

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENTS SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DEM'SILA



Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme Licence

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

THEME

**Recherche Bibliographique sur les transferts de
chaleur de l'écoulement des nanofluides dans
les espaces confinés**

Proposé et dirigé par :

Benkherbache S

Présenté par :

ZIANE Belkacem

CHAOUKI Said

Année Universitaire 2019 /2020

Dédicaces

A la mémoire de ma grand-mère,

A mes parents,

A mes frères et sœurs.

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu Le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces longues années d'étude.

Nos sincères remerciements à tous les enseignants du département de Génie Mécanique de M'sila, notamment à notre encadreur Mme Benkherbache S, qui a assurée la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce mémoire.

Nous tenons notamment, à adresser nos sincères reconnaissances aux membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Enfin, nos remerciements vont à tous ceux qui nous ont soutenus de près ou de loin à réussir ce travail.

Vives salutations

Table des matières

<u>Table des matières</u>	I
<u>Liste des Figures</u>	II
<u>Liste des Tableaux</u>	III
<u>Introduction générale</u>	1
<u>Chapitre I. Généralités sur les transferts de chaleurs et nanofluides ...</u> Erreur ! Signet non défini.	
<u>I. Les modes de transfert de chaleur</u>	5
<u>I.1 La conduction</u>	5
<u>I.2 La convection</u>	5
<u>I.2.1 Convection naturelle</u>	6
<u>I.2.2 Convection forcée</u>	6
<u>I.2.3 Convection mixte</u>	6
<u>I.3 Rayonnement</u>	6
<u>Chapitre II. Les nanofluides</u>	7
<u>II. Les nanofluides</u>	8
<u>II.1 Définition des nanofluides</u>	8
<u>II.2 Les différents types de nanofluides</u>	8
<u>II.3 Les méthodes d'élaboration des nanofluides</u>	10
<u>II.4 Les avantages et les inconvénients</u>	11
<u>II.5 Domaine d'utilisation des nanofluides</u>	12
<u>II.6 Les propriétés physiques des nanofluides et modèles</u>	12
<u>Chapitre III. Transfert de chaleur dans une enceinte fermée et remplie de nanofluide</u> 18	
<u>I.1 Synthèse bibliographique</u>	19
<u>I.2 Conclusion</u>	30
<u>Références bibliographiques</u>	31

Liste des Figures

Figure 1 – Nanofluides vue au microscope électronique.	08
Figure 2 – Procédé de synthèse de nanofluide en une seule étape	11
Figure 3 – Valeur de $\frac{(C_p)_{nf}}{(C_p)_f}$ en fonction de ϕ pour le nanofluide (Al ₂ O ₃ +eau)	16
Figure 4 – Valeur de $\frac{(C_p)_{nf}}{(C_p)_f}$ en fonction de ϕ pour le nanofluide (CuO+eau).....	16
Figure 5 – Schéma du modèle physique (Khanafar et al).	20
Figure 6 – Croquis de la géométrie du problème et coordonnées(Oztop et Abu-Nada,2008).....	20
Figure 7 – Schéma du modèle physique Aminossadati et Ghasemi(2009).....	21
Figure 8 – Schéma pour le modèle physique (Alinia et al., 2011).....	22
Figure 9 – Domaine géométrique (Allouiet al., 2011)..	23
Figure 10 – Une vue schématique de la cavité carrée et des conditions aux limites considérées.	23
Figure 11 – Cavité à double-couvercle entraînée Chamkha et Abu-Nada(2012).....	24
Figure 12 – Configuration de l'échangeur de chaleur à micro canaux Chein et Huang(2005)..	25
Figure 13 – Schéma d'un dissipateur de chaleur à micro canaux.	26
Figure 14 – Schéma d'échangeur de chaleur à microcanaux (Tsai et Chein, 2007).....	26
Figure 15 – Géométrie du problème et conditions aux limites(Santra et al.,2009).....	27
Figure 16 – Schéma de (a) échangeur de chaleur à microcanaux.....	27
Figure 17 – Un diagramme schématique du modèle physique (Pishkar et Ghasemi,2012).	28
Figure 18 – Schéma du modèle d'échangeur de chaleur à microcanaux (Halelfadl et al., 2014).....	28

Introduction Générale

Introduction Générale

Les transferts de chaleur constituent la base de nombreux processus industriels qui sont présents dans notre vie quotidienne. L'intensification de ces échanges et l'amélioration du rendement sont devenues aujourd'hui une problématique majeure dans le monde industriel, des organismes de réglementation, mais aussi de la société dans son ensemble, qui prend conscience de l'épuisement progressif des ressources énergétiques et qui se soucie de l'avenir en matière énergétique.

Face à ces enjeux énergétiques et environnementaux, le défi technologique réside dans le développement de nouveaux processus pour une meilleure gestion de l'énergie.

Il existe une réelle demande dans le monde industriel pour développer de nouvelles stratégies permettant d'améliorer le comportement thermique des fluides utilisés dans les systèmes de refroidissement. Des progrès importants en chimie ont permis dès la fin des années 90 de synthétiser des particules de taille nanométrique, qui sont dispersées dans le liquide porteur. Leurs synthèses répondent au besoin d'améliorer les propriétés thermiques en y insérant une phase solide de conductivité thermique très élevée. Choi et al. [1] furent les premiers à introduire le concept de nanofluide en 1995 au laboratoire National d'Argonne de l'université de Chicago. Même si le concept de nanofluide est en apparence simple, il apparaît au fond d'une grande complexité en raison des mécanismes physiques mis en jeu. De nombreuses recherches ont été menées sur cette nouvelle génération de fluides afin d'apporter une meilleure compréhension de ces mécanismes, et mettre ainsi au point des liquides caloporteurs plus performants.

Les applications potentielles des nanofluides sont multiples et très importantes dans plusieurs domaines (refroidissement électrique, climatisation et froid, aéronautique et spatial...), et pourraient constituer sous certaines conditions un débouché prometteur des nanosciences dans le domaine de l'énergie.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres répartis comme suit :

Dans le premier chapitre nous avons présenté des notions générales sur les transferts de chaleur.

Le deuxième chapitre englobe un aperçu sur les nanofluides, les différents types et les méthodes d'élaboration des nanofluides ; leurs avantages et inconvénients ainsi que leur différents domaines d'utilisation

Introduction générale

Le troisième chapitre est consacré à la recherche bibliographique sur les différents travaux ultérieurs traitant les écoulements avec transfert de chaleur des nanofluides dans les espaces confinés.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale

Chapitre I

Généralités sur les transferts de chaleur

I. Les modes de transferts de chaleur

Lorsque deux systèmes à sont des températures différentes, le système le plus chaud cède de la chaleur au plus froid. Il y a ´échange thermique ou encore transfert thermique entre ces deux systèmes. Cette situation se rencontre dans de nombreuses situations industrielles ou domestiques

Un transfert d'énergie donne lieu à un flux de chaleur qui correspond à un déplacement de l'énergie du plus chaud vers le plus froid.

Il existe trois modes essentiels de transferts de chaleur : la conduction, le rayonnement et la convection. Cette dernière est la plus utilisé dans les domaines industriels bien tels que le refroidissement des processeurs et des composantes électroniques, les radiateurs et les échangeurs de chaleur.

I.1 La conduction

La conduction est un mode transfert de chaleur dans lequel les échanges d'énergies ont lieu dans les solides et les fluides sans déplacement de matière. Dès qu'il y a un mouvement macroscopique au sein d'un fluide on parle de convection. Le transfert se fait dès qu'il existe un gradient de température au sein du système matériel, depuis les régions chaudes vers les régions plus froides. Dans le cas d'un solide on a deux contributions car l'énergie est transportée par les quanta de vibration du réseau appelés phonons par les électrons libres dans le cas d'un matériau conducteur de l'électricité. Dans le cas des fluides. L'énergie est transportée essentiellement par translation des atomes ou molécules conduisant à des collisions.

Les deux grandeurs d'internet pour thermicien sont le champ de température dans le système matériel $T(r,t)$, et le flux chaleur ϕ que l'on évalue à partir du gradient de température .

I.2 La convection

Un d´débit ou une circulation de liquide ou de gaz peut transporter avec lui une certaine quantité d'énergie thermique. Ce transport de chaleur porte le nom de CONVECTION thermique

La convection caractérise la propagation de chaleur dans un fluide, gaz ou liquide dont les molécules sont en mouvement. On distingue deux types de convection par la suite.

I.2.1. La convection naturelle

En convection naturelle, les mouvements du fluide sont provoqués par des gradients de densité due au non uniformité du champ de température. Les couches chaudes, donc de poids spécifique plus faible, sont soumises à des forces dirigées vers le haut, suivant un mécanisme analogue à celui de la poussée d'Archimède. Dans les régions a température élevée, le fluide prend donc un mouvement ascendant.

Le phénomène inverse de courants descendants se produit pour les parties du fluide dont la température est inférieure à celle du fluide chaud. Les courants de convection naturelle sont alors dus à des différences de poids spécifique et par conséquent le phénomène se produit en raison de l'existence du champ de pesanteur terrestre.

L'intervention du poids a pour effet de donner à la verticale un rôle privilégié. La définition de la géométrie d'un système convectif doit donc faire intervenir la forme et les dimensions ainsi que la disposition par rapport à la verticale.

I.2.2. La convection forcée

La convection forcée dans laquelle l'écoulement du fluide est forcé par un dispositif mécanique quelconque (pompe pour un liquide, ventilateur pour de l'air) ;c'est donc un gradient de pression extérieur qui provoque les déplacements des particules du fluide.

I.2.3. La convection mixte

Ce mode de transfert, très fréquent, est un régime où les phénomènes de convection libre coexistent avec ceux de la convection forcée. Ce problème de convection mixte est généralement tridimensionnel ; dans certain cas d'hypothèse ;il peut se restreindre au cas bidimensionnel.

La convection mixte dépend essentiellement du nombre de Grashof ,du nombre de Reynolds et celui de Prandtl.

I.3. Le rayonnement

La plupart des corps matériels solides, liquides ou gazeux, portés à une température supérieure à 0 K émettent un rayonnement électromagnétique. Lorsque ce dernier est absorbé, il est transformé en énergie thermique. Tout corps qui émet ce type de rayonnement est capable d'absorber un rayonnement de même nature. Ainsi il apparaîtra entre deux corps capables d'émettre ce type de rayonnement un échange de chaleur dit par rayonnement. Ce type d'échange existe même lorsque les deux corps sont à la même température.

Chapitre II

Les Nanofluides

Les Nanofluides

II.1 Définition des nanofluides

Les nanofluides sont des solutions colloïdales constituées de particules de taille nanométrique en suspension dans un liquide porteur. Ce type de solution suscite un grand intérêt depuis la découverte de leur propriété thermique particulière. En effet, les fluides de base souvent utilisés dans les applications de refroidissement ou de chauffage ont des conductivités thermiques très faibles qui limitent leurs capacités de transfert de chaleur

L'idée est d'insérer aux seins des liquides de bases des nanoparticules de conductivité très élevée, afin d'augmenter la conductivité thermique effective du mélange et ainsi améliorer ces performances thermiques.

Les liquides de bases généralement utilisés dans la préparation des nanofluides sont ceux d'usage commun dans les applications de transfert de chaleurs tels que l'eau, l'éthylène glycol, l'huile de moteur, etc.... ; les nanoparticules peuvent être à base de métaux, d'oxydes, de carbures, de nitrures ou de carbone.

II. Les différents types de nanofluides

Les nano fluides sont des dispersions de particules de taille nanométrique (dont le diamètre est typiquement inférieur à 100 nm), appelées nanoparticules, dans un fluide de base afin d'en améliorer certaines propriétés. Les nanoparticules se situent entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique, dans le cas des fluides caloporteurs, un des premiers paramètres à prendre en compte afin d'évaluer le potentiel d'échange de chaleur est la conductivité thermique.

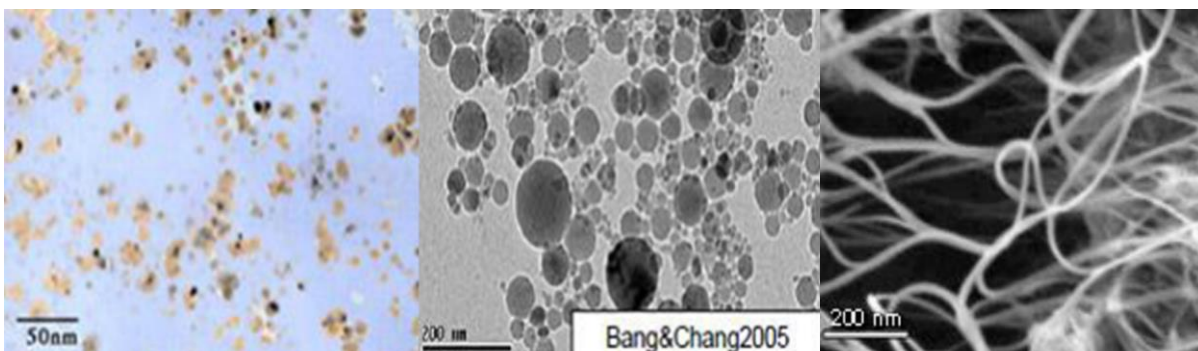


Figure 1 : Nanofluides vue au microscope électronique : éthylène glycol + cuivre 0.5% ; eau + alumine ; eau +nanotube

Les nanoparticules les plus utilisées pour obtenir des nanofluides sont:

- Les nanoparticules des oxydes métalliques :

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

- Les nanoparticules métalliques :

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

- Les nanoparticules non métalliques :

1. Les nanotubes de carbone (CNT).
2. Les liquides de base les plus utilisés sont :
 1. L'eau.
 2. L'éthylène glycol (EG)
 3. les huiles.

Les caractéristiques thermiques de ces nanoparticules et les fluides de base sont présentés dans le tableau suivant :

	Nanoparticules Et fluide d base	K (W/m K)	ρ (Kg/m ³)	C_p (J/Kg K)	μ (Pa.s)
Métallique	Cu	400	8933	383	
	Fe	80.2	7870	447	
	Ni	90.7	8900	444	
	Au	317	19.30	129	
	Ag	429	10.50	235	
Oxyde métallique	SiO ₂	1.38	2220	745	
	TiO ₂	8.95	4250	686.2	
	Al ₂ O ₃	36	3970	765	
	CuO	69	6350	535	
Fluides de base	L'eau	0.613	997.1	4179	8.513×10 ⁻⁵
	Éthylène-glycol	0.258	1132	2349	0.0157

Tableau I Propriétés thermo-physiques de différents matériaux

III. Les méthodes d'élaboration des nanofluides

Il existe deux méthodes principales pour produire des nanofluides :

a) La méthode en deux étapes

Consiste à produire dans un premier temps les nanoparticules, puis à les disperser dans le fluide de base. Pour permettre une bonne dispersion, une forte action mécanique à l'aide d'un agitateur rotatif ou d'ultrasons est souvent nécessaire afin de briser les agglomérats.

En outre, pour éviter l'agglomération due aux forces d'attraction entre les particules, on utilise des forces de répulsion électrostatique en chargeant la surface des particules en adaptant le pH.

On peut également utiliser les forces de répulsion stériques à l'aide de molécules adsorbées ou greffées sur la surface.

b) La méthode en une seule étape

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

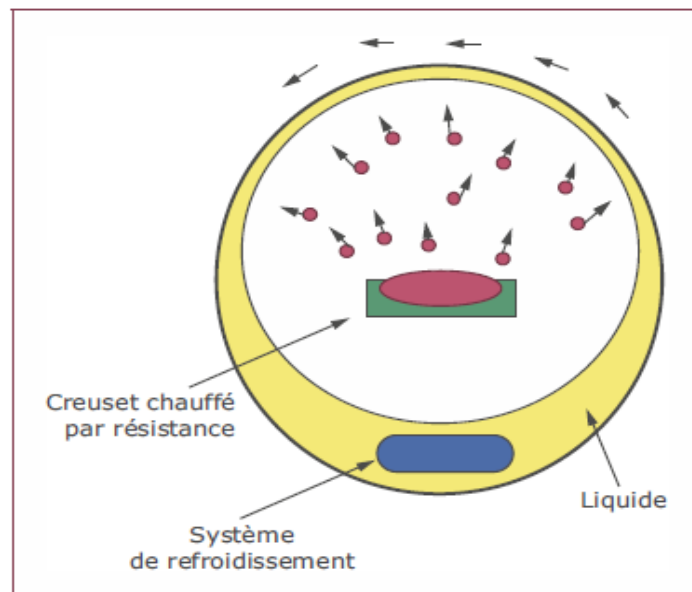


Figure 2 – Procédé de synthèse de nanofluide en une seule étape (Argonne National Laboratory, USA)

IV. Les avantages et les inconvénients des nanofluides

V.1. Les avantages

- Une grande surface de transfert de chaleur entre les particules et les fluides.
- Propriétés ajustables, dont la conductivité thermique et la mouillabilité de la surface, en faisant varier les concentrations de particules en fonction de différentes applications.

- Augmentation de la conductivité thermique des fluides porteurs.

V.2 .Les inconvénients des nanofluides

- Erosion des surfaces.
- Sédimentation et bouchons dans les conduites.

- Le coût élevé des nanofluides.
- Difficultés dans le processus de production.
- Toxique

V. Les domaines d'utilisation des nanofluides

Les nanofluides peuvent être utilisés pour améliorer le transfert de chaleur et l'efficacité énergétique dans plusieurs systèmes thermiques. Dans cette section, quelques exemples d'applications seront présentés tel que le transport, la micro-électronique, la défense, le nucléaire, l'espace, et la biomédicale.

- L'échangeur de chaleur.
- Le refroidissement d'éléments électroniques (produire un nanofluide stable qui est compatible avec des circuits et des composants électroniques).
- Nanoparticules pour l'efficacité des réfrigérateurs (formulations de lubrifiants et liquides de refroidissement mélangés avec des nanoparticules pourraient entraîner une augmentation de l'efficacité énergétique des réfrigérateurs)
- Refroidissement des systèmes nucléaires.
- Dans le moteur des véhicules. L'addition des nanoparticules dans le mélange d'éthylène-glycol et l'eau permet d'améliorer le taux de refroidissement.
- Autres applications (caloducs, piles à combustible, le chauffage solaire d'eau, forage, stockage thermique).

VI. Les propriétés physiques des nanofluides

Les propriétés physiques du nanofluide dépendent essentiellement du fluide de base (liquide) et de la phase dispersée (nanoparticules) sous une forme solide, donc leur définition nécessite un retour aux propriétés de chacun de ses composants (fluide de base et nanoparticule).

VII.1. La fraction volumique(ϕ) :

La fraction volumique est la propriété la plus importante pour le nanofluide, puisque les calculs de tous les autres propriétés se basent sur la fraction volumique du nanofluide. Et on peut définir la fraction volumique comme le volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules+fluide de base). La valeur de la fraction volumique est

varie entre 0 (fluide de base pure) et 1. La fraction volumique est donnée par la relation

$$\text{suivante : } \phi = \frac{V_s}{V_T}$$

V_s : volume de solide (nanoparticules)

V_T : volume totale

VII.2. La conductivité thermique (k)

La conductivité thermique généralement est une propriété importante, parce qu'elle joue un rôle très important dans le phénomène de transfert de chaleur elle peut indiquer clairement l'efficacité du transfert de chaleur du fluide ou du solide, la conductivité dépend de la température.

En plus des variations en fonction de la température, la conductivité thermique du nanofluide varie en fonction de la fraction volumique aussi, la conductivité thermique d'un nanofluide est calculé selon les deux modèles suivants :

A-Modèle de Maxwell(1873)

Maxwell a présenté son modèle pour calculer la conductivité thermique d'un nanofluide en fonction de la fraction volumique du nanofluide, mais ce modèle est valable uniquement dans le cas des nanofluides qui contiennent des nanoparticules sphériques, et que cette condition peut être considérée comme un point négatif pour le modèle, donc pour l'utilisation de ce modèle on est obligée de considérer seulement les nanoparticules de forme sphériques.

Le modèle de Maxwell est donné par la formule suivante:

$$K_{nf} = \frac{K_p + 2K_{bf} - 2\phi(K_{bf} - K_p)}{K_p + 2K_{bf} + \phi(K_{bf} - K_p)} K_{bf} \quad (1)$$

(ϕ : fraction volumique = V_s / V_T ; p: particule ; bf: fluide de base ; nf: nanofluide)

B-Modèle de Hamilton et Crosser (1962)

Le modèle de Hamilton et Crosser a été établi pour résoudre la limite du modèle de Maxwell. Puisque ce dernier n'est pas valable que dans le cas des particules sphériques une chose qui rend le modèle non efficace pour la description du phénomène étudié, Pour cela le modèle de Hamilton et Crosser a été développé pour rendre plus efficace le calcul de la

conductivité thermique d'un nanofluide quelque soit la forme des nanoparticules, et ça en introduisant la notion du facteur géométrique appelé la sphéricité (ψ). 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.

La conductivité thermique apparente du milieu est donnée par l'expression suivante

$$K_{nf} = \frac{K_p + (n-1)K_{bf} - (n-1)(K_{bf} - K_p)\phi}{K_p + (n-1)K_{bf} + (K_{bf} - K_p)\phi} K_{bf} \quad (2)$$

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

$n = 3$ pour les particules sphériques et $n=6$ pour les particules cylindriques.

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

VII.3. Viscosité dynamique(μ) :

La viscosité peut être définie comme étant une propriété d'un fluide pour qu'il résiste aux déformations lorsqu'il est mis en mouvement. On peut donc parler de la viscosité comme étant une mesure du frottement interne d'un fluide. Un liquide très visqueux est un liquide qui présente un frottement interne élevé.

La dispersion des nanoparticules dans un liquide a un effet sur la viscosité dynamique de ce dernier. La viscosité obtenue devient la viscosité dynamique du nanofluide qui peut être influencé énormément par la qualité de la dispersion de la nanoparticule dans le fluide de base et de la température, cette viscosité dynamique peut être calculée à partir de la viscosité dynamique du fluide de base et la fraction volumique du nanofluide, Pour ce qui suit nous allons citer deux modèles pour le calcul des viscosités apparentes :

A-Modèle d'Einstein (1906) :

La viscosité dynamique d'un nanofluide est donnée par la relation d'Einstein pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines rigides la relation d'Einstein et la suivant :

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2,5\phi \quad (3)$$

Cette relation est valable juste pour $\phi=0,03$.

B-Modèle de Brinkman (1952) :

Par contre, Brinkman a généralisé la formule pour qu'il puisse être utilisé dans une large plage de concentrations volumiques.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{(1-\phi)^2} \quad (4)$$

VII.4 La masse volumique (ρ) :

La détermination de la masse volumique d'un nanofluide parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide) en fonction de la fraction volumique ϕ à une température T donnée, se fait à partir de la définition de la masse volumique d'un mélange.

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

$$\rho = \left(\frac{m}{V}\right)_{nf} = \frac{m_f + m_p}{V_f + V_p} = \frac{\rho_f V_f + \rho_p V_p}{V_f + V_p} \quad (5)$$

À partir de là on déduit alors la masse volumique du nanofluide :

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (6)$$

VII.5 La chaleur spécifique :

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène $C_p = dQ/mdT$. La chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance de 1 K lors de la transformation considérée.

Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nanofluide, on peut citer les deux modèles suivantes :

A- Modèle du Paket Cho:

Pak et Cho ont utilisé la formule suivante :

$$(C_p)_{nf} = (1 - \phi)(C_p)_{bf} + \phi(C_p)_p \quad (7)$$

B- D'autres auteurs dont Xuan et Roetzel ont travaillé avec la formule ci-dessous :

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_{bf} + \phi(\rho C_p)_p \quad (8)$$

Nous présentons sur les figures (1) à (4) les valeurs du rapport $(C_p)_{nf}/(C_p)_{bf}$ obtenus

a partir des deux relations (7) et (8) pour différents nanofluides avec comme fluide de base l'eau et pour différentes nanoparticules (Al_2O_3 , CuO, Cu, Ag et Au) en fonction de la fraction volumique ϕ qui varie de 0 à 8%. On constate une différence remarquable entre les valeurs calculées à partir des deux relations (7) et (8).

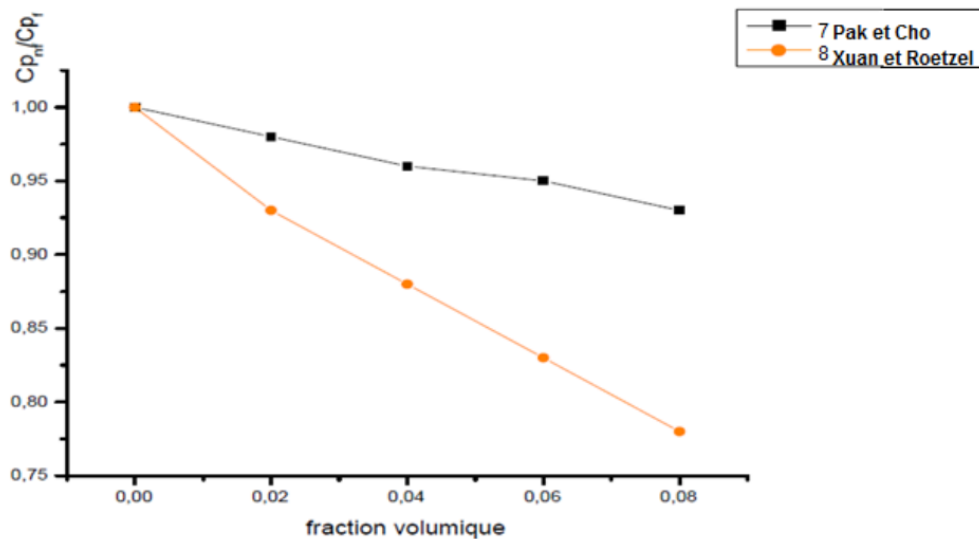


Figure 3: Valeurs de $\frac{(C_p)_{nf}}{(C_p)_f}$ en fonction de ϕ pour le nanofluide (Al_2O_3+eau) obtenues a partir de 7 et 8.

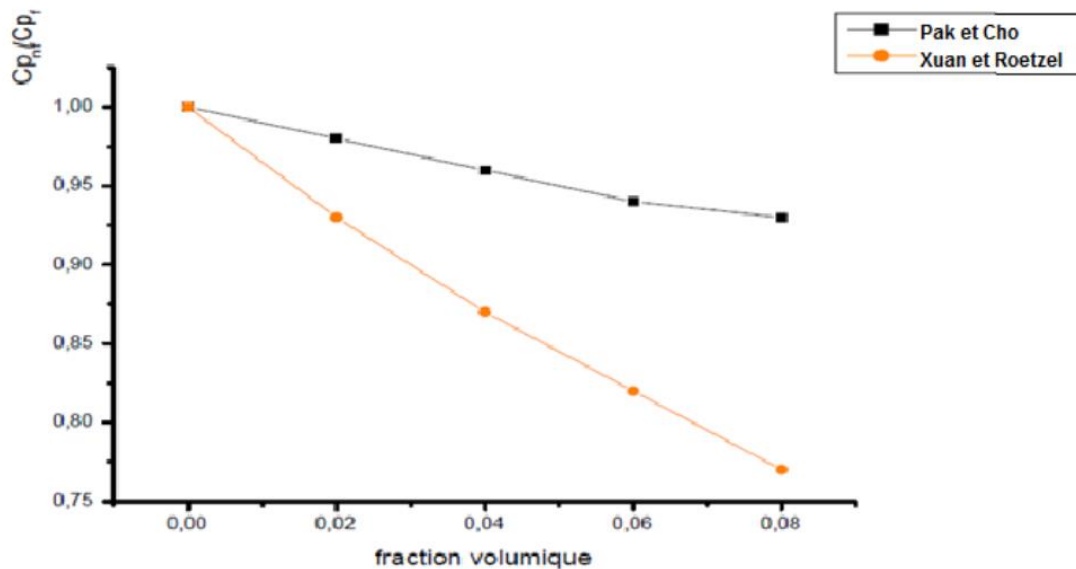


Figure 4: Valeurs de $\frac{(C_p)_{nf}}{(C_p)_f}$ en fonction de ϕ pour le nanofluide ($CuO+eau$) obtenues a partir de 7 et 8.

VII.6.Coefficient d'expansion thermique :

Nous nous intéressons dans le cadre de notre étude aux seuls fluides porteurs incompressibles (masse volumique indépendante de la pression) mais dilatables. Cette variation de masse volumique sous l'action de la température est caractérisée par le coefficient d'expansion thermique.

$\beta_T = - (1/\rho)(\partial\rho / \partial T)_p$ appelé également **coefficient de dilatation isobare**.

Le calcul de la valeur de ce coefficient pour les nanofluides, de très nombreux auteurs ont utilisé à la suite des premiers travaux sur les nanofluides et par analogie avec la relation qui détermine la masse volumique l'expression suivante :

$$\beta_{nf} = (1 - \phi)\beta_{bf} + \phi\beta_p \quad (9)$$

Remarque :

Dans tous les travaux, sans exception, les nanofluides ont été caractérisés en fonction de la fraction volumique $\phi = V_s/V_T$, ce paramètre dépend de la température T du nanofluide au moment du mélange, même si on suppose que le volume des particules solides varie peu pour de faibles variations de température, par contre celui des fluides varie. La plus part des expériences menées sur les nanofluides avec une fraction volumique ϕ donné ont été réalisées à des différentes températures.

Pour mener bien une étude il vaut mieux prendre un autre paramètre indépendant de la température, c'est le cas de la fraction massique $C = M_s/M_T$, C reste constante égale à C_0 dans un milieu homogène et ce pour toute valeur de T.

Chapitre III

Transfert de chaleur dans une enceinte fermée et remplie de nanofluide

I.3 Recherche bibliographique

L'objectif de ce chapitre est d'exposer une synthèse bibliographique des travaux ultérieurs traitant les écoulements avec transfert de chaleur des nanofluides dans les espaces confinés. L'amélioration du transfert de chaleur dans ces espaces confinés a reçu un intérêt considérable au cours des dernières décennies ; cela est dû à leurs applications pratiques dans les équipements électroniques, les échangeurs de chaleur, les réacteurs nucléaires et beaucoup d'autres systèmes thermiques.

De nombreux travaux ont été examinés analytiquement, numériquement et expérimentalement sur le transfert de chaleur dans les espaces confinés en utilisant les nanofluides avec différentes conditions aux limites, Chauffage symétrique ou asymétrique.

Choi. (1995) était le premier à utiliser la suspension des nanoparticules solides dans un liquide de base et a trouvé que la conductivité thermique effective d'un mélange eau+Al₂O₃ augmente de 20% pour une concentration en volume entre 1% et 5% de Al₂O₃. De nombreuses recherches ont été menées depuis 2001 sur cette nouvelle classe de nanofluides afin de permettre une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu, et mettre ainsi au point des fluides caloporteurs plus performants.

Il y a un certain nombre des études numériques à propos de convection naturelle ou mixte de nanofluides dans des cavités rectangulaires simples avec différentes conditions aux limites. L'amélioration de transfert de chaleur dans une enceinte en utilisant les nanofluides est étudiée par **Khanafar et al. (2003)** pour différents paramètres pertinents. Un modèle a été développé pour analyser la performance de transfert de chaleur de nanofluides dans une enceinte tenant compte de la dispersion de particules solides. L'effet de la suspension de nanoparticules métalliques ultrafines sur les processus d'écoulement de fluide et le transfert de chaleur dans l'enceinte a été analysé pour différents paramètres de contrôle. Il a été montré que les écarts dans les différents modèles ont des répercussions importantes sur les résultats.

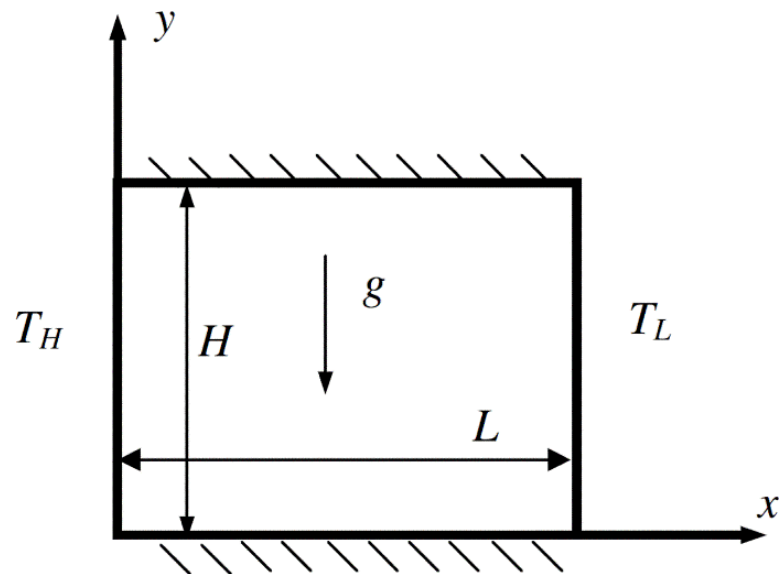


Figure 5. Schéma du modèle physique Khanafar et al. (2003).

Wang et al. (2003) ont étudié numériquement la convection naturelle dans une cavité bidimensionnelle chauffée par le bas, pour différents nombres de Grashof et différentes valeurs de ϕ . Ces auteurs ont conclu que le coefficient de transfert de chaleur pour ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{eau}$) est augmenté de 100% pour un nanofluide avec des nanotubes de carbone et de l'huile comme fluide porteur avec $\phi = 1\%$.

Le transfert de chaleur et l'écoulement du fluide dû à des forces de flottabilité dans une enceinte chauffée partiellement ont été étudiés par Oztop et Abu-Nada(2008), en utilisant différents types de nanoparticules. Une augmentation de nombre de Nusselt moyen a été trouvée avec la fraction volumique de nanoparticules pour toute la gamme de nombre de Rayleigh. Ils ont constaté aussi que l'amélioration du transfert de chaleur, en utilisant nanofluides est plus prononcée à faible rapport d'aspect qu'à rapport d'aspect élevé.

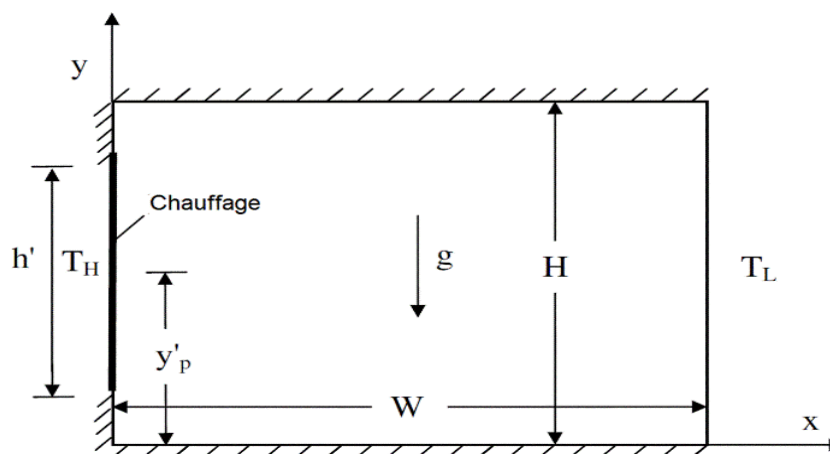


Figure 6. Croquis de la géométrie du problème Oztop et Abu-Nada(2008).

Une étude numérique de refroidissement par convection naturelle d'une source de chaleur embarquée sur la paroi inférieure d'une enceinte remplie de nanofluides a été faite par **Aminossadati et Ghasemi**(2009). L'influence des paramètres pertinents tels que le nombre de Rayleigh, l'emplacement et la géométrie de la source de chaleur, le type de nanofluide et la fraction volumique solide des nanoparticules sur la performance de refroidissement ont été étudiés. Les résultats indiquent que l'ajout de nanoparticules dans l'eau pure permet d'améliorer la performance de refroidissement, en particulier à faible nombre de Rayleigh. Le type de nanoparticules, la longueur et l'emplacement de la source de chaleur affectent de manière significative la température maximale de la source de chaleur.

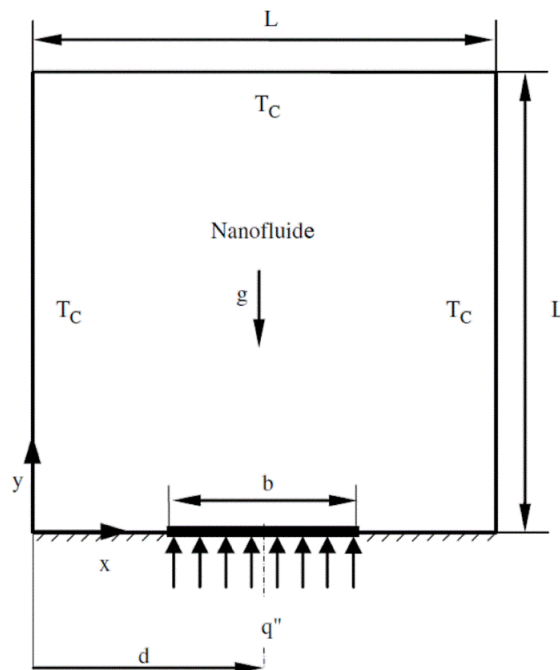


Figure 7. Schéma du modèle physique Aminossadati et Ghasemi(2009).

L'amélioration du transfert de chaleur en utilisant comme nanofluide de l'eau+SiO₂ dans une cavité carrée de parois latérale soumise à des températures différentes a été étudiée par **Jahanshahi et al.**(2010). Cette étude a été réalisée pour des différentes valeurs du nombre de Rayleigh du fluide de base ($Ra_f=10^5,10^7$) et une fraction volumique de nanoparticule qui varie entre 0 et 4%. Un dispositif expérimental pour extraire la valeur de conductivité de nanofluide a été utilisé. Les comparaisons montrent que le nombre de Nusselt moyen augmente avec la fraction de volume pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh.

Alinia et al.(2011) ont étudié numériquement la convection mixte d'un nanofluide (l'eau+SiO₂) dans une cavité inclinée. Les parois gauche et droite sont maintenues à des températures constantes, alors que les parois supérieure et inférieure sont isolées et mobiles. Les effets de la fraction volumique solide de nanofluides sur les caractéristiques hydrodynamiques et thermiques ont été étudiés ($\phi=0$ à 0.08), pour différents angles d'inclinaison de l'enceinte ($\alpha=-60^\circ$ à $\alpha=60^\circ$), nombre de Richardson variant de 0,01 à 100 et une valeur constante du nombre de Grashof. Les résultats ont montré que l'addition de nanoparticules améliore le transfert de chaleur dans la cavité et provoque des changements significatifs dans la configuration d'écoulement. En outre, l'effet de l'angle d'inclinaison est plus prononcé pour les plus grandes valeurs du nombre de Richardson.

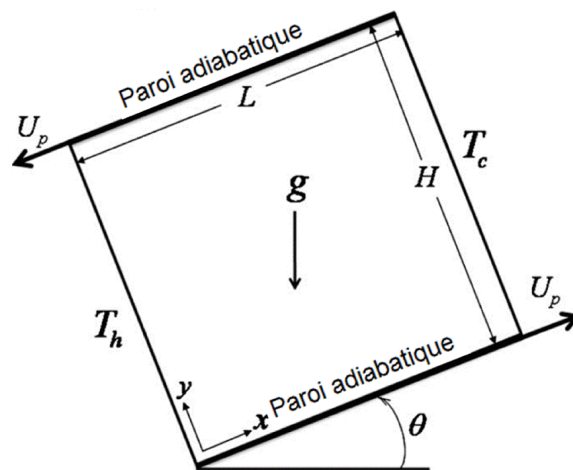


Figure 8. Schéma du modèle physique Alinia et al.(2011).

Une étude analytique et numérique de la convection naturelle a été faite par **Alloui et al. (2011)**, dans une cavité rectangulaire remplie avec un nanofluide. Les paramètres gouvernants sont le nombre de Rayleigh, Ra, le nombre de Prandtl Pr, le rapport d'aspect de la cavité A, et la fraction volumique solide de nanoparticules ϕ . Un bon accord est observé entre le modèle analytique et les simulations numériques.

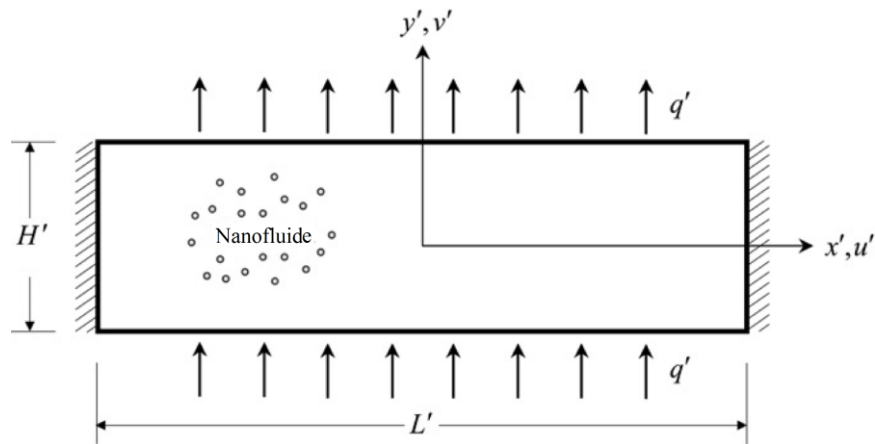


Figure 9. Domaine géométrique Alloui et al.(2011)

La convection mixte de nanofluide Cu+eau à l'intérieur d'une cavité carrée a été étudiée numériquement par **Abbasian et al.(2012)**, avec parois horizontales adiabatiques et chauffage sinusoïdal sur les parois latérales. Les effets de l'augmentation de la force de cisaillement pour une force de flottabilité fixe et les effets d'augmentation de la force de flottabilité pour une force de cisaillement fixe ont été étudiés. Les effets des variations du nombre de Richardson, déviation de phase de chauffage sinusoïdal, et la fraction volumique de nanoparticules sur l'écoulement et champ de température ont été étudiés. Les résultats obtenus ont montré que pour un nombre de Grashof constant, un tourbillon dans le sens horaire a été développé à l'intérieur de la cavité, en outre, le taux de transfert de chaleur augmente avec la diminution du nombre de Richardson et l'augmentation de la fraction volumique de nanoparticules.

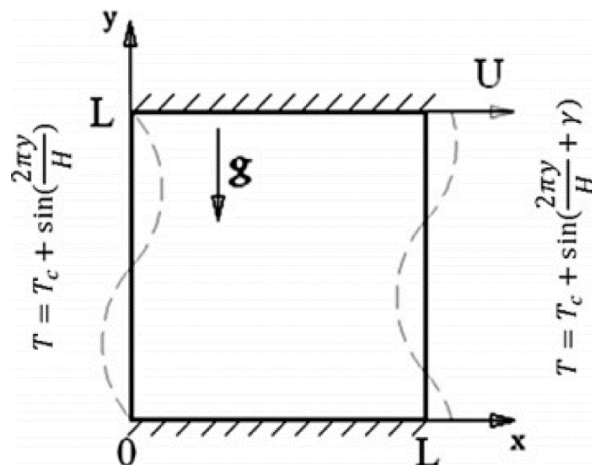


Figure 10. Vue schématique de la cavité carrée et conditions aux limites considérées Abbasian et al.(2012).

Chamkha et Abu-Nada (2012) se sont focalisé sur la modélisation numérique du flux laminaire de convection mixte en cavité carrée à simple et double couvercle rempli d'un

nanofluide eau+Al₂O₃. Les modèles de viscosité de Brinkmann et la corrélation de Pak et Cho sont utilisés pour approximer la viscosité de nanofluide. Un ensemble sélectif des résultats graphiques est présenté et discuté pour illustrer les effets de la présence de nanoparticules et le nombre de Richardson sur les caractéristiques d'écoulement et de transfert de chaleur dans les deux configurations de la cavité. On constate qu'il ya une amélioration significative de transfert de chaleur peut-être obtenu due à la présence de nanoparticules. Toute fois, pour les petits nombres de Richardson, le modèle de Pak et Cho prédisent que la présence de nanoparticules provoque la réduction du nombre de Nusselt moyen dans la configuration de la cavité à couvercle unique.

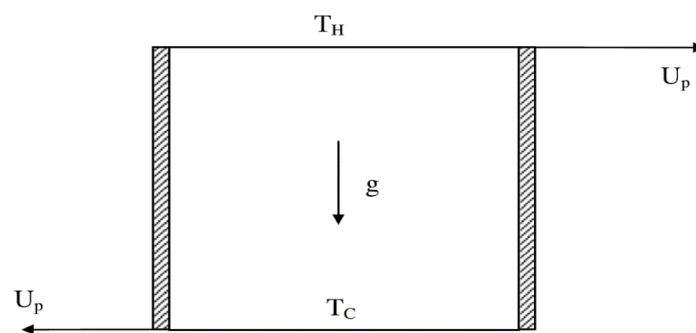


Figure 11. Cavité à double-couvercle entraînée Chamkha et Abu-Nada(2012).

La convection mixte et la génération d'entropie de nanofluide Cu+eau et de l'eau pure dans une cavité carrée ont été étudiées par **Khorasani zadeh et al.(2013)**. Les parois horizontales de la cavité sont des parois adiabatiques et verticales ont une température constante. La paroi supérieure est en mouvement à une vitesse constante U_0 . Les résultats montrent que l'ajout de nanoparticules au fluide de base affecte la génération de l'entropie, motif l'écoulement et le comportement thermique spécialement aux grandes valeurs du nombre de Rayleigh et faible nombre de Reynolds. La génération maximale d'entropie se produit dans un nanofluide à faible nombre de Rayleigh, avec nombre de Reynolds élevé.

Le transfert de chaleur et l'écoulement de fluide dans une cavité carrée avec des parois latérales partiellement chauffées remplie de nanofluide ont été étudiés numériquement par **Ridha Jmai et al. (2013)** en utilisant différents types de nanoparticules. L'influence des paramètres pertinents tels que le nombre de Rayleigh, le type et l'emplacement des de nanofluide, la fraction volumique solide de nanoparticules sources de chaleur sur le transfert de chaleur et l'écoulement de fluide sont étudiés. Ils ont constaté que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh et la fraction volumique des nanoparticules. En outre, la température maximale de la source a

été affectée de manière significative lorsque leurs emplacements sont considérés.

L'amélioration du transfert de chaleur le plus élevé survient pour le cas haut- bas, alors que le minimum est atteint au milieu.

Chein et Huang(2005) ont analysé les performances d'échangeur de chaleur à micro canaux de silicium utilisant nanofluides comme fluides de refroidissement.

En raison de l'augmentation de la conductivité thermique et les effets de dispersion thermiques, il a été constaté que les performances sont améliorées pour les deux géométries spécifiques utilisées.

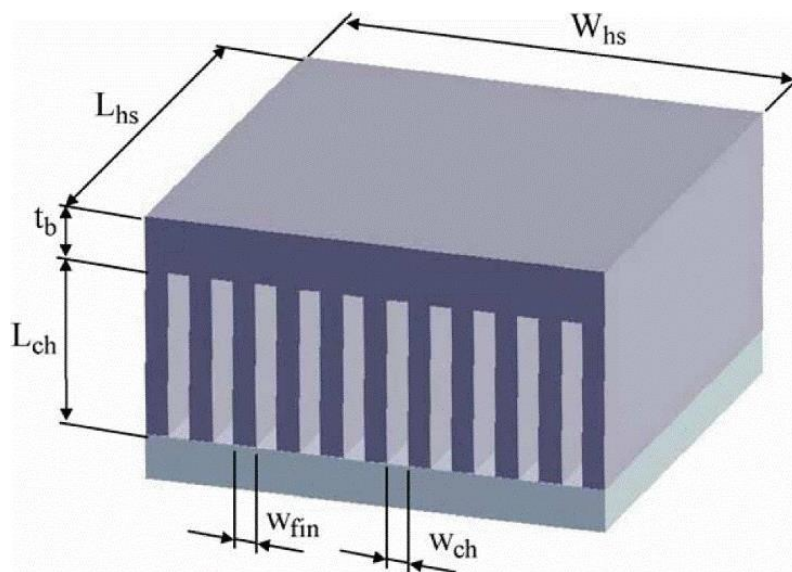


Figure 12. Configuration de l'échangeur de chaleur à micro canaux Chein et Huang(2005).

Les performances de refroidissement d'un échangeur de chaleur à micro canaux, avec suspensions des nanoparticules au fluide (nanofluides), sont numériquement étudiées par **Jang et Choi(2006)**. En utilisant un modèle théorique de la conductivité thermique des nanofluides tenant en compte un rôle fondamental du mouvement brownien. Les résultats montrent que les performances de refroidissement d'un échangeur de chaleur à microcanaux avec nanofluides (Ag+H₂O) à un pompage à puissance fixe sont augmentées d'environ 10% par rapport à celle d'un échangeur de chaleur à micro canaux avec de l'eau. Ainsi que, les nanofluides réduisent à la fois la résistance thermique et la différence de température entre la paroi du micro canal chauffé et le fluide de refroidissement.

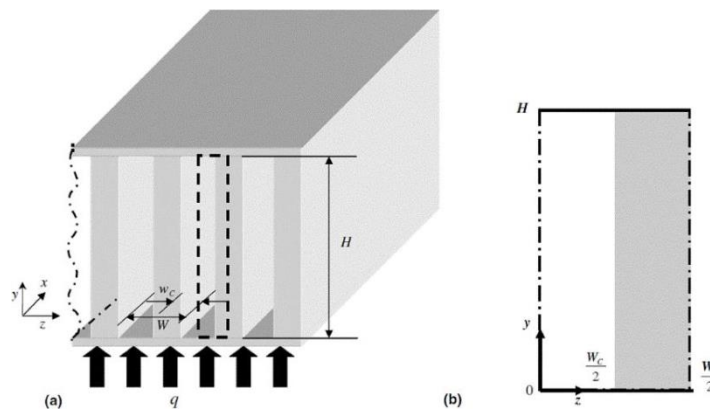


Figure 13. Dissipateur de chaleur à micro canaux:(a) domaine physique, (b) domaine de calcul
Jang et Choi(2006)

Tsai et Chein(2007) ont traité analytiquement les performances d'échangeur de chaleur à micro canaux en utilisant un nanofluide cuivre+eau($\text{Cu-H}_2\text{O}$),et nanotubes de carbone+eau($\text{CNT-H}_2\text{O}$) comme fluides de refroidissement. Les résultats montrent que l'utilisation de nanofluide peut améliorer les performances d'échangeur de chaleur à micro canaux lorsque la porosité et le rapport d'aspect sont inférieurs aux valeurs optimales. Lorsque la porosité, et le rapport d'aspect de canal sont plus élevés que les valeurs optimales, le nanofluide en'a pas donné un changement significatif dans la résistance thermique de dissipateur de chaleur à micro canaux.

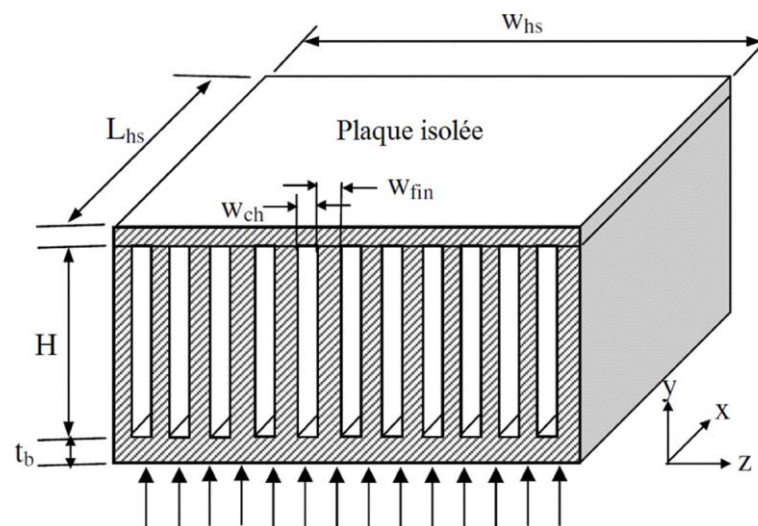


Figure 14. Schéma d'échangeur de chaleur à micro canaux Tsai et Chein (2007).

Santra et al.(2009) ont étudié l'effet de nanofluide cuivre-eau comme fluide de refroidissement pour simuler le comportement de transfert de chaleur dans un canal rectangulaire horizontal bidimensionnel (profondeur infinie). L'étude a été réalisée compte tenu du fluide est Newtonien ainsi que non-Newtonien pour une large gamme de nombre de Reynolds ($\text{Re}=5$ à 1500) et fraction volumique solide ($\phi=0,00$ à $0,05$). Il a été

observé que l'augmentation du transfert de chaleur est possible en utilisant un nanofluide par rapport à des fluides classiques pour les deux cas. Le taux de transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du flux d'écoulement ainsi que l'augmentation de la fraction volumique solide du nanofluide. Contrairement à la convection naturelle, l'augmentation du transfert de chaleur est quasiment identique pour les deux cas.

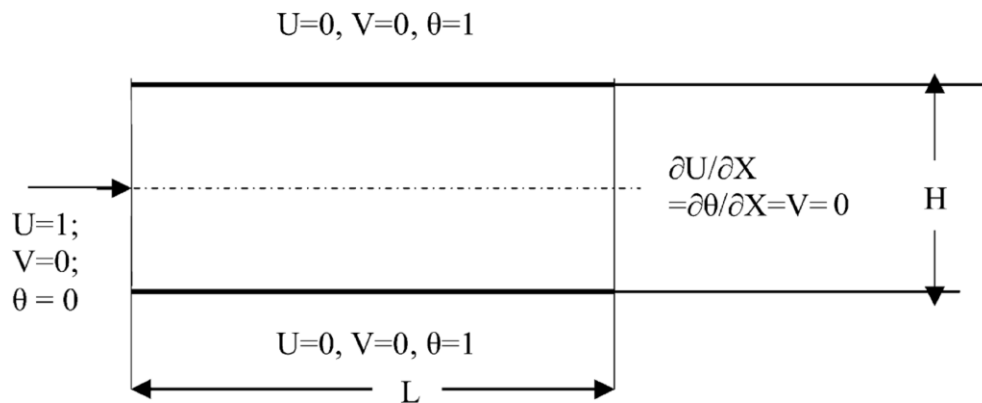


Figure 15. Géométrie du problème et conditions aux limites, Santra et al.(2009).

Hung et al.(2012) ont étudié numériquement l'amélioration de transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur à micro canaux 3D en utilisant les nanofluides. Les résultats montrent que la fraction volumique des particules de nanofluide augmente, la résistance thermique diminue d'abord et puis augmente. Pour une gamme modérée de tailles de particules, l'échangeur de chaleur à micro canaux donne de meilleures performances lorsqu'on utilise des nanofluides avec de plus petites nanoparticules.

Les performances de transfert de chaleur des nanofluides $Al_2O_3+H_2O$ et $Ag+H_2O$ étaient de 21,6% supérieure à celle de l'eau pure.

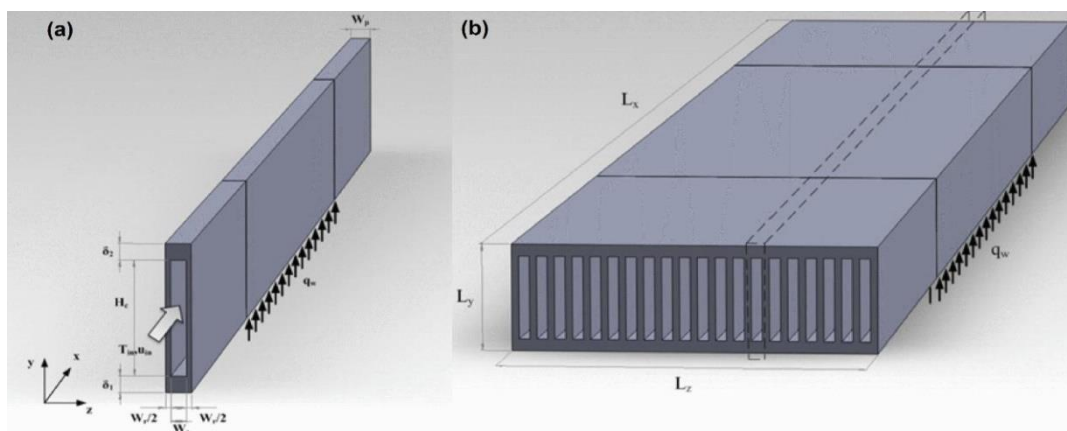


Figure 16. Echangeur de chaleur à micro canaux (a), domaine de calcul(b)

Hung et al.(2012).

Pishkar et Ghasemi(2012) ont présenté une étude numérique de la performance thermique des deux ailettes montées sur la paroi inférieure d'un canal horizontal et refroidi avec de l'eau pure ou un nanofluide Cu+eau. La paroi inférieure du canal est chauffée à température constante et refroidie par convection mixte, et la paroi supérieure est adiabatique. Les résultats de la simulation numérique indiquent que le taux de

transfert de chaleur des ailettes est significativement affecté par la distance et la conductivité thermique des ailettes. L'influence de la fraction volumique solide sur l'augmentation du transfert de chaleur est plus perceptible pour des valeurs élevées du nombre de Reynolds.

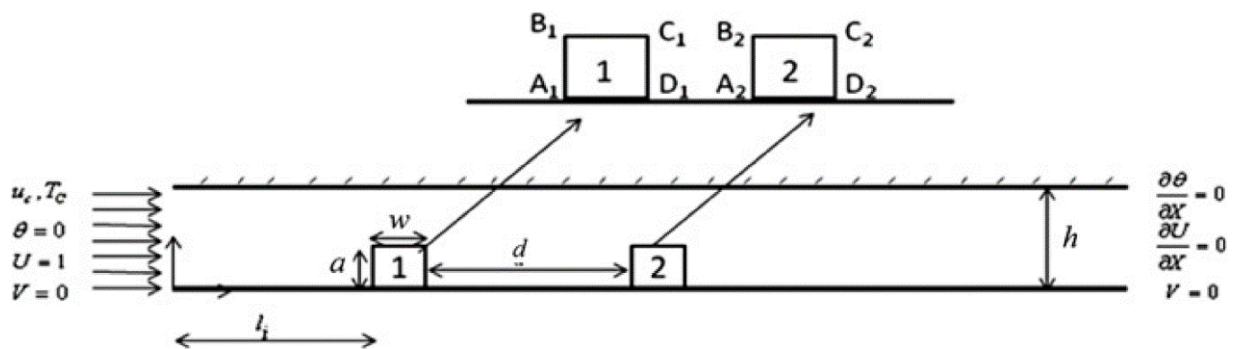


Figure 17. Modèle physique, Pishkar et Ghasemi(2012)

Le travail de **Halefadi et al.(2014)** se sont concentré sur l'optimisation analytique d'un échangeur de chaleur à micro canaux rectangulaire en utilisant un nanofluide à nanotubes de carbone aqueux comme fluide de refroidissement. Les résultats ont montré que l'utilisation du nanofluide comme fluide de travail peut améliorer significativement les performances thermiques du fluide de travail à haute température.

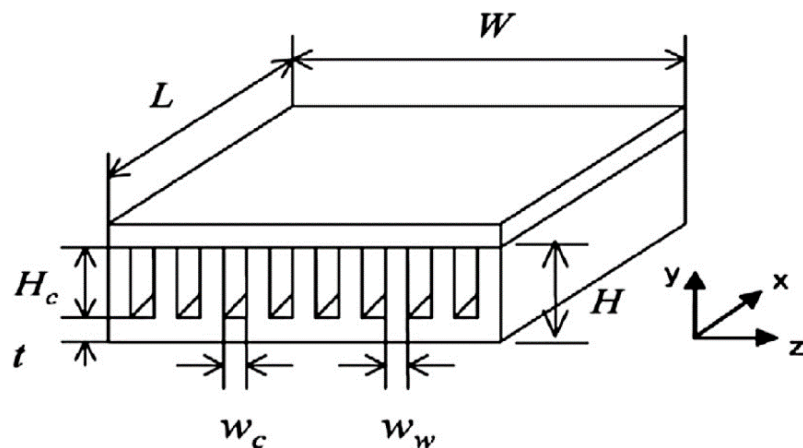


Figure 18. Echangeur de chaleur à micro canaux ,Halefadi et al.(2014).

Une étude analytique est faite par **Nield et Kuznetsov (2014)** pour la convection forcée laminaire complètement développée dans un canal à plaques parallèles rempli par un nanofluide ou par un milieu poreux saturé, soumis à un flux uniforme. Un modèle intégrant les effets du mouvement Brownien et thermophorèse est adopté. Les auteurs ont constaté que l'effet combiné de ces deux organismes réduit le nombre de Nusselt.

Ahmed et al. (2015) ont étudié numériquement et expérimentalement le transfert de chaleur par convection du flux de nanofluide SiO_2 +eau dans des canaux avec différentes formes pour un nombre de Reynolds variant de 400 à 4000. Trois canaux différents, tels que trapézoïdale, sinusoïdale et droit ont été fabriqués et testés. Les résultats ont montré que le nombre de Nusselt moyen et l'amélioration du transfert de chaleur augmentent lorsqu'il y a une augmentation de la fraction volumique des nanoparticules. En outre, le canal trapézoïdal-ondulé donne une amélioration de transfert de chaleur le plus élevé suivie par le canal sinusoïdal-ondulé et le canal droit.

Hemmat et al. (2015) ont étudié la convection mixte d'un flux laminaire de nanofluide Al_2O_3 +eau dans un canal horizontal où deux obstacles chauds sont montés sur la paroi inférieure. Les résultats explicitent que la différence entre le nombre de Nusselt moyen obtenu à partir des trois modèles thermo physiques ne dépasse pas 3%. Les résultats montrent également que l'augmentation de la concentration en nanofluide de 0% à 5%, augmente le nombre de Nusselt moyen des obstacles de moins de 10%.

Heidary et al. (2015) ont étudié numériquement le transfert de chaleur de l'écoulement de fluide dans un canal rectiligne avec nanofluide, tandis que le champ d'écoulement est sous champ magnétique. L'utilisation de nanoparticules dans le fluide de base et aussi l'application de champ magnétique transversal à la vitesse du fluide sont deux moyens d'améliorer l'échange de chaleur dans le conduit. Des études numériques sont effectuées dans une gamme du nombre de Reynolds, fraction volumique nanofluide et nombre de Hartmann. L'influence de ces paramètres est étudiée sur le nombre de Nusselt locaux et moyens. A partir de cette étude, les auteurs ont conclu que le transfert de chaleur dans les canaux peut augmenter jusqu'à 75% en raison de la présence de nanoparticules et de champ magnétique.

CONCLUSION

Dans ce mémoire nous avons exposé une recherche bibliographique sur les transferts de chaleurs des écoulements de nanofluides dans les espaces confinés.

En premier, nous avons présenté des notions générales sur les transferts de chaleur, ensuite nous avons présenté quelques notions sur les nanofluides, leur domaine d'application ainsi que les différents modèles pour le calcul des propriétés thermo physiques de ces derniers.

La dernière partie de ce mémoire englobe l'ensemble des travaux analytiques numériques et expérimentaux des écoulements avec transfert de chaleur des nanofluides dans les espaces confinés.

L'amélioration du transfert de chaleur dans les espaces confinés a reçu un intérêt considérable au cours des dernières décennies ; cela est dû à leurs applications pratiques dans les équipements électroniques, les échangeurs de chaleur, les réacteurs nucléaires et beaucoup d'autres systèmes thermiques. La majorité des travaux ont traité ce phénomène dans les enceintes fermés et les canaux et micro canaux en changeant les conditions de chauffage ou en insérant soit des blocks chauffés ou bien des ailettes et en variant les concentrations volumiques des nanofluides. Les résultats ont montré que l'augmentation de la concentration des particules nanométriques a pour effet de changer les propriétés thermo physiques du fluide de travail et améliorer ainsi l'échange de chaleur et l'analyse de ces travaux a permit donc d'identifier les différents paramètres qui peuvent influencer le comportement thermique et rhéologique des nanofluides.

Les nanofluides sont alors l'un des fruits d'une telle richesse. Dotés de propriétés physico-chimiques particulières et intéressantes telle que leur importante conductivité thermique, les nanofluides offrent un coefficient de transfert thermique imbattable par rapport autres fluides caloporteurs.

Références bibliographiques

- 1- Choi, S.U.S., (1995): Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *Developments and applications of Non-Newtonian Flows*, FED-vol. 231/MD-vol.66, ASME, New York, 99-105.
- 2- Khanafer, K., Vafai, K., Lightstone, M. (2003): Buoyancy-Driven Heat Transfer Enhancement in a Two-Dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, pp. 3639–3653.
- 3- Wang, B., X., Zhou, L., P., Peng, X., F, (2003): A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, pp. 2665-2672.
- 4- Jahanshahi, M., Hosseinizadeh, S., F., Alipanah, M., Dehghani, A., Vakilinejad, G., R. (2010): Numerical Simulation of Free Convection Based on Experimental Measured Conductivity in a Square Cavity Using Water/SiO₂ Nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, pp. 687–694.
- 5- Alinia, M., Ganji, D., D., Gorji-Bandpy, M. (2011): Numerical study of mixed convection in an inclined two sided lid driven cavity filled with nanofluid using two-phase mixture model, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 38, pp. 1428–1435.
- 6- Alloui, Z., Vasseur, P., Reggio, M. (2011): Natural convection of nanofluids in a shallow cavity heated from below, *International Journal of Thermal Sciences*, vol.50, pp. 385-393.
- 7- Abbasian A., A., A., Mazrouei S., S., Mahmoodi, M., Ardeshiri, A., Aliakbari, M. (2012): Numerical study of mixed convection flow in a lid-driven cavity with sinusoidal heating on sidewalls using nanofluid, *Superlattices and Microstructures*, vol. 51, pp. 893–911.
- 8- Abu-Nada, E., Masoud, Z., Hijazi, A. (2008): Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric annuli using nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 35, pp. 657-665.
- 9- Chamkha, A., J., Abu-Nada., E. (2012): Mixed convection flow in single- and double-lid driven square cavities filled with water–Al₂O₃ nanofluid: Effect of viscosity models, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, vol. 36, pp. 82–96.
- 10- Khorasanizadeh, H., Nikfar, M., Amani, J., (2013): Entropy generation of Cu–water nanofluid mixed convection in a cavity, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, vol. 37, pp. 143–152.

- 11- Jmai, R., Ben-Beya, B., Lili, T. (2013): Heat transfer and fluid flow of nanofluid-filled enclosure with two partially heated side walls and different nanoparticles, *Superlattices and Microstructures*, vol. 53, pp.130–154.
- 12- Hung, L., Tsai, G., Chao, S., Yen, Y. (2012): Measurement of thermal and hydraulic performance of a plate-fin heat sink with a shield, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 42, pp. 71–78.
- 13- Chein, R., Huang, G. (2005): Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, pp. 3104–3114.
- 14- Jang, S., P., Choi, S., U., S., (2006): Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, pp. 2457–2463.
- 15- Tsai, T., Chein, R., (2007): Performance analysis of nanofluid-cooled microchannel heat sinks, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 28, pp. 1013–1026.
- 16- Santra, A., K., Sen, S., Chakraborty, N., (2009): Study of heat transfer due to laminar flow of copper–water nanofluid through two isothermally heated parallel plates, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 48, pp. 391–400.
- 17- Pishkar, I., Ghasemi. B. (2012): Cooling enhancement of two fins in a horizontal channel by nanofluid mixed convection, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 59, pp. 141-151.
- 18- Halefadi, S., Adham, A., M., Mohd-Ghazali, N., Maré, T., Estellé, P., Robiah, A. (2014): Optimization of thermal performances and pressure drop of rectangular microchannel heat sink using aqueous carbon nanotubes based nanofluid, *Applied Thermal Engineering*, vol. 62, pp. 492-499.
- 19- Nield, D., A., Kuznetsov, A., V., (2014): Forced convection in a parallel-plate channel occupied by a nanofluid or a porous medium saturated by a nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 70, pp. 430–433.
- 20- Ahmed, M., A., Yusoff, M., Z., Shuaib, K., C. (2015): Numerical and experimental investigations on the heat transfer enhancement in corrugated channels using SiO₂–water nanofluid, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 6, pp. 77–92.
- 21- Hemmat, M., Arani, A., A., A., Niroumand, A., H., Yan, W., Karimipour, A. (2015): Mixed convection heat transfer from surface-mounted block heat sources in a horizontal channel with nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 89, pp. 783–791.

- 22- Heidary, H., Hosseini, R., Pirmohammadi, M., Kermani, M., J. (2015): Numerical study of magnetic field effect on nano-fluid forced convection in a channel, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 374, pp. 11–17.