

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA



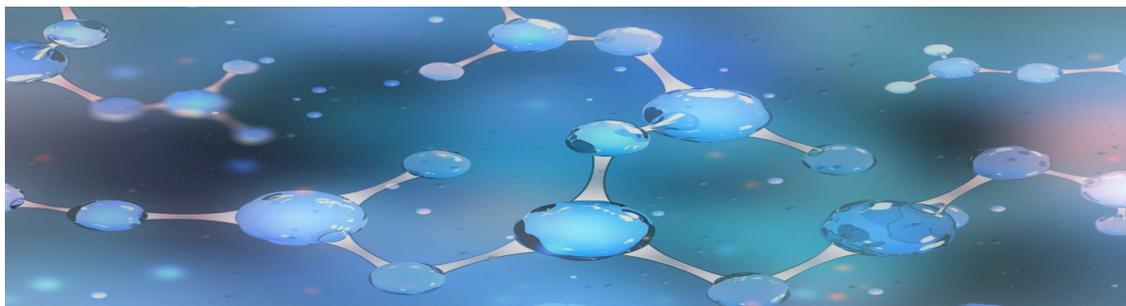
FACULTÉ DES SCIENCES EXACTES
DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

Mémoire de Fin de cycle

En Physique Fondamentale
Option : Dynamique Des Fluides Et Energétique

THÈME

Etude bibliographique des transferts thermiques dans les nanofluides



Présenté le 04/07/2022 par :

M^{lle} Liliane KIROUANE

M^{lle} Nadjat BENAMOR

Devant le jury composé de :

M^{me} Ouerdia OURREAD MEZIANI Professeur Univ. de Bejaia Promotrice

M^r Makhoulf CHENNIT M.A.A Univ. de Béjaïa Président

M^{me} Nawel AMATOUSSE Professeur Univ. de Béjaïa Examinatrice

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2021/2022

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre entière gratitude envers Professeur Ourrad Meziani Ouerdia pour son encadrement et sa contribution à l'aboutissement de ce travail.

Nous tenons à présenter nos plus vifs remerciements aux membres du jury qui nous font l'honneur de juger ce modeste travail de l'étude Bibliographique des transferts thermiques dans les nanofluides.

Nos remerciements s'adressent aussi à madame Dairi Nassima pour ses précieux conseils au sujet de la rédaction de ce travail sur latex.

Enfin, nous ne sauront terminer ces remerciements sans adresser nos plus tendres pensées à nos parents et à nos familles.

Dédicaces 1

Je dédie ce modeste travail

A celle qui m'a tout donné sans rien exiger en retour et à qui je dois ma réussite et mes exploits grâce à ses tendres encouragements, maman chérie.

A mon guide éternel dans la vie, et celui qui a toujours espéré me voir réussir, mon cher papa.

A mes chères frères Rayan et Aris.

A mes tantes qui ont eu l'amabilité de m'avoir héberger chez elles pendant mes années d'études à l'université.

A ma chère amie Nadjjet qui m'a accompagné dans ce travail et avec qui j'ai partagé mes meilleurs moments.

A tous mes amis, mes proches et mes camarades Amani, Assia, Ryma, Kenza, Khellaf et Koutaiba .

Liliane

Dédicaces 2

Je dédie ce modeste travail

A celle qui m'a tout donné sans rien exiger en retour et à qui je dois ma réussite et mes exploits grâce à ses tendres encouragements, maman chérie.

A mon guide éternel dans la vie, et celui qui a toujours espéré me voir réussir, mon cher papa.

A mes chères frères Abdelkrim, Djaber et Nadjim.

A ma chère amie Liliane qui m'a accompagné dans ce travail et avec qui j'ai partagé mes meilleurs moments. .

A tous mes amis, mes proches et mes camarades Amani, Assia, Ryma, Kenza, Khellaf et Koutaiba .

Nadjet

Table des matières

Table des matières	ii
Table des figures	iv
Liste des tableaux	v
Notations	vi
Introduction Générale	1
1 introduction aux transferts thermiques	3
1.1 Introduction	3
1.2 Définitions	3
1.2.1 Définition de la chaleur	3
1.2.2 Définition de la température	4
1.2.3 Définition d'une échelle de température	5
1.2.4 Définition d'un champ de température	6
1.2.5 Définition d'un gradient de température	6
1.2.6 Définition d'une quantité de chaleur	7
1.2.7 Définition d'un flux de chaleur	8
1.2.8 Définition de la densité de flux	9
1.2.9 Définition de la capacité thermique massique	9
1.2.10 Définition d'un transfert de chaleur	10
1.2.11 Etablissement du bilan d'énergie	11
1.3 Les différents modes de transferts thermiques	12
1.3.1 La conduction	12
1.3.2 La convection	20
1.3.3 Le rayonnement	26
1.4 Les différents domaines d'utilisation des transferts thermiques	29
1.5 Conclusion	30
2 Les nanofluides dans le domaine thermique	31
2.1 Introduction	31
2.2 Définitions des nanofluides et leurs propriétés	32
2.2.1 Définition des nanofluides :	32
2.2.2 Les propriétés des nanofluides :	37
2.3 Les nanofluides en thermique	43

2.3.1	Expérience de R. Ridouane et E. Campo :	43
2.3.2	Expérience de S. Aminossadati et B. Ghasemi :	43
2.3.3	Expérience de A. H. Mahmoudi et al :	43
2.3.4	Expérience de H. Rahman et al :	44
2.3.5	Expérience de B. Ghasemi et S. Aminossadati :	44
2.3.6	Expérience de S. Aminossadati :	44
2.3.7	Expérience de F. Polidori et al et autres chercheurs :	44
2.3.8	Expérience de M.S.Soutiji et al :	44
2.3.9	Expérience de R. AL-Shahi et al :	45
2.3.10	Expérience de K. Kalidasan et al :	45
2.3.11	Expérience de R. Kaseipoor et al :	45
2.3.12	Expérience de M. Benzema et al :	45
2.4	Les domaines d’application des nanofluides	45
2.5	Étude comparative des transferts thermiques dans les nanofluides et les fluides .	46
2.6	Pourquoi les nanofluides sont utilisés dans les transferts thermiques?	53
2.7	Conclusion	53
Conclusion Générale		54
	Bibliographie	56
Annexe		59
Résumé		60
Abstract		61

Table des figures

1.1	Notions du transfert de chaleur, de la température et de l'équilibre thermique [2].	4
1.2	Notion de la température	5
1.3	Représentation d'une surface isotherme et du gradient de température [1].	7
1.4	Notion de chaleur sensible.	7
1.5	Notion de chaleur latente.	8
1.6	Flux de chaleur.	9
1.7	Différents modes du transfert de chaleur [2].	10
1.8	Bilan énergétique appliquée à un volume V	11
1.9	Les trois modes de transferts thermiques [3].	12
1.10	Transfert de chaleur par conduction.	13
1.11	Schéma d'un transfert thermique dans un mur simple.	14
1.12	Schéma d'un transfert thermique dans un mur multicouches.	15
1.13	Schéma d'un transfert thermique dans un cylindre creux long.	16
1.14	Schéma d'un transfert thermique dans un cylindre creux multicouches.	17
1.15	Schéma d'une plaque infinie.	18
1.16	Schéma d'un cylindre infini.	19
1.17	Schéma d'une sphère.	19
1.18	Transfert de chaleur convectif.	20
1.19	Convection libre[41].	22
1.20	Convection forcée.	23
1.21	Ecoulement sur une plaque plane en convection forcée	24
1.22	Ecoulement autour d'un cylindre pour une convection forcée [9].	25
1.23	Convection avec changement de phase [42].	26
1.24	Schématization du rayonnement.	27
1.25	Les différents spectres électromagnétiques [43].	28
1.26	Le rayonnement d'un corps opaque [45].	29
2.1	Échelle de dimension [11].	32
2.2	Nanoparticules de fer de diamètre moyen [12].	33
2.3	Nanoparticules d'argent [12].	34
2.4	Nanotubes de carbone [12].	34
2.5	Illustration d'un nanofluide.	35
2.6	Illustration d'un fluide de base.	36
2.7	Illustration d'un nanofluide hybride.	36
2.8	Champs des températures pour $Ra = 10^4$ du fluide pur eau et du nanofluide Dioxyde de Titane eau ($TiO_2 - eau$) pour $\phi = 0$ et $\phi = 0.1$ [39].	47

2.9	Champs des températures pour $Ra = 10^4$ du fluide pur eau et du nanofluide Dioxyde de Titane eau ($TiO_2 - eau$) pour $\phi = 0.2$ [39].	48
2.10	Champs des températures pour $Ra = 10^4$ du fluide pur eau et du nanofluide Argent-eau pour $\phi = 0$ et $\phi = 0.1$ [39].	48
2.11	Champs des températures pour $Ra = 10^4$ du fluide pur eau et du nanofluide Argent-eau pour $\phi = 0.2$ [39].	49
2.12	les lignes de courants pour $Ra = 10^4$ du fluide pur eau et du nanofluide Dioxyde de Titane eau ($TiO_2 - eau$) pour $\phi = 0$ et $\phi = 0.1$ [39].	49
2.13	Lignes de courants pour $Ra = 10^4$ du fluide pur eau et du nanofluide Dioxyde de Titane eau ($TiO_2 - eau$) pour $\phi = 0.2$ [39].	50
2.14	Lignes de courants pour $Ra = 10^4$ du fluide pur eau et du nanofluide Argent-eau pour $\phi = 0$ et $\phi = 0.1$ [39].	50
2.15	Lignes de courants pour $Ra = 10^4$ du fluide pur eau et du nanofluide Argent-eau pour $\phi = 0.2$ [39].	51
2.16	Variation du nombre de Nusselt en fonction de la fraction volumique des nanofluides TiO_2 -eau et Ag-eau et du fluide pur eau en $Ra = 10^4$ [39].	51
2.17	Variation du nombre de Nusselt en fonction de la fraction volumique du nanofluide TiO_2 -eau et du fluide pur eau en différentes valeurs de Ra [39].	52

Liste des tableaux

1.1	<i>Unités de l'énergie [1].</i>	4
1.2	<i>Conversion des unités de mesures de la température.</i>	6
1.3	<i>Capacités thermiques massiques de quelques substances [5].</i>	10
1.4	<i>Variables utilisées dans le bilan d'énergie et leur unités.</i>	12
1.5	<i>Valeurs de la conductivité thermique des matériaux les plus utilisés [8].</i>	14
1.6	<i>Exemple des valeurs du coefficient d'échange convectif [9].</i>	21
1.7	<i>Valeurs de C et m dans l'expression du nombre de Nusselt pour un écoulement d'un fluide autour d'un cylindre [9].</i>	24
2.1	<i>Propriétés thermiques de quelques matériaux [23].</i>	43
2.2	<i>Propriétés physiques des nanofluides utilisés [39].</i>	47

Notations

Symboles Latins :

- U : Energie interne
- W : Energie mécanique
- Q : Energie calorifique
- But : British Thermal unit
- T : Température
- F° : Degré Fahrenheit
- °C : Degré Celsius
- k : Degré Kelvin
- Ra° : Degré Rankine
- \vec{n} : Vecteur unitaire de la normale
- Q : Quantité de chaleur
- m : Masse
- Cp : Chaleur spécifique
- L : Coefficient de chaleur latente du changement d'état
- S : Surface
- s : Seconde
- t : Temps
- \dot{m} : Débit massique
- x, y, z : Cordonnées cartésiennes
- X : Direction du flux thermique
- V : Volume
- \dot{q} : Densité volumique énergie générée
- f : Fluide.
- e : Epaisseur de la paroi (m)
- R_{th} : Résistance thermique de la paroi
- h : Coefficient de transfert thermique convectif
- r : Rayon
- D, d : Diamètre
- CNT : Nanotubes de carbone
- EG : Ethylène glycol
- R12, R22 : Fluides de réfrigération
- K : Conductivité thermique du nanofluide
- n : Facteur de forme empirique
- P : Particule

Symboles grecs :

- γ : Densité de flux de chaleur
- φ : Flux thermique
- λ : Conductivité thermique du matériau ou du milieu en ($Wm^{-1}C^{-1}$)
- μ : Viscosité dynamique ($N.s.m^{-2}$)
- α : Coefficient de diffusion (m^2s^{-1}) ou diffusivité thermique
- ρ : Masse volumique (Kg^{-3})
- μ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W);
- σ : Constante de Stefan ($5,67.Wm^{-2}k^{-4}$);
- ε_p : Facteur d'émission de la surface;
- ψ : Constante
- ϕ : Fraction volumique des nanoparticules (solide)
- β : Coefficient d'expansion volumique

Nombres adimensionnels :

- Pr : Nombre de Prandtl
- Ra : Nombre de Rayleigh
- Nu : Nombre de Nusselt
- Ha : Nombre de Hartmann
- Re : Nombre de Reynolds
- Ri : Nombre de Richardson
- Pe : Nombre de Peclet

Introduction générale

Le transfert de chaleur a toujours été l'un des dilemmes les plus cruciaux depuis l'antiquité, de l'âge de pierre au 21^{ème} siècle en passant par le moyen âge . la vie actuelle est fortement rythmée par la pénurie ou l'abondance de l'énergie en général et du transfert thermique en particulier, cependant nous sommes constamment à la recherche de l'amélioration de ces deux derniers en utilisant diverses manières et procédés scientifiques pour arriver à cette fin. Parmi ces procédés, nous citons l'utilisation des nanofluides qui est l'un des domaines les plus récents et original qui soit.

L'étude des transferts thermiques voit son utilité dans le monde de l'industrie, du refroidissement et de la vie quotidienne. Il se présente sous moult formes , la conduction entre deux régions du même solide ou fluide, la convection entre un solide et un fluide ainsi que le rayonnement entre un corps rayonnant et un corps noir ou un corps quelconque.

Les nanofluides sont des fluides intelligents qui optimisent le transfert de chaleur fortement en améliorant la conductivité du fluide de base grâce à l'ajout des nanoparticules de différentes formes et types. Nous différencions les bons nanofluides des mauvais à l'aide de leurs propriétés qui sont représentées par la conductivité thermique, la viscosité dynamique, la fraction volumique, le coefficient d'expansion volumique, la chaleur massique ainsi que la masse volumique.

Différentes études empiriques ont été menées par les chercheurs dans le but de distinguer la différence de la conductivité thermique entre un fluide de base et un nanofluide et déterminer le plus performant des deux. Dans les articles que nous avons utilisés en 2006 R.Ridouane et E.Campo [28] ont été les premiers à mener ce type d'études. Ils ont fait une étude sur l'effet de la géométrie du matériel utilisé sur l'amélioration des échanges thermiques au sein des nanofluides dans le but de déterminer la géométrie la plus optimisante du transfert de chaleur. En 2007 c'est le tour de F.Polidori et al de mener une étude sur les nanofluides afin de confirmer les résultats d'autres chercheurs qui affirment que les propriétés thermophysiques du nanofluide modifient le transfert thermique par convection naturelle et plus précisément la viscosité et la conductivité thermique [34][35][36].

En 2010 c'est B.Ghasemi et S.Aminossadati [32] qui se sont prêtés à cette étude en simulant le problème de la convection mixte d'un nanofluide Al_2O_3 -eau dans une enceinte triangulaire entraînée en utilisant la méthode des volumes finis pour déduire si le transfert de chaleur est plus efficace lorsque le nombre de Richardson est élevé ainsi que R.AL-Shahi et al [38] qui ont fait une étude numérique qui concerne la convection mixte au sein d'un nanofluide (Cu-Eau) dans une cavité carrée ventilée de manière à vérifier que l'ajout des nanoparticules au fluide de base perfectionne le transfert de chaleur. En 2011 H.Rahman et al ont[31] exécuté une simulation de

l'écoulement d'un nanofluide Cu-eau, dans une cavité triangulaire inclinée dans l'intention de prouver que les champs hydrodynamiques et thermiques ont une forte dépendance du nombre de Richardson aussi bien que S.Aminossadati et B.Ghasemi [29] qui ont exécuté une étude numérique de deux cavités triangulaires chauffées, afin de comparer le transfert thermique d'un fluide (éthylène glycol pur) et d'un nanofluide (éthylène-glycol-cuivre).

En 2012 A.H Mahmoudi et al [30] ont étudié la convection naturelle et la production d'entropie (agitation) dans le nanofluide cuivre-eau en vu de démontrer que le transfert thermique est plus efficace lorsqu'on rajoute les nanoparticules au fluide sous faible nombre de Rayleigh (conduction) et H.Salhi et al[29] ont dirigé une étude numérique sur la convection naturelle de deux types de nanofluides de type : Ag-eau (argent/eau) et de type : Ti_2O_3 -eau (dioxyde de titane / eau) et un fluide de base (eau) dans une cavité carré chauffée dans le but de mettre en jour les résultats concernant les champs de température , les lignes de courants mais surtout le nombre de Nusselt .

À la suite, en 2013 S.Aminossadati [33] a mené une analyse sur la magnétohydrodynamique d'un nanofluide, Cu-eau, dans une cavité triangulaire à l'égard d'indiquer que le transfert thermique diminue au grand nombre de Hartmann; de plus, en 2014 M.S.Soutiji et al [37] ont étudié numériquement le transfert thermique dans une cavité carrée ventilée traversée par un nanofluide (Al_2O_3 -eau) de façon à établir que le transfert de chaleur est optimisé lors de l'augmentation des nombres de Reynolds, de Richardson et de la fraction volumique.

Par la suite, en 2015 R.Kaseipoor et al [40] ont mené une étude sur la convection mixte au sein d'un nanofluide Cu-eau dans une cavité ventilée de forme " T " soumise à un champ magnétique pour conclure que le transfert thermique se perfectionne lors de la présence des nanoparticules dans le fluide de base, surtout aux grands nombres de Reynolds et Hartmann, en 2017 K.Kalidasan et al [39] ont fait une étude numérique d'un nanofluide dans une cavité carrée ventilée ayant un obstacle adiabatique en son centre à fin de déterminer l'apport de l'utilisation d'un nanofluide hybride sur les performances thermique de la cavité , et M.Benzema et al [?] ont lancé leur propre étude numérique sur le nanofluide hybride Ag-MgO- eau dans une cavité trapézoïdale ventilée soumise à un champ magnétique externe dans le but de montrer l'impacte du nombre de Hartmann sur les champs hydrodynamiques et thermiques.

Toutes ces expériences ont fini par affirmer que les nanofluides sont de meilleurs performants thermiques que les fluides simples.

1

introduction aux transferts thermiques

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser au phénomène du transfert thermique qui consiste à étudier l'évolution de la chaleur dans un système ou entre deux corps différents doté d'un gradient de température (le corps le plus chaud cède de la chaleur au moins chaud).

Nous allons d'abord, commencer par définir quelques notions de base telles que la chaleur, la température, un champ de température, un gradient de température, une quantité de chaleur, un flux thermique, une densité de flux de chaleur, un transfert de chaleur et un bilan d'énergie.

Nous allons ensuite, présenter les différents modes de transferts thermiques et donner quelques exemples afin de les illustrer ainsi que les lois qui permettent de calculer les flux thermiques transférés d'un corps à un autre.

Enfin, nous allons citer les différents domaines d'utilisations des transferts thermiques et finir ce chapitre par une conclusion.

1.2 Définitions

1.2.1 Définition de la chaleur

En langage courant, le terme de chaleur est lié à la sensation que donne un corps chaud lorsqu'on se trouve près de lui. La chaleur est plus communément appelée "énergie thermique" par les physiciens, elle est causée par l'agitation des molécules et la vibration des atomes autrement dit par le déplacement désordonné des particules contenues dans une substance . Elle est exprimée en joule (J) tout comme le travail, d'ailleurs ces deux derniers constituent le premier principe de la thermodynamique [1].

$$\Delta U = \Delta W + \Delta Q$$

ΔU : variation de l'énergie interne

ΔW : variation de l'énergie mécanique

ΔQ : variation de l'énergie calorifique [1]

elle peut aussi être exprimée en d'autres unités qui sont kcal et British thermal unit (But) :

Joule (j)	kcal	British Thermal unit (But)
1	2.39×10^4	9.478×10^4
4184	1	3.966
1055	0.252	1

TAB. 1.1 – Unités de l'énergie [1].

Le corps le plus chaud cède de la chaleur au corps le plus froid élevant ainsi la température de ce dernier et abaissant sa propre température, jusqu'à ce que les deux corps aient la même température. On dit alors qu'on a atteint l'équilibre thermique, ceci traduit le deuxième principe de la thermodynamique. Ce dernier est irréversible, c'est à dire que la chaleur ne pourra pas se propager du corps le plus froid vers le corps le plus chaud.

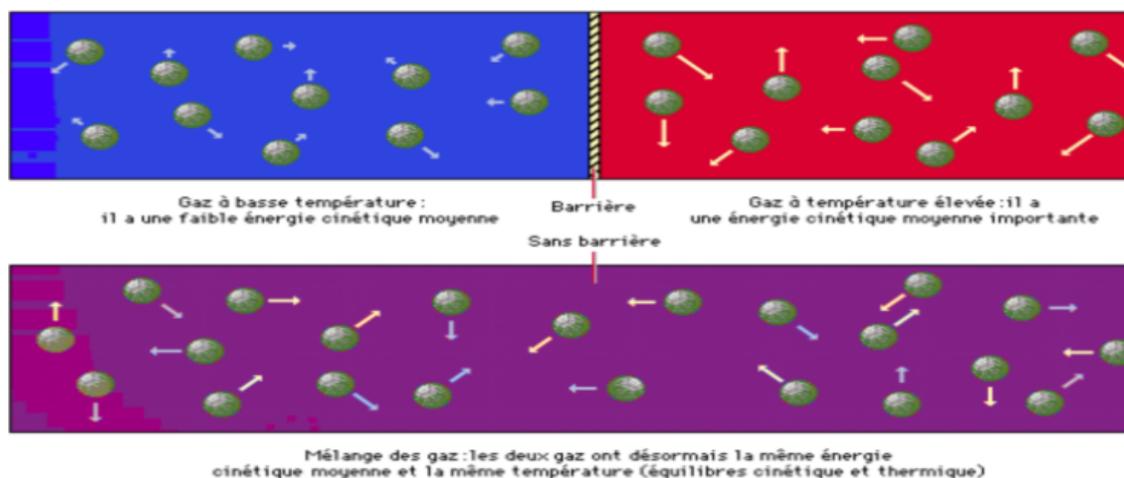


FIG. 1.1 – Notions du transfert de chaleur, de la température et de l'équilibre thermique [2].

1.2.2 Définition de la température

La température est une grandeur physique qui caractérise l'état de l'énergie de la matière et qui mesure indirectement le degré d'agitation microscopique des particules d'une substance, plus l'agitation est grande plus la température est élevée et en absence d'agitation c'est le zéro absolue. Elle est mesurée à l'aide d'un thermomètre [3].

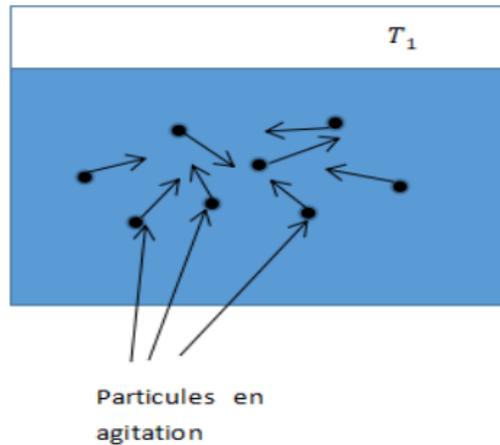


FIG. 1.2 – Notion de la température .

1.2.3 Définition d'une échelle de température

Une échelle de température est une méthode de mesure quantitative de la grandeur physique température d'un corps matériel (solide liquides ou gazeux), les physiciens utilisent plusieurs échelles de mesure de la température. On dénombre [1] :

Echelle de Fahrenheit :

Le physicien allemand Fahrenheit a inventé le thermomètre à mercure en 1720, prenant pour référence :

- la température de congélation de l'eau à 32 F°.
- la température d'ébullition à 212 F° [1].

Echelle de Celsius :

En 1741, le physicien Anders Celsius a choisi de fixer ces références :

- la température de congélation de l'eau à 0 °C
- la température d'ébullition à 100 °C

Il a devisé son échelle en 100 intervalles en appelant chaque intervalle "un degré Celsius" (°C), démarrant de zéro pour le point haut et 100 pour le point bas (pour lui, l'eau se transforme en glace à 100°C et bout à 0°C). Ensuite, on a inversé son échelle pour obtenir celle qu'on utilise actuellement : l'eau se transforme en glace à 0°C et bout à 100°C [1].

Echelle de Kelvin :

Le physicien anglais Lord Kelvin a décidé de répondre aux besoins de la thermodynamique en suggérant d'utiliser une échelle de température où le zéro serait un zéro en dessous duquel on ne peut pas descendre : le "zéro absolu" qui est : -273,15 °C et on note "k" (sans le ° devant) [1].

Echelle de Rankine :

L'échelle de Rankine est une échelle de mesure de température qui a pris le nom du célèbre physicien écossais William Rankine qui la proposa en 1859. Elle est similaire à l'échelle de Kelvin car leur zéro degré est le zéro absolu sauf qu'une différence d'un degré Ra est égale à une différence d'un degré Fahrenheit.

	Celsius	Fahrenheit	Kelvin	Rankine
1 Celsius(°C)	1	$[32 + T(^{\circ}\text{C})] \times 1.8$	$T(^{\circ}\text{C})-273.15$	$1.8^{\circ}\text{C} +491.67$
1 Fahrenheit(F°)	$[T(\text{F}^{\circ})- 32] \times \frac{5}{9}$	1	$[[T(\text{F}^{\circ})- 32] \times \frac{5}{9}] +273.15$	$T(\text{F}^{\circ})+459.67$
1 Kelvin	$T(\text{k})+273.15$	$[(T(\text{k})-273.15) \times 1.8] +32$	1	$1.8 \times T(\text{k})$
1 Rankine(Ra°)	$[T(\text{Ra}^{\circ})-491.67] \times \frac{5}{9}$	$T(\text{Ra}^{\circ})-459.67$	$T(\text{Ra}^{\circ}) \times \frac{5}{9}$	1

TAB. 1.2 – Conversion des unités de mesures de la température.

1.2.4 Définition d'un champ de température

L'évolution de la température dans l'espace en fonction du temps $T(x,y,z,t)$ caractérise le déplacement d'énergie ceci conduit à appeler la température en chaque point dans l'espace par "un champ de température".

On différencie deux cas :

- Le champ de température qui ne dépend pas du temps : on dit que c'est un régime permanent ou stationnaire.
- Le champ de température qui dépend du temps : on dit que c'est un régime variable ou transitoire [1] [6].

1.2.5 Définition d'un gradient de température

On appelle une surface isotherme, une surface dont tout ses points dans l'espace ont la même température, l'évolution de cette dernière par unité de longueur est optimale le long de la normale de la surface isotherme. Alors le gradient de température définit cette évolution, il est caractérisé par la loi suivante [1] :

$$\overrightarrow{\text{grad}T} = \vec{n} \times \frac{\partial T}{\partial n}$$

avec \vec{n} : vecteur unitaire de la normale à la surface isotherme.
et $\frac{\partial T}{\partial n}$: dérivée de la température le long de la normale [1].

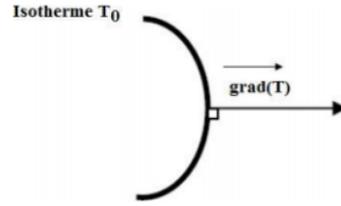
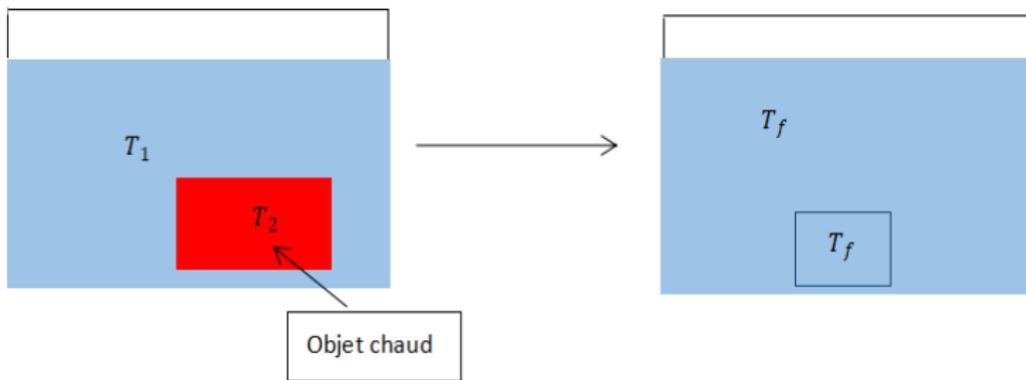


FIG. 1.3 – Représentation d’une surface isotherme et du gradient de température [1].

1.2.6 Définition d’une quantité de chaleur

La quantité de chaleur Q est l’énergie nécessaire à un corps pour porter sa température de T_1 à T_2 . C’est l’énergie qu’il faut pour un changement d’état. Elle s’exprime en joule (J) [1] [3]. Il existe deux sortes de quantité de chaleur :

La chaleur sensible :



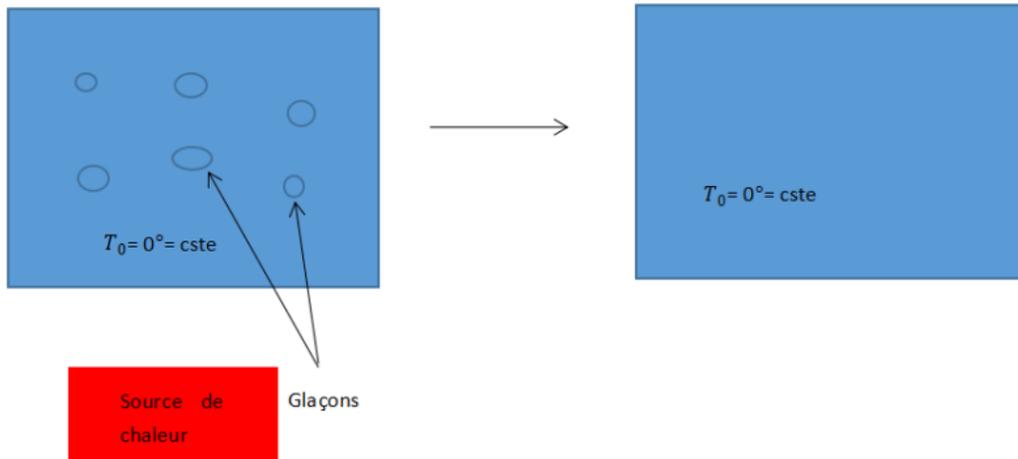
$$Q_{1 \rightarrow 2} = m C_p \cdot (T_1 - T_2)$$

FIG. 1.4 – Notion de chaleur sensible.

m : masse des glaçons[1] [3].

C_p : capacité calorifique.

La chaleur latente :



$$Q = m.L$$

FIG. 1.5 – Notion de chaleur latente.

L : coefficient de chaleur latente du changement d'état.
m : masse des glaçons[1] [3].

1.2.7 Définition d'un flux de chaleur

Le flux de chaleur (débit de chaleur) est la quantité de chaleur transmise à travers la surface S par unité de temps au cours d'un transfert thermique, il a donc la dimension d'une puissance (w), en d'autres termes c'est la mesure du transfert d'énergie (chaleur) qui est causée par un gradient de température (des hautes températures vers les basses) jusqu'à l'atteinte de l'équilibre thermique [4].

$$\varphi = \frac{dQ}{dt}$$

φ : flux thermique en joule/seconde (J/S) ou bien en watt (w).

dQ : Quantité de chaleur transmise en joule (J).

dt : le temps en seconde (S)[4].

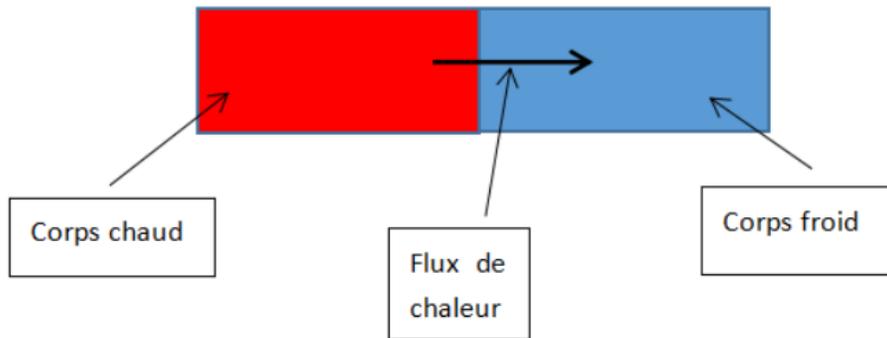


FIG. 1.6 – Flux de chaleur.

1.2.8 Définition de la densité de flux

La densité de flux de chaleur représente la quantité de chaleur transmise par unité de temps et à travers une surface, autrement dit c'est le flux thermique transmis par unité de surface [4]. Elle se traduit par la loi suivante :

$$\gamma = \frac{1}{S} \times \frac{dQ}{dt} = \frac{\varphi}{S}$$

γ : La densité de flux de chaleur (W/m^2) ou bien en (J/sm^2).

S : L'aire de la surface en (m^2).

dQ : La quantité de chaleur transmise en joule (J).

dt : Le temps en seconde (s).

φ : Le flux thermique en watt (W) ou bien (J/s) [4].

1.2.9 Définition de la capacité thermique massique

La quantité de chaleur nécessaire à 1 kg d'une matière quelconque pour élever sa température de 1 kelvin est appelée capacité thermique massique, qu'on note C_p . Elle s'exprime en ($Jkg^{-1}k^{-1}$) ou bien en ($Jg^{-1}C^{-1}$) [1].

Le tableau suivant expose les capacités thermiques massiques de quelques substances :

Les substances	Les capacités thermiques massiques en ($Jg^{-1}C^{-1}$)
Eau liquide	4.18
éthanol	2.46
glace	2.06
huile végétale	2.00
bois	1.76
air	1.01
verre	0.84
le sable	0.80
le fer	0.45
le cuivre	0.38
l'argent	0.24

TAB. 1.3 – Capacités thermiques massiques de quelques substances [5].

1.2.10 Définition d'un transfert de chaleur

Le phénomène de transfert de chaleur qu'il convient d'appeler un transfert thermique (phénomène irréversible) est l'un des modes les plus connus de l'échange d'énergie sous forme de chaleur. Il est issu d'une différence de la grandeur physique "température" entre deux corps en contact ou pas. D'ailleurs on y constate une tendance à égaliser Les températures, on dit alors qu'il y'a "équilibre thermique". Les corps qui assurent le transfert de cette grandeur sont appelés porteurs de charge [1] [4].

La chaleur peut se transmettre sous trois modes différents :

- 1-La conduction.
- 2-La convection.
- 3-Le rayonnement.

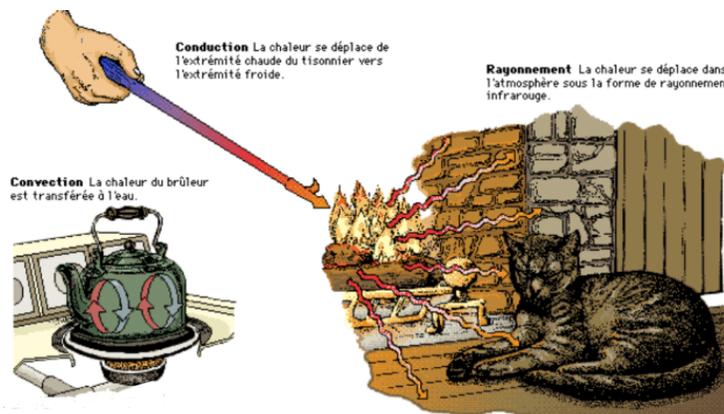


FIG. 1.7 – Différents modes du transfert de chaleur [2].

1.2.11 Etablissement du bilan d'énergie

Le bilan énergétique est le calcul du flux thermique global. On l'établi en s'aidant du premier principe de la thermodynamique. Premièrement, on détermine un système ensuite on fait une liste des différents flux thermiques qui aiguillonnent l'état du système et finalement on établi le bilan. On compte positivement les flux reçus et négativement les flux perdus ou sortant comme suit [1] [6] [7] :

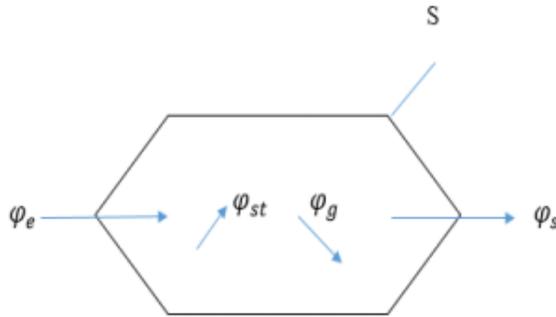


FIG. 1.8 – Bilan énergétique appliquée à un volume V .

$$\varphi_e + \varphi_g = \varphi_s + \varphi_{st}$$

Avec :

$$\varphi_e = (\dot{m}C_p)(T_1 - T_2)$$

$$\varphi_g = \dot{q}V$$

$$\varphi_s = (\dot{m}C_p)(T_2 - T_3)$$

$$\varphi_{st} = \rho V C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

et : φ_e : flux thermique entrant

et : φ_g : flux thermique généré

et : φ_s : flux thermique sortant

et : φ_{st} : flux thermique stockée

Le produit $\rho V C_p$ est appelé la capacitance thermique du corps.

Les variables	Les expressions	Les unités
$\varphi_e, \varphi_g, \varphi_s, \varphi_{st}$	Flux de chaleur	(W) ou (J/s)
C_p	Chaleur spécifique	$Jkg^{-1}k^{-1}$
\dot{q}	Densité volumique énergie généré	wm^{-3}
V	volume	m^3
\dot{m}	Débit massique	$kg s^{-1}$
ρ	masse volumique	$kg m^{-3}$
T	Température	$^{\circ}C$
t	temps	s

TAB. 1.4 – Variables utilisées dans le bilan d'énergie et leur unités.

1.3 Les différents modes de transferts thermiques

Il existe trois modes de transferts thermiques :

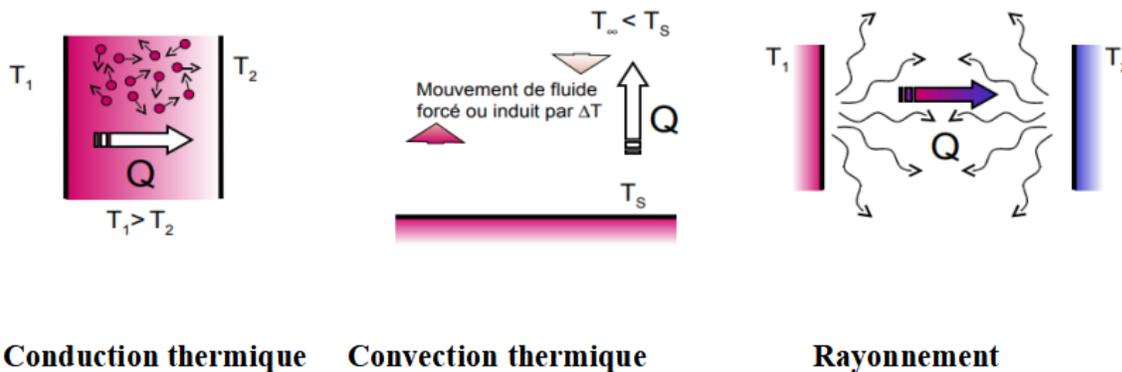


FIG. 1.9 – Les trois modes de transferts thermiques [3].

1.3.1 La conduction

La conduction est l'un des trois modes de propagation de la chaleur. Ce mode permet un transfert thermique efficace à travers les solides, les liquides et les gaz. La chaleur se déplace à l'intérieur d'un corps de particule en particule, de proche en proche par transmission d'énergie de l'agitation thermique. En résumé, la conduction est le mode de transfert de chaleur par contact [2] [4].

La conduction thermique est un phénomène très analogue à la conduction électrique, le mystère du mécanisme exacte de celle-ci dans les solides n'est pas totalement élucidé, par contre nous savons qu'il découle du mouvement des électrons libres dans le corps causé par la

différence de température entre deux zones du même solide ou du même fluide. D'ailleurs les bons conducteurs de chaleur sont en général de bons conducteurs électriques [2] [4].

Le phénomène de la conduction est exprimé par la loi de Fourier :

$$\vec{\varphi} = -\lambda S \overrightarrow{\text{grad}T} \text{ on peut aussi l'écrire comme tel : } \vec{\varphi} = -\lambda S \left(\frac{\partial t}{\partial X}\right) \vec{u}$$

On remarque ici que le flux thermique est proportionnel au gradient de température.

Avec : φ : Flux thermique en (W) ou (J/s).

\vec{u} : vecteur unitaire.

λ : Conductivité thermique du matériau ou du milieu en ($wm^{-1}C^{-1}$).

S : Surface que le flux thermique traverse en (m^2) .

X : Direction du flux thermique en (m).

T : Température en ($^{\circ}C$) [2] [4] .

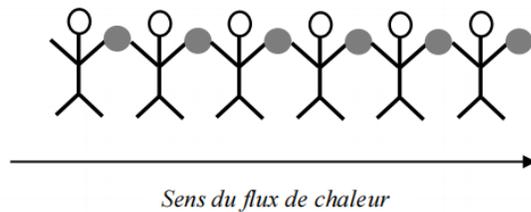


FIG. 1.10 – Transfert de chaleur par conduction.

On présente dans le tableau suivant les valeurs de la conductivité thermique λ des matériaux les plus utilisés :

Le matériau	La conductivité thermique en ($wm^{-1}C^{-1}$)
eau	0.60
air	0.026
argent	419
cuivre	386
glace	1.88
verre	1
béton	1.4
platre	0.48
liège	0.044 - 0.049
bois	0.12 - 0.23

TAB. 1.5 – Valeurs de la conductivité thermique des matériaux les plus utilisés [8].

1-Transfert de chaleur par conduction en régime Permanent [7] :

En appliquant le bilan énergétique suivant : $\varphi_e + \varphi_g = \varphi_s + \varphi_{st}$

On obtient l'équation de la chaleur générale suivante : $\frac{\partial}{\partial x}(\lambda S \frac{\partial T}{\partial x}) = \rho SC \frac{\partial T}{\partial t}$

Dans le cas tridimensionnel : $\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{q} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}$

- Cas du mur simple sans génération et stockage d'énergie [7] :

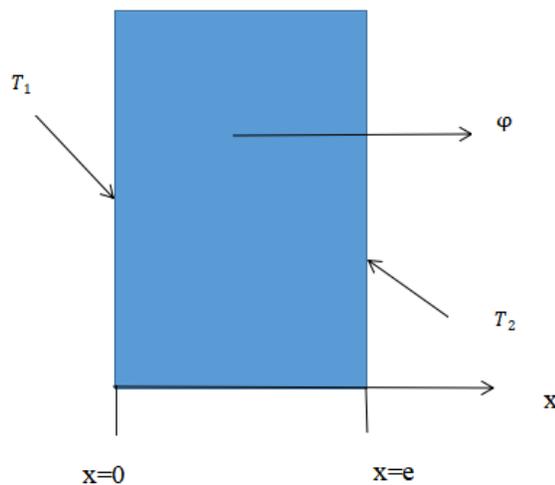


FIG. 1.11 – Schéma d'un transfert thermique dans un mur simple.

En appliquant le bilan thermique sur le système, on obtient cette expression du flux thermique :

$$\varphi = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e}{\lambda S}} \quad \text{avec } \frac{e}{\lambda S} : \text{ la résistance thermique.}$$

- Cas du mur multicouches [7] :

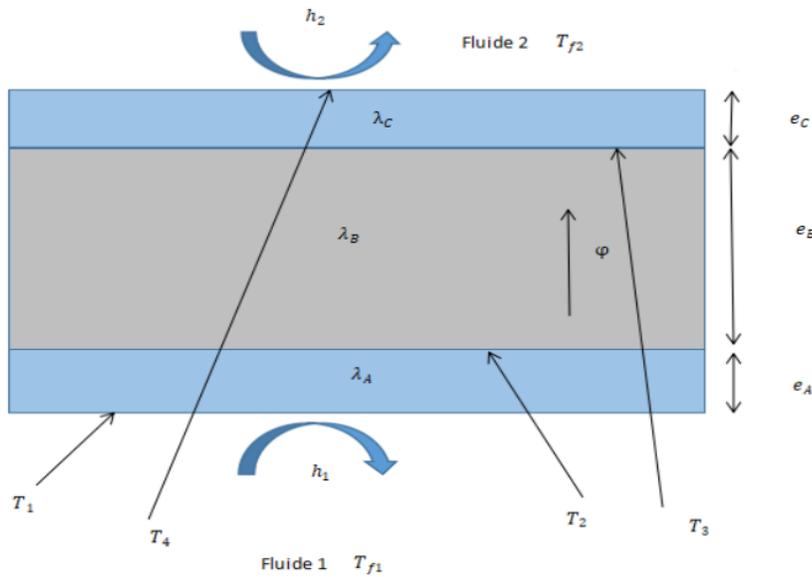


FIG. 1.12 – Schéma d'un transfert thermique dans un mur multicouches.

Le flux thermique se conserve et s'écrit comme tel :

$$\varphi = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{h_1 S} + \frac{e_A}{\lambda_A S} + R_{AB} + \frac{e_B}{\lambda_B S} + R_{BC} + \frac{e_C}{\lambda_C S} + \frac{1}{h_2 S}}$$

Démonstration :

$$\varphi = h_1 S (T_{f1} - T_1) = \lambda_A S \frac{T_1 - T_2}{e_A} + \frac{T_1 - T_2}{R_{AB}} = \lambda_B S \frac{T_2 - T_3}{e_B} + \frac{T_2 - T_3}{R_{BC}} = \lambda_C S \frac{T_3 - T_4}{e_C} = h_2 S (T_4 - T_{f2})$$

$$\text{Donc : } \varphi = h_1 S (T_{f1} - T_1) = \lambda_A S (T_1 - T_2) \left(\frac{1}{e_A} + \frac{1}{R_{AB}} \right) = \lambda_B S (T_2 - T_3) \left(\frac{1}{e_B} + \frac{1}{R_{BC}} \right) = \lambda_C S \frac{T_3 - T_4}{e_C} = h_2 S (T_4 - T_{f2})$$

Aussi :

$$\begin{aligned} \frac{\varphi}{h_1 S} &= (T_{f1} - T_1) \\ \varphi \left(\frac{e_A}{\lambda_A S} + R_{AB} \right) &= (T_1 - T_2) \\ \varphi \left(\frac{e_B}{\lambda_B S} + R_{BC} \right) &= (T_2 - T_3) \\ \frac{\varphi e_c}{\lambda_c S} &= (T_3 - T_4) \\ \frac{\varphi}{h_2 S} &= (T_4 - T_{f2}) \end{aligned}$$

Alors : $\frac{\varphi}{h_1 S} + \varphi \left(\frac{e_A}{\lambda_A S} + R_{AB} \right) + \varphi \left(\frac{e_B}{\lambda_B S} + R_{BC} \right) + \frac{\varphi e_c}{\lambda_c S} + \frac{\varphi}{h_2 S} = (T_{f1} - T_1) + (T_1 - T_2) + (T_2 - T_3) + (T_3 - T_4) + (T_4 - T_{f2})$

ceci conduit à : $\frac{\varphi}{h_1 S} + \varphi \left(\frac{e_A}{\lambda_A S} + R_{AB} \right) + \varphi \left(\frac{e_B}{\lambda_B S} + R_{BC} \right) + \frac{\varphi e_c}{\lambda_c S} + \frac{\varphi}{h_2 S} = (T_{f1} - T_{f2})$

Finalement :

$$\varphi = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{h_1 S} + \frac{e_A}{\lambda_A S} + R_{AB} + \frac{e_B}{\lambda_B S} + R_{BC} + \frac{e_C}{\lambda_C S} + \frac{1}{h_2 S}}$$

- Cas du cylindre creux long [7] :

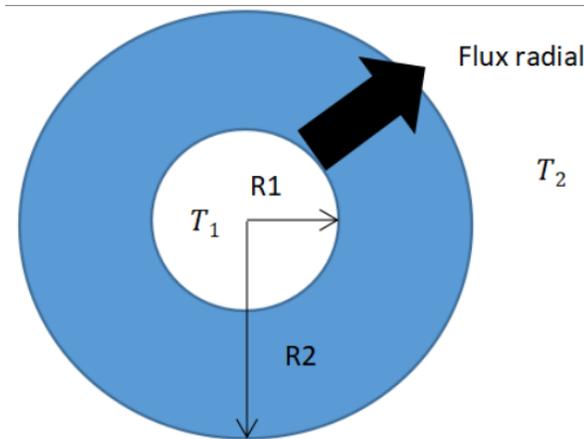


FIG. 1.13 – Schéma d'un transfert thermique dans un cylindre creux long.

En appliquant le bilan thermique et les conditions aux limites, le flux thermique s'écrit :

$$\varphi = \frac{2\pi L \lambda (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \text{ avec } R_{12} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L \lambda} \text{ donc le flux devient : } \varphi = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{12}}$$

Démonstration :

$$\varphi \times R = \Delta T \text{ donc } \varphi = \frac{\Delta T}{R} \text{ alors } \varphi = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{12}}$$

comme $\frac{\Delta T}{R}$ et $R_{12} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L \lambda}$ et $\Delta T = (T_1 - T_2)$

Alors

$$\varphi = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L \lambda}}$$

finalement

$$\varphi = \frac{2\pi L\lambda(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

- Cas du cylindre creux multicouches [7] :

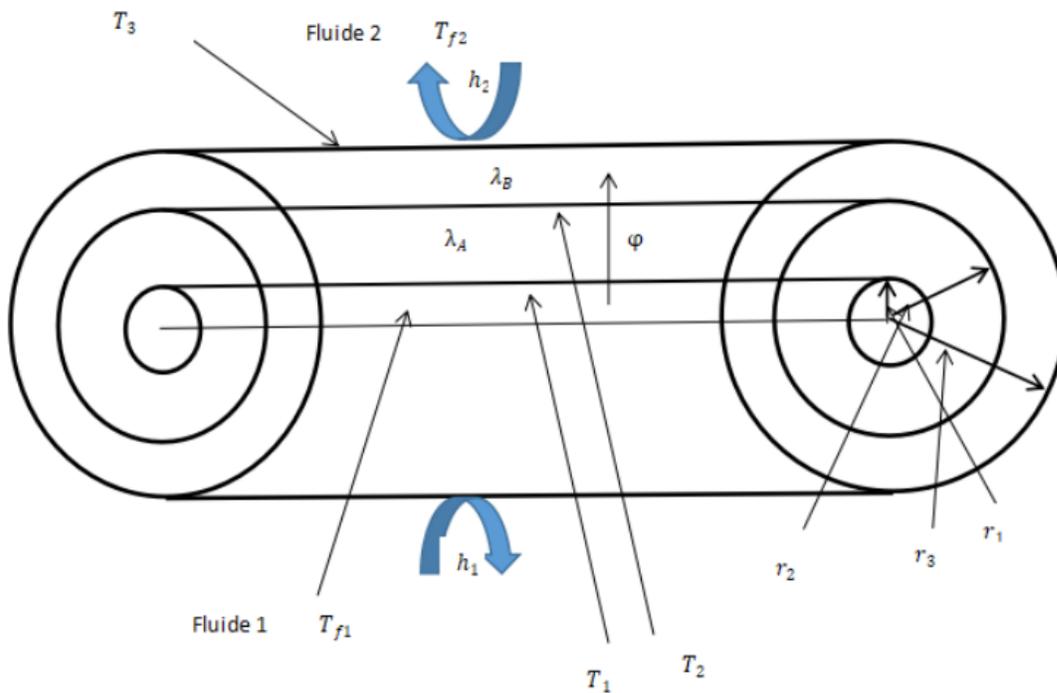


FIG. 1.14 – Schéma d'un transfert thermique dans un cylindre creux multicouches.

Le flux thermique se conserve et s'écrit comme tel :

$$\varphi = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{h_1 2\pi r_1 L} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L \lambda_A} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L \lambda_B} + \frac{1}{h_2 2\pi r_3 L}}$$

Démonstration :

$$\varphi = \frac{\Delta T}{R} \text{ donc } \varphi_t = \frac{\sum \Delta T}{\sum R}$$

$$\varphi_1 = \frac{T_{f1}-T_1}{h_1 S_1}, \varphi_2 = \frac{T_1-T_2}{\frac{2\pi L \lambda}{\ln \frac{r_2}{r_1}}}, \varphi_3 = \frac{T_2-T_3}{\frac{2\pi L \lambda}{\ln \frac{r_3}{r_2}}}, \varphi_4 = \frac{T_3-T_{f2}}{h_2 S_2}$$

Nous avons $S_1 = 2\pi r_1 L$ et $S_2 = 2\pi r_3 L$

$$\text{Donc } \sum \Delta T = (T_{f1} - T_1) + (T_1 - T_2) + (T_2 - T_3) + (T_3 - T_{f2}) = (T_{f1} - T_{f2})$$

$$\text{et } \sum R = \frac{1}{h_1 S_1} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi L \lambda} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi L \lambda} + \frac{1}{h_2 S_2} = \frac{1}{h_1 2\pi r_1 L} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2\pi L \lambda_A} + \frac{\ln(\frac{r_3}{r_2})}{2\pi L \lambda_B} + \frac{1}{h_1 2\pi r_1 L}$$

Donc

$$\varphi_t = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{h_1 2\pi r_1 L} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2\pi L \lambda_A} + \frac{\ln(\frac{r_3}{r_2})}{2\pi L \lambda_B} + \frac{1}{h_1 2\pi r_1 L}}$$

2-Transfert de chaleur par conduction en régime variable[7] :

- Cas d'une plaque infinie [8] :



FIG. 1.15 – Schéma d'une plaque infinie.

Dans le cas d'une plaque infinie à température imposée, le profil des températures s'écrit comme tel [7] :

$$T(x, t) = \frac{T(x, t) - T_0}{T_i - T_0} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin\left[(2n+1) \frac{\pi x}{2L}\right] \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 at}{4L^2}\right]$$

- Cas d'un cylindre infini [7] :

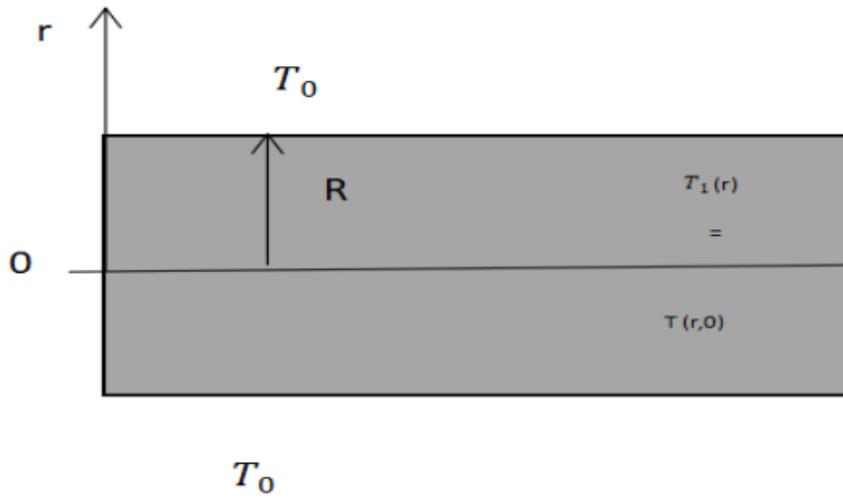


FIG. 1.16 – Schéma d'un cylindre infini.

Dans le cas d'un cylindre infini à température imposée, le profil des températures s'écrit comme tel :

$$T(r, t) = T_0 + \frac{2(T_i - T_0)}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(w_n r)}{W_n J_1(w_n R)} \exp^{-aw_n^2 t}$$

- Cas d'une sphère [7] :

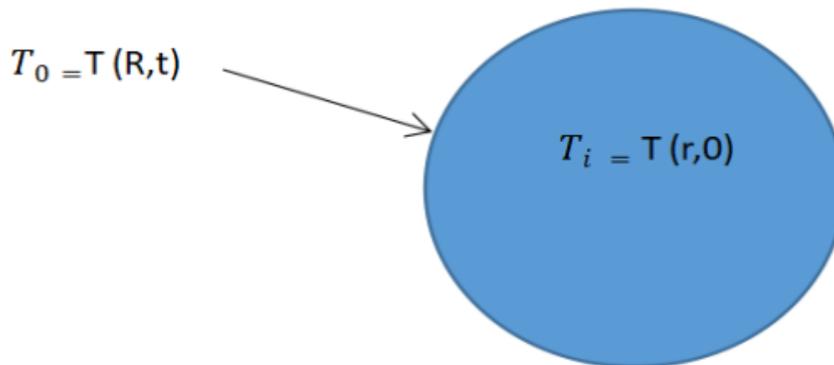


FIG. 1.17 – Schéma d'une sphère.

Dans le cas d'une sphère à température imposée, le profil des températures s'écrit comme tel [7] :

$$T(r, t) = T_0 + \frac{2R(T_0 - T_i)}{\pi R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin\left[\frac{n\pi r}{R}\right] \exp\left[-\frac{an^2\pi^2 t}{R^2}\right]$$

1.3.2 La convection

La convection est un transfert de chaleur entre deux corps de nature différente, entre un fluide et un solide. Ce transfert est lié au mouvement des particules du milieu à travers lequel se propage la chaleur. L'un des corps deux est généralement au repos et l'autre en mouvement en présence d'un gradient de température. Autrement dit la convection est une circulation d'un fluide qui peut transporter avec lui une certaine quantité d'énergie thermique à la fois par advection et par diffusion thermique. On retiendra donc que dans la convection, la chaleur se sert du fluide comme véhicule pour se déplacer [4][8][9].

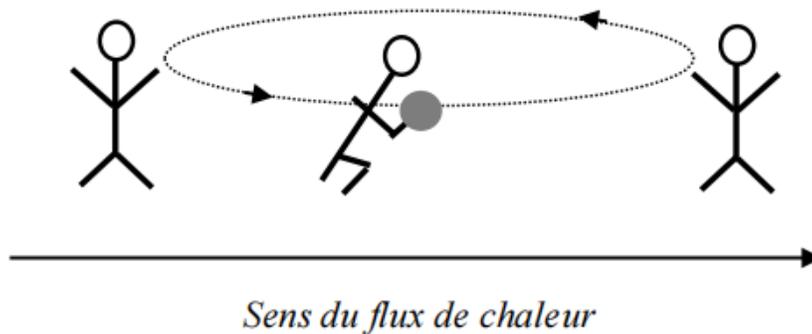


FIG. 1.18 – Transfert de chaleur convectif.

Le flux de chaleur est exprimé en convection par la loi de newton :

$$\varphi = hS_p(T_p - T_f)$$

φ : Flux de chaleur transmis par convection (W).

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($Wm^2\text{C}^{-1}$).

T_p : Température de surface du solide ($^{\circ}\text{C}$).

T_f : Température du fluide loin de la surface du solide ($^{\circ}\text{C}$).

S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m^2).

On représente dans le tableau suivant, les ordres de grandeurs du coefficient de convection moyen en ($Wm^{-2}k^{-1}$) pour différentes configurations :

Fluide	Convection naturelle	Convection forcée
gaz	5-30	30-500
eau	30-300	$300 - 2 \times 10^4$
huile	5-100	$30 - 3 \times 10^3$
métal liquide	50-500	$500 - 2 \times 10^4$
eau bouillante	$2 \times 10^3 - 2 \times 10^4$	$3 \times 10^3 - \times 10^4$
Condensation de vapeur d'eau	$3 \times 10^3 - 3 \times 10^4$	$3 \times 10^3 - 2 \times 10^5$

TAB. 1.6 – Exemple des valeurs du coefficient d'échange convectif [9].

Signification physique des nombres sans dimensions[9] :

- Le nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu}$$

compare les forces d'inertie et les forces visqueuses.

- Le nombre de Prandtl :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda_f}$$

compare la diffusion de masse devant la diffusion thermique.

- Le nombre de Nusselt :

$$Nu = \frac{hD}{\lambda_f}$$

compare le transfert par convection devant le transfert par conduction dans le fluide. Il est proportionnel au coefficient d'échange et il est d'autant plus élevé que le transfert par convection est important.

- Le nombre de Péclet :

$$Pe = Re_L Pr_L = \frac{uL}{\alpha_f}$$

compare le transfert par diffusion et par convection dans le fluide (L : la distance, α_f : diffusivité thermique du fluide) .

Le flux échangé est lié à plusieurs facteurs :

- 1- la différence de température entre la paroi et le fluide .
- 2- la vitesse du fluide .
- 3- la capacité thermique massique du fluide .
- 4- la surface d'échange .
- 5- l'état de surface du solide .
- 6- sa dimension etc . . .

On distingue quatre types de convection selon le mécanisme qui engendre l'activité du fluide :

- 1- la convection naturelle .
- 2- la convection forcée.
- 3- la convection mixte.
- 4- la convection par changement de phase.

Les types de convection :

On distingue quatre types de convection :

1-la convection naturelle ou libre [9] :

La convection naturelle est un type de transport de masse et de chaleur, dans lequel le mouvement du fluide est généré uniquement par des différences de densité dans le fluide dues aux gradients de température. On dit qu'il y'a convection naturelle lorsque le fluide circule naturellement sous l'effet de la chaleur qui, par ailleurs, sera transportée avec lui.

La convection naturelle ne peut se produire que dans un champ gravitationnel ou en présence d'une autre accélération appropriée (accélération, force centrifuge et force de Coriolis).

Exemple :

Le chauffage d'une pièce par un convecteur électrique se fait par une ascension d'air chaud le long du mur, tandis que l'air plus frais descend et est " aspiré " vers le convecteur pour remplacer l'air chaud le quittant.

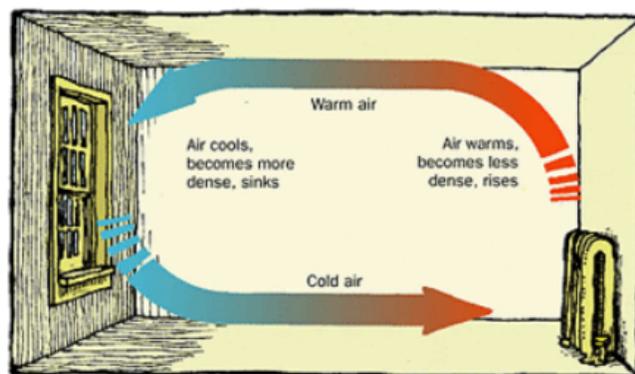


FIG. 1.19 – Convection libre[41].

2-la convection forcée :

La convection forcée est appelée aussi chaleur tournante qui est provoquée par une circulation artificielle, dans laquelle l'écoulement du fluide est forcé par un dispositif mécanique quelconque (pompe, turbine; ventilateur). Ce transfert est plus rapide que dans le cas de la convection naturelle.

Exemple :

un sèche-cheveux dans lequel l'air ambiant est soufflé par un ventilateur au travers d'une résistance chauffante électrique.

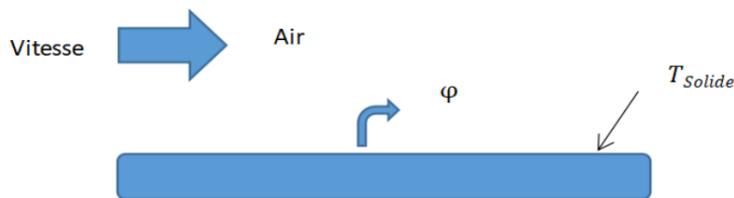


FIG. 1.20 – Convection forcée.

Les différentes corrélations empiriques pour calculer le nombre de Nusselt en convection forcée :[9]

- Le cas d'un écoulement sur une plaque plane [9] :

En régime laminaire :

$$\overline{Nu}_x = 0.322 \times Re_x^{0.5} \times Pr^{0.33} \text{ pour } Pr \geq 0.6$$

$\overline{Nu}_L = 0.664 \times Re_x^{0.5} \times Pr^{0.33}$ pour $Pr \geq 0.6$ et L la longueur considérée ,avec \overline{Nu}_L le coefficient moyen de la configuration.

En régime turbulent :

$$\overline{Nu}_x = 0.0296 \times Re_x^{0.8} \times Pr^{0.33} \text{ pour } 0.6 < Pr < 60$$

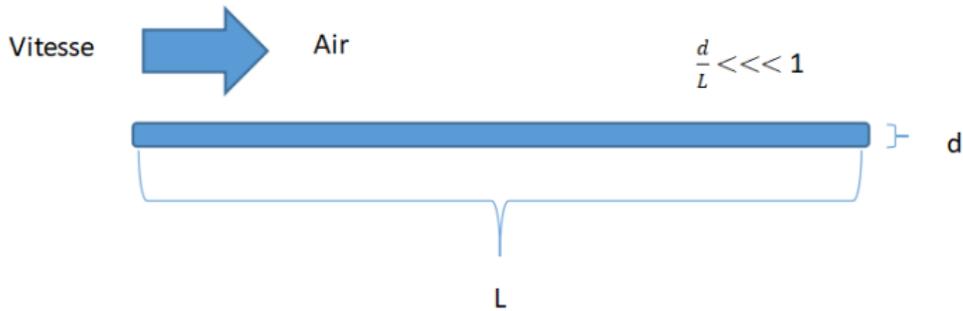


FIG. 1.21 – Écoulement sur une plaque plane en convection forcée .

• Cas d'un écoulement autour d'un cylindre [9] :

Pour un gaz :

$$\overline{Nu_D} = C \times Re_D^m \times Pr^{0.33}$$

Pour un liquide :

$$\overline{Nu_D} = 1.11C \times Re_D^m \times Pr^{0.33}$$

Le tableau suivant représente les constantes C et m dans l'expression du nombre de Nusselt en fonction des nombres de Reynolds :

Re	C	m
0.4-4	0,989	0,330
4-40	0,911	0,385
40-4000	0,683	0,466
4000-40000	0,193	0,618

TAB. 1.7 – Valeurs de C et m dans l'expression du nombre de Nusselt pour un écoulement d'un fluide autour d'un cylindre [9].

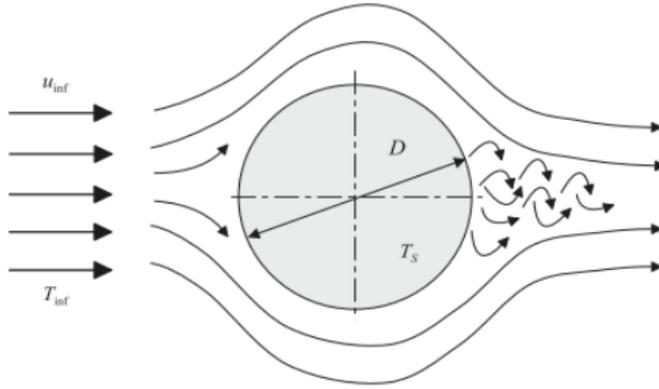


FIG. 1.22 – Écoulement autour d'un cylindre pour une convection forcée [9].

• **Cas d'un écoulement autour d'une sphère [9] :**

$$\overline{Nu_D} = 2 + (0.4Re_D^{0.5} + 0.06Re_D^{0.66})Pr^{0.4}\left(\frac{\mu_{inf}}{\mu_s}\right)$$

Avec :

$$0.71 < Pr < 380$$

$$3.5 \ll 7.6 \times Re_D \times 10^4$$

$$1.0 < \frac{\mu_{inf}}{\mu_s} < 3.2$$

• **Cas d'un écoulement dans un tube cylindrique [9] :**

En régime turbulent :

lorsque le nombre de Reynolds dépasse 10^4 et $0,7 < Pr < 100$ on utilise la corrélation suivante :

$$Nu_D = 0.023Re_D^{0.8} \times Pr^{0.33}$$

En régime laminaire :

lorsque le nombre de Reynolds est inférieur à 2100 et que $0,48 < Pr < 16700$ on utilise celle ci :

$$\overline{Nu_D} = 1.86\left(\frac{Re_D \times PrD}{L}\right)^{0.33} \frac{\mu}{\mu_s}$$

Avec :

$$0.0044 < \frac{\mu}{\mu_s} < 9.75$$

3-La convection mixte :

La convection mixte est une convection où l'écoulement forcé est de même sens que l'écoulement libre, il se produit une amplification des transferts par rapport à la convection forcée seul c'est donc un transfert thermique où les deux types du transfert de chaleur par convection (naturelle et forcée) se retrouvent dans un seul et même système et au même moment.

Exemple :

Cas de la plaque verticale chauffée dans un fluide lui même en mouvement ascendant.

4-La convection par changement de phase[9] :

Le transfert de chaleur associé à un changement de phase (ébullition d'un liquide ou condensation d'une vapeur) conduit en général à des coefficients d'échange très élevés. Pour cette raison, les applications industrielles de systèmes thermiques exploitant ces phénomènes sont nombreuses : condenseurs, chaudières, réchauffeurs.

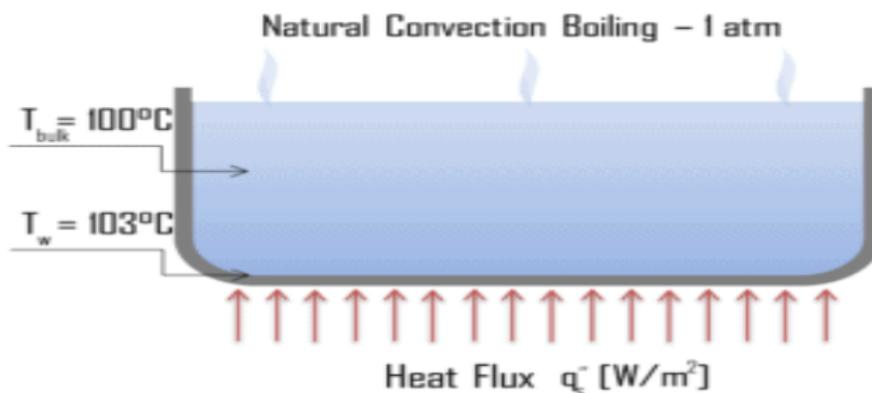


FIG. 1.23 – Convection avec changement de phase [42].

1.3.3 Le rayonnement

1-Définition :

Le rayonnement thermique est un phénomène ondulatoire où l'énergie thermique du soleil se propage dans le vide (sans support matériel) et dans l'espace sous forme d'une onde électromagnétique. Comme on l'imagine, le rayonnement électromagnétique est d'autant plus élevé que

sa température est grande (comme dans la conduction, ce sont les interactions entre atomes et molécules qui sont à l'origine de ce rayonnement).

Le spectre de ce rayonnement s'étend du domaine micro-onde à l'ultraviolet [4].

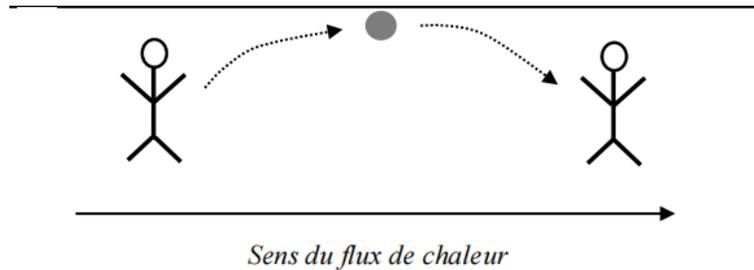


FIG. 1.24 – Schématisation du rayonnement.

Dans les problèmes de la conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant. Dans ce cas, nous avons la relation suivante :

$$\nu = \sigma \epsilon_p S (T_p - T_\infty)$$

avec :

- ν : flux de chaleur transmis par rayonnement (W) ;
- σ : constante de Stefan ($5,67 \times 10^{-8} W m^{-2} k^{-4}$).
- ϵ_p : Facteur d'émission de la surface.
- T_p : Température de la surface (K).
- T_∞ : Température du milieu environnant la surface (K).
- S : La surface (m^2).

2-le spectre électromagnétique [9] :

Les rayons émis par le soleil sont d'une nature électromagnétique en raison de l'agitation de la matière sous l'effet de la température dans tous les corps (solide, liquide ou gazeux). Cette transmission d'énergie s'effectue au détriment de leur énergies internes. Pour le thermicien, il s'agit d'un flux de chaleur émis par le corps considéré.

3-Les types de rayonnement électromagnétique [44] :

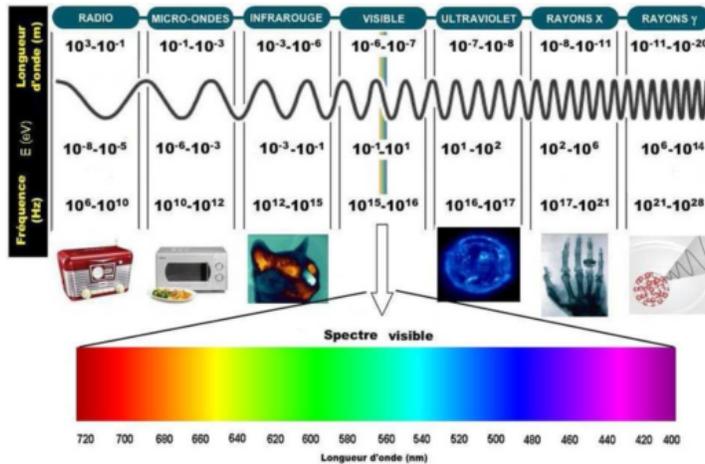


FIG. 1.25 – Les différents spectres électromagnétiques [43].

- Les ondes radio.
- Les micro-onde.
- Les rayons infrarouges.
- La lumière visible.
- Les ultra violets.
- Les rayons X et les rayons gamma.

4-Rayonnement des corps noir(rayonnement complet) :

Le rayonnement d'un corps noir est un rayonnement électromagnétique à intérieur ou entourant un corps en équilibre thermodynamique avec son environnement, ou émis par un corps noir qui est une surface parfaite (qui n'existe donc pas dans la nature) et qui possède les propriétés suivantes : il est éclairé indépendamment de la longueur d'onde et de la direction de cet éclairé. à une température de surface équivalente, le rayonnement d'un corps noir est plus grand que celui de toute autre surface, ce dernier possède un spectre spécifique et une intensité qui dépend seulement de la température du corps [10].

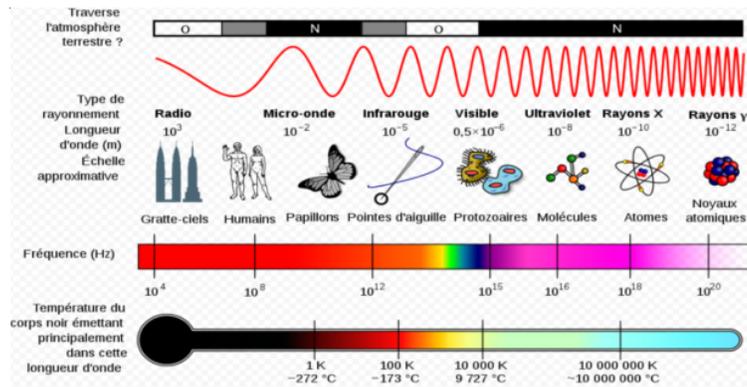


FIG. 1.26 – Le rayonnement d'un corps opaque [45].

5-Rayonnement des corps gris[9] :

Un corps gris est un corps qui émet un rayonnement à chaque longueur d'onde selon un rapport constant inférieur à l'unité à celui émis par un corps noir aux mêmes températures, autrement dit un corps gris est un objet dont l'absorptivité d'une surface ne varie pas avec les variations de la température et de la longueur d'onde (indépendante de la température et de la longueur d'onde).

1.4 Les différents domaines d'utilisation des transferts thermiques

Un transfert de chaleur entre deux substances ou corps quelconques est une sorte d'interférence énergétique qui découle d'un gradient de température entre eux deux, ou bien entre deux parties différentes de la même substance (de la plus chaude vers le plus froide). Il existe trois modes de transferts de chaleur, mais quels sont les domaines d'applications de ses transferts thermiques ?

On rencontre les transferts thermiques dans de nombreuses situations telles que le chauffage des centrales et de l'eau pour les sanitaires, le nettoyage et la stérilisation de différents endroits et outils ainsi que le traitement de l'air et de l'eau, dans le chauffage et l'isolation des habitations, des bâtiments et des bureaux, dans la production de vapeur nécessaire à la fabrication d'énergie électrique demandée par les habitations, les industries ainsi que les raffineries industrielles, dans le refroidissement des moteurs thermiques (réfrigérateur, chambres froides et climatisation, voitures et autres outils de transports) et de certains composants électriques et électroniques des machines en surchauffes, dans les hauts fourneaux des travaux artisanaux qui nécessitent une grande température pour faire fondre l'acier et le verre afin d'élaborer de magnifiques sculptures, dans la biothermie et la géothermie, notamment dans le maintien de la température au cours des réactions et finalement la mise en température des réacteurs.

1.5 Conclusion

Dans cette première partie, nous avons défini le transfert thermique comme étant l'échange de chaleur qui se produit entre deux substances ou deux endroits de la même substance. Nous avons également expliqué d'autres concepts fondamentaux dont on ne peut s'en passer lors de l'étude des transferts thermiques. Nous avons mentionné aussi les différents mécanismes de transfert de chaleur existant dans la nature et nous avons terminé par préciser les cadres d'applications de ces derniers.

2

Les nanofluides dans le domaine thermique

2.1 Introduction

Plus le temps passe et plus les besoins de l'être humain en énergie s'intensifient. Ce dernier essaye de réunir au maximum les conditions de vie qui lui permettront de vivre aisément et confortablement. Pour cela il développe sans cesse un grand nombre de systèmes énergétiques importants dans divers domaines. Ceci exige donc l'introduction de moyens de refroidissement très puissants et efficaces tels que les nanofluides .

Dans ce travail nous nous intéressons spécialement aux nanofluides. Dans ce deuxième chapitre où nous allons mettre l'accent beaucoup plus sur l'utilité et l'utilisation des nanofluides en thermique.

Nous allons d'abord commencer par donner la définition des nanofluides, des nanoparticules, d'un fluide de base et d'un fluide hybride tout en s'aidant à chaque fois d'une illustration. Puis nous allons citer les types de fluides de base et de nanoparticules que nous pouvons rencontrer.

Ensuite, nous allons exposer les propriétés des nanofluides et nous allons lister les raisons pour lesquelles les nanofluides sont utilisés en thermique.

Après cela, nous allons énumérer quelques études expérimentales et numériques menées sur les transferts thermiques dans les nanofluides puis nous allons faire une étude comparative des transferts de chaleur entre un fluide de base pur et un nanofluide .

A la fin, nous parlerons des différents domaines d'applications des nanofluides et conclure.

2.2 Définitions des nanofluides et leurs propriétés

2.2.1 Définition des nanofluides :

1-Définition d'un nanofluide :

Un nanofluide est un fluide caloporteur constitué d'un fluide de base dans lequel on dispose de manière aléatoire des particules nanométriques de forme sphériques ou cylindriques ne dépassant pas 100 nm (de 1 nm à 100nm) dotées d'une conductivité très élevée. Ces dernières sont appelées nanoparticules. On peut déposer dans le fluide de base plusieurs types de nanoparticules (nanofluide hybride) ou bien un seul type, dans le but d'améliorer certaines propriétés du fluide mais surtout les propriétés thermiques (conduction, convection, transfert thermique en général) [14][15].

Une nanoparticule est un ensemble de centaines ou milliers d'atomes qui forment un corps de dimensions nanométriques (1 à 100 nm) ,1 nanomètre = 0,000 001 millimètre.

Les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire. Elles ont un intérêt à la fois fondamental et appliqué. Les chimistes les synthétisent, les physiciens les étudient pour comprendre la physique de ces objets nanométriques et les biologistes les utilisent comme marqueurs cellulaires.

La fraction volumique du nanofluide ou bien la concentration des nanoparticules dans le fluide de base est calculée par le volume des particules divisé par le volume total. Cette concentration peut aller de 0.1 jusqu'à 10 %. Elle ne doit pas dépasser ce pourcentage vu que la viscosité élevée du fluide ne nous le permet pas. Sauf dans certains cas, où elle peut atteindre les 20 % et cela pour les nanofluides à base de liquide métallique.

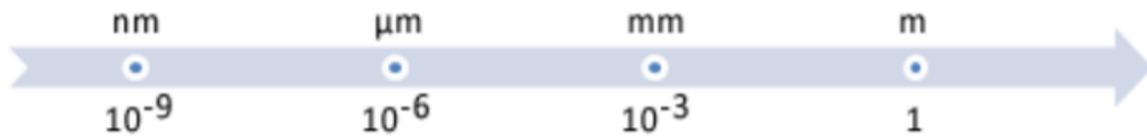


FIG. 2.1 – Échelle de dimension [11].

Les nanoparticules les plus utilisées afin d'obtenir des nanofluides sont classées en trois catégories :

- **Des nanoparticules de type métalliques** :[11]

On peut trouver différents matériaux tels que :

1. L'aluminium (Al)
2. Le cuivre (Cu)
3. L'or (Au)
4. L'argent (Ag)
5. Le Fer (Fe)
6. Le Zinc (Zn)
7. Le Titane (Ti)
8. Le silicium (Si)

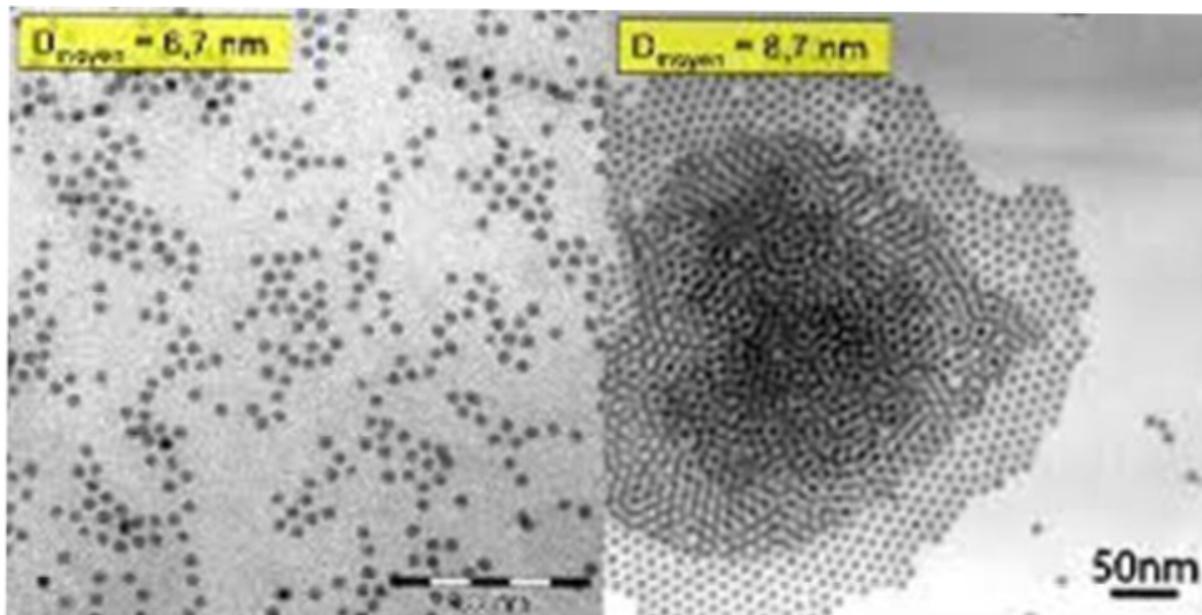


FIG. 2.2 – Nanoparticules de fer de diamètre moyen [12].

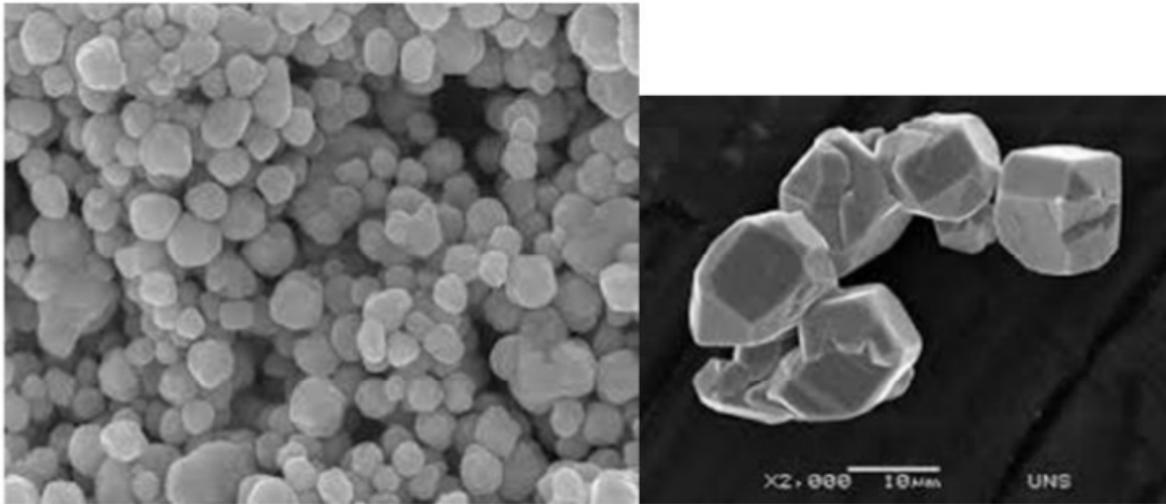


FIG. 2.3 – Nanoparticules d'argent [12].

• **Des nanoparticules de type non métallique (carbures) :**[11]

On y trouve trois matériaux seulement :

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

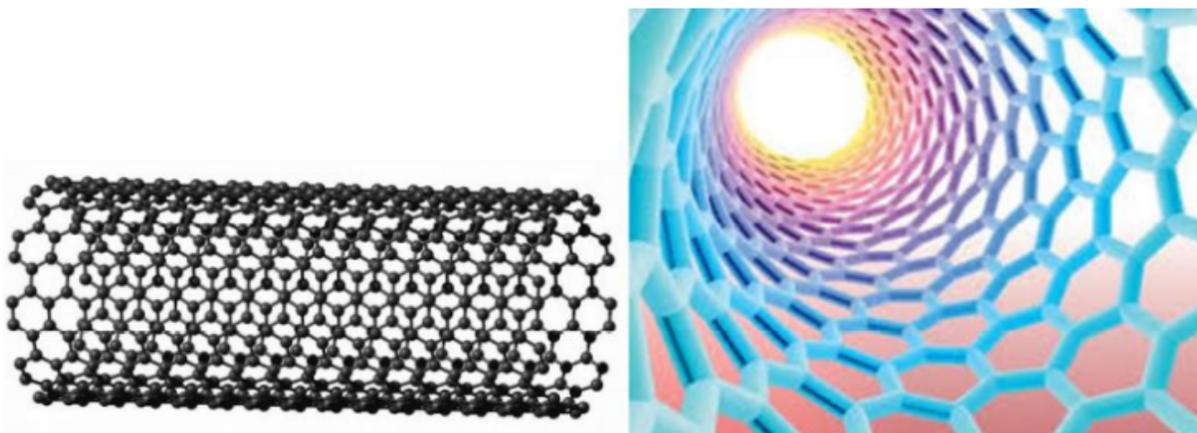


FIG. 2.4 – Nanotubes de carbone [12].

• Des nanoparticules de type oxyde métallique [11] :

On y trouve différents matériaux comme par exemple :

1. L'oxyde d'aluminium (Al_2O_3)
2. L'oxyde de silicium (SiO_2)
3. L'oxyde de Titantium (TiO_2)
4. L'oxyde de cuivre (CuO)
5. L'oxyde de fer (Fe_3O_4)
6. L'oxyde de Zinc (ZnO)

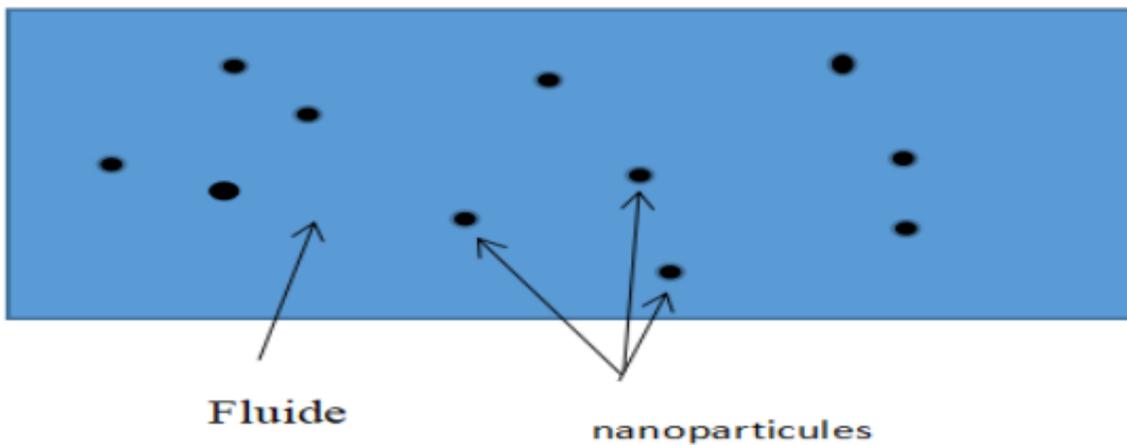


FIG. 2.5 – Illustration d'un nanofluide.

2-Définition d'un fluide de base :

Un fluide de base est un liquide de refroidissement totalement ordinaire dans lequel on met en suspension les nanoparticules pour former un nanofluide.

Les fluides de base sont eux aussi constitués de divers types tels que [11] :

1. L'eau.
2. L'huile.
3. L'éthylène glycol (EG).
4. Les fluides de réfrigération (R12, R22).
5. Le Toluène.

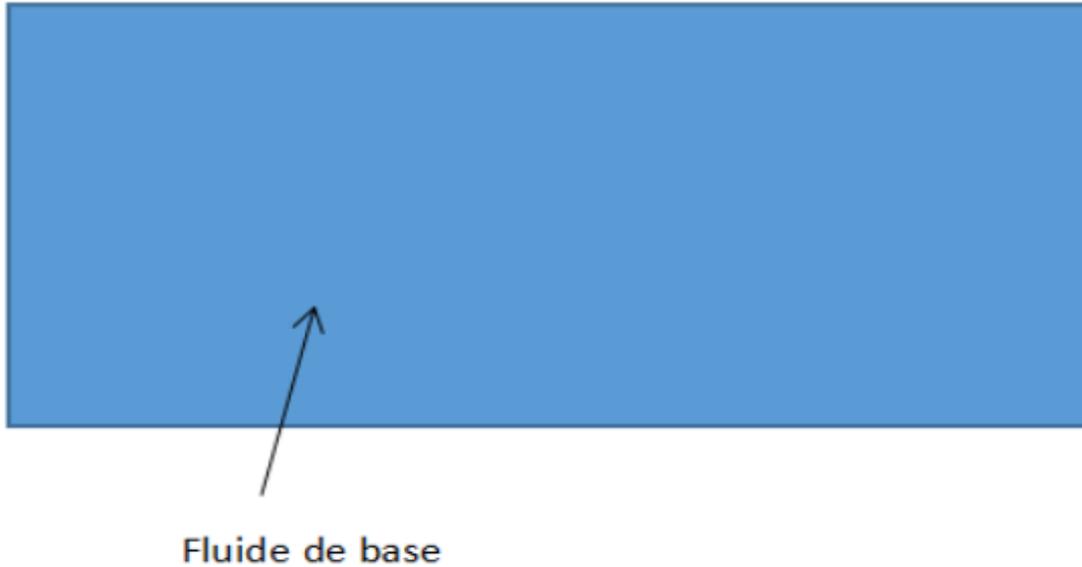


FIG. 2.6 – Illustration d'un fluide de base.

3- 1-Définition d'un nanofluide hybride :

Un nanofluide hybride est un fluide de base où on dispose en même temps plusieurs types de nanoparticules (type A, type B, type Cetc) aléatoirement, dans le but d'en améliorer les propriétés mais généralement pour obtenir un fluide de refroidissement amélioré. Ce dernier est donc une combinaison des propriétés physiques et chimiques des nanoparticules utilisées. Les nanofluides hybrides sont plus rares que les nanofluides.

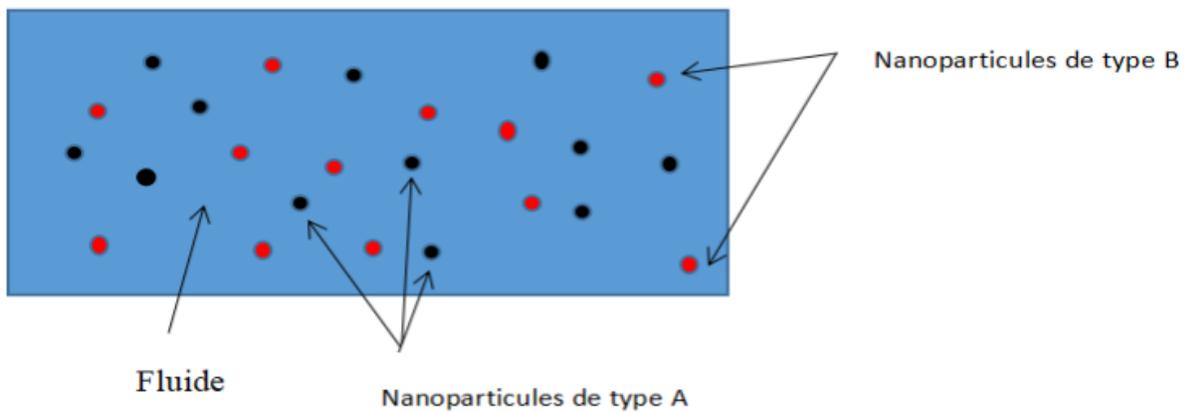


FIG. 2.7 – Illustration d'un nanofluide hybride.

2.2.2 Les propriétés des nanofluides :

Les propriétés thermophysiques (conductivité thermique, viscosité dynamique et cinématique, capacité thermique massique, etc.) des fluides de base sont profondément modifiées par l'ajout des nanoparticules. Ces propriétés liées principalement au fluide de base (liquide) et à la phase dispersée (nanoparticules) sous forme solide, sont calculées par les formules suivantes :

1- Conductivité thermique(K) :

La conductivité thermique généralement est l'une des propriétés les plus importantes liées au transfert de chaleur dans les nanofluides. Elle joue un rôle très important dans le phénomène de transfert de chaleur [13].

La principale raison de l'ajout de nanoparticules dans le fluide de base est d'augmenter sa conductivité thermique. Cette dernière est définie comme la quantité de chaleur transférée par unité de surface et de temps sous un gradient de température de 1 K par mètre [13]. La conductivité thermique d'un nanofluide est calculée selon les modèles suivants :

A-Modèle de Maxwell [14] :

Pour calculer la conductivité thermique d'un nanofluide en fonction de la fraction volumique du nanofluide, Maxwell a utilisé son modèle qui est l'un des premiers à étudier analytiquement la conductivité thermique du nanofluide K_{nf} . Ce modèle donne des résultats satisfaisants pour des suspensions qui contiennent des particules sphériques avec des concentrations volumiques relativement faibles.

Le modèle de Maxwell est donné par la formule suivante :

$$K_{nf} = \frac{K_s + 2K_f + 2\phi(K_s - K_f)}{(K_s + 2K_f) - \phi(K_s - K_f)} \times K_f$$

Où K_{nf} : La conductivité thermique du nanofluide.

K_f : La conductivité thermique du fluide de base.

K_s : La conductivité thermique des particules solides.

B-Modèle de Hamilton et Crosser [15] :

En 1962, Hamilton et Crosser ont utilisé leur modèle pour résoudre la limite du modèle de Maxwell ; il est valable que dans le cas des particules sphériques. Cela rend le modèle non efficace pour la description du phénomène étudié. Hamilton et Crosser ont proposé un modèle pour les mélanges liquide-solide de particules non sphériques. Ils ont introduit un facteur géométrique appelé sphéricité faisant référence à la géométrie sphérique pour prendre en compte cette diversité de formes. Ce facteur est défini comme étant le rapport de la surface de la sphère

ayant le même volume que les nanoparticules sur la surface d'une nanoparticule. Ils ont obtenu une relation qui est donnée par :

$$K_{nf} = \frac{K_s + (n-1)K_f - (n-1)\phi(K_f - K_s)}{K_s + (n-1)K_f + \phi(K_s - K_f)} \times K_f$$

Où (n) est un facteur de forme empirique donné par : $n = \frac{3}{\psi}$

Pour les particules sphériques : $n=3$

Pour les particules cylindriques : $n=6$

Pour ($\psi=1$) (particules sphériques) le modèle de Hamilton et Crosser est identique au modèle de Maxwell.

C-Modèle de Bruggeman [16] :

Ce modèle donne des résultats expérimentaux plus fiables comparé aux autres modèles :

$$K_{nf} = \frac{1}{4}[(3\phi - 1)K_p + (2 - 3\phi)K_f + K_f 4\sqrt{\Delta}]$$

avec :

$$\Delta = [(3\phi - 1)^2 \left(\frac{K_p}{K_f}\right)^2 + (2 - 3\phi)^2 + 2(2 + 9\phi - 9\phi^2) \frac{K_p}{K_f}]$$

D-Modèle de Yu et Choi[17] :

En 2003, Yu et Choi ont introduit une nouvelle expression qui sert à calculer la conductivité thermique avec leur proposition qui est : la modélisation des nanofluides comme un liquide de base et la séparation des particules par une couche nanométrique qui agit comme un pont thermique entre les nanoparticules et le fluide. De plus Yu et Choi ont supposé que la conductivité thermique du liquide est plus petite par rapport à la conductivité thermique de la couche nanométrique. Le modèle de Yu et Choi est donné par :

$$K_{nf} = \frac{K_s + 2K_f + 2(K_s - K_f)(1 + \beta)^3 \phi}{(K_s + 2K_f) - (K_s - K_f)(1 + \beta)^3 \phi} \times K_f$$

Où β est le rapport de l'épaisseur de la couche nanométrique sur le rayon des particules.

E-Modèles corrélations semi-empirique [11] :

Dans plusieurs résultats expérimentaux ,on a trouvé qu'il existe plusieurs modèles de corrélations semi-empirique pour calculer la conductivité thermique des différents nanofluides :

Pour le nanofluide ($EG + Al_2O_3$) :

$$k_{nf} = (28.905\phi^2 + 2.8273\phi + 1) \times k_f$$

Pour le nanofluide (Eau + Al_2O_3) :

$$k_{nf} = (28.905\phi^2 + 2.8273\phi + 1) \times k_f$$

Pour le nanofluide (Cu +Eau) :

$$k_{nf} = (28.905\phi^2 + 2.8273\phi + 1) \times k_f$$

Pour le nanofluide (huile + ntc) :

$$k_{nf} = (28.905\phi^2 + 2.8273\phi + 1) \times k_f$$

2-Viscosité dynamique (μ) :

La viscosité est une propriété importante de l'écoulement du fluide (l'aptitude d'un fluide à s'écouler) pour qu'il résiste aux déformations lorsqu'il est mis en mouvement. Dans un écoulement laminaire où il y'a des pertes de charges, la puissance de pompage, ou quand il y'a un transfert de chaleur par convection, tout ces paramètres dépendent de la viscosité du fluide.

D'une autre façon, on dira que la viscosité dynamique est un frottement interne d'un fluide ; un liquide qui présente un frottement interne élevé est un liquide visqueux. Afin de déterminer la viscosité dynamique des particules en suspension dans un fluide, on peut utiliser diverses formules théoriques telles que :

A-Modèle d'Einstein [18] :

Albert Einstein(1906) à été le premier à calculer la viscosité effective d'une suspension de solide sphérique à l'aide des équations hydrodynamiques phénoménologiques. Il a utilisé cette relation, qui est d'ailleurs valable que dans le cas ou ϕ égal à 0.03 :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\phi)$$

avec :

μ_{nf} : La viscosité dynamique du nanofluide.

μ_f : La viscosité dynamique du fluide de base.

ϕ : La fraction volumique des nanoparticules (solide).

B-Modèle de Brinkman[19] :

Brinkman en 1952 a étendu l'équation d' Einstein pour une gamme de fractions volumiques plus importante allant jusqu'à 4 % en utilisant cette expression :

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

C-Modèle de Batchlor[20] :

En 1977, Batchlor a utilisé la relation d'Einstein mais avec une fonction non linéaire, il a montré que la viscosité dynamique n'est pas seulement une fonction linéaire de la fraction volumique des particules. Son modèle a été développé en considérant une suspension isotrope de nanoparticules solides et sphériques avec la présence de terme ϕ son modèle est donné par cette relation :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\phi + 6.5\phi^2 + \dots)$$

3-la fraction volumique (ϕ) :

Toutes les propriétés se basent sur la fraction volumique du nanofluide. Cette dernière est la propriété la plus importante du nanofluide. La fraction volumique est un rapport entre deux volumes (sans dimension) : le volume du solide ou des particules (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules + fluide de base), où la fraction volumique varie entre 0 (fluide de base pure) et 1. Elle est donnée par cette relation : [16]

$$\phi = \frac{\text{volume des particules}}{\text{volume totale du nanofluide}} = \frac{V_p}{V_p + V_f}$$

avec :

V_p : volume du solide (nanoparticule) en m^3 .

V_f : volume du fluide de base pure en m^3 .

4-La chaleur massique (C_p) :

On nomme la chaleur massique ou la chaleur spécifique une capacité calorifique par unité de masse du nanofluide d'un système homogène. C'est la quantité de chaleur dont on a besoin afin d'élever la température de l'unité de substance de 1 K lors de la transformation. La chaleur massique se traduit par cette relation [11] :

$$C_p = \frac{dQ}{mdT}$$

Il existe deux différents modèles pour déterminer la chaleur spécifique d'un nanofluide qui sont :

A-Modèle du Pak et Cho[21] :

Ce modèle à été donné par cette relation :

$$Cp_{nf} = (1 - \phi)Cp_f + \phi Cp_s$$

B-Modèle du Xuan et Roetzel [11] :

Ce modèle à été donné par cette relation :

$$Cp_{nf} = (1 - \phi)(\rho Cp)_f + \phi(\rho Cp)_s$$

5-Coefficient d'expansion volumique (β) :

Le calcul du coefficient d'expansion volumique (β) peut se faire avec les deux expressions suivantes [14] [25] :

$$\beta_{nf} = (1 - \phi)\beta_f + \phi\beta_s$$

avec :

β_{nf} : Le coefficient de dilatabilité du nanofluide.

β_f : Le coefficient de dilatabilité du fluide de base.

β_s : Le coefficient de dilatabilité des nanoparticules (solide).

ϕ : La fraction volumique du nanofluide.

Ou bien :

$$\rho\beta_{nf} = (1 - \phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_s$$

6-la masse volumique (ρ) :

La fraction volumique est un rapport sans dimension entre deux volumes, le volume du solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules + fluide de base). Cependant nous pouvons aisément calculer la masse volumique d'un nanofluide considéré absolument homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide grâce au mouvement brownien) en fonction de la fraction volumique à une température donnée [22].

Donc à partir de cette définition, nous pouvons faire ce calcul en utilisant la loi suivante :

$$\rho_{nf} = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{m_f + m_p}{V_f + V_p} = \frac{\rho_f V_f + \rho_p V_p}{V_f + V_p}$$

avec :

ρ_{nf} : la masse volumique du nanofluide.

m : la masse du nanofluide.

V : le volume du nanofluide.

m_f : la masse du fluide de base.

m_p : la masse du solide (particules).

V_f : le volume du fluide de base.

V_p : le volume du solide (particules).

La masse volumique d'un nanofluide pour une température donnée peut aussi être calculée par cette relation :

$$\rho_{nf} = (1 - \phi_f)\rho_f + \phi_p\rho_p$$

avec :

ρ_{nf} : la masse volumique du nanofluide.

ϕ_{nf} : la fraction volumique du nanofluide.

ϕ_f : la masse volumique du fluide de base.

ϕ_p : la masse volumique du solide (particules).

/	Nanoparticule et fluide de base	K (W/m k)	$\rho(kg/m^3)$	C _p (J/kg K)	$\mu(pa.s)$
métallique (solide)	Cu	400	6954	383	/
	Fe	80.2	7870	474	/
	Ni	90.7	8900	444	/
	Au	317	19.300	129	/
	Ag	429	10.500	235	/
	C (diamant)	2300	3500	509	/
Oxyde (solide) métallique (solide)	SiO_2	1.38	2222	745	/
	TiO_2	8.4	4167	710	/
	Al_2O_3	36	3970	765	/
	CuO	69	6350	535	/
	SiC	490	3160	675	/
Liquides non métallique	L'eau	0.613	1000	4183	0.0008513
	L'éthylène glycol	0.258	1132	2349	0.0157

TAB. 2.1 – Propriétés thermiques de quelques matériaux [23].

2.3 Les nanofluides en thermique

2.3.1 Expérience de R. Ridouane et E. Campo :

En 2006, R.Ridouane et E.Campo ont mené une étude sur l'effet de la géométrie du matériel utilisé sur l'amélioration des échanges thermiques au sein des nanofluides dans laquelle ils ont confronté quatre cavités : deux triangulaires horizontales (isocèle et angle droit) et les deux autres rectangulaires, dans le but d'améliorer le transfert de chaleur et de limiter la taille de la cavité [25].

Cette expérience a démontré que les cavités triangulaires dotées d'une taille inférieure aux rectangulaires, offrent une meilleure optimisation du transfert thermique.

2.3.2 Expérience de S. Aminossadati et B. Ghasemi :

En 2011, S.Aminossadati et B.Ghasemi ont exécuté une étude numérique de deux cavités triangulaires chauffées, afin de comparer le transfert thermique d'un fluide (éthylène glycol pur) et d'un nanofluide (éthylène-glycol-cuivre). Ils ont déduit que la meilleure performance thermique ce fait dans le nanofluide, surtout lorsque le nombre de Rayleigh (convection) et la fraction volumique ont des valeurs élevées [26].

2.3.3 Expérience de A. H. Mahmoudi et al :

En 2012, A. H. Mahmoudi et al ont étudié la convection naturelle et la production d'entropie (agitation) dans le nanofluide cuivre-eau en utilisant la méthode des volumes finis dans une cavité triangulaire soumise à un champ magnétique. Ces chercheurs ont conclu que le transfert

thermique est plus efficace quand on ajoute les nanoparticules au fluide lorsque le nombre de Rayleigh est faible (conduction), mais aussi que le nombre de Hartmann n'a aucun impact sur le transfert de chaleur [27].

2.3.4 Expérience de H. Rahman et al :

En 2011, H.Rahman et al ont effectué une simulation de l'écoulement d'un nanofluide Cu-eau, dans une cavité triangulaire inclinée en utilisant la méthode des éléments finis. Ils ont trouvé que l'augmentation du pourcentage des nanoparticules dans le fluide affecte plus l'écoulement que le nombre de Nusselt (transfert thermique). De même, ils ont remarqué que les champs hydrodynamiques et thermiques ont une forte dépendance du nombre de Richardson [28].

2.3.5 Expérience de B. Ghasemi et S. Aminossadati :

En 2010, B.Ghasemi et S.Aminossadati ont simulé le problème de la convection mixte d'un nanofluide Al_2O_3 -eau dans une enceinte triangulaire entraînée grâce à la méthode des volumes finis. Ils ont déduit que le transfert de chaleur est plus efficace lorsque la paroi à un mouvement descendant. Par contre il diminue quand le nombre de Richardson est élevé [29].

2.3.6 Expérience de S. Aminossadati :

En 2013, S.Aminossadati a mené une analyse sur la magnétohydrodynamique d'un nanofluide, Cu-eau, dans une cavité triangulaire. Il a remarqué que lorsque le nombre de Rayleigh est élevé, il en résulte une intensification des courants convectifs. Il a aussi déduit que le transfert thermique diminue lorsque que le nombre de Hartmann augmente mais aussi qu'il supprime les cellules de recirculation. Il a également observé que le nombre de Nusselt aux faibles valeurs du nombre de Rayleigh augmente lors de l'ajout des nanoparticules dans le fluide [30].

2.3.7 Expérience de F. Polidori et al et autres chercheurs :

Certains chercheurs ont découvert que les propriétés thermophysiques des nanofluides ont un impact important sur la prédiction des transferts de chaleur.

En 2007, F.Polidori et al confirment cela car ils ont démontré que les propriétés thermophysiques du nanofluide modifient le transfert thermique par convection naturelle plus précisément la viscosité et la conductivité thermique [31] [32] [33].

2.3.8 Expérience de M.S.Soutiji et al :

En 2014, M.S.Soutiji et al ont étudié numériquement le transfert thermique dans une cavité carrée ventilée traversée par un nanofluide (Al_2O_3 -eau). Ils ont fait varier l'emplacement de

l'ouverture de refoulement. Ces derniers ont déduit que le nombre de Nusselt moyen croît avec l'augmentation des nombres de Reynolds, de Richardson et de la fraction volumique [34].

2.3.9 Expérience de R. AL-Shahi et al :

En 2010, R. AL-Shahi et al. ont mené une étude numérique concernant la convection mixte au sein d'un nanofluide (Cu-Eau) dans une cavité carrée ventilée dont une portion de sa base est soumise à un flux de chaleur. Ils ont conclu que l'ajout de nanoparticules conduit à l'augmentation du nombre de Nusselt moyen [35].

2.3.10 Expérience de K. Kalidasan et al :

En 2017, K.Kalidasan et al ont fait une étude numérique d'un nanofluide dans une cavité carrée ventilée ayant un obstacle adiabatique en son centre. ces chercheurs se sont intéressés à l'apport de l'utilisation d'un nanofluide hybride (constitué de nanoparticules de diamant et d'oxyde de cobalt dans de l'eau comme fluide suspendant) sur les performances thermique de la cavité [36].

2.3.11 Expérience de R. Kaseipoor et al :

En 2015, R.Kaseipoor et al ont mené une étude sur la convection mixte au sein d'un nanofluide Cu-eau dans une cavité ventilée de forme " T " soumise à un champ magnétique. Ils ont conclu que le transfert thermique se perfectionne lors de la présence des nanoparticules dans le fluide de base, surtout quand les nombres de Reynolds et Hartmann augmentent [37].

2.3.12 Expérience de M. Benzema et al :

En 2017, M.Benzema et al ont lancé leur propre étude numérique sur le nanofluide hybride Ag-MgO/ eau dans une cavité trapézoïdale ventilée soumise à un champ magnétique externe en utilisant des corrélations empiriques afin de calculer la viscosité dynamique du nanofluide ainsi que sa conductivité thermique. Ils ont fini par trouver que l'application de champ magnétique ralentit l'écoulement ascendant du nanofluide hybride dans la cavité. Par conséquent l'augmentation du nombre de Hartmann impacte fortement les champs hydrodynamiques et thermiques en créant un gradient de température et de vitesse important près de la paroi active. Ainsi que l'accroissement de l'inertie du fluide et l'intensification du champ magnétique améliore les performances thermiques du fluide, tout comme l'ajout des nanoparticules [38].

2.4 Les domaines d'application des nanofluides

Les nanofluides sont essentiellement employés pour optimiser le transfert thermique et l'efficacité énergétique dans plusieurs systèmes thermiques et partout où il existe des flux de chaleur

qui doivent être évacués à l'aide de liquides. Ils sont utilisés pour refroidir les composants des systèmes électroniques, électriques et thermiques tels que les ordinateurs et les moteurs des véhicules, ce qui conduit à une miniaturisation de ces composants. Ils sont aussi utilisés dans les échangeurs de chaleur et dans les systèmes de réfrigération en introduisant des nanoparticules dans les liquides de réfrigération et les huiles de lubrifications afin d'augmenter l'efficacité énergétique et le rendement de ces derniers. Ils sont employés dans les systèmes d'énergie solaires où ils améliorent les performances thermiques ce qui entraîne une réduction de la taille des dispositifs solaires et favorise l'utilisation des énergies renouvelables, qui ont de multiples avantages environnementaux et économiques.

Les nanofluides sont aussi appliqués au niveau industriel pour le refroidissement des machines ce qui engendre de grosses économies d'argent et d'énergie ainsi que d'importantes réductions d'émissions polluantes. Ils sont exploités dans le chauffage des bâtiments (échangeurs de chaleur) pour augmenter le rendement des échangeurs et réduire ainsi la taille, le coût de l'équipement initial et les déchets matériaux à éliminer lorsqu'ils ne seront plus utilisables.

L'application des nanofluides dans le secteur du nucléaire est très importante, vu qu'ils contribuent au refroidissement des réacteurs nucléaires. Ceci se répercute sur l'augmentation considérable de la puissance des réacteurs et l'amélioration de leurs performances économiques. Mais aussi, cela évite de grosses catastrophes en donnant une marge de manœuvre (de temps) plus importante aux ingénieurs pour régler le problème .

Ils peuvent tout aussi bien servir dans le domaine spatial, militaire et aéronautique où on a un fort besoin d'engins refroidissant efficaces mais léger et d'une taille minime à des fins de rapidité et d'efficacité du déplacement .

Les nanofluides sont nouvellement assimilés à la biomédecine. Ils sont utilisés lors d'opérations chirurgicales en refroidissant efficacement les alentours de la région chirurgicale, ou bien dans le traitement des cancers en élevant la température autour des tumeurs afin d'éradiquer les cellules cancéreuses sans pour autant endommager les tissus voisins qui sont sains.

Récemment, des chercheurs ont découvert qu'il était tout à fait possible d'utiliser les nanofluides dans le processus de raffinage du pétrole et dans l'extraction du pétrole brut [40].

2.5 Étude comparative des transferts thermiques dans les nanofluides et les fluides

En 2012, une étude comparative a été dirigée par H.Salhi et al sur la convection naturelle de deux types de nanofluides : Ag-eau (argent/eau) et $TiO_2 - eau$ (dioxyde de titane / eau) avec un fluide de base (eau) dans une cavité carré chauffée en fixant le nombre de Rayleigh (Ra) à 10^4 et le nombre de Prandtl (Pr) à 6.2 . Ce travail a été fait dans le but d'étudier les champs de température , les lignes de courants mais surtout le nombre de Nusselt qui nous informe sur l'intensité du transfert thermique qui s'opère dans le nanofluide et le fluide de base [39].

Ci dessous un tableau qui regroupe les propriétés physiques de l'eau, le dioxyde de titane et l'argent :

Propriétés physiques	Fluide pur eau	Argent	Dioxyde de titane
C_p (J/kg.K)	4179	230	686.2
ρ (kgm^3)	997.1	10500	4250
K (W/m.K)	0.613	418	8.9538
$\beta \times 10^7$ (m^2/s)	21	1.65	0.9

TAB. 2.2 – Propriétés physiques des nanofluides utilisés [39].

on fait varier la fraction volumique ($\phi = 0$ pour le fluide pur eau, $\phi = 0.1$ et $\phi = 0.2$ pour les nanofluides Ag-eau et dioxyde de titane) et obtient ces résultats :

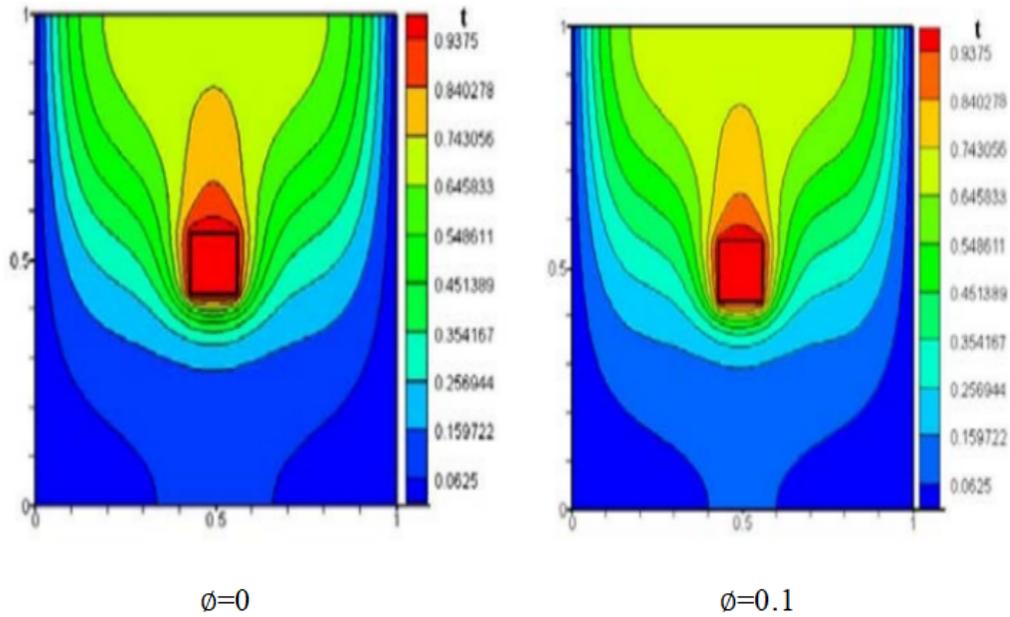
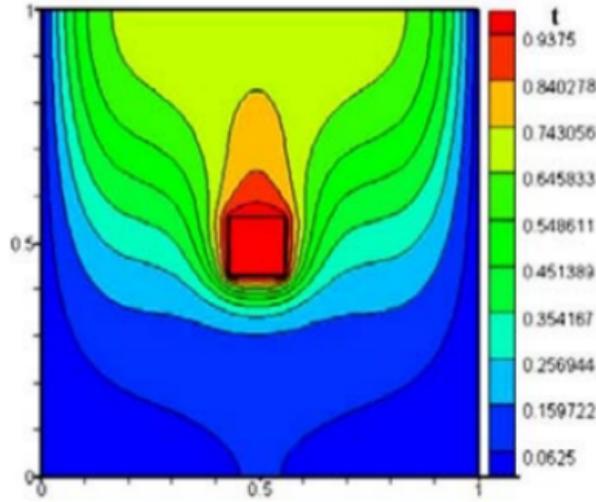
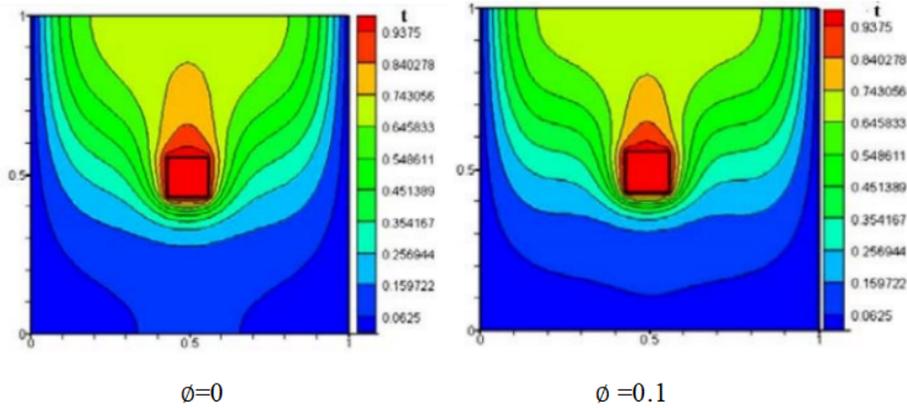


FIG. 2.8 – Champs des températures pour $Ra = 10^4$ du fluide pur eau et du nanofluide Dioxyde de Titane eau ($TiO_2 - eau$) pour $\phi = 0$ et $\phi = 0.1$ [39].



$\phi=0.2$

FIG. 2.9 – Champs des températures pour $Ra = 10^4$ du fluide pur eau et du nanofluide Dioxyde de Titane eau ($TiO_2 - eau$) pour $\phi = 0.2$ [39].

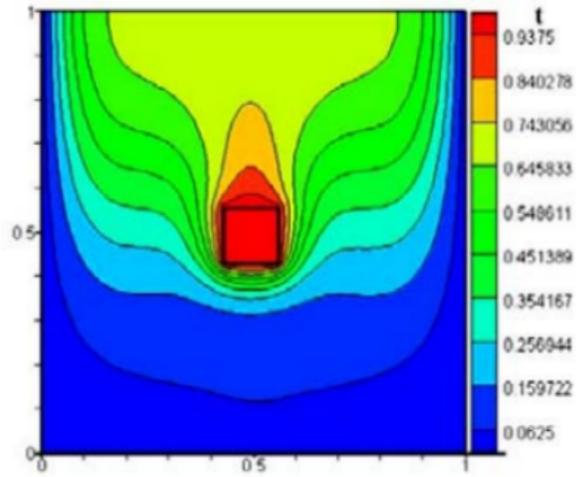


$\phi=0$

$\phi = 0.1$

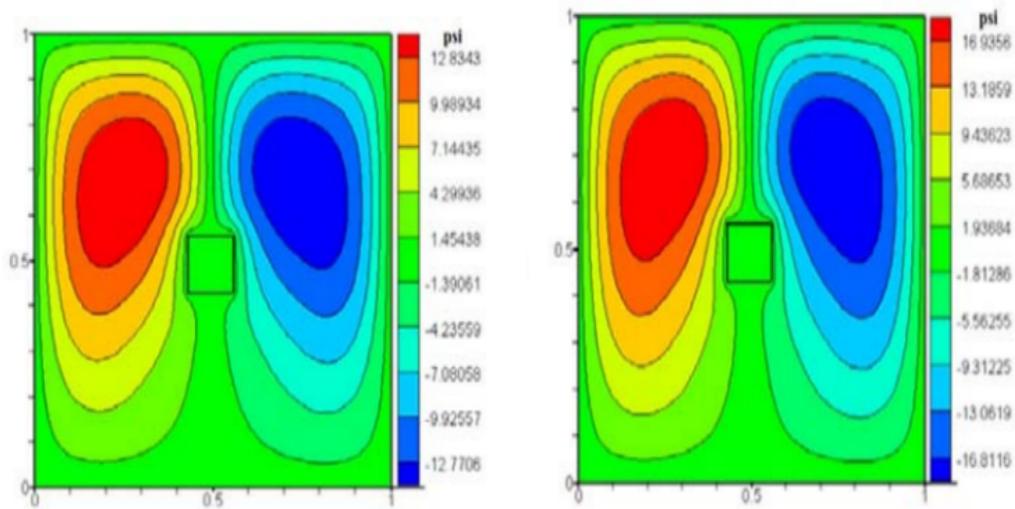
FIG. 2.10 – Champs des températures pour $Ra = 10^4$ du fluide pur eau et du nanofluide Argent-eau pour $\phi = 0$ et $\phi = 0.1$ [39].

Les figures 8, 9,10 et 11 représentent les champs de températures pour $Ra = 10^4$ du fluide pur eau et des nanofluides Dioxyde de Titane-eau ($TiO_2 - eau$) et l'argent eau où on a remarqué qu'au près des parois les isothermes sont plus serrées et courbées mais aussi que la différence des fractions volumiques entre le fluide pur eau et les nanofluides impacte les isothermes en leur donnant une déviation considérable. Par contre lors de la comparaison entre les deux nanofluides on déduit que le transfert thermique est plus important dans le nanofluide argent-eau que dans le Dioxyde de Titane-eau.



$\phi=0.2$

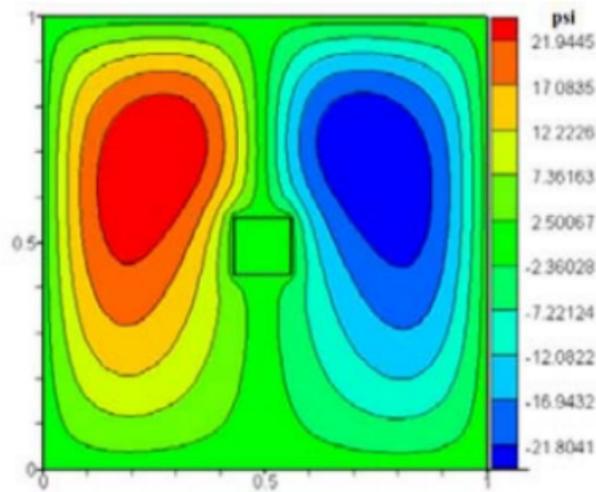
FIG. 2.11 – Champs des températures pour $Ra = 10^4$ du fluide pur eau et du nanofluide Argent-eau pour $\phi = 0.2$ [39].



$\phi=0$

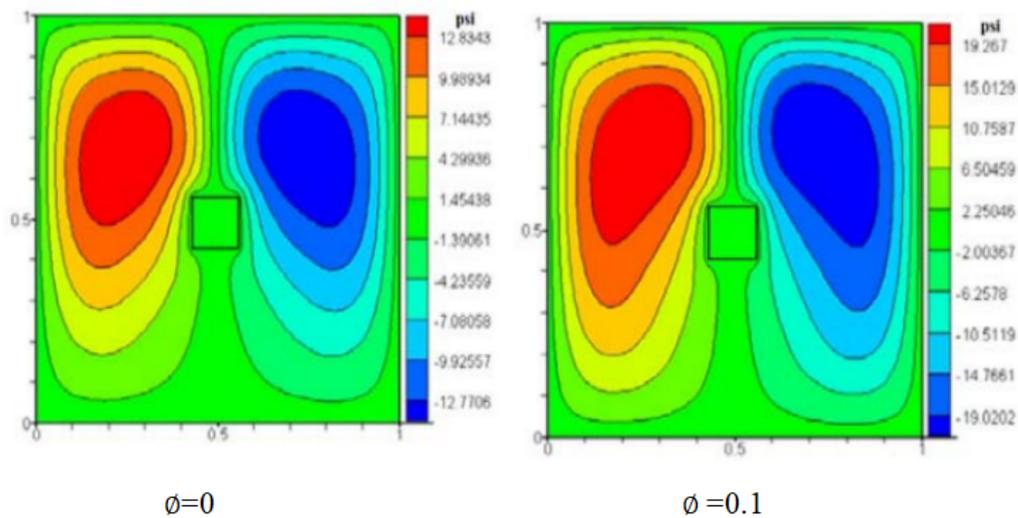
$\phi=0.1$

FIG. 2.12 – les lignes de courants pour $Ra = 10^4$ du fluide pur eau et du nanofluide Dioxyde de Titane eau ($TiO_2 - eau$) pour $\phi = 0$ et $\phi = 0.1$ [39].



$\phi=0.2$

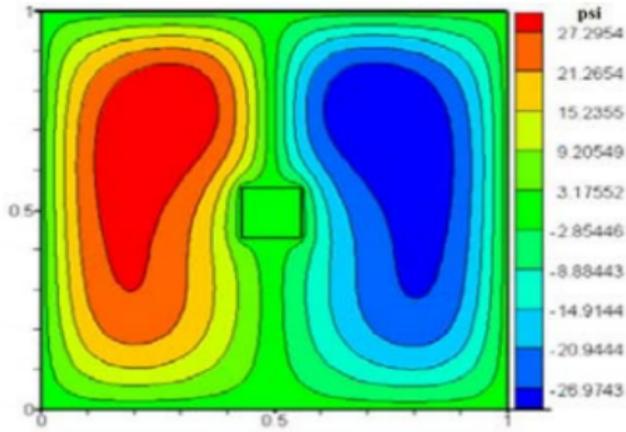
FIG. 2.13 – Lignes de courants pour $Ra = 10^4$ du fluide pur eau et du nanofluide Dioxyde de Titane eau ($TiO_2 - eau$) pour $\phi = 0.2$ [39].



$\phi=0$

$\phi = 0.1$

FIG. 2.14 – Lignes de courants pour $Ra = 10^4$ du fluide pur eau et du nanofluide Argent-eau pour $\phi = 0$ et $\phi = 0.1$ [39].



$\phi=0.2$

FIG. 2.15 – Lignes de courants pour $Ra = 10^4$ du fluide pur eau et du nanofluide Argent-eau pour $\phi = 0.2$ [39].

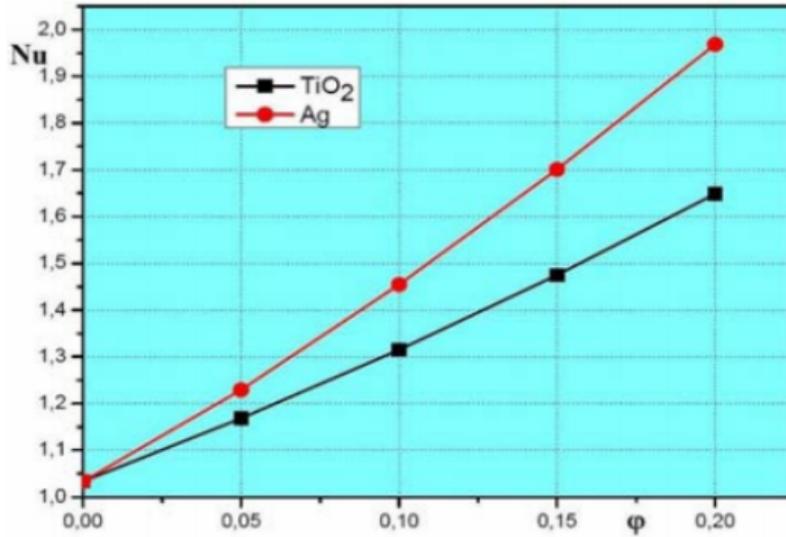


FIG. 2.16 – Variation du nombre de Nusselt en fonction de la fraction volumique des nanofluides TiO_2 -eau et Ag-eau et du fluide pur eau en $Ra = 10^4$ [39].

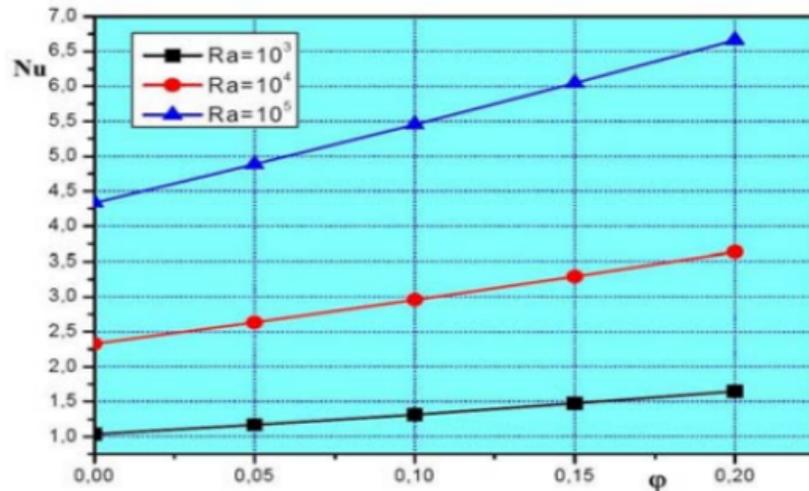


FIG. 2.17 – Variation du nombre de Nusselt en fonction de la fraction volumique du nanofluide TiO_2 -eau et du fluide pur eau en différentes valeurs de Ra [39].

Les figures 12, 13, 14 et 15 représentent les lignes de courant pour $Ra = 10^4$ du fluide pur eau et des nanofluides Argent-eau (Ag-eau) dioxyde de Titane-eau (TiO_2 -eau) où on a observé que les lignes de courant sont influencées par la fraction volumique et c'est grâce aux valeurs de psi (ψ) qui sont les plus élevées qu'on arrive à voir cela (pour le nanofluide dioxyde de Titane à $\phi = 0$ psi = 128343 ; à $\phi = 0.1$ psi = 16 9358 ; à $\phi = 0.2$ psi= 219445).

Les lignes se resserrent près des parois de l'enceinte par contre les valeurs de psi (ψ) sont toujours plus élevées dans le nanofluide Ag par rapport au TiO_2 .

La Figure 16 quant à elle représente la variation du nombre de Nusselt en fonction de la fraction volumique des nanofluides TiO_2 – eau et Ag-eau et du fluide pur eau en $Ra = 10^4$. On remarque que l'argent est plus bon conducteur que TiO_2 car les valeurs du nombre de Nusselt du nanofluide argent-eau sont plus élevées que celles du dioxyde de Titane -eau.

La figure 17 montre ouvertement que l'augmentation de la fraction volumique et le nombre de Rayleigh élève le nombre de Nusselt ce qui veut dire que le transfert thermique est plus important dans le nanofluide TiO_2 que le fluide pur eau.

Donc la fraction volumique du nanofluide et son type sont des facteurs principaux pour l'amélioration du transfert thermique.

2.6 Pourquoi les nanofluides sont utilisés dans les transferts thermiques ?

Les nanofluides sont utilisés en transfert thermique à cause de leurs avantages attrayants mais aussi pour la variété de leurs domaines d'applications ainsi qu'à l'embarras du choix qu'ils nous proposent quant à leurs types, leurs formes, leurs compositions chimiques, leurs tailles et leurs prometteuses et larges propriétés physico-chimiques. Ils améliorent le transfert thermique grâce à l'existence d'une grande surface de transfert de chaleur entre le fluide de base et les nanoparticules. Ils ont des propriétés ajustables comme la conductivité thermique et la mouillabilité en faisant varier la fraction volumique (la concentration) des nanoparticules dans le fluide à notre guise en fonction du rôle qu'on veut leur donner. Ils peuvent être utilisés comme des matériaux intelligents qui fonctionnent comme une soupape de chaleur afin de contrôler le flux de chaleur en ajustant la concentration des nanoparticules [24].

Les nanoparticules présentes dans les nanofluides ont une haute dispersion et stabilité qui permettent de minimiser leurs sédimentations à l'aide du mouvement brownien des particules (mouvement aléatoire et dispersé) qui évite aussi la formation d'agglomérats [24].

Ils ont une puissance de pompage réduite par rapport au liquide de base pur afin d'obtenir une intensification du transfert de chaleur ainsi qu'un colmatage réduit par rapport aux boues conventionnelles ce qui favorise la miniaturisation du système [24].

Les récentes recherches sur les nanofluides et l'électronique poussent à croire qu'ils peuvent être utilisés même pour réduire le besoin de base en carburant conventionnel, en énergie électrique ou en gaz et à faire des économies d'argent , d'énergie et de limiter les dégâts environnementaux [24].

2.7 Conclusion

Dans cette deuxième partie, nous avons défini les nanofluides comme étant des fluides caloporteurs dotés d'une importante conductivité thermique, et nous avons cité leurs propriétés thermophysiques.

Puis, nous avons donné certains avantages qui nous poussent à préférer les nanofluides aux fluides de base conventionnels.

Ensuite, nous avons nommé quelques études faites par des chercheurs sur les nanofluides en thermique et nous avons comparé le transfert de chaleur entre un fluide de base pur et un nanofluide.

Enfin, nous avons terminé par préciser les cadres d'applications des nanofluides .

Conclusion générale

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous sommes intéressées à l'étude bibliographique des phénomènes thermiques dans les nanofluides.

Les nanofluides ont été introduits pour résoudre certains problèmes en transfert thermique qui apparaissent dans des installations industrielles et dans divers autres domaines.

Ce mémoire est reparti en 3 parties, la première est l'introduction générale où nous avons donné un avant-gout de ce qui allait suivre dans les chapitres 1 et 2 et où nous avons répertorié les différentes études numériques et expérimentales qui ont été faites au sujet des nanofluides de manière chronologique.

La deuxième, qui est le chapitre 1, où nous nous sommes concentrés sur le phénomène de la thermique et où nous avons d'abord présenté des définitions de nombreuses notions de bases essentielles qu'il faut absolument intégrer avant de plonger dans le vif du sujet et d'en parler en détails tout en les illustrant. Ensuite nous avons listé les différents modes de transferts de chaleur qui s'opèrent dans la nature tout en donnant des exemples. A la fin nous avons dénombré plusieurs domaines d'applications des transferts thermiques.

La troisième, qui est le chapitre 2, où nous avons premièrement octroyé les définitions de divers concepts tels que les nanofluides, les fluides de bases et les fluides hybrides. Deuxièmement, nous avons sondé les propriétés des nanofluides et nous avons accompagné cela en énumérant leurs domaines d'applications. Troisièmement nous avons catalogué les études expérimentales et numériques qui ont été menées à ce sujet et nous avons mis en avant une étude comparative entre un fluide de base et un nanofluide. Nous avons fini par exhiber les raisons pour lesquelles ils sont utilisés.

Au final, nous avons constaté que, comparés à la thermique dans les fluides de bases, les transferts dans les nanofluides se font plus rapidement, aisément et efficacement lorsque la frac-

tion volumique et le nombre de Rayleigh sont élevés, mais aussi que le type des nanoparticules utilisées dans les fluides de bases impactent fortement le transfert thermique car certains ont une meilleure conductivité thermique que d'autres. Les cavités de petites tailles offrent une meilleure performance thermique et le transfert de chaleur diminue lorsque les nombres de Richardson et de Hartmann sont faibles. De plus, les propriétés thermophysiques des nanofluides influencent ardemment le transfert thermique.

Nous espérons poursuivre nos études dans ce domaine de la thermique qui est très passionnant et très en vogue ces dernières années et prometteur pour l'avenir.

Bibliographie

- [1] Khaldi Souheyla, Généralités sur les transferts de chaleur, 2019.
- [2] Dr Lyes Bordja, Polycopié de Cours Transfert Thermique, université L'ARBI BEN M'HIDI, Oum el Bouaghi, 2013-2014.
- [3] Jean-Martial Cohard, Thermique Notions fondamentales, Université de Grenoble.
- [4] Abderrahmane DJAFER, Notions des Phénomènes de Transfert, Introduction aux phénomènes de transfert, Université Moustapha ben Boulaid Batna2, 2018/2019.
- [5] Boualam Ouazine, révisé par Nicolas Gagnon, Cahier de l'adulte, Commission scolaire de Montréal, V1. 2018.
- [6] Dr Tayeb Ouksel, Cours Transfert Thermique, Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi, 2016-2017.
- [7] Yves JANNOT, Transferts thermiques, Ecole des Mines Nancy, 2ème année, 2012.
- [8] S. Bensaada et M.T. Bouziane, Transfert de chaleur.
- [9] Jean-Luc Battaglia, introduction aux transferts thermiques, Paris 2010.
- [10] Philippe Marty, COURS DE TRANSFERTS THERMIQUES Conduction et rayonnement, 2012-2013.
- [11] chouireb hossam eddine, Simulation numérique de la convection mixte dans un dissipateur de chaleur radial (pour application des diodes électroluminescente, LED), Thèse de Master, Université de M'sila 2017 / 2018.
- [12] Chaïb Lilia et al, Modélisation et simulation du transport de nanoparticules dans un écoulement de fluide dans une conduite, Thèse de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2014 / 2015.
- [13] LAMRI Zeggar Asma, Contribution à l'Etude Théorique des Transferts Thermiques Convectifs dans un Nanofluide. Application aux Modèles Monophasique et Diphasique, Thèse de Magister, Université de Frères Mentouri, 2014.
- [14] J.C. Maxwell. A Treatise on electricity and magnetism, Clarendon Press, U.K., (1891).

- [15] R.L. Hamilton and O.K. Crosser. Thermal conductivity of heterogeneous two component systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals* 1(3), pp.187-191, (1962).
- [16] D.A.G. Bruggeman. *Ann. Physics (Leipzig)*, Vol.24, N° 636, 1935.
- [17] B.C. Pak and Y.I. Choi. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11(2), pp.151–170, (1998).
- [18] A. Einstein. *Investigations on the Theory of the Brownian movement*. Dover Publications, New York, (1956).
- [19] H.C. Brinkman. The viscosity of concentrated suspensions and solution. *J. Chem. Phys.*, 20, pp.571–581, (1952).
- [20] G. K. Batchelor, Brownian diffusion of particles with hydrodynamic interaction, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.74, N°1, pp. 1 - 29, 1976.
- [21] B.C. Pak and Y.I. Choi. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11(2), pp.151–170, (1998).
- [22] Boutal Walid et al, "Etude de transfert de chaleur de nanofluide dans une cavité carrée sous champ magnétique", Thèse de Master, Université de Akli Mohand Oulhadj (Bouira),2020.
- [23] Maouassi Ammar, intensification des échanges de chaleur par l'utilisation des nanofluides, Thèse de Master, Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2012.
- [24] Deepak Kumar Bairwa et al , "Nanofluids and its Applications",*International Journal of Engineering, Management and Sciences (IJEMS)* ISSN-2348 –3733, Volume-2, Issue-1, January 2015.
- [25] E.H. Ridouane, A. Campo, Relationship between thermal convection intensity and aspect ratio of two triangular cavities inscribed in horizontal rectangular cavities, *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow* 16 (2006) 338–355.
- [26] S.M. Aminossadati, B. Ghasemi, Enhanced natural convection in an isosceles triangular enclosure filled with a nanofluid, *Computers and Mathematics with Applications* 61 (2011) 1739–1753.
- [27] A.H. Mahmoudi, I. Pop, M. Shahi, Effect of magnetic field on natural convection in a triangular enclosure filled with nanofluid, *International Journal of Thermal Sciences* 59 (2012) 126–140 .
- [28] M.M. Rahman, M.M. Billah, A.T.M.M. Rahman, M.A. Kalam, A. Ahsan, Numerical investigation of heat transfer enhancement of nanofluids in an inclined lid-driven triangular enclosure, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 38 (2011) 1360–1367.

- [29] B. Ghasemi, S.M. Aminossadati, Mixed convection in a lid-driven triangular enclosure filled with nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 37 (2010) 1142–11 .
- [30] S.M. Aminossadati, Hydromagnetic natural cooling of a triangular heat source in a triangular cavity with water-CuO nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 43 (2013) 22–29 .
- [31] E. Abu-nada, Z. Masoud, H.F. Oztop, A. Campo, *International Journal of Thermal Sciences* Effect of nanofluid variable properties on natural convection in enclosures, *International Journal of Thermal Sciences* 49 (2010) 479–491.
- [32] S.-E. Ouyahia, Y.K. Benkahla, N. Labsi, Numerical Study of the Hydrodynamic and Thermal Properties of Titanium Dioxide Nanofluids Trapped in a Triangular Geometry, *Arabian Journal for Science and Engineering* 41 (2016) 1995–2009) 1965–1972 .
- [33] G. Polidori, S. Fohanno, C.T. Nguyen, A note on heat transfer modelling of Newtonian nanofluids in laminar free convection, *International Journal of Thermal Sciences* 46 (2007) 739–744 .
- [34] E. Sourtiji, M. Gorji-Bandpy, D.D. Ganji, S.F. Hosseinizadeh Numerical analysis of mixed convection heat transfer of Al₂O₃-water nanofluid in a ventilated cavity considering different positions of the outlet port, *Powder Technology*, 262 (2014) 71-81 .
- [35] M.Shahi, A. Houshang Mahmoudi, F. Talebi, Numerical study of mixed convective cooling in a square cavity ventilated and partially heated from the below utilizing nanofluid, *Int. com. In heat and mass tranf*, 37 (2010) 201-213 .
- [36] K. Kalidasan , P. Rajesh Kanna, Natural convection on an open square cavity containing diagonally placed heaters and adiabatic square block and filled with hybrid nanofluid of nanodiamond-cobalt oxide/water, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 81 (2017) 64–71 .
- [37] A. Kasaeipoor, B. Ghasemi, S.M. Aminossadati, Convection of Cu-water nanofluid in a vented T shaped cavity in the presence of magnetic field, *Int. J. of Thermal Sciences*, 94, (2015), 50-60 .
- [38] M.Benzema et al, Étude 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, 23^{ème} CFM, Lille, 28 .08 au 1.09. 2017.
- [39] H.Salhi et al , Convection naturelle dans les enceintes : nanofluide , Université El-Hadj Lakhdar, 1 Rue Mohamed El-Hadi Boukhlof, Batna, Algérie, revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°1 (2012) 121 – 130.
- [40] M. ZOHUD Mohammed Kamel Abdelatif, Amélioration des Caractéristiques Thermiques des Réfrigérants par l'Addition de Nanoparticules, thèse de doctorat 3^{ème} Cycle LMD, Université des Sciences et de la Technologie Mohamed BOUDIAF d'Oran.

Annexe

[41] <https://sa.ge.sts.free.fr/Wiki/pmwiki.php?n=SA.ThermConvection&fbclid=IwAR01zYNajCTSRUTLg0i76EnqPVzQUD1yOMBjMhrDGd6LwMIkH4d0fTIDEXg>

[42] https://thermal-engineering.org/wp-content/uploads/2019/05/Pool-Boiling-Boiling-Modes.png?fbclid=IwAR0x5F1F-eem2nYLuJx8PuhVHNpPJ44BQ_mWHOH6e32H9_t9-NCe0IAUWG0&h=AT1su9_8OOWk80_yATioVmZCmcxnTdbxf39In8AUyiaZXk75XOQ_b-wRfi0t1IPmfqkEVDDD-1uzA4xoc3DkJtdwtqW7rePusTc6wsUuqiRl6z5qrRXtYi3Z-X1riyAasaSFDw

[43] https://www.researchgate.net/figure/Les-differents-domaines-du-spectre-electromagnetique_fig1_30514255?fbclid=IwAR3AiLs_Zk1t2A9O4ywDNyKXyecfRIHqn-TCwoNv6ppPo6D6gC9MHt_pQpA

[44] <https://www.alloprof.qc.ca/fr/elevs/bv/sciences/le-spectre-electromagnetique-s1137?fbclid=IwAR0A-KJcw4ViyiysLjpyy2nU5GU5jScY9or4Tf-xS7Ct9SIA29ZSFKyEgJA>

[45] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_du_corps_noir?fbclid=IwAR3CewRP6C4JIMkQpzkrbOz6H_n3GK3299_y2T7GF5QJYQ_qdbCsusnNvXc

Résumé

Etude bibliographique des transferts thermiques dans les nanofluides

Dans le cadre de notre travail, nous avons entrepris une étude bibliographique des transferts thermiques dans les nanofluides.

Nous avons commencé par définir quelques notions de base en relation avec le transfert thermique, ensuite nous avons exposé les différents modes de transfert thermique ainsi que les lois qui permettent de calculer les flux thermiques transférés d'un corps à un autre.

Puis, nous avons cité les différents domaines d'utilisations des transferts thermiques.

Par la suite, nous avons donné la définition des nanofluides, des nanoparticules, d'un fluide de base et d'un fluide hybride, après ceci nous avons cité les types de fluides de base et de nanoparticules que nous pouvons rencontrer.

De plus, nous avons exposé les propriétés des nanofluides et nous avons listé les raisons pour lesquelles les nanofluides sont utilisés en thermique.

De même, nous avons énuméré quelques études expérimentales et numériques menées sur les transferts thermiques dans les nanofluides puis nous avons mis en avant une étude comparative des transferts de chaleur entre un fluide de base pur et un nanofluide .

Au final, nous avons cité les différents domaines d'applications des nanofluides.

Abstract

Bibliographic study of heat transfers in nanofluids

In our work, we undertook a bibliographic study of heat transfer in nanofluids.

We started by defining some basic notions in relation to heat transfer, then we exposed the different modes of heat transfer as well as the laws which make it possible to calculate the thermal fluxes transferred from one body to another.

Then, we mentioned the different fields of use of thermal transfers.

Subsequently, we gave the definition of nanofluids, nanoparticles, a basic fluid and a hybrid fluid, after this we cited the types of basic fluids and nanoparticles that we can meet.

In addition, we exposed the properties of nanofluids and we listed the reasons why nanofluids are used in thermal.

Similarly, we have listed some experimental and numerical studies carried out on heat transfers in nanofluids and then we have highlighted a comparative study of heat transfers between a pure base fluid and a nanofluid.

Finally, we mentioned the different fields of application of nanofluids.

دراسة بيبيولوجرافية لانتقال الحرارة في السوائل النواوية .

في اطار عملنا، أجرينا دراسة بيبيولوجرافية لانتقال الحرارة في السوائل النواوية .
بدانا بتحديد بعض المفاهيم التي تتعلق بنقل الحرارة ، ثم كشفنا عن الاوضاع المختلفة لنقل الحرارة و كذلك
القوانين التي من الممكن استعمالها في حساب التدفقات الحرارية المنقولة من جسم الى اخر .
ثم ذكرنا المجالات المختلفة لاستخدام التحويلات الحرارية .

بعد ذلك ،قدمنا تعريف للموائع النواوية و الجسيمات النواوية و السائل الاساسي و السائل الهجين ،
و بعد ذلك، ذكرنا انواع السوائل الاساسية و الجسيمات النواوية التي يمكن ان ناتقي بها .

بالاضافة الى ذلك، كشفنا عن خصائص السوائل النواوية و ادرجنا اسباب استخدام السوائل النواوية في التنقل
الحراري .

و بالمثل، قمنا بادراج بعض الدراسات التجريبية و الرقمية التي اجريت على عمليات نقل الحرارة في السوائل
النواوية ،ثم قمنا بتسليط الضوء على دراسة مقارنة لنقل الحرارة بين مائع اساسي نقي و مائع نووي .

اخيرا، ذكرنا المجالات المختلفة لتطبيق الموائع النواوية .