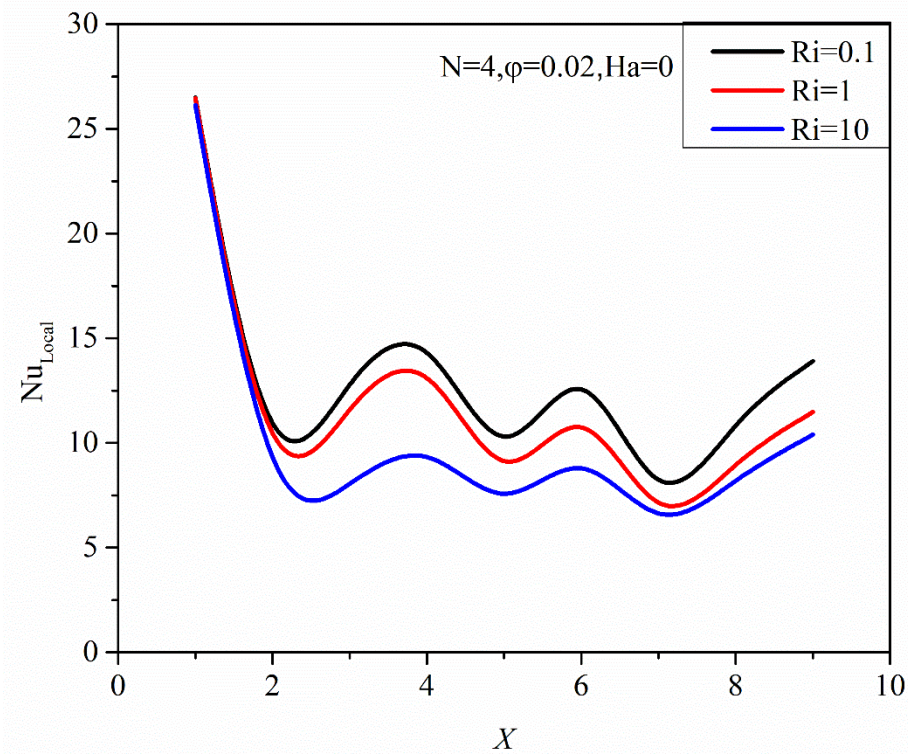
L'effet du champ magnétique avec différentes intensités ($0 \leq Ha \leq 50$) est étudié.

Dans cet état, les calculs sont effectués à $0.1 \leq Ri \leq 10$, $\varnothing=0.02$, $N=4$ et $0 \leq Ha \leq 50$. par longueur d'onde, comme illustré à la figure 4.18, Le nombre de Nusselt local est dans le canal à paroi ondulée, avec une nombre d'onde ondulée $N=4$, la courbe harmonique pour le nombre de Nusselt local dans la région du canal ondulé a la même fréquence que celle de la surface ondulée, et les valeurs maximales et minimales se produisent précisément à les emplacements des sections minimale et maximale du canal à paroi ondulée a la même fréquence que celle de la surface ondulée, et les valeurs maximales et minimales se produisent précisément à les emplacements des sections minimale et maximale du canal à paroi ondulée.

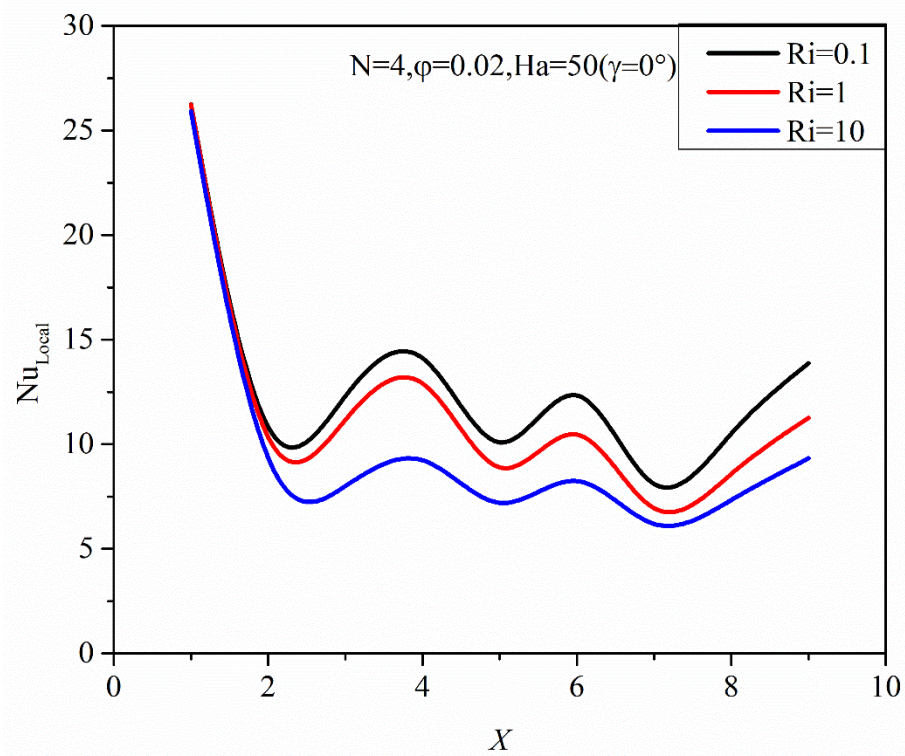
On observe que, l'effet du champ magnétique axial ($\gamma=0$), aucune de différence dans l'ordre de grandeur pour $Ha=0$ et $Ha=50$ (voir figure 4.18 a et b). Le nombre de Nusselt local est maximum à l'entrée du canal et il diminue avec une distance axiale croissante à partir de l'entrée le long de canal à paroi ondulée a la même fréquence que celle de la surface ondulée.

L'effet d'un champ magnétique transversal ($\gamma=\pi/2$), Le nombre de Nusselt local est maximum à l'entrée du canal, il diminue très légèrement avec une distance axiale croissante à partir de l'entrée le long de canal à paroi ondulée.

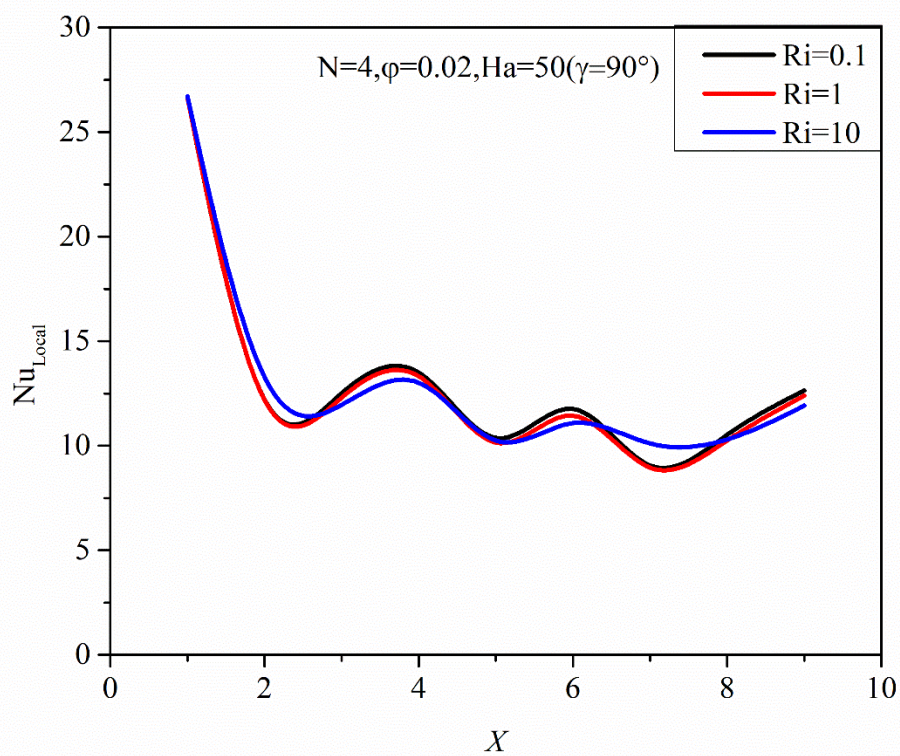
Il ressort également de la figure 4.18 a que le canal ondulé avec un champ magnétique transversal ($\gamma=\pi/2$) fournit la valeur la plus élevée du nombre de Nusselt local parmi les trois configurations aux mêmes N et \emptyset .



(a)



(b)



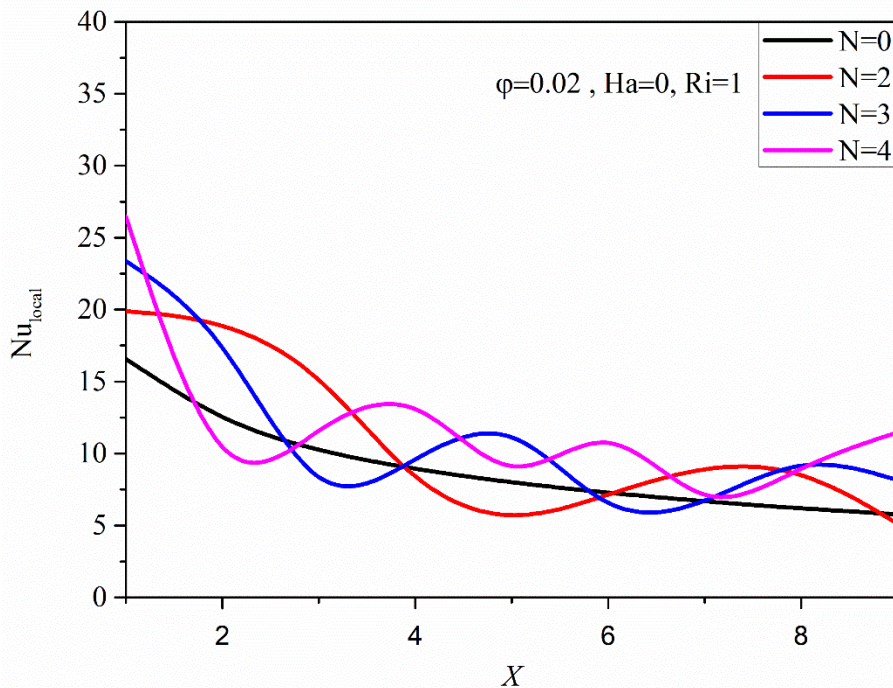
(c)

Figure 4.18. Variation du Nusselt local le long de la surface de canal en fonction de Ri pour différentes valeurs de Ha ., $N=04$, $\phi=0.02$.

4.6. Effets de Ri , Ha , B , γ sur du coefficient de Nusselt local:

La variation des nombres locaux de Nusselt le long de la surface du canal pour différentes nombre d'onde sinusoïdale ($2 \leq N \leq 4$) et pour des valeurs constantes de Ri , et ϕ sont présentés sur la figure 4.19.

Le nombre de Nusselt local est maximum à l'entrée du canal lisse et il diminue le long de la surface du canal avec une distance axiale croissante à partir de l'entrée, car l'épaisseur de la couche limite à l'entrée du canal est inférieure à d'autres lieux. Pour $2 \leq N \leq 4$, le nombre de Nusselt local augmente à section convergente du canal ondulé parce que l'amplitude de la vitesse et augmentation du gradient de vitesse dans la section convergente, tandis qu'à la section divergente du canal diminue. Pour un canal lisse à écoulement développé, Le nombre de Nusselt local va vers une valeur constante. Alors que ce paramètre à la section convergente de canal en raison de la vitesse élevée, est plus que section divergente. Aussi, en augmentant le nombre de l'onde sinusoïdale, le nombre de Nusselt et l'augmentation du transfert de chaleur le long du canal en raison de la création des tourbillons près des parois du canal.



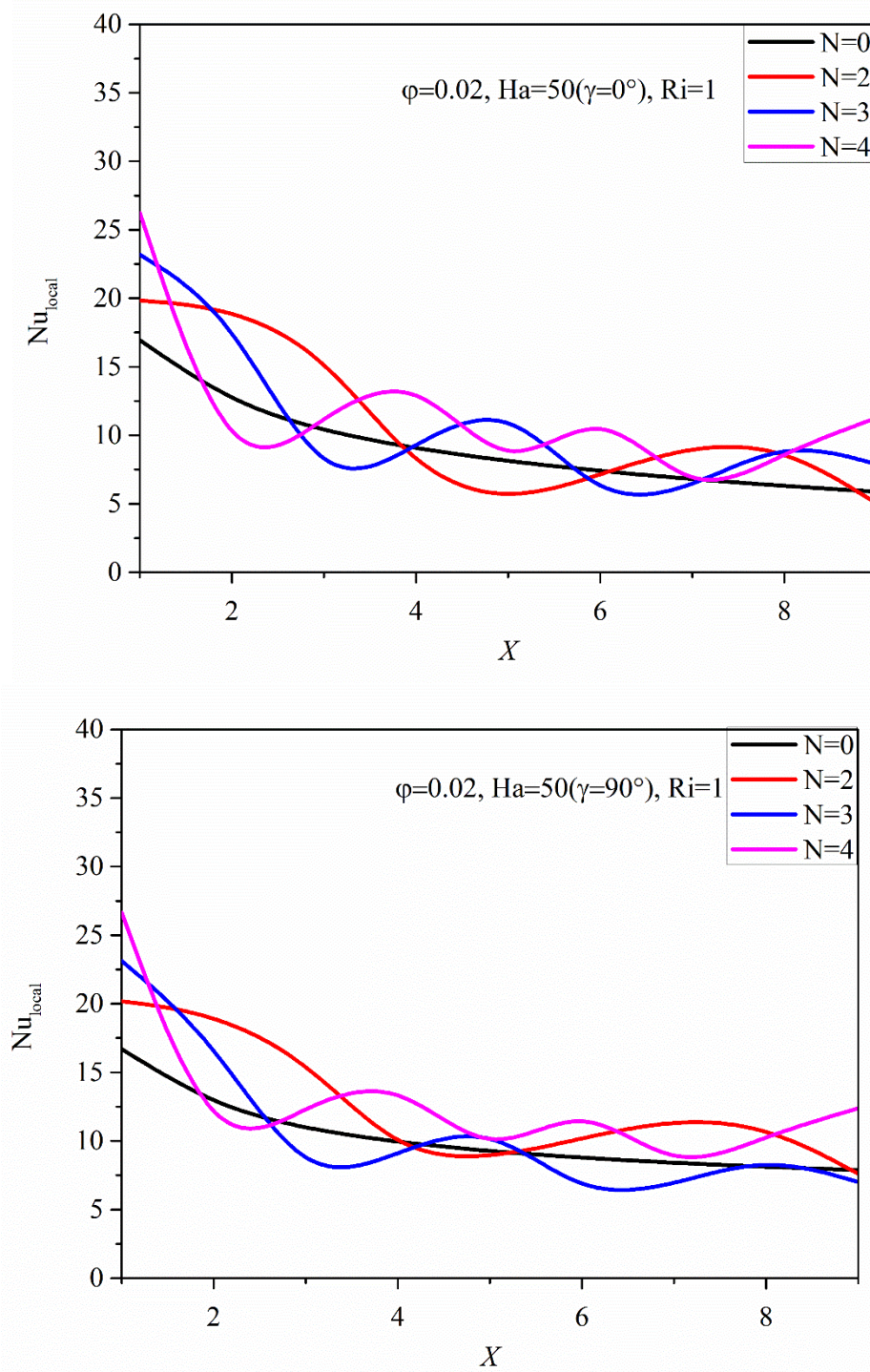


Figure 4.19. Variation du nombre Nusselt local le long de la surface de conduite en fonction de N pour différentes valeurs de Ha , ($\phi=0.02$, $Ri=1$).

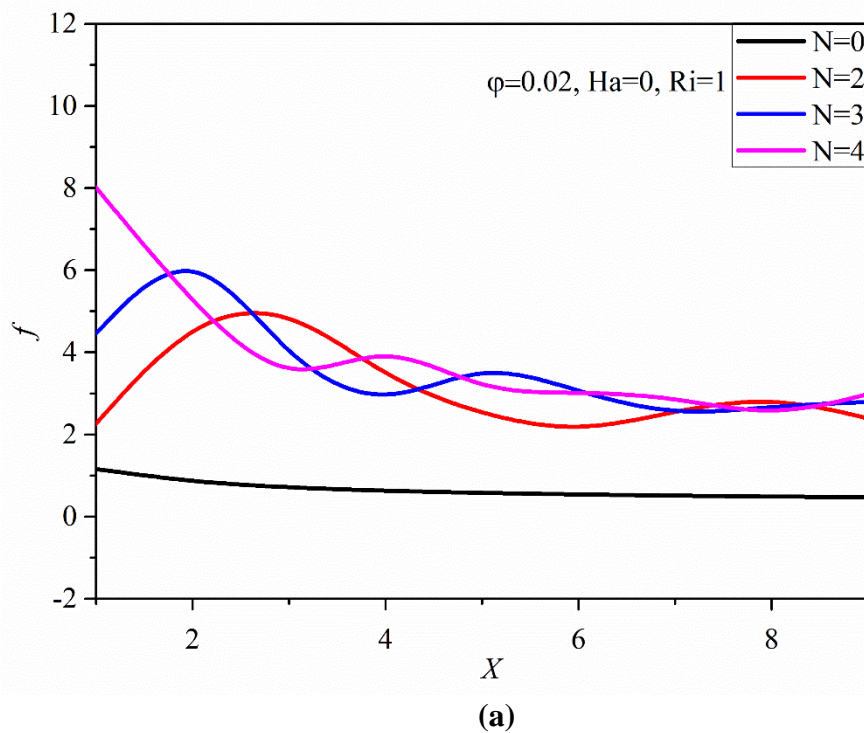
4.7. Effets de Ha , $B \cdot \gamma$ sur de nombre de frottement local en fonction de N :

La variation du coefficient de frottement local le long du canal lisse et du canal de paroi ondulée pour différentes nombre d'onde ($0 \leq N \leq 4$), pour un nombre de Hartmann ($0 \leq H \leq 50$) et des valeurs constantes de Ri , et φ est illustrée à la figure 4.20.

Pour un canal lisse avec un écoulement développé, le coefficient de frottement local est presque constant pour trois nombres de Hartmann ($Ha=0$, $Ha=50$ ($\gamma=0$) et $Ha=50$ ($\gamma=\pi/2$)) dans les mêmes conditions.

Pour un canal à paroi ondulée, sous l'effet d'un champ magnétique axial ou le champ magnétique est nul, le coefficient de frottement local varie le long de canal à paroi ondulée d'une manière alternative avec N , est maximal pour $N = 4$ et minimum pour $N = 2$.

Sous l'effet d'un champ magnétique transversal, le coefficient de frottement local varie le long de la surface du canal à paroi ondulée d'une manière alternative avec N , il augmente avec le nombre d'ondulations, (augmente considérablement avec $N=4$).



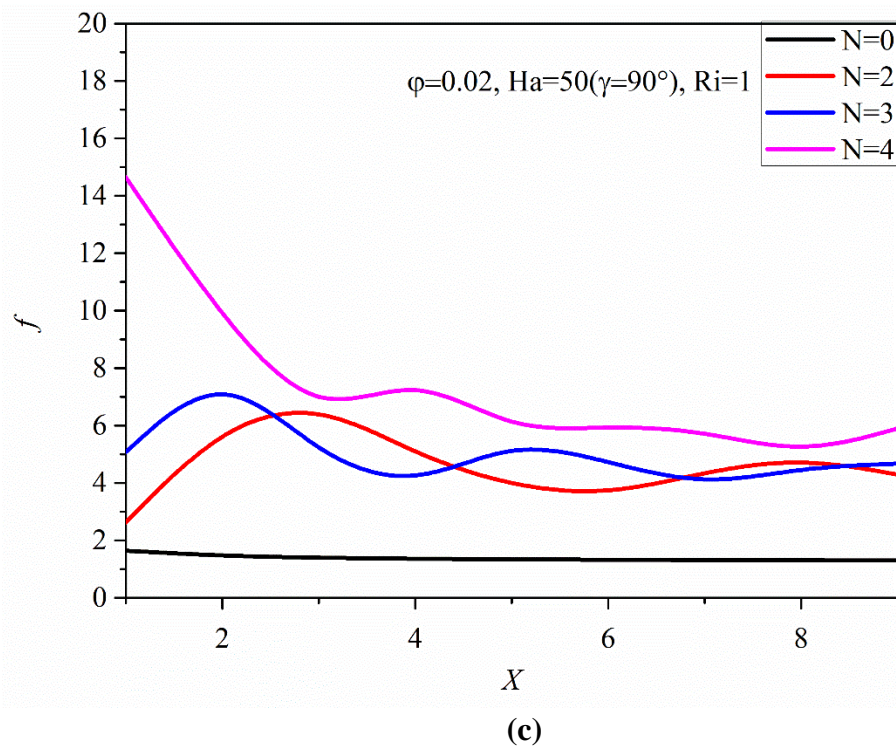
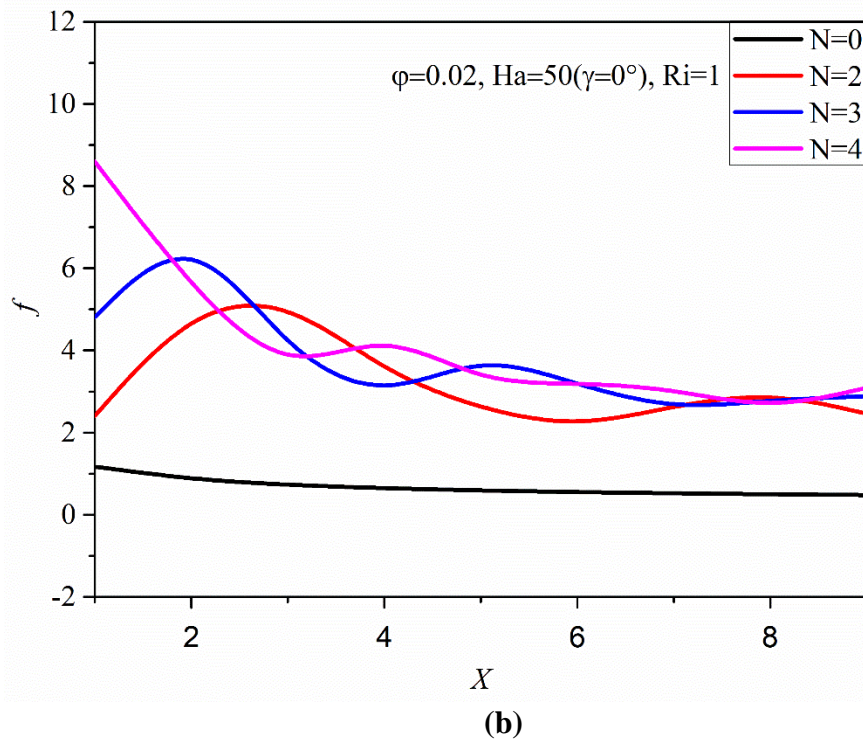
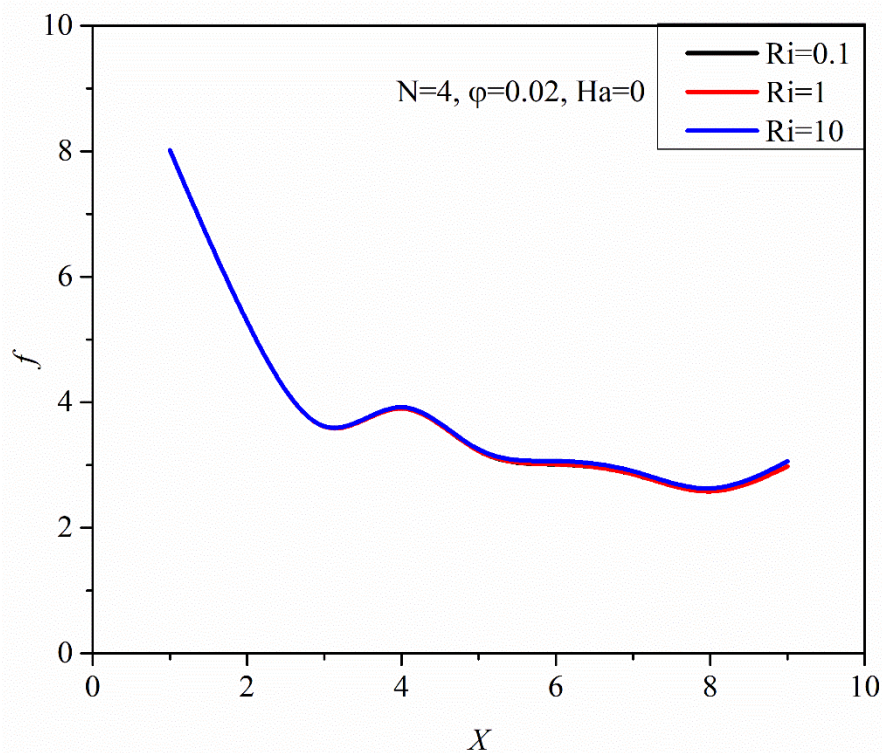


Figure 4.20. Evolutions de coefficient de frottement le long de la surface du canal en fonction de N pour différentes valeurs de Ha . Pour $\varphi=0.02$, $Ri=1$ et pour : a) sans champs magnétique b) avec champs magnétique : $\gamma=90^\circ$

4.8. Effets de Ha , $B \cdot \gamma$ sur de nombre de frottement moyen en fonction de Ri

La figure. 4.21 montre la variation des coefficients de frottement moyen pour le nombre de Richardson de en fonction du nombre de Hartmann à un Reynolds constant ($Re=200$), $\varnothing=0.02$ et $N=4$ le long d'un conduit ondulé horizontal avec divers orientation du champ MHD. ($0 \leq \gamma \leq 90$) axial et transversal. En remarque que les valeurs de coefficients de frottement moyen Lorsqu'on applique un champ transversal d'une valeur ($Ha=50$) sont plus élevées que celles de l'application d'n champs magnétique axial ($Ha=50$) ou sans champs magnétique ($Ha=0$) et qu'elles sont plus élevées à l'entrée qu'à la sortie.

Les effets de la force de Lorentz et de la force de flottabilité sont responsables du mouvement du ferrofluide se décélèrent, ce qui entraîne un ralentissement de la vitesse du fluide pour le cas ou d'un champ transversal.



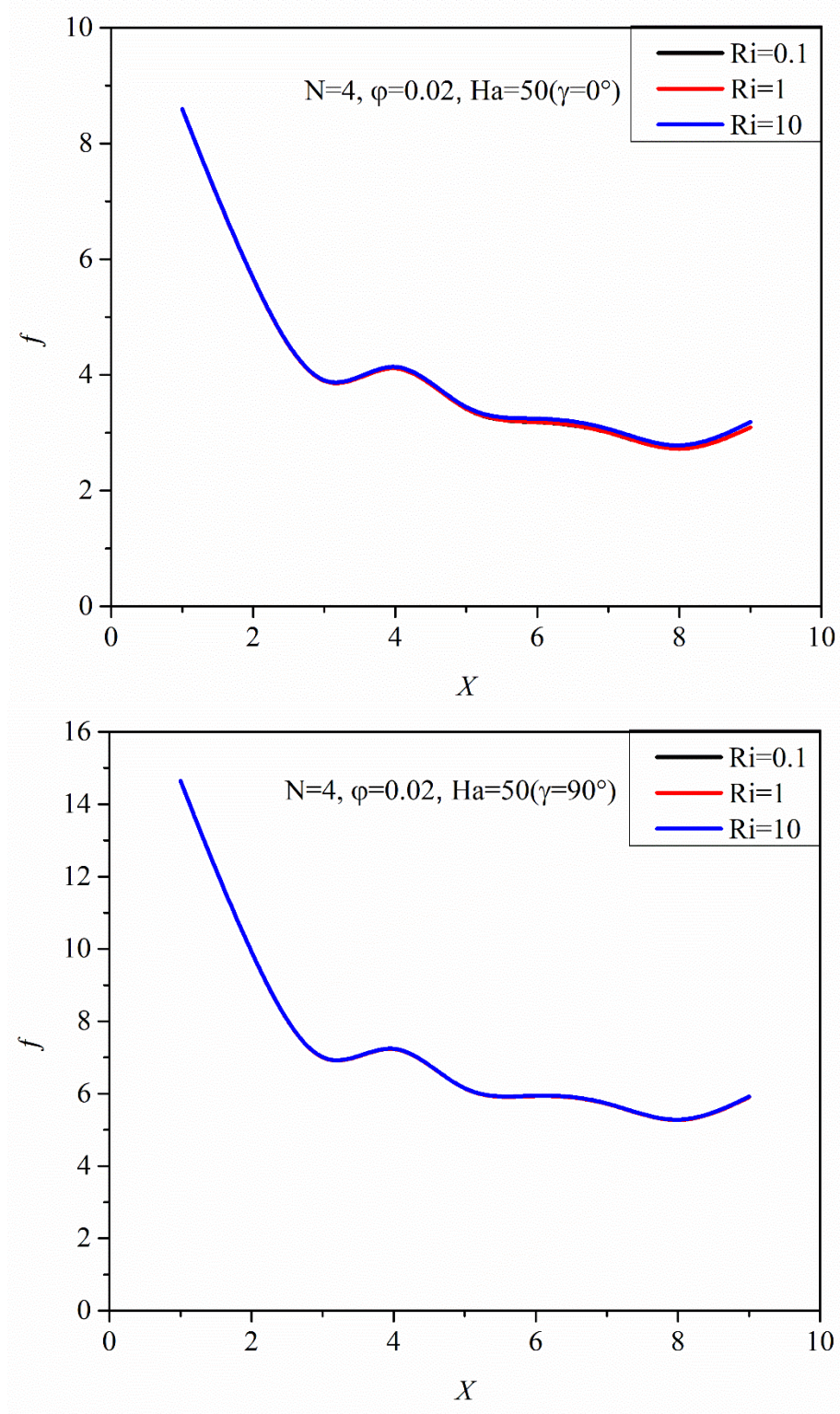


Figure 4.21. Evolution de coefficient de frottement sur le long de la surface du canal en fonction de Ri pour différentes valeurs de Ha . ($N=04$, $\phi =0.02$).

4.9. Effets de Ha , $B \cdot \gamma$ sur de nombre de N moyen en fonction de Ri

La figure 4.22 montre la variation de nombre de Nusselt moyen par rapport au nombre de Richardson le long de la surface du canal pour $N=4$ et $\phi=0.02$. Les nombres de Nusselt moyens des nano-fluides augmente d'une manière considérable avec faible valeur de nombre de $Ri = 0.1$, $Ri=1$, respectivement, et se séquentiellement, le transfert de chaleur s'améliore. Pour $Ri=10$ le nombre de Nusselt moyen augmente d'une manière légèrement.

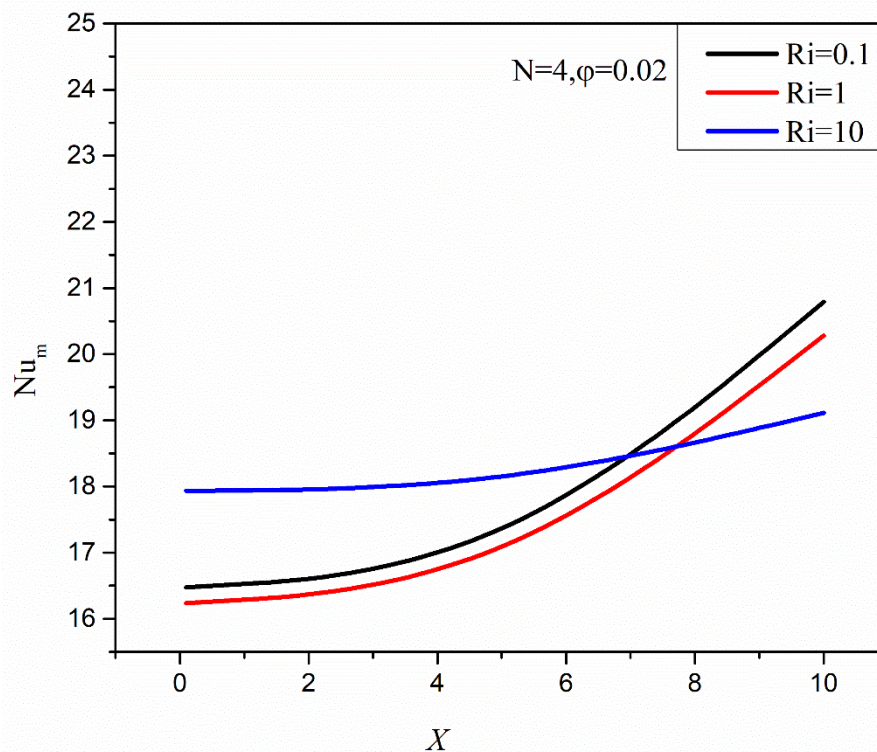


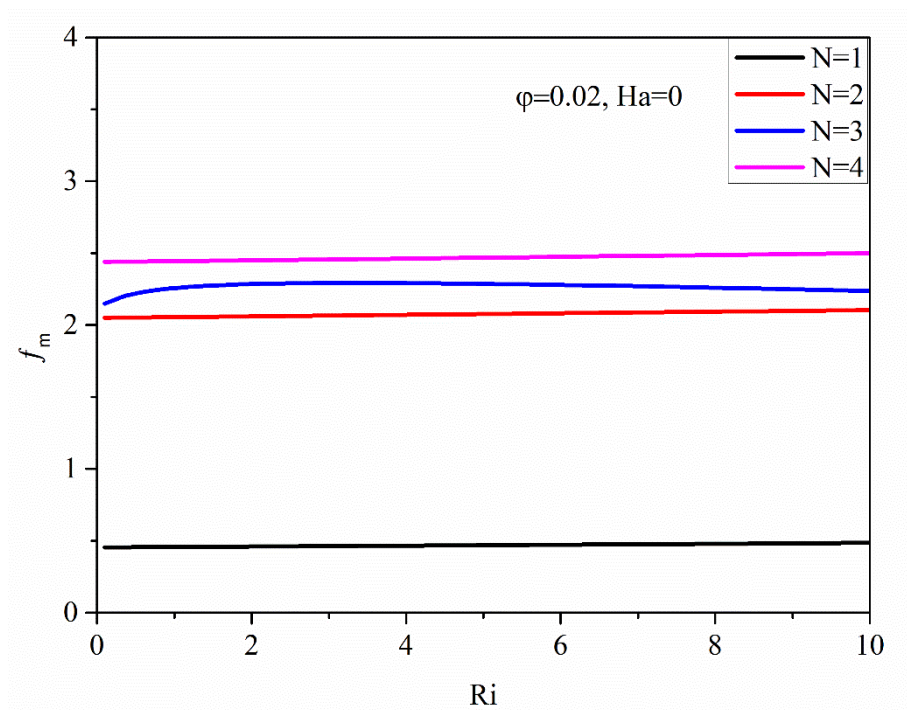
Figure 4.22. Variation de nombre de Nusselt moyen le long de la paroi de la conduite en fonction de Ri et pour différentes valeurs de N et $\phi=0.02$.

4.10. Effets de Ri , Ha , $B \cdot \gamma$ sur de nombre de moyen en fonction de N

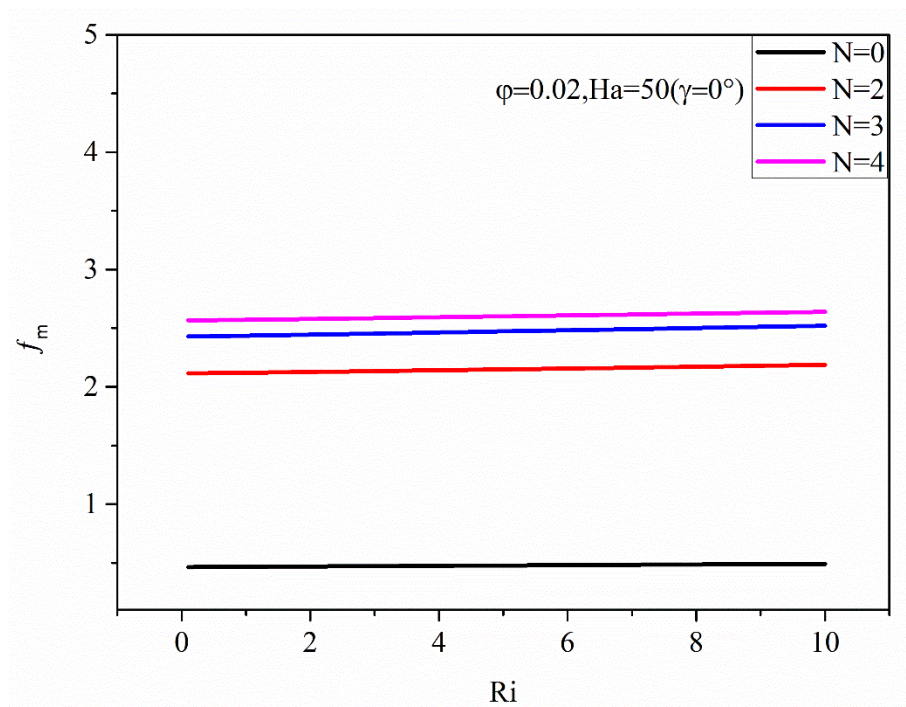
Comme le montre la figure 4.23, Le coefficient de frottement moyen augmente avec le nombre de Hartmann, lorsque on applique d'un champ magnétique MHD axial ou transversal, en raison du plus grand nombre de contacts de surface dans le conduit, On peut observer que pour la perte de charge maximale se produit à conduite de parois ondulé $N=4$.

On observe que, en comparaison de l'application d'un champ axial, avec le cas sans champ magnétique, alors que la variation de la chute de pression avec le nombre de Hartmman n'est pas modifiée quelle que soit la valeur du nombre de Hartmman,

(a)



(b)



(c)

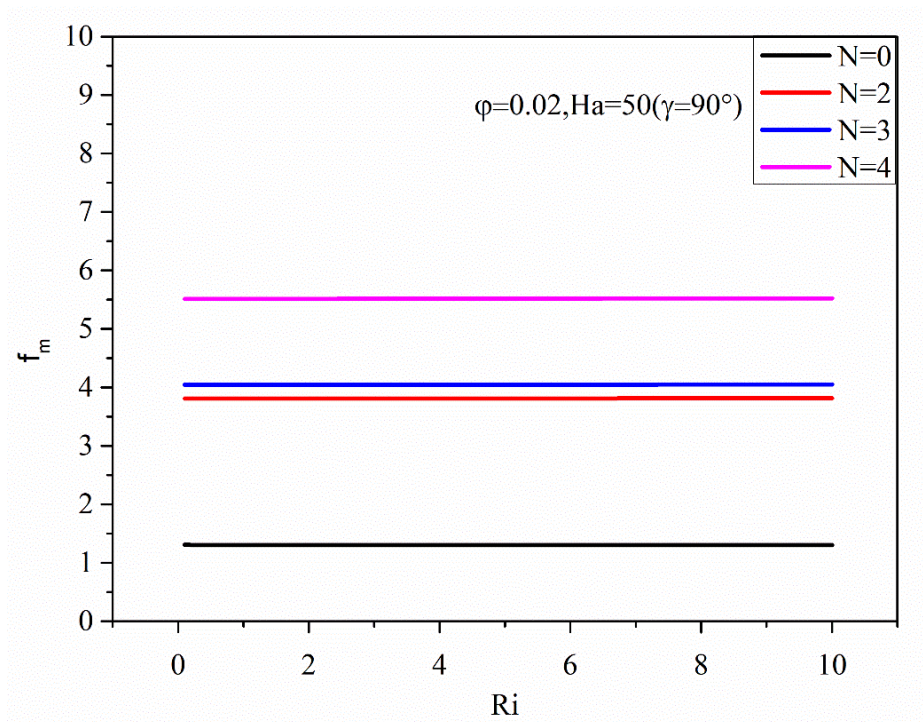


Figure 4.23. Variation du coefficient de frottement moyen en fonction du nombre de Richardson pour différentes valeurs de N , Ha et Ri $\phi=0,02$.

4.11. Effets de nombre de frottement moyen en fonction de Ri

La figure 4.24 montre la variation de coefficient de frottement moyen par rapport au nombre de Richardson le long de canal, de nombre d'onde sinusoïdale pour $N=4$ et $\phi=0.02$, le coefficient de frottement moyens des nano-fluides augmente d'une manière considérable a valeurs constantes de différents nombres de Ri , lorsqu'il appliqué d'un champ magnétique transversal (la force de Lorentz a retardé la vitesse d'écoulement de fluide dans la conduite).

Lorsqu'il appliqué d'un champ magnétique axial et l'absence d'un champ magnétique augmente de manière faible a des valeurs constantes constants de différents nombres de Ri .

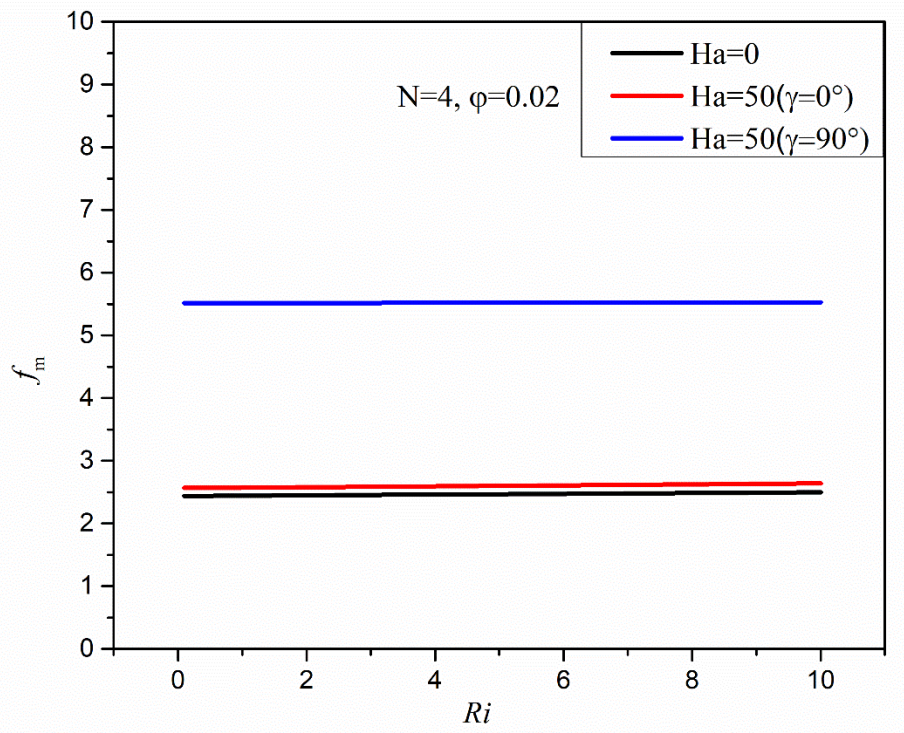
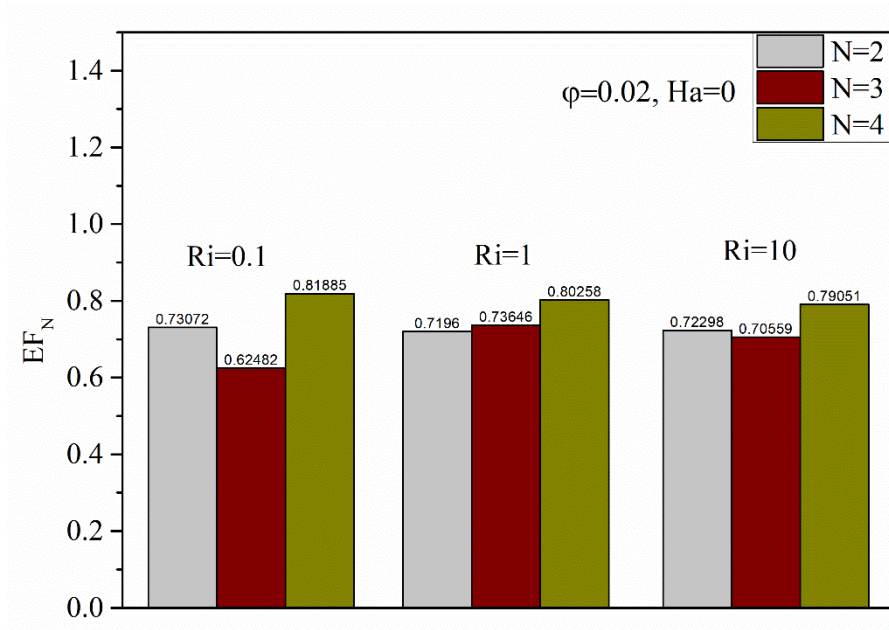


Figure 4.24. Variation du frottement moyen pour différentes valeurs de Ha , Ri $N=04$ ($\varphi = 0.02$)

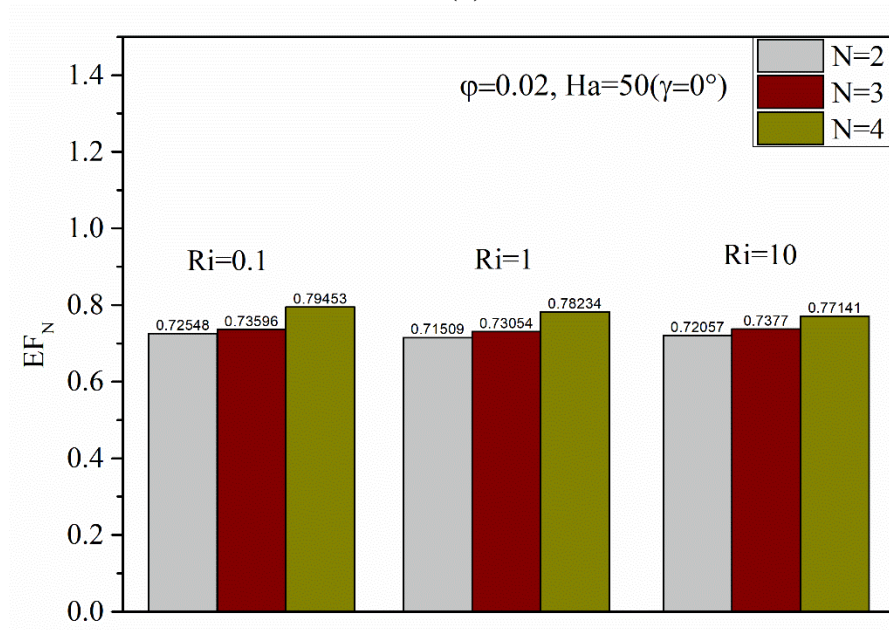
4.12 Efficacité EF_N

La figure 4.25 montre évolution de EF_n pour différents nombres d'onde $2 \leq N \leq 4$, différents nombres de Hartmann, $0 \leq Ha \leq 50$, différents nombres de Richardson $0.1 \leq Ri \leq 10$, $Re = 200$ et $\varnothing = 0.02$. Plus on augmente le nombre d'onde plus on améliore l' EF_n en l'absence de champ magnétique ($Ha=0$) et en présence de champ magnétique axial ($Ha=50$) pour différents nombres de Richardson.

En présence de champ magnétique transversal, l' EF_n a augmenté à nombre d'onde $N=2$ de manière opposé par rapport à l'absence de champ magnétique ($Ha=0$) et en présence de champ magnétique axial ($Ha=50$).



(a)



(b)

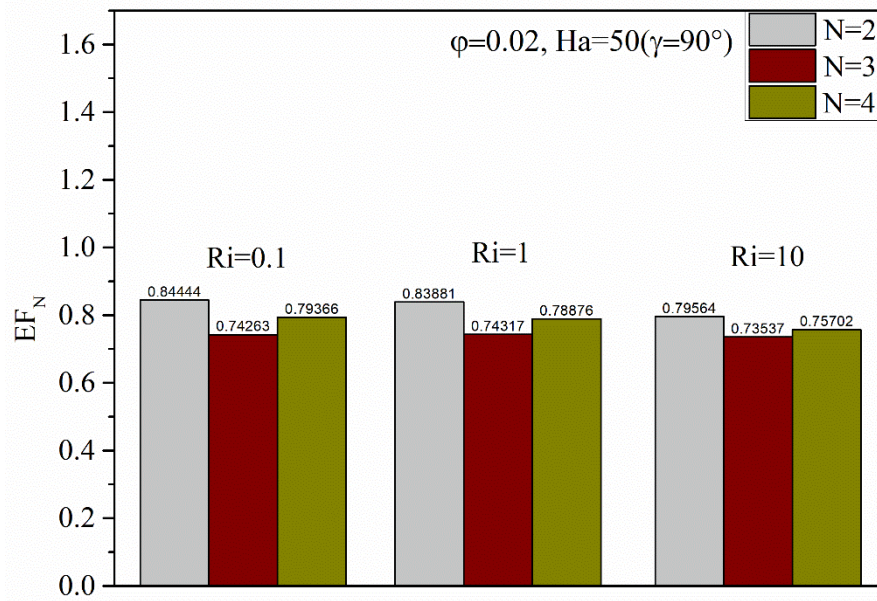


Figure 4. 25. Variation de l'efficacité pour différentes valeurs de N et Ri , $\gamma = (0^\circ, 90^\circ) \varphi=0.02$.

4.13 Efficacité EF_{Ha}

La figure 4.26 montre évolution de EF_{Ha} pour différents nombre Richardson $0.1 \leq Ri \leq 10$ et pour différents nombres de Hartmann, $Re = 200$, $N=4$ et $\varnothing = 0.02$.

EF_{Ha} est supérieur en présence de champ magnétique Axial par port à la présence de champ magnétique transversal.

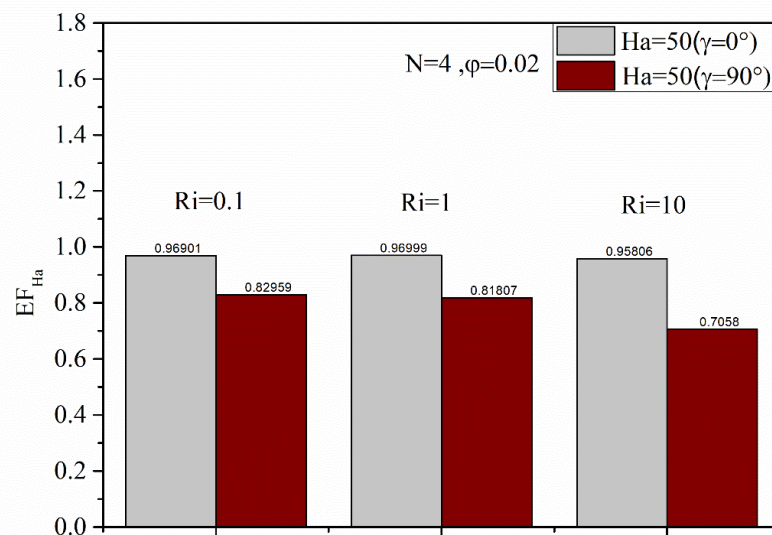


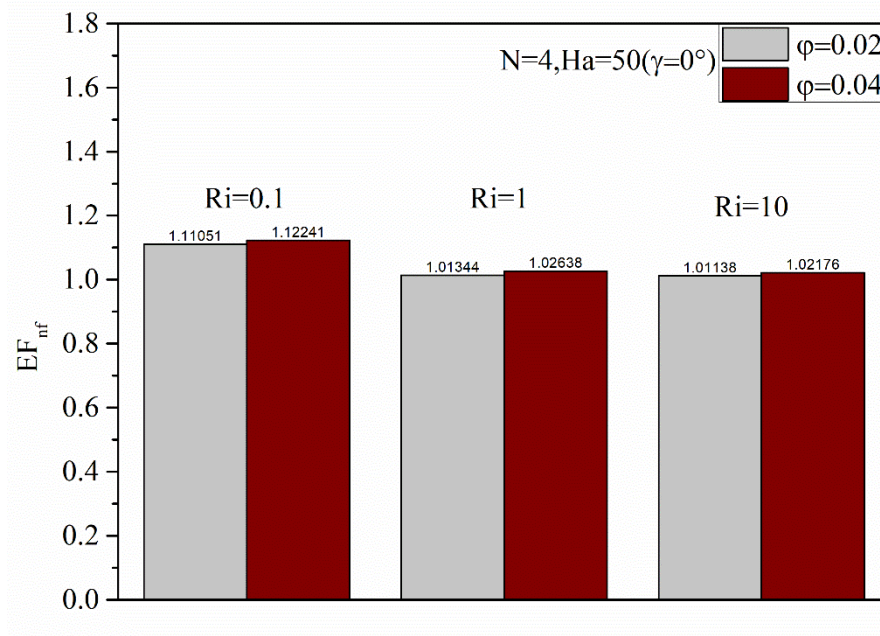
Figure 4. 26. Variation de l'efficacité en fonction de Ri pour différentes valeurs de Ha $N=04, \varphi=0.02$.

4.14 Efficacité EF_{nf}

La figure. 4.27 illustre l'efficacité EF_{nf} pour différents nombres de Hartmann $0 \leq H \leq 50$, différentes fractions volumiques $0.02 \leq \phi \leq 0.04$, $Re = 200$ et $0.1 \leq Ri \leq 10$. L' EF_{nf} augmente (supérieur à 1), sous l'effet d'un champ magnétique axial ($Ha = 50$) par rapport à l'absence d'un champ magnétique, pour différentes fractions volumiques et pour différents nombre de Richardson.

L' EF_{nf} augmente légèrement (supérieur à 1), sous l'effet d'un champ magnétique transversal ($Ha = 50$) par rapport à l'absence d'un champ magnétique, pour différentes fractions volumiques et pour différents nombre de Richardson.

On constate que l'augmentation de la fraction volumique améliore le transfert de chaleur, il augmente le frottement et augmente puissance de pompage du fluide.



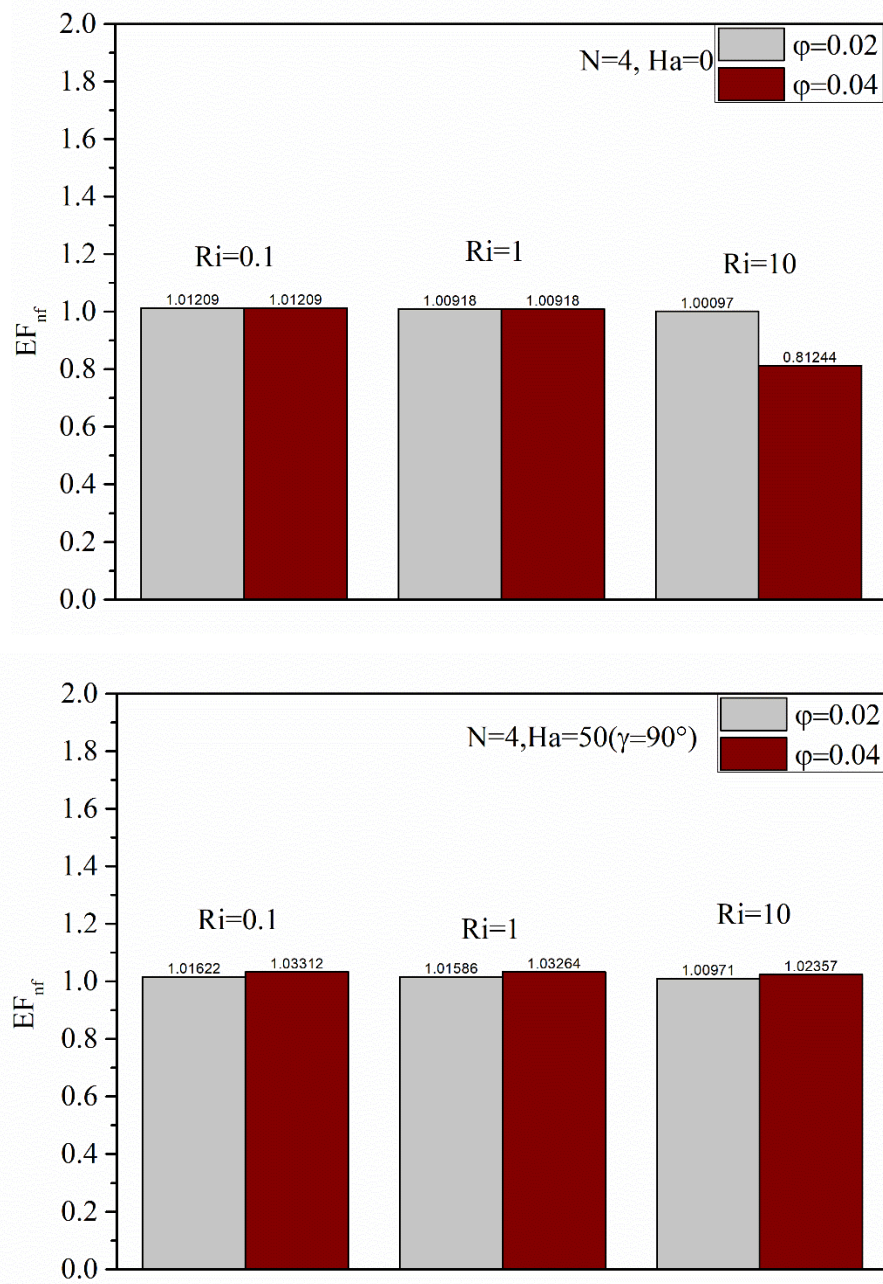


Figure 4. 27. Variation de l'efficacité en fonction de Ri pour différentes valeurs de ϕ et $Ha, N=04,$

Bibliographies

- [1] Shah RK, London AL. Laminar Flow Forced Convection Heat Transfer and Flow Friction in Straight and Curved Ducts—A Summary of Analytical Solutions. Stanford, CA: Department of Mechanical Engineering, Stanford University; 1971.
 - [2]. Bayat J, Nikseresht AH. Investigation of the different base fluid effects on the nanofluids heat transfer and pressure drop. Heat Mass Transfer. 2011;47(9):1089-1099.
 - [3]. Kim D, Kwon Y, Cho Y, et al. Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions. Curr Appl Phys. 2009; 9(2):e119-e123.
-

Conclusion

Dans le présent travail, nous avons considéré le transfert thermique par convection mixte dans une conduite ondulé remplie de ferrofluid ($\text{Fe}_3\text{-O}_4$) et soumis à un flux de chaleur constant à la paroi en présence d'un champ magnétique externe.

En se basant sur l'approximation de Boussinesq, nous avons développé un modèle mathématique décrivant notre problème. Nous avons mis également au point un modèle numérique basé sur la méthode de volumes finis discrétiser les équations gouvernantes. Nous avons validé notre calcul numérique en comparant nos résultats avec ceux de littérature. Nos résultats de simulation sont obtenus à l'aide de code FLUENT.

L'étude portait sur les effets de nombre d'ondes, le nombre de Hartmann, nombre de Richardson et l'effet de la direction du champ magnétique sur le transfert thermique.

Les simulations numériques sont effectuées pour les nombres des ondes ($2 \leq N \leq 4$), les différents nombres de Richardson ($0.1 \leq Ri \leq 10$), fractions volumiques pour les ferrofluide ($0.02 \leq \varphi \leq 0.04$), et différents nombres de Hartman ($0 \leq Ha \leq 50$).

Les principales conclusions sont résumées comme suit :

- Pour une présence d'un champ magnétique axial ou sans champs magnétiques on n'observe qu'aucun impact sur le transfert de chaleur.
- Pour une présence d'un de champ magnétique transversal ($\gamma = 90$), le nombre de Nusselt moyen augmente et le transfert de chaleur améliorer.

Dans le futur, il nous semble intéressant de mener des études en 3D et en régime turbulent et ceci dans le but d'avoir des résultats numériques qui reflètent mieux la réalité physique en particulier dans des applications comme dans le refroidissement des composants électroniques. Il sera également possible d'étudier une autre forme des blocs aux différentes tailles utilisant d'autre fluide de travail.

Résumé :

Une analyse de la convection mixte MHD dans différentes conduites lisse et ondulée remplie d'un ferrofluid en présence d'un champ magnétique axial et transversal et sous l'influence d'un flux de chaleur constant est étudiée numériquement. Les équations régissant l'écoulement (de continuité, de mouvement et de l'énergie) sont résolues numériquement en utilisant la méthode des volumes finis (MVF). L'objectif principal consiste à étudier l'effet des paramètres de contrôle tels que le nombre de Reynolds, le nombre de Richardson, le nombre d'onde et les fractions volumiques sous l'effet de champ magnétique sur les champs dynamique et thermique. Les résultats seront présentés en termes de lignes de courant, d'isothermes, des profils des coefficients de frottement locaux et moyens, des profils des nombres de Nusselt locaux et moyens. Les effets des paramètres de contrôle du problème, à savoir le nombre de Hartmann Ha et le nombre la structure de l'écoulement ont été aussi discutés.

Mots clés : MHD, ferrofluid, Convection mixte, ondulé, Méthode des volumes finis

Abstract:

An analysis of mixed MHD convection in smooth and corrugated ferrofluid filled ducts in the presence of an axial and transverse magnetic field and under the influence of a constant heat flux is numerically studied. The equations governing the flow (continuity, motion and energy) are solved numerically using the finite volume method (FVM). The main objective is to study the effect of control parameters such as Reynolds number, Richardson number, and wave number and volume fractions under magnetic field effect on the dynamic and thermal fields. The results will be presented in terms of streamlines, isotherms, local and average friction coefficient profiles, local and average Nusselt number profiles. The effects of the control parameters of the problem, namely the Hartmann number Ha and the flow structure number, were also discussed.

Keywords: MHD, Ferrofluid, Mixed convection, Corrugated, Finite volume method

الملخص:

تمت دراسة تحليل الحمل الحراري المختلط MHD في القنوات المموج والأملس و المملوءة بالسائل في وجود مجال مغناطيسي محوري وعرضي وتحت تأثير تدفق حراري ثابت. تم حل المعادلات التي تحكم التدفق (الاستمرارية والحركة والطاقة) عددياً باستخدام طريقة الحجم المحدد (FVM). الهدف الرئيسي هو دراسة تأثير معاملات التحكم مثل رقم رينولدز ورقم ريتشاردسون ورقم الموجة وأجزاء الحجم تحت تأثير المجال المغناطيسي على المجالات الديناميكية والحرارية. سيتم عرض النتائج من حيث الانسيابية ، متساوي الحرارة ، ملامح معامل الاحتكاك المحلي والمتوسط ، ملفات تعريف رقم نسلت المحلي والمتوسط. كما تمت مناقشة تأثيرات معاملات التحكم للمشكلة ، وبالتحديد رقم هارتمان Ha ورقم التدفق.

الكلمات المفتاحية: MHD، Ferrofluid، الحمل الحراري المختلط، المموج، طريقة الحجم المحدود