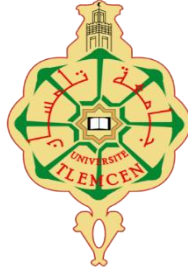


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –
Université Abou bakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MÉMOIRE

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

En : Génie Mécanique

Spécialité : Énergétique

Par:

**ZINAI HAMZA ABDESSAMAD
ABDELMOUMENE ABDELHADI**

Sujet

**Amélioration du transfert de chaleur dans un capteur
solaire plan avec différentes formes de chemin
d'écoulement avec un nanofluide**

Soutenu publiquement, le 18/06/2025, devant le jury composé de :

Mme. BENAHMED Lamia	MCB	Université de Tlemcen	Présidente
Mr. ROSTANE Brahim	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
Mme. SICHAIB Amel	MAA	Université de Tlemcen	Encadreur
Mr. ALIANE Khaled	Professeur	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2024 / 2025



Remerciements

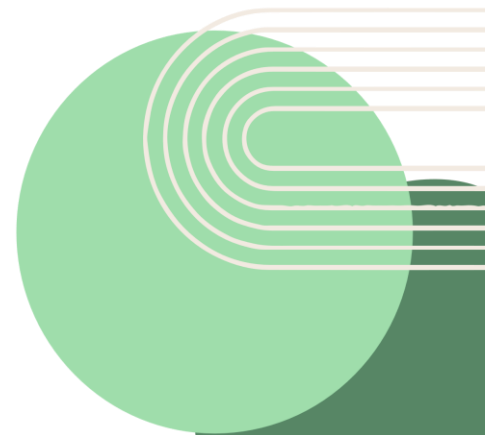
Nous tenons à remercier Allah, qui a guidé nos pas et nous a accordé la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Nous remercions tout particulièrement nos encadreurs Mme SICHAIB Amel et Mr ALIANE Khaled pour son accompagnement, sa disponibilité et ses conseils avisés tout au long de ce travail et pour son soutien, ses orientations précieuses.

Nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury Mr ROSTANE Brahim et Mme BENAHMED Lamia.

Nous adressons également notre profonde reconnaissance à l'ensemble des enseignants du département de génie mécanique ainsi qu'à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet.





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A ma mère

Pour son amour, sa patience et son soutien tout au long de mon parcours. Merci de m'avoir toujours fait confiance.

A mon père

Qui a su être à la fois un guide dans la vie et un maître dans le savoir.

Sa rigueur, sa sagesse et son soutien indéfectible ont profondément marqué mon parcours.

Ce mémoire est l'aboutissement de ton investissement. Merci du fond du cœur.

A mon frère et ma sœur

A toute ma famille

A mes encadreurs Mme SICHAIB Amel et Mr ALIANE Khaled

A tous mes collègues et mes amis partout

ZINAI Hamza Abdessamad





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents

Pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices qui ont rendu ce parcours possible.

**A mes encadreurs Mme SICHAIB Amel et
Mr ALIANE Khaled**

Pour leur expertise, leur disponibilité et leurs précieux conseils qui ont guidé chaque étape de ce travail.

À tous mes enseignants

A mes chères sœurs

A tous les amis

Qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours universitaire.

A toute la promo de l'énergétique 2024 /2025

**A l'ensemble de la famille ABDELMOUMENE
et BENALLAL**

Ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit possible.

ABDELMOUMENE Abdelhadi



ملخص

تعتبر السوائل النانوية الآن واحدة من السوائل المرجعية الأكثر شعبية في نقل الحرارة وميكانيكا الموائع. لتحليل أداء نقل الحرارة للسوائل النانوية، من الضروري إجراء تقييم دقيق لخصائصها الحرارية الفيزيائية. ومن بين الخصائص الحرارية الفيزيائية التي تؤثر بشكل مباشر على استخدام السوائل النانوية، يمكن ذكر معامل التوصيل الحراري واللزوجة باعتبارهما ضروريين بشكل خاص. لا يمكن أن يعزى ارتفاع التوصيل الحراري للسائل النانوي فقط إلى التوصيل الحراري الأفضل للجسيمات النانوية المنتشرة. ومع ذلك، فإن التقدم هو نتيجة لتضافر عدة عوامل فيزيائية متزامنة ذات أهمية متفاوتة. يهدف هذا المشروع إلى فحص التدفق في قناة مستطيلة على العمق لثلاثة أنواع مختلفة (بدون حاجز، مع حاجز: شبه منحرف مثلثي ورأسي)، بما في ذلك تلك التي تستخدم سائل نانوي " Al_2O_3 - ماء" كسائل لنقل الحرارة. لقد أجرينا محاكاة عددية باستخدام كود ANSYS-FLUENT لنمذجة التدفق الصفحي في قناة مستطيلة. تمت مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع التحقيقات الرقمية على اثنين من السوائل النانوية المتميزة، " TiO_2 - ماء" و " SiO_2 - ماء". كما تم إجراء مقارنة أيضًا لثلاث سرعات مختلفة. أظهر استخدام الحواجز المثلثة ومحلول " Al_2O_3 - ماء" كسائل نانوي أداءً حراريًا جيدًا في هذه القناة .

الكلمات المفتاحية: المحاكاة العددية، التدفق الصفحي، السوائل النانوية، الجسيمات النانوية، الأداء الحراري.

Abstract:

Nanofluids are now considered one of the most sought-after reference fluids in heat transfer and fluid mechanics. To analyze the heat transfer performance of nanofluids, it is essential to accurately assess their thermophysical characteristics. Among the thermophysical characteristics that have a direct impact on the use of nanofluids, the thermal conductivity coefficient and viscosity are particularly essential. The increase in nanofluid thermal conductivity cannot be attributed solely to the improved thermal conductivity of dispersed nanoparticles. However, this progress is the result of a combination of several simultaneous physical factors of varying importance. The objective of this project is to examine the flow in a rectangular channel at depth for three different types (unbaffled, baffled, triangular, and vertical trapezoidal), particularly those using an " **Al_2O_3 – water**" nanofluid as the heat transfer fluid. We performed a numerical simulation using the **ANSYS-FLUENT** code to model laminar flow in a rectangular channel. The results obtained were compared with numerical investigations involving two distinct nanofluids, " **TiO_2 – water**" and " **SiO_2 – water**", and a comparison was also made for three different velocities. The use of triangular baffles and an " **Al_2O_3 – water**" solution as the nanofluid demonstrated good thermal performance in this channel.

Keywords: Numerical simulation, Laminar flow, Nanofluids, Nanoparticles, Thermal performance.

Résumé :

On considère désormais les nanofluides comme l'un des fluides de référence les plus prisés en matière de transfert thermique et de mécanique des fluides. Pour analyser les performances des nanofluides en matière de transfert thermique, il est indispensable d'avoir une évaluation exacte de leurs caractéristiques thermophysiques. Parmi les caractéristiques thermophysiques qui ont un impact direct sur l'utilisation des nanofluides, on peut citer le coefficient de conductivité thermique et la viscosité comme étant particulièrement essentielles. On ne peut pas attribuer uniquement l'accroissement de la conductivité thermique du nanofluide à la meilleure conductivité thermique des nanoparticules en dispersion. Toutefois, le progrès est le résultat d'une conjonction de plusieurs facteurs physiques simultanés ayant une importance variable.

L'objectif de ce projet est d'examiner le flux dans un canal rectangulaire en profondeur pour trois types différents (sans chicane, avec chicane : triangulaires et trapèzes verticaux), notamment ceux qui emploient un nanofluide " $Al_2O_3 - eau$ " comme fluide caloporteur. Nous avons réalisé une simulation numérique à l'aide du code ANSYS-FLUENT pour modéliser un écoulement laminaire dans un canal rectangulaire.

Les résultats obtenus ont été mis en parallèle avec des recherches numériques portant sur deux nanofluides distincts, le " $TiO_2 - eau$ " et " $SiO_2 - eau$ ", et une comparaison a également été effectuée pour trois vitesses différentes. L'utilisation de chicanes triangulaires et d'une solution " $Al_2O_3 - eau$ " en tant que nanofluide a montré une bonne performance thermique dans ce canal.

Mots clés : Simulation numérique, Ecoulement laminaire, Nanofluides, Nanoparticule, Performance thermique.

Table des matières

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I: Rappels et généralités

I.1) Introduction.....	4
I.2) Hydrodynamique des écoulements internes	5
I.2.1) Couche limite dynamique	5
I.2.2) Grandeurs caractéristiques d'un écoulement.....	7
I.2.3) Caractéristiques de la couche limite	8
I.2.4) Profil de vitesse.....	9
I.2.5) Vitesse moyenne	9
I.2.6) Perte de charge.....	10
I.2.6.1) Pertes de charge singulières	10
I.2.6.2) Pertes de charge linéaires.....	11
I.3) Transfert thermique.....	11
I.3.1) Modes fondamentaux de transfert thermique.....	12
I.3.1.1) Conduction thermique	13
I.3.1.2) Convection	14
I.3.1.2.1) Convection forcée	15
I.3.1.2.2) Convection naturelle	16
I.3.1.2.3) Convection Mixte.....	16
I.3.1.3) Rayonnement.....	18
I.4) Technique d'intensification de l'échange convectif	19
I.4.1) Nanofluides	19
I.4.2) Fabrication des nanofluides.....	21
I.4.3) Propriétés thermophysiques des nanofluides	23
I.4.3.1) Conductivité thermique	23
I.4.3.2) Viscosité dynamique " μ "	24
I.4.3.3) Capacité calorifique " C_p "	25
I.4.3.4) La masse volumique " ρ "	26
I.4.4) Comportement thermique des nanofluides.....	26

I.4.5) Phénomène physique associés au transfert convectif de nanofluide.....	27
I.4.6) Domaine d'utilisation des nanofluides.....	29
I.4.7) Avantages et inconvénients des nanofluides.....	29
I.4.7.1) Avantages	29
I.4.7.2) Inconvénients	30
I.5) Conclusion	30

Chapitre II: Recherche bibliographique

II.1) Introduction.....	32
II.2) Différents types de capteurs solaires	32
II.3) Les capteurs solaires thermiques	33
II.3.1) Capteurs plans vitrés	33
II.3.2) Capteurs plans non vitrés	34
II.3.3) Capteurs plans sous vide.....	34
II.4) Principaux éléments constituant un capteur plan.....	35
II.5) Principes de fonctionnement.....	37
II.6) Paramètres caractérisent le fonctionnement d'un capteur plan	38
II.6.1) Paramètres externes comprennent	38
II.6.2) Paramètres internes comprennent	39
II.7) Rendement du capteur plan.....	39
II.7.1) Energie thermique reçue	39
II.7.1.1) Rayonnement solaire.....	40
II.7.1.2) Captation du rayonnement solaire	40
II.7.2) Pertes thermiques	41
II.7.3) Energie utile	42
II.7.4) Rendement thermique	43
II.8) Amélioration des Performances des Capteurs Solaires Plans.....	44
II.9) Les avantages et inconvénients d'un capteur plan.....	45
II.9.1) Avantages.....	45
II.9.2) Inconvénients	45
II.10) Recherche bibliographique	45
II.11) Conclusion	51

Chapitre III: Résultats et discussions

III.1)	Introduction.....	53
III.2)	Procédure de la simulation et présentation du modèle physique.....	53
III.2.1)	Hypothèses.....	53
III.2.2)	Méthode des volumes finis.....	55
III.2.2.1)	Maillages non structurés.....	57
III.2.2.2)	Notion de maillage.....	57
III.3)	Procédures du calcul.....	59
III.3.1)	Présentation de logiciel ANSYS Workbench.....	59
III.3.1.1)	Conception numérique du modelé étudié.....	61
III.3.1.2)	Maillage.....	63
III.3.1.3)	Configuration.....	65
III.3.2)	Discussions.....	67
III.4)	Propriétés thermo-physiques.....	67
III.5)	Etude de l'écoulement dans le capteur.....	68
III.5.1)	Description de la géométrie du canal sans chicanes.....	68
III.5.2)	Description de la géométrie du canal avec des chicanes triangulaires.....	69
III.5.3)	Description de la géométrie du canal avec des chicanes trapèzes rectangles verticaux.....	70
III.5.4)	Conditions aux limites.....	71
III.5.5)	Champs et profils de vitesse.....	72
III.5.6)	Champs et profils de Température.....	78
III.5.7)	Etude comparative de vitesse.....	83
III.5.8)	Etude comparative des nano fluide (<i>SiO₂ – eau TiO₂ – eau; Al₂O₃ – eau</i>).....	88
III.5.8.1)	Profil de vitesse.....	88
III.5.8.2)	Profil de Température.....	89
III.6)	Conclusion.....	92
Conclusion générale :		93
Références bibliographiques		94

Listes des figures

Figure I.1: Couche limite dynamique	5
Figure I.2: Régime laminaire	6
Figure I.3: Régime transitoire	6
Figure I.4: Régime turbulent.....	6
Figure I.5: Épaisseur de la couche limite " δ "	8
Figure I.6: Profil de vitesse	9
Figure I.7: Vitesse variable et uniforme.	10
Figure I.8: Exemple des modes de transfert thermique	12
Figure I.9: Mur simple.	14
Figure I.10: Exemple de transfert de chaleur par convection	14
Figure I.11: Échelle des dimensions nanoparticules	20
Figure I.12: Nanoparticules d'argent.	21
Figure I.13: Nanotubes de carbone.	21
Figure II.1: Capteur solaire plan vitré	33
Figure II.2: Capteur solaire plan non vitré	34
Figure II.3: Capteurs plans sous vide	35
Figure II.4: Capteur solaire plan.....	37
Figure II.5: Types des capteurs solaires et le principe d'absorption des rayonnements solaires.	41
Figure II.6: Un capteur plan	42
Figure II.7: Disposition des obstacles DCL.....	44
Figure II.8: Disposition des obstacles OCL.....	44
Figure II.9: Canal contenant un seul obstacle chauffé.	46
Figure II.10: Schéma des micro-canaux étudiés.....	47
Figure II.11: Géométrie des problèmes étudiés.....	48
Figure II.12: Schéma simplifié du modèle physique.....	49
Figure II. 13: Géométrie du problème étudié	50
Figure II.14: Domaine physique étudié : (a) Canal sinusoïdal, (b) Canal triangulaire, (c) Canal trapézoïdal.	50

Figure III.1: Maillage Volumes finis structurés.	56
Figure III.2: Schéma du maillage.	58
Figure III.3: Schéma du maillage. (a): Maillage décalé pour ue , (b): Maillage décalé pour vn	58
Figure III.4: Menu principal de Workbench.	59
Figure III.5: Création d'un projet en mécanique de fluide.	60
Figure III.6: Création de géométrie.	61
Figure III.7: DesignModeler.	61
Figure III.8: DesignModeler – Création de géométrie.	62
Figure III.9: Géométrie du problème.	63
Figure III.10: Maillage de la géométrie d'un canal avec des chicanes triangulaires. .	64
Figure III.11: Maillage de la géométrie d'un canal sans chicanes.	64
Figure III. 12: Maillage de la géométrie d'un canal avec des chicanes trapèzes rectangles verticaux.	65
Figure III.13: Equation de l'énergie.	65
Figure III.14: Création les données du nanofluide $Al_2O_3 - eau$	66
Figure III.15: Boundary Conditions.	66
Figure III.16: Géométrie du canal sans chicanes.	68
Figure III.17: Géométrie du canal avec des chicanes triangulaires.	69
Figure III.18: Géométries du canal avec des chicanes trapèzes rectangles.	70
Figure III.19: Contour de vitesse.	72
Figure III.20: Profils de vitesse.	74
Figure III.21: Capture les profils de vitesse dans fluent.	75
Figure III.22: Les profils de Température d'eau et nanofluide $Al_2O_3 - eau$	78
Figure III.23: Contours de Température.	79
Figure III.24: Profils de Température.	81
Figure III.25: Capteur des profils de Température dans fluent pour les trois types ...	82
Figure III.26: Comparaison des trois vitesses dans un capteur solaire sans chicane. .	84

Figure III.27: Comparaison des trois vitesses dans un capteur solaire avec chicane triangulaire	85
Figure III.28: Comparaison des trois vitesses dans un capteur solaire avec chicane trapèzes verticales	86
Figure III.29: Profils de vitesse pour les trois types de nanofluides (<i>SiO₂ – eau ; TiO₂ – eau; Al₂O₃ – eau</i>).....	88
Figure III.30: Profils de température pour les trois types de nanofluides (<i>SiO₂ – eau ; TiO₂ – eau; Al₂O₃ – eau</i>).....	89
Figure III.31: Capteur des profils de vitesse dans fluent pour les trois types de nanofluides (<i>SiO₂ – eau ; TiO₂ – eau; Al₂O₃ – eau</i>).	90
Figure III.32: Capteur des profils de température dans fluent pour les trois types de nanofluides (<i>SiO₂ – eau ; TiO₂ – eau; Al₂O₃ – eau</i>).	91

Listes des tableaux

Tableau I.1: Exemples de viscosité dynamique des fluides.	8
Tableau II.2: Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur.	36
Tableau II.3: Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants [22]	36
Tableau III.4: Propriétés du fluide de base et des nanoparticules [40].	67
Tableau III.5: Propriétés des nanofluides à concentration volumique 3%[40].....	68

Nomenclature

<u>Symboles</u>	<u>Description</u>	<u>Unités</u>
A	Section de passage du flux de chaleur	m^2
C_p	Chaleur spécifique	$J/Kg.K$
$C_{p_{nf}}$	Chaleur spécifique du nanofluide	$J/Kg.K$
C_{p_f}	Chaleur spécifique du fluide de base	$J/Kg.K$
C_{p_p}	Chaleur spécifique des nanoparticules	$J/Kg.K$
D	Diamètre du conduit	m
D_h	Diametre hydraulique	m
D_c	Distance entre les deux chicanes	m
e	Epaisseur du mur	m
F	Force de glissement entre les couches	N
f	Coefficient de friction	
Gr	Nombre de Grashof	
g	Accélération de la pesanteur	m/s^2
h	Coefficient de transfert thermique par convection	$W/m^2.K$
H	Facteur de Forme	
L	Longueur du conduit	m
L_c	Longueur caractéristique	m
L_s	La longueur entre la sortie du canal et la dernière ailette	m
L_e	La longueur entre l'entrée du canal et la première ailette	m
Nu	Nombre de Nusselt	
P	Périmètre mouillé	m
P	Pression	Pa
Pr	Nombre de Prandtl	
Q_v	Débit volumique	m^3/s
Re	Nombre de Reynolds	
R_{th}	Résistance thermique	$^{\circ}C/W$
S	Surface	m^2
T	Température	K
T_f	Température de fluide	K

T_p	Température de paroi	K
U_∞	Vitesse de l'écoulement libre	m/s
V_p	Volume des nanoparticules	m^3
V_f	Volume du fluide de base	m^3
V	Vitesse	m/s
V_{moy}	Vitesse moyenne d'écoulement	m/s
V_i	Vitesse du fluide dans cet élément particulier i	m/s
μ	Viscosité dynamique	kg/m.s
ΔV	Écart de vitesse entre deux couches	m/s
Y	Largeur du canal	m
Δy	Distance entre deux couches	m
X	Longueur du canal	m
Z	Profondeur du canal	m
ρ	Masse volumique d'un fluide	kg/ m^3
ρ_{ref}	Masse volumique d'un fluide de référence	kg/ m^3
ρ_{nf}	Masse volumique du nanofluide	kg/ m^3
ρ_p	Masse volumique des nanoparticules	kg/ m^3
ρ_f	Masse volumique du fluide de base	kg/ m^3
φ	Fraction volumique des nanoparticules	
ξ_i	Coefficient de perte pour chaque élément i	
ϕ	Flux de chaleur	W
λ	Conductivité thermique du milieu	W/m °C
ϑ	Viscosité cinématique	m^2/s
δ^*	Épaisseur de Déplacement	
θ	Épaisseur de Quantité de Mouvement	
β	Facteur de dilation volumique du fluide	K^{-1}
ΔT	Différence de température entre la paroi et le fluide	K
ΔP	Perte de pression	Pa
σ	Constante de stefan	W/ $m^2 \cdot K^4$
ε	Facteur d'émission dépendant de la nature de la surface	

Introduction générale

L'énergie solaire, l'une des nombreuses sources d'énergie renouvelable, suscite un grand intérêt dans tous les pays du monde grâce à son absence de pollution environnementale et à son coût réduit comparé aux autres types d'énergie.

On utilise souvent l'énergie thermique dans diverses applications telles que le séchage des denrées alimentaires, le séchage du bois, le chauffage des édifices, l'accumulation de chaleur et la climatisation solaire.

Nous sommes tous conscients que les systèmes solaires présentent une instabilité, car l'énergie solaire évolue naturellement au fil du temps. Le développement de modèles mathématiques est indispensable pour l'utilisation de logiciels dans la conception de ces systèmes.

Dans ce travail, nous avons présenté une étude sur l'écoulement dans un capteur solaire avec nanofluide $Al_2O_3 - eau$. Nous avons effectué une étude numérique sur trois types des capteurs solaire (sans chicane et avec chicane : triangulaires et trapèzes verticaux), et nous avons également fait une étude comparative sur deux autres types des nanofluides $SiO_2 - eau$ et $TiO_2 - eau$. Ce travail a été réalisé par une simulation numérique en CFD à l'aide du code ANSYS. À cet effet, nous avons organisé ce mémoire comme suit :

- ✚ Le premier chapitre : est consacré à des rappels et généralités, avec quelques notions d'hydrodynamique des écoulements internes (couche limite, perte de charge ...), le transfert thermique et Les définitions et les bases essentielles concernant les nanofluides, y compris les divers paramètres thermophysiques susceptibles d'influencer le comportement d'un nanofluide.
- ✚ Le deuxième chapitre est consacré à une synthèse bibliographique des recherches précédentes sur les capteurs solaires thermiques, ainsi que d'une analyse théorique du capteur solaire plan. Ce chapitre aborde ses divers éléments constitutifs, sa classification, son mode de fonctionnement et les différents transferts thermiques qui se produisent à l'intérieur du capteur solaire.

Introduction générale

- ✚ Dans le troisième chapitre, nous étudions la modélisation mathématique et l'écriture des différentes équations liées à cette étude et de connaître les étapes de la simulation avec ANSYS WORKBENCH. En plus de présenter les résultats obtenus avec des interprétations.
- ✚ Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale qui englobe l'ensemble des constatations prises dans cette étude.

Chapitre I

Rappels et généralités

I.1) Introduction

La chaleur peut être transférée d'un corps à un autre ou d'un endroit à un autre dans un même corps. Cette opération est connue sous le nom de transfert de chaleur, qui est la science qui cherche à prédire l'énergie transférée entre les corps à la suite d'une différence de température. Lorsqu'un transfert d'énergie se produit, il crée un mouvement thermique où l'énergie se déplace du plus chaud vers le plus froid.

Les fluides caloporteurs classiques, notamment l'eau, l'éthylène glycol et l'huile, présentent des caractéristiques thermiques relativement limitées, diminuant ainsi l'efficacité globale des systèmes thermiques. Récemment, les nanoparticules utilisées dans le domaine de la nanotechnologie, qui peuvent posséder des propriétés métalliques (telles que l'argent, le cuivre et le fer) ou non métalliques (alumine et les nanotubes de carbone), se distinguent par leur conductivité thermique exceptionnellement élevée ; ces nanoparticules sont généralement en suspension dans un fluide de base, constituant ainsi une nouvelle catégorie de fluides caloporteurs appelés nanofluides. Ces nouveaux fluides ouvrent un vaste champ de recherche de par leurs applications de plus en plus répandues dans les processus industriels pour leurs remarquables propriétés physiques.

Pour améliorer les paramètres de performance, il est impératif de diminuer l'épaisseur de la couche limite en augmentant la vitesse du fluide, comme dans les applications à jet d'eau, ou en ajoutant de petits obstacles pour augmenter le brassage à la paroi. Ces effets contribuent à pousser le liquide froid dans la paroi chaude autant que possible afin d'améliorer le processus de transfert de chaleur.

Les nanofluides présentent une conductivité thermique élevée, ce qui permet d'améliorer le transfert d'énergie thermique à travers la sous-couche visqueuse. Les propriétés rhéologiques du liquide peuvent être modifiées en réponse à la suspension de nanoparticules en utilisant une configuration structurale spécifique au sein de la couche limite.

En fonction de leur nature et de leur forme, il est possible de constater un comportement de rhéofluidification qui a pour effet de diminuer la viscosité apparente près de la paroi

(effet lubrifiant) en augmentant la vitesse de cisaillement. En réduisant la viscosité, on réduit l'épaisseur de la couche limite dynamique, ce qui conduit à une augmentation directe du coefficient d'échange à la paroi. [1]

I.2) Hydrodynamique des écoulements internes

L'hydrodynamique des écoulements internes est essentiel pour optimiser la conception des systèmes fluidiques, amélioration de l'efficacité énergétique, à la diminution des pertes de charge et garantir la performance des infrastructures de transport de fluides, tels que les tuyaux, les canaux ou les échangeurs de chaleur.

I.2.1) Couche limite dynamique

La couche limite dynamique est une région critique pour comprendre l'écoulement des fluides près des surfaces et ses effets sur la performance d'un objet dans un fluide., influencé par divers facteurs tels que les conditions thermiques, les interactions structurales et les mécanismes de contrôle.

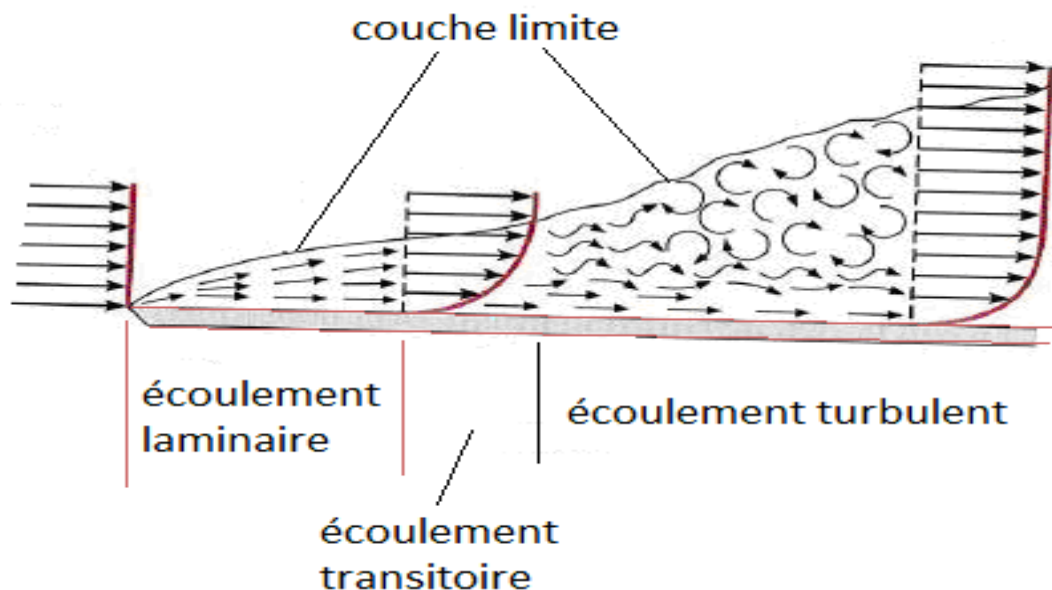


Figure I.1: Couche limite dynamique

L'écoulement à l'intérieur d'un canal peut être laminaire ou turbulent. Osborne Reynolds fut le premier à décrire trois régimes d'écoulement : **Laminaire, transitoire et turbulent.**

- On qualifie d'écoulement laminaire celui où un fluide se déplace dans un tuyau en glissant parallèlement aux parois qui le guident. Le fluide se déplace en strates parallèles (avec un mélange latéral minime), sans rupture entre les strates. La distribution des vitesses est bien uniforme. L'écoulement laminaire a généralement lieu à des vitesses plus basses et sous une viscosité élevée. Si $R_e < 2200$ l'écoulement est laminaire.



Figure I.2: Régime laminaire

- L'écoulement transitoire se réfère à un processus où un fluide (qu'il soit liquide ou gazeux) connaît des changements de vitesse, de pression ou d'autres caractéristiques au cours du temps. Si $4000 > R_e > 2200$ l'écoulement est transitoire.



Figure I.3: Régime transitoire

- L'écoulement turbulent est un type d'écoulement de fluide caractérisé par des mouvements chaotiques et irréguliers des particules de fluide. Il se produit à des vitesses plus élevées et à une faible viscosité. $R_e > 4000$ l'écoulement est turbulent.



Figure I.4: Régime turbulent

La couche limite est un concept très important, car il permet d'expliquer de nombreux phénomènes de mécanique observés avec les fluides visqueux.

I.2.2) Grandeurs caractéristiques d'un écoulement

Les grandeurs caractéristiques d'un écoulement sont des mesures essentielles qui fournissent des informations sur le comportement et la dynamique de divers systèmes d'écoulement.

- ❖ **Vitesse:** La vitesse du fluide est l'une des grandeurs essentielles. C'est un vecteur qui décrit la direction et l'intensité du déplacement du fluide en chaque point de l'écoulement. Elle est généralement notée "V" et peut varier dans l'espace et dans le temps.
- ❖ **Densité "d":** C'est la mesure de la masse présente dans une certaine quantité de fluide. Elle représente le nombre de molécules présentes dans le volume. Si la température augmente, les molécules du liquide se dispersent et sa densité se réduit. Si la température diminue, c'est le contraire.

$$d = \frac{\text{masse volumique du fluide}}{\text{masse volumique d'un fluide de référence}} = \frac{\rho}{\rho_{ref}} \quad (\text{I. 1})$$

- ❖ **Viscosité:** La viscosité traduit la capacité d'un fluide à s'opposer à un écoulement. Plus un fluide est visqueux, plus il a de mal à se déplacer. Il y a deux types : la viscosité dynamique " μ " est exprimée en « Pa.s » et la viscosité cinématique " ν " est exprimée en « m²/s ».

- **La viscosité dynamique " μ ":** La viscosité dynamique incarne la relation entre la force requise pour pénétrer dans une plaque immergée dans un courant et la variation de vitesse des courants de fluide de chaque côté de la plaque.

$$F = \mu \cdot S \cdot \frac{\Delta V}{\Delta y} \quad (\text{I. 2})$$

Tableau I.1: Exemples de viscosité dynamique des fluides.

Fluide	Viscosité dynamique μ (Pa.s)
Eau (20 °C)	$1,002 \cdot 10^{-3}$
Huile d'olive (20 °C)	$100 \cdot 10^{-3}$
Glycérol (20 °C)	$1000 \cdot 10^{-3}$
Hydrogène (20 °C)	$0,86 \cdot 10^{-5}$

- Viscosité cinématique :

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho} \quad (I.3)$$

- ❖ **Pression "P"**: La pression est la force exercée par unité de surface dans une direction normale à la surface. C'est une propriété importante de l'écoulement, surtout lorsque le fluide est comprimé ou détendu, généralement mesuré en unités de pascals (Pa).
- ❖ **Température "T"**: Il représente l'énergie cinétique moyenne des molécules dans un fluide, ce qui indique le degré de chaleur ou de froid du fluide.

I.2.3) Caractéristiques de la couche limite

- **Épaisseur de la couche limite (δ)**

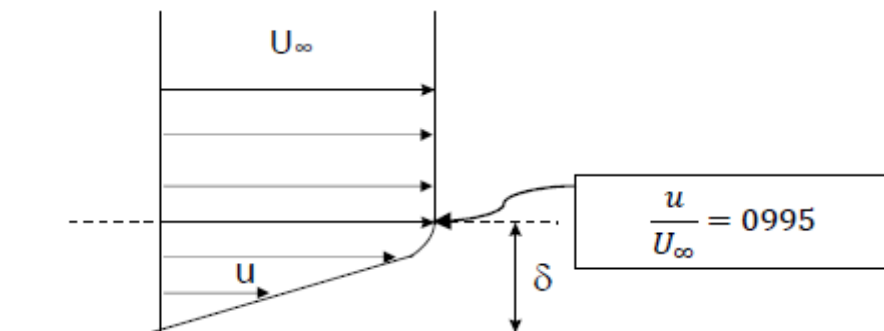


Figure I.5: Épaisseur de la couche limite " δ "

- **Épaisseur de Déplacement (δ^*).**
- **Épaisseur de Quantité de Mouvement (θ).**
- **Facteur de Forme (H).**

I.2.4) Profil de vitesse

Le profil de vitesse est crucial pour la compréhension des phénomènes hydrodynamiques à proximité des surfaces solides. Il permet d'expliquer comment la vitesse du fluide évolue dans une zone fortement influencée par la friction avec la surface et d'analyser des situations telles que l'écoulement autour d'objets, les pertes de pression dans les canaux ou le transfert de chaleur dans les fluides.

Par forces d'interaction entre les molécules du fluide et celles de la paroi, chaque molécule du fluide ne s'écoule pas à la même vitesse. Si l'on illustre la vitesse de chaque particule présente dans une section droite perpendiculaire à l'écoulement global par un vecteur, la courbe lieu des extrémités de ces vecteurs représente le profil de vitesse (fig.I.6).

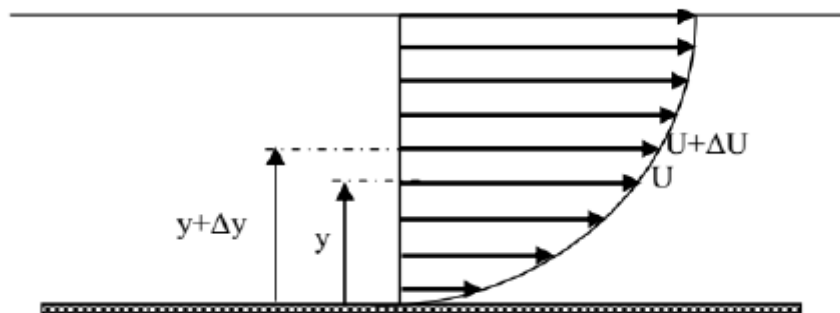


Figure I.6: Profil de vitesse

Le profil de vitesse peut être constant ou variable, en fonction de la nature des changements de vitesse. Dans un profil de vitesse constant, la vitesse reste inchangée sur toute la section, alors que dans un profil de vitesse variable, la vitesse varie.

I.2.5) Vitesse moyenne

La vitesse moyenne est la distance parcourue par un fluide divisé par le temps qu'il met pour parcourir cette distance. Elle peut être exprimée de différentes manières en fonction du type d'écoulement (laminaire, turbulent, etc.) et des conditions du fluide, en utilisant la formule suivante :

$$V_{moy} = \frac{Q_v}{S} \quad (I.4)$$

avec: $S = \frac{\pi D^2}{4}$

V_{moy} : Vitesse moyenne d'écoulement.

Q_v : Débit volumique.

S : Section d'une conduite

En général la vitesse v n'est pas constante sur la section S d'un tube de courant (Fig. 2.7), on dit qu'il existe un profil de vitesse (à cause des forces de frottement). Le débit-volume s'obtient en intégrant la relation précédente à travers la section de passage.

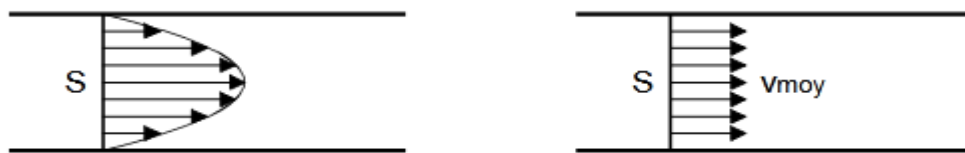


Figure I.7: Vitesse variable et uniforme.

I.2.6) Perte de charge

La perte de charge est un terme utilisé principalement dans le domaine de la mécanique des fluides, de l'hydraulique et de la ventilation, pour décrire la perte d'énergie d'un fluide (liquide ou gaz) lorsqu'il se déplace à travers un système (comme un tuyau, un conduit ou un échangeur de chaleur). Cette perte d'énergie est principalement due à la friction entre le fluide et les parois du conduit, ainsi qu'aux changements de direction ou aux perturbations dans le flux.

I.2.6.1) Pertes de charge singulières

Quand la conduite subit de brusques variations de section ou de direction, comme un coude, une vanne, un réducteur de section ou un autre élément de construction dans un système de tuyauterie, on observe ce qu'on appelle des pertes de charges singulières, elles sont généralement mesurables et font partie des caractéristiques de l'installation. On les formule comme suit :

$$\Delta P_{singulière} = \sum \xi_i \cdot \rho \cdot \frac{V_i^2}{2} \quad (I.5)$$

$\Delta P_{singulière}$: Perte de pression singulière (Pa).

ξ_i : Coefficient de perte pour chaque élément i .

V_i : Vitesse du fluide dans cet élément particulier i .

ρ : Densité du fluide (kg/m³).

I.2.6.2) Pertes de charge linéaires

Les pertes de charge linéaires se produisent à cause de la friction du fluide qui s'écoule à travers un tuyau ou un conduit. Ces pertes sont directement liées à la longueur du conduit, à son diamètre, à la vitesse du fluide et à la rugosité de ses parois. On calcule par la formule suivante:

$$\Delta P_{linéaires} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho V^2}{2} \quad (I.6)$$

$\Delta P_{linéaires}$: Perte de pression linéaire (Pa ou N/m²).

f : Coefficient de friction (sans dimension).

L : Longueur du conduit (m).

D : Diamètre du conduit (m).

V : Vitesse moyenne du fluide dans le conduit (m/s).

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{linéaires} + \Delta P_{singulière} \quad (I.7)$$

Les pertes de charge sont une considération essentielle dans la conception, l'optimisation et la maintenance des réseaux de fluides. Que ce soit pour le calcul des pertes linéaires ou les pertes singulières, comprendre ces phénomènes permet de créer des systèmes plus efficaces, d'éviter des défaillances prématurées et de réaliser des économies d'énergie.

I.3) Transfert thermique

Le transfert thermique est le processus par lequel l'énergie thermique (ou chaleur) se déplace d'un endroit à un autre, généralement d'un corps ou d'un système à température élevée vers un corps ou un système à température plus basse. Dans le cas fréquent du transfert thermique entre deux fluides ayant des températures différentes, à travers une paroi séparatrice, ce transfert est le résultat d'une action combinée des modes fondamentaux de transfert de la chaleur. Processus de transfert thermique à hautes températures où, en même temps que la conduction et la convection, intervient aussi le

rayonnement (par exemple : fours, foyers de chaudières à vapeurs, etc.), processus de transfert thermique à basses températures ayant lieu grâce à une combinaison entre conduction et convection, le rayonnement pouvant être négligé.

La conduction thermique se manifeste comme un phénomène unique seulement à l'intérieur des corps solides opaques ; elle est aussi prépondérante dans les fluides stagnants. Quant à la surface extérieure des corps, la chaleur est transférée par convection. Compte tenu du rôle crucial que joue le transfert de chaleur dans tous les processus naturels ou technologiques associés à l'énergie thermique, deux pistes d'action fondamentales sont définies :

- L'amélioration du transfert de chaleur pour optimiser le flux thermique échangé entre une source et un récepteur thermique.
- L'isolation thermique vise à réduire les échanges (pertes) de chaleur avec l'environnement ambiant.

I.3.1) Modes fondamentaux de transfert thermique

Le transfert thermique est un processus complexe qui est réalisé par la superposition des trois modes fondamentaux : conduction, convection et rayonnement. Dans le cas où l'un de ces trois modes est déterminant, les effets des autres sont peu importants ; aussi, ils peuvent être négligés, simplifiant considérablement l'analyse du cas concerné. En tenant compte de ces conditions, on va présenter ensuite le mécanisme d'apparition de chacun de ces modes.

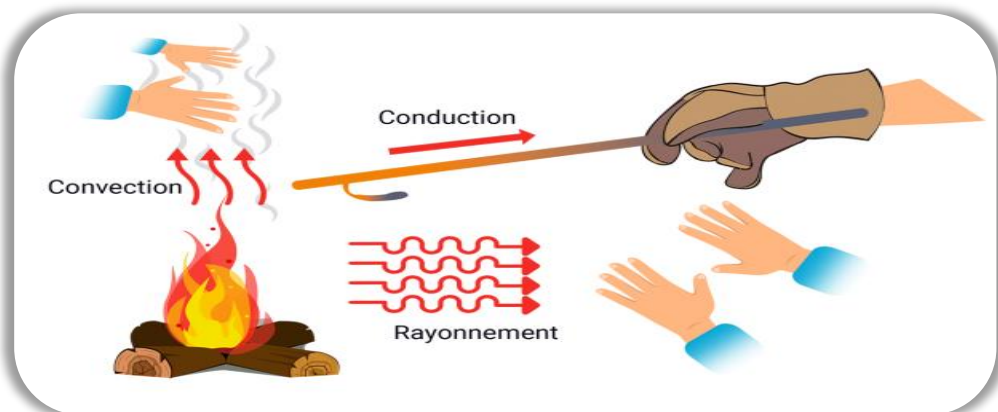


Figure I.8: Exemple des modes de transfert thermique

I.3.1.1) Conduction thermique

Le processus de transfert de chaleur par conduction s'appuie sur un milieu matériel sans mouvement de matière et est dû à des phénomènes physiques microscopiques ; il est le processus de propagation de la chaleur par le contact direct entre les particules d'un corps ou entre des corps ayant des niveaux énergétiques différents, suite au mouvement de ces particules élémentaires.

Dans le cas des gaz, le transfert thermique par conduction est le résultat de la diffusion moléculaire, et dans les liquides et les solides diélectriques, il a lieu à l'aide des ondes élastiques.

Pour les métaux, la conduction est déterminée essentiellement par la diffusion des électrons libres des zones plus chaudes vers les zones plus froides, les oscillations élastiques de la matrice cristalline jouant un rôle mineur.

Dans n'importe quel milieu, ce mode de transfert thermique tend à uniformiser la répartition d'énergie cinétique des particules constituantes dans la masse du corps.

Loi de Fourier :

La loi de Fourier exprime le taux de transfert de chaleur par conduction pour variation de la température dans les trois directions de l'espace:

$$\begin{cases} \phi_x = -\lambda \cdot A_x \frac{\partial T}{\partial x} \\ \phi_y = -\lambda \cdot A_y \frac{\partial T}{\partial y} \\ \phi_z = -\lambda \cdot A_z \frac{\partial T}{\partial z} \end{cases} \quad (I.8)$$

Mur simple :

$$\phi = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} = \frac{\lambda \cdot A \cdot (T_1 - T_0)}{e} = \frac{T_1 - T_0}{R_{th}} \quad (I.9)$$

avec $R_{th} = \frac{L}{\lambda \cdot A}$

ϕ : Flux de chaleur (W)

λ : Conductivité thermique du milieu ($W/m^{\circ}C$)

A: Section de passage du flux de chaleur (m^2)

e: Epaisseur du mur (m)

T: Température (K)

R_{th} : Résistance thermique ($^{\circ}C/W$)

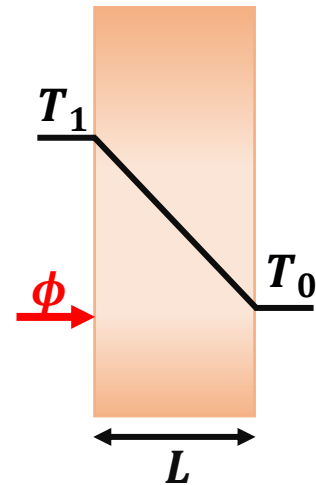


Figure I.9: Mur simple.

I.3.1.2) Convection

La convection est le processus de transfert thermique déterminé par le mouvement des particules élémentaires d'un fluide, liquide ou gaz, ou entre des zones ayant des températures différentes; ce mouvement entraîne un mélange intense des particules entre elles les fluides, qui changent de l'énergie (chaleur) et de la quantité de mouvement entre elle.

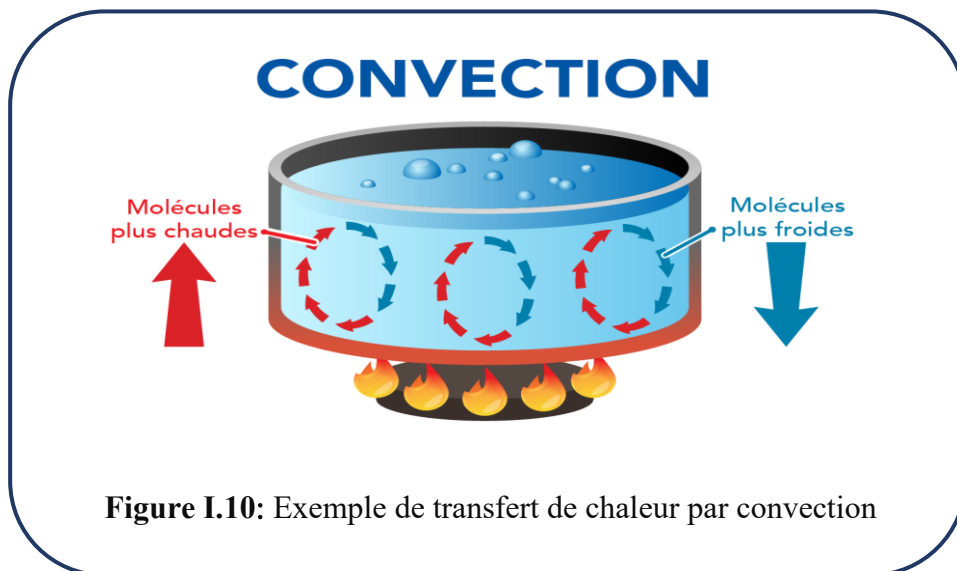


Figure I.10: Exemple de transfert de chaleur par convection

Ayant toujours lieu dans un milieu fluide, la convection peut apparaître entre des couches de fluide ayant des températures différentes ou entre un courant de fluide s'écoulant le long d'une surface solide ayant une autre température que le fluide même.

Compte tenu des forces qui produisent le mouvement du fluide, on a deux types de convection : forcée et naturelle ou libre [2].

L'écoulement et le transfert de chaleur par convection dans les canaux sont rencontrés dans plusieurs applications industrielles telles que la climatisation, le transport, la production chimique, la microélectronique, les échangeurs de chaleur, les réacteurs nucléaires, les capteurs solaires, le refroidissement des turbomachines et des composants électroniques et le domaine biomédical [3]. Lorsqu'un fluide traversant un conduit possède une température qui s'écarte de celle de la paroi environnante, un processus de transfert de chaleur est initié. En fonction de l'orientation du flux thermique, les conduits peuvent être utilisés à diverses fins : si le fluide caloporteur extrait la chaleur de la paroi, on parle d'un extracteur de chaleur, par exemple d'un capteur solaire.

I.3.1.2.1) Convection forcée

Le mouvement du fluide est provoqué par l'action de forces extérieures au procédé (telles que pompes, ventilateurs, etc.), ce qui lui confère une vitesse de déplacement assez élevée. Par conséquent, l'intensité du transfert de chaleur par convection forcée sera directement liée à l'état de mouvement du fluide.

La convection forcée s'accompagne généralement d'une convection libre. Ce dernier effet sera plus important lorsque la différence de température entre les particules est plus grande et que la vitesse du fluide en convection forcée est plus faible.

Mikhailov et cotta [4] ont aussi mis au point un ensemble de mathématiques qui calcule les fonctions, les intégrales, la température dimensionnelle et le nombre de Nusselt pour les écoulements convectifs dans les microcanaux, en tenant compte de la stagnation de la vitesse et de la variation de la température.

Leur méthode a permis de résoudre le transfert thermique stable en utilisant une température d'entrée uniforme et périodique, ainsi qu'en réalisant un autre écoulement électro-osmotique dans les microcanaux, avec une paroi chauffante et une température à l'entrée.

Bayazitoglu et KaKac [5] les régimes d'écoulement et les paramètres dimensionnels ont été abordés lors de la discussion sur l'influence du domaine de l'écoulement

monophasique laminaire dans les microcanaux, avec un fluide de travail gazeux. Ils ont observé que le chauffage visqueux, la compressibilité et la raréfaction sont pris en compte lors de l'écoulement convectif gazeux à l'intérieur des microcanaux.

Tunc et Bayazitoglu [6] la technique de la transformation intégrale a été utilisée pour étudier la dynamique hydrodynamique d'un écoulement convectif laminaire dans les microtubes à une température uniforme et à un flux de chaleur uniforme. La méthode de résolution a été vérifiée pour le cas où le chauffage visqueux est négligeable, dans des conditions de température uniforme et avec un nombre de Brinkman spécifique qui indique l'étendue de la viscosité de chauffage ; sur une distance axiale définie avec précision, l'impact du chauffage visqueux a été pris en compte, ce qui a permis au nombre de Nusselt d'atteindre sa valeur maximale. Le transfert thermique a été prouvé par l'effet combiné du nombre de Knudssen, du nombre de Brinkman et du nombre de Prandtl, en évaluant la valeur maximale du nombre de Nusselt.

I.3.1.2.2) Convection naturelle

Son origine est le mouvement généré par la différence de densité entre les particules chaudes et froides du fluide présent dans le champ de force de masse (par exemple, champ gravitationnel). La thermosphère a donc une densité plus faible et subit une force ascendante, suivant un mécanisme similaire à la poussée d'Archimède. Par conséquent, dans les zones à haute température, les fluides se déplacent vers le haut. Le phénomène inverse de courant descendant se produit pour les pièces dont la température est inférieure à celle du fluide thermique.

I.3.1.2.3) Convection Mixte

Lorsque les deux mécanismes naturels et forcés sont présents simultanément et ont une influence significative sur le transfert de chaleur, on parle de convection mixte. Cela peut se produire dans des cas où les forces de flottabilité (convection naturelle) et les forces externes (convection forcée) sont équivalentes.

Loi de Newton : Quelque soit le type de convection (naturelle ou libre) et quelque soit le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent), le flux de chaleur ϕ extrait

par le fluide froide de température T_f a une paroi de surface S et température T_p telle que $T_p > T_f$, est donnée par:

$$\phi = h \cdot S(T_p - T_f) \quad (\text{I.10})$$

ϕ : Flux de chaleur (W)

h : Coefficient de transfert thermique par convection ($W/m^2 \cdot K$)

S : Surface de paroi (m^2)

T_f : Température de fluide (K)

T_p : Température de paroi (K)

L'analyse dimensionnelle est la méthode la plus simple à utiliser pour déterminer l'expression du coefficient de transfert thermique « h ».

Cette analyse dimensionnelle fait apparaitre des nombres sans dimension très utiles dans l'étude de la mécanique des fluides et en particulier dans les phénomènes convectifs.

Ces nombres sont en particulier :

1. Nombre de Reynolds "Re" :

Le régime d'écoulement d'un fluide peut être laminaire ou turbulent. Le passage d'un régime à un autre est caractérisé par le nombre de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D_h}{\mu} \quad (\text{I.11})$$

ρ : Masse volumique (Kg/m^3)

V : Vitesse du fluide (m/s)

D_h : Diamètre hydraulique ($D_h = 4S/P$) (m)

μ : Viscosité dynamique du fluide ($Kg/m \cdot s$)

2. Nombre de Nusselt "Nu" :

Ce nombre caractérise l'importance de la convection par rapport à la conduction :

$$Nu = \frac{h \cdot D_h}{\lambda} \quad (I.12)$$

3. Nombre de Grashof "Gr" :

Un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser la convection libre dans un fluide, il caractérise la force de viscosité du fluide :

$$Gr = \frac{g \cdot L_c^3 \cdot \beta \cdot \Delta T}{\vartheta^2} \quad (I.13)$$

g : Accélération de la pesanteur (m/s^2)

L_c : longueur caractéristique (m)

β : Facteur de dilation volumique du fluide ($\beta = \frac{1}{T}$)(K^{-1})

ΔT : Différence de température entre la paroi et le fluide ($\Delta T = T_p - T_f$)(K)

ϑ : Viscosité cinématique (m^2/s)

4. Nombre de Prandtl "Pr" :

Il caractérise la distribution des vitesses par rapport à la distribution de la température.

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda} \quad (I.14)$$

C_p : Chaleur spécifique du fluide ($J/Kg \cdot K$)

I.3.1.3) Rayonnement

Le rayonnement thermique est une forme particulière de transfert thermique où les particules de substance ne sont plus représentées par le porteur d'énergie, mais par des ondes électromagnétiques ayant à l'origine l'agitation atomique à la surface d'un corps. Le mécanisme de rayonnement est formé par l'émission et l'absorption des ondes électromagnétiques chargées d'énergie et par la conversion de celle-ci en chaleur, en

changeant l'état énergétique des corps qui la maintiennent. Le rayonnement thermique sera régi par les mêmes lois que le rayonnement lumineux, mais avec des lois propres.

Le rayonnement thermique ne demande pas de support matériel, il peut même se produire dans le vide. Il est essentiel pour le transfert thermique subi par des corps solides, des gaz et dans l'espace, car son effet est plus marqué à des températures élevées.[1]

Loi de Stefan-Boltzman :

La loi de Stefan Boltzman permet de déterminer le flux de chaleur émis sous forme de rayonnement par un corps de surface dans toutes les directions de l'espace:

$$\phi = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot T^4 \quad (\text{I. 15})$$

σ : Constante de stefan ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$) ($W/m^2 \cdot K^4$)

ε : Facteur d'émission dépendant de la nature de la surface.

I.4) Technique d'intensification de l'échange convectif

L'intensification de l'échange convectif est une technologie prometteuse qui permet d'améliorer la performance thermique de nombreux systèmes.

Le transfert de chaleur et le contrôle de la température jouent un rôle central dans de nombreux processus industriels. Ainsi, de nombreux dispositifs améliorés ont été développés en optimisant, par exemple, les paramètres géométriques de l'échangeur thermique afin de modifier et de contrôler le débit du fluide caloporteur. Cependant, à mesure que la technologie progresse dans de nombreux domaines, la densité du flux de chaleur à évacuer ou à fournir devient de plus en plus importante, ce qui nécessite l'émergence de nouvelles technologies améliorant le transfert de chaleur.

I.4.1) Nanofluides

Les nanofluides sont des suspensions de nanoparticules dans un fluide de base. Ces fluides offrent des avantages significatifs par rapport aux suspensions traditionnelles contenant des particules plus grandes. Ce qui les distingue, c'est leur capacité

exceptionnelle à améliorer l'échange thermique, avec une conductivité thermique souvent bien supérieure aux prévisions théoriques.

Le choix des liquides de base revêt une grande importance pour un nanofluide, car il permet de maintenir la stabilité de la suspension dans le temps et d'empêcher tout regroupement ; ce choix de fluide sera déterminé par les caractéristiques de la nanoparticule, les solvants les plus fréquemment utilisés étant :

- L'eau
- L'éthylène
- Les huiles
- Le toluène

❖ Nanoparticule:

Les nanoparticules sont des entités minuscules qui existent dans un spectre de taille de 1 à 100 nanomètres (nm), où un nanomètre équivaut à un milliardième de mètre. Ces entités présentent des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques distinctes lorsqu'elles sont juxtaposées à des particules plus grosses composées du même matériau, principalement en raison de leurs dimensions minuscules et de leur grande surface par rapport à leur volume.

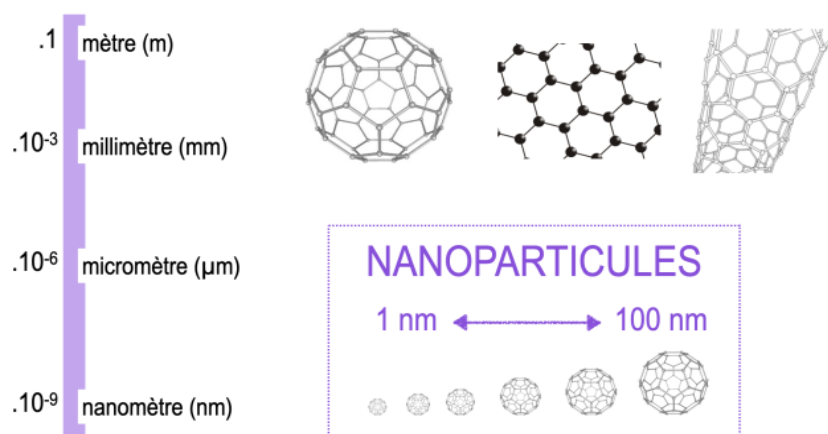


Figure 1.11: Échelle des dimensions nanoparticules

Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides sont [7] :

- **Les nanoparticules des oxydes métalliques :**

1. L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3).
2. L'oxyde de cuivre (CuO).
3. L'oxyde de silicium (SiO_2).
4. L'oxyde de titanium (TiO_2).

- **Les nanoparticules métalliques :**

1. L'aluminium (Al).
2. Le cuivre (Cu)
3. L'or (Au).
4. L'argent (Ag).

- **Les nanoparticules non métalliques :**

1. Les nanotubes de carbone (CNT).
2. Le diamant(C).

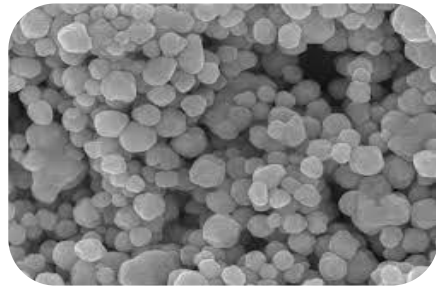


Figure I.12: Nanoparticules d'argent.

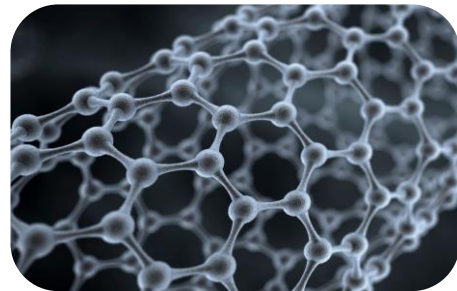


Figure I.13: Nanotubes de carbone.

I.4.2) Fabrication des nanofluides

La création de nanofluides est un domaine d'étude captivant, notamment en raison de leurs caractéristiques extraordinaires qui peuvent améliorer l'efficacité thermique dans une multitude d'utilisations, notamment dans des domaines tels que les échangeurs de chaleur ou les solutions de refroidissement avancées.

Les nanofluides renferment en leur sein de minuscules particules, mesurant généralement quelques nanomètres seulement, se délectant dans un liquide de base, comme de l'eau, de l'huile ou des fluides organiques. Ces nanoparticules peuvent être fabriquées à partir de matériaux tels que des oxydes métalliques (comme l'alumine ou le dioxyde de titane), des métaux (comme le cuivre ou l'argent) ou des nanotubes de carbone.

Les principales étapes de la production de nanofluides sont les suivantes :

- ❖ Fabrication des nanoparticules : Les nanoparticules peuvent être produites par une multitude de méthodes telles que la précipitation chimique, réduction moléculaire,

assemblage autonome ou méthode sol-gel. Le choix des matériaux est déterminé par les propriétés thermiques spécifiques recherchées.

- ❖ Intégration de nanoparticules dans le fluide de base : les nanoparticules sont ensuite mélangées dans un fluide de base à l'aide de techniques telles que l'agitation mécanique, l'homogénéisation par ultrasons ou même des méthodes de mélange à haute énergie. Ce procédé atténue le risque d'agglomération de nanoparticules et garantit une distribution uniforme dans le fluide.
- ❖ Pour maintenir l'harmonie des nanofluides : après avoir méticuleusement dispersé les nanoparticules dans le liquide, il devient impératif d'assurer la stabilité de cette fusion afin d'éviter toute propension des nanoparticules à se rassembler. Cette stabilisation peut être obtenue en utilisant des tensioactifs (molécules qui aident à maintenir la dispersion) ou en modifiant les propriétés de surface des nanoparticules.
- ❖ Caractérisation des nanofluides : après leur production, les nanofluides sont fréquemment analysés pour évaluer la taille des particules, la distribution, la stabilité du mélange et les caractéristiques thermophysiques, notamment la conductivité thermique et la viscosité.

On distingue deux techniques principales pour la fabrication de nanofluides :

- **La méthode en une seule étape** : Le nanofluide stable est synthétisé à l'aide de la technique de dépôt physique en phase vapeur (PVD) dans laquelle l'évaporation et la condensation directes des nanoparticules se produisent dans le fluide de base. Cette approche permet d'obtenir des nanoparticules pures et homogènes. Ainsi, l'accumulation de nanoparticules est réduite. Les principaux inconvénients de la méthode en une étape sont que les réactifs résiduels sont laissés dans les nanofluides et que le coût est également élevé.
- **Méthode en deux étapes** : C'est la méthode la plus économique pour la préparation à grande échelle de nanofluide. Dans une méthode en deux étapes, les nanoparticules sont obtenues par différentes méthodes, puis ces nanoparticules sont dispersées dans

le liquide de base pour le nanofluide souhaité. Ce processus de production est peu coûteux et massif. Le principal inconvénient de la méthode en deux étapes est l'agrégation des nanoparticules. En raison de l'instabilité, un tensioactif est utilisé. C'est la méthode commerciale pour préparer le nanofluide. La plupart des chercheurs préfèrent cette méthode dans la préparation de nanofluide pour la recherche [8].

I.4.3) Propriétés thermophysiques des nanofluides

Pour saisir le comportement et le potentiel des nanofluides dans les applications thermiques de pointe, il est crucial d'examiner leurs caractéristiques thermophysiques. Ces caractéristiques comprennent la conductivité thermique, la viscosité, la capacité thermique et la densité, toutes modifiées par l'introduction de nanoparticules. Voici une vue d'ensemble des principales caractéristiques thermophysiques des nanofluides :

I.4.3.1) Conductivité thermique

Un des principaux atouts des nanofluides est leur aptitude à renforcer la conductivité thermique comparativement aux liquides conventionnels. L'amélioration significative du transfert de chaleur est possible grâce à l'incorporation de nanoparticules, notamment des métaux ou des composés céramiques. Les nanofluides peuvent présenter une conductivité thermique supérieure aux estimations théoriques traditionnelles, cependant, les recherches divergent quant à l'influence précise des nanoparticules sur ce processus.

Modèle de Maxwell [9] a étudié théoriquement la conductivité thermique d'un nanofluide, qui contient uniquement des nanoparticules de forme sphérique. Il a estimé que les particules avaient le même diamètre et étaient suffisamment éloignées pour éviter toute interaction entre elles. Dans son modèle, la conductivité thermique est uniquement influencée par la fraction volumique des nanoparticules en suspension, la conductivité thermique du fluide de base et celle des nanoparticules.

Modèle de Yu et Choi [10] les nanofluides ont été identifiés comme un liquide de base et des particules solides séparés par une couche nanométrique, qui agit comme un pont thermique entre le fluide et les nanoparticules.

Modèle de Bhattacharya et al [11] ont représenté théoriquement une nouvelle relation ressemble à la formule de Xuan and Roetzel définissant la masse volumique d'un nanofluide, en prenant en considération le mouvement Brownien des particules. On explique le mouvement Brownien en tant que description mathématique des déplacements aléatoires des nanoparticules au sein du liquide de base. Ce déplacement est provoqué par les collisions avec les molécules du liquide de base, qui se déplacent dans toutes les directions sous l'effet de la chaleur. Les nanoparticules sont suffisamment petites pour être poussées par les chocs reçus et elles peuvent alors parcourir une certaine distance (très petite), avant de repartir dans une autre direction suite à de nouveaux chocs et ainsi de suite. Le mouvement brownien est le résultat d'un mouvement d'ensemble chaotique.

I.4.3.2) Viscosité dynamique " μ "

La viscosité constitue un paramètre essentiel qui caractérise la capacité d'un fluide à démontrer son comportement d'écoulement ; c'est un paramètre important pour les applications pratiques, car elle affecte directement la chute de pression en convection forcée. L'ajout de particules solides dans un liquide provoque une augmentation, plus ou moins importante, de la viscosité du mélange obtenu. Pour des nanoparticules qui possèdent des caractéristiques identiques (telles que la nature et la taille) et qui sont dispersées dans un fluide de base uniforme, la qualité de la dispersion et les conditions thermiques peuvent exercer un effet important sur la viscosité du système. Par conséquent, pour permettre l'utilisation de nanofluides dans des applications pratiques, il est impératif d'étudier méticuleusement le degré d'amélioration de la viscosité des nanofluides par rapport à leurs homologues fluides purs. Des exemples de certains modèles :

- **Modèle de Einstein** [12] a été le premier à étudier la viscosité dynamique d'un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides en faible concentration volumique (moins de 2%).
- **Modèle de Chandrasekar et al** [13] ont proposé une étude expérimentale et théorique de la viscosité dynamique de nanofluides avec des nanoparticules d'aluminium en suspension de taille moyenne $1.2 \mu m$, $3.65 g/cm^3$ et de kaolin de taille moyenne $3.73 \mu m$, $2.48 g/cm^3$, en prenant en compte les aspects électromagnétiques et mécanique
- **Nguyen et al** [14] ont étudié l'influence de la taille des nanoparticules sur la viscosité dynamique d'un nanofluide contenant (Al_2O_3 -eau) en variant leurs diamètres dp . L'effet de la taille des nanoparticules sur la viscosité effective est pris en considération dans les relations proposées.
- **Wang et al** [15] se sont engagés dans une exploration expérimentale de la viscosité dynamique d'un nanofluide, où l'eau a servi de fluide de base enrichi de nanoparticules d'alumine.
- **Song et al** [16] se sont penchés sur les calculs de la viscosité dynamique d'un nanofluide composé de silicium et d'eau, révélant que cette viscosité se comporte comme une fonction linéaire de la fraction volumique.

$$\mu_{nf} = (1 + 56.5\varphi) \quad (I.16)$$

- **Kulkarni et al** [17] ont étudié l'impact de la température sur la viscosité d'un nanofluide enrichi en nanoparticules d'oxyde de cuivre en suspension dans de l'eau, présentant une corrélation crédible dans un spectre de température allant de 5 à 50 °C.

I.4.3.3) Capacité calorifique " C_p "

La capacité thermique d'un nanofluide dépend à la fois de la capacité thermique du fluide de base et de celle des nanoparticules. L'introduction de nanoparticules peut induire une augmentation marginale de la capacité thermique ; toutefois, ce phénomène est généralement moins significatif lorsqu'il est associé à une augmentation de la

conductivité thermique. Néanmoins, l'impact cumulé de la capacité thermique sur le transfert de chaleur reste un domaine d'étude en cours. Chaleur spécifique est calculée par relation de Pak et Cho :

$$C_{p_{nf}} = (1 - \varphi)C_{p_f} + \varphi C_p \quad (I. 17)$$

I.4.3.4) La masse volumique " ρ "

La masse volumique d'un nanofluide est calculée en considérant la masse volumique du fluide de base et celle des nanoparticules, peut être approximée par la formule de **Xuan et Roetzel** [18] suivante :

$$\rho_{nf} = \rho_f \cdot (1 - \varphi) + \rho_p \cdot \varphi \quad (I. 18)$$

ρ_{nf} : La masse volumique du nanofluide.

ρ_p : La masse volumique des nanoparticules.

ρ_f : La masse volumique du fluide de base.

φ : La fraction volumique des nanoparticules (rapport du volume des nanoparticules par rapport au volume total du nanofluide).

$$\varphi = \frac{V_p}{V_p + V_f} \quad (I. 19)$$

I.4.4) Comportement thermique des nanofluides

Le comportement thermique des nanofluides fait référence à la manière dont les propriétés thermiques (comme la conductivité thermique, la capacité thermique et la viscosité) des fluides contenant des nanoparticules diffèrent de celles des fluides classiques. Mais ces améliorations dépendent de la nature des nanoparticules, de leur concentration et de leur stabilité dans le fluide.

❖ Performances de convection thermique :

Les nanofluides améliorent souvent les performances des systèmes de convection thermique, tels que les échangeurs de chaleur, en raison de leur conductivité thermique plus élevée. Cela permet un refroidissement plus efficace dans les applications industrielles et électroniques.

❖ Effet de la concentration de nanoparticules :

L'augmentation de la concentration de nanoparticules augmente généralement la conductivité thermique, mais augmente également la viscosité des nanofluides et diminue la stabilité. Il existe donc un compromis entre la conductivité thermique et d'autres propriétés telles que la stabilité et la viscosité lors de l'ajustement de la concentration des nanoparticules.

❖ Effet de la taille et de la forme des nanoparticules :

Les nanoparticules de plus petite taille ou de formes spécifiques peuvent avoir un impact plus important sur les propriétés thermiques des nanofluides.

I.4.5) Phénomène physique associés au transfert convectif de nanofluide

Le transfert convectif des nanofluides est un phénomène physique complexe impliquant l'échange de chaleur entre un fluide et une surface ou à travers un fluide. La présence de nanoparticules améliore les caractéristiques thermiques du fluide, telles que la conductivité thermique, ce qui a un impact significatif sur les mécanismes de transfert de chaleur par convection.

Les phénomènes physiques associés au transfert convectif des nanofluides :

❖ Augmentation de la conductivité thermique : la présence de nanoparticules augmente la conductivité thermique du fluide, ce qui permet d'améliorer l'efficacité du transfert de chaleur. Cela est principalement dû à la capacité des nanoparticules à transmettre rapidement de l'énergie thermique grâce à leurs interactions avec le milieu environnant.

❖ Variation de viscosité : les nanofluides ont souvent une viscosité différente de celle du fluide de base. Bien qu'une viscosité élevée puisse entraver les débits, elle peut

aussi améliorer la stabilité du nanofluide, en réduisant l'agrégation des nanoparticules et favorisant une dispersion thermique supérieure.

❖ Impact de la convection forcée et naturelle :

Convection forcée : lorsqu'un fluide est contraint de s'écouler généralement avec une pompe ou un ventilateur, les nanofluides démontrent une efficacité supérieure en matière de transfert de chaleur grâce à la conduction thermique renforcée par les nanoparticules.

Convection naturelle : le transfert de chaleur se déroule en réponse aux gradients de température, et l'augmentation de la conductivité thermique des nanofluides améliore encore l'efficacité.

❖ Effet des propriétés des nanoparticules : Les propriétés thermiques des nanofluides sont affectées par la taille, la forme, la concentration et les propriétés des nanoparticules, qui augmentent considérablement la conductivité thermique du fluide.

❖ Rôle de la diffusion et de la dispersion thermiques : les nanoparticules peuvent créer un « réseau » unique qui accélère la diffusion thermique. L'agitation thermique des nanoparticules atténue également les phénomènes de stratification thermique et favorise l'uniformité de la température dans le fluide.

❖ Stabilité des nanofluides : il est essentiel que les nanofluides maintiennent une dispersion efficace des nanoparticules dans le fluide afin d'empêcher la sédimentation, ce qui pourrait compromettre les avantages d'un transfert de chaleur amélioré. Pour maintenir cette dispersion, des stabilisants sont fréquemment utilisés.

La conductivité thermique des nanofluides est un phénomène complexe et multifactoriel, influencé par plusieurs paramètres interconnectés. Parmi ceux-ci, la concentration et la taille des nanoparticules sont des facteurs clés, car une concentration plus élevée et des nanoparticules plus petites tendent à améliorer la conductivité thermique. De plus, les propriétés thermiques des nanoparticules elles-mêmes, ainsi que celles du fluide de base, jouent un rôle fondamental dans cette amélioration.

La température est un facteur dynamique qui peut également moduler la conductivité thermique, tout comme la stabilité et la dispersion des nanoparticules dans le fluide. Une dispersion homogène est cruciale pour maximiser l'efficacité de transfert thermique. Enfin, la viscosité du nanofluide et les interactions entre les nanoparticules et le fluide sont des éléments supplémentaires qui influencent indirectement la performance thermique du nanofluide.

I.4.6) Domaine d'utilisation des nanofluides

La convection est le transfert de chaleur résultant du mouvement complet du matériau qui la supporte et il y'a plusieurs types :

- Convection forcée, semblable à une pompe ou à un ventilateur, où le fluide oscille sous l'effet d'une force dynamique interne.
- Convection libre déclenchée par des variations de densité du fluide, entraînées par des disparités de température qui influencent le comportement du fluide.
- La convection mixte émerge de la confluence des deux phénomènes précédents, apparaissant lorsqu'un facteur externe impose un mouvement fluide, mais le principe d'Archimède continue d'exercer son influence.

I.4.7) Avantages et inconvénients des nanofluides

I.4.7.1) Avantages

- Les nanofluides présentent divers avantages qui en font une utilisation pour diverses applications.
- Étant donné que la taille, la forme, le matériau et la fraction volumique des nanoparticules changent, elles sont capables d'optimiser l'absorption de l'énergie solaire.
- Lorsque la surface des particules en suspension s'accroît, la capacité thermique du fluide se voit également augmentée.

- Il améliore la conductivité thermique et donc l'efficacité du système de transfert de chaleur.
- Le gradient de température de transfert du fluide s'aplatit en raison de la dispersion.
- Le changement de concentration de nanoparticules modifie les propriétés du fluide.
- Il augmente la température des applications solaires thermiques.

I.4.7.2) Inconvénients

- La puissance de pompage.
- Chaleur spécifique basse et viscosité supérieure.
- Le coût élevé des nanofluides.
- Difficultés dans le processus de production.
- Des nanoparticules dispersion est stable.

I.5) Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons initialement présenté un aperçu des nanofluides (leur synthèse, leur caractérisation, leur production et leurs applications). Une revue exhaustive de leurs propriétés thermophysiques et de leurs performances en termes de thermique et d'hydrodynamique a par la suite été réalisée.

Par conséquent, cette étude a démontré que les performances des nanofluides sont étroitement liées à divers facteurs tels que la constitution et la qualité des nanoparticules, ainsi qu'au type de liquide de base utilisé.

Il est donc indispensable d'examiner minutieusement les propriétés thermophysiques des nanofluides pour mieux saisir leur comportement de flux et leurs caractéristiques thermiques, dans l'optique d'une utilisation potentielle dans les systèmes thermiques.

D'autres approches théoriques ont tenté de comprendre l'origine et l'importance de cette augmentation de la conductivité thermique des nanofluides. Néanmoins aucune d'entre

elles n'est parvenue à décrire convenablement tous les comportements obtenus expérimentalement.

Un meilleur contrôle des propriétés physico chimiques de ces fluides serait donc nécessaire pour pouvoir les étudier de façon précise et ainsi comprendre leur comportement.

Chapitre II:

Recherche bibliographique

II.1) Introduction

Energie solaire est un immense gisement d'énergie naturel et gratuit, avec les appareils de conversion d'énergie solaire en énergie thermique appelés capteurs solaires thermiques. On les utilise fréquemment dans des domaines comme le réchauffement de l'eau, le chauffage des habitations et la génération d'électricité par le biais de cycles thermodynamiques. Le rendement de ces détecteurs repose largement sur leur compétence à transmettre la chaleur recueillie du liquide porteur de chaleur. Dans ce cadre, le recours aux nanofluides dans l'amélioration des trajectoires d'écoulement du fluide constitue des stratégies prometteuses pour optimiser le transfert thermique. Cette étude examine diverses techniques pour optimiser l'efficacité des capteurs solaires plans, en mettant l'accent sur les configurations des flux d'écoulement et l'emploi de nanofluides.

II.2) Différents types de capteurs solaires

Non seulement il existe de multiples façons de fournir de l'énergie solaire, mais il existe également différentes manières de capter l'énergie solaire du rayonnement entrant. La liste ci-dessous présente les types de capteurs solaires les plus courants [19].

- Capteurs plans de types vitrés
- Capteurs plans sans vitrage
- Capteurs à plaque perforée sans vitrage
- Capteurs solaires à passage retour
- Capteurs solaires à concentration
- Capteurs solaires à air
- Capteurs solaires intégrés
- Capteurs solaires à circulation de liquide
- Systèmes à réflecteur cylindro-parabolique
- Systèmes de centrale à tour
- Capteurs solaires fixes à concentration
- Capteurs sous vide

II.3) Les capteurs solaires thermiques

Un capteur solaire constitue une catégorie d'échangeur de chaleur qui facilite le transfert de l'énergie solaire thermique vers un fluide. Dans ces dispositifs, le rayonnement solaire frappe une plaque d'absorption, permettant ainsi le transfert d'énergie thermique au fluide. En 1909, William Bailey a conceptualisé et développé les premiers capteurs solaires caractérisés par des plaques plates [20]. Les systèmes de conversion de l'énergie solaire peuvent être classés en deux catégories principales : la conversion thermique, dans laquelle l'énergie solaire incidente sur le plan du capteur est entièrement convertie en énergie thermique, et la conversion électrique, communément appelée système photovoltaïque. La conversion la plus réussie reste celle en énergie thermique, vue sa simplicité d'installation et son large domaine d'utilisation.

II.3.1) Capteurs plans vitrés

Le type de capteur solaire le plus répandu est le capteur plan vitré, c'est moins cher et présente généralement une garantie plus longue. Les capteurs plans vitrés sont très répandus et ils existent sous forme de capteurs à circulation de liquide et sous forme de capteurs à air. Les capteurs à circulation de liquide sont plus communément utilisés pour le chauffage de l'eau chaude des résidences et des commerces, pour le chauffage des bâtiments.

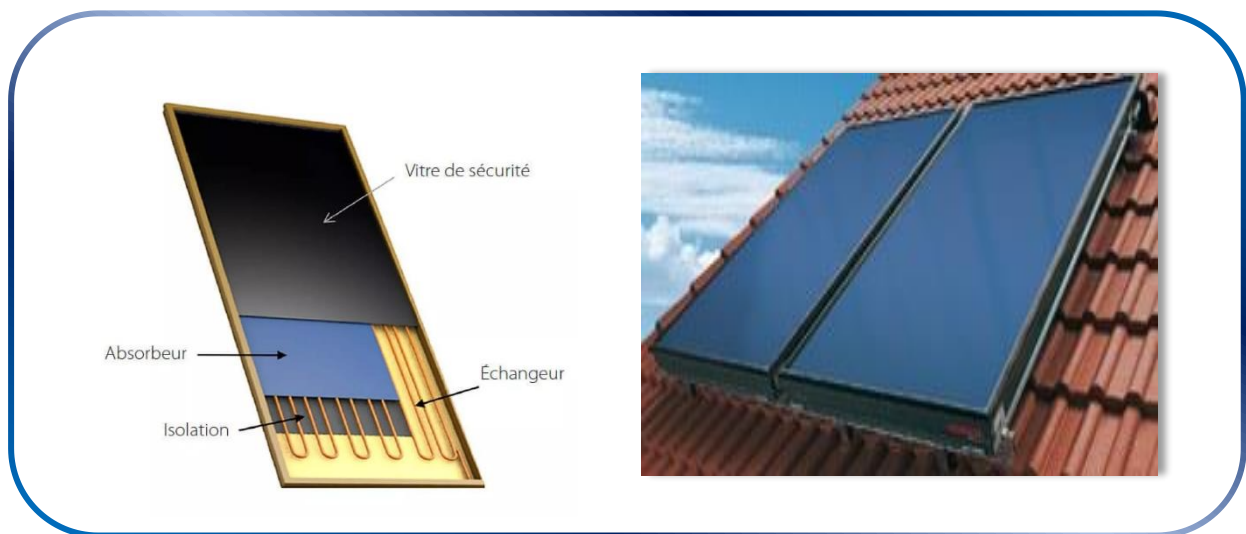


Figure II.1 : Capteur solaire plan vitré

II.3.2) Capteurs plans non vitrés

Les capteurs plans non vitrés sont composés de tubes généralement fabriqués à partir de plastique noir résistant aux ultraviolets, à travers lesquels l'eau circule. L'absence de vitrage dans les capteurs non vitrés signifie que l'énergie solaire est directement absorbée par le capteur, mais cette conception permet également des pertes de chaleur plus importantes, car il n'y a pas de barrière pour retenir la chaleur. Il est utilisé dans de nombreuses applications, telles que le chauffage de l'eau des piscines, les systèmes de chauffage de l'air ou de l'eau.

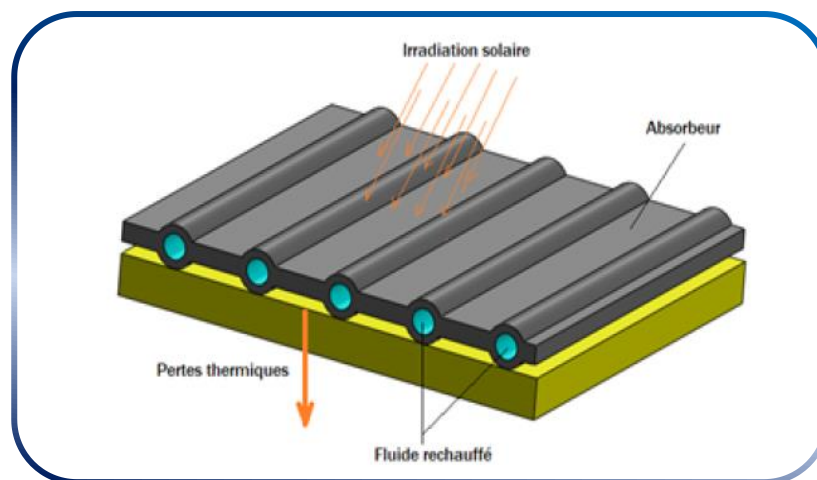


Figure II.2 : Capteur solaire plan non vitré

II.3.3) Capteurs plans sous vide

Un capteur solaire utilisant des tubes à vide facilite la capture efficace de l'énergie solaire. Cette catégorie spécifique de capteurs comprend plusieurs tubes à vide fabriqués principalement en verre. Ces tubes sont dotés d'une surface absorbant la chaleur qui améliore l'efficacité de la capture de la chaleur solaire.

La particularité des capteurs solaires plans sous vide réside dans l'absence totale d'air dans les tubes. Cette condition de vide confère l'avantage d'améliorer de manière significative les propriétés d'isolation thermique du dispositif. En l'absence de molécules d'air, les pertes de chaleur par convection ou conduction deviennent négligeables. Par conséquent, le capteur solaire à vide joue un rôle important dans la capture efficace de la chaleur solaire, même dans des conditions de basses températures

ou de ciel couvert. En effet, les caractéristiques d'isolation supérieures de ces capteurs solaires permettent d'utiliser de faibles sources thermiques.

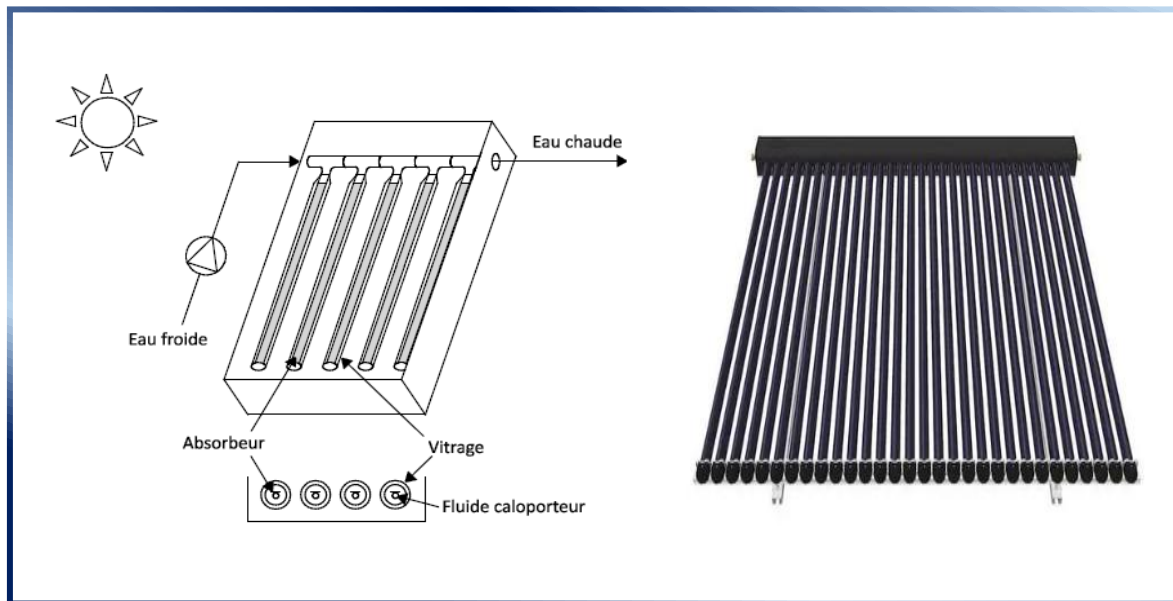


Figure II.3 : Capteurs plans sous vide

II.4) Principaux éléments constituant un capteur plan

➤ Vitrage :

La couche transparente sert de support permettant l'entrée du rayonnement solaire dans le capteur. Généralement composé de verre, son rôle principal est de faciliter le passage de la lumière tout en conservant l'énergie thermique à l'intérieur du capteur. Ce vitrage est conçu pour optimiser la capture de l'énergie solaire tout en minimisant la dissipation thermique.

➤ Absorbeur :

La nature de l'absorbeur joue un rôle très important pour les performances d'un capteur. Il s'agit de la surface noire située à l'intérieur du capteur, qui absorbe la lumière du soleil et la transforme en chaleur. L'absorbeur est généralement fabriqué en métal, tel que l'aluminium ou le cuivre, par leur excellente conductivité thermique. La couleur noire de l'absorbeur maximise l'absorption de l'énergie solaire. Ses principales qualités sont donc [19] :

- ❖ Une faible inertie thermique.
- ❖ Facteur d'absorption aussi proche que possible de l'unité.
- ❖ Pouvoir émissif dans l'infrarouge le plus bas possible.
- ❖ Excellente conductivité thermique.

Le tableau suivant montre les propriétés de différents matériaux comme absorbeurs [21].

Tableau II.2: Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur.

Matière	Conductivité (W/m°C)	Coefficient de dilatation
Aluminium	230	2,38
Cuivre	380	1,65
Zinc	112	2,9
Acier	52	1,15
Plastique	0,2-0,4	7-20

➤ **Isolant thermique :**

L'isolation est d'une importance primordiale dans les applications thermiques. Un isolant est placé sous l'absorbeur pour empêcher la chaleur recueillie de s'évanouir par la partie inférieure du capteur. Ceci contribue à maintenir une température élevée au sein du capteur, favorisant ainsi son rendement.

Tableau II.3: Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants [22]

Matériau	Facteur de transmission solaire (%)	Masse volumique (Kg/m³)	Chaleur massique (J/Kg.K)	Diffusivité (10⁻⁷ m²/s)
Air	0.025	1.2	1003	208
Mousse de polyuréthane	0.029	30	1600	6.0
Laine de verre	0.036	40	840	10.7
Polyester expansé	0.040	20	1500	13.3

Papier de journal comprimé	0.105	130	1340	6.0
Bois de pin	0.118	500	1210	1.95
Plâtre	0.35	800	800	5.5

➤ **Fluide caloporteur :**

Pour évacuer la chaleur stockée par la plaque absorbante. Un fluide circule à travers le capteur, passant à travers des tuyaux situés près de l'absorbeur. Ce fluide récupère la chaleur générée par l'absorbeur et la transfère vers un dispositif de stockage.

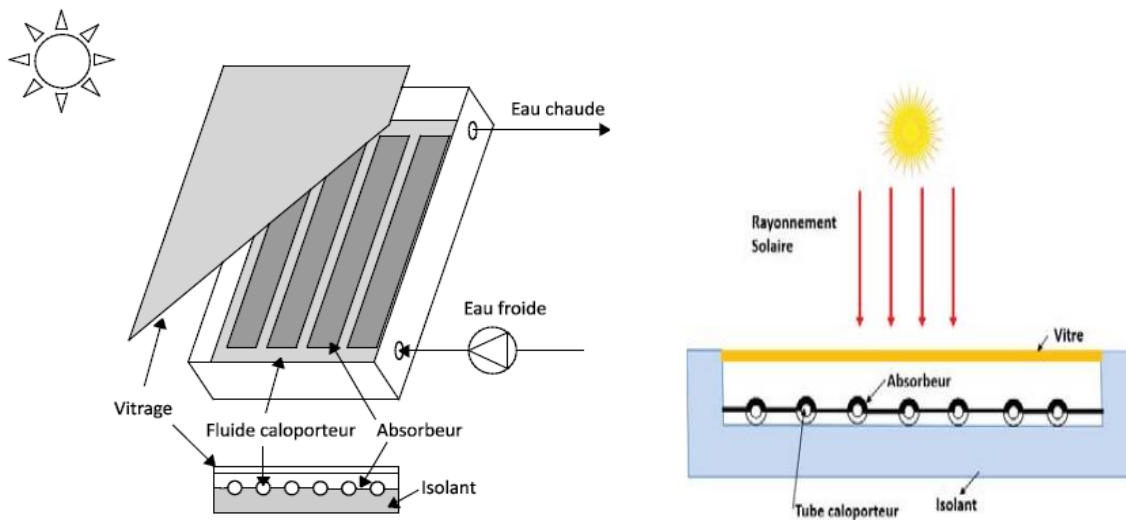


Figure II.4: Capteur solaire plan

II.5) Principes de fonctionnement

Un capteur solaire plat comprend essentiellement une surface absorbante qui est soumise au rayonnement solaire, ce qui facilite le transfert d'énergie thermique à un fluide caloporteur, dérivé de l'énergie absorbée par le rayonnement incident, et émet ensuite un rayonnement thermique d'une longueur d'onde plus longue lorsqu'il est soumis à des températures élevées, comme décrit par la loi de Stefan-Boltzmann. Si cette surface absorbante est directement en interface avec l'atmosphère environnante, les pertes attribuées à la convection peuvent être importantes, en plus des pertes dues

au rayonnement. Par conséquent, un équilibre thermique est établi entre la surface absorbante et l'environnement extérieur, ce qui entraîne une capture d'énergie minimale. Pour atténuer les pertes thermiques par la face postérieure du collecteur, la surface absorbante est positionnée stratégiquement dans une enceinte dont les surfaces internes sont isolées avec un matériau conçu pour minimiser la conductivité thermique.

L'isolation thermique de la face avant est réalisée en interposant entre l'absorbeur et l'air un matériau opaque au rayonnement thermique, mais transparent au rayonnement solaire. Certains types de verre et diverses substances synthétiques présentent une transparence au rayonnement solaire tout en étant opaques au rayonnement infrarouge lointain. Par conséquent, ces matériaux sont utilisés comme revêtements transparents pour les capteurs solaires.

Dans un capteur qui intègre un couvercle transparent, le rayonnement thermique émis par l'absorbeur est absorbé par ce couvercle transparent, qui subit alors une augmentation de température et rayonne ensuite depuis ses deux surfaces. Une partie de ce rayonnement est dissipée dans l'environnement extérieur, tandis que le reste est réémis vers l'absorbeur, contribuant ainsi à l'effet de serre [20].

II.6) Paramètres caractérisent le fonctionnement d'un capteur plan

Ils peuvent être divisés en deux groupes : paramètres externes et internes :

II.6.1) Paramètres externes comprennent

- Paramètre d'ensoleillement : énergie lumineuse en rapport avec le rayonnement global, emplacement du soleil, durée de l'ensoleillement.
- Température extérieure sans humidité.
- Vitesse du vent mesurée par le capteur.

II.6.2) Paramètres internes comprennent

- **Paramètres de forme :**
 - Réglage de position : inclinaison, direction du détecteur.
 - La taille du capteur, qui est un paramètre crucial.
 - Dimensionnement de diverses sections : épaisseur, longueur et largeur.
- **Paramètres de fonctionnement ou Conditions d'opération :**
 - La température à laquelle le fluide entre dans le capteur.
 - Le taux d'écoulement du fluide caloporteur.
 - La température des divers segments du capteur.

Ces attributs revêtent une grande importance puisqu'ils facilitent, à partir du coût, la sélection parmi les diverses sortes de capteurs, y compris : la température de sortie du fluide et la puissance thermique utile du capteur. On envisage d'estimer les températures d'équilibre que l'absorbeur et le vitrage atteindront lorsque le flux du fluide caloporteur sera stoppé [23].

II.7) Rendement du capteur plan

L'efficacité des capteurs plats englobe diverses conceptions et applications, notamment la qualité du matériau, les conditions d'illumination, l'angle d'incidence de la lumière et la technologie utilisée. Le rendement d'un capteur plan fait généralement référence à son efficacité à convertir l'énergie reçue sous forme de lumière (souvent solaire) en énergie électrique.

II.7.1) Energie thermique reçue

L'énergie thermique reçue par un capteur plan, notamment dans le cas d'un capteur solaire, dépend de plusieurs facteurs, dont l'intensité du rayonnement solaire, la surface du capteur et les performances thermiques du système.

II.7.1.1) Rayonnement solaire

L'énergie émise par le soleil se propage vers la terre sous forme de rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement est similaire aux ondes radio, mais dans une gamme de fréquences différente. L'énergie disponible lors du trajet entre le Soleil et l'atmosphère extérieure de la Terre est approximativement égale à 1367 W/m^2 . Ainsi, par temps clair, l'énergie solaire disponible à la surface de la Terre dans la direction du soleil est généralement supérieure ou inférieure à 1000 W/m^2 . À tout moment, la quantité d'énergie solaire disponible dépend principalement de la position du soleil dans le ciel et de la couverture nuageuse.

Le rayonnement solaire total atteignant la surface du capteur comprend le rayonnement direct (rayonnement en ligne droite provenant directement du soleil) et le rayonnement diffus (provenant de manière non isotrope de toutes les directions de l'espace).

II.7.1.2) Captation du rayonnement solaire

On peut capter directement le rayonnement solaire au moyen des panneaux plans (capteurs plans) réceptifs, convenablement équipés dénommés isolateurs.

Les capteurs plats sont considérés comme de simples absorbeurs de rayons solaires provenant de toutes les directions. Le rayonnement solaire est absorbé non seulement par le ciel mais aussi par l'ensemble de l'environnement. Cela signifie que les capteurs planaires sont relativement insensibles aux conditions du ciel. En revanche, la fabrication de capteurs solaires plats ne nécessite pas de conception complexe. Cependant, la conception d'un capteur à effet concentrant repose sur le principe de focaliser le flux solaire incident sur un absorbeur de surface inférieure à la surface d'ouverture du capteur pour augmenter la concentration du rayonnement au niveau de l'absorbeur. Contrairement aux capteurs planaires qui utilisent le rayonnement diffus du ciel et du sol.

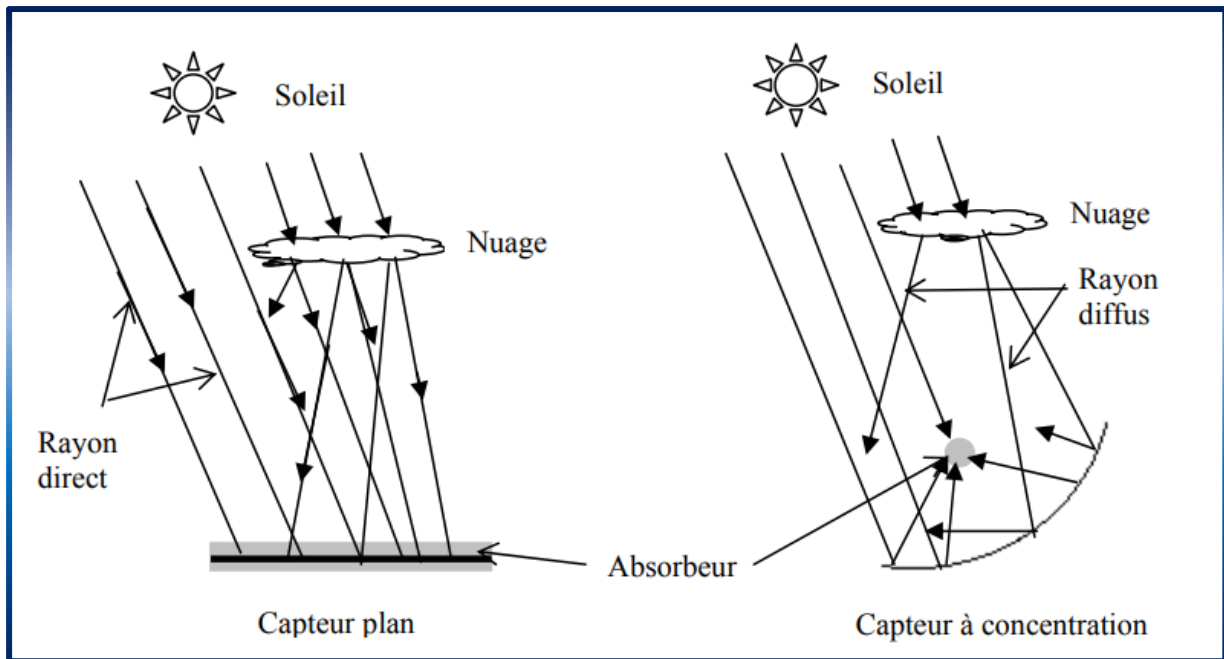


Figure II.5 : Types des capteurs solaires et le principe d'absorption des rayonnements solaires.

II.7.2) Pertes thermiques

La perte thermique associée à un capteur solaire signifie la quantification de l'énergie thermique qui s'échappe sans contribuer à la production. De telles pertes dissipatives peuvent résulter d'une multitude de processus physiques qui influent sur l'efficacité opérationnelle du capteur solaire. Lorsque le rayonnement solaire atteint le récepteur, dépassant les niveaux thermiques ambiants, il déclenche un mécanisme de dissipation thermique du récepteur. Les modes de ces pertes comprennent la convection, le rayonnement et la conduction. Les pertes thermiques sont dues à la différence de température entre les différents constituants du capteur solaire ainsi qu'avec le milieu ambiant. Elles se divisent en trois catégories [24] :

- ❖ Les pertes vers l'avant.
- ❖ Les pertes vers l'arrière.
- ❖ Les pertes latérales.

Avec :

$$Perte\ thermique = K \times (T_m - T_{ext}) \quad (II.18)$$

K: Coefficient de transmission thermique ($W/m^2.K$).

T_m : Température moyenne du capteur (K).

T_{ext} : La température ambiante (K).

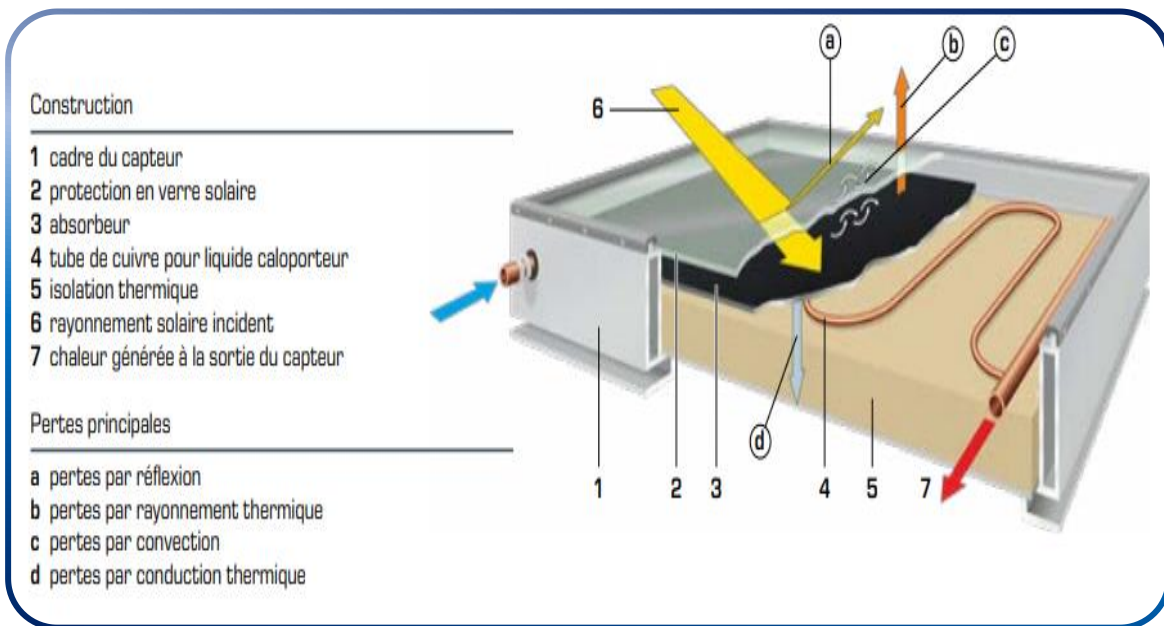


Figure II.6 : Un capteur plan

II.7.3) Energie utile

L'énergie utile d'un capteur solaire dépend du rayonnement solaire, de l'efficacité du capteur et des pertes de chaleur. Ces facteurs doivent soigneusement être optimisés pour augmenter l'efficacité globale du système solaire thermique. Une bonne conception et une bonne maintenance des capteurs ainsi que la prise en compte des conditions climatiques locales sont essentielles pour atteindre un rendement élevé et ainsi obtenir de grandes quantités d'énergie utile.

La chaleur utile qui produit un capteur solaire est la chaleur qui est transmise au fluide thermique qui circule dans les tubes. Cette quantité d'énergie thermique peut être

déterminée en fonction du débit massique du fluide, de sa capacité thermique spécifique ainsi que de sa température d'entrée et de sa température de sortie.

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_s - T_e) \quad (\text{II. 19})$$

Q_u : Chaleur utile du panneau solaire (W).

C_p : Capacité thermique spécifique ($J/Kg \cdot K$).

T_e : Température d'entrée (K).

T_s : Température de sortie (K).

II.7.4) Rendement thermique

Le rendement thermique est un indicateur important pour évaluer les performances des capteurs solaires. Il montre avec quelle efficacité l'énergie solaire reçue est convertie en chaleur utile. Un rendement élevé signifie que le système est efficace, tandis qu'un rendement faible indique la nécessité d'améliorations, que ce soit dans la conception, les matériaux ou les conditions d'utilisation.

L'efficacité thermique d'un capteur solaire plan est égale au rapport entre le flux utile récupéré et l'éclairement incident total reçu par la surface du capteur.

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{A_c \cdot I_c} \times 100 \quad (\text{II. 20})$$

η_{th} : Rendement thermique (%)

A_c : Surface du capteur (m^2).

I_c : L'irradiation solaire moyenne incidente sur la surface du capteur (W/m^2).

II.8) Amélioration des Performances des Capteurs Solaires Plans

L'amélioration de l'efficacité des capteurs solaires plats implique principalement l'atténuation des pertes thermiques survenant entre l'absorbeur et l'environnement. Plusieurs approches ont été développées.

Dans le cas des obstacles fixés sur l'isolant, le choix des formes géométriques d'obstacles doit respecter des critères spécifiques. En effet, la morphologie et la disposition de ces obstacles influencent de manière significative la dynamique du flux d'air tout au long de sa trajectoire. Ces obstacles facilitent une irrigation adéquate de l'absorbeur, créent la turbulence et réduisent les zones inactives dans le collecteur. Par exemple, A. Ahmed-Zaïd, A. Moulla, M. S. Hantala et J.Y. Desmons [25] Une comparaison est faite entre les résultats obtenus avec le capteur solaire équipé d'obstacles et avec le capteur sans obstacles. Les différentes formes étudiées sont simples et intéressantes, comme le montrent les figures II.7, figure II.8, les chicanes Delta Cintrées Longitudinalement (DCL), Ogivales Cintrées Longitudinalement (OCL).



Figure II.7 : Disposition des obstacles DCL.

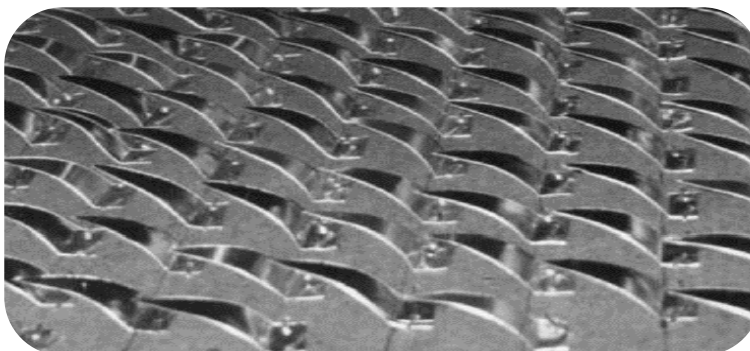


Figure II.8 : Disposition des obstacles OCL.

II.9) Les avantages et inconvénients d'un capteur plan

II.9.1) Avantages

- Energie gratuite et abondante.
- Efficacité énergétique.
- Une longue durée de vie, ce qui en fait un investissement rentable à long terme.
- Adaptabilité.
- Respect de l'environnement.
- Matériaux très résistants.

II.9.2) Inconvénients

- Prix d'achat élevé.
- La production dépend directement de la lumière du soleil. Dans les zones où l'ensoleillement est faible ou saisonnier, leur performance peut être moins satisfaisante, limitant leur utilisation dans certaines zones.
- Capacité de stockage d'énergie limitée.

II.10) Recherche bibliographique

En 1998, les chercheurs **Young et al** [26] ont réalisé une étude numérique sur la convection forcée d'un fluide compressible dans un canal avec une rangée d'obstacles chauffés fixés à la paroi inférieure pour observer les effets de paramètres tels que le nombre de Reynolds, la hauteur, la largeur et l'espacement des obstacles et la conductivité thermique. Les résultats montrent que ces paramètres ont un impact significatif sur les changements du nombre de Nusselt moyen, de la structure de l'écoulement et de la répartition de la température à l'intérieur du fluide.

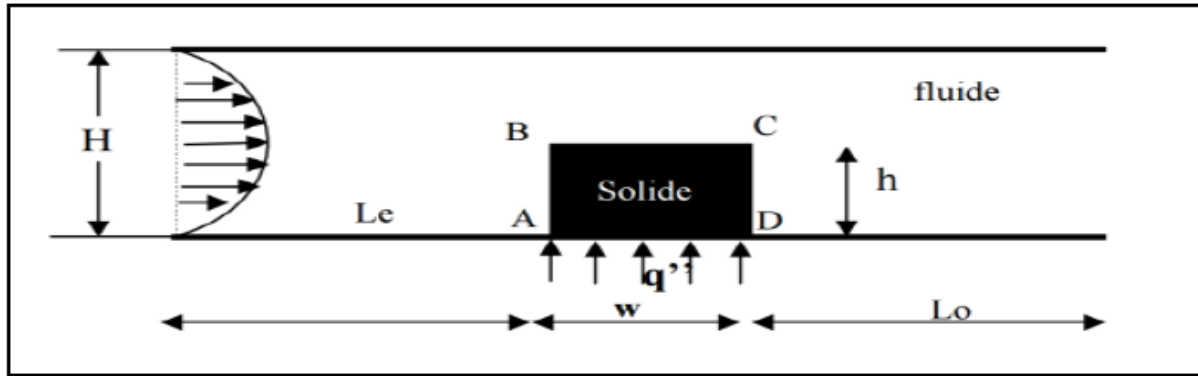


Figure II.9: Canal contenant un seul obstacle chauffé.

Ho et al [27] ont mené une étude numérique concernant les phénomènes de convection dans une cavité activée thermiquement qui est remplie d'un nanofluide $Al_2O_3 - eau$. Leurs résultats indiquent que les résultats obtenus ont un impact significatif sur les caractéristiques de transfert thermique. Ils ont effectué des simulations sur des nombres de Reynolds allant de 103 à 106 et pour une fraction volumique allant de 0% à 4%. Ils ont alors relevé que le recours à l'une ou l'autre des relations donnant les grandeurs thermo physiques du nanofluide conduit à des résultats différents pour le transfert de chaleur dans cette configuration.

Maiga et al [28] ont présenté un travail numérique sur la mesure du coefficient de transfert convectif de nanofluides à flux laminaire dans des tubes circulaires. Pour mener cette étude, ils ont choisi l'eau comme fluide de base et l'oxyde d'aluminium avec une concentration volumique comprise entre 0 % et 10 % comme nanoparticules. Les résultats ont montré que l'ajout de nanoparticules entraînait une augmentation significative du flux de chaleur. Ces formules sont valables pour des Reynolds inférieurs à 1000 et des Prandtl compris entre 6 et 753.

Khanafer et al [29] ont réalisé une étude numérique sur la convection naturelle de nanofluides confinés dans une enveloppe chauffée différemment. Les résultats montrent que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules.

Jou et Tzeng [30] a utilisé le modèle Khanafer pour mener une étude numérique de la convection naturelle des nanofluides dans une enceinte rectangulaire. Ils ont démontré que l'augmentation de la fraction volumique améliore le transfert de chaleur.

Behnampour et al [31] Ils ont étudié numériquement les effets des fluctuations rectangulaires, triangulaires et trapézoïdales sur le transfert de chaleur laminaire du nanofluide dans le canal sous flux thermique constant. Les résultats montrent que la forme rectangulaire a fait plus d'efficacité dans les lignes de courant et que la forme triangulaire a la meilleure valeur de critère d'évaluation des performances thermiques et les trapézoïdales sont recommandées dans les nombres de Reynolds élevés.

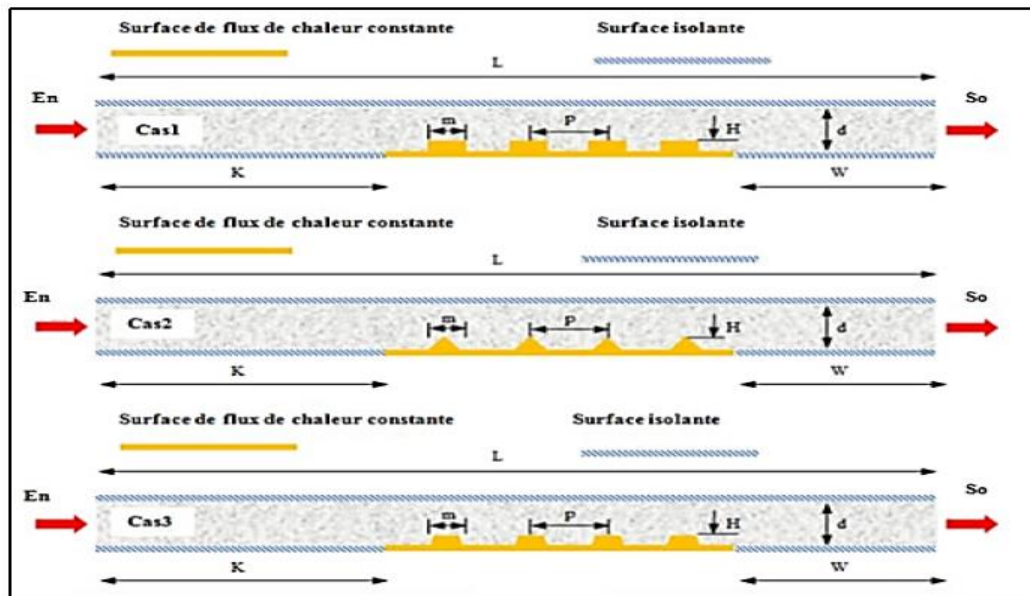


Figure II.10 : Schéma des micro-canaux étudiés

Ahmed et al [32] ont étudié numériquement et expérimentalement le transfert de chaleur par convection du nanofluide $SiO_2 - eau$ circulant dans des canaux de formes différentes avec des nombres de Reynolds allant de 400 à 4000. Trois canaux différents, trapézoïdaux, sinusoïdaux et droits, ont été fabriqués et testés. Leurs résultats ont montré que lorsque la fraction volumique de nanoparticules augmentait, le nombre moyen de Nusselt et l'amélioration du transfert de chaleur augmentaient, le canal ondulé trapézoïdal présentant l'amélioration de transfert de chaleur la plus élevée, suivi du canal ondulé sinusoïdal et du canal droit.

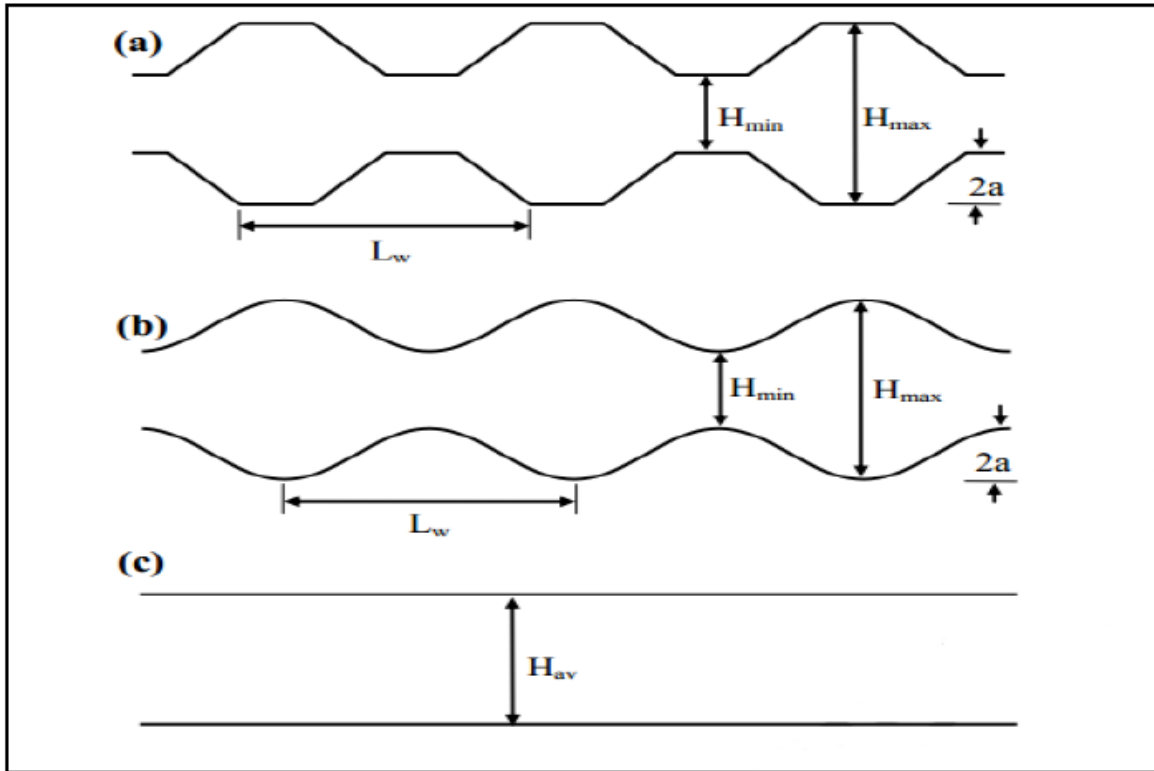


Figure II.11 : Géométrie des problèmes étudiés

Ahmed et al [34] ont mené une étude numérique sur les caractéristiques d'écoulement laminaire des nanofluides cuivre-eau et les phénomènes de transfert de chaleur associés dans un canal ondulé bidimensionnel. Le nombre de Reynolds a été manipulé entre 100 et 800, tandis que la fraction volumique des nanoparticules a varié de 0 % à 5 %. L'impact de la fraction volumique des nanoparticules, de l'amplitude du canal d'onde, de la longueur d'onde et du nombre de Reynolds sur le coefficient de frottement, le nombre de Nusselt local et moyen, ainsi que sur l'amélioration du transfert de chaleur, est méticuleusement présenté et analysé. Les résultats indiquent que le coefficient de frottement et le nombre de Nusselt présentent une tendance à la hausse à mesure que l'amplitude du canal d'onde augmente. Une augmentation de la fraction volumique des nanoparticules entraîne une augmentation significative du nombre de Nusselt, qui ne s'accompagne que d'une augmentation marginale du coefficient de frottement. De plus, il a été constaté que l'amélioration du transfert de chaleur dépend principalement de la fraction volumique des nanoparticules, de l'amplitude de la paroi ondulée et du nombre de Reynolds plutôt que de la longueur d'onde. Par conséquent, l'incorporation de

nanofluides à la place des fluides caloporteurs classiques dans un canal comportant une paroi ondulée peut potentiellement permettre d'améliorer encore l'efficacité thermique des échangeurs de chaleur.

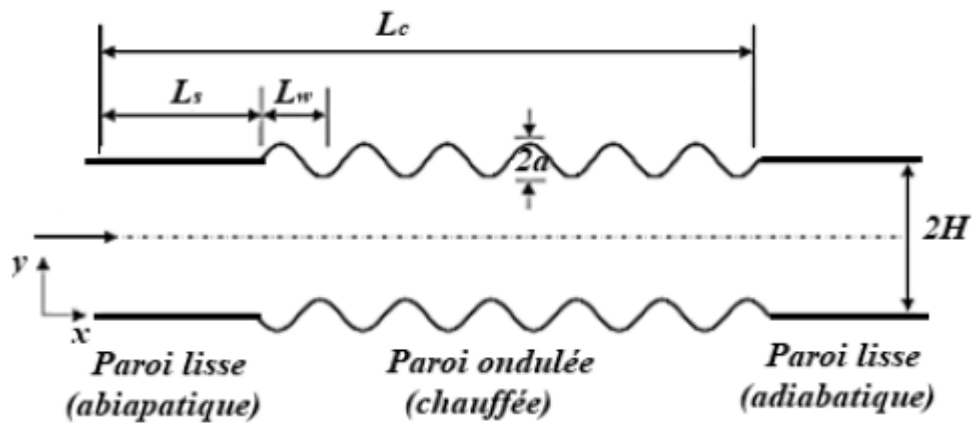


Figure II.12 : Schéma simplifié du modèle physique

D'autres travaux d'**Ahmed et al** [35], ont réalisé une exploration numérique du transfert de chaleur par convection forcée laminaire d'un nanofluide cuivre-eau dans un canal trapézoïdal ondulé. Dans cette étude, le nombre de Reynolds était compris entre 100 et 700, et la fraction volumique de nanoparticules était comprise entre 0 % et 5 %. Les effets de paramètres géométriques tels que l'amplitude et la longueur d'onde du canal d'onde, la fraction volumique des nanoparticules et le nombre de Reynolds sur le vecteur vitesse, le profil de température, la chute de pression et le nombre de Nusselt moyen sont proposés et analysés.

Les résultats montrent que le nombre de Nusselt moyen augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules et de l'amplitude des canaux ondulés, mais cette amélioration s'accompagne d'une augmentation de la perte de charge. De plus, à mesure que la longueur d'onde du canal ondulé diminue, le nombre de Nusselt moyen augmente et la perte de pression diminue. Par conséquent, il peut être suggéré de concevoir un échangeur de chaleur plus compact avec des performances thermiques plus élevées et plus importantes.

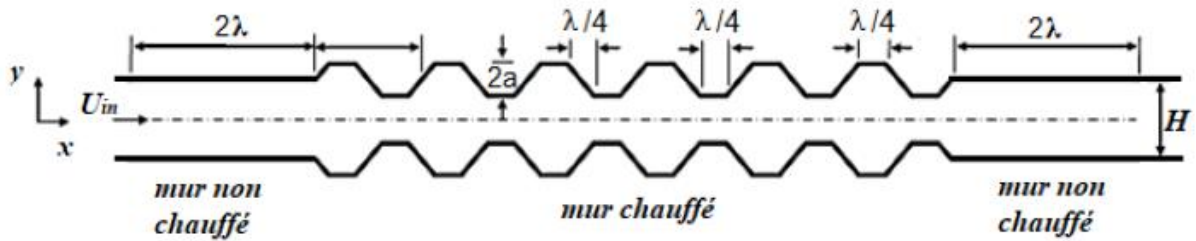


Figure II.13: Géométrie du problème étudié

Ahmed et al [35] Trois formes différentes de canaux ondulés ont été prises en compte dans cette étude : sinusoïdale, triangulaire et trapézoïdale, comme le montre la (figure II.14). Les résultats montrent que le nombre de Nusselt moyen et le facteur de performance thermique augmentent avec la fraction volumique des nanoparticules et le nombre de Reynolds pour les trois types de canaux étudiés. De plus, la chute de pression sans dimension augmente avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules et diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds pour tous les canaux. Le canal trapézoïdal présente le nombre de Nusselt le plus élevé, suivi du canal sinusoïdal, du canal triangulaire et du canal droit.

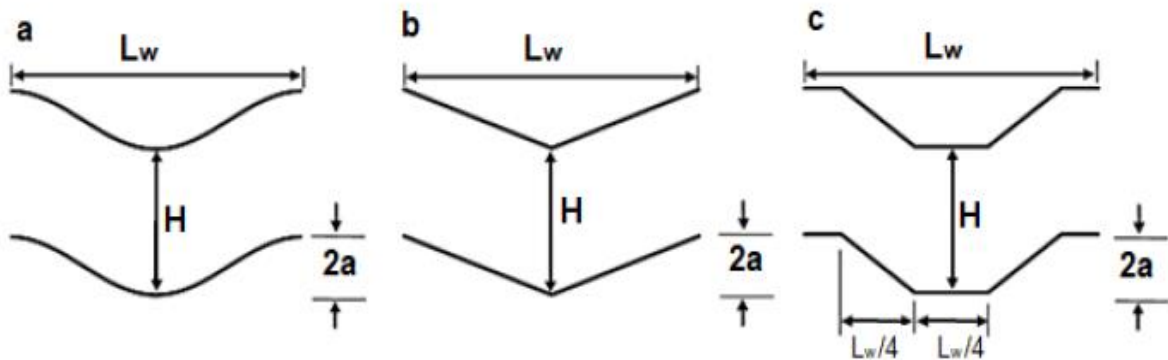


Figure II.14 : Domaine physique étudié : (a) Canal sinusoïdal, (b) Canal triangulaire, (c) Canal trapézoïdal.

II.11) Conclusion

Dans ce chapitre, nous fournissons un résumé des panneaux solaires thermiques, expliquant leur importance et les types disponibles. Les capteurs solaires thermiques à plaque plane représentent une option rentable et durable pour exploiter l'énergie solaire, bien qu'il soit important d'évaluer soigneusement leurs limites en fonction des besoins spécifiques et des conditions climatiques locales.

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1) Introduction

Ce logiciel est considéré parmi les logiciels de simulation les plus puissants actuellement. L'analyse et la conception sont effectuées sous le code ANSYS. Le logiciel ANSYS est conçu spécifiquement pour la dynamique des fluides calculée (CFD).

La CFD, ou « Computational Fluid Dynamics », qui se traduit en français par Dynamique des Fluides Numérique, regroupe un ensemble de techniques numériques destinées à fournir une solution approximative pour les problèmes liés à la dynamique des fluides et au transfert thermique. Tel que les équations de la mécanique des fluides sont résolues par des techniques numériques.

Il offre aussi la possibilité de réduire les conjectures, et l'approche analytique facilite la résolution de problèmes d'une certaine complexité. De plus, cela coûte beaucoup moins cher qu'une méthode expérimentale.

Cependant, cela est contraint par la séquence des méthodes numériques employées, ce qui implique l'arithmétique et le modèle de précision. Les avancées et les améliorations réalisées dans les techniques numériques, en particulier

III.2) Procédure de la simulation et présentation du modèle physique

L'usage d'un nano fluide avec des caractéristiques thermo-physiques inférieures comme fluide de transfert thermique en convection forcée dans les convertisseurs solaires thermiques nécessite un écoulement turbulent pleinement établi.

Les équations principales comprennent l'équation de conservation de la masse, les équations de Navier-Stokes, l'équation de conservation de l'énergie pour le fluide et le solide, ainsi que les équations liées à la turbulence.

III.2.1) Hypothèses

Pour modéliser la convection forcée turbulente d'un nanofluide dans les convertisseurs thermiques solaires, les hypothèses suivantes sont adoptées :

1. **Écoulement turbulent pleinement développé** – En raison des faibles propriétés thermo-physiques des nanofluides, un régime turbulent est considéré pour améliorer le transfert thermique.
2. **Fluide Newtonien et incompressible** – Le nanofluide suit une loi de comportement newtonienne, et sa densité est supposée constante (approximation d'incompressibilité).
3. **Propriétés thermo-physiques constantes** – Les caractéristiques du fluide (viscosité, conductivité thermique, etc.) sont supposées indépendantes de la température (sauf pour les termes de flottabilité en convection mixte).
4. **Effets de dissipation visqueuse négligeables** – L'échauffement dû aux frottements visqueux est considéré comme faible devant les autres transferts d'énergie.
5. **Adhérence pariétale (condition de non-glissement)** – La vitesse du fluide est nulle aux parois solides.
6. **Équilibre thermique particules/fluide** – Les nanoparticules sont en équilibre thermique avec le fluide de base (pas de retard de température).

Ces hypothèses permettent de simplifier les équations gouvernantes (masse, Navier-Stokes, énergie et turbulence) tout en conservant une modélisation physiquement représentative du système.

Donc les équations simplifiées régissant le phénomène d'écoulement seront comme suit :

a) Equation de continuité :

En tenant compte des hypothèses précédentes, l'équation de continuité (III.1) se réduit à

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0 \quad (\text{III.1})$$

Sous forme développée :

$$\frac{\partial}{\partial x} u + \frac{\partial}{\partial y} v + \frac{\partial}{\partial z} w = 0 \quad (\text{III.2})$$

b) Equation de mouvement :

Suivant l'axe (OX) :

$$\rho u \frac{\partial x}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) + \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_t) + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \quad (\text{III.3})$$

Suivant l'axe (OY) :

$$\rho u \frac{\partial x}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) + \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_t) + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \quad (\text{III.4})$$

Suivant l'axe (OZ) :

$$\rho u \frac{\partial x}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) + \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[(\mu + \mu_t) + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \quad (\text{III.5})$$

c) Conservation d'énergie dans le fluide :

$$\rho u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v \frac{\partial T}{\partial y} + \rho w \frac{\partial T}{\partial z} = - \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (\text{III.6})$$

d) Conservation d'énergie dans la paroi :

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (\text{III.7})$$

III.2.2) Méthode des volumes finis

Dans la méthode des volumes finis, on divise le domaine en un nombre limité de volumes de contrôle qui englobent la zone d'étude. Des lois de conservation sont mises en œuvre sur chaque volume de contrôle ou cellule pour établir les diverses variables associées au problème à des points (ou nœuds) qui ne s'alignent pas obligatoirement sur les points du maillage ou de la grille. Dans cette approche, il existe une variété d'options pour le choix des volumes de contrôle et des nœuds (centré sur la cellule, centré sur le vertex, nœud-vertex...) qui seront abordées

ultérieurement dans ce document. Le maillage utilisé pour le calcul peut être structuré ou non, comme dans le cas de l'usage d'éléments finis, ce qui confère une grande flexibilité à la méthode.

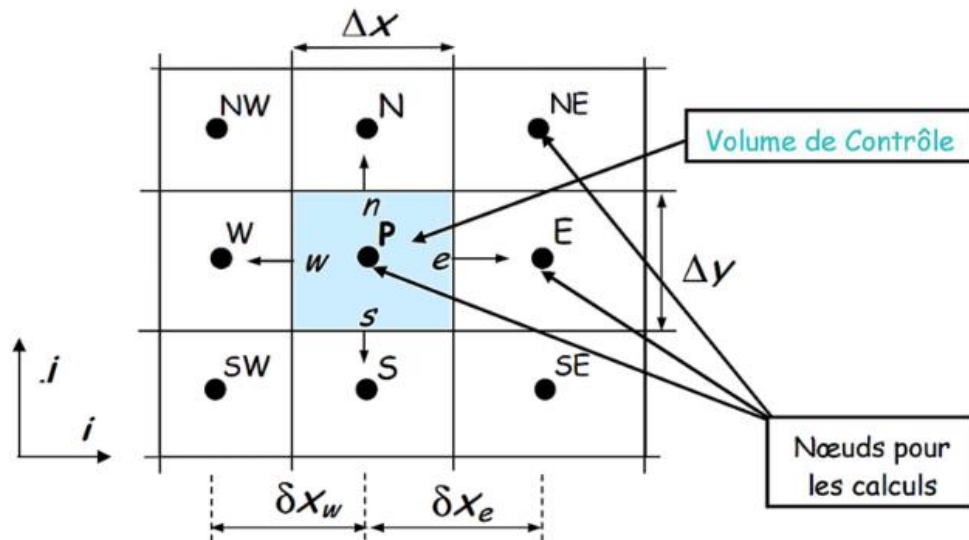


Figure III.1 : Maillage Volumes finis structurés.

Un des principaux bénéfices de cette approche est que la discrétisation spatiale se réalise directement sur le domaine physique. Ainsi, il n'y a pas de conversion nécessaire entre divers systèmes de coordonnées, comme c'est le cas en analyse par éléments finis où l'on doit réaliser une transformation de l'élément réel à l'élément de référence pour lequel les fonctions de forme sont connues. La situation est similaire pour la méthode des différences finies lorsqu'une grille non cartésienne est utilisée. À l'inverse des méthodes de différences finies, cette technique est applicable sur des maillages qui sont structurés ou pas. L'approche de type volumes finis, qui repose sur une discrétisation des lois de conservation, garantit que ces lois sont naturellement respectées au niveau des volumes de contrôle par le biais du schéma numérique. Cette caractéristique est cruciale lors du traitement de chocs (ou d'autres formes de discontinuités), car elle assure que les relations de Rankine-Hugoniot seront respectées par la méthode.

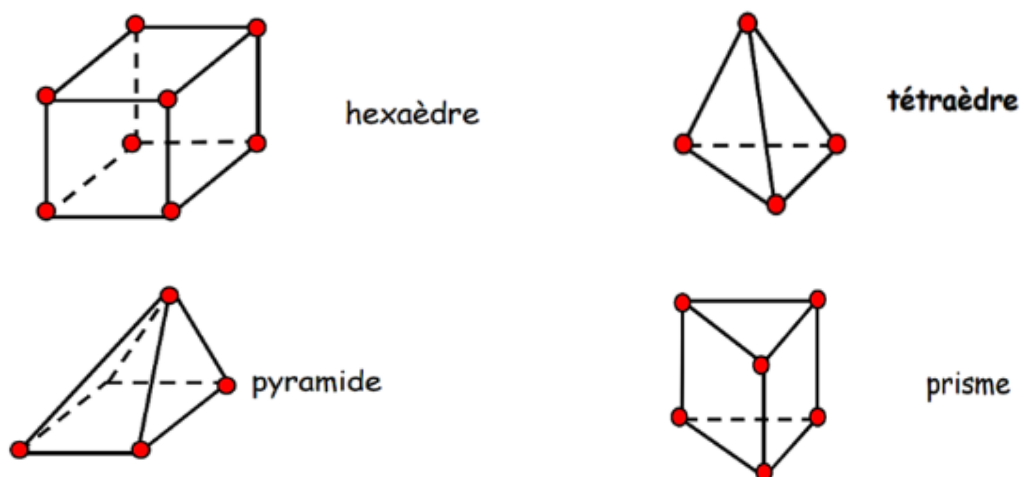
La simplicité de mise en œuvre alliée à la souplesse pour représenter des géométries complexes en fait la méthode la plus utilisée actuellement en Mécanique des fluides dans

les codes de calcul commerciaux (FLUENT, STAR CD, PHOENICS, CFDFASTRAN, CFD, KIVA...).

III.2.2.1) Maillages non structurés

Cette catégorie de maillage offre la plus grande flexibilité dans la construction de géométries complexes. En effet il est toujours possible de créer des maillages de manière automatique avec des triangles en 2D (et des tétraèdres en 3D et ce, quel que soit la complexité de l'enveloppe du domaine. En pratique on préfère utiliser des quadrangles et des hexaèdres qui permettent d'obtenir une meilleure précision dans les calculs.

Types d'éléments 3D :



La construction de maillages non structurés est en général beaucoup plus simple et plus rapide à mettre en œuvre dans un contexte de calculs Industriels. Il est aussi plus facile de raffiner localement certaine partie du domaine.

III.2.2.2) Notion de maillage

Définition :

Il s'agit de la division du domaine d'étude en grilles longitudinales et transversales, dont l'intersection représente un nœud où se trouvent la variable P ainsi que les éléments u et v du vecteur vitesse, qui se situe au centre des segments reliant deux nœuds voisins. La discrétisation du domaine se réalise grâce à un maillage formé d'un ensemble de points (nœuds). Par conséquent, un volume de contrôle est défini autour de chaque

point. Dans le nœud P du maillage, la figure illustre que les grandeurs scalaires de pression et de température sont conservées, tandis que les grandeurs vectorielles u et v sont enregistrées au centre des segments qui relient les nœuds. L'équation générale du transport est appliquée sur le volume de contrôle correspondant aux variables scalaires, tandis que les équations de mouvement sont appliquées sur le volume de contrôle dédié aux composantes de vitesse.

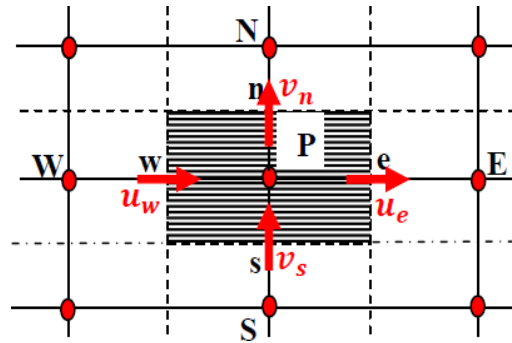


Figure III.2: Schéma du maillage.

Le volume de contrôle de la composante longitudinale u est décalé suivant la direction X par rapport au volume de contrôle principale, figure (III.3.a), celui de la composante transversale v est décalé suivant la direction de Y, figure (II.3.b). Ce type de maillage dit “maillage décalé permet une bonne approximation des flux convectif set une meilleure évaluation des gradients de pression ainsi qu’une stabilisation numérique de la solution [39].

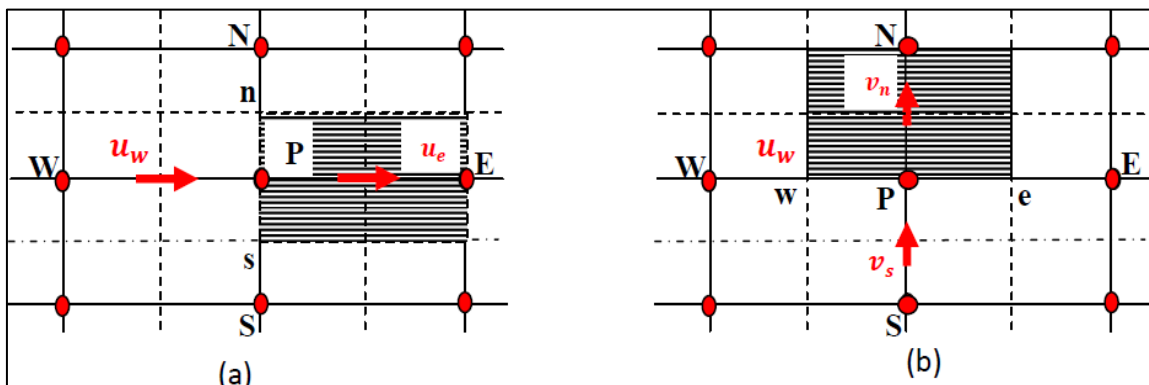


Figure III.3 : Schéma du maillage. (a): Maillage décalé pour u_e , (b): Maillage décalé pour v_n .

III.3) Procédures du calcul

III.3.1) Présentation de logiciel ANSYS Workbench

ANSYS Workbench présente une plateforme de simulation numérique intégrée développée par ANSYS Inc.

Il est un environnement unifié pour intégrer différents types d'analyses (multi-physiques) et il permet de chaîner des simulations thermique et mécanique). Elle permet aussi de réaliser des analyses par éléments finis (FEA), des simulations CFD (Computational Fluid Dynamics), des analyses thermiques, structurelles, électromagnétiques et multi physiques.

Il y a plusieurs codes industriels performants qui permettent de prédire les écoulements de fluides (FLUENT, CFX, PHOENICS, FEMLAB, CFD-ACE, FLOTRAN, CFDS-FLOW3D...). Nous avons opté pour le code de calcul afin d'effectuer nos simulations.

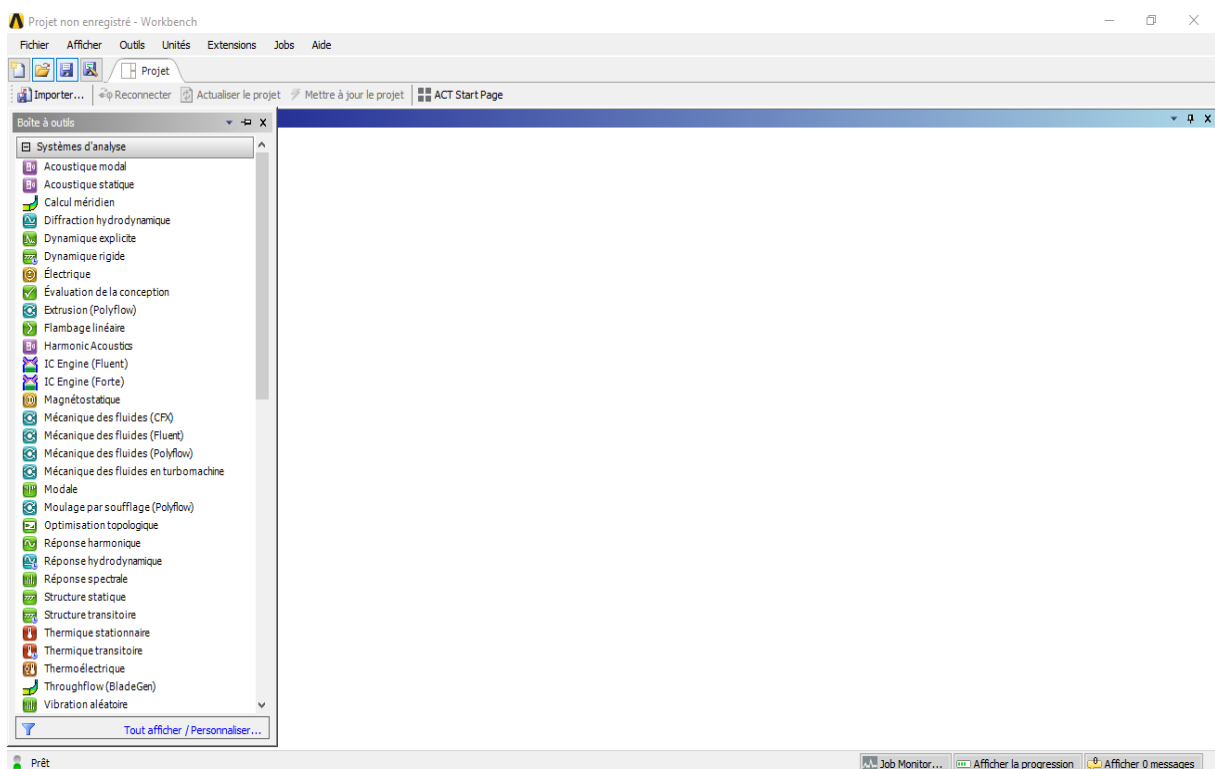


Figure III.4 : Menu principal de Workbench.

La barre d'outils permet d'accéder à une multitude de système analytiques. Lancer une analyse dans le domaine de la mécanique des fluides (fluent) dans le schéma du projet (Figure III.5).

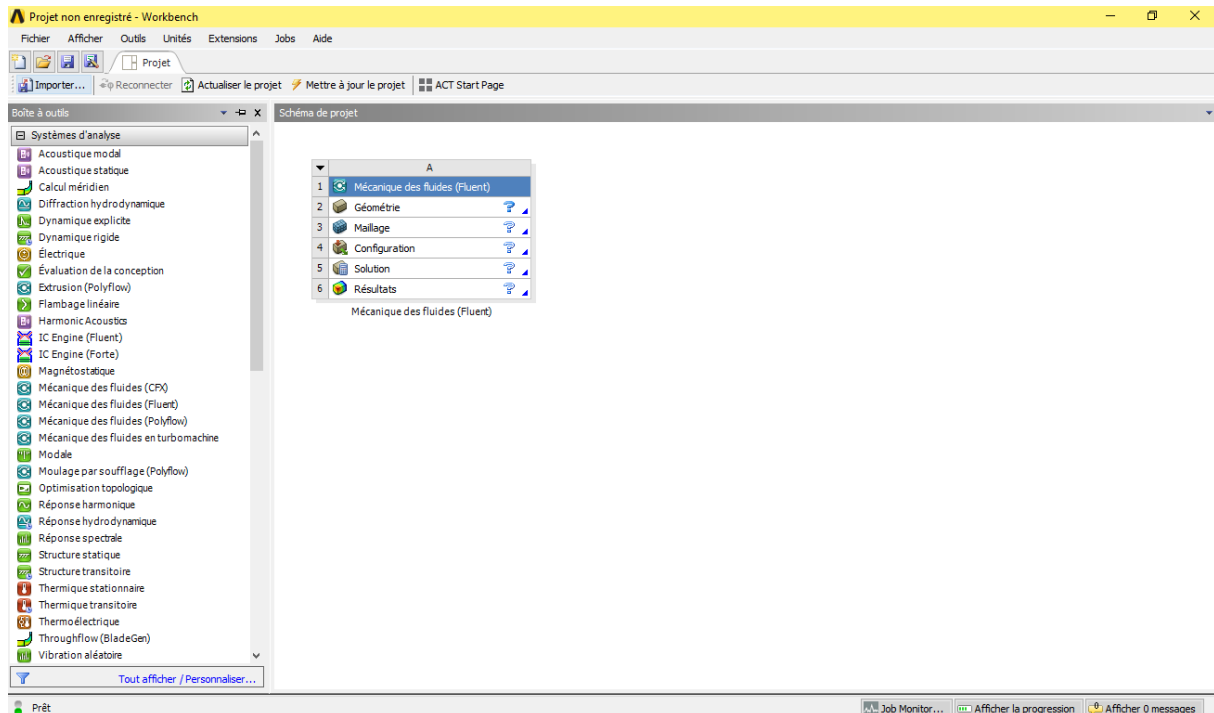


Figure III.5 : Création d'un projet en mécanique de fluide.

Le tableau créé constitué de 5 étapes :

- **Géométrie** : Cette fonction est utilisée pour l'importation, la création, la modification d'un modèle à des fins d'analyse.
- **Maillage** : Cette cellule est liée à la délimitation des propriétés géométriques, des systèmes de coordonnées, des interconnexions et des processus de maillage dans le module de simulation mécanique.
- **Configuration** : Il permet de spécifier les charges, les conditions aux limites et les différentes configurations pertinentes pour l'analyse.
- **Solution** : La cellule de solution facilite l'accès aux données relatives aux résultats du processus de résolution.
- **Résultats** : Cette cellule montre les résultats obtenus lors du processus analytique.

III.3.1.1) Conception numérique du modelé étudié

Toute simulation CFD commence par la réalisation de la géométrie en 2D ou 3D, soit avec un logiciel intégré au code de calcul CFD soit à l'aide d'un logiciel de CAO. Dans le deuxième cas, la géométrie doit être exportée en un format lisible par le logiciel de maillage. Les formats step ou iges sont les plus couramment utilisés.

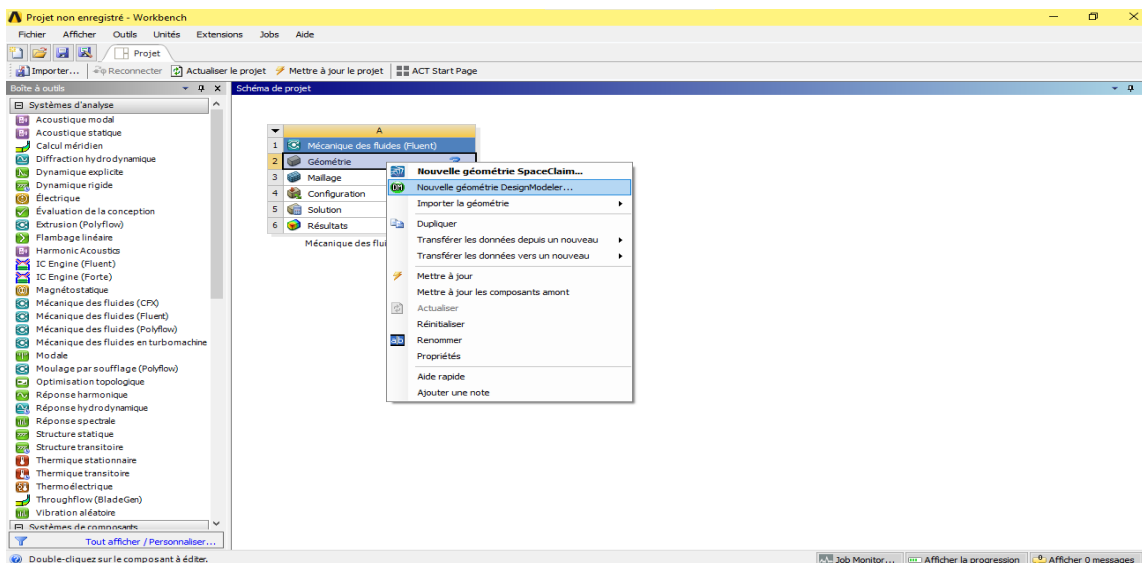


Figure III.6 : Création de géométrie.

Tu es dans ANSYS Workbench. Tu as effectué un clic droit sur le bloc Géométrie du module « Mécanique des fluides (Fluent) » puis tu as sélectionné : « Nouvelle géométrie DesignModeler ».

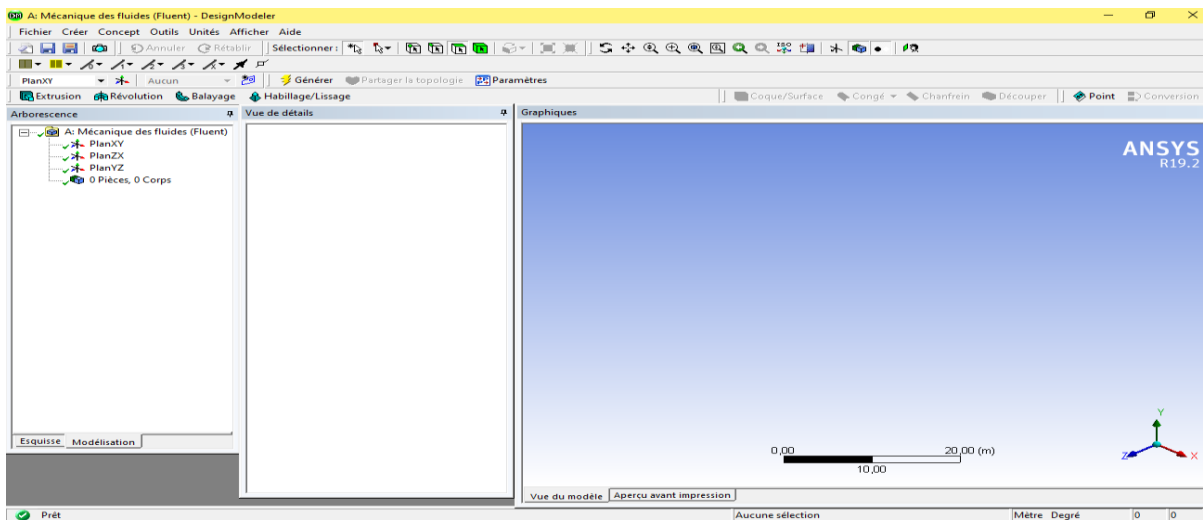


Figure III.7 : DesignModeler

Cela signifie que tu souhaites générer une nouvelle forme 2D ou 3D en utilisant l'éditeur DesignModeler, qui offre la possibilité de tracer la configuration de la pièce sur laquelle tu vas modéliser le mouvement des fluides.

Voici l'interface de DesignModeler une fois ouverte. Actuellement : Le plan de dessin choisi est le Plan XY.

Aucune esquisse ou forme modélisée n'est encore disponible.

Sur la gauche, tu peux apercevoir les différents plans de travail (Plan XY, Plan ZX, Plan YZ) dans l'arborescence.

Sur la droite, l'aire de travail graphique est toujours inoccupée, en attente d'une esquisse.

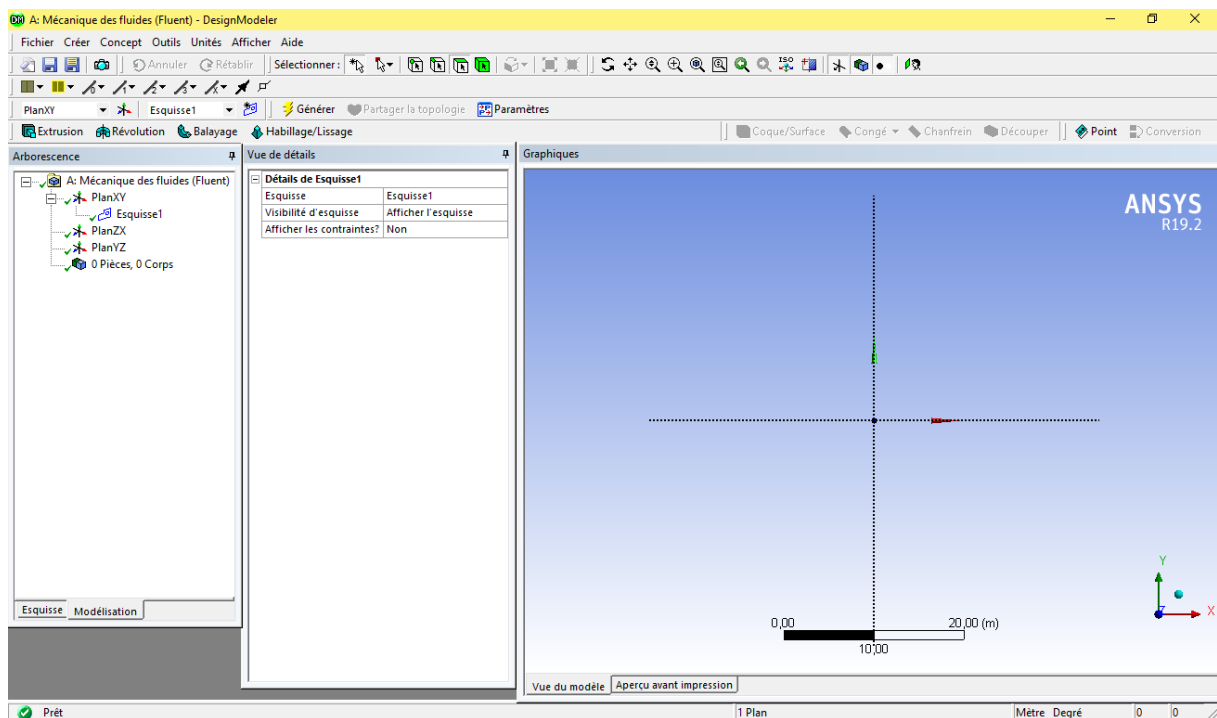


Figure III.8 : DesignModeler – Création de géométrie.

Un plan de travail (Plan XY) avec une esquisse active (Esquisse1).

Cette étape est utilisée pour dessiner la géométrie 2D ou 3D de l'objet à simuler. Ici, on est en train de créer une esquisse qui sera probablement extrudée ensuite pour former un solide.

Le module de gauche montre l'arborescence avec les plans de référence et l'esquisse active.

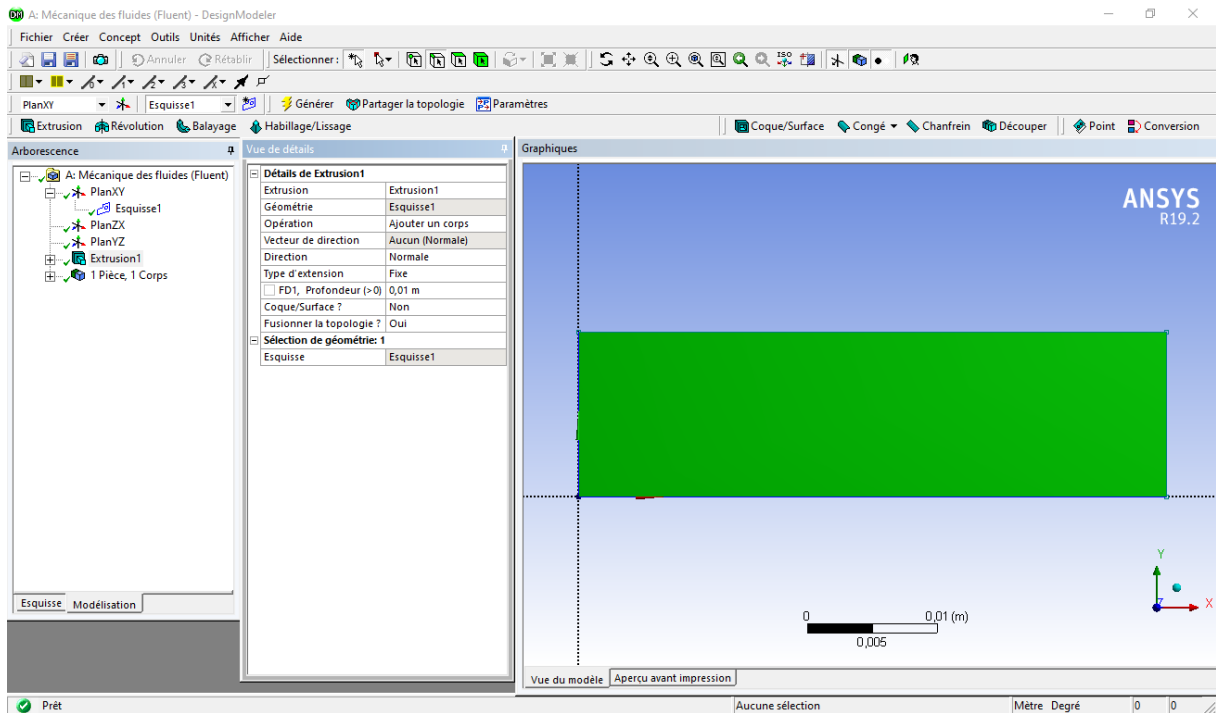


Figure III.9 : Géométrie du problème.

III.3.1.2) Maillage

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu son influence sur la solution calculée. Un maillage de très bonne qualité est essentiel pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et significatif. La qualité du maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul. Une bonne qualité de maillage repose sur la minimisation des éléments présentant des distorsions (skewness en anglais), et sur une bonne « résolution » dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc,...). Un bon maillage doit également être suffisamment « lisse ».

Après l'achèvement de la première étape, nous passons directement à l'étape suivante, qui est l'étape du maillage où, à ce stade, la géométrie est divisée en très petites parties pour faciliter le processus d'étude.

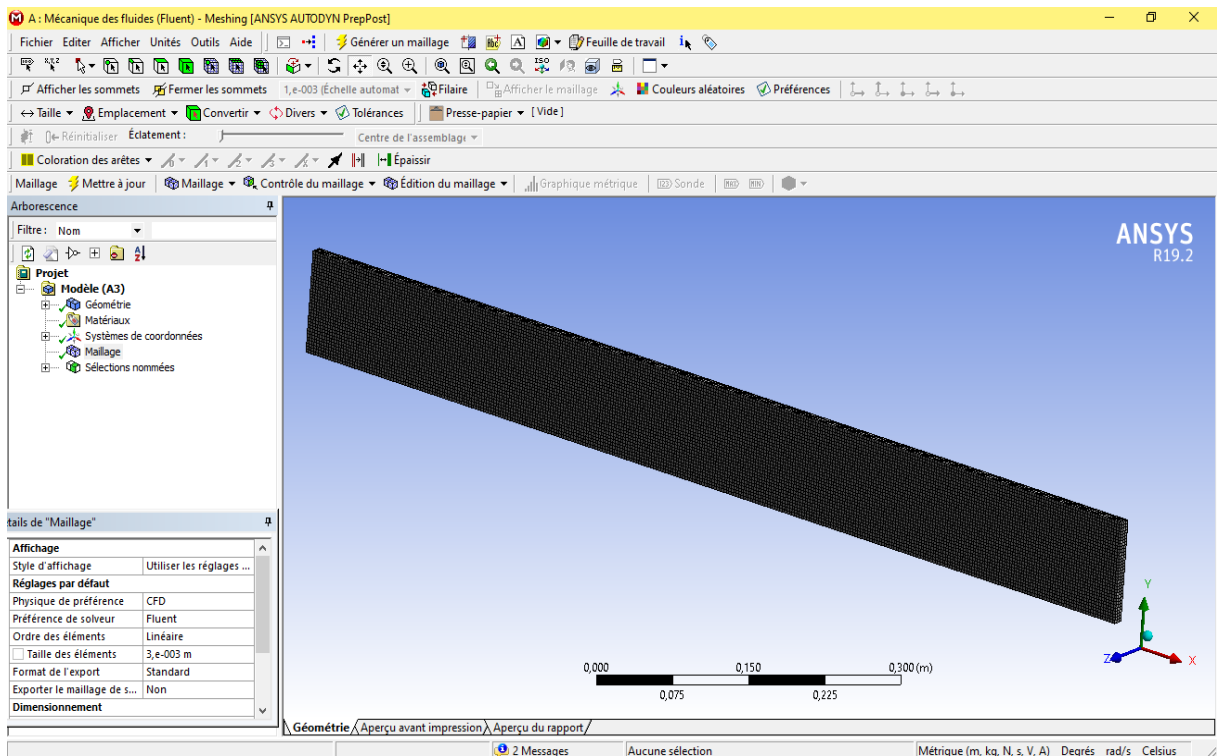


Figure III.10 : Maillage de la géométrie d'un canal sans chicanes.

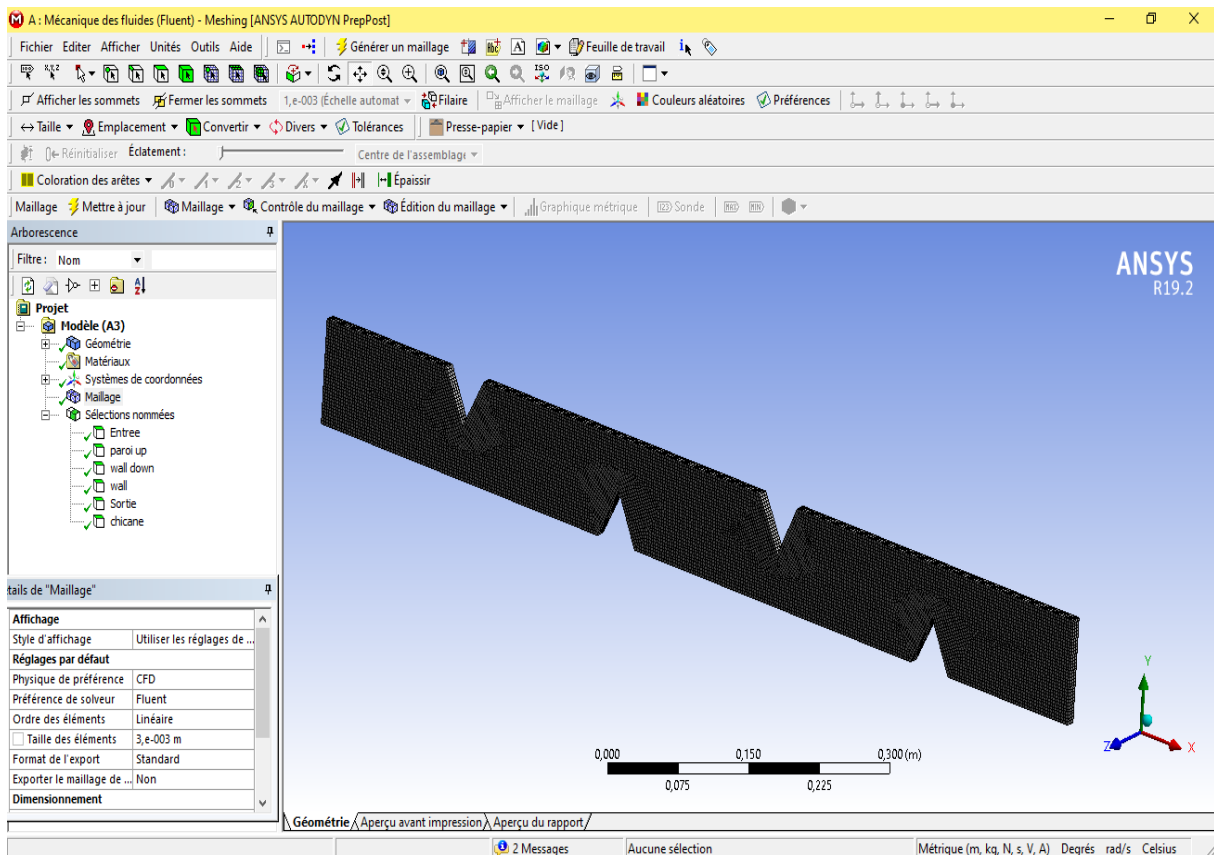


Figure III.11 : Maillage de la géométrie d'un canal avec des chicanes triangulaires.

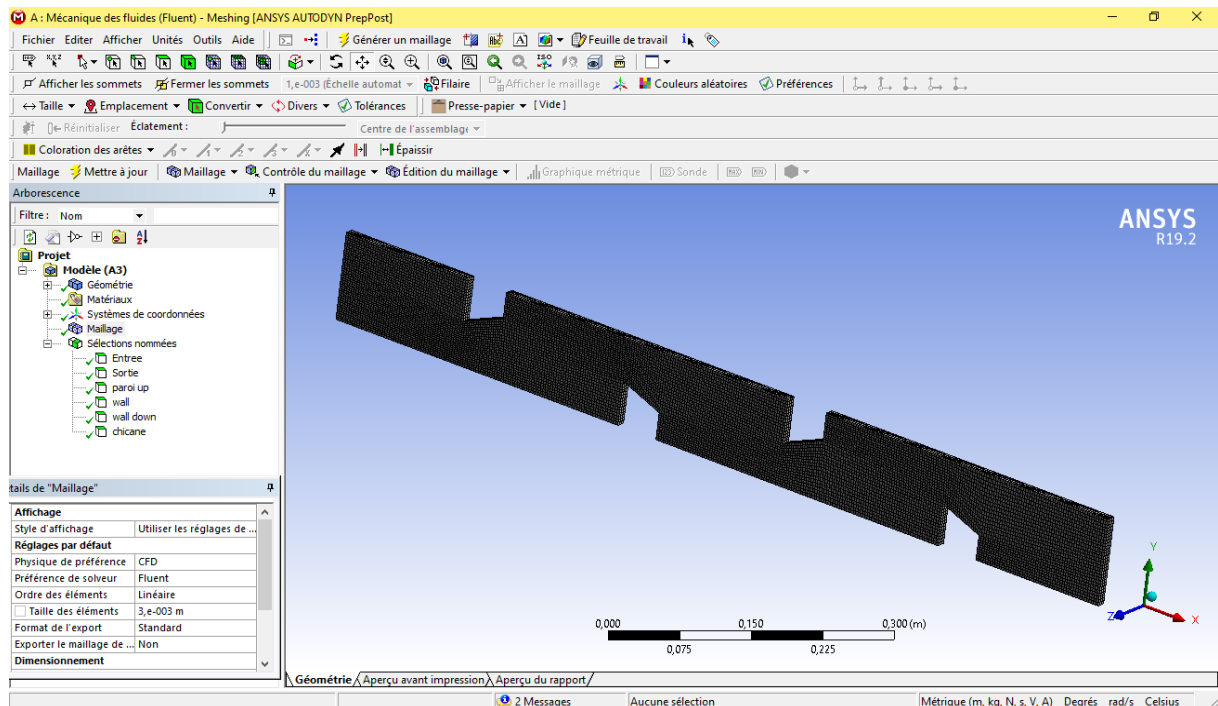


Figure III.12: Maillage de la géométrie d'un canal avec des chicanes trapèzes rectangles verticaux.

Une géométrie discrétisée (maillée) avec des cellules (éléments).

Cette étape est cruciale pour la discrétisation de la géométrie, ce qui permet la résolution numérique des équations de Navier-Stokes par le solveur CFD.

Particularités :

Maillage relativement fin avec des éléments de taille environ 0.003 m.

On voit des obstacles ou chicanes dans un canal.

Des zones sont nommées : Entrée, Sortie, drop up, chicane, etc.

III.3.1.3) Configuration

Les sélections désignées sont systématiquement exposées, ce qui suscitera une demande concernant les conditions limites.

- ❖ **Model:** Equation de l'énergie.

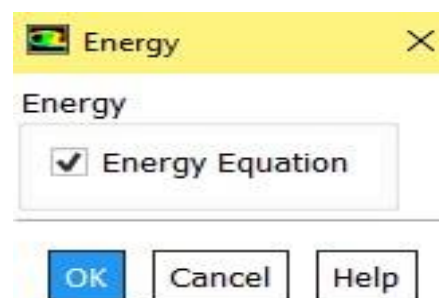


Figure III.13 : Equation de l'énergie

- ❖ **Matériels:** Les propriétés thermiques et physiques pour fraction volumique 3% de nanofluide $Al_2O_3 - eau$.

The screenshot shows the 'Create/Edit Materials' dialog box. The 'Name' field contains 'al2o3-eau'. The 'Material Type' is 'fluid'. The 'Chemical Formula' field is empty. The 'Fluent Fluid Materials' dropdown is set to 'al2o3-eau'. The 'Mixture' dropdown is set to 'none'. The 'Order Materials by' section has 'Name' selected. The 'Properties' section is expanded, showing the following values: Density (kg/m3) is constant at 1085; Cp (Specific Heat) (j/kg-k) is constant at 3804; Thermal Conductivity (w/m-k) is constant at 0.66915; and Viscosity (kg/m-s) is constant. At the bottom, there are buttons for 'Change/Create', 'Delete', 'Close', and 'Help'.

Figure III.14 : Création les données du nanofluide $Al_2O_3 - eau$.

- ❖ **Boundary Conditions:** Nous avons défini les conditions aux limites.








- ▾  Boundary Conditions
 -  entree (velocity-inlet, id=6)
 -  interior-solide (interior, id=1)
 -  paroi_up (wall, id=5)
 -  sortie (pressure-outlet, id=9)
 -  wall (wall, id=7)
 -  wall_down (wall, id=8)

Figure III.15 : Boundary Conditions.

III.3.2) Discussions

Les travaux de simulation sont classés en trois catégories :

- **Un canal sans chicanes.**
- **Un canal avec des chicanes triangulaires.**
- **Un canal avec des chicanes trapèzes rectangles verticaux.**

III.4) Propriétés thermo-physiques

Le nanofluide est un mélange préparé de nanoparticule et du fluide de base. Les propriétés des nanofluides ont un effet combiné des propriétés des nanoparticules, du fluide de base, des dimensions des nanoparticules et de la concentration volumétrique des nanoparticules. De nombreux modèles ont été formulés pour estimer les propriétés des nanofluides en question, qui sont jugés satisfaisants pour décrire avec précision les phénomènes de convection forcée dans des géométries similaires à celles examinées dans cette étude. Le tableau III.1 décrit les propriétés du fluide de base et des nanoparticules utilisées dans cette étude ; les propriétés des nanoparticules proviennent de AnkitKumar Gupta et al [37], KamyarSaidur et Hasanuzzaman [38] et Abdelrazek et al [39].

Tableau III.4: Propriétés du fluide de base et des nanoparticules [40].

Matériaux	Conductivité thermique (W/m.K)	Masse volumique (Kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg K)	Viscosité (Pa.s)
Eau	0.615	996	4178	0.000803
Al₂O₃	36	3970	765	NA
SiO₂	1.38	2220	745	NA
TiO₂	8.4	4230	170	NA

Tableau III.5: Propriétés des nanofluides à concentration volumique 3%. [40]

Nanofluides	Concentration volumique	Conductivité thermique (W/m.K)	Masse volumique (Kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg K)	Viscosité (Pa.s)
<i>Al₂O₃ – eau</i>	3%	0.66915	1085	3804	0.001046
<i>SiO₂ – eau</i>	3%	0.63137	1033	3957	0.001046
<i>TiO₂ – eau</i>	3%	0.66400	1024	4053	0.001046

III.5) Etude de l'écoulement dans le capteur

III.5.1) Description de la géométrie du canal sans chicanes

Le modèle étudié sans chicane est représenté par la géométrie de la figure III.16.

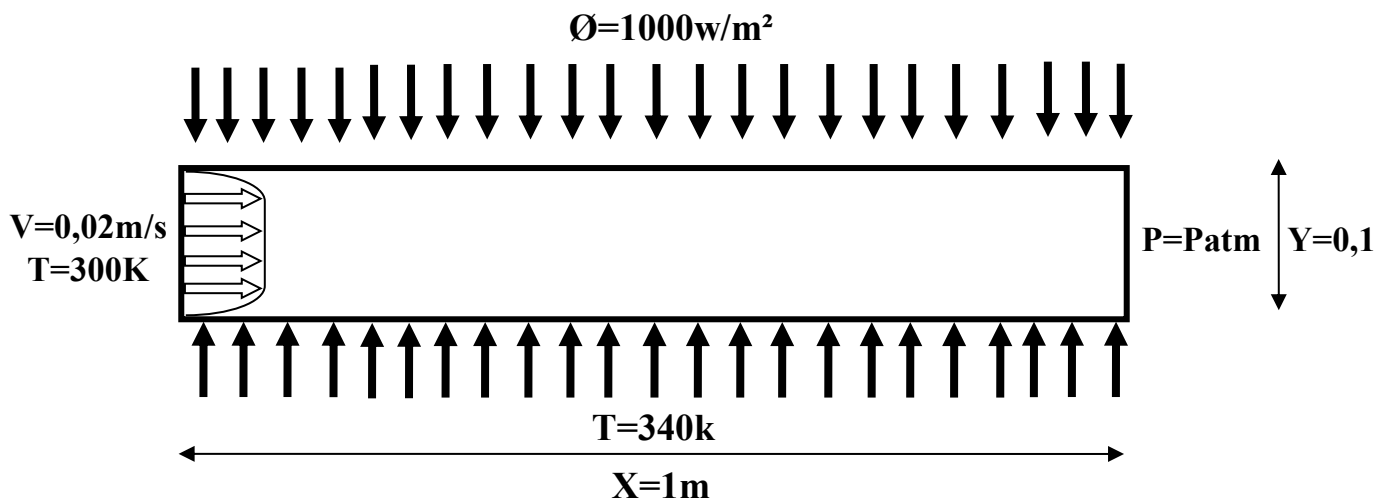


Figure III.16 : Géométrie du canal sans chicanes.

Les dimensions du canal présentées dans ce travail :

- La longueur du canal : $X = 1\text{m}$.
- La largeur du canal : $Y = 0.1\text{m}$.
- Profondeur du canal : $Z = 0.01\text{m}$.
- Nombre de Reynolds : $Re = 377.157$.
- Diamètre hydraulique : $D_h = 0.01818\text{ m}$.

III.5.2) Description de la géométrie du canal avec des chicanes triangulaires

Le modèle étudié avec chicane de types triangulaires est représenté par la géométrie de la figure III.17.

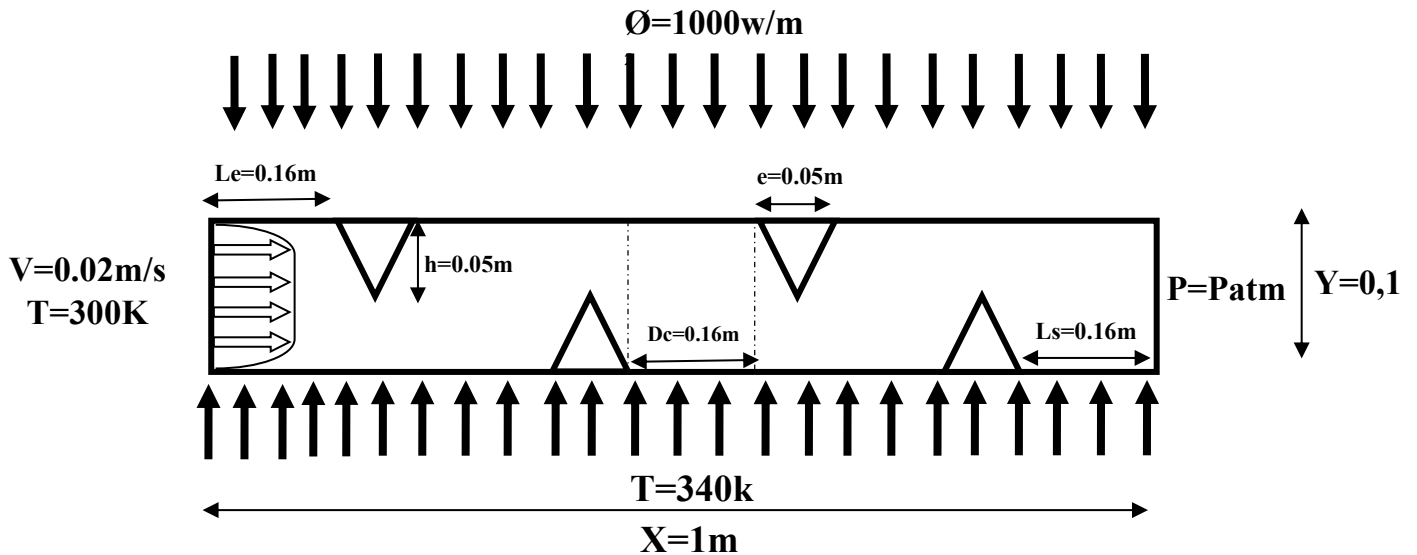


Figure III.17 : Géométrie du canal avec des chicanes triangulaires.

Les dimensions du canal présentées dans ce travail :

- La longueur du canal : $X = 1\text{m}$.
- La largeur du canal : $Y = 0,1\text{m}$.
- Profondeur du canal : $Z = 0,01\text{m}$.
- La hauteur des chicanes prise selon la largeur (l'axe Y) : $h = 0,05\text{m}$.
- L'épaisseur des chicanes prise selon la longueur (l'axe X) : $e = 0,05\text{m}$.
- La longueur entre l'entrée du canal et la première ailette : $L_e = 0,16\text{m}$.
- Distance entre les deux chicanes : $D_c = 0,16\text{m}$.
- La longueur entre la sortie du canal et la dernière ailette : $L_s = 0,16\text{m}$.
- Nombre de Reynolds : $Re = 377.157$.
- Diamètre hydraulique : $D_h = 0,01818\text{m}$.

III.5.3) Description de la géométrie du canal avec des chicanes trapèzes rectangles verticaux

Un deuxième modèle avec chicane de types trapèzes rectangles verticaux est représenté par la géométrie de la figure III.18.

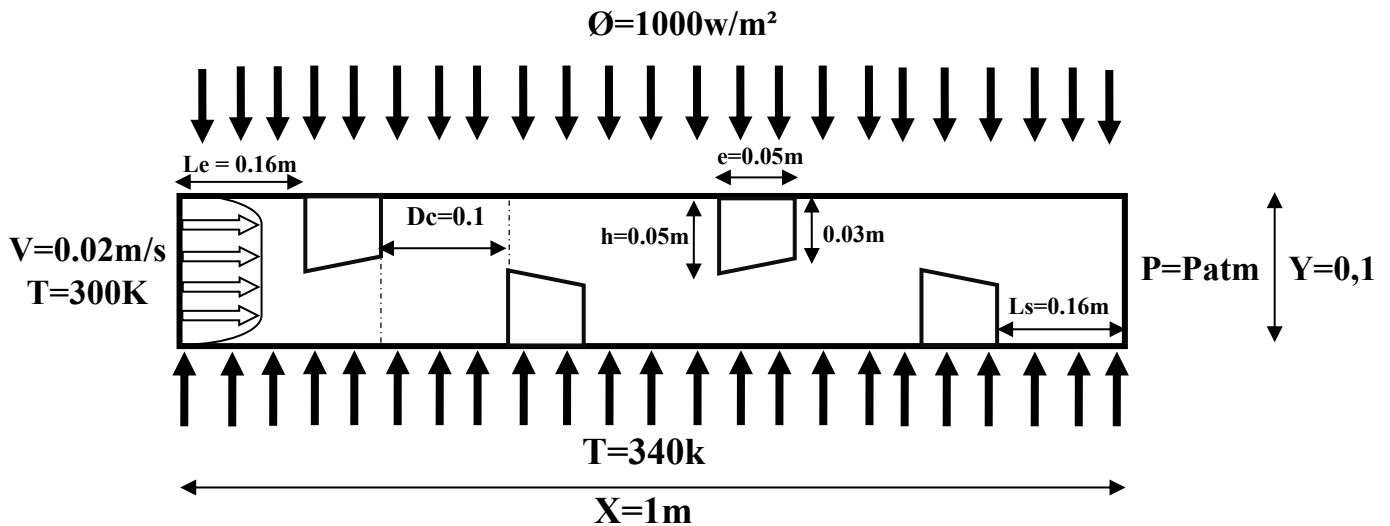


Figure III.18 : Géométries du canal avec des chicanes trapèzes rectangles verticaux.

Les dimensions du canal présentées dans ce travail :

- La longueur du canal : $X = 1\text{m}$.
- La largeur du canal : $Y = 0.1\text{m}$.
- Profondeur du canal : $Z = 0.01\text{m}$.
- La hauteur des chicanes prise selon la largeur (l'axe Y) : $h = 0.05\text{m}$.
- L'épaisseur des chicanes prise selon la longueur (l'axe X) : $e = 0.05\text{m}$.
- La longueur entre l'entrée du canal et la première ailette : $Le = 0.16\text{m}$.
- Distance entre les deux chicanes : $Dc = 0.16\text{m}$.
- La longueur entre la sortie du canal et la dernière ailette : $Ls = 0.16\text{m}$.
- Nombre de Reynolds : $Re = 377.157$.
- Diamètre hydraulique : $D_h = 0.01818\text{m}$.

III.5.4) Conditions aux limites

La résolution du système d'équations obtenu précédemment nécessite l'incorporation des conditions aux limites pour chaque variable dépendante.

Dans ce travail, les conditions aux limites hydrodynamiques et thermiques du système sont :

- La vitesse à l'entrée $V = 0,02 \text{ m/s}$.
- Température de nano fluide $Al_2O_3 - eau = 300 \text{ K}$ constante à l'entrée de la conduite.
- Fraction volumique de nano fluide $Al_2O_3 - eau \varphi = 0,03$.
- Température de l'isolant $T = 340 \text{ K}$.
- La pression $P = P_{atm}$.
- Le flux de la paroi supérieur $\dot{Q} = 1000 \text{ W/m}^2$.

III.5.5) Champs et profils de vitesse

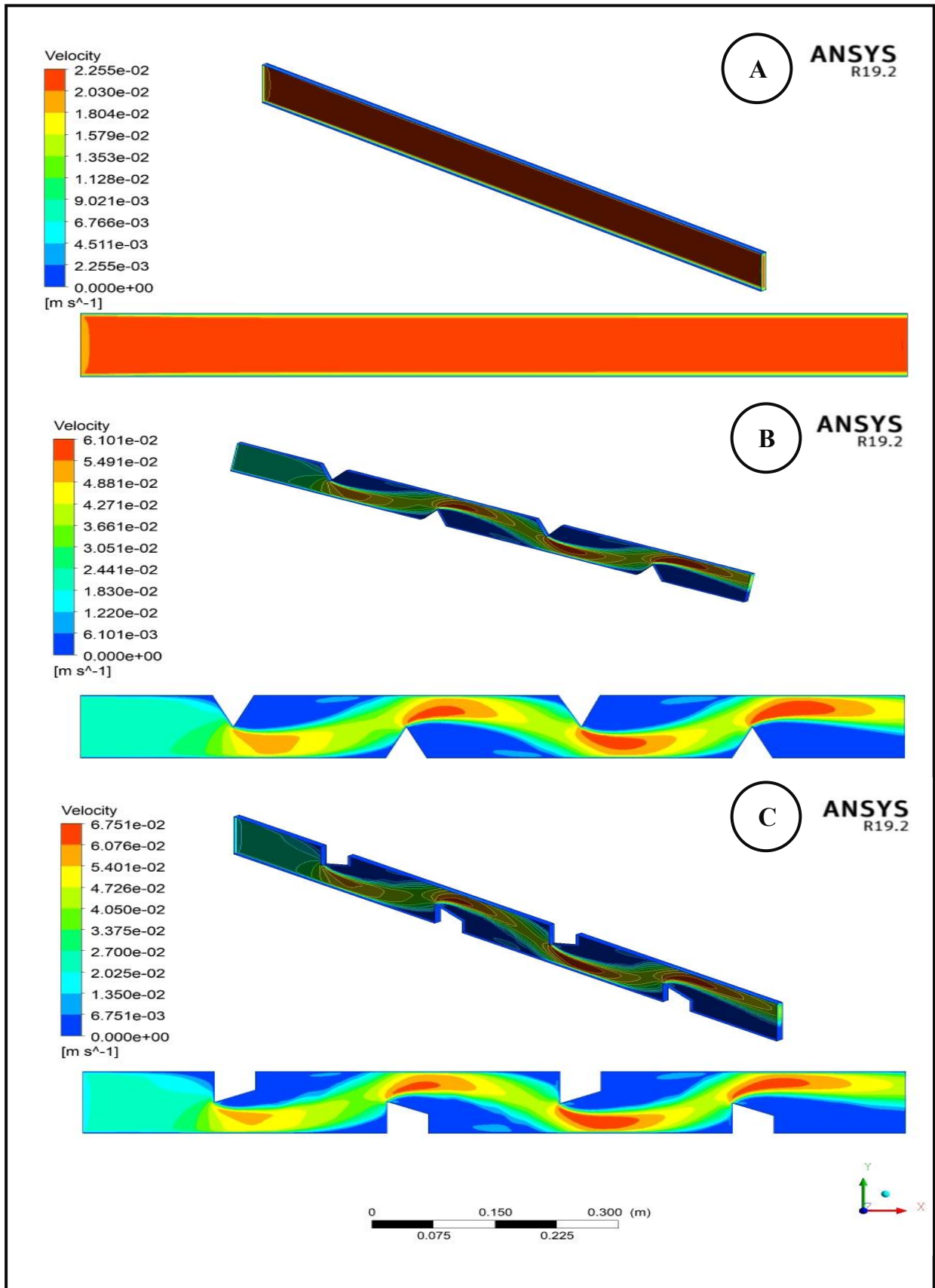


Figure III.19 : Contour de vitesse.

La figure III.19 représente les contours de vitesse du nanofluide $Al_2O_3 - eau$ de fraction volumique 3% et vitesse à l'entrée 0,02 m/s pour un canal. On remarque clairement que :

- Dans la figure A du modèle sans chicanes :

Les valeurs de la vitesse sont très faibles au voisinage de l'entrée et sont presque nulles près des parois supérieure et inférieure. On constate aussi une légère augmentation de vitesse au milieu d'un absorbeur.

- Dans les figures B et C qui représentent respectivement le modelé avec des chicanes triangulaires et trapèzes rectangles verticaux, les résultats numériques montrent que les valeurs les plus faibles de la vitesse sont au voisinage des chicanes.
- Dans les régions entre la pointe de la chicane et la paroi du canal, la vitesse augmente, en raison du rétrécissement de la section de passage de fluide.

- Les plus hautes valeurs importantes de la vitesse apparaissent après les chicanes. Mais ce processus d'accélération de vitesse commence juste après la deuxième chicane.

- Dans le model avec chicanes, la vitesse prend des valeurs importantes atteignant environ 0,061 m/s, soit trois fois plus élevées que la vitesse d'entrée de 0,02 m/s.

- La vitesse maximale dans la figure B était de 0,061m/s et dans la figure C, elle était de 0,0675m/s.

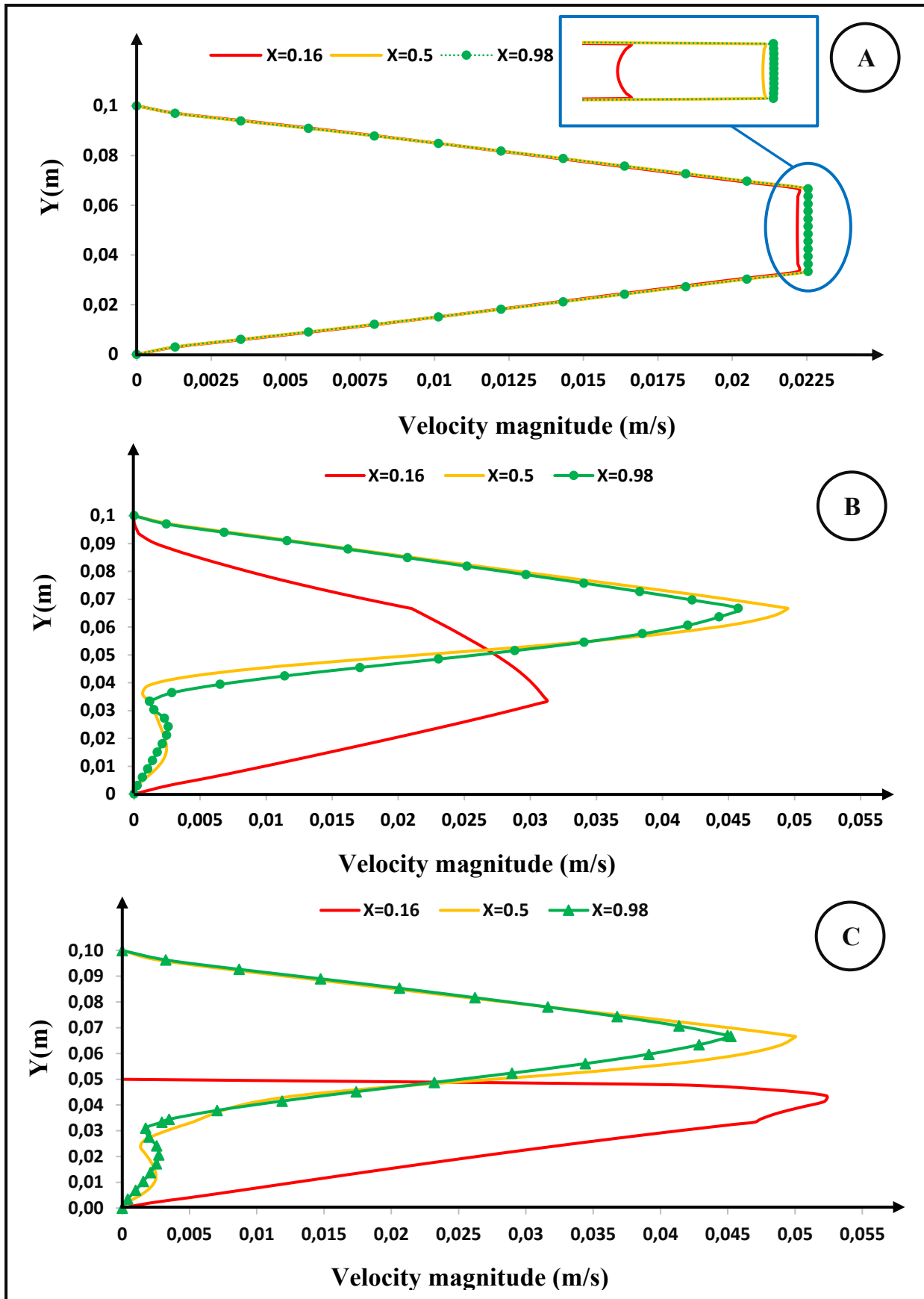


Figure III.20 : Profils de vitesse.

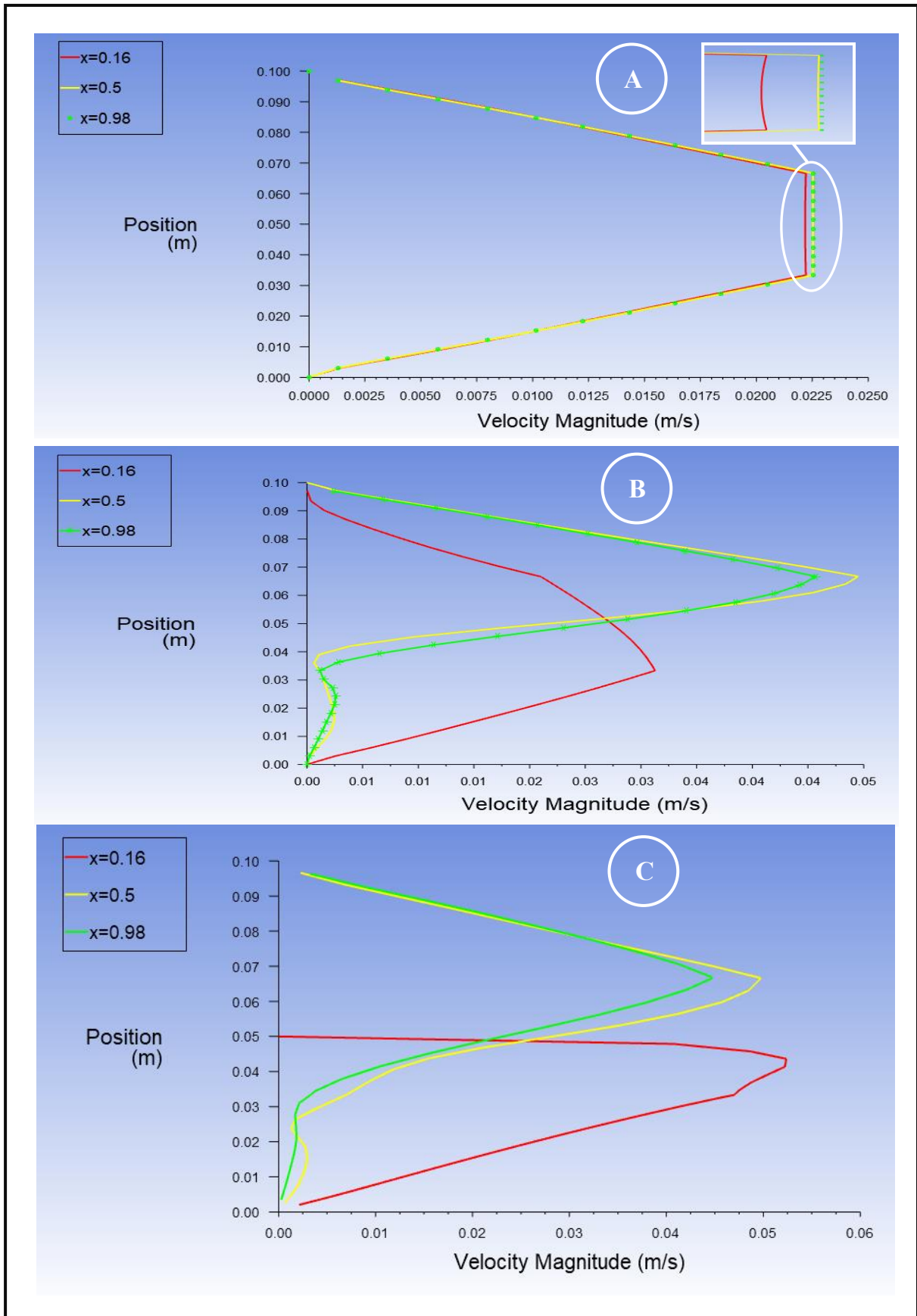


Figure III.21 : Capture les profils de vitesse dans fluide.

Par la simulation de dynamique des fluides (CFD), nous illustrons les courbes de la figure III.20 qui représente les profils de vitesse du nano fluide $Al_2O_3 - eau$ de vitesse à l'entrée 0,02 m/s et de fraction volumique 3% dans la position proche de l'entrée $X = 0,16m$, dans la position intermédiaire $X = 0,5m$ et en fin dans la position proche de la sortie en $X = 0,98m$. L'interprétation est faite pour les trois types.

1) Type A : sans chicanes

Les courbes montrent les profils de vitesse dans les positions $X = 0,16m$, $X = 0,5m$ et $X = 0,98m$, sans chicanes du canal.

Nous remarquons que les courbes sont très proches les unes des autres, ce qui signifie que de la zone d'entrée $X=0.16m$ jusqu'à $X=0.98m$ il n'y a pas de différence significative.

Dans la zone agrandie, les motifs semblent très proches les uns des autres, indiquant un écoulement parallèle sans grande variation. La position $X = 0,98m$ correspond à la vitesse maximale atteinte par le fluide.

2) Type B : avec chicanes triangulaires

Les courbes montrent les profils de vitesse d'un canal avec chicanes triangulaires.

- **Courbe rouge en position $X = 0.16m$:**

Le profil est très irrégulier et la forme est asymétrique. Cela indique un développement non encore complet de la couche limite.

La vitesse maximale est décentrée, ce qui est un signe que l'écoulement est fortement affecté par les conditions d'entrée.

- **Courbe jaune en position $X = 0.5m$:**

Le profil devient plus symétrique. Cela indique un développement progressif de l'écoulement.

Il est à noter que la vitesse maximale est supérieure à celle de la zone d'entrée.

- **Courbe verte en position $X = 0.98m$:**

Le profil presque symétrique et bien formé. La vitesse maximale se situe au centre.

3) Type C : avec chicanes trapèzes rectangles verticaux.

Les courbes montrent les profils de vitesse d'un canal avec chicanes trapèzes rectangles verticaux.

- **Courbe rouge en position $X = 0.16\text{m}$:**

On remarque que la courbe part de $Y = 0$ m jusqu'à une de $Y = 0,05$ m ; cela est dû à la présence d'une chicane la hauteur $h = 0,05$ m de la paroi supérieure jusqu'au milieu du canal.

La vitesse maximale atteinte est de $0,052$ m/s près d'une barrière à $Y = 0,044$ m.

- **Courbe jaune en position $X = 0.5\text{m}$ et courbe verte en position $X = 0.98$:**

Le profil est plus étalé et il est symétrique.

Le gradient de vitesse élevé et très faible vitesse près des parois.

III.5.6) Champs et profils de Température

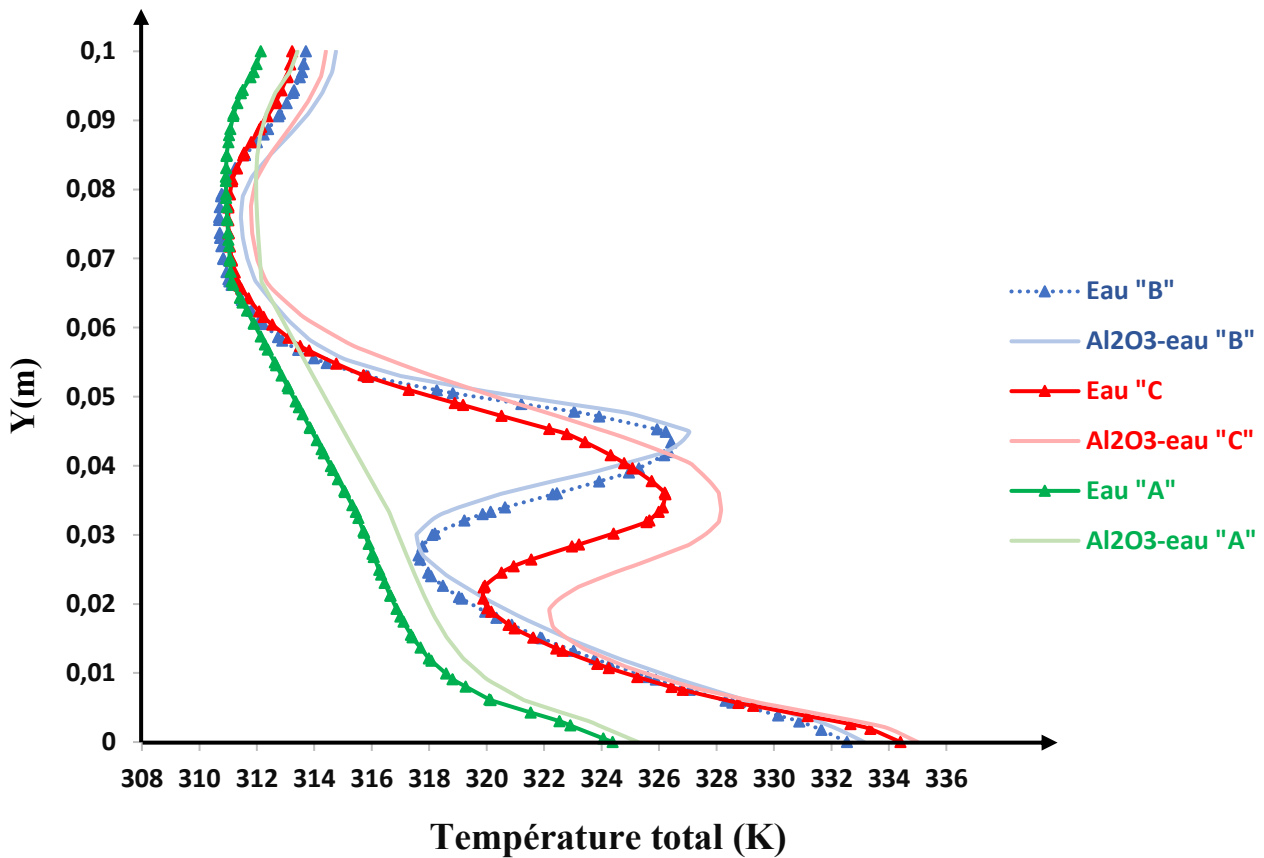


Figure III.22 : Les profils de Température d'eau et nanofluide $Al_2O_3 - eau$.

La figure III.22 représente les profils de température de l'eau et du nanofluide $Al_2O_3 - eau$ à la sortie d'un canal de position $X = 0,84m$ jusqu'à $X = 1 m$, avec une vitesse d'entrée de $0,02m/s$ et une fraction volumique de 3 %. Nous remarquons :

Le nanofluide $Al_2O_3 - eau$ présente un transfert thermique supérieur à celui de l'eau dans tous les cas, sans ou avec des chicanes.

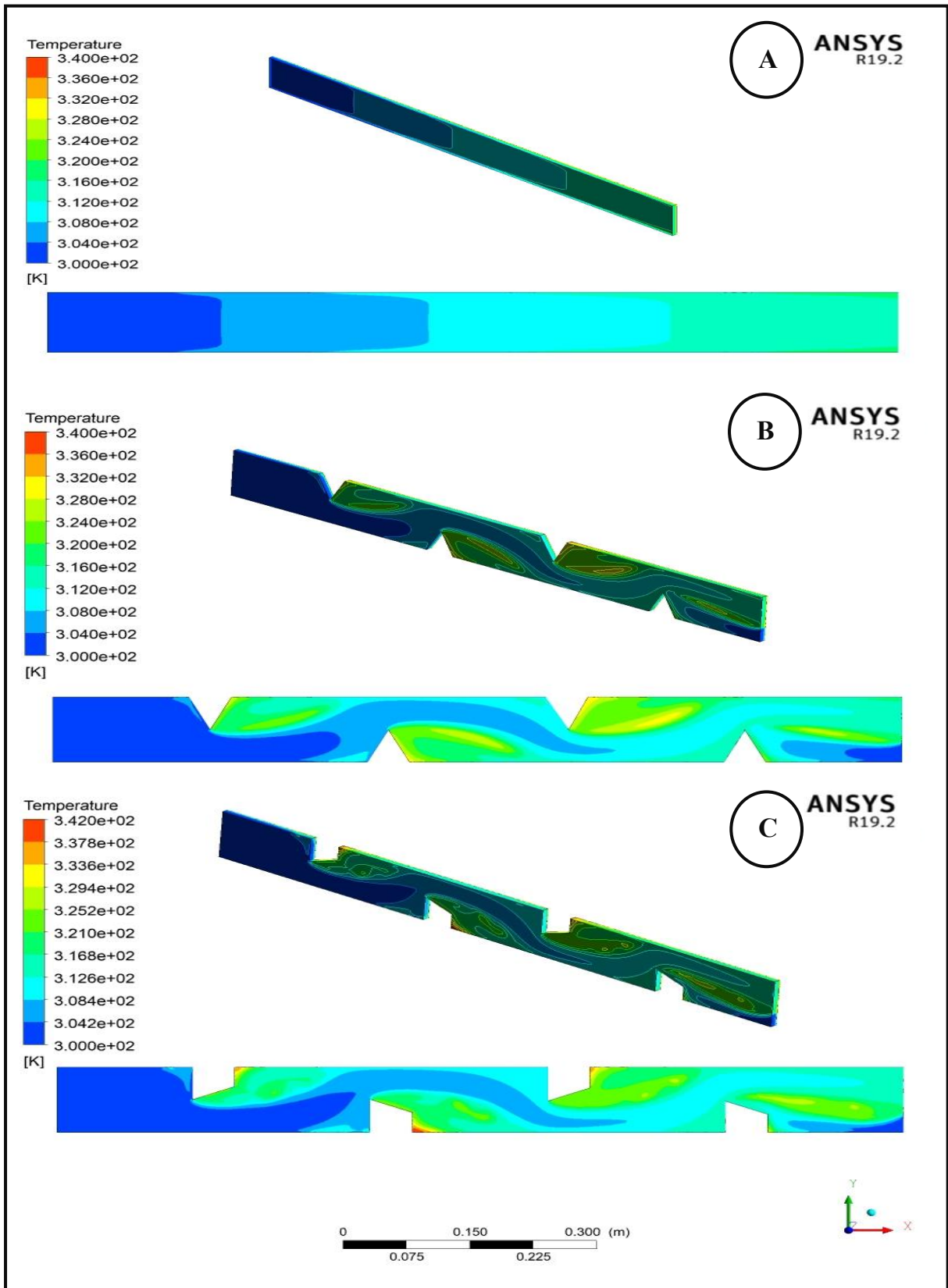


Figure III.23 : Contours de Température.

La figure III.23 ci-dessus représente les contours de température du nano fluide Al_2O_3 – eau de température à l'entrée 300K et fraction volumique 3% pour un canal. Nous avons obtenu les résultats suivants :

- Dans le type **A** sans chicane, les zones les plus chaudes sont localisés à la sortie du capteur.
- Dans le type **B** qui représente un canal avec chicanes triangulaires, et le type **C** qui représente un canal avec chicanes trapèzes rectangles verticaux, la température devient importante juste au niveau de la deuxième chicane.
- La température de fluide augmente dès que le fluide retrouve de nouveau en contact avec les chicanes, et ceci se répète d'une manière analogue d'une cellule à une autre.
- On constata que les chicanes triangulaires assurent mieux l'augmentation de la température de l'écoulement parce qu'elles contiennent la plus grande zone de la recirculation dans la région supérieure à l'aval de la chicane.

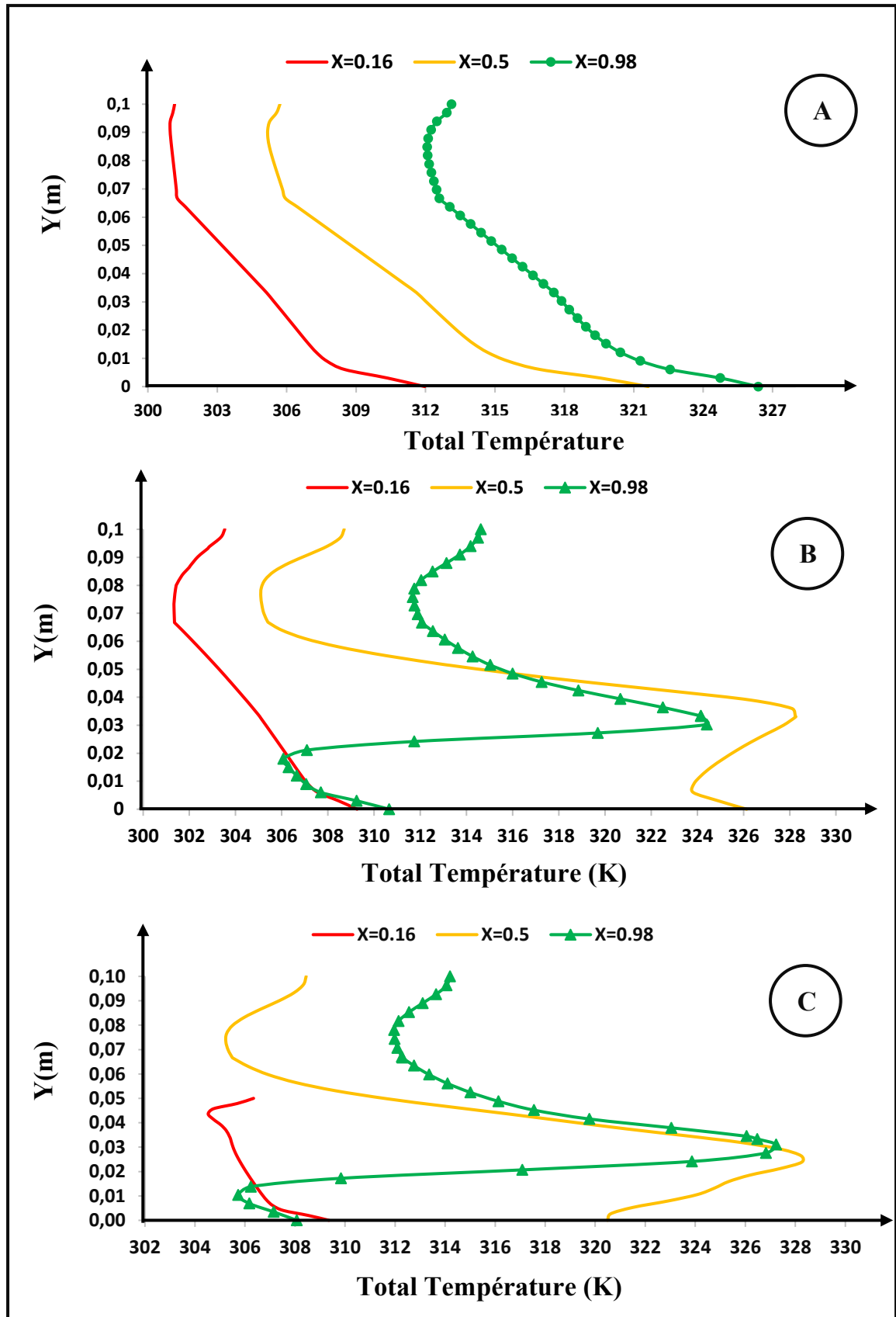


Figure III.24 : Profils de Température.

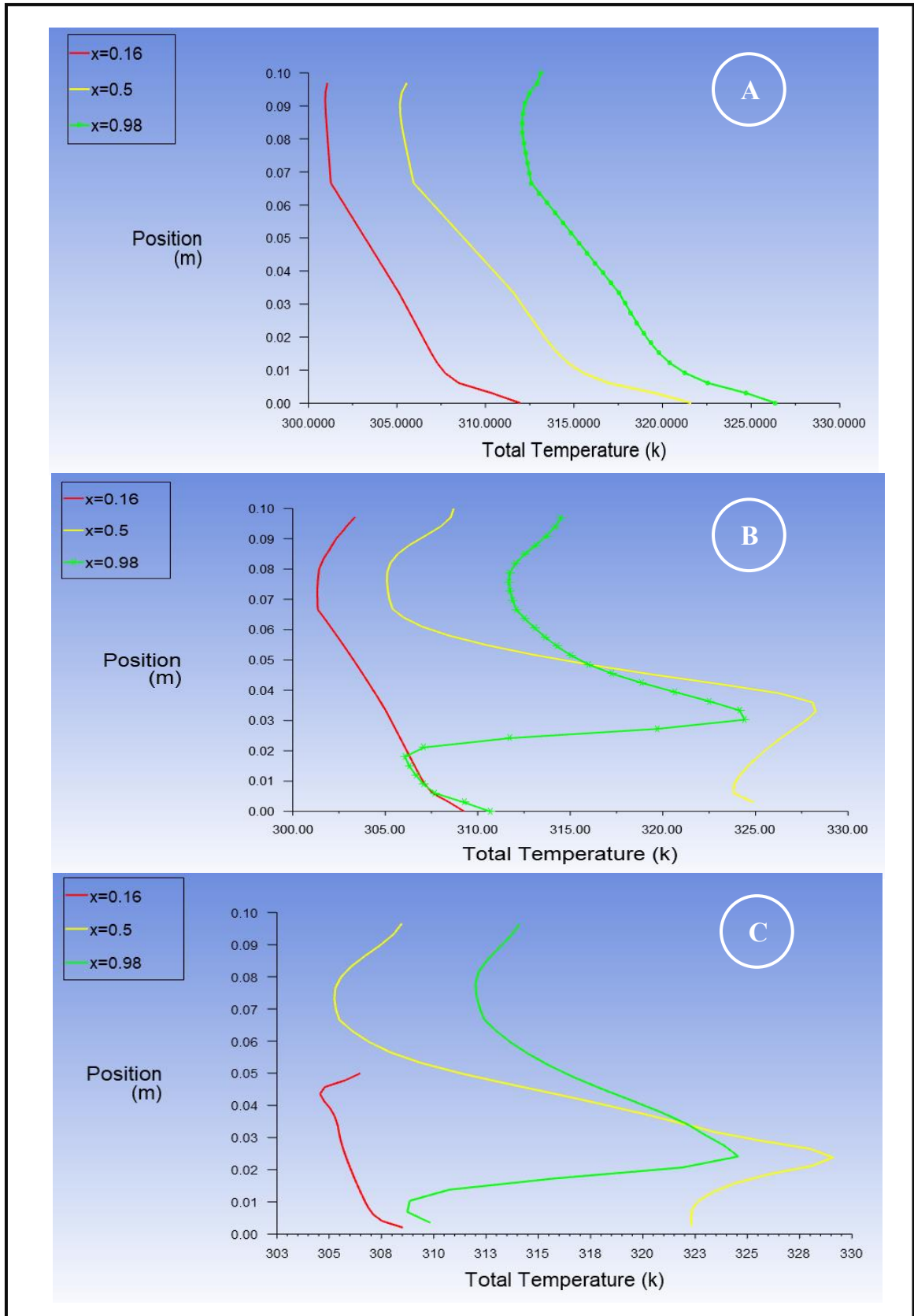


Figure III.25 : Capteur les profils de Température dans fluide pour les trois types.

Ces graphiques montrent les **profils de température totale (en Kelvin)** en fonction de la largeur Y (m) du nano fluide $Al_2O_3 - eau$ de température à l'entrée 300K et fraction volumique 3% à trois positions dans le domaine : $X = 0.16m$, $X = 0.5m$, et $X = 0.98m$. Ils permettent d'analyser l'évolution thermique dans le fluide où nous remarquons pour les trois :

- **Cas type A sans chicanes**

Dans la position $X = 0,16m$, la température augmentée par rapport à la largeur Y , de 301,15 K jusqu'à atteindre une valeur de 311,97 K dans la paroi inférieure.

La même chose se produit dans la position $X=0,5m$, la température est de 305,7K et monte jusqu'à atteindre 321,63K et dans la position $X=0,98m$, la température est plus élevée, elle varie donc de 313,13K à 326,39k.

- **Cas type B et C avec chicanes**

Nous constatons une augmentation significative de la température, notamment entre $Y=0,02m$ et $Y=0,04m$. Dans la position $X=0.5m$ la température atteint un pic égale 328,25K en B et C.

III.5.7) Etude comparative de vitesse

L'étude suivante portait sur la vitesse du nanofluide $Al_2O_3 - eau$, et nous avons réalisé une comparaison avec trois vitesses (0.02m/s, 0.05m/s, 0.1m/s) a fraction volumique 3%.

Les figure III.26, III.27 et III.28 présentent une comparaison des trois vitesses étudiées, chaque figure correspondant à un type de capteur.

➤ Type "A"

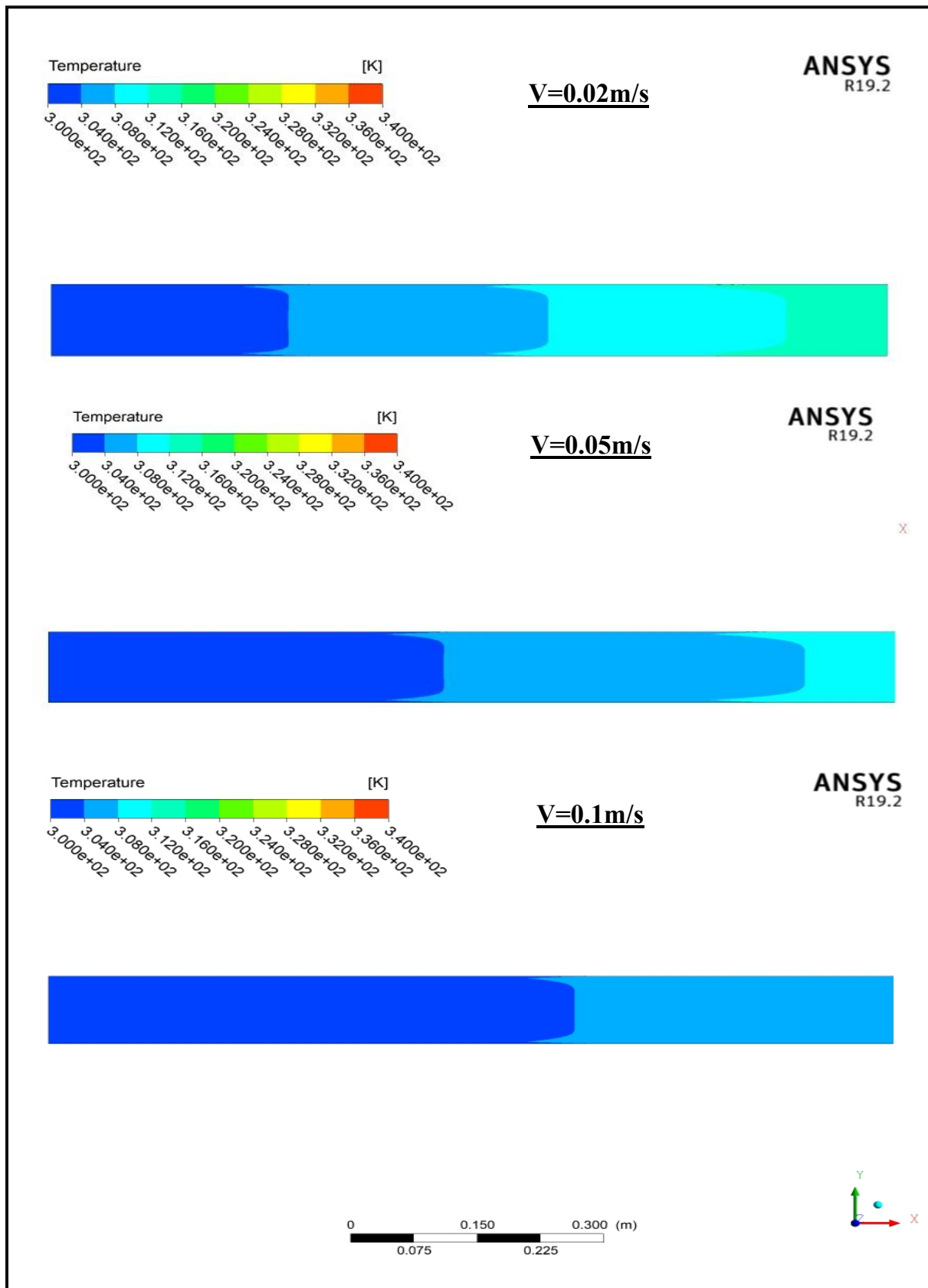


Figure III.26 : Comparaison des trois vitesses dans un capteur solaire sans chicane.

➤ Type "B"

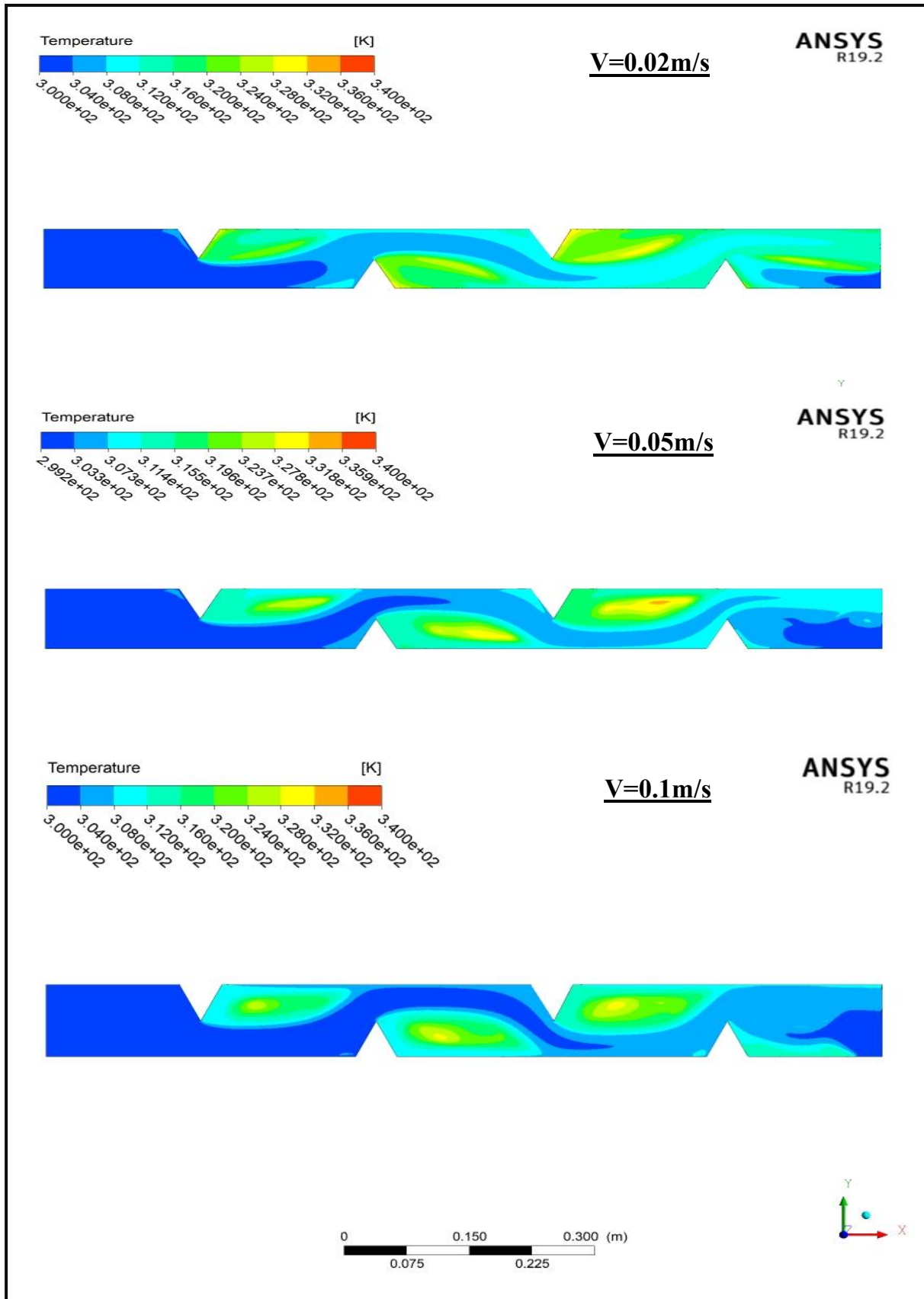


Figure III.27 : Comparaison des trois vitesses dans un capteur solaire avec chicane triangulaire.

➤ Type "C"

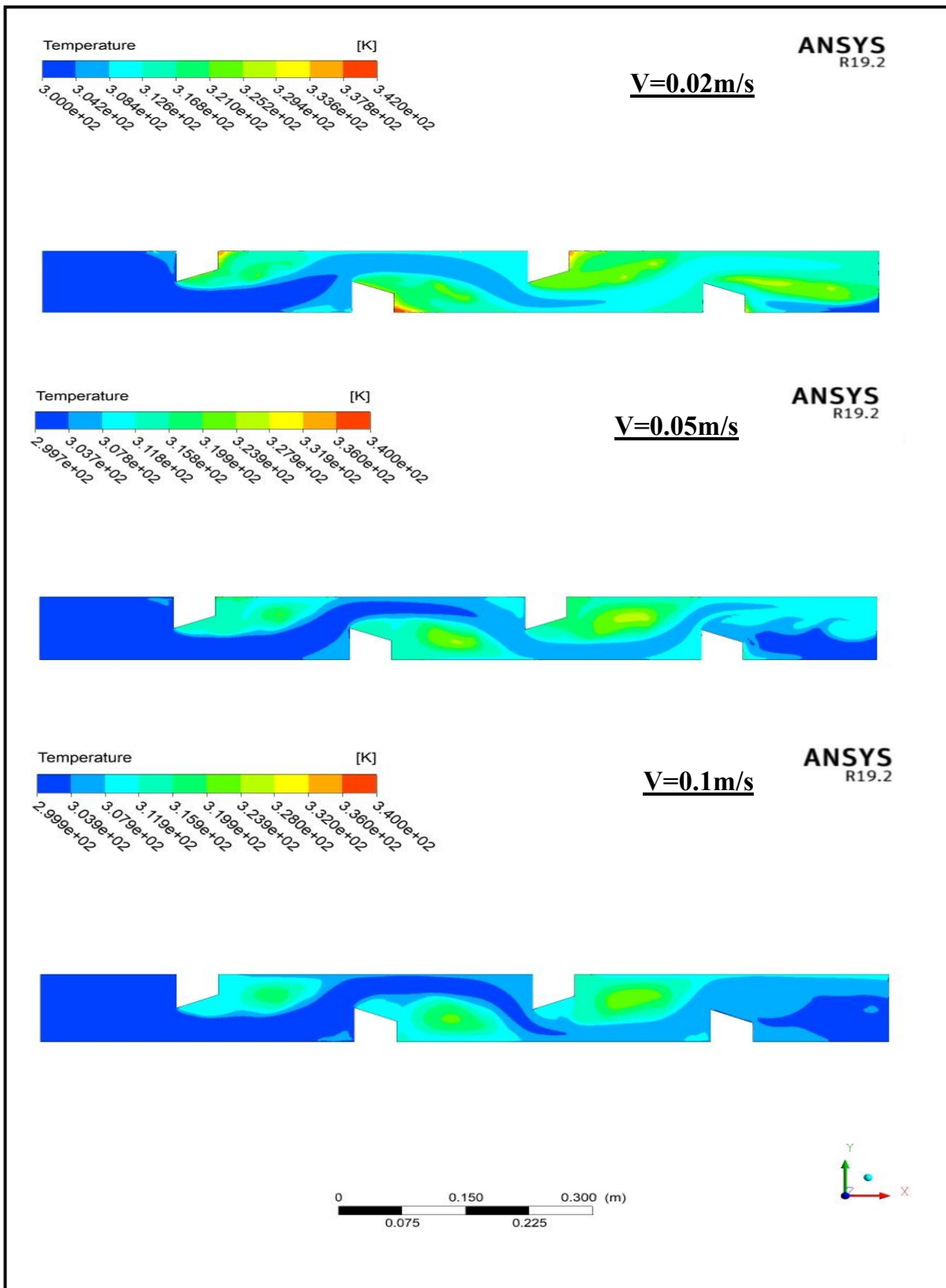


Figure III.28 : Comparaison des trois vitesses dans un capteur solaire avec chicane trapèzes verticales.

Dans la figure III.26 (Type « A » sans chicane) :

Nous présentons les champs de températures de nanofluide $Al_2O_3 - eau$.

Nous étudions le changement de vitesse dans ce canal et nous remarquons :

- Dans la vitesse 0,02 m/s : une augmentation de température d'entrée 300 K jusqu'à une température max à la sortie 316 K.
- Dans la vitesse 0,05 m/s : la température augmente jusqu'à une température 312 K à la sortie.
- Dans la vitesse 0,1 m/s : la température varie jusqu'à 308 m/s à la sortie.

Dans les figures III.27 et III.28 (avec chicanes Types « B » et « C ») :

On a étudié le changement de vitesse dans des canaux avec chicanes modèles B et C, on a un changement de température.

- Dans la vitesse 0,02 m/s : la zone la plus chaude à partir de la première chicane.
- Dans la vitesse 0,05 m/s : la zone la plus chaude commence à partir de la deuxième chicane.
- Dans la vitesse 0,1 m/s : la zone la plus chaude commence à partir de la deuxième chicane.

Nous concluons une relation entre la vitesse de nanofluide et la chaleur absorbée, qu'en augmentant la vitesse de nanofluide, la chaleur absorbée diminue.

III.5.8) Etude comparative des nano fluide ($SiO_2 - eau$
 $TiO_2 - eau; Al_2O_3 - eau$)

III.5.8.1) Profil de vitesse

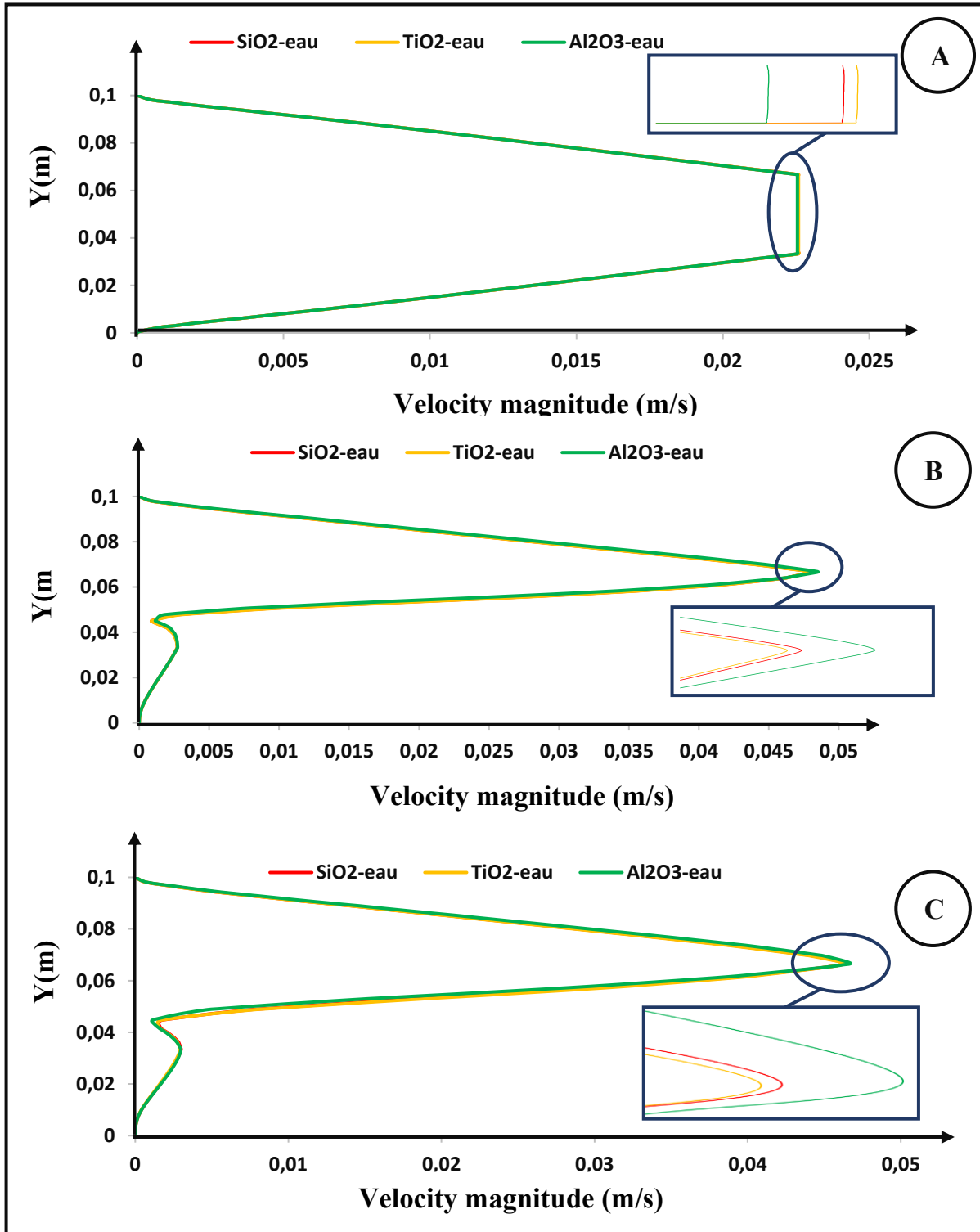


Figure III.29 : Profils de vitesse pour les trois types de nanofluides ($SiO_2 - eau$; $TiO_2 - eau$; $Al_2O_3 - eau$).

III.5.8.2) Profil de Température

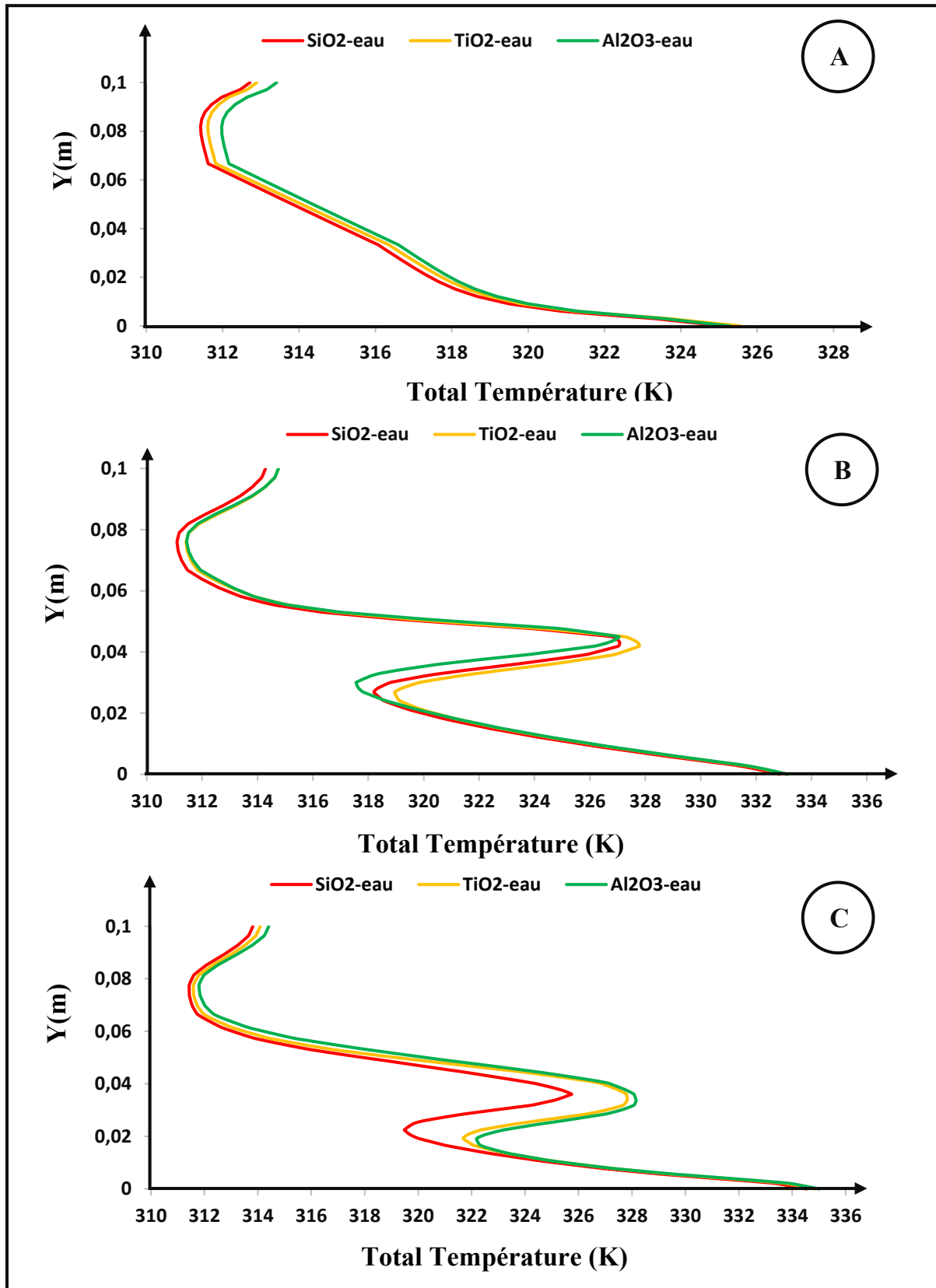


Figure III.30 : Profils de température pour les trois types de nanofluides ($SiO_2 - eau$; $TiO_2 - eau$; $Al_2O_3 - eau$).

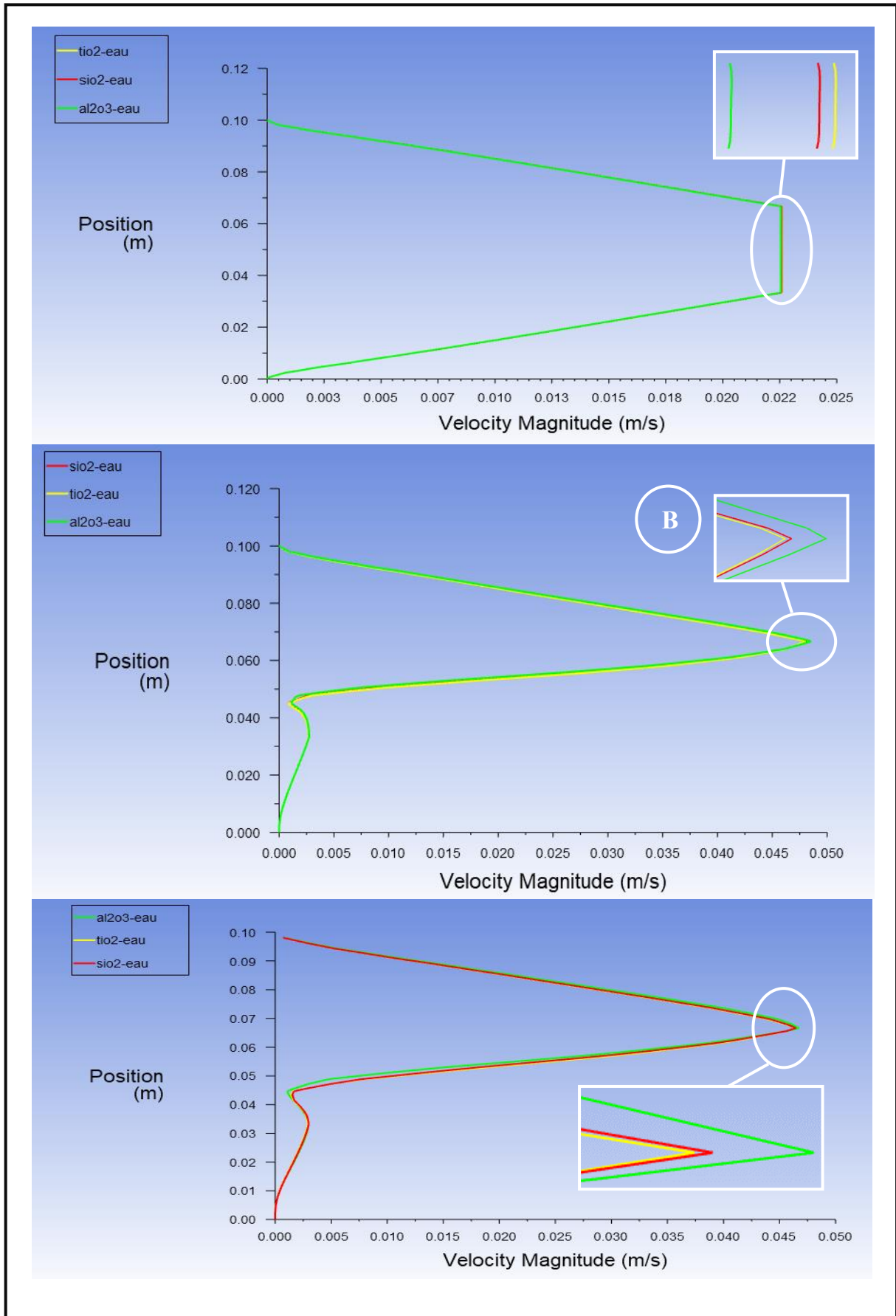


Figure III.31 : Capteur des profils de vitesse dans fluide pour les trois types de nanofluides ($SiO_2 - eau$; $TiO_2 - eau$; $Al_2O_3 - eau$).

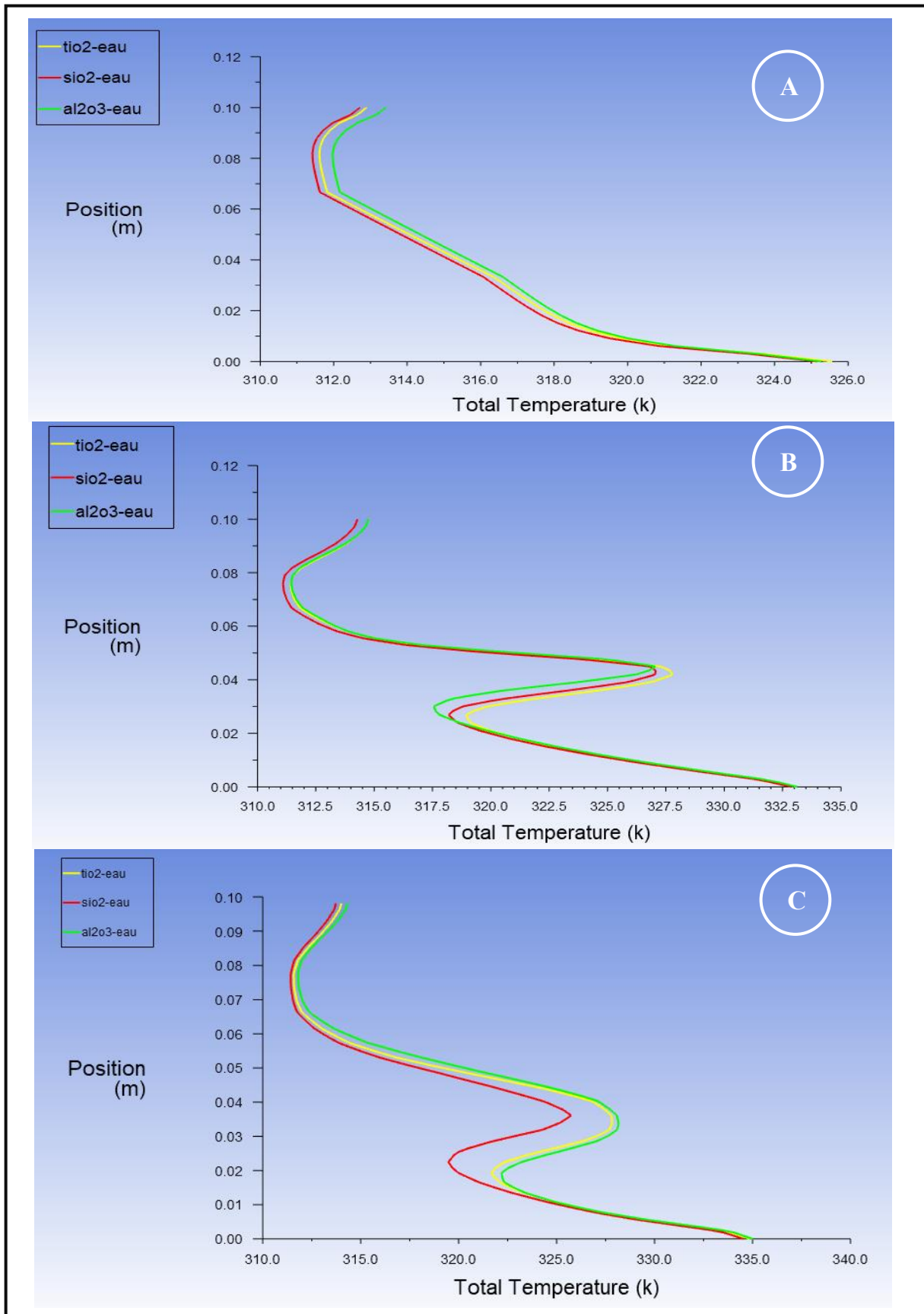


Figure III.32 : Capteur des profils de température dans fluide pour les trois types de nanofluides ($\text{SiO}_2 - \text{eau}$; $\text{TiO}_2 - \text{eau}$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{eau}$).

Afin de comparer les nanofluides, nous avons étudié deux autres types de nanofluides $SiO_2 - eau$ et $TiO_2 - eau$ avec le nanofluide $Al_2O_3 - eau$. Les trois types de nanofluides ont une vitesse d'entrée 0,02 m/s et une fraction volumique 3%. La figure III.29 représente les profils de vitesse des trois types des nanofluides $SiO_2 - eau$; $TiO_2 - eau$; $Al_2O_3 - eau$ de la dernière chicane à la sortie de la position $X=0,84m$ à $X=1m$, et la figure III.30 représente les profils de température des trois types de nanofluides dans les mêmes conditions. Nous remarquons :

- **La vitesse :**

Les valeurs de vitesse sont pratiquement similaires dans le cas du canal sans chicanes. Pour le nanofluide $Al_2O_3 - eau$, nous observons les valeurs optimales, presque doublées par rapport à l'autre cas (sans chicane).

- **La température :**

Les valeurs de température sont proches pour les trois types de nanofluides $SiO_2 - eau$; $TiO_2 - eau$; $Al_2O_3 - eau$, mais le nanofluide $Al_2O_3 - eau$ est meilleur.

III.6) Conclusion

La visualisation de la simulation de la température et de la vitesse, présente des effets sur le comportement thermique du nanofluide $Al_2O_3 - eau$ dans un canal muni de chicanes, et que les chicanes de type triangulaire offrent de meilleures performances par rapport aux chicanes trapézoïdales verticales.

Nous remarquons aussi que le transfert thermique est faible avec une vitesse d'entrée élevée, le nanofluide $Al_2O_3 - eau$ a augmenté le transfert de chaleur par rapport l'eau.

Conclusion générale :

Le travail traite la simulation numérique de transfert thermique dans un capteur solaire plan avec des différents formes de chemin d'écoulement avec un nanofluide en utilisant le logiciel de simulation CFD Workbench-ANSYS Fluent.

Un nanofluide " $Al_2O_3 - eau$ " est utilisé comme agent de transfert thermique. l'étude des capteurs sans obstacles et ceux avec des obstacles triangles et trapèzes verticaux est présenté. En plus une analyse comparative avec un autre nanofluide " $SiO_2 - eau$ " et " $TiO_2 - eau$ " a été réalisée, y compris une étude sur trois vitesses différentes. Ces simulations ont fourni des informations détaillées sur la distribution des températures et des vitesses du nanofluide $Al_2O_3 - eau$ dans ce capteur.

Ces résultats permettent d'optimiser le fonctionnement de ce capteur solaire plan pour différentes conditions d'exploitation améliorant son efficacité.

À travers des résultats obtenus par la simulation, nous tirons les conclusions suivantes.

Les chicanes en forme de triangle favorisent davantage l'élévation de la température du flux, car elles engendrent la plus vaste zone de recirculation dans la région située au-dessus du pied de la chicane. Cette forme de chicanes de type triangulaire offre de meilleures performances thermiques.

L'établissement d'un lien entre la vitesse du nanofluide et la chaleur absorbée, indique l'accroissement de la vitesse du nanofluide qui entraîne à son tour une diminution de la chaleur absorbée.

Pour le nanofluide " $Al_2O_3 - eau$ ", les valeurs optimales, sont presque doublées par rapport à l'autre cas sans chicane.

Les chicanes de type triangulaire offrent et présentent une amélioration de transfert de chaleur du capteur solaire plan étudié.

Enfin, il est vivement conseillé d'approfondir ce genre d'analyse en utilisant le code ANSYS WORKBENCH combiné à d'autres études paramétriques.

Cette étude s'inscrit dans la continuité des travaux de modélisation des énergies renouvelable et surtout l'amélioration d'efficacité et de la performance du capteur solaire plan.

Références bibliographiques

- [1] Sihem HAMMOUDA, Transfert de chaleur par un écoulement MHD instationnaire d'un nanofluide dans un système poreux à élargissement brusque, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir,2021.
- [2] ANA-MARIA BIANCHI, YVES FAUTRELLE ,JACQUELINE ETAY, Transferts thermiques ,1998.
- [3] MOSTEFAOUI AMINA, Analyse thermo énergétique de la convection thermique d'un écoulement de nanofluide dans des micro-canaux ondulés, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen,2021
- [4] M.D .Mikhailov, Cotta R.M., and Kakac, S., Steady state and periodic heat transfer in micro conduits, Microscale Heat Transfer- Fundamentals and Applications in Biological Systems and MEMS, (edits) Kakac, S., Vasiliev, L., Batazitoglu, Y., Yener, Y., Kluwer Academic Publisher, The Netherlands, 2005.
- [5] Y. Bayazitoglu, Kakac, S., Flow regimes in microchannel single phase gaseous fluid flow, Microscale Heat Transfer- Fundamentals and Applications in Biological Systems and MEMS,(edits) Kakac, S., Vasiliev, L., Bayazitoglu, Y., Yener, Y., Kluwer Academic Publisher, The Netherlands, 2005.
- [6] G.Tunc, Bayazitoglu, Y., Heat transfer in microtubes with viscous dissipation, Int. J. Heat Mass Transfer, 2001a, 44 (13), 2395-2403
- [7] Stéphane FOHANNO, Guillaume POLIDORI, Catalin POPA. Nanofluides et transfert de chaleur par convection naturelle (journée thématique : SFT-Paris 2012). Université de Reims Champagne-Ardenne, France 2012.
- [8] BOUKHARI Bachir, NAIM Abdelillah, Etude des performances thermiques et dynamiques des canaux de différentes formes en présence des nanofluides, Thèse de mémoire, université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2021.
- [9] J.C.A. Maxwell, Treatise on electricity and magnetism. Oxford, UK: Clarendon Press; (1881).
- [10] W. Yu, SUS. Choi. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. J. nanoparticle Res5: 167-71, 2003.

- [11] P. Bhattacharya, SK. Saha, A. Yadav, PE. Phelan, RS.Prasher, Brownian dynamics simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids. *Journal Applied Physics*,95(11),(2004):6492-4.
- [12] A. Einstein, Eine neue bestimmung der molekul dimensioned. *Annalen der Physik*, Leipzig, 19 (1906): 289–306.
- [13] M. Chandrasekar, S. Suresh, A. Chandra Bose, Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃/ water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34 (2010): 210–6.
- [14] C.T. Nguyen, F. Desgranges, G. Roy, N. Galanis, N. Mare, S. Boucher, et al, Temperature and particle-size dependent viscosity data for water based nanofluids– hysteresis phenomenon, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28 (2007): 1492–506. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43 (2000): 3701-3707.
- [15] S. Song, C.Peng, A. M. Gonzalez-Olivares, A. Lopez-Valdivieso, Study on hydration layers near nanoscale silica dispersed in aqueous solutions through viscosity measurement. *Journal of Colloid and Interface Science*, 287 (2005): 114-20.
- [16] DP.Kulkarni, D. K. Das, G. Chukwu, Temperature dependent rheological property of copper oxide nanoparticles suspension Nanofluid. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* (2006):1150-4.
- [17] J. Buongiorno, Convective transport in nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, 128 (2006): 240-50.
- [18] Y.Xuan and W. Roetzel, Conception for heat transfer correlation of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43 (2000): 3701-3707.
- [19] AKERMI MUSTAPHA, Contribution à l'étude d'un capteur solaire thermodynamique thermosiphon à eau et application aux sites de TIARET et ADRAR, Thèse de Magister en physique, Université Abou Baker Belkaid, Tlemcen, 2014.
- [20] Harold H. Schobert, *Energy and society: An introduction*, CRC Press, 2014.
- [21] k. Kaci, A. Belloua. Etude et réalisation d'un capteur solaire plan à contact direct eau-plaque absorbante configuration "convexe", Mémoire de PFE Energétique, Université de Blida, 1997.

- [22] KARROUTE Salima, Etude théorique et numérique des systèmes couples: Distillateur plan-capteur et distillateur hot boc-capteur, Thèse de Magister en physique, Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [23] L. KENJO, Etude du comportement thermique d'un chauffe eau solaire à faible débit, Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis. 274 p. 2003
- [24] B. MOUFFOK Abd El Ilah & BENAOUA Ihab, Bilan énergétique d'un capteur solaire plan, Mémoire de PFE Energétique, Université de Abou Baker Balkaid, Tlemcen, 2014.
- [25] A. Ahmed-Zaïd, A. Moulla, M. S. Hantala et J.Y. Desmons « Amélioration des Performances des Capteurs Solaires Plans à Air: Application au Séchage de l'Oignon Jaune et du Hareng » Rev. Energ. Ren. Vol.4 (2001) 69-78.
- [26] T.J. Young, K. Vafai, Convective flow and heat transfer in a channel containing multiple heated obstacles. International Journal of Heat and Mass Transfer, 41, pp. 3279-3298, 1998.
- [27] C.J. Ho, M.W. Chen, and Z.W. Li, Numerical simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: Effects due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity. International Journal of heat and Mass Transfer, 51, pp. 4506-4516, 2008.
- [28] S.Maiga, S.J.Palm, C.T.Nguyen, G.Roy, N.Galanis, Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows. International Journal of Heat and Fluid Flow 26, pp. 530-46, 2005.
- [29] K. Khanafer, K. Vafai, M. Lightstone, Buoyancy-driven Heat Transfer Enhancement in a Two-dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.46, pp. 3639 - 3653, 2003.
- [30] R.Y. Jou, S.C. Tzeng, Numerical Research of Nature Convective Heat Transfer Enhancement Filled with Nanofluids in Rectangular Enclosures, Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 6, pp.727-736, 2006.
- [31] A. Behnampour, O. A. Akbari, M. R. Safaei, M. Ghavami, A.Marzban, G. A. S. Shabani, M. zarringalam, R. Mashayekhi, Analysis of heat transfer and nanofluid fluid flow in microchannels with trapezoidal, rectangular and triangular shaped ribs. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, pp.15-31, 2017.

- [32] M. A. Ahmed, M. Z. Yusoff, K. C. Shuaib, Numerical and experimental investigations on the heat transfer enhancement in corrugated channels using SiO₂-water nanofluid. *Case Studies in Thermal Engineering*, pp. 77-92, 2015.
- [33] M. Ahmed, N. Shuaib, M. Yusoff, Numerical investigations on the heat transfer enhancement in a wavy channel using nanofluid, *Int. J. Heat Mass Transfer* 55, pp.5891–5898, 2012.
- [34] M. Ahmed, M. Yusoff, N. Shuaib, Effects of geometrical parameters on the flow and heat transfer characteristics in trapezoidal-corrugated channel using nanofluid, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* 42, pp.69–74, 2013.
- [35] M.A. Ahmed, M.Z. Yusoff, K.C. Ng, N.H. Shuaib, Effect of corrugation profile on the thermal-hydraulic performance of corrugated channels using CuO-water nanofluid, *Case Stud. Therm. Eng.* 4, pp. 65–75,2014.
- [36] CHRISTOPHE ROME, « Une méthode de raccordement de maillages non-conformes pour la résolution des équations de NAVIER-STOKES », Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, N°3175, 2006.
- [37] Ankit Kumar Gupta, Bhupendra Gupta, Jyoti Bhalavi, Prashant Baredar, Hemant Parmar & Ramalingam Senthil. CFD study on heat transfer and pressure drop of nanofluids (SiO₂/H₂O, Al₂O₃/H₂O, CNTs/H₂O) in a concentric tube heat exchanger. *International Journal of Ambient Energy*, 2021.
- [38] A. Kamyar, R. Saidur, and M. Hasanuzzaman. Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) for Nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012.
- [39] A. H. Abdelrazek , O. A. Alawib, S. N. Kazia, N. Yusoffa, Z. Chowdhuryd, and A. A. D. Sarhane. A New Approach to Evaluate the Impact of Thermos Physical Properties of Nanofluids on Heat Transfer and Pres- sure Drop. *international Communications in Heat and Mass Transfer*, 2018.
- [40] YAHLA Mohamed Amine & MOKHTARI Younes, Étude numérique d'un échangeur de chaleur à tubes concentriques fonctionnant avec un nanofluid, Thèse de Master en Génie Mécanique de spécialité Energétique, Université Abou Baker Belkaid, Tlemcen, 2022.