

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

Université Hamma Lakhdar -El-Oued

*Université Hamma Lakhdar -El-Oued*

*Faculté des Sciences et de la Technologie*

*Département de Génie Mécanique*

*Filière : Génie Mécanique*

*Option: Energétique*



**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

*Par:*

**HEDED FAKHER EDDINE**

**HAMAEID EL WALID**

**Intitulé**

*Etude numérique d'une cavité rectangulaire  
remplie d'un nanofluide hybride*

***Soutenu le 06/ 06 /2023 devant le jury composé de:***

Gharbi Muhammad Al-Taher	Université -El-OUED	Président
Ali Boukhari	Université -El-OUED	Rapporteur
Berkane houda	Université -El-OUED	Examineur

**Année universitaire : 2022/2023**

## *Remerciement*

*Nous exprimons notre gratitude à ALLAH (SWT) pour le courage et la volonté qui ont rendu possible la réalisation de cette étude.*

*Nous souhaitons également exprimer nos sincères remerciements à nos parents bien-aimés pour leur soutien et leurs conseils tout au long de ces années d'études.*

*En premier lieu, nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance envers notre promoteur, le **Dr. BOUKHARI Ali**, pour son aide inestimable, sa disponibilité, sa bienveillance et ses conseils précieux tout au long de ce travail. Sans sa méthodologie, ses orientations et ses conseils avisés, cette étude n'aurait pas pu aboutir.*

*Nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'évaluer notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Leur soutien et leur participation ont été précieux.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire :*

*Ames chers parents ma mère et mon père*

*Pour leur patience, leur amour, leur soutien leur*

*Encouragement.*

*Mes frères et mes sœurs.*

*Toute ma famille.*

*Toutes mes amies.*

*N'oublions pas de mentionner tous les enseignants,*

*qu'ils travaillent à l'école primaire, au collège,*

*au lycée ou dans l'enseignement supérieur.*

**TABLE DES MATIERES**

*Remerciement*

*Dédicace*

*Table des matières*

*Nomenclature*

*Liste des figures*

*Liste des tableaux*

*Introduction générale*

*Chapitre I: généralités et revue bibliographique*

I.1 Introduction.....	4
I.2. Généralités sur les nanofluides hybrides.....	4
I.2.1 Généralités sur les Nanofluides.....	5
I.2.2 Les types des nanoparticules .....	5
I.2.3 Les avantages des nanofluides.....	7
I.2.4 Les inconvénients des nanofluides .....	8
I.2.5 Préparation des nanofluides.....	9
I.3.1 Nanofluide hybride .....	9
I.3.2 Les applications des nanofluides hybrides .....	10
I.3.3 Synthèse de nanoparticules hybrides .....	11
I.3.3.1 Synthèse de la poudre nano-composite Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Cu.....	11
I.3.3.2 Synthèse de la poudre nano-composite SiO <sub>2</sub> -MoS <sub>2</sub> .....	12
I.3.4 Propriétés thermophysiques des nanofluides .....	13
I.3.4.1 la fraction volumique ( $\phi$ ).....	13
I.3.4.2 Conductivité thermique (k) .....	15
I.3.4.3 Viscosité dynamique ( $\mu$ ) .....	15
I.3.4.4 La masse volumique ( $\rho$ ) .....	17
I.3.4.5 Coefficient d'expansion volumique ( $\beta$ ).....	17
I.4 Généralité sur le transfert de chaleur .....	17
I.4.1 Transfert de chaleur par conduction .....	18
I.4.2 Transfert de chaleur par rayonnement .....	18
I.4.3 Transfert de chaleur par convection .....	19
I.4.4 Les nombres sans dimension.....	20
I.4.4.1 Nombre de Reynolds .....	21

## **Table des matières**

---

I.4.4.2 Nombre de Prandtl.....	21
I.4.4.3 Nombre de Nusselt .....	22
I.4.4.4 Nombre de Gras Hoff .....	22
I.4.4.5 Nombre de Rayleigh.....	23
I.4.4.6 Nombre de Hartmann.....	23
I.4.5 Techniques d'amélioration le transfert de chaleur.....	24
I.5 Synthèse bibliographique.....	25
<b>Chapitre II: Modélisation mathématique .....</b>	<b>27</b>
II.1 Introduction.....	29
II.2 Equations générales en régime laminaire.....	29
II.2.1 Equation de continuité.....	30
II.2.2 Equation de quantité de mouvement.....	30
II.2.3 Equation de conservation d'énergie.....	30
II.3 La géométrie du problème étudié.....	30
II.4 Formulation mathématique du problème.....	31
II.4.1Hypothèses simplificatrices.....	31
II.4.2 Equation de continuité .....	32
II.4.3 Equation de quantité de mouvement .....	32
II.4.4 Equation de l'énergie .....	32
II.5 Les équations sous formes adimensionnelles .....	32
II.5.1 Equation de continuité.....	32
II.5.2 Equation de quantité de mouvement.....	32
II.5.3 Equations de l'énergie .....	32
II.6 Les propriétés thermo physiques des nano fluides hybrides.....	32
II.6.1 la masse volumique.....	33
II.6.2 La fraction volumique.....	34
II.6.3 la capacité calorifique.....	34
II.6.4 La conductivité thermique.....	34
II.6.5 La viscosité dynamique.....	34
II.7 Conclusion .....	34
<b>Chapitre III: Résolution numérique.....</b>	<b>35</b>
III.1 Introduction .....	36
III.2 Procédure de la simulation.....	36
III.2.1 Le progiciel ANSYS Workbench .....	36

## **Table des matières**

---

III.2.2 Menu principal du progiciel d'ANSYS Workbench.....	38
III.2.3 Création de la géométrie.....	39
III.2.4 Le maillage .....	42
III.2.4.1 Configuration .....	43
III.3. Conclusion .....	46
<b>Chapitre IV: Résultats et discussions</b>	
IV.1 Introduction .....	48
IV.2 Résultats et interprétations .....	48
IV.2.1 Impacts des vitesses à l'entrée et à la sortie.....	49
IV.2.2 Influence de la vitesse autour de l'ailette de chauffage.....	50
IV.2.3 Influence de la température .....	51
IV.2.4 Distribution de la température.....	53
IV.2.5 Champs de vitesse d'écoulement .....	54
IV.3 Conclusion .....	56
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>58</b>
<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>59</b>

## **Liste des tableaux**

### ***Chapitre I: généralités et revue bibliographique***

***Tableau I.1: Les propriétés thermophysiques des différents matériaux***

### ***Chapitre II: Modélisation mathématique***

***Tableau II.1: Dimensions d'une cavité rectangulaire***

***Tableau II.2: Les propriétés thermophysiques de nanoparticules et fluide de base***

### ***Chapitre IV: Résultats et discussions***

***Tableau IV.1: Propriétés thermophysiques pour le nanofluide hybride***

**Liste des figures**

**Chapitre I: Généralités et revue bibliographique**

<b>Figure. I.1:</b> nanoparticules d'Argent	<b>6</b>
<b>Figure. I.2:</b> nanotube de carbone	<b>6</b>
<b>Figure I.3:</b> Nanofluides vue au microscope électronique : éthylène glycol + cuivre 0.5% , eau + nanotube , eau + alumine , eau + or à 2nm	<b>10</b>
<b>Figure I.4:</b> Méthodes de production descendantes et ascendantes pour fabriquer différents types de nanostructures	<b>13</b>
<b>Figure I.5:</b> La chaleur du soleil est transmise par rayonnement	<b>19</b>
<b>Figure I.6:</b> Effet d'accumulation sur l'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides.	<b>25</b>
<b>Figure I.7:</b> La géométrie en question et les conditions aux limites du phénomène	<b>25</b>
<b>Figure I.8:</b> Schéma de la cavité sous champ magnétique	<b>26</b>

**Chapitre II: Modélisation mathématique**

<b>Figure II.1:</b> Configuration étudiée, cavité rectangulaire remplie d'un nanofluide hybride	<b>31</b>
---	-----------

**Chapitre III: Résolution numérique**

<b>Figure III.1:</b> Fenêtre lancement du logiciel	<b>37</b>
<b>Figure III.2:</b> Menu principal de Workbench.	<b>38</b>
<b>Figure III.3:</b> Création d'une analyse (projet) en CFD	<b>38</b>
<b>Figure III.4:</b> Création d'un projet en CFD	<b>39</b>
<b>Figure III.5:</b> Création du modèle de la géométrie.	<b>39</b>
<b>Figure III.6:</b> Identification de l'unité	<b>40</b>
<b>Figure III.7:</b> Création d'esquisse	<b>40</b>
<b>Figure III.8:</b> Création d'esquisse	<b>41</b>

<i>Figure III.9: Concept surface à partir d'esquisse</i>	<b>41</b>
<i>Figure III.10: Définition de la zone du fluide.</i>	<b>42</b>
<i>Figure III.11: Maillage utilisé.</i>	<b>43</b>
<i>Figure III.12: Nombre de nœuds et éléments.</i>	<b>43</b>
<i>Figure III.13: Model (laminaire, équation de l'énergie)</i>	<b>44</b>
<i>Figure III.14: Création les données du nano fluide hybride</i>	<b>44</b>
<i>Figure III.15: Condition aux limite –DOWN_WALL- Température imposée</i>	<b>45</b>
<i>Figure III.16: Condition aux limite –UP_WALL- Température imposée</i>	<b>45</b>
<i>Figure III.17: Condition aux limite –INLET- Vitesse imposée</i>	<b>45</b>
<i>Figure III.18: Condition aux limite –DOWN WALL-Flux calorifique imposé</i>	<b>46</b>

**Chapitre IV: Résultats et discussions**

<i>Figure IV.1: Le profil de vitesse <math>V</math> à l'entrée pour <math>\Delta T = 20</math>, avec : <math>V = 0.005</math>, <math>V = 0.015</math> et <math>V = 0.025</math> (Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Eau).</i>	<b>49</b>
<i>Figure IV.2: Le profil de vitesse <math>V</math> à sortie pour <math>\Delta T = 20</math>, avec: <math>V = 0.005</math>, <math>V = 0.015</math> et <math>V = 0.025</math> (Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Eau).</i>	<b>49</b>
<i>Figure IV.3 : Profil de vitesse <math>V</math> dans la cavité pour <math>\Delta T = 60</math> et <math>V = 0.015</math>. (Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Eau).</i>	<b>50</b>
<i>Figure IV.4 : Profil de vitesse <math>V</math> dans la cavité pour <math>\Delta T = 60</math> et <math>V = 0.015</math>. (Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Eau).</i>	<b>51</b>
<i>Figure IV.5 : Profil de température <math>T</math> dans la cavité pour <math>\Delta T = 60</math> et <math>V = 0.015</math>. (Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Eau).</i>	<b>52</b>
<i>Figure IV.6 : Profil de température <math>T</math> dans la cavité pour <math>T = 360</math> et <math>V = 0.025</math>. (Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Eau).</i>	<b>52</b>
<i>Figure IV.7 : Répartition de la température pour (<math>\Delta T = 60</math>, <math>V = 0.025</math>).</i>	<b>53</b>
<i>Figure IV.8 : Répartition de la température pour (<math>T = 400</math>, <math>V = 0.025</math>).</i>	<b>54</b>
<i>Figure IV.9 : Vitesse d'écoulement (<math>T = 400</math>, <math>V = 0.025</math>).</i>	<b>55</b>
<i>Figure IV.10 : Lignes de courant de l'écoulement. (<math>T = 360</math>, <math>V = 0.025</math>).</i>	<b>55</b>

## ***Nomenclature***

### ***Symboles latins***

<b><i>B</i></b>	<i>Champ magnétique [teslas].</i>
<b><i>C<sub>p</sub></i></b>	<i>Chaleur spécifique à pression constante [J/(kg · K)].</i>
<b><i>D<sub>h</sub></i></b>	<i>Diamètre hydraulique [m].</i>
<b><i>E</i></b>	<i>Champ électrique [V].</i>
<b><i>F</i></b>	<i>Force de Lorentz [N].</i>
<b><i>g</i></b>	<i>Accélération de la pesanteur [m · s<sup>-2</sup>].</i>
<b><i>H</i></b>	<i>Hauteur de la cavité [m].</i>
<b><i>j</i></b>	<i>Densité volumétrique de courant [A/m<sup>3</sup>].</i>
<b><i>K</i></b>	<i>Conductivité thermique [W/m.K].</i>
<b><i>L</i></b>	<i>Longueur de la cavité [m].</i>
<b><i>p</i></b>	<i>Pression du fluide [Pa].</i>
<b><i>P</i></b>	<i>Pression adimensionnelle [-].</i>
<b><i>T<sub>p</sub></i></b>	<i>Température de la paroi [°C].</i>
<b><i>T<sub>∞</sub></i></b>	<i>Température du milieu environnant la surface [°C].</i>
<b><i>T<sub>a</sub></i></b>	<i>Température du fluide loin de la surface du solide [°C].</i>
<b><i>T<sub>s</sub></i></b>	<i>Température de surface du solide [°C].</i>
<b><i>u, v</i></b>	<i>Composantes de la vitesse [m/s].</i>
<b><i>U, V</i></b>	<i>Composantes de la vitesse adimensionnelle [-].</i>
<b><i>q</i></b>	<i>Puissance volumique dissipée [W/m<sup>3</sup>].</i>
<b><i>x, y</i></b>	<i>Coordonnées cartésiennes [m].</i>
<b><i>X, Y</i></b>	<i>Coordonnées cartésiennes adimensionnelle [-].</i>

***Nombres adimensionnels***

***Pr*** Nombre de Prandtl [-]

***Gr*** Nombre de Grashoff [-]

***Ra*** Nombre de Rayleigh [-]

***Re*** Nombre de Reynolds [-]

***Ha*** Nombre de Hartmann [-]

***Symboles grecs***

**$\alpha$**  Diffusivité thermique du fluide [ $m^2/s$ ].

**$\beta$**  Coefficient d'expansion thermique [ $1/K$ ].

**$\Theta$**  Température adimensionnelle [-].

**$\mu$**  Viscosité dynamique du fluide [ $kg/m.s$ ].

**$\nu$**  Viscosité cinématique du fluide [ $m^2/s$ ].

**$\rho$**  Masse volumique [ $kg/m^3$ ].

**$\Phi$**  Fraction volumique solide.

***Indices et exposants :***

***f*** fluide pur.

***Nf*** Nanofluide.

***nfh*** Nanofluide hybride.

***P*** Nanoparticules.

***0*** indices de référence.

## *Introduction générale*

La demande en fluide caloporteur efficace augmente avec les progrès de l'ingénierie thermique. Bien que les fluides de travail conventionnels tels que l'eau et divers types d'huile aient été utilisés dans divers applications industrielles, la conductivité thermique de ces fluides est très faible. Ainsi, dans les avancées dispositifs de génie thermique, ces fluides traditionnels ne maintiennent pas les taux d'échange thermique standards. Cependant, des études récentes proposent une solution en suspendant divers types de particules solides aux propriétés thermophysiques intéressantes dans des fluides traditionnels.

Le besoin d'améliorer les transferts thermiques des fluides dans des system énergétiques a donné naissance au développement d'une nouvelle technique, d'améliorer les propriétés thermiques de fluides par l'adjonction de particules n'est pas nouvelle, mais l'utilisation de particules de taille nanométrique permet potentiellement de minimiser considérablement les problèmes d'érosion et de sédimentation rencontrés avec les particules de taille plus élevée. De plus, certains auteurs ont mis en avant des performances thermiques améliorées en conductivité thermique et en échange thermique liquide et liquide/ vapeur dues à la taille nanométrique, ces solutions sont les nanofluides hybrides.

Les nanofluides hybride, des solutions contenant des nanoparticules en suspension dans un fluide de base. Grâce à leurs propriétés qui permettent d'améliorer les performances thermiques, les nanofluides hybride peuvent être utilisés dans une multitude d'applications domestiques et industrielles. Cependant, la principale difficulté rencontrée avec les nanofluides hybrides est de disperser de manière stable dans le temps les nanoparticules dans le liquide de base à cause de leur agglomération, due soit à la gravité ou soit à la précipitation dépendant de la température [1].

### **Objectif de cette étude:**

L'objectif de ce travail est d'étudier numériquement les transferts thermiques convectifs dans une étude numérique d'une cavité rectangulaire remplie d'un nanofluide hybride muni des obstacles et de déterminer l'effet des performances thermiques d'un nanofluide hybride à l'aide du logiciel de simulation numérique ANSYS Workbench qui permet la prédiction des

écoulements fluides par résolution des équations de bilan en se basant sur la méthode des volumes finis.

La simulation numérique a été procédée pour prédire l'effet des nombres de Reynolds, Darcy porosité et de la fraction volumique des nanoparticules dans le fluide.

✓ **Le premier** chapitre comporte une étude bibliographique concernant les principales recherches antérieures des chercheurs, en donnant des notions sur le nanofluides hybrides avec des techniques appliquées pour améliorer le transfert de chaleur par ces liquides.

✓ **Le deuxième** chapitre est consacré à définir et formulons le modèle physique, mathématique et les hypothèses simplificatrices ainsi que les conditions aux limites appropriées, ainsi que la résolution numérique.

✓ **Le troisième** chapitre nous illustrons une description de la méthode de la résolution numérique par l'utilisation du code commercial ANSYS Fluent®.

✓ **Le chapitre** quatrième présente en détail les résultats de simulation avec leurs interprétations.

✓ **Finalement**, une conclusion générale clarifier les points essentiels et les résultats finales de notre étude.

# ***Chapitre I***

## ***Généralités et revue bibliographique***

## I.1 Introduction:

Le transfert thermique est un processus qui implique le transfert de chaleur entre un système et son environnement. Les nanofluides hybrides, qui sont des fluides contenant des nanoparticules, présentent des propriétés thermiques améliorées par rapport aux fluides de base non modifiés, ce qui les rend utiles pour le transfert de chaleur dans de nombreuses applications.

Le transfert de chaleur dans les nanofluides hybrides peut être influencé par plusieurs facteurs, tels que la concentration, la taille, la forme et la nature des nanoparticules, la température, la pression et le régime d'écoulement du fluide. On reconnaît généralement trois modes distincts de transmission de la chaleur : conduction, convection et rayonnement [2].

Malgré l'augmentation des propriétés thermiques des nanofluides, de nombreuses applications réelles nécessitent des compromis entre diverses caractéristiques/propriétés des nanofluides. Par exemple, les nanoparticules d'oxyde métallique présentent une bonne inertie et stabilité chimiques, tandis que les nanoparticules métalliques comme l'aluminium, le cuivre L'argent possède des conductivités thermiques plus élevées mais est chimiquement réactif et instable [3]. Ainsi, un nouveau type de nanofluide appelé nanofluide hybride est créé en hybridant deux nanoparticules différentes avec propriétés uniques. Un nanofluide hybride est un mélange de deux nanoparticules distinctes dispersées dans une base fluide. Le but d'un nanofluide hybride est d'améliorer les propriétés thermiques par rapport à un fluide de base ou un mono-nanofluide par des effets synergiques.

Ce chapitre est consacré à la revue des principales investigations effectuée par le Etude numérique d'une cavité rectangulaire remplie d'un nanofluide hybride petit rappel sur les notions de base concernant les nanofluides et le nanofluide hybride et le transfert de chaleur.

## I.2. Généralités sur les Nanofluides hybrides:

### I.2.1. Généralité sur les nanofluides:

Les nanofluides sont des suspensions liquides contenant des nanoparticules de taille nanométrique (moins de 100 nm) dispersées dans un liquide de base [4]. Les nanoparticules peuvent être composées de métaux, d'oxydes, de carbone, de polymères ou d'autres matériaux, et le liquide de base peut être de l'eau, de l'huile, des liquides organiques ou des liquides ioniques. Les nanofluides présentent des propriétés physiques améliorées par rapport aux fluides de base non modifiés, telles que la conductivité thermique, la capacité thermique, la viscosité, la densité et la stabilité thermique. Ces propriétés peuvent être modifiées en fonction des propriétés des nanoparticules, de leur concentration, de leur taille, de leur forme et de leur dispersion dans le liquide de base.

Les nanofluides ont des applications dans divers domaines, notamment le refroidissement des composants électroniques, la production d'énergie, la lubrification, la thermochimie et le traitement des matériaux. Dans l'industrie, les nanofluides sont utilisés pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire la consommation d'énergie, ce qui conduit à une réduction des coûts et des émissions de gaz à effet de serre.

Cependant, il y a encore des défis à relever pour l'utilisation des nanofluides, notamment la stabilité des nanoparticules dans le liquide de base, la toxicité des nanoparticules et l'impact environnemental potentiel des nanofluides. De plus, la production et la manipulation des nanoparticules peuvent être coûteuses et nécessitent des équipements spécialisés. En somme, les nanofluides sont un domaine de recherche en pleine expansion, offrant de nombreuses opportunités pour l'amélioration des propriétés physiques des fluides et pour leur utilisation dans des applications industrielles variées. L'amélioration du transfert de chaleur dans ces systèmes est un sujet essentiel du point de vue des économies d'énergie [5].

### I.2.2 Les types de nanoparticules:

Il existe de nombreux types de nanoparticules, qui peuvent être classées en fonction du matériau à partir duquel elles sont fabriquées. Voici quelques exemples de types de nanoparticules couramment utilisées :

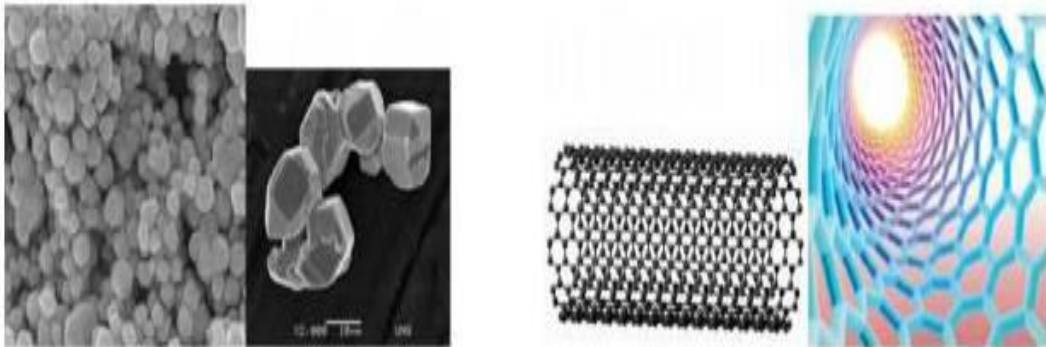
✓ **Nanoparticules métalliques:** Ce sont des particules fabriquées à partir de métaux tels que l'or, l'argent, le cuivre et le platine. Les nanoparticules métalliques sont largement utilisées dans l'électronique, la catalyse, la médecine et d'autres domaines.

✓ **Nanoparticules d'oxyde:** Ce sont des particules fabriquées à partir d'oxydes métalliques tels que le dioxyde de titane, l'oxyde de zinc et l'oxyde de fer. Les nanoparticules d'oxyde sont utilisées dans de nombreuses applications, notamment en tant que pigments, catalyseurs, matériaux de revêtement et composants électroniques.

✓ **Nanoparticules de polymère:** Ce sont des particules fabriquées à partir de polymères, tels que le polyéthylène et le polystyrène. Les nanoparticules de polymère sont utilisées dans des applications telles que les revêtements, les matériaux composites et la médecine.

✓ **Nanoparticules de carbone:** Ce sont des particules fabriquées à partir de différents types de carbone, tels que les nanotubes de carbone, les fullerènes et le graphène. Les nanoparticules de carbone sont utilisées dans des applications telles que la catalyse, l'électronique, la médecine et les matériaux composites [6].

Il existe de nombreux autres types de nanoparticules, y compris des nanoparticules de silice, de sulfure, de nitrite et de chalcogénure, chacune ayant des propriétés et des applications uniques.



*Figure I.1: Nanoparticules d'Argent [12]    Figure I.2: Nanotube de carbone [12]*

Les nanoparticules, ont des caractéristiques thermiques intéressantes comparées aux fluides de base traditionnels, voir le tableau I.1.

**Tableau. I.1** : Les propriétés thermophysiques de différents matériaux [13]

	Nanoparticules et fluide de base	$k$ (W/m.K)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/Kg.K)	$\mu$ (Pa.s)
Métallique (solides)	Cu	400	8954	383	
	Fe	80,2	7870	447	
	Ni	90,7	8900	444	
	Au	317	19,300	129	
	Ag	429	10,500	235	
	C (diamant)	2300	3500	509	
Oxyde Métallique (solides)	SiO <sub>2</sub>	1,38	2220	745	
	TiO <sub>2</sub>	8,4	4157	710	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	36	3970	765	
	CuO	69	6350	535	
	SiC	490	3160	675	
Liquides Non métalliques	L'eau	0,600	998.2	4183	0,0001003
	Ethylène-glycol (EG)	0,252	1111.4	2349	0,0157

### I.2.3 Les avantages du nanofluides:

Les nanofluides présentent plusieurs avantages par rapport aux fluides traditionnels. Voici quelques-uns des avantages des nanofluides.

**Conductivité thermique élevée:** Les nanofluides ont une conductivité thermique plus élevée que les fluides traditionnels, ce qui les rend plus efficaces pour le transfert de chaleur.

**Capacité de dissipation de chaleur élevée:** Les nanofluides peuvent dissiper la chaleur plus efficacement que les fluides traditionnels, ce qui les rend utiles pour le refroidissement de composants électroniques et d'autres applications à haute température.

**Augmentation de l'efficacité énergétique:** Les nanofluides peuvent être utilisés comme fluides de travail dans les centrales électriques pour augmenter l'efficacité des turbines et réduire la consommation d'énergie.

**Meilleure lubrification:** Les nanofluides peuvent réduire la friction et l'usure des surfaces, ce qui les rend utiles comme lubrifiants pour les machines industrielles et les moteurs.

**Amélioration de la dispersion des nanoparticules:** Les nanofluides peuvent améliorer la dispersion des nanoparticules dans les matériaux composites, ce qui améliore les propriétés mécaniques et thermiques des composites.

**Réduction de la taille des équipements:** Les nanofluides permettent de concevoir des équipements plus compacts et plus efficaces, grâce à leur meilleure conductivité thermique et à leur meilleure capacité de dissipation de chaleur.

**Meilleure stabilité:** Les nanofluides ont une meilleure stabilité que les fluides traditionnels, ce qui signifie qu'ils ne se dégradent pas aussi rapidement et qu'ils peuvent avoir une durée de vie plus longue.

**Faible toxicité:** Les nanofluides peuvent être fabriqués à partir de matériaux non toxiques, ce qui les rend plus sûrs pour l'environnement et les êtres humains.

En somme, les nanofluides présentent de nombreux avantages par rapport aux fluides traditionnels, ce qui les rend utiles dans de nombreuses applications industrielles et technologiques.

#### **I.2.4 Les inconvénients des nanofluides:**

Bien que les nanofluides présentent de nombreux avantages, il y a également quelques inconvénients à prendre en compte. Voici quelques-uns des inconvénients des nanofluides.

**Coût:** Les nanofluides sont plus coûteux à produire que les fluides traditionnels en raison du coût des nanoparticules [8].

**Stabilité à long terme:** Les nanofluides peuvent être instables à long terme en raison de la sédimentation des nanoparticules, ce qui peut réduire leur efficacité.

**Impact environnemental:** Les nanoparticules utilisées dans les nanofluides peuvent avoir un impact environnemental s'ils sont libérés dans l'environnement. Il est donc important de prendre des mesures pour prévenir leur libération et pour les éliminer correctement leur durée de vie.

**Toxicité:** Certaines nanoparticules utilisées dans les nanofluides peuvent être toxiques pour l'environnement et pour les êtres vivants, ce qui peut avoir des conséquences négatives pour la santé humaine et l'environnement.

**Effets inconnus sur la santé:** Les effets à long terme de l'exposition aux nanoparticules ne sont pas encore complètement compris, ce qui peut poser des risques potentiels pour la santé humaine

**Difficulté à la production en grande quantité:** La production en grande quantité de nanofluides peut être difficile et coûteuse en raison de la complexité de la fabrication et de la nécessité d'un équipement spécialisé.

Il est donc important de prendre en compte ces inconvénients lors de l'utilisation de nanofluides et de mettre en place des mesures pour minimiser leur impact négatif potentiel sur l'environnement et la santé humaine.

### I.2.5 Préparation des nanofluides

Les procédés de fabrication de nanoparticules sont nombreux. Ils peuvent être classés en deux catégories

- ✓ Les procédés physiques, comme le broyage mécanique,
- ✓ Les procédés chimiques, comme la pyrolyse ou la précipitation chimique,

Par contre pour les nanofluides il existe deux procédés distincts

#### **Procédé en une étape (One step method):**

La méthode en une seule étape consiste à produire les nanoparticules dans le fluide de base. Moins industrielle, elle n'est utilisable que pour certains nanofluides mais permet d'éviter l'agglomération et l'oxydation des nanoparticules. Un exemple de procédé consiste à condenser sous forme de nanoparticules une vapeur métallique dans un réacteur sur un film de liquide à basse tension de vapeur [8].

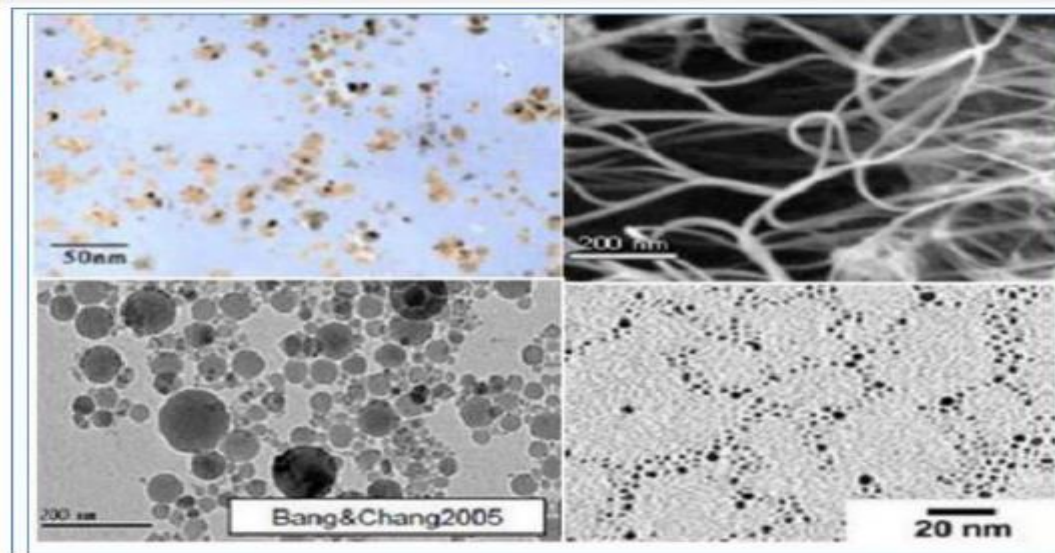
#### **Procédé en deux étapes (Two steps method):**

La première étape consiste à fabriquer les nanoparticules, et dans la seconde étape les nanoparticules sont dispersées dans un fluide de base [8].

### I.3.1 Nanofluide hybride :

Un matériau hybride est une combinaison de propriétés physiques et chimiques de deux ou plusieurs matériaux. Les deux nanoparticules ou plus sont dispersées dans un fluide de base pour obtenir les propriétés souhaitées pour des applications individuelles. Par exemple, l'Argent (Ag) et l'Oxyde de Titane ( $\text{TiO}_2$ ) dispersés dans le fluide de base d'une manière homogène et plus stable [9].

Les nanoparticules sont des particules très petites, généralement de l'ordre du nanomètre ( $1/10^9$  de mètre), qui sont dispersées dans un liquide. Les nanoparticules confèrent au nanofluide hybride des propriétés uniques telles qu'une conductivité thermique accrue, une résistance à la corrosion, une stabilité thermique et une meilleure viscosité. Ces propriétés peuvent être ajustées en fonction des types et des concentrations de nanoparticules et d'autres substances ajoutées au fluide. Les nanofluides hybrides sont largement utilisés dans les applications industrielles telles que les échangeurs de chaleur, les lubrifiants, les fluides de coupe et les fluides hydrauliques.



**Figure I.3:** Nanofluides vue au microscope électronique : éthylène glycol + cuivre 0.5% , eau + nanotube , eau + alumine , eau + or à 2nm [16].

### I.3.2 Les applications des nanofluides hybride

Les nanofluides hybrides ont de nombreuses applications potentielles dans divers domaines, notamment :

**Refroidissement électronique:** Les nanofluides hybrides peuvent être utilisés pour dissiper la chaleur générée par les composants électroniques tels que les processeurs, les circuits intégrés et les LED. En améliorant la conductivité thermique, ils permettent de réduire la température de fonctionnement des dispositifs électroniques et d'optimiser leurs performances [7].

**Échangeurs de chaleur:** Les nanofluides hybrides peuvent être utilisés comme fluides de transfert thermique dans les échangeurs de chaleur pour augmenter l'efficacité de transfert de chaleur. Cela peut conduire à des économies d'énergie significatives et à une meilleure performance des systèmes de climatisation, de refroidissement industriel, et d'autres applications nécessitant un échange de chaleur efficace.

**Automobile:** Les nanofluides hybrides peuvent être utilisés dans les systèmes de refroidissement des moteurs pour améliorer l'efficacité de refroidissement et prévenir la surchauffe. Ils peuvent également être utilisés dans les systèmes de climatisation des véhicules pour augmenter l'efficacité du refroidissement de l'habitacle.

**Médecine:** Les nanofluides peuvent être utilisés comme vecteurs de médicaments pour améliorer la distribution des médicaments dans le corps et leur efficacité [6].

**Conversion d'énergie thermique:** Les nanofluides hybrides peuvent être utilisés dans les systèmes de conversion d'énergie thermique tels que les panneaux solaires thermiques et les systèmes de récupération de chaleur pour améliorer l'efficacité de conversion et maximiser la production d'énergie.

**Industrie pétrolière et gazière:** Les nanofluides hybrides peuvent être utilisés dans les opérations de forage et de complétion de puits pour améliorer le transfert de chaleur et réduire les pertes de chaleur. Ils peuvent également être utilisés dans le domaine de la récupération assistée du pétrole pour améliorer l'efficacité des processus de récupération.

Il convient de noter que les applications des nanofluides hybrides sont encore en développement et que de nouvelles utilisations potentielles peuvent émerger à mesure que la recherche et le développement progressent dans ce domaine.

### **I.3.3 Synthèse de nanoparticules hybrides:**

La synthèse de nanoparticules hybrides est un domaine de recherche en nanotechnologie qui consiste à combiner des matériaux de différentes natures pour créer des particules avec des propriétés uniques et améliorées. Les nanoparticules hybrides peuvent être obtenues en combinant des matériaux organiques et inorganiques, des polymères et des métaux, des oxydes métalliques et des matériaux magnétiques, entre autres.

Il existe différentes méthodes de synthèse de nanoparticules hybrides, telles que la méthode dite "en une seule étape", qui consiste à synthétiser les deux matériaux simultanément, ou la méthode "en deux étapes", qui implique la synthèse séparée des deux matériaux avant leur combinaison. Les techniques utilisées pour la synthèse peuvent varier en fonction des matériaux utilisés et des propriétés recherchées pour les nanoparticules hybrides.

#### **I.3.3.1 Synthèse de la poudre nano-composite $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu}$ :**

La synthèse de la poudre nano-composite  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu}$  peut être réalisée par diverses méthodes telles que la métallurgie des poudres, la pulvérisation cathodique, la co-précipitation et la méthode sol-gel. Voici un exemple de synthèse de cette poudre nano-composite.

**Préparation de la solution de précurseur:** La solution de précurseur est préparée en dissolvant des sels de cuivre et d'aluminium dans de l'eau déionisée pour former une solution homogène.

**Ajout d'un agent de stabilisation:** Un agent de stabilisation tel que le polyvinylpyrrolidone (PVP) est ajouté à la solution de précurseur pour empêcher la croissance des particules.

**Formation de la poudre:** La solution de précurseur est séchée et chauffée à une température élevée pour former une poudre composite. La poudre est ensuite broyée pour obtenir une taille de particule souhaitée. Le mélange de poudre a finalement été broyé à la bille à 400 tours par minute pendant 1 heure afin d'obtenir une poudre composite homogène  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu}$  [10].

**Traitement thermique:** La poudre composite est soumise à un traitement thermique à une température élevée pour favoriser la formation de la phase d'oxyde d'aluminium.

**Caractérisation de la poudre:** La poudre est caractérisée par des techniques telles que la diffraction des rayons X, la spectroscopie infrarouge et la microscopie électronique à balayage pour déterminer sa taille de particule, sa structure et sa composition.

La poudre nano-composite  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cu}$  ainsi obtenue peut-être utilisée dans diverses applications telles que les revêtements, les catalyseurs et les dispositifs électroniques en raison de ses propriétés uniques telles qu'une conductivité thermique élevée, une résistance à l'oxydation et une résistance.

### I.3.3.2 Synthèse de la poudre nano-composite $\text{SiO}_2\text{-MoS}_2$ :

La synthèse de la poudre nano-composite  $\text{SiO}_2\text{-MoS}_2$  implique généralement la préparation de nanoparticules de  $\text{MoS}_2$  suivie de leur incorporation dans une matrice de  $\text{SiO}_2$ . Voici un processus possible pour la synthèse de la poudre nano-composite.

**Préparation de nanoparticules de  $\text{MoS}_2$ :** Les nanoparticules de  $\text{MoS}_2$  peuvent être préparées par diverses méthodes telles que la méthode de précipitation chimique, la méthode de dépôt chimique en phase vapeur, la méthode de synthèse hydrothermale, etc. Parmi ces méthodes, la méthode de synthèse hydrothermale est la plus couramment utilisée pour obtenir des nanoparticules de  $\text{MoS}_2$  de haute qualité.

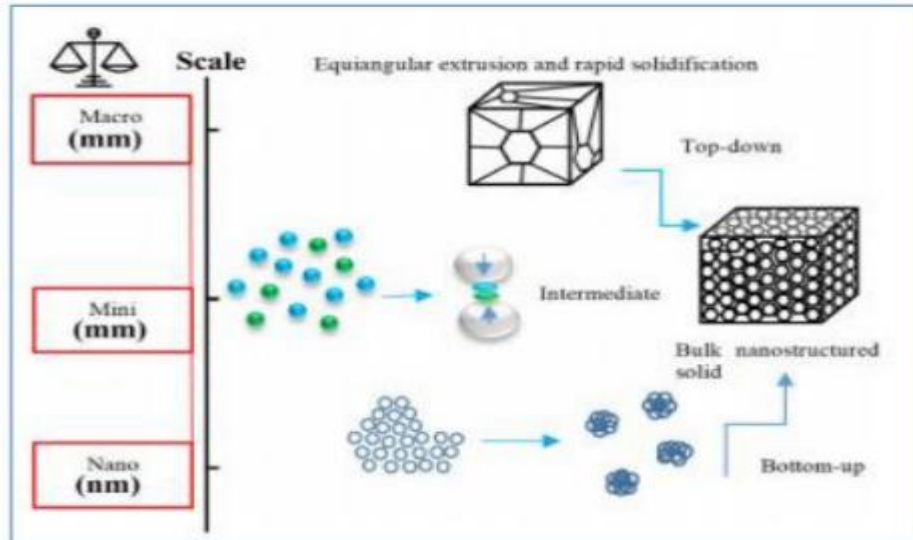
**Préparation de la matrice de  $\text{SiO}_2$  :** La matrice de  $\text{SiO}_2$  peut être préparée en utilisant une méthode de synthèse sol-gel. Dans cette méthode, un précurseur de silice est dissous dans un solvant organique pour former une solution. Cette solution est ensuite hydrolysée pour former un gel solide qui peut être séché et calciné pour former la matrice de  $\text{SiO}_2$ .

**Incorporation des nanoparticules de  $\text{MoS}_2$  dans la matrice de  $\text{SiO}_2$  :** Les nanoparticules de  $\text{MoS}_2$  préparées sont dispersées dans la solution préparée à l'étape 2. Cette suspension est ensuite

agitée pour assurer une distribution homogène des nanoparticules de MoS<sub>2</sub> dans la matrice de SiO<sub>2</sub>.

**Séchage et calcination:** La suspension obtenue est séchée et calcinée pour éliminer les solvants organiques et les impuretés restantes, et pour former la poudre nano-composite SiO<sub>2</sub>-MoS<sub>2</sub>.

Le processus de synthèse de la poudre nano-composite SiO<sub>2</sub>-MoS<sub>2</sub> peut être optimisé en fonction des propriétés souhaitées de la poudre, telles que la taille des particules, la densité, la pureté, etc.



*Figure I.4: Méthodes de production descendantes et ascendantes pour fabriquer différents types de nanostructures [11].*

### I.3.4 Propriétés thermophysiques des nanofluides :

De nombreuses études ont été menées afin de mesurer, mais aussi d'expliquer et de prédire, l'augmentation de la conductivité thermique des nanofluides. Différentes méthodes de mesure de conductivité thermique ont été employées, la plus courante reste la méthode utilisant un fil chaud en régime transitoire. Néanmoins, compte tenu de la dispersion des résultats, des biais expérimentaux ont été suspectés et d'autres méthodes de mesure ont été utilisées, comme la méthode  $3\omega$ , les méthodes stationnaires utilisant une différence de température entre deux plaques ou deux cylindres et les méthodes optiques basées sur la variation de l'indice de réfraction en fonction de la température [14].

#### I.3.4.1 la fraction volumique ( $\phi$ ):

La fraction volumique est une mesure de la concentration des nanoparticules dans un nanofluide. Elle représente le rapport entre le volume des nanoparticules et le volume total du nanofluide. Elle est généralement exprimée en pourcentage.

La fraction volumique est une variable importante qui peut influencer les propriétés thermo physiques des nanofluides. En général, plus la fraction volumique de nanoparticules est élevée, plus les propriétés thermo physiques du nanofluide sont modifiées. Cependant, une fraction volumique trop élevée peut également entraîner une augmentation de la viscosité et une diminution de la stabilité du nanofluide, ce qui peut affecter sa performance en tant que fluide de refroidissement ou de chauffage.

$$\varphi = \frac{\text{Volume solid}}{\text{Volume total du nano fluide}} = \frac{V_s}{V_s + V_f} \quad (\text{I. 1})$$

Où

$V_s$  : Volume des nanoparticules solides [m<sup>3</sup>].

$V_f$  : Volume du fluide de base [m<sup>3</sup>].

#### I.3.4.2 Conductivité thermique (K):

La conductivité thermique (K) est une propriété thermo physique importante des nanofluides. Elle mesure la capacité d'un matériau à conduire la chaleur à travers lui. Pour les nanofluides, la conductivité thermique est influencée par la conductivité thermique des nanoparticules et du liquide, ainsi que par la fraction volumique des nanoparticules.

En général, les nanofluides ont une conductivité thermique plus élevée que les liquides purs en raison de la présence de nanoparticules qui ont une conductivité thermique plus élevée. Cependant, la conductivité thermique des nanofluides dépend également de la taille, de la forme, de la composition chimique et de la concentration des nanoparticules, ainsi que des propriétés du liquide dans lequel elles sont suspendues.

La conductivité thermique des nanofluides peut être mesurée expérimentalement à l'aide de différentes techniques, telles que la méthode de la sonde thermique, la méthode de la plaque chauffante, la méthode de la barre chaude, etc. Ces techniques sont utilisées pour déterminer les propriétés thermo physiques des nanofluides afin de mieux comprendre leur comportement et d'optimiser leur utilisation dans diverses applications telles que les systèmes de refroidissement et de chauffage.

##### A- Modèle de Maxwell:

Effectivement, James Clerk Maxwell fut le premier à proposer un modèle pour estimer la conductivité thermique d'une suspension contenant des particules. Il a présenté cette idée dans un

article intitulé "On the Dynamical Theory of Gases" en 1867, où il a proposé une théorie de la conductivité thermique pour les gaz.

Plus tard, en 1881, Maxwell a publié un article intitulé "On the Electrical Resistance of Suspensions of Spherical Particles" dans lequel il a étendu sa théorie à la conductivité électrique des suspensions de particules sphériques [15].

$$K_{nf} = \frac{K_s + 2K_f + 2(K_s - K_f)\varphi}{K_s + 2K_f - (K_s - K_f)\varphi} K_f \quad (I. 2)$$

avec :

$k_{nf}$ : La conductivité thermique du nanofluide.

$k_f$ : La conductivité thermique du fluide de base.

$k_p$ : La conductivité thermique de la nanoparticule.

### B- Modèle de Hamilton & Crosser :

Le modèle de Hamilton et Crosser peut également être étendu aux nanofluides, qui sont des fluides contenant des nanoparticules dispersées. Dans le cas des nanofluides, le modèle de Hamilton et Crosser peut être utilisé pour estimer la conductivité thermique des nanofluides à des pressions et des températures élevées en considérant la présence de nanoparticules en suspension en introduisant la notion du facteur géométrique appelé la sphéricité ( $\psi$ ). La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante:

$$K_{nf} = \frac{K_s + (n-1)K_f - (n-1)(K_f - K_s)\varphi}{K_s + (n-1)K_f + (K_f - K_s)\varphi} K_f \quad (I. 3)$$

$n$  est un facteur de forme empirique donné par :  $n = 3/\psi$  [12].

### C- Modèle de Yu et Choi :

La relation entre Yu et Choi est une autre expression de la conductivité thermique, qui était en 2003. Les particules liquides et solides étaient considérées comme une base séparée avec une couche nanométrique d'un modèle en nanofluides. Cette couche est un pont thermique entre nanoparticules et liquides. Ce modèle est donné comme suit:

$$K_{nf} = \frac{K_s + 2K_f + 2(K_s - K_f)(1+\beta)^3\varphi}{K_s + 2K_f - (K_s + K_f)(1+\beta)^3\varphi} K_f \quad (I. 4)$$

$\beta$  est le rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules.

#### I.3.4.3 Viscosité dynamique ( $\mu$ ):

La viscosité dynamique, symbolisée par  $\mu$ , est une propriété des fluides qui mesure leur résistance à l'écoulement sous l'effet d'une contrainte de cisaillement. Elle est définie comme le

rapport entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement, et s'exprime en unité de Pascal-seconde [Pa.s] dans le système international d'unités (SI).

Plus précisément, la viscosité dynamique est la force de frottement par unité de surface qui s'oppose à un mouvement relatif entre deux couches de fluide qui se déplacent à des vitesses différentes. Elle dépend de la nature du fluide, de sa température et de sa pression, ainsi que de la géométrie de l'écoulement. Dans cette partie, nous nous intéresserons aux modèles les plus utilisés dans le cas des nanofluide.

#### **A- Modèle d'Einstein**

Pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides est la suivante :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 - 2.5\varphi) \quad (I.5)$$

avec :

$\mu_{nf}$ : La viscosité dynamique du nanofluide.

$\mu_f$ : La viscosité dynamique du fluide de base.

#### **B- Modèle de Brinkman**

Brinkman a étendu la formule d'Einstein pour couvrir une large plage de concentrations volumiques [17].

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 - \varphi) - 2.5 \quad (I.6)$$

### I.3.4.4 La masse volumique ( $\rho$ ):

La masse volumique, également appelée densité, est une grandeur physique qui mesure la quantité de matière contenue dans un volume donné. Elle est définie comme la masse d'une substance par unité de volume, généralement exprimée en kilogrammes par mètre cube [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] dans le système international d'unités (SI).

En général, la mesure de la masse volumique des nanofluides est importante pour comprendre leurs propriétés thermiques et de transfert de chaleur, qui sont influencées par la densité de la suspension

Dans le cas d'un mélange, la masse volumique est donnée par la relation suivante :

$$\rho_{nf} = \left[ \frac{m}{V} \right]_{nf} = \frac{m_f + m_s}{V_f + V_s} = \frac{\rho_f V_f + \rho_s V_s}{V_f + V_s} \quad (I.7)$$

A partir de la relation, on déduit alors la masse volumique du nanofluide:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s$$

$\rho_{nf}$ : Masse volumique du nanofluide.

$\rho_f$ : Masse volumique du fluide de base.

$\rho_s$  : La masse volumique des nanoparticules.

### I.3.4.5 Coefficient d'expansion volumique ( $\beta$ ) :

Le coefficient d'expansion volumique est une grandeur physique qui mesure la variation de volume d'un matériau en fonction de la variation de température. Il est également appelé coefficient de dilatation volumique ou coefficient de dilatation thermique volumique.

$$\beta_{nf} = (1 - \varphi)\beta_f + \varphi\beta_p \quad (I.8)$$

$\beta_{nf}$  : Coefficient de dilatabilité du nanofluide.

$\beta_p$  : Coefficient de dilatabilité de la nanoparticule.

$\beta_f$  : Coefficient de dilatabilité du fluide.

## I.4 Généralité sur le transfert de chaleur:

La chaleur est une forme d'énergie qui est causée par l'agitation des particules au sein d'une substance. Plus précisément, la chaleur est l'énergie cinétique totale des particules qui composent une substance, c.-à-d. l'énergie associée au mouvement désordonné de ces particules [8]. Cette agitation des particules est souvent décrite en termes de température. Lorsqu'une substance est chauffée, la température de la substance augmente, ce qui signifie que les particules qui la composent se déplacent plus rapidement et avec plus d'énergie. La chaleur est donc essentiellement une mesure de l'énergie cinétique des particules dans une substance.

On distingue habituellement trois modes de transfert de chaleur:

- La conduction thermique ou diffusion thermique,
- La convection,
- Le rayonnement thermique.

#### I.4.1. Transfert de chaleur par conduction :

La conduction thermique est le transfert de chaleur qui se produit à l'intérieur d'un matériau ou entre des matériaux en contact direct. La chaleur se propage de proche en proche à travers le matériau, en raison de la collision entre les atomes et les molécules. Elle concerne surtout les solides, mais aussi les liquides et les gaz pour lesquels elle est souvent négligeable par rapport à la convection ou au rayonnement [18].

La conduction thermique peut être décrite mathématiquement par la loi de Fourier, qui établit que le flux de chaleur  $Q$  à travers une surface est proportionnel à la différence de température  $\Delta T$  entre les deux côtés de la surface, à la surface elle-même  $S$  et à la conductivité thermique  $\lambda$  du matériau : La conductivité thermique  $\lambda$  est une propriété physique du matériau qui décrit sa capacité à conduire la chaleur. Les matériaux qui ont une conductivité thermique élevée, tels que les métaux, conduisent mieux la chaleur que les matériaux qui ont une conductivité thermique faible, tels que les isolants.

$$Q = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (I.9)$$

avec

$Q$ : Flux de chaleur transmis par conduction (W).

$\lambda$  : Conductivité thermique du milieu (W/m.K)

$S$  : Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $m^2$ ).

$dT/dx$  : Gradient de température en  $x$  en (K/m).

#### I.4.2 Transfert de chaleur par rayonnement :

Contrairement à la conduction et à la convection, qui nécessitent un milieu matériel pour transférer la chaleur, le rayonnement thermique est le transfert de chaleur par l'intermédiaire de ondes électromagnétiques. C'est ainsi que la terre est "chauffée" par le rayonnement thermique du soleil qui s'est propagé dans le vide, de la surface solaire, qui l'a émis, jusqu'à la terre qui l'absorbe.

Lorsque le rayonnement thermique atteint un objet, il peut être absorbé, réfléchi ou transmis. Si l'objet absorbe le rayonnement, il augmente en température en raison de l'énergie thermique absorbée. Si l'objet réfléchit ou transmet le rayonnement, il ne reçoit pas cette énergie

thermique et sa température ne change pas Le transfert de chaleur par rayonnement est souvent utilisé dans les processus de chauffage et de refroidissement. Par exemple, les radiateurs à infrarouge émettent du rayonnement thermique qui est absorbé par les objets et les personnes dans la pièce, les réchauffant ainsi. De même, les panneaux solaires fonctionnent en absorbant le rayonnement solaire et en convertissant cette énergie en électricité. L'équation de Stefan-Boltzmann qui permet de calculer le flux de chaleur transmis par rayonnement est [19]:

$$Q = \sigma \cdot T^4 \cdot S \quad [W] \quad (I.10)$$

où

Q : Flux de chaleur transmis par rayonnement (en Watts),

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$  est la constante de Steffan-Boltzmann [ $W/m^2 \cdot K^4$ ].

T : La température absolue [K].

S : Surface [ $m^2$ ].



*Figure I.5: La chaleur du soleil est transmise par rayonnement [20].*

#### **I.4.3 Transfert de chaleur par convection:**

Le transfert de chaleur par convection est un mode de transfert de chaleur qui se produit lorsque la chaleur est transférée d'un fluide (liquide ou gaz) à un objet ou un milieu environnant. Ce mode de transfert de chaleur se produit en raison du mouvement du fluide qui transporte la chaleur d'un endroit à un autre. Il existe deux types de convection :

##### **A- Naturelle**

La convection naturelle est un type de convection qui se produit lorsque la chaleur est transférée par le mouvement naturel du fluide, généralement dû à une différence de densité créée par une différence de température. Ce mode de transfert de chaleur est couramment observé dans

les liquides et les gaz et peut être observé dans de nombreux phénomènes naturels tels que les courants marins, les vents et les mouvements de l'atmosphère.

### **B- Forcée**

La convection forcée est un type de convection qui se produit lorsque le fluide est forcé à circuler à l'aide d'une source externe telle qu'une pompe ou un ventilateur. Contrairement à la convection naturelle, la convection forcée n'est pas due à une différence de densité créée par une différence de température, mais plutôt à une source externe qui génère un mouvement du fluide.

### **C- Mixte**

La convection mixte est un type de convection qui combine à la fois la convection naturelle et la convection forcée. Elle se produit généralement dans des situations où les deux types de convection sont présents simultanément.

Dans la convection mixte, le fluide est généralement chauffé ou refroidi à un point fixe, créant une différence de densité et un mouvement de convection naturelle. Cependant, le fluide peut également être forcé à circuler à l'aide d'une source externe telle qu'une pompe ou un ventilateur, créant un mouvement de convection forcée. Les deux types de mouvements de convection sont combinés pour former un mouvement de convection mixte.

#### **1.4.4 Les nombres sans dimension:**

L'étude des problèmes de transfert de chaleur par convection implique la résolution d'équations différentielles qui décrivent la mécanique des fluides, les échanges d'énergie, les transferts de masse. Ces équations sont généralement liées et difficiles à résoudre théoriquement, ce qui conduit à associer à la théorie l'expérimentation permettant de trouver les valeurs des grandeurs recherchées. L'expérimentation est souvent menée à une échelle différente de la réalité industrielle. La nécessité de définir des corrélations qui soient applicables à des appareils de tailles différentes opérant dans des situations différentes conduit à l'utilisation de paramètres adimensionnels qui permettent de définir des similitudes [18].

$$\begin{aligned}
 & \text{– Les forces d'inertie : } Fa = ma [Fa] = \rho L^2 V^2 \\
 & \text{– les forces de viscosité : } F\mu = \tau s [F\mu] = \mu LV \\
 & \text{– Les forces de gravité : } Fg = mg [Fg] = \rho g L^3 \quad (I.11)
 \end{aligned}$$

#### I.4.4.1 Nombre de Reynolds:

Le nombre de Reynolds (Re) est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser l'écoulement d'un fluide autour d'un objet. Il est nommé en l'honneur du physicien britannique Osborne Reynolds.

Le nombre de Reynolds est défini comme le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses dans un fluide. Plus précisément, il est défini comme :

$$\begin{aligned}
 \frac{F_a}{F_\mu} &= \frac{\text{forces d'inertie}}{\text{forces de viscosité}} \\
 \frac{F_a}{F_\mu} &= \frac{\rho L^2 V^2}{\mu LV} = \frac{\rho VL}{\mu} = Re \quad (I.12)
 \end{aligned}$$

où

V: Vitesse moyenne [m/s].

L : Longueur caractéristique [m].

Le nombre de Reynolds est important car il permet de déterminer si l'écoulement est laminaire ou turbulent. Si Re est inférieur à une certaine valeur critique (environ 2300 pour un écoulement autour d'un cylindre), l'écoulement est laminaire et se caractérise par des lignes de courant régulières et ordonnées. Si Re est supérieur à cette valeur critique, l'écoulement devient turbulent et se caractérise par des tourbillons chaotiques et désordonnés.

#### I.4.4.2 Nombre de Prandtl:

Le nombre de Prandtl, nommé en l'honneur du physicien allemand Ludwig Prandtl, est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser le rapport entre les effets de la viscosité et de la conduction thermique dans un fluide. Il est défini comme le rapport entre la diffusivité de la quantité de mouvement (viscosité dynamique) et la diffusivité de la chaleur (conductivité thermique) :

$$Pr = \mu C_p / k \quad (I.13)$$

où  $\mu$  est la viscosité dynamique,  $C_p$  la capacité thermique à pression constante et  $k$  la conductivité thermique.

Le nombre de Prandtl est important pour comprendre la convection naturelle, car il décrit la façon dont la chaleur est transférée dans un fluide qui se déplace. Les fluides avec des nombres de Prandtl faibles sont plus susceptibles de subir des instabilités et des turbulences lorsqu'ils sont

chauffés ou refroidis par le bas ou le haut, tandis que les fluides avec des nombres de Prandtl élevés sont plus résistants à ces effets.

#### I.4.4.3 Nombre de Nusselt:

Le nombre de Nusselt, nommé en l'honneur du physicien allemand Wilhelm Nusselt, est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser le transfert de chaleur entre un fluide et une surface solide. Il est défini comme le rapport entre le flux de chaleur convectif et le flux de chaleur conductif qui serait présent si le fluide était stagnant:

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (I.14)$$

où  $h$  est le coefficient de transfert de chaleur par convection,  $L$  est une longueur caractéristique du système (comme la distance entre la surface et le fluide) et  $k$  est la conductivité thermique du fluide. Le nombre de Nusselt est important pour la compréhension de la convection forcée et naturelle, ainsi que pour le dimensionnement et l'optimisation des échangeurs de chaleur et des systèmes de refroidissement. Des expériences peuvent être menées pour déterminer les valeurs du nombre de Nusselt pour différents systèmes et conditions de fonctionnement, ce qui permet ensuite de modéliser et de prédire les performances des systèmes similaires.

#### I.4.4.4 Nombre de GrasHoff:

Le nombre de GrasHoff, nommé en l'honneur du physicien allemand Franz GrasHoff, est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser les effets de la convection naturelle dans un fluide. Il est défini comme le rapport entre la force de flottabilité et les forces visqueuses dans un fluide en mouvement :

$$Gr = \frac{(g\beta\Delta T L^3)}{\nu^2} \quad (I.15)$$

où  $g$  est l'accélération due à la gravité,  $\beta$  est le coefficient de dilatation thermique du fluide,  $\Delta T$  est la différence de température entre la surface chaude et la surface froide,  $L$  est une longueur caractéristique du système (comme la distance entre les surfaces) et  $\nu$  est la viscosité cinématique du fluide.

Le nombre de GrasHoff est important pour comprendre la convection naturelle dans les fluides, comme le mouvement de l'air dans une pièce chauffée ou la circulation de l'eau dans un réservoir chauffé. Les fluides avec des nombres de GrasHoff élevés sont plus susceptibles de subir des instabilités et des turbulences, tandis que les fluides avec des nombres de GrasHoff faibles ont tendance à avoir une convection plus régulière. Le nombre de GrasHoff est également important pour la conception et l'optimisation des systèmes de chauffage et de refroidissement,

ainsi que pour la modélisation et la simulation numérique des phénomènes de convection naturelle.

#### I.4.4.5 Nombre de Rayleigh:

Le nombre de Rayleigh, nommé en l'honneur du physicien britannique Lord Rayleigh, est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides pour caractériser les effets de la convection naturelle dans un fluide visqueux et incompressible. Il est défini comme le rapport entre les forces de flottabilité et les forces visqueuses dans un fluide en mouvement, multiplié par un facteur lié à la géométrie du système :

$$Ra = \frac{(g\beta(T_s - T_\infty)L^3)}{\nu\alpha} \quad (I. 16)$$

$T_s$ : Température de la paroi [°C].

$T_\infty$ : Température du fluide loin de la paroi [°C].

$\nu$ : Viscosité cinématique du fluide [ $m^2/s$ ].

$\alpha = k/\rho C_p$ : Diffusivité thermique [ $m^2/s$ ].

#### I.4.4.6 Nombre de Hartmann:

Le nombre de Hartmann, nommé en l'honneur du physicien allemand Ludwig Hartmann, est un nombre sans dimension utilisé en électromagnétisme pour caractériser les effets magnétiques dans un fluide conducteur en mouvement. Il est défini comme le rapport entre les forces magnétiques et les forces de frottement visqueux dans le fluide.

$$Ha = B \cdot L \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}} \quad (I. 17)$$

$B$ : Champ magnétique [tesla].

$L$ : Longueur caractéristique [m].

$\mu$ : Viscosité dynamique [Pa.s].

$\sigma$ : Conductivité électrique [siemens/m]

### I.4.5 Techniques d'amélioration du transfert de chaleur

#### I.4.5.1 Avec des nanofluides:

Les nanofluides sont des fluides contenant des nanoparticules qui peuvent améliorer considérablement la conduction thermique. Voici quelques techniques pour améliorer le transfert de chaleur avec les nanofluides.

**Choix des nanoparticules:** La sélection de nanoparticules avec des propriétés thermiques optimales telles que la conductivité thermique et la capacité thermique spécifique est essentielle pour maximiser l'amélioration du transfert de chaleur.

**Concentration en nanoparticules:** La concentration en nanoparticules est un facteur important à considérer pour l'amélioration du transfert de chaleur. Une concentration élevée en nanoparticules peut entraîner une augmentation de la conductivité thermique, mais peut également entraîner une augmentation de la viscosité du fluide, ce qui peut entraîner une perte

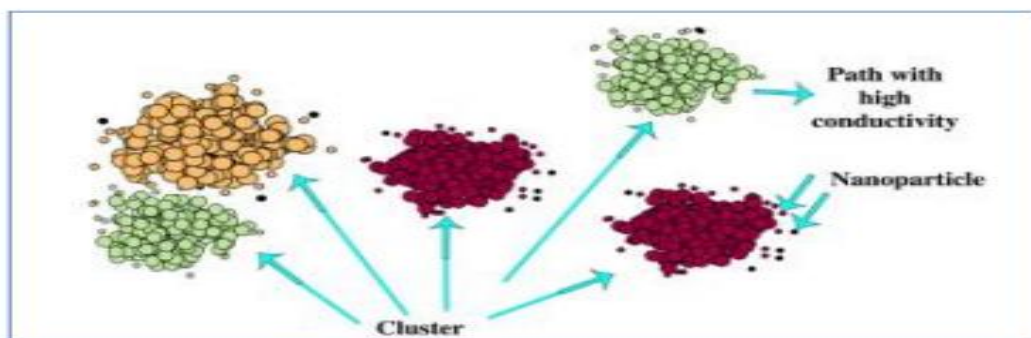
**Taille des nanoparticules:** La taille des nanoparticules est un autre facteur important à considérer. Des nanoparticules plus petites peuvent améliorer la conductivité thermique, mais peuvent également entraîner une augmentation de la surface spécifique, ce qui peut entraîner une augmentation de la viscosité et de la perte de pression.

**Choix du liquide de base:** Le choix du liquide de base peut également avoir un impact significatif sur les propriétés thermiques du nanofluide. Les fluides à haute conductivité thermique tels que l'eau et les fluides organiques sont souvent utilisés comme liquide de base.

**Traitement de surface des nanoparticules:** Les nanoparticules peuvent être traitées pour améliorer leur stabilité dans le fluide de base. Le traitement de surface peut également améliorer l'adhérence des nanoparticules à la paroi du tube, ce qui peut améliorer le transfert de chaleur.

**Conditions de préparation:** Les conditions de préparation telles que la température, la pression et le temps de mélange peuvent également avoir un impact significatif sur les propriétés thermiques du nanofluide. En général, le choix des nanoparticules, la concentration en nanoparticules, la taille des nanoparticules, le choix du liquide de base, le traitement de surface des nanoparticules et les conditions de préparation sont tous des facteurs clés à considérer pour améliorer le transfert de chaleur avec les nanofluides.

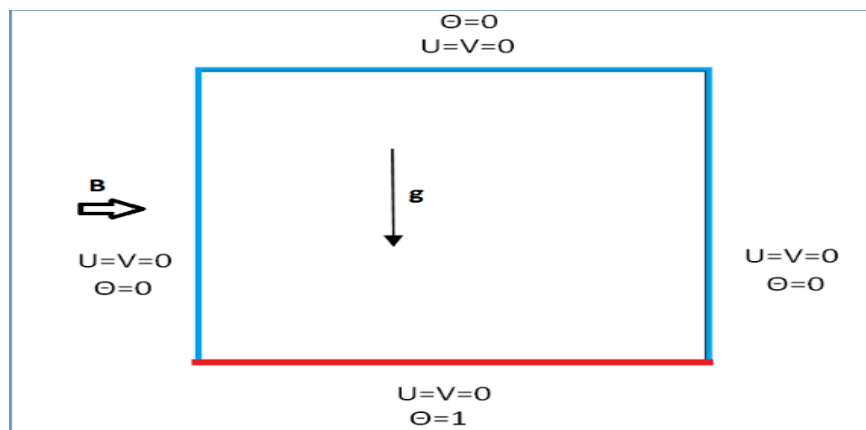
**I.4.5.2 Avec des nanofluides hybrides:** Les nanofluides hybrides peuvent remplacer les nanofluides simples puisqu'ils fournissent plus d'amélioration de transfert de chaleur. Le nanofluide hybride est une nouvelle classe de nanofluides conçus en dispersant deux nanoparticules différentes dans un fluide de transfert de chaleur conventionnel qui l'augmentation doublement de la conductivité thermique du fluide caloporteur permet d'améliorer l'efficacité du processus de transfert thermique associé.



**Figure I.6:** Effet d'accumulation sur l'amélioration de la conductivité thermique des nanofluides[21].

### I.5 Synthèse bibliographique:

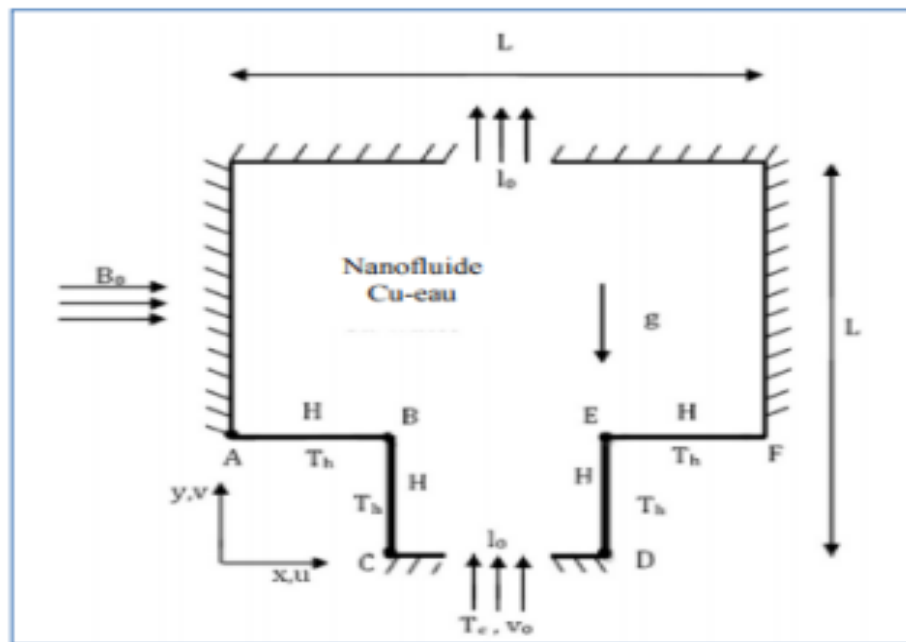
**M. Kalfali [23]** a montré dans cette étude numérique, qu'une présence d'un champ magnétique dans un sens pouvait modifier complètement l'écoulement de la convection thermique dans une cavité carrée chauffée par sa paroi inférieure, remplie par un nanofluide hybride (Cu + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-eau). Les études numériques effectuées par le logiciel ANSYS, à différents nombres de Rayleigh et nombre d'Hartmann ainsi que celui de la fraction volumique totale en nanoparticules sur les caractéristiques hydrodynamique et thermique au sein de la cavité. Les résultats obtenus ont permis de faire ressortir les remarques suivantes. Une augmentation de la fraction volumique des nanoparticules améliore le transfert de chaleur, une augmentation des nombres de Rayleigh produit un taux de transfert de chaleur nettement plus élevé, les simulations effectuées à différentes valeurs des nombres d'Hartmann ont mis en évidence l'existence d'une valeur du champ pour laquelle l'écoulement est ralenti. D'une façon générale, l'ajout de plusieurs types des nanoparticules permet d'améliorer le transfert thermique.



**Figure I.7:** Géométrie considérée du phénomène étudié associée aux conditions aux limites spécifiées [22].

**Kasaeipoor et al. [26]** ont présenté les résultats d'une étude numérique sur la convection mixte du nanofluide Cu-eau dans une cavité en forme de T en présence d'un champ magnétique uniforme. Certaines sections de la paroi de fond de la cavité sont chauffées à une température constante et les autres parois sont isolées thermiquement. Le nanofluide à une température relativement basse entre par le bas de la cavité. Les effets de paramètres tels que les nombres de Reynolds  $10 \leq Re \leq 400$ , de Richardson  $0,01 \leq Ri \leq 10$ , de Hartmann  $0 \leq Ha \leq 80$ , la fraction volumique du solide  $0 \leq \phi \leq 0,06$  et le rapport d'aspect de la cavité  $0,1 \leq AR \leq 0,4$  sur l'écoulement

du fluide et les performances thermiques de la cavité ont été étudiés. Les résultats indiquent que la présence de nanoparticules améliore le transfert de chaleur, sauf à  $Re = 100$  et  $Ha < 10$  ainsi que  $Re = 400$  et  $Ha < 60$ , où l'eau pure a un taux de transfert de chaleur légèrement plus élevé par rapport au nanofluide. En outre, l'influence du nanofluide sur l'augmentation du transfert de chaleur augmente à mesure que le rapport d'aspect augmente. Pour  $Ri = 0.01$  et  $1$ , le taux de transfert de chaleur maximal est obtenu à  $AR = 0.4$ , cependant, pour  $Ri = 10$ , le taux de transfert de chaleur maximal se produit à  $AR = 0.1$  (figure I. 2).



**Figure I.8** : Schéma de la cavité sous champ magnétique de Kasaeipoor et al.[23]

**Ibrir et Rahal** [24] ont mené une étude numérique de la convection naturelle dans une enceinte rectangulaire contenant du métal liquide et soumise à un gradient horizontal de température. La convection naturelle dans les métaux liquides a fait l'objet d'études menées par les métallurgistes et les ingénieurs des réacteurs nucléaires parce que les métaux liquides sont un excellent milieu de transfert de chaleur, Une modélisation du problème, en 2D et 3D, a été menée par l'utilisation du code ANSYS, qui se base sur la méthode des éléments finis, les résultats montrent l'influence de la nature du fluide sur les écoulements convectifs, des fluides, à hauts nombres de Prandtl (tel l'eau) et d'autres à bas nombres de Prandtl (tels le mercure et le gallium).

**Glades et Benhadid** [25] ont entamé une étude théorique et numérique en vue de quantifier l'importance du transfert de chaleur convectif par convection naturelle dans une cellule horizontale chauffée par le bas (configuration de Rayleigh-Benard), ils ont utilisés cinq types de nanofluides (Ag+eau), (Cu+eau), (CuO+eau), (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+eau) et (Au+eau) chacun dote de propriétés

thermophysiques différentes, ils ont montrés que dans ce travail que dans la configuration de Rayleigh-Benard, après l'apparition de la convection, le transfert de chaleur est plus élevé dans le fluide de base par rapport au nanofluides. Le nombre de Rayleigh dans les nanofluides diminue avec l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules. Ainsi, les nanoparticules en suspension dans l'eau vont retarder l'apparition de la convection dans ce dernier.

**I.6. Conclusion:**

Nous avons consacré ce chapitre pour présenter des différents travaux expérimentaux et numériques disponibles dans la littérature, que nous avons exposé dans la section recherche bibliographique, ont été réalisés afin de comprendre les caractéristiques de l'écoulement, le transfert de chaleur par convection en présence des nanofluide et du champ magnétique à l'intérieur de différentes cavité.

**Chapitre II**  
***Modélisation &  
formulation  
mathématique***

## II Modélisation et formulation mathématique

### II.1 Introduction:

Dans les écoulements causés par la force de flottabilité (convection naturelle), le comportement du fluide est complètement décrit par le champ d'écoulement (composantes de la vitesse), le champ thermique, la distribution de pression et les propriétés locales du fluide. Ces variables sont gouvernées par les lois fondamentales de conservation de la masse, de quantité de mouvement et d'énergie. La solution de cet ensemble des équations gouvernantes dépend des valeurs de plusieurs groupes adimensionnels. Parmi ces groupes nous distinguons les nombres de Rayleigh, de Grashof, de Prandtl, de Reynolds et d'autres nombres sans dimensions représentés par plusieurs propriétés physiques dépendantes de la température. L'importance mutuelle des valeurs des nombres adimensionnels dépend des conditions thermiques et des facteurs géométriques. L'objectif de ce chapitre consiste en premier lieu à donner les équations modélisant le phénomène physique traité dans ce mémoire.

### II.2 Equations générales en régime laminaire:

En mécanique des fluides, le régime laminaire est caractérisé par un écoulement fluide régulier et ordonné, sans turbulences. Les équations générales qui régissent le régime laminaire sont les équations de Navier-Stokes, qui décrivent le mouvement des fluides visqueux.

Les équations de Navier-Stokes sont exprimées en termes de la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Elles prennent la forme générale suivante :

#### II.2.1 Equation de continuité:

L'équation de continuité est une équation fondamentale en mécanique des fluides qui exprime la conservation de la masse d'un fluide en écoulement. Elle établit une relation entre la vitesse du fluide et la section transversale de l'écoulement. Cette équation signifie que le débit volumique du fluide (c.-à-d. le volume de fluide qui s'écoule par unité de temps) est constant le long de l'écoulement, même si la section transversale de l'écoulement change.

Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \cdot v) = 0 \quad (\text{II.1})$$

où  $\rho$  est la masse volumique et  $v$  est le vecteur de vitesse.

### II.2.2 Equation de quantité de mouvement:

L'équation de quantité de mouvement, également appelée équation d'Euler, est une équation fondamentale en mécanique des fluides qui décrit le mouvement d'un fluide incompressible, c.-à-d. un fluide dont la densité est constante.

L'équation de quantité de mouvement peut être exprimée mathématiquement de la manière suivante :

$$\frac{D}{Dt}(\rho \cdot V) = \rho F - \text{grad}(p) + \mu \Delta + \frac{1}{3} \mu \text{grad}(\text{div}(v)) \quad (\text{II.2})$$

F est une force par unité de volume.

$\mu$  est la viscosité dynamique.

### II.2.3 Equation de conservation d'énergie:

L'équation de conservation d'énergie, également appelée premier principe de la thermodynamique, est une équation fondamentale en thermodynamique qui exprime la conservation de l'énergie dans un système fermé. Elle établit une relation entre la variation de l'énergie interne d'un système et les échanges d'énergie avec le milieu extérieur.

L'équation de conservation d'énergie peut être exprimée mathématiquement de la manière suivante :

$$\frac{D}{Dt}(\rho C_p T) = \Delta(k \cdot T) + q + \beta T \frac{Dp}{DT} + \mu \Phi \quad (\text{II.3})$$

$(D/Dt)(\rho C_p T)$ : La variation totale d'énergie (par accumulation et convection).

$\Delta(k T)$ : La variation d'énergie par conduction.

$\beta T Dp/DT$ : La variation d'énergie due à la compressibilité.

$\mu \Phi$  : La dissipation irréversible due au frottement visqueux.

Les coefficients  $C_p$ ,  $k$  et  $\beta$  sont respectivement, la capacité calorifique, la conductivité thermique et le coefficient de dilatation isobare du fluide.

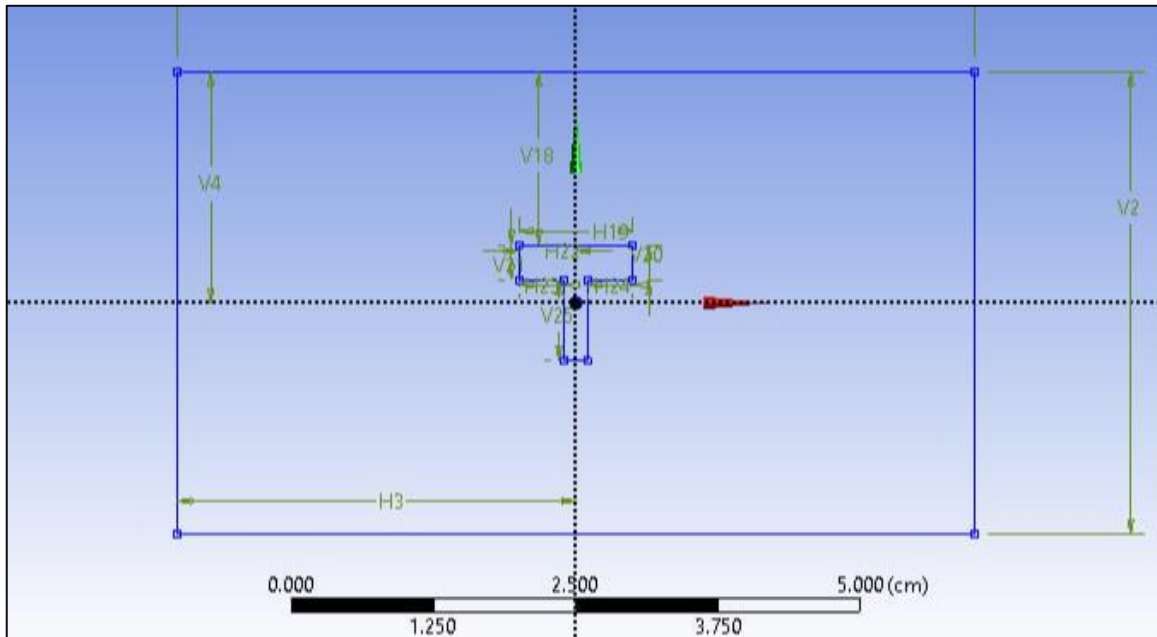
### II.3. La géométrie du problème étudié:

*Tableau II.1 Dimensions d'une cavité rectangulaire*

H1	V18	V2	V4	H19	H3
Longueur totale (L) est de 7 cm	Largeur de la cavité est de 1.5 cm	Hauteur d'obstacle de 4 cm	Largeur d'obstacle de 2 cm	Hauteur de la cavité est de 1 cm	Hauteur de la sortie est de 3.5 cm

La configuration étudiée est représentée sur la figure (II.1), elle consiste en une cavité rectangulaire remplie d'un nanofluide hybride. Ses parois sont maintenues à une température

constante (froide), tandis que sa paroi inférieure est subit partiellement à un flux de chaleur constant,  $\dot{q}$ . Le liquide qui circule dans la cavité est un nanofluide hybride à base d'eau contenant des nanoparticules de **Cu** et **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**.



**Figure II.1:** La configuration étudiée consistant en une cavité rectangulaire.

#### II.4. Formulation mathématique du problème :

La formulation mathématique du problème consiste à exprimer les équations qui décrivent le comportement du nanofluide hybride dans la cavité rectangulaire. Dans le cas d'une simulation CFD, les équations qui décrivent le comportement du fluide dans la cavité rectangulaire sont généralement des équations de Navier-Stokes, qui décrivent la conservation de la quantité de mouvement, et l'équation de continuité, qui décrit la conservation de la masse.

##### II.4.1. Hypothèses simplificatrices :

Afin de résoudre la solution des équations qui contrôlent le flux d'écoulement des nanoparticules, on va adopter les hypothèses de simplification suivantes:

- ✓ Le nanofluide hybride étudié est considéré comme un fluide newtonien incompressible,
- ✓ Les transferts de chaleur s'effectuent par convection libre,
- ✓ L'écoulement du nanofluide est laminaire permanent,
- ✓ L'écoulement et le transfert de chaleur sont bidimensionnels,
- ✓ La dissipation visqueuse est négligeable dans l'équation de l'énergie,
- ✓ Les propriétés thermophysiques du nanofluide hybride sont constantes, sauf pour la variation de la masse volumique selon l'approximation de Boussinesq.

### II.4.2 Equation de continuité :

Après l'application des hypothèses précédentes on obtient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.4})$$

u et v étant les composantes du champ de vitesse V(u,v) dans la direction x et y respectivement.

### II.4.3 Equation de quantité de mouvement :

- Equation de la conservation de la quantité de mouvement suivant x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{-1}{\rho_{nfh}} \frac{\partial p}{\partial x} + \vartheta_{nfh} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.5})$$

- Equation de la conservation de la quantité de mouvement suivant y :

$$\frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{-1}{\rho_{nfh}} \frac{\partial p}{\partial y} + \vartheta_{nfh} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (\rho\beta)_{nfh} (T - T_c)g - \frac{\sigma_{nfh} B_0^2}{\rho_{nfh}} \vartheta_{nfh} \quad (\text{II.6})$$

### II.4.4 Equation de l'énergie :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nfh} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.7})$$

### II.5 Equations adimensionnelles:

Les paramètres non dimensionnels suivants peuvent être utilisés pour convertir les équations déterminantes dans forme adimensionnelle :

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, U = \frac{uL}{v_{nfh}}, V = \frac{vL}{v_{nfh}}, P = \frac{pL}{(\rho v)_{nfh}}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}$$

$$Ha = B_0 \cdot L \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{nfh}}{\mu_{nfh}}} Pr = \frac{\mu_{nfh} C p_{nfh}}{K_{nfh}} Ra = \frac{g}{v_{nfh} \alpha_{nfh}} (T_s - T_\infty) \cdot L^3$$

#### II.5.1 Equation de continuité

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.8})$$

#### II.5.2 Equation de quantité de mouvement:

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (\text{II.9})$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{Ra}{Pr} \theta - (Ha)^2 V$$

#### II.5.3 Equations de l'énergie :

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Pr} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (\text{II.10})$$

### II.6 Les propriétés thermophysiques des nanofluides hybrides:

Les propriétés thermophysiques, pour le fluide de base et de l'oxyde de Cu et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont présentées dans le tableau (II.2). La densité effective, la diffusivité thermique, la capacité

thermique et le coefficient de dilatation thermique de la nanofluide hybride sont calculés en utilisant les expressions suivantes :

**Tableau II.2:** Les propriétés thermophysiques de nanoparticules et fluide de base

	l'eau	Cu	Al2O3
$C_P$ (J/kg.k)	4180	700	765
$K$ (W/m.K)	0.613	401	40
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	997.1	8933	3970

### II.6.1 la masse volumique

Pour calculer la masse volumique d'un nanofluide que nous supposons parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide de base) en fonction de la fraction volumique ( $\phi$ ) à une température  $T$  donnée. La masse volumique de ce mélange est définie comme suite :

$$\rho_{nfh} = \phi_{Al_2O_3} \rho_{Al_2O_3} + \phi_{Cu} \rho_{Cu} + (1 - \phi) \rho_f \quad (II.11)$$

### II.6.2. La fraction volumique

$$\phi = \phi_{Al_2O_3} + \phi_{Cu} \quad (II.12)$$

### II.6.3. la capacité calorifique

$$(\rho \cdot Cp)_{nfh} = (\phi \cdot \rho \cdot Cp)_{Al_2O_3} + (\phi \cdot \rho \cdot Cp)_{Cu} + (1 - \phi)(\rho \cdot Cp)_f \quad (II.13)$$

### II.6.4. La conductivité thermique

Le modèle de Maxwell (éq. II.14) qui est une équation générale pour trouver la conductivité thermique d'un mélange composé d'un fluide de base et de particules solides dispersées est développé dans cette étude pour déterminer la conductivité thermique d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cu :

$$K_{nfh} = \frac{\frac{(\phi \cdot K)_{Al_2O_3} + (\phi \cdot K)_{Cu}}{\phi} + 2K_f + 2[(\phi \cdot K)_{Al_2O_3} + (\phi \cdot K)_{Cu}] - 2\phi K_f}{\frac{(\phi \cdot K)_{Al_2O_3} + (\phi \cdot K)_{Cu}}{\phi} + 2K_f - [(\phi \cdot K)_{Al_2O_3} + (\phi \cdot K)_{Cu}] + \phi K_f}$$

**II.6.5. La Viscosité dynamique**

La viscosité dynamique du nanofluide hybride

$$\mu_{nfh} = \frac{\mu_f}{(1 - \Phi_{Al_3O_3})^{2,5} (1 - \Phi_{Cu})^{2,5}} \quad (\text{II. 15})$$

**II.7 Conclusion:**

Dans ce chapitre nous avons exposé le modèle physique examiné et les équations qui régissent ce modèle physique, ensuite, d'une cavité rectangulaire remplie d'un nanofluide hybride. Nous avons spécifié les conditions aux limites sur toutes les frontières du domaine de l'écoulement pour résoudre les équations de la dynamique des fluides qui se font par l'utilisation des méthodes numériques où intervient le concept de la discrétisation.

**Chapitre III**  
***Résolution numérique***

## III. Résolution numérique

### III.1 Introduction:

Après des années, le développement des ordinateurs a encouragé les scientifiques à résoudre des problèmes de plus en plus complexes pour lesquelles les solutions analytiques ne peuvent être trouvées. . La résolution des équations d'un phénomène physique de convection thermique se fait par l'utilisation d'une méthode numérique. Ces types des phénomènes sont généralement modélisés par des équations aux dérivées partielles (E.D.P) non-linéaires. Cette dernière consiste à développer les moyens de la résolution de ces équations. A cette étape, intervient le concept de la discrétisation. Pour obtenir une solution numérique, le modèle mathématique constitué par une équation différentielle aux dérivées partielles (EDP) ou par un système d'EDP est transformé, à l'aide d'une méthode de discrétisation en système d'équations algébriques. Il existe plusieurs schémas de discrétisations des équations aux dérivées partielles (E.D.P) : les différences finies, les éléments finis et les volumes finis[26].

Ce chapitre est dédié à la modélisation de l'écoulement et du transfert thermique dans les nanofluides hybrides. On traite de l'étude du refroidissement de composants électroniques, principalement à l'aide du logiciel Workbench ANSYS qui est spécialement destiné à la dynamique des fluides numérique (CFD), CFD «computational fluid dynamics» ensemble des méthodes numériques pour obtenir une solution approchée pour des problèmes de la dynamique des fluides et transfert de chaleur. Équations de la mécanique des fluides sur ceux resaluent par des méthodes numériques. Les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie sont résolues par la méthode des volumes finis, en utilisant le code de calcul FLUENT.

### III.2 Procédure de la simulation:

#### III.2.1 Le progiciel ANSYS® Workbench:

Le Workbench est un progiciel permettant de gérer les fichiers et le lancement des différents logiciels à partir d'une fenêtre unique.



*Figure III.1: Fenêtre lancement du logiciel*

### III.2.2 Menu principal du progiciel ANSYS Workbench

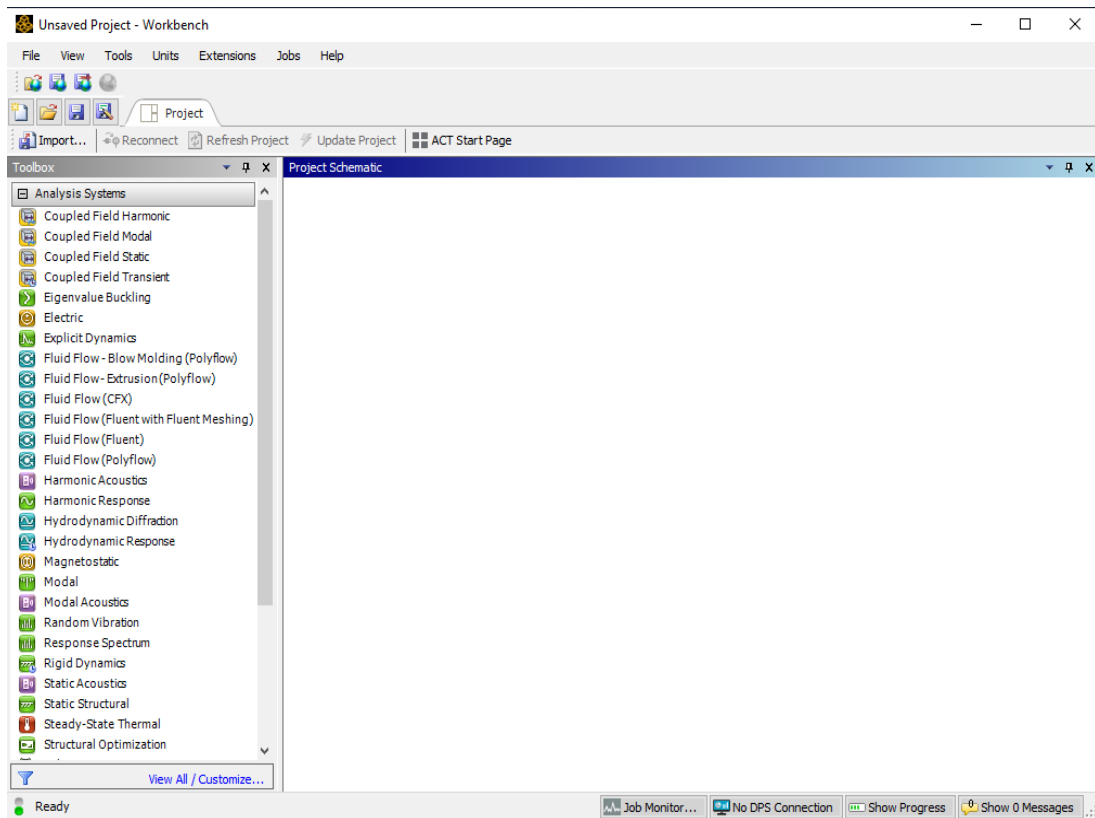


Figure III.2: Menu principal de Workbench.

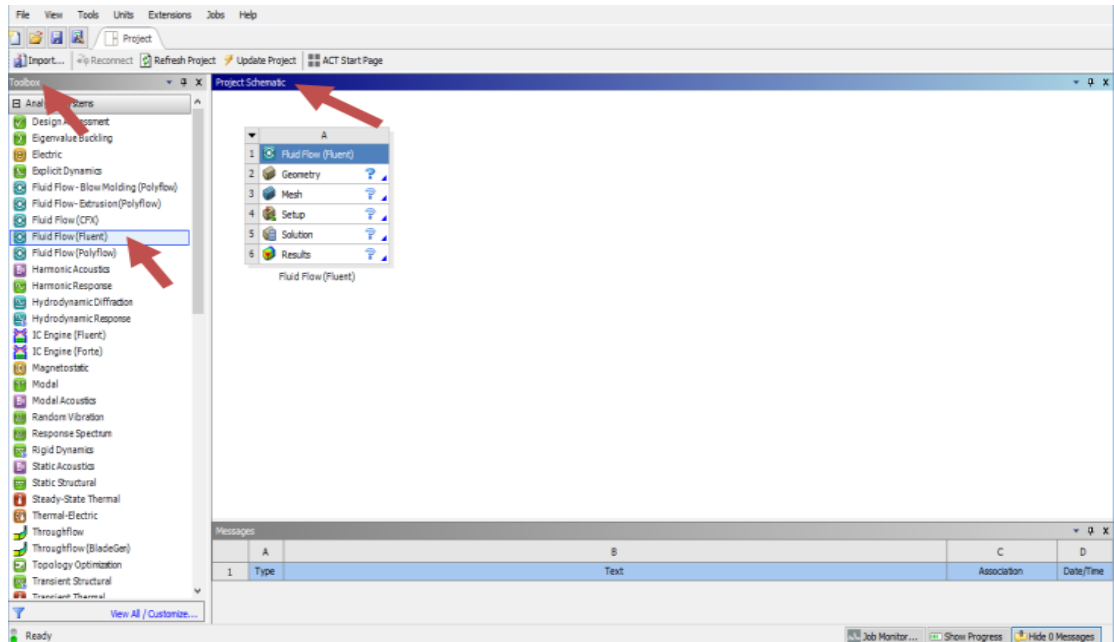


Figure III.3: Création d'une analyse (projet) en mécanique de fluide

La séquence des calculs numériques se compose en 5 étapes :

**1. Géométrie:** Ce module est employé pour importer, créer, modifier ou mettre à jour un modèle qui peut être utilisé pour l'analyse.

**2. Maillage:** Cette cellule est associée à la définition de la géométrie, des systèmes de coordonnées et du réseau de communication, ainsi qu'au maillage dans le module de simulation mécanique. Elle est également utilisée pour déclarer certaines propriétés physiques des matériaux spécifiques.

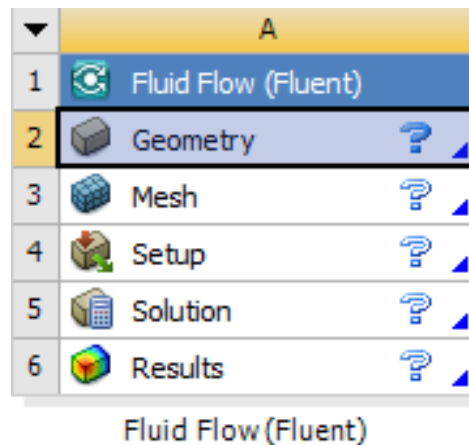
**3. Configuration:** Il permet de spécifier les charges, les conditions aux limites et d'autres configurations nécessaires pour l'analyse.

**4. Solution:** Cette cellule offre la possibilité d'accéder aux données de résolution.

**5. Résultats:** Cette cellule combine les résultats de l'analyse.

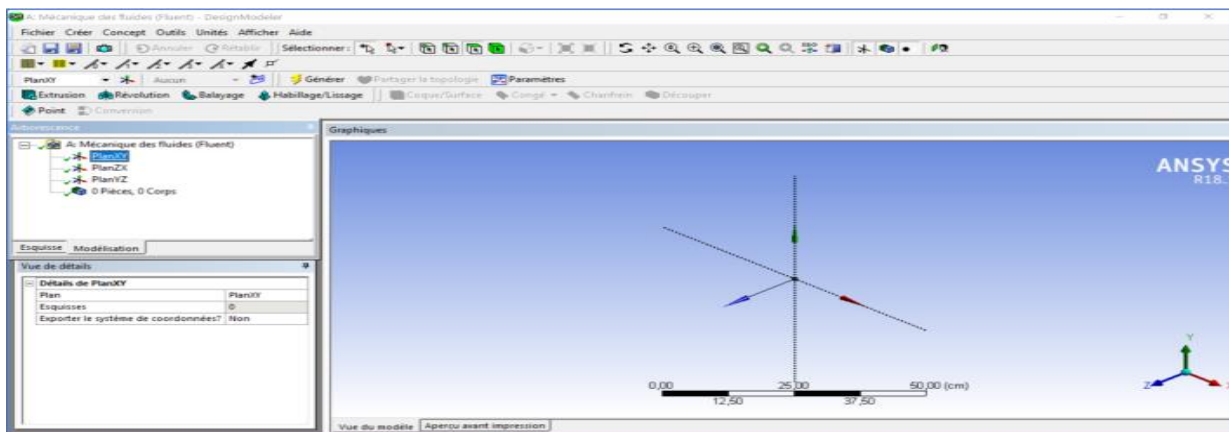
### III.2.3 Création de la géométrie:

Pour créer une géométrie avec ANSYS Workbench double-clique sur la géométrie pour ouvrir le module de création géométrique (Design Modeler).



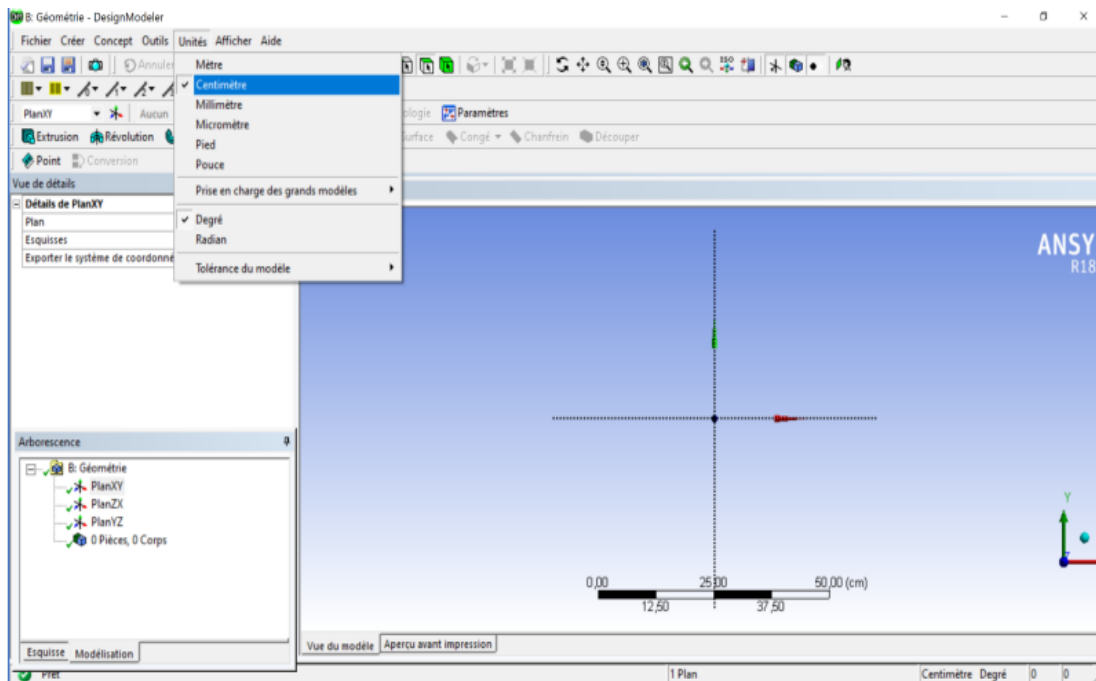
**Figure III. 4:** Création d'un projet en mécanique de fluide

Après avoir ouvert le module de création de géométrie, il est nécessaire de choisir le type d'analyse, soit 2D ou 3D. Dans la liste des unités, nous sélectionnons le centimètre (cm) comme unité de dimension



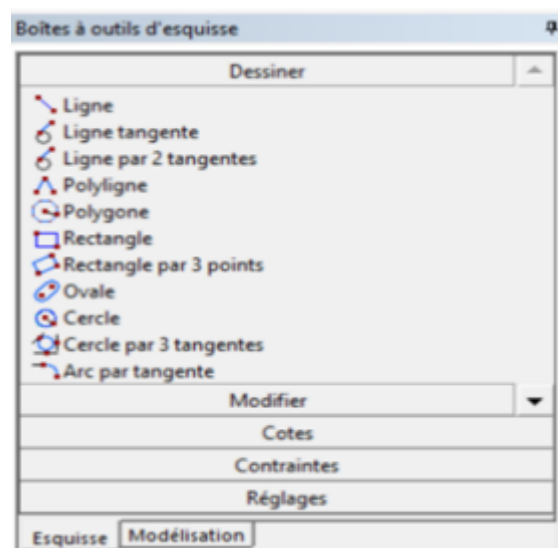
**Figure III. 5:** Création du modèle de la géométrie.

Une fois que nous ouvrons le module de création de géométrie, nous sélectionnons le millimètre (mm) comme unité de dimension dans la liste des unités.



**Figure III 6:** Identification de l'unité.

Pour dessiner l'esquisse, il faut cliquer sur la boîte à outils "Esquisse". Cette boîte à outils permet de créer la géométrie, d'ajouter des dimensions et de contraindre la géométrie selon les besoins :



**Figure III 7:** Création d'esquisse

On obtient cette esquisse :

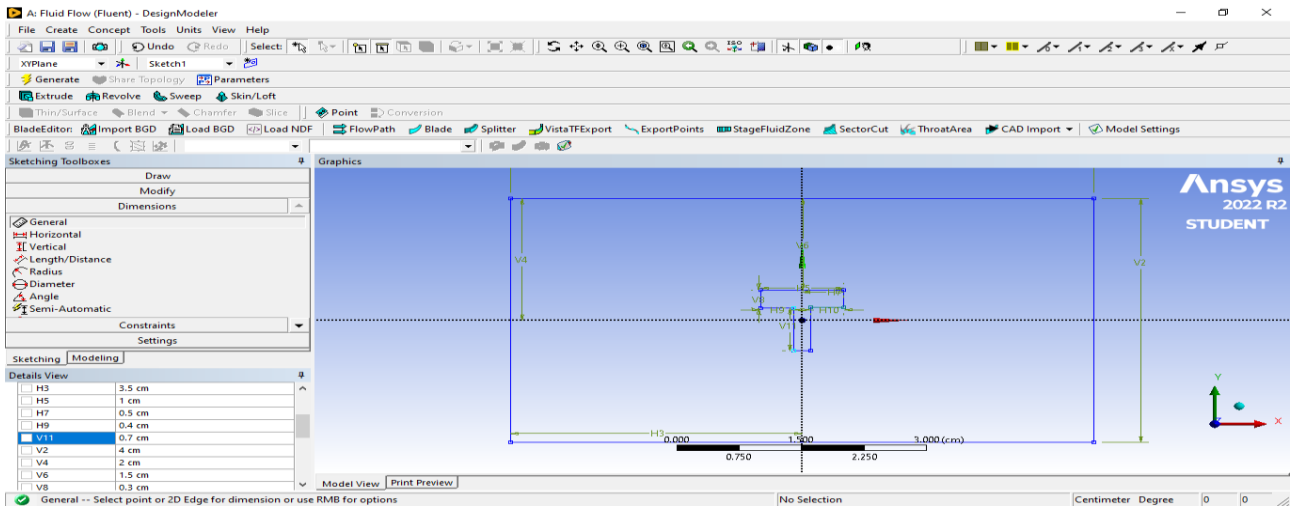


Figure III 8: Création d'esquisse

Maintenant la définition des surfaces se fait dans le menu :

- Concept surface à partir d'esquisse.
- Esquisse.
- Appliquer générer.

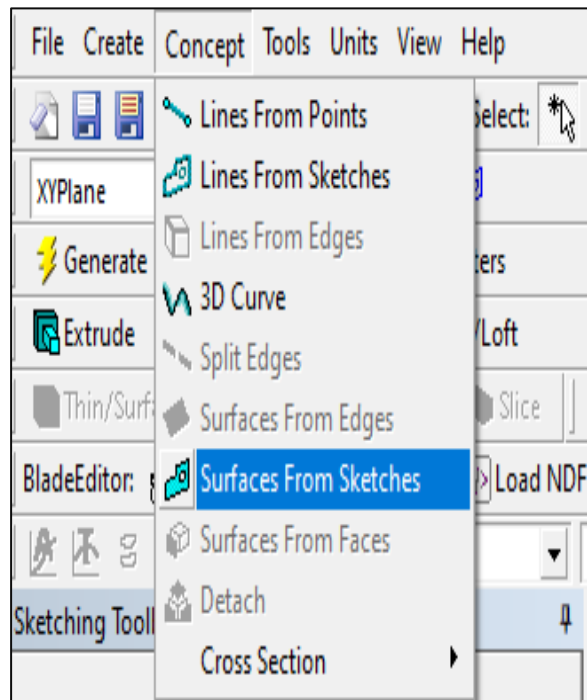
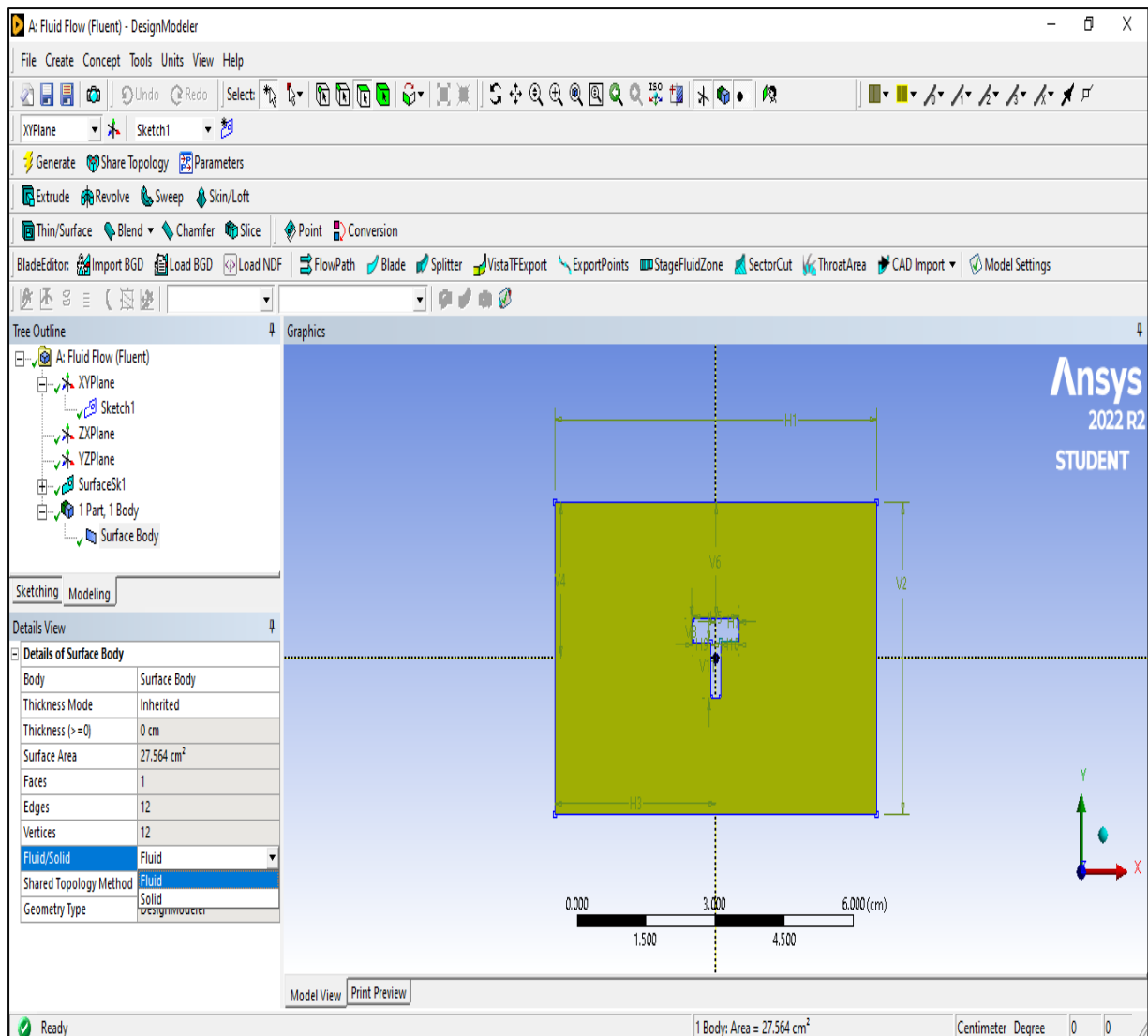


Figure III 9: Concept surface à partir d'esquisse

Pour clarifier, il est important de préciser que toutes les surfaces définies jusqu'à présent appartiennent en réalité à la même zone de fluide.



**Figure III. 10:** Définition de la zone du fluide. .

Ensuite, nous passons à l'étape suivante, qui est maillage.

### III.2.4. Le maillage

The meshing in Workbench was performed by double-clicking on the mesh in the Workbench toolbox once. This initiates the "Meshing" process.

Dans l'étape de maillage, il y a deux points importants à considérer :

- La surnommations des éléments qui construit la géométrie pour réaliser cette dernière étape, Sélectionner une partie de la géométrie à l'aide de ces deux icônes :

Après on clique droit sur l'élément que nous voulons surnomme et on choisit Créer "une sélection nommée" ou directement on clique sur "N", puis Lui donner un nom comme le montre la figure suivante :

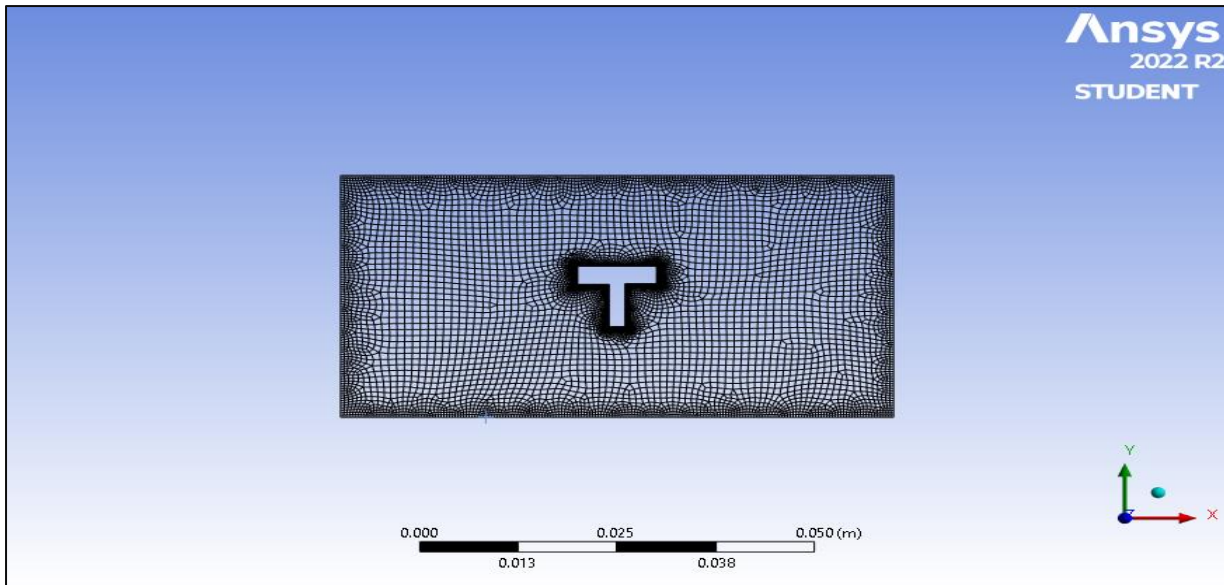


Figure III. 11: le maillage utilisé.

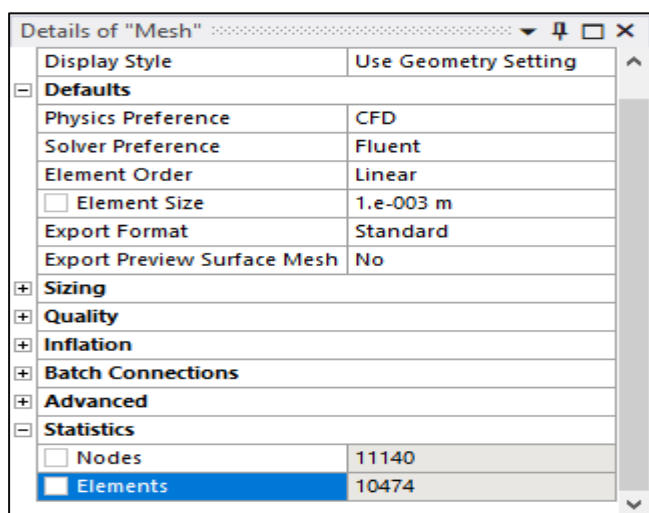


Figure III. 12: le nombre des nœuds et les éléments.

### III.2.4.1. Configuration

Automatiquement, on va poser nos conditions aux limites et on va poser les données comme montre les figures suivantes :

- **Model** : laminaire, équation de l'énergie,
- **Matériels** : On ajoute les matériels utilisé dans notre étude et changeons les propriétés thermiques et physiques (la masse volumique, la chaleur spécifique, la conductivité thermique et la viscosité dynamique) pour le nano fluide hybride.
- **Cell zone conditions** : Nous avons identifié le nano fluide hybride dans la cavité.
- **Boundary Conditions**: Nous avons identifié les conditions aux limites suivantes :

- ✓ Up\_wall : Température imposée (Température Froids) avec le champ mantique.
- ✓ Down\_wall : Température imposée (Température chauds).

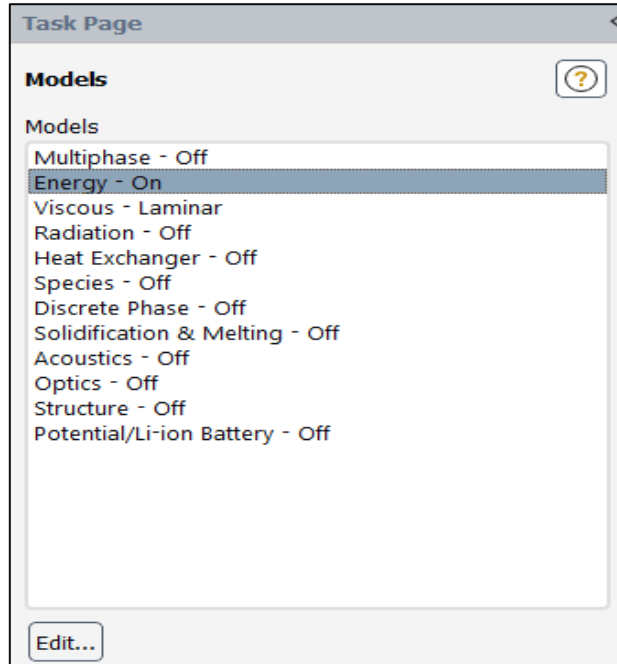


Figure III 13: Model (laminaire, équation de l'énergie)

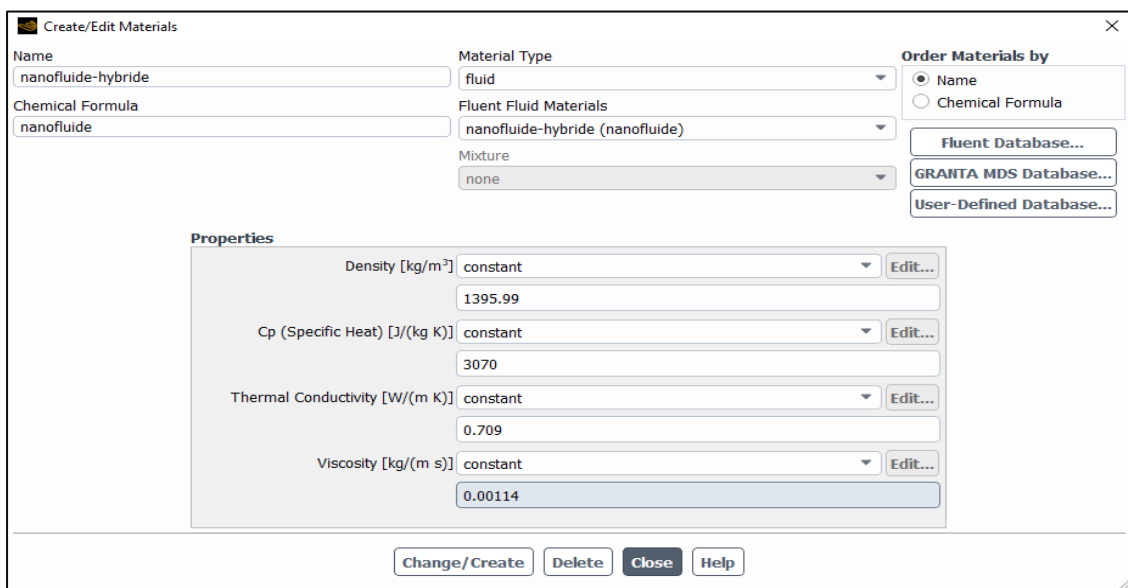


Figure III.14: Création les données du nanofluide hybride

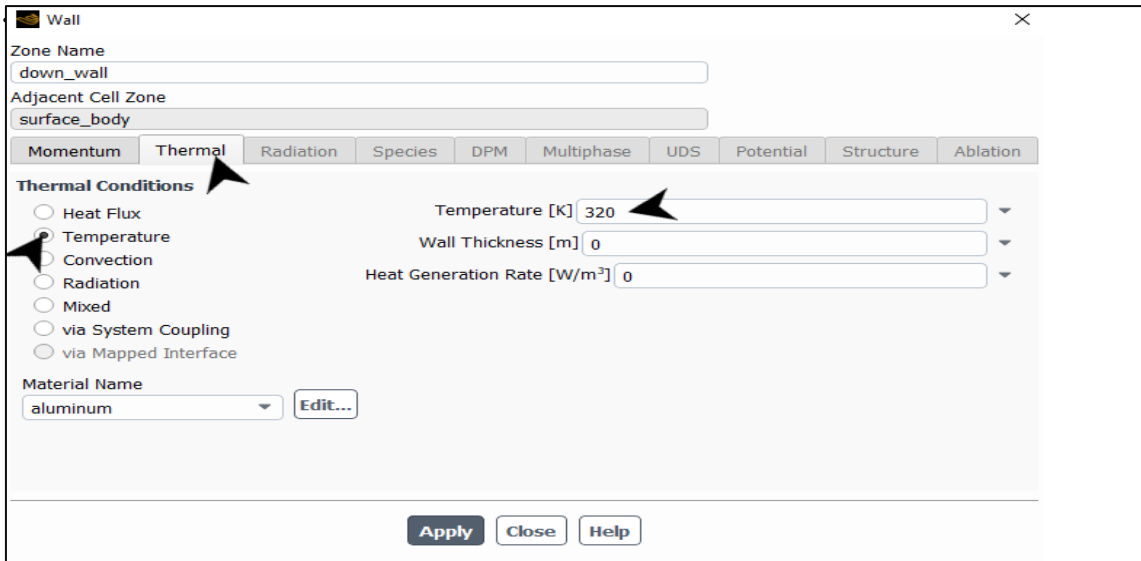


Figure III.15: Condition aux limites –DOWN\_WALL- Température imposée

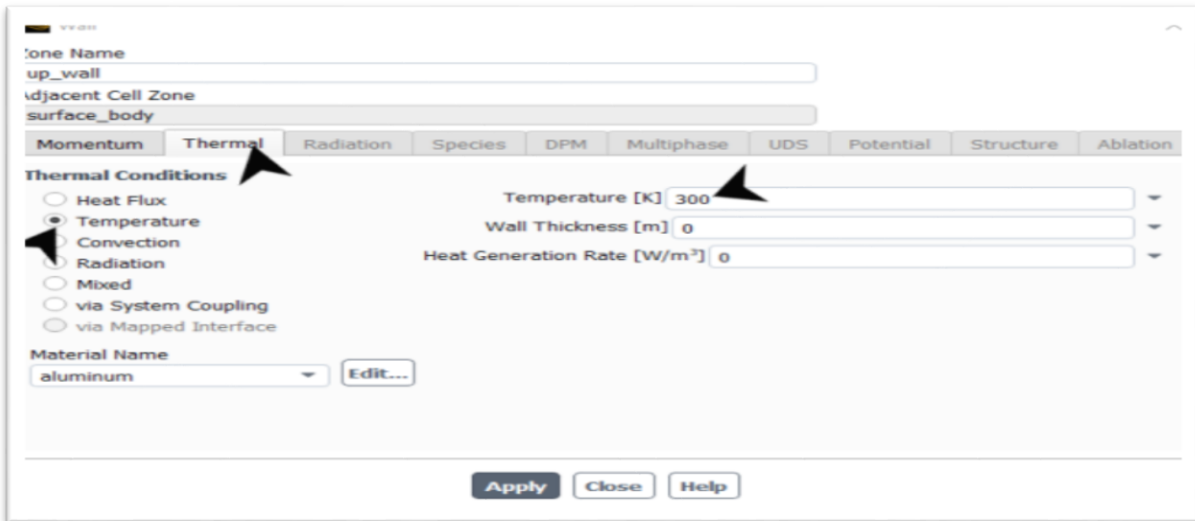


Figure III.16: Condition aux limites –UP\_WALL- Température imposée

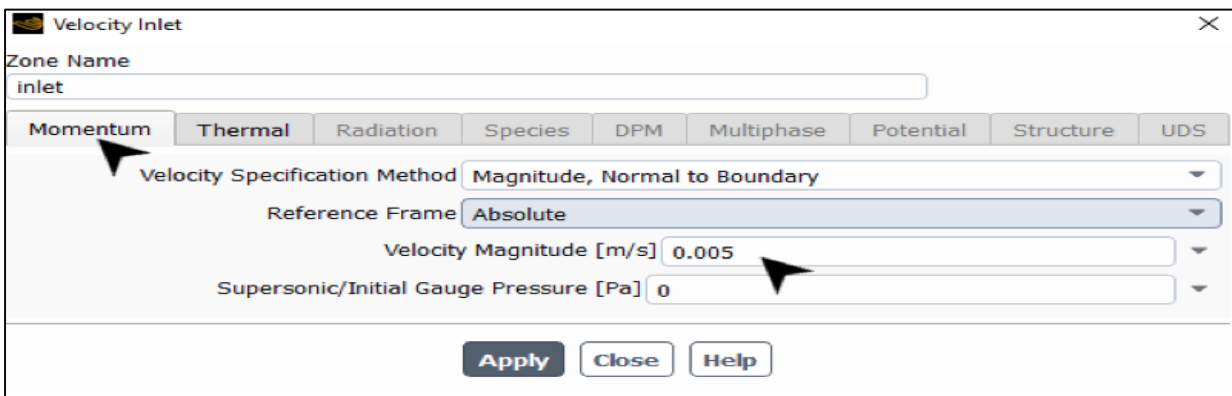
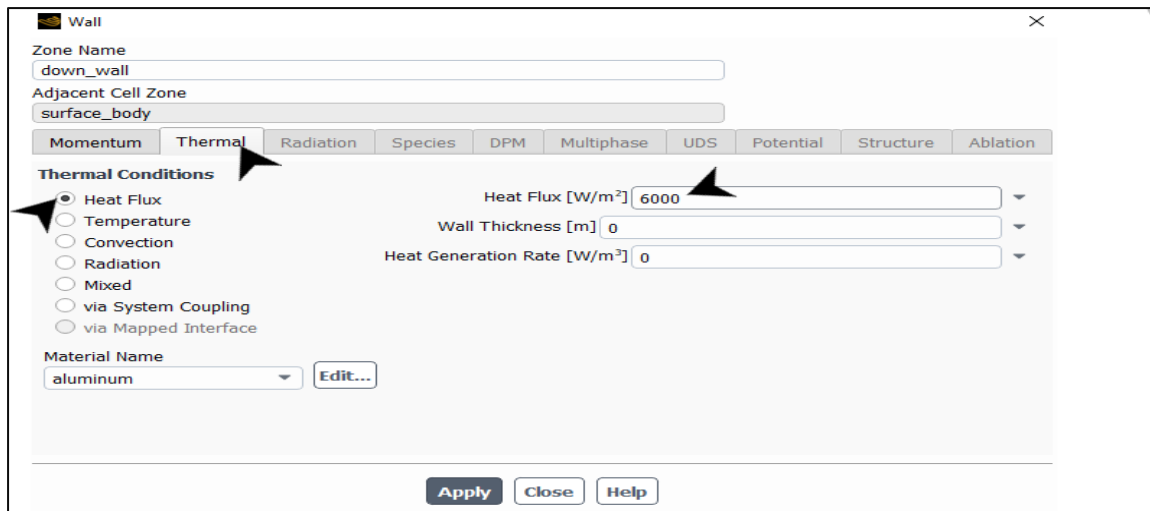


Figure III. 17: Condition aux limites –INLET- vitesse imposée



*Figure III.18: Condition aux limites –DOWN WALL- flux de chaleur imposé*

### III.3. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons fourni une explication détaillée d'ANSYS et de son utilisation, ainsi que les étapes de calcul utilisant la simulation numérique par CFD. Nous avons particulièrement porté notre attention sur les résultats liés au champ de température, à la vitesse et au flux de chaleur. Ces résultats seront présentés, interprétés et discutés dans le chapitre suivant.

***Chapitre IV***  
***Résultats & discussions***

## IV Résultats et discussions

### IV.1 Introduction:

Dans cette section, nous avons présenté les résultats numériques obtenus à l'aide d'une simulation numérique effectuée avec le progiciel de CFD "ANSYS FLUENT®" dans un rectangle creux en présence d'un nanofluide hybride (Cu+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-eau), les parois sont maintenues à une température constante, qui est une température froide, tandis que sa paroi inférieure et sa paroi interne sont partiellement exposées à une température constante (chaude).

Dans ce chapitre, nous effectuons des simulations numériques des écoulements à travers ce type de configuration, tout en ajustant certains paramètres tels que la vitesse et la température et le flux de chaleur.

### IV.2 Résultats et interprétation:

Dans cette section, nous avons effectué plusieurs simulations numériques en utilisant le code commercial ANSYS Fluent® (édition 2022) selon une licence STUDENT privée, pour présenter les résultats de simulation et leurs interprétations des différents paramètres d'écoulement d'un nanofluide hybride dans un rectangle creux.

Dans ce calcul, la fraction volumique des nanoparticules joue un rôle crucial, et leur exposition à un cycle de température varie entre différentes valeurs. ( $\Delta T = 20, \Delta T = 40, \Delta T = 60$ ). En ce qui concerne la paroi inférieure, ainsi que le rapport de la paroi intérieure, ils sont pris en considération dans cette analyse ( $T = 320, T = 360, T = 400$ ), en outre, une vitesse différente est également prise en compte ( $V = 0.005, V = 0.015, V = 0.025$ ).

### Propriétés thermophysiques

Dans nos calculs nous avons utilisés le nanofluide (Eau-Cu et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), les propriétés thermophysiques sont déterminées à partir des modèles mentionnés au chapitre II.

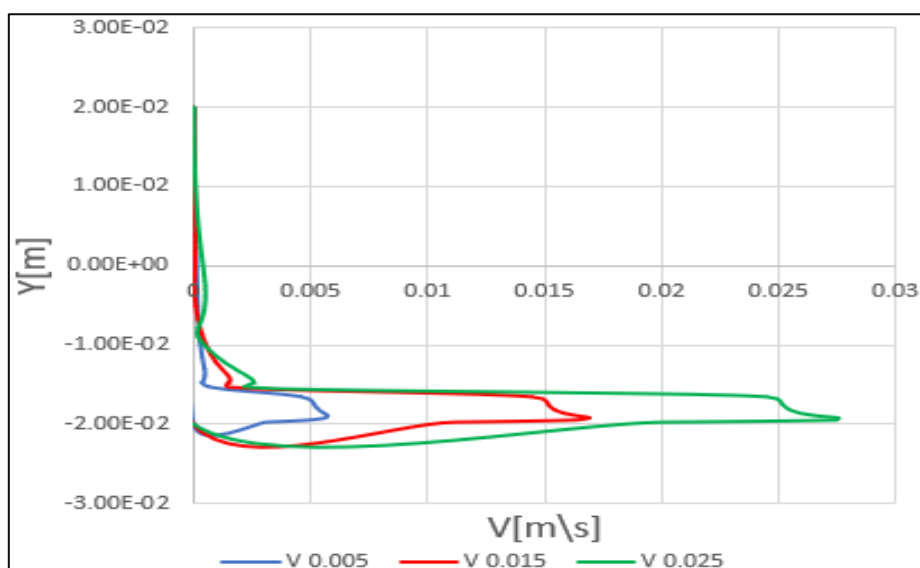
**Tableau IV 1.** Propriétés thermophysiques pour le nanofluide hybride

Fraction volumique du nano fluide hybride	K (W/m. K)	$\mu$ (Kg/m.s)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Cp (J/kg. K)	$\beta$ (1/k)	$\sigma$ (Seime/m)
$\varphi = 0.05$	0.709	0.00114	1395.99	3070	$1.53 \times 10^{-4}$	-

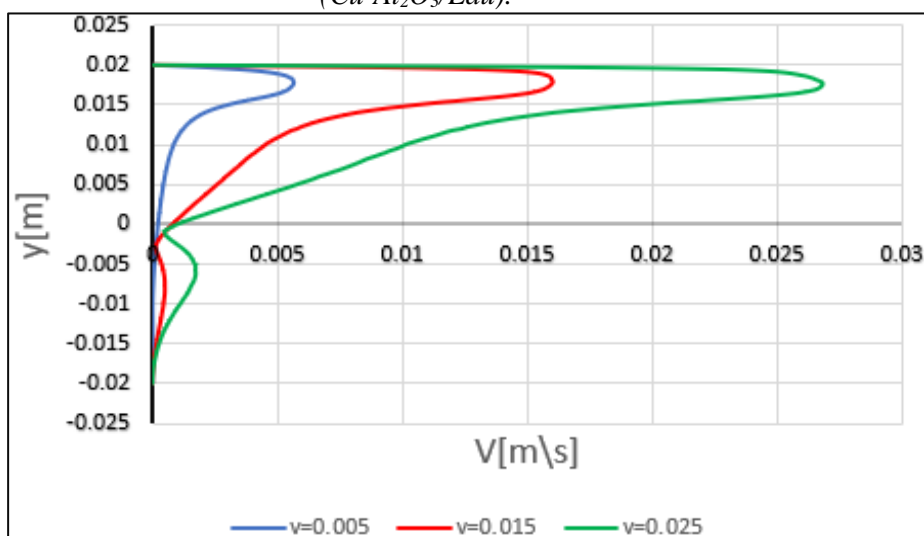
### IV.2.1 Impacts des vitesses à l'entrée et à la sortie:

La figure IV.1 montre les changements de vitesse d'écoulement à l'entrée à la température  $\Delta T = 20$  et  $V = 0.005$ ,  $V = 0.015$ ,  $V = 0.025$ .

Il est observé que plus nous nous éloignons d'un axe, la vitesse d'écoulement augmente, ce qui indique que la vitesse d'écoulement en  $V = 0.025$  est supérieure à celle en  $V = 0.005$ , quant à la figure IV.2, elle montre l'évolution de la vitesse d'écoulement en sortie à une température de  $\Delta T = 20$  et  $V = 0.005$ ,  $V = 0.015$ ,  $V = 0.025$ . On remarque aussi qu'à mesure qu'on s'éloigne de l'axe de symétrie, la vitesse d'écoulement augmente, c.-à-d. qu'elle est directement proportionnelle.



**Figure IV.1:** Profil de vitesse  $V$  à l'entrée pour  $\Delta T = 20$ , avec  $V = 0.005$ ,  $V = 0.015$  et  $V = 0.025$  ( $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3/\text{Eau}$ ).

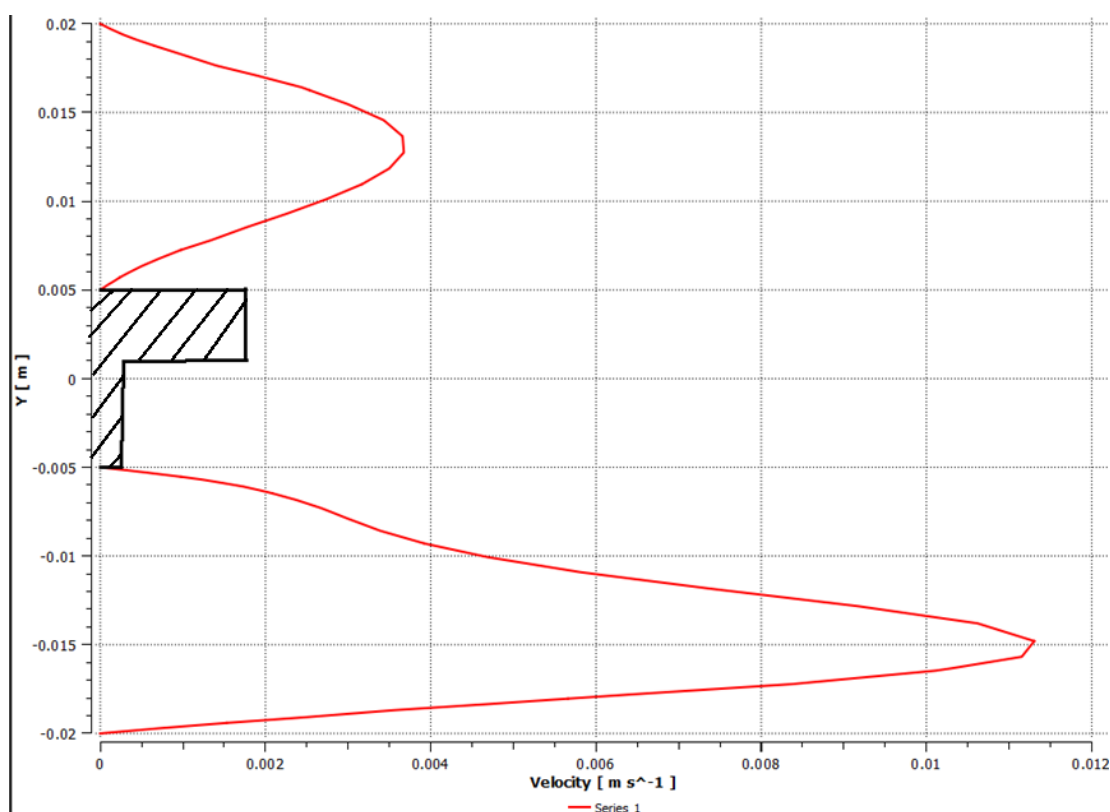


**Figure IV.2:** Profil de vitesse  $V$  à la sortie pour  $\Delta T = 20$ , avec  $V = 0.005$ ,  $V = 0.015$  et  $V = 0.025$  ( $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3/\text{Eau}$ ).

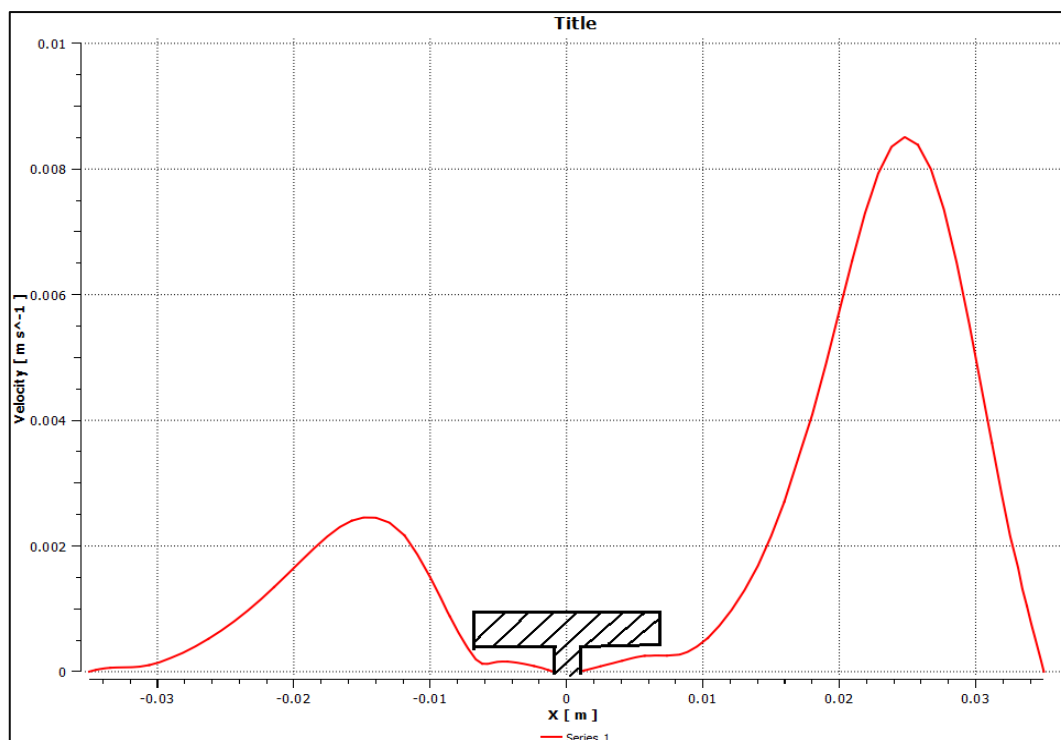
### IV.2.2 Interprétation des résultats de vitesse autour de la cavité :

La figure V.3 illustre la variation de la vitesse d'écoulement aux températures  $\Delta T = 60$  et  $V = 0.015$ . Une observation importante est que la vitesse d'écoulement en dessous de la cavité est plus élevée que celle au-dessus de la cavité par rapport à l'axe.

En relation avec la figure IV.4, elle montre l'évolution de la vitesse d'écoulement aux températures  $\Delta T = 60$  et  $V = 0.015$ . On remarque que la vitesse d'écoulement à droite de la cavité est supérieure à la vitesse d'écoulement à gauche de la cavité par rapport à l'axe de symétrie.



**Figure IV.3** : Profil de vitesse  $V$  dans la cavité pour  $\Delta T = 60$  et  $V = 0.015$  ( $Cu-Al_2O_3/Eau$ ).

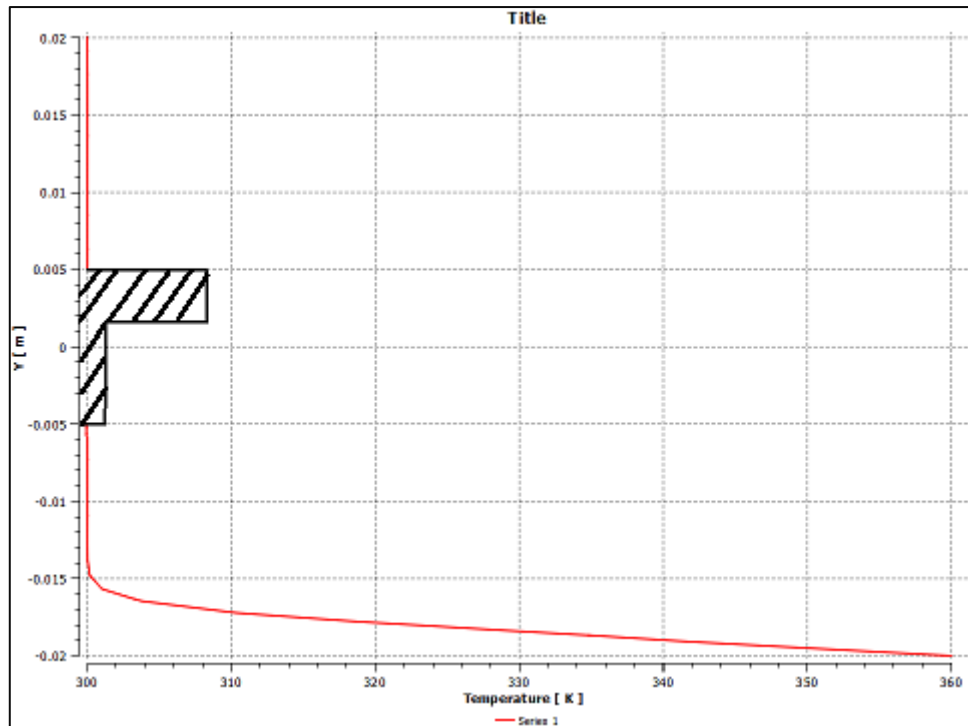


**Figure IV.4:** Profil de vitesse  $V$  dans la cavité pour  $\Delta T = 60$  et  $V = 0.015$  ( $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3/\text{Eau}$ ).

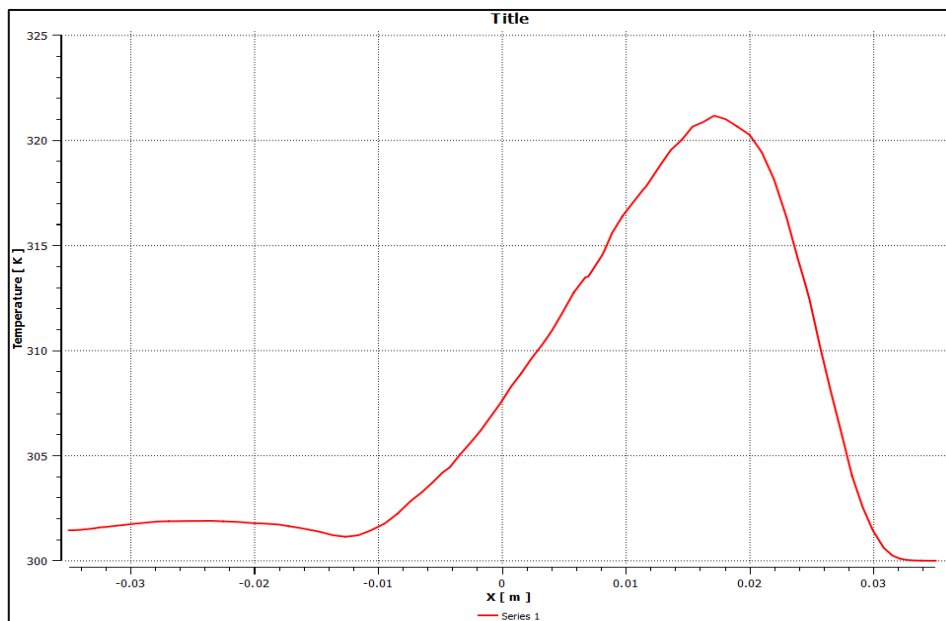
### IV.2.3 Influence de la température de chauffage:

La figure IV.5 montre l'effet de la température si la paroi inférieure est chauffée,  $\Delta T = 60$ , et  $V = 0.025$ . notez la concentration de chaleur le long de la paroi inférieure par rapport à l'axe, et en ce qui concerne la figure V.6, elle montre les changements de température dans le cas où la paroi interne est exposée au chauffage  $T = 360$  et  $V = 0.025$ .

Nous remarquons que la courbe (valeur) de température est supérieure à la proximité de la cavité, et à mesure que nous nous éloignons de la cavité, la magnitude de la température diminue.



**Figure IV.5 :** Profil de température T dans la cavité pour  $\Delta T = 60$  et  $V = 0.015$  ( $Cu-Al_2O_3/Eau$ ).



**Figure IV.6:** Profil de température T dans la cavité pour  $T = 360$  et  $V = 0.025$  ( $Cu-Al_2O_3/Eau$ ).

#### IV.2.4 Distribution de la température:

Nous avons utilisé un flux de chaleur élevé sur la paroi inférieure avec une différence de température de  $\Delta T=60^{\circ}\text{C}$ , tandis que la paroi intérieure était maintenue à une température de  $400^{\circ}\text{C}$ . De plus, nous avons appliqué une vitesse d'écoulement de  $V=0.025$  à l'entrée. L'augmentation de la vitesse d'écoulement conduit à une dispersion plus importante de la température, comme le montre la Figure IV.7, et crée la configuration illustrée dans la Figure V.8. Ces observations sont spécifiques au cas de chauffage de la paroi intérieure.

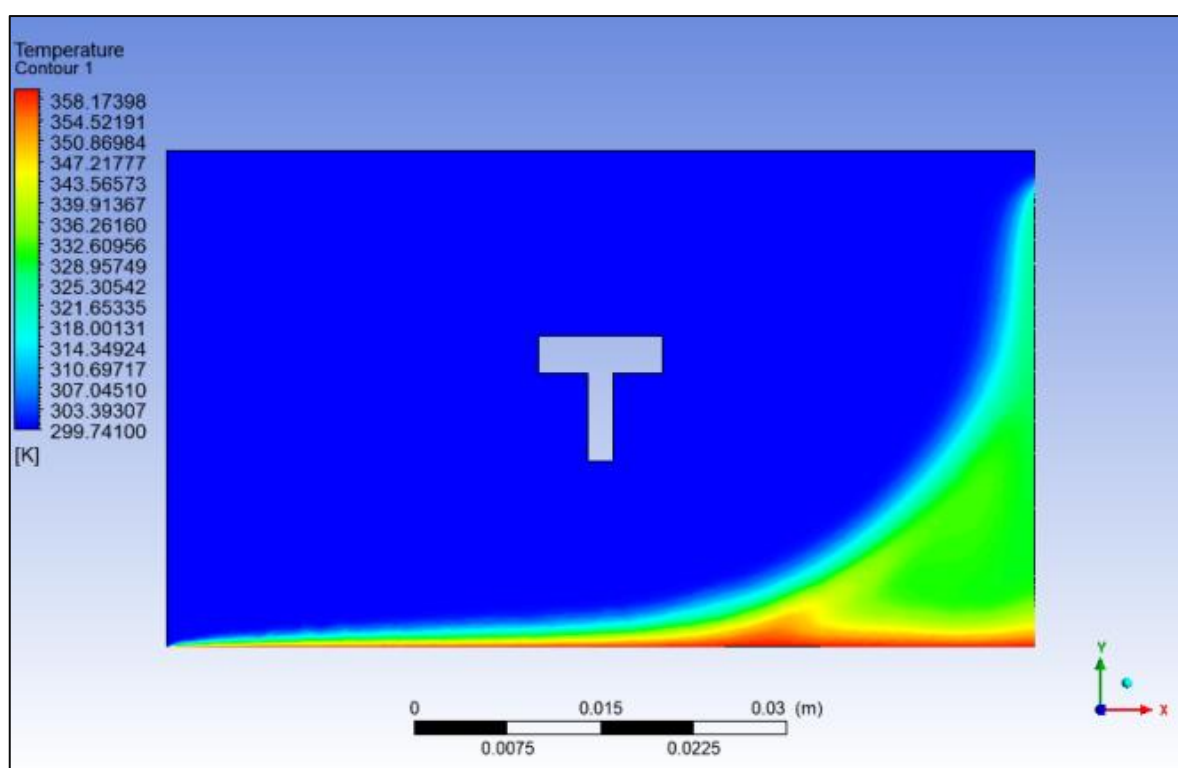
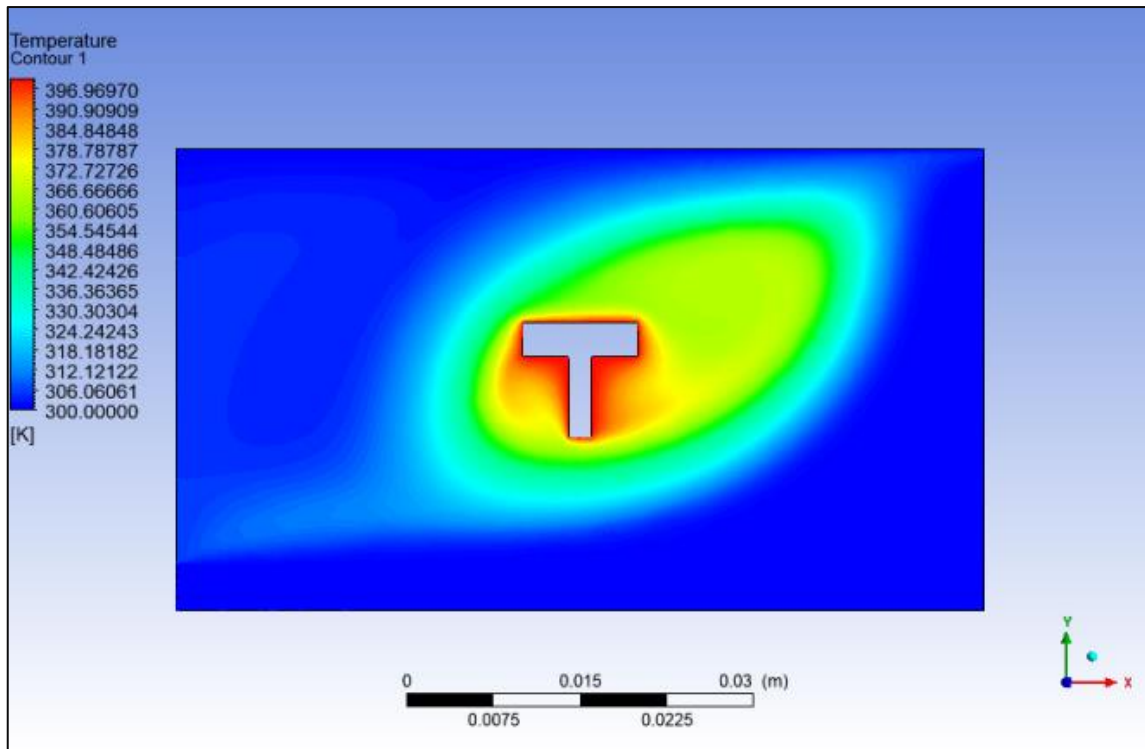


Figure IV.7: Répartition de la température (iso-valeurs) pour ( $\Delta T = 60$ ,  $V = 0.025$ ).



*Figure IV.8: Contours de la température pour ( $T = 400$ ,  $V = 0.025$ ).*

#### IV.2.5 Investigation de la vitesse d'écoulement :

En ce qui concerne le débit, on observe que l'ajustement de la vitesse entraîne une amélioration du processus de chauffage car la vitesse d'écoulement est plus élevée en (0.025), contrairement à la vitesse d'écoulement en (0.005).

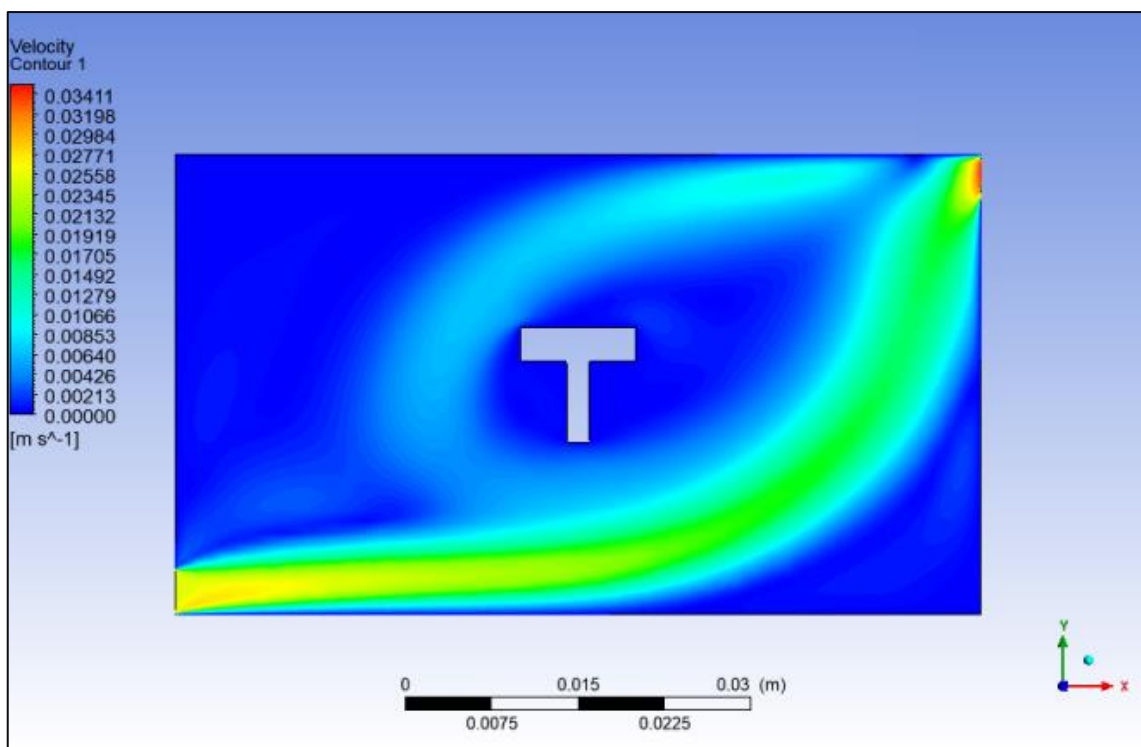


Figure IV.9: Isovaleurs de la vitesse d'écoulement ( $T = 400, V = 0.025$ ).

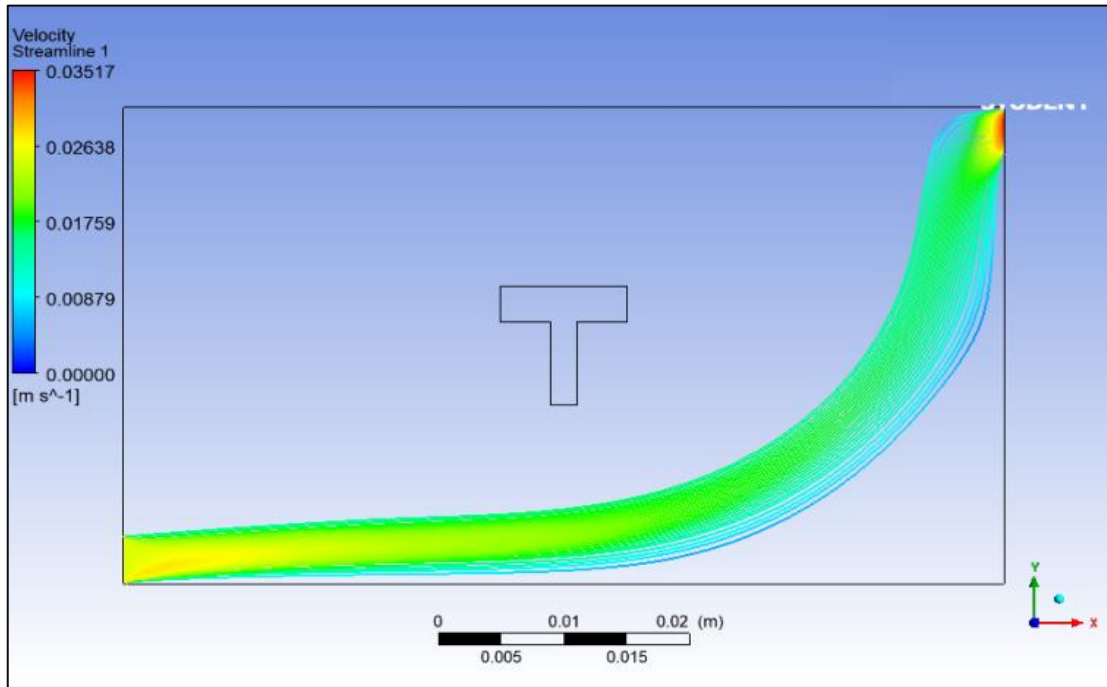


Figure IV.10: Streamline (lignes de courant) pour la vitesse d'écoulement, avec ( $T = 360, V = 0.025$ ).

**IV.3 Conclusion :**

Dans cette étude, nous présentons un ensemble de résultats obtenus à l'aide du programme de simulation numérique ANSYS WORKBENCH (version 2022), dans un rectangle creux rempli d'un nanofluide hybride (Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Eau). Les résultats comprennent des données numériques et des graphiques illustrant les variations de température et d'écoulement du fluide. Nous avons examiné les cas où la paroi inférieure et la paroi interne sont chauffées à des vitesses différentes, ce qui a permis d'analyser le comportement du transfert de chaleur.

# *Conclusion Générale*

*Conclusion générale*

Dans ce travail de mémoire, Nous avons employé le progiciel ANSYS Fluent® pour modéliser un rectangle creux bidimensionnel rempli d'un liquide nano-hybride (Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Eau). Les parois inférieures et intérieures de la cavité étaient chauffées. Nous avons mené des études à différentes températures et vitesses afin d'analyser les propriétés thermiques à l'intérieur de la cavité.

Dans cette étude on a achevé plusieurs tâches, qui ont été :

En première partie de cette étude présente une revue de la littérature existante dans ce domaine, en mettant l'accent sur les nanofluides hybrides. Elle comprend des informations générales sur les nanofluides hybrides, ainsi qu'une revue des concepts fondamentaux du transfert de chaleur.

Ensuite et dans la deuxième partie, l'étude se base sur la modélisation mathématique de la convection d'un liquide nano-hybride. Elle comprend une présentation des équations générales du système laminaire, ainsi que le modèle mathématique spécifique au cas étudié et la formulation mathématique du problème. Les propriétés thermophysiques des nanofluides hybrides sont également prises en compte dans cette section.

Puis, nous avons défini le cas d'ingénierie étudié, la grille de maillage et la géométrie créés par le progiciel ANSYS Workbench, des simulations ont été effectuées en variant les températures, les vitesses, le coefficient d'étude et la porosité. L'objectif était de comprendre l'effet de ces paramètres sur les champs de chaleur et d'analyser les résultats obtenus.

En conclusion, on a constaté qu'il soit possible de déduire qu'une amélioration de l'échangeur de chaleur peut être réalisée en ajustant à la fois la vitesse d'écoulement et la température. Les résultats obtenus dans cette étude mettent en évidence l'importance de ces deux paramètres dans l'efficacité de l'échange thermique. En optimisant la vitesse et la température, il est possible d'obtenir des performances améliorées de l'échangeur de chaleur. Cela peut conduire à une meilleure gestion de la chaleur et à une augmentation de l'efficacité globale du système énergétique considérée dans une application industrielle spécifique.

## *Références*

---

- [1] Teggat N., Etude de la convection d'un nano-fluide dans des microcanaux inclinés, Mémoire master, université Mohamed Khider Biskra, 2020.
- [2] Bordjane M., cours modes transfert thermique, Université Mohamed Boudiaf Oran, 2017.
- [3] Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences 100, Issue 3 (2022) 23-34
- [4] Bourhane B., Zouhir G., 'Etude Numérique de la Convection Naturelle Dans Une Cavité Rectangulaire Inclinée Saturée Par Des Fluides Et Des Nanofluides', Ecole nationale polytechnique de Constantine, 2018.
- [5] Hakan F. O., Abu-Nada E., 'Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids', International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 49, pp. 56-77, 2008.
- [6] Lebbihi S., 'Refroidissement Par Convection Naturelle D'une Source De Chaleur Localisée Au Fond D'une Enceinte Remplie De Nanofluide', Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [7] Hamdi M, Hedia W, Ridha D, Ezeddine S: 'Accurate finite volume investigation of nanofluid mixed convection in two-sided lid driven cavity including discrete heat sources', Univ. Tunis El-Manar, Tunisia, 2015.
- [7] Soufi, E., H., (2013): Application des nanofluides pour le refroidissement : étude d'un cas d'une géométrie simple, Thèse de Master en Génie Chimique, Université Kasdi Merbah d'Ouargla.
- [9] Benkhedda M., 'Étude Numérique des écoulements Thermoconvectifs d'un Nanofluide à travers un Espace Cylindrique Annulaire muni d'Ailettes', thèse de doctorat, Université Frères Mentouri Constantine 1, 2018.
- [10] Abbasi. S, M, Rashidi. A, Nemat. A, and Arzani. K, The effect of functionalisation method on the stability and the thermal conductivity of nanofluid hybrids of carbon nanotubes/gamma alumina, Ceramics International 39, no. 4 (2013): 3885-3891.
- [11] Witharana. S, Chen. H, & Ding. Y, Stability of nanofluids in quiescent and shear flow fields, Nanoscale Res. Lett. 6 (1) (2011) 231.
- [12] Salhi H., Etude numérique de la convection naturelle dans les enceintes : nanofluide, thèse de doctorat, université de batna, 2015.
- [13] Maouassi A., Intensification des échanges de chaleur par l'utilisation des nanofluides. Hydrocarbure et Chimie, thèse de magister, Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2012
- [14] Fohanno S. et al, 'Nanofluides et transfert de chaleur par convection naturelle', thèse université de Reims Champagne-Ardenne, France, 2012
- [15] Maxwell J.C., A Treatise on electricity and magnetism, Clarendon Press, U.K., 1891

## *Références*

---

- [16] Nor A. Che S., Muhammad M. J., Wan M. Arif A. J. , Isa M. A.. A review on preparation methods, stability and applications of hybrid nanofluids. *Renwable ande sustianable Energy reviews* 80 (2017) 1112-1122.
- [17] Benzema M. , Benkahla Y.K. , Boudiaf A., Ouyahia S., ' Etude numérique de la convection mixte lors de l'écoulement d'un nanofluide hybride (Ag- MgO /Eau) dans une cavité trapézoïdale ventilée soumise à l'action d'un champ magnétique', a. Laboratoire des Phénomènes de Transfert, FGMGP, USTHB, BP, 32 El Alia, 16111 Bab Ezzouar, Alger, Algérie. 2017.
- [18] Ijam A. , SaidurR. , Nanofluid as a coolant for electronic devices (cooling of electronic devices), *Appl. Therm. Eng.* 32 (2012) 76 82.
- [19] Klaleche S., Madjour A., ' Simulation Numérique De La Convection Forcée Entre Deux Disques en Présence d'un Nanofluide', Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2015.
- [20] <https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/les-transfertsde-chaleur>
- [21] Jana S., Salehi-khojin A., W.H. Zhong, Amélioration de la conductivité thermique des fluides par l'ajout de nano-additifs simples et hybrides, *Thermochim. Acte* 462 (1 2) (2007) 45 55. [22]
- Kalfali. M., Etude de la convection thermique dans des cavités par l'utilisation des nanofluides hybrides. Mémoire master, université Mohamed Khider Biskra , 2021.
- [23] Kasaeipoor, A., Ghasemi, B., & Aminossadati, S. M. (2015): Convection of Cu-water nanofluid in a vented T-shaped cavity in the presence of magnetic field. *International Journal of Thermal Sciences*, 94, 50-60.
- [24] Ibrir N, 'Etude de la convection naturelle dans une cavité rectangulaire contenant du métal liquide', Thèse université de Batna, 2006.
- [25] Glades et Benhadid, 'Contribution à l'étude de la convection naturelle dans les nanofluides en configuration de Rayleigh-Bénard', thèse université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2010.
- [26] Athmani B., (2014). Analyse expérimentale et numérique du déversoir en touche de piano «PK-WEIR» (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).

## *Résumé*

Le but de ce travail est de réaliser une étude numérique à l'aide de simulations effectuées en code de mécanique des fluides numérique (CFD) afin d'améliorer le transfert de chaleur par convection dans les cavités des applications industrielles en utilisant des nanofluides hybrides (Cu–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Eau).

La vitesse et la température ont été étudiées sur les valeurs de débit et d'échange de chaleur, Nous avons examiné les cas où la paroi inférieure et la paroi interne sont chauffées à des vitesses différentes, ce qui a permis d'analyser le comportement du transfert de chaleur, L'objectif ultime est d'optimiser ces conditions de chauffage afin d'améliorer l'efficacité du transfert de chaleur dans les applications industrielles.

**Mots clés:** Transfert de chaleur, convection, simulation numérique, nanofluides hybrides.

## **Abstract**

The purpose of this work is to carry out a digital study using simulations carried out in digital fluid mechanics code (CFD) in order to improve convection heat transfer in industrial applications by using hybrid nanofluides (Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water).

The speed and temperature have been studied on the speed and heat exchange magnitudes. We have examined the cases where the lower wall and the internal wall are heated at different speeds, which made it possible to analyze the behavior of the heat transfer. The ultimate objective was to optimize these heating conditions in order to improve the efficiency of heat transfer in industrial applications.

**Keywords:** heat transfer, convection, digital simulation, hybrid nanofluides.

## Résumé

### ملخص

الغرض من هذا العمل هو إجراء دراسة رقمية باستخدام عمليات المحاكاة التي أجريت في برنامج ميكانيكا السوائل الرقمية (CFD) من أجل تحسين نقل حرارة الحمل الحراري في التطبيقات الصناعية باستخدام النانو الهجينة/ (الماء/AL2O3 - Cu)

تمت دراسة السرعة ودرجة الحرارة على قيم التدفق و التبادل الحراري ، فقد فحصنا الحالات التي يتم فيها تسخين الجدار السفلي والجدار الداخلي بسرعات مختلفة ، مما جعل من الممكن تحليل سلوك نقل الحرارة ، والهدف النهائي هو تحسين ظروف التدفئة هذه من أجل تحسين كفاءة نقل الحرارة في التطبيقات الصناعية.

**الكلمات الرئيسية:** نقل الحرارة ، الحمل الحراري ، المحاكاة الرقمية ، النانو الهجينة.