REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE



Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Énergies renouvelables

Thème : Interaction des nano fluides et des ailettes poreuses radiales à haute température

Présenté par :

_Turkman Mohamed amine

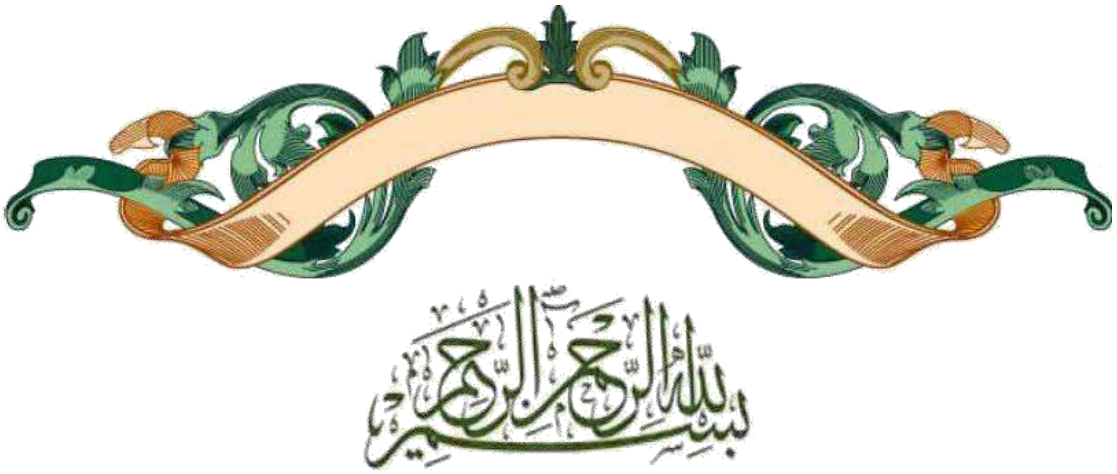
_Rebahi Mohamed amine

Proposé et Dirigé par :

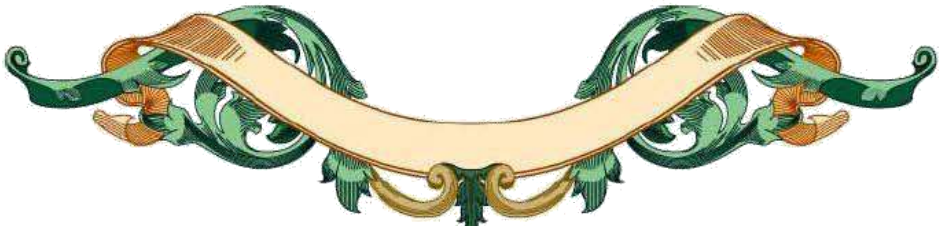
Pr M .N BOUAZIZ

Et Dr. A.M. BOUAZIZ

Promotion juin 2022



"رب أوزعني أن أشكر نعمتك
التي أنعمت عليَ وعلى والديَ
وأن أعمل صالحا ترضاه
وأصلح لي في ذريتي
إني تبت إليك و إني من المسلمين"
صدق الله العظيم



Résumé

Ces dernières années et pour un gain de matière, les ailettes poreuses radiales ont peu à peu remplacé les ailettes pleines. En particulier, si l'espace est limité cette technique s'avère adéquate pour une miniaturisation des équipements tels les échangeurs à tubes à ailettes ou à plaques à ailettes. La porosité induite est le siège de l'écoulement d'un fluide classique, notamment l'air, mais souvent les fluides en présence sont de nature liquide et à cet effet on se propose dans ce projet de quantifier le gain en efficacités lors de la présence des nanofluides comme agent de dissipation de la chaleur. Dans ces conditions, L'étude se propose cette tache notamment dans le cas des hautes températures.

Ce mémoire avait pour objectif une compréhension de l'usage d'une ailette poreuse radiale dissipant la chaleur dans un milieu de nanofluide.

Après une connaissance des caractéristiques des nanofluides ainsi que de l'intensification des échanges thermiques (de dissipation) par voie d'ailettes pleines et puis poreuses, une modélisation classique a été reportée, puis une modélisation particulière relative aux ailettes poreuses et radiales a été établie.

Le modèle mathématique a été implémenté dans Matlab via le Bvp4c dédié aux équations différentielles ordinaires avec les conditions aux limites.

Les principaux résultats ont montré que:

- Un ailette poreuse est avantageuse en rapport de l'ailette pleine en termes de performance, ce qui est économiquement bien.
- Il est préférable d'utiliser les ailettes très poreuses et moins perméables.
- Par contre, un nanofluide comme fluide récepteur de chaleur ne conduit pas à une bonne efficacité de l'ailette.
- L'efficacité de l'ailette poreuse est meilleure dès lors qu'un contraste de rapport est grand entre les conductivités thermiques de l'ailette et du fluide.

Cependant, une optimisation suivant tel ou tel cas est nécessaire pour le bon choix des paramètres influant en termes de performances technique alliées à l'économie.

Remerciements

Mes remerciements s'adressent d'abord à Allah le tout puissant et miséricordieux de m'avoir donné la force et la patience pour achever ce modeste travail.

En second lieu, je remercie vivement mon cher promoteur, Pr. Bouaziz Mohammed Najib ainsi que Dr A. Manal Bouaziz pour leurs disponibilités et leurs conseils précieux, leurs orientations et leurs efforts élaborés pour réaliser ce travail.

Mes profonds remerciements vont également à Dr Zirari Mounir de m'avoir facilité l'accès au sein de leur établissement ainsi que pour leurs conseils et disponibilité.

Mes vifs et sincères remerciements s'adressent également aux membres du jury, de nous avoir fait l'honneur d'évaluer et d'examiner ce travail.

Je remercie infiniment le corps des enseignants de la faculté de Génie mécanique, université Yahia Farès de Médéa pour leurs efforts afin de nous garantir l'aboutissement du programme de LICENCE et MASTER.

Ces remerciements ne seraient pas complets sans associer toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Avec toute modestie, je dédie ce travail :

À ma très chère mère et mon très cher père, qui ont toujours été là pour

Moi, ils ont tout sacrifié pour leurs enfants. Ils m'ont donné un magnifique

modèle de labeur et de persévérance.

Je suis redevable d'une éducation irremplaçable dont je suis fièr.

À mes chères grands-mères pour leur douceur et leur gentillesse. À mon cher grand-père maternel, aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour que je lui porte.

À la mémoire de mon grand-père paternel, Qu'ALLAH lui pardonne et ait pitié de lui. Bien sûr, la vie n'aurait pas du goût sans eux, ma très chère sœur Khouloud et frères Chems Eddine, qu'ALLAH les protège.

A tous mes oncles et tantes, à leurs mari(e)s et à leurs enfants.

A tous les membres de ma famille, petits et grands. Et tous mes amis.

Turkman .M .A

Dédicaces

J’ai dédié ce modeste travail au gens qui m’ont inspiré :

A ma mère, à la mémoire de mon père, Qu’ALLAH lui pardonne et ait pitié de lui.

A mes frères et mes sœurs

A toute ma famille

A mes chers amis

A toutes et à tous je dédie ce modeste travail.

Rabahi .M.A

Table des matières

Chapitre I: Les nano fluides 17

I.1. Introduction : 17

I.2. Généralités sur les nano fluides et nanoparticules : 19

I.2.1. Production des nano fluides et nanoparticules : 20

I.2.2. Types de nanoparticules 21

I.3. nano fluides et caractéristiques : 22

I.3.1. Types de nanoparticules et leurs effets sur les nano fluides : 22

I.3.2. Types de nanoparticules : 23

I.3.3. Nano fluides à base de nanotubes de carbone : 23

I.3.4. Nano fluides à base de nanoparticules métalliques ou des oxydes : 24

I-3.5. Les nanoparticules métalliques : 25

I.3.6 Propriétés thermo physiques des nano fluides : 25

I.3.6.1 Viscosité dynamique (μ) : 25

I.3.6.2 La masse volumique effective du nano fluide : 26

I.3.6.3 La conductivité thermique effective du nano fluide : 26

I.3.6.4 Effets des grandeurs significatives sur la conductivité thermique suivant les études expérimentales 29

I.3.6.5 La fraction volumique (ϕ) : 30

I-4. Modèle mathématique pour un nano fluide (mélange fluide de base nanoparticules) : 30

I-5. Revue bibliographique succincte sur la convection forcée dans les nano fluides : 33

I.6. Conclusion : 34

Chapitre II : Ailettes 36

II.1. Introduction générale : 36

II.1.1. Intérêt des ailettes et de calcul des performances : 37

II.1.2. Mécanismes de transfert de chaleur dans les systèmes : 38

II.1.3. Convection et Conduction et rayonnement dans une ailette : 38

II.1.3.1. Convection : 38
II.1.3.2. Conduction : 39
II.1.4. Le rayonnement : 40
II.2. Modélisation des ailettes classiques 41
II.2.1. Introduction : 41
II.2.2. Définition d'une ailette : 41
II.2.3. Formes des ailettes : 42
II.2.4. Types d'ailettes : 42
II.2.5. Thermique de l'ailette : 43
II.2.6. Rendement de l'ailette : 44
II.2.7. Efficacité d'ailette : 45
II.2.8. Distribution de la température dans l'ailette : 46
II.2.9. Résistance de l'ailette : 47
II.2.10. L'équation de la barre et modèle mathématique : 47
Chapitre III : Ailettes poreuses 51
III.1.Introduction : 51
III.2.Description de l'historique des échangeurs à ailettes : 51
III.6. conclusion : 55
Chapitre IV : Modélisation des ailettes pleines/poreuses 56
IV.1 Distribution de température dans les ailettes pleines : 56
IV.2 L'efficacité de l'ailette : 58
IV.3 Rendement d'une surface ailette : 59
IV.4. Distribution de température dans les ailettes poreuses radiales: 59
IV.4.1. Introduction : 59
IV.4.2. Formulations mathématiques : 60
Chapitre V : Simulations numériques 64
V. 2. Ailette radiale (circulaire) pleine (pas de porosité) 66
V. 3. Effet de la conductivité thermique du nanofluide : 67
V. 4. Effet du paramètre conducto-convectif de l'ailette poreuse : 68

V. 5. Effet de basse ou haute température de fonctionnement : 69
V. 7. Effet de la porosité de l'ailette : 71
V. 8. Effet de l'épaisseur relative de l'ailette poreuse : 72

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Pyrolyse laser donnant de la nano poudre à mélanger au liquide et dépôt direct dans le liquide par pulvérisation cathodique sous vide

Figure I-2: Nanoparticule (Ag) & Nanoparticule (TiO2)

Figure I-3: Exemples de nano fluides aqueux et opaques avec seulement 1 % de nanoparticules de diverses natures

Figure I-4: conductivité thermique de nano fluide

Figure II -1 : Schéma du transfert de chaleur convectif

Figure II -2: Schéma du transfert de chaleur conductif

Figure II -3: Schéma du transfert de chaleur radiatif

Figure II -4 : Types d'ailettes [2] (a) ailette longitudinale à profil rectangulaire, (b) tube cylindrique avec ailette de type (a), ailette longitudinale à profil triangulaire(c) ; parabolique(d), Tube cylindrique équipé d'une ailette radiale à profil rectangulaire(e) trapézoïdal(f) Epine cylindrique(g) ; conique(h), parabolique (i)

Figure II -5: Distribution des températures le long d'une ailette

Figure II -6: Représentation d'une barre encastrée et schéma simplifié

Figure II -7: Représentation des flux élémentaires sur une barre encastrée

Figure III -1: Echangeur chaleur à tubes plats utilisant des ailettes conventionnelles

Figure III -2: *Echangeur* de chaleur à tubes plats utilisant des ailettes poreuses

Figure III -3: Pertes de pressions des ailettes conventionnelles et poreuses par rapport au nombre de Reynolds

Figure IV-1 : Schématisation d'une ailette

Figure IV-2: Schéma de l'ailette poreuse convective

Figure V-1 : ailette pleine

Figure V-2: effet du nano fluide

Figure V-3: effet de l'épaisseur de l'ailette

Figure V-4: effet BT/HT

Figure V-5: perméabilité du M.P

Figure V-6: effet de la porosité du M.P

Figure V-7: effet de l'épaisseur de l'ailette poreuse

Figure V-8: effet du rapport des conductivités nano fluide/solide

Liste des Tableaux

Tableau 01 : Métal pour oxydes métallique carbone

Tableau 2 : Modèles théoriques de la conductivité thermique des nano-fluides.

INTRODUCTION GENERALE

La théorie du transfert de la chaleur est une science qui étudie la façon dont la chaleur se propage d'une région a une autre sous l'influence d'une différence de température. Les phénomènes du transfert de chaleur sont très importants dans beaucoup de domaines technologiques. Comme la conception des appareils thermiques dans l'industrie. Le calcul thermique dans les constructions, les industries pétrochimiques, etc. , il est prouvé que le transfert de chaleur reste un domaine très vaste et compliqué dans les processus réels. La conduction, la convection et parfois le rayonnement interviennent simultanément dans l'amélioration du transfert d'un système avec le milieu extérieur. De ce fait, la conception thermique des appareillages ne peut être menée à bien qu'à la suite d'une connaissance et compréhension des phénomènes liés.

Le développement considérable et récent des recherches traitant des nano fluides est dû au fait qu'il est possible, pour certaines applications, d'accroitre de façon appréciable les transferts de chaleur en introduisant dans un fluide pur une faible concentration de nanoparticules. Rappelons que les nano fluides sont des solutions colloïdales obtenues en dispersant dans un fluide de base des particules solides de taille nanométrique ($10^{-9}m$). A très faible concentrations, certaines de ces solutions se sont révélées très efficaces pour améliorer, sous certaines conditions les transferts de chaleur.

Le transfert de chaleur dans un nano fluide dépend donc à la fois des propriétés thermo physiques de la phase solide et de la phase liquide.

L'étude du transfert thermique dans les échangeurs de chaleur tient aujourd'hui une place capitale dans la conception de ces derniers. Plusieurs méthodes de refroidissement ont été étudiées dans le but d'améliorer le transfert de chaleur et d'augmenter leur efficacité soit par la méthode classique de refroidissement par convection naturelle ou bien par l'utilisation d'un fluide caloporteur adéquat.

Par ailleurs, de nombreuses applications sont concernées par ces nanofluides et on pourra affirmer que là où il est possible de transférer ou d'évacuer plus de chaleur, ces suspensions seront d'un intérêt certain.

Dans les domaines classiques d'évacuation de la chaleur, l'intensification est réalisée souvent par le biais d'ailettes pleines ou classiques permettant d'augmenter les surfaces de convection. En réalité,

ces ailettes sont l'objet d'une interaction de conduction-convection avec le fluide externe. Depuis au moins 70 ans que cette technique est largement utilisée, bien que impliquant de la matière jugée onéreuse. Pour pallier à ce défaut économique majeur, l'apparition beaucoup plus récente d'ailettes poreuses et brevetées suscitent un intérêt très prometteur, en raison des couts moindres et donc des gains appréciables sachant que plusieurs industries sont impliquées. Une autre raison de la possibilité d'utilisation de ces ailettes poreuses réside dans la légèreté du produit étant donné sa porosité élevée, allant dans le sens de la miniaturisation des équipements.

L'objectif de ce travail est donc de simuler numériquement le transfert de chaleur par convection dans les ailettes pleines ou poreuses convectant avec un nano fluide. Le but essentiel de cette étude est de simuler de manière simple les distributions des températures dans de telles configurations, en mettant en évidence les paramètres influant ces distributions, synonymes d'efficacité.

Ce mémoire est organisé en cinq chapitres.

Le premier chapitre, présente les connaissances nécessaires pour la compréhension de ces nouveaux fluides que sont les nanofluides en axant principalement sur leurs propriétés thermophysiques. Si dans une approche plus complexe, faisant intervenir les équations de conservations de la masse, des quantités de mouvement et d'énergie, il sera présenté dans ce mémoire une approche plus simple, liant la conductivité thermique du nanofluide avec la concentration des nanoparticules d'une part et, mettant en exergue le degré de porosité de l'ailette sur la distribution d'autre part. En plus, l'effet de la perméabilité de l'ailette poreuse sera étudié ainsi que le rapport des conductivités thermiques entre le nanofluide et l'ailette, ce qui constituent une originalité dans la compréhension de l'interaction nanofluide/ailette poreuse.

Dans le 2ème chapitre, nous présentons les ailettes classiques ou pleines ainsi que les formes géométriques classiques, les calculs relatifs à ces surfaces auxiliaires. Ainsi la formulation mathématique des équations régissant le phénomène étudié avec les conditions aux limites sera revue et les solutions exprimées. Dans ce même chapitre, l'efficacité recherchée de l'ailette est définie et

son lien avec la distribution des températures est montrée.

La nouveauté relative des ailettes poreuses est présentée dans un 3ème chapitre, à travers la description de son implémentation dans un échangeur de chaleur classique. L'exposé est délibérément choisi court et la modélisation de l'ailette radiale (circulaire) poreuse est reportée dans un quatrième chapitre, permettant ainsi de différencier sa modélisation mathématique par rapport à celle classique. Là, la présentation est étendue pour permettre l'introduction à la fois de la porosité et la conductivité thermique du complexe poreux/matériau.

Le 5ème et dernier chapitre et consacré à la présentation desdistributions des températures de l'ailette circulaire, poreuse convectante dans un nanofluide à travers une simulation. Les résultats obtenus via le logiciel Matlab dans lequel le modèle mathématique déduit sera implémenté, sont sous forme de graphes menant à une analyse paramétrique. Ces courbes seront interprétées suivant les écoulements et la thermique.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale qui synthétise les différents résultats obtenus.

Chapitre I: Les nano fluides

I.1. Introduction :

Les Nanosciences étudient la structure de la matière au niveau moléculaire donc à l'échelle nanométrique dans le but d'innover dans de nombreux domaines tels que : l'environnement, la production et le stockage de l'énergie, le refroidissement des composants électroniques au moyen d'écoulements simples ou diphasiques dans des micro-canaux, la biologie, le diagnostic médical, le traitement de l'eau, etc.…

Les nano fluides sont des solutions colloïdales composées de particules de taille nanométrique en suspension dans un liquide. Cette proposition a été prédite par Choi en 1995 dans le laboratoire national d'Argonne. En fait, Leurs propriétés thermiques, une fois élaborées ont été considéré prometteuses et ont fait l'objet par suite d'intenses investigations durant les deux dernières décennies.

Le développement des nanotechnologies dans ce sens constitue un défi pour les années à venir. En ce qui concerne les applications dans le domaine de transfert de chaleur, des études menées depuis une dizaine d'années ont montré que dans certaines conditions, l'ajout de particules nanométriques dans un fluide de base produit des nano fluides. L'élément supplémentaire par rapport au fluide base est une nanoparticule, qui est un assemblage de quelques centaines à quelques milliers d'atomes, conduisant à un objet dont au moins l'une des dimensions est de taille nanométrique ($\leq$100nm)

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 pratique et sont très étudiées de nos jours. De nombreux physiciens et chimistes les synthétisent, d'autres physiciens les étudient afin de comprendre la physique de ces objets nanométriques et des biologistes les utilisent comme marqueurs cellulaires.

Parmi Les particules les plus utilisées pour obtenir des nano fluides on peut citer l'oxyde d'aluminium **(Al2O3)**, l'Oxyde de Cuivre **(CuO)**, le cuivre **(Cu)**, l'aluminium **(Al)**, l'or **(Au)**, l'argent **(Ag)**, les nanotubes de carbone, le silicium **(Si)**, le dioxyde de titane **(TiO2)**. En les plaçant dans des liquides de base, elles modifient de manière significative la conductivité thermique du fluide porteur et donc

permettent d'augmenter le transfert de chaleur par rapport au cas de liquides de base traditionnels purs comme (l'eau, l'éthylène-glycol **(EG)**, les huiles, le toluène).

Différents modèles ont été élaborés en vue d'expliquer cette remarquable amélioration des transferts convectifs, mais la confrontation entre ces modèles pour évaluer la conductivité thermique effective des nano fluides, montre que ces derniers n'approximent pas de façon satisfaisante les expériences réalisées sur les nano fluides avec différentes variétés de nanoparticules et de fluides porteurs tels que : eau, éthylène glycol,…

La conductivité thermique des nano fluides peut être significativement plus élevée que celle des fluides caloporteurs purs.

L'explication des raisons de cette forte augmentation a été faite par **Keblinski et al. [1]** qui ont proposé quatre possibilités de mécanismes e.g. l'agitation microscopique brownienne des nanoparticules, liée à la taille nanométrique des particules, qui minimise les problèmes de sédimentation rencontrés avec des particules de plus grandes dimensions, la stratification au niveau moléculaire du liquide à l'interface liquide / particule, la nature balistique de transport de chaleur dans les nanoparticules (Les phonons), et l'effet de la sédimentation rencontré avec des particules de plus grande dimension.

Les mesures disponibles de la conductivité thermique de différents nano fluides ne sont pas concordantes. Pour comprendre les phénomènes mis en jeu dans les nano fluides, des expériences supplémentaires sont nécessaires pour arriver à une bonne compréhension des phénomènes mis en jeu dans les nano fluides. Pour l'instant aucune des théories physiques proposées ne rend compte des résultats expérimentaux obtenus.

De nombreuses recherches ont été menées sur cette nouvelle classe de fluides caloporteurs afin de permettre une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu, et mettre ainsi au point des fluides plus performants. La forte conductivité thermique des nano fluides les désigne en effet comme des candidats potentiels pour le remplacement des fluides porteurs utilisés dans les dissipateurs de chaleur à micro-canaux en forme rectangulaire et dans les écoulements entre disques

coaxiaux, en vue d'améliorer les performances de ces systèmes. Certaines limitations susceptibles de réduire les performances des nano fluides utilisés à la place des fluides caloporteurs purs, ont aussi été étudiées.

L'utilisation des nano fluides comme fluides caloporteurs dans les micro-canaux dissipateurs de chaleur en forme rectangulaire et entre deux disques coaxiaux a montré que l'addition de nanoparticules dans un liquide augmente sa viscosité et de ce fait les pertes de charge. Par ailleurs, les études expérimentales en convection forcée semblent montrer un effet supplémentaire sur le coefficient d'échange, qu'on peut attribuer directement à l'augmentation de la conductivité thermique.

Dans ce chapitre nous allons donner un bref aperçu des différents types de transferts thermiques et de leur influence respective dans des dispositifs nano-fluidiques. Aux échelles nanométriques les relations fondamentales régissant les transferts thermiques restent inchangées. En effet la loi de Fourier reste valable dans les domaines d'écoulement dont les échelles de longueur sont grandes devant le libre parcours moyen des atomes.

Ainsi, l'équation de la chaleur en régime conductif reste inchangée. Il convient de comprendre quels sont les types de transferts thermiques prédominants dans les nano fluides. Mais, nous nous intéresserons exclusivement au transfert thermique par conduction et par convection et les équations qui les régissent en régime permanent, ainsi nous ne prenons pas en compte le transfert radiatif.

I.2. Généralités sur les nano fluides et nanoparticules :

Les fluides caloporteurs de base souvent utilisés dans les applications de refroidissement ou de chauffage ont des conductivités thermiques très faibles qui limitent parfois leur capacité de transfert de chaleur. L'utilisation des nano fluides, particules de taille nanométrique de conductivité thermique très élevée en suspension dans un fluide caloporteur, est susceptible d'apporter des gains en performances thermiques très importants.

Une nanoparticule est un assemblage de quelque centaine à quelques milliers d'atomes conduisant à un objet dont au moins l'un objet dont au moins l'une des dimensions est de taille nanométrique (1-100 nm), 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, et sont très étudiées actuellement.

I.2.1. Production des nano fluides et nanoparticules :

Les expériences effectuées sur les fluides caloporteurs avec des particules de taille micrométrique (10^{-6} m) ont montré que certains problèmes pouvaient être engendrés par l'utilisation de ces derniers tel que le problème de sédimentation des particules, l'augmentation des pertes de charge etc…. tandis que pour des particules de l'ordre du nanomètre (10^{-9} m), ces problèmes sont pratiquement insignifiants.

Tout en supposant que la suspension est stable et durable, l'agglomération de particules est négligeable, aucun changement chimique du fluide, et la préparation des nano fluides ne peut se faire par l'une des méthodes :

1- La méthode à une seule étape : basée sue la vaporisation d'un matériau solide sous vide, puis condensation directe de sa vapeur dans le liquide.

2- La méthode à deux étapes : elle consiste d'abord à la fabrication d'une nano poudre sèche, puis le mélange et la dispersion de celle-ci dans le liquide. Ces procèdes de fabrication sont la nature physique ou chimique. Ils font l'objet de beaucoup de recherches pour améliorer le cout de production qui reste toutefois élevé vu les difficultés de mise en œuvre et pour obtenir des particules de taille voulue. Chaque méthode a ses inconvénients et certaines ne sont pas aptes à produire de grandes quantités de nanoparticules pour une production de masse vu les contraintes inhérentes au procédé, notamment les méthodes en une étape (**Figure I-1)**. Les principaux moyens peuvent être :

Le mécano synthèse (broyage à haute énergie)

- La précipitation chimique (réduction de sels métalliques par exemple)
- Les dépôts chimiques ou physiques en phase vapeur (CVD ou PVD)
- Les dépôts chimiques en phase vapeur assistés par plasma (PECVD)
- La condensation de vapeurs par détente brutale dans des tuyères supersoniques
- La pulvérisation cathodique radiofréquence
- La sublimation par ablation laser (vaporisation d'un échantillon par impulsion laser)

- La pyrolyse laser (interaction entre un faisceau laser continu et un flux de réactifs)
- La désintégration d'électrodes submergées par passage d'étincelles (comme pour un usinage par électroérosion).

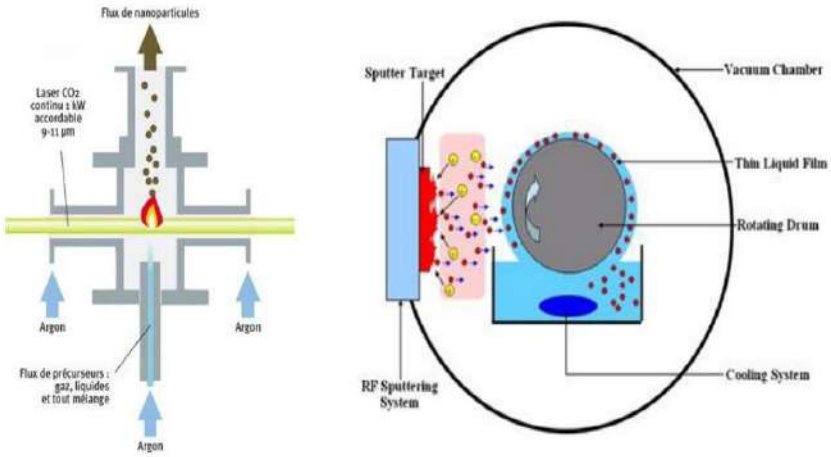


Figure I-1 : Pyrolyse laser donnant de la nano poudre à mélanger au liquide et dépôt direct dans le liquide par pulvérisation cathodique sous vide

I.2.2. Types de nanoparticules

- 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).

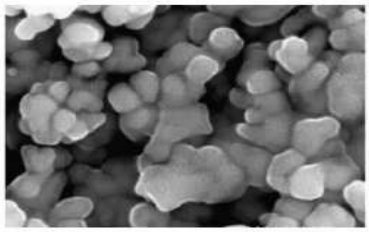
- Les nanoparticules métalliques :

1- L'aluminium (AL).

2- Le cuivre (Cu).

3- L'or (Au).

4- L'argent (Ag).



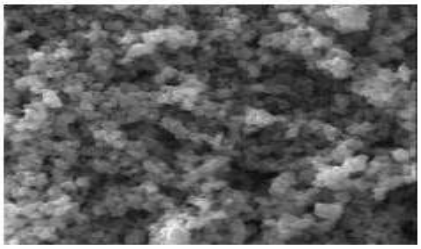


Figure I-2: Nanoparticule (Ag) Nanoparticule (TiO2)

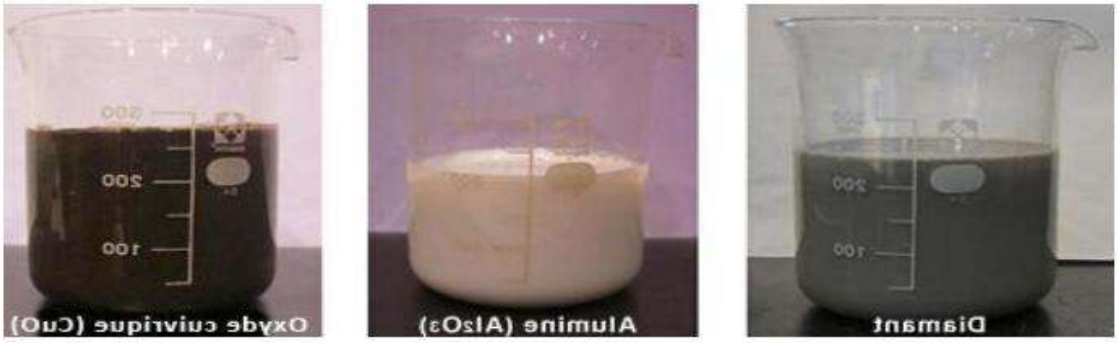


Figure I-3: Exemples de nano fluides aqueux et opaques avec seulement 1 % de nanoparticules de diverses natures

I.3. nano fluides et caractéristiques :

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.

En effet, les fluides de base souvent utilisés dans les applications de refroidissement ou de chauffage ont des conductivités thermiques très faibles qui limitent leur capacité de transfert de chaleur.

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

I.3.1. Types de nanoparticules et leurs effets sur les nano fluides :

Les propriétés thermo physiques (conductivité thermique, viscosité dynamique et cinématique, capacité thermique massique, etc.) sont profondément modifiées par l'ajout de nanoparticules et un grand nombre de paramètres peuvent avoir un effet non négligeable sur cette

déviation (le matériau, la taille, le rapport d'aspect, la concentration des particules en suspension, la conductivité du fluide de base, la température du milieu).

De nombreux groupes de recherche tentent de comprendre quels sont le ou les mécanismes à l'origine de telles différences mais aucune phénoménologie n'a pu être encore formulée de manière concise et satisfaisante.

I.3.2. Types de nanoparticules :

Différents types de nanomatériaux ont été utilisés pour fabriquer des nano fluides. Nous pouvons de manière générale distinguer deux types de nano fluides selon leurs formes (sphère, cylindre, agglomérat) et aussi la concentration volumique de particules.

Tableau 1 : Metal pur Oxides métalliques Carbure

Al	Al_2O_3	Diamant
Cu	CuO	Graphite
Fe	$Fe_2O_3Fe_3O_4$	Nanotube à paroi simple
Ag	Ag_2O	Nanotubes multi-parois
Zn	ZnO	
Ti	TiO_2	

I.3.3. Nano fluides à base de nanotubes de carbone :

Un nanotube de carbone est une structure cristalline particulière du carbone. Ces tubes de quelques nanomètres de diamètre peuvent atteindre plusieurs centaines de micromètres de longueur. Les nanotubes peuvent être constitués d'une seule couche de graphème enroulée sur elle-même et sont alors appelés « nanotube mono feuillet » (SWCNT), décrivant une géométrie tubulaire. Ils peuvent aussi être constitués d'un enroulement de plusieurs couches de graphème et sont alors appelés « nanotube multi feuillets » (MWCNT)

La principale difficulté rencontrée lors de la préparation des nano fluides à base de nanotubes de carbone est la dispersion uniforme et stable dans le temps de ces nanotubes dans tout le volume du liquide de base**.** Pour remédier à ce problème de dispersion, on réalise une fonctionnalisation de surface des nanotubes. Malheureusement lors de cette fonctionnalisation, des agents chimiques sont greffés à la surface du nanotube et ils peuvent induire une résistance thermique interfaciale qui atténue les transferts thermiques entre le fluide et le nanotube.

D'un point de vue thermique, une fonctionnalisation adéquate du nanotube doit augmenter son affinité pour le liquide hôte sans diminuer notablement ses propriétés thermiques. Les nanotubes de carbone présentent la plus grande conductivité thermique connue à ce jour : ≈ 6600 (W⁄m. K) à température ambiante**.**

Ce type de fonctionnalisation présenterait un double intérêt, car elle permettrait d'améliorer la stabilité de la suspension tout en améliorant les propriétés de transfert thermique du nano fluide.

Une autre voie est possible en utilisant, quand cela présente un intérêt, des fluides hôtes permettant une mise en suspension des nanotubes sans fonctionnalisation de surface.

I.3.4. Nano fluides à base de nanoparticules métalliques ou des oxydes :

Plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés pour la préparation de nano fluides à base de nanoparticules. Ces nanoparticules peuvent être synthétisées à partir de semi-conducteurs, de métaux ou d'oxydes métalliques. Certains oxydes métalliques ont entraîné des augmentations de conductivité thermique de l'ordre de 40% pour des concentrations volumiques inférieures à 1%**.**

D'autres études portant sur la dispersion de nanoparticules de diverses natures ont aussi permis d'atteindre des résultats similaires, proches de ceux obtenus avec des nanotubes de carbone. Là aussi il est difficile de comparer les différentes études expérimentales portant sur les nano fluides car chacune d'entre elles a été menée pour des particules de tailles diverses et des méthodes de préparations différentes.

Or la taille des particules et la préparation des échantillons sont des facteurs déterminants qui influent fortement sur les résultats obtenus. D'autre part les théories classiques des mélanges de (**Maxwell** et de **Hamilton)** qui permettent de décrire convenablement la conductivité thermique de suspensions de particules microscopiques dans un liquide ne sont pas aptes à décrire les

comportements obtenus pour la plupart des nano fluides. D'autres approches théoriques ont vu le jour pour tenter de décrire les augmentations de conductivité thermique des nano fluides.

Des phénomènes comme la contribution du mouvement brownien ou les échanges de phonons entre les particules ont été étudiés.

Dans le cadre de cette synthèse bibliographique, on s'intéressera principalement à l'étude des nano fluides à base de nanoparticules des oxydes.

I-3.5. Les nanoparticules métalliques :

Les nanoparticules métalliques ont des conductivités thermiques plus grandes que celles des oxydes métalliques correspondants. On devrait s'attendre à trouver des valeurs de conductivité thermique du même ordre que celle obtenues avec les oxydes métalliques correspondants mais avec des fractions volumiques en nanoparticules métalliques beaucoup plus faibles. La conductivité thermique du cuivre à la température ambiante est environ 700 fois plus grande que celle de l'eau et environ 3000 fois plus grande que celle d'huile du moteur. Xuan et Li ont présenté une étude prouvant que la conductivité thermique augmente avec l'augmentation de la fraction volumique. Le rapport de la conductivité thermique du nano fluide (eau+Cu) sur le fluide de base augmente 75% et de 45% pour le nano fluide (huile+Cu), quand la fraction volumique des nanoparticules varie entre 2.5% à 7.5%. Théoriquement, Xuan et al ont utilisé le modèle de Hamilton- Crosser pour étudier la conductivité thermique des mêmes nano fluides. Ils ont obtenu des résultats très proches des résultats expérimentaux.

I.3.6 Propriétés thermo physiques des nano fluides :

L'introduction de nanoparticules solides dans un fluide modifie ses propriétés physiques et en particulier sa conductivité thermique et sa viscosité et la masse volumique et la fraction volumique.

I.3.6.1 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 du fait que les nanoparticules se déplacent en tant que des corps solides à une vitesse donnée et interrompent, par conséquent, le mouvement du fluide. La viscosité obtenue devient la viscosité dynamique du nano fluide 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 nano fluide.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \qquad \text{…….. (1)}$$

I.3.6.2 La masse volumique effective du nano fluide :

La détermination de la masse volumique d'un nano fluide 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 et donnée par la relation suivante :

$$\rho_{nf} = \varphi\rho_f + (1-\varphi)\rho_f \qquad \text{……. (05)}$$

I.3.6.3 La conductivité thermique effective du nano fluide :

La conductivité thermique généralement est une propriété importante et principalement dans notre étude 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 dépends de la température.

En plus de sa variation en fonction de la température, la conductivité thermique du nano fluide varie en fonction de la fraction volumique aussi. La conductivité thermique d'un nano fluide peut être spécifiée selon plusieurs modèles qui se trouvent dans la littérature. On cite seulement les deux modèles suivants parce qu'ils sont basés sur la théorie effective du milieu (effective medium théorie) qui stipule que l'application des équations gouvernant un milieu homogène peut être étendues pour des milieux hétérogènes.

$$\mu_{nf}=\frac{K_s-\varphi(n-1)(K_s+K_f)+(n-1)K_f}{(K_s+(n-1)K_f-\varphi(K_s-K_f)}K_f \qquad \text{.....(06)}$$

- La chaleur spécifique et le coefficient d'expansion thermique du nano fluide est donnée :

$$(C_p)_{nf}=(1-\varphi)(C_p)_f+\varphi(C_p)_s \qquad \text{.....(07)}$$

$$(\beta_p)_{nf}=(1-\varphi)(\beta_p)_f+\varphi(\beta_p)_s \qquad \text{.....(08)}$$



Figure I-4: conductivité thermique de nano fluide

Il existe plusieurs expressions et mesures expérimentales dédiées à la conductivité thermique des nanofluides.

-En considérant l'interaction inter-particule pour la fraction de volume plus élevé, Bruggeman **[66]** a modifié l'expression de Maxwell.

-Se basant sur le modèle de Bruggeman, Hamilton et Crosser **[67]** ont développé une théorie modifiée de Maxwell pour des systèmes de deux-composants contenant différentes formes de particules et dimensions particulaires s'étendant entre les millimètres et les micromètres.

-Yu et Choi **[68]** ont modifié le modèle de H-C en incluant la couche interfaciale de la particule-liquide pour la prévision de la conductivité thermique des nano-fluides ayant les particules de forme ellipsoïde.

-De même, Xuan et Li **[69]** s'appuient sur le mouvement Brownien de la particule dans le fluide de base pour l'expression de la conductivité thermique.

-Kumar et al. **[70]** ont modifié le modèle du Maxwell afin de prendre en compte la viscosité du fluide de base et de sa dépendance en température.

-Pour Prasher et al. **[71],** c'est la convection due au mouvement Brownien qui sera la base d sa proposition.

-Un modèle de cellules de nano-fluide contenant des nano-fibres de carbone est proposé par Yamada Ota **[72].**

-Hesselman et Johnson **[73]** ont proposé un nouveau modèle pour les nano-fluides dilués, en considérant une barrière à résistance thermique à l'interface des matériaux pour la particule sphérique, cylindrique et plate.

-Jang et Choi **[74]** ont dérivé une expression sur la base de l'épaisseur de couche liquide et du mouvement Brownien de la particule dispersée.

-Wang et al. **[75]** ont aussi modifié le modèle de Maxwell tenant compte de l'effet de la distribution des particules agglomérées.

-Pour les suspensions, Meibodi et al. **[76]** ont employé l'approche de résistance thermique pour établir une expression.

-Une corrélation a été présentée par Corcione **[77]** se basant sur le point de congélation du fluide de base.

Ces expressions ainsi que d'autres les plus couramment citées sont indiquées dans le **Tableau 2.** Elles sont déduites comme il a été mentionné à partir des considérations du mouvement Brownien seul ou avec la température, de l'interaction des nanoparticules, du concept de nano-couche inter-faciale, parfois de l'agglomération et de la taille et formes des particules…

Tableau 2 : Modèles théoriques de la conductivité thermique des nano-fluides.

Auteurs	Expression mathématique de k du nano-fluide
Maxwell **[63]**	$\frac{k}{k_f}=\frac{1+2\beta\varphi}{1-\beta\varphi}\quad \beta=\frac{k_p-k_f}{k_p+2k_f}$
Brugge man **[66]**	$\frac{k}{k_f}=k_f\frac{\left[(3\varphi-1)\frac{k_p}{k_f}+(2-3\varphi)+\sqrt{\Delta}\right]}{4}$ $\Delta=(3\varphi-1)^2\left(\frac{k_p}{k_f}\right)^2+(2-3\varphi)^2+2(2+9\varphi-9\varphi^2)\left(\frac{k_p}{k_f}\right)$
Hashin et Shtrikm an **[78]**	$k_f\left[1+\frac{3\varphi[k]}{3k_f+(1-\varphi)k}\right]\leq k\leq\left[1-\frac{3(1-\varphi)[k]}{3k_p-\varphi[k]}\right]k_p.$
Hamilto n et Crosser **[67]**	$\frac{k}{k_f}=k_f\left[\frac{k_p+(n-1)k_f-(n-1)(k_f-k_p)\varphi}{k_p+(n-1)k_f+(k_f-k_p)\varphi}\right]$
Yu et Choi **[68]**	$\frac{k}{k_f}=\left(1+\frac{n\varphi A}{1-\varphi A}\right)k_1$ $A=\frac{1}{3}\sum_{j=a,b,c}\frac{k_{pj}-k_f}{k_{pj}+(n-1)k_f}.$
Xuan et Lie **[70]**	$\frac{k}{k_f}=\frac{k_p+2k_f-2(k_f-k_p)\varphi}{k_p+2k_f+(k_f-k_p)\varphi}k_f+\frac{\rho_p\varphi c_p}{2}\sqrt{\frac{k_BT}{3\pi r_c\mu}}$
Kumar et al. [71]	$\frac{k}{k_f}=k_b+c\frac{2k_BT}{\pi\eta d^2}\frac{\varphi r_b}{k_b(1-\varphi)r_b}k_b.$
Prasher et al. **[71]**	$\frac{k}{k_f}=\left(1+A\mathrm{Re}^m\,\mathrm{Pr}^{0.333}\varphi\right)\left[\frac{k_p+2k_f+2(k_p-k_f)\varphi}{k_p+2k_f-(k_p-k_f)\varphi}\right]k_p,$ $h=\frac{k_p}{\alpha(1+A\mathrm{Re}^m\,\mathrm{Pr}^{0.333}\varphi)},\ \mathrm{Re}=\frac{1}{\nu}\sqrt{\frac{18k_fT}{\pi\rho_pd_p}},$
Yamada et Ota **[72]**	$\frac{k}{k_f}=\frac{\frac{k_p}{k_f}+K-K\varphi(1-k_p/k_f)}{\frac{k_p}{k_f}+K+\varphi(1-k_p/k_f)}k_f \qquad K=2\varphi^{0.2}(l_p/d_p)$

Auteurs	Expression mathématique de k du nano-fluide
Hesselman et Johnson **[73]**	$\frac{k}{k_f}=\frac{[\alpha(1+2\beta+2)]+2\varphi[\alpha(1-\beta)-1]}{[\alpha(1+2\beta+2)]-\varphi[\alpha(1-\beta)-1]}$
Jang et Choi **[74]**	$\frac{k}{k_f}=k_f+(1-\varphi)+k_p\varphi+\varphi h\delta_T$
Wang et al**.** **[75]**	$\frac{k}{k_f}=\frac{(1-\varphi)+3\varphi\int_0^\infty\frac{k_{cl}(r)n(r)}{k_{cl}(r)+2k_f}dr}{(1-\varphi)+3\varphi\int_0^\infty\frac{k_fn(r)}{k_{cl}(r)+2k_f}dr}$
Meibodi et al. **[76]**	$\frac{k}{k_f}=\frac{\alpha'\left(1+\frac{\Delta}{d}\right)}{1+\frac{\alpha'\Delta}{d}}\qquad \alpha'=k_p/k_f.$
Corcione **[77]**	$\frac{k}{k_f}=1+4.4\mathrm{Re}^{0.4}\,\mathrm{Pr}^{0.66}\left(\frac{T}{T_{fr}}\right)^{10}\left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.03}\varphi^{0.66}$
Avsec et al. **[79]**	$\frac{k}{k_f}=\left[\frac{k_p+(n-1)k_f-(n-1)\alpha_e(k_f-k_p)}{k_p+(n-1)k_f+\alpha_e(k_f-k_p)}\right]$
Pak et al. **[80]**	$\frac{k}{k_f}=1+7.47\varphi$
Chandrasekar et al. [**[81]**	$\frac{k}{k_f}=\left[\frac{k_p+(n-1)k_f+(n-1)(1+\beta)^3\varphi(k_p-k_f)}{k_p+(n-1)k_f-(1+\beta)^3\varphi(k_p-k_f)}\right]+\frac{C\varphi(T-T_0)}{\mu k a^4}$
Leong et al. **[82]**	$\frac{k}{k_f}=\frac{(k_p-k_{lr})\varphi k_p[2\gamma_1^3-\gamma^3+1]+(k_p+2k_{lr})\gamma_1^3[\varphi\gamma^3(k_{lr}-k_f)+k_f]}{\gamma_1^3(k_p+k_{lr})-(k_p-k_{lr})\varphi[\gamma_1^3+\gamma^3-1]}$
Gupta et al. **[83]**	$k=k_f(0.0556Pe+0.1649Pe^2-0.0391Pe^3+0.0034Pe^4)$
Xie et al. **[84]**	$\frac{k}{k_f}=1+3\Theta\varphi_T+\frac{3\Theta^2\varphi_T^2}{1-\Theta\varphi_T}$
Timofeeva et al. **[85]**	$\frac{k}{k_f}=1+3\varphi$

I.3.6.4

Effets des grandeurs significatives sur la conductivité thermique suivant les études expérimentales

Les nano-fluides ont été l'objet d'un grand intérêt pendant la dernière décennie principalement due à la conductivité thermique affichée et élevée en rapport du fluide de base et ceci avec un petit pourcentage des nanoparticules **[85-87].** Par exemple, Masuda **[88]** a rapporté une augmentation de la conductivité thermique de 30% avec 4.3 % en volume de nanoparticule d'AlO_3. Eastman et al. **[86]** ont observé plus de 40% dans 0.3 % en volume de CuO. En conséquence, la conductivité thermique des nano-fluides dépend de beaucoup de facteurs tels que la fraction de volume de particules, la composition des particules, la taille et la forme de la particule, …. Les expérimentateurs ont rapporté ces variations de manière exhaustive. Dans ce qui suit, l'analyse de synthèse est effectuée suivant les données recueillies.

I.3.6.5 La fraction volumique (φ) :

La fraction volumique est la propriété la plus importante pour le nano fluide, puisque le calcul de tous les autres propriétés se base sur la fraction volumique du nano fluide. 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 varie entre 0 (fluide de base pure) et 1.

La fraction volumique est donnée par la relation suivante :

$$\varphi = \frac{V_p}{V_T} \qquad \text{…… (09)}$$

V_p: Volume de solide (nanoparticules) [m3]. V_T : Volume totale [m3]

I-4. Modèle mathématique pour un nano fluide (mélange fluide de base nanoparticules) :

Les modèles existants pour la modélisation des écoulements des nano fluides sont basés essentiellement sur les deux approches de description de mouvement en mécanique des fluides, à savoir l'approche de Lagrange qui considère que les nanoparticules, en mouvement dans le fluide, comme des sources d'énergie, quantité de mouvement et de masse pour le fluide de base.

Dans cette approche, les températures et les trajectoires des nanoparticules sont obtenues en résolvant des équations différentielles ordinaires qui décrivent l'échange d'énergie et de quantité de mouvement entre les nanoparticules et le fluide de base. Or, les modèles basés sur l'approche d'Euler considèrent que les nano fluides sont des milieux continus.

Parmi ces modèles, on distingue le plus simple qui s'appelle modèle homogène d'Euler dans lequel on considère le nano fluide comme un mélange homogène comportant deux phases à la même vitesse et à la même température. Ce mélange a en tout point, des propriétés thermodynamiques qui sont en fonction de la concentration Ø.

La convection forcée engendrée par des transferts de chaleur au voisinage des surfaces chauffées a été largement étudiée tant au niveau théorique qu'expérimental. En mécanique des fluides, en supposant que le fluide est un milieu continu, on peut utiliser les lois classiques de conservation suivantes :

* Loi de Lavoisier (principe de conservation de la masse) pour établir l'équation de continuité.

*Deuxième loi de newton (principe de conservation de la quantité de mouvement) pour établir les équations de quantité de mouvement (Navier-Stokes).

*Loi de conservation d'énergie (Premier principe de la thermodynamique) pour établir l'équation de l'énergie.

a) Équation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial_u}{\partial_x} + \frac{\partial_v}{\partial_y} = 0 \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (10)$$

b) Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes) :

• Équation de conservation de quantité de mouvement suivant x :

$$u\frac{\partial_u}{\partial_x} + v\frac{\partial_u}{\partial_y} = -\frac{1}{\rho_{nf}}\frac{\partial_p}{\partial_x} + v_{nf}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (11)$$

• Équation de conservation de quantité de mouvement suivant y :

$$u\frac{\partial_v}{\partial_x} + v\frac{\partial_v}{\partial_y} = -\frac{1}{\rho_{nf}}\frac{\partial_p}{\partial_x} + v_{nf}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (12)$$

a) Équation de conservation de l'énergie :

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{\alpha_{nf}}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (13)$$

La performance d'un modèle nano fluide utilisé dépend des :

-Equations gouvernant le phénomène.

-Les conditions aux limites imposées.

-Les équations de fermetures utilisées en cas de régime turbulent.

Les équations qui gouvernent le nano fluide semblent performantes par ce qu'elles représentent des équations de conservation. Excepté le cas où le nano fluide sera autre qu'un fluide newtonien.

Les conditions aux limites utilisées pour les nano fluides sont identiques à celles utilisées au niveau des parois par exemple (pas de pénétration, pas de mouvement au niveau d'une paroi fixe, une température égale,....)

Dans de telles conditions le nano fluide est considéré comme une suspension diluée et les particules n'ont aucun effet sur les parois.

Les équations de fermeture dans ce modèle sont seulement les équations correspondantes à $\lambda_{nf}, \mu_{nf}, \rho_{nf}$ et C_{pnf} .

Beaucoup d'études expérimentales ont été faites pour déterminer les propriétés du nano fluide tout en considérant que le nano fluide soit un mélange homogène et par conséquent toutes les données sont disponible dans les littératures pour calculer ces propriétés ce qui justifie le choix de ce modèle. Il

faut noter que l'approche qui a été prise en considération considère que les particules suspendues dans le fluide de base ne présentent ni sources de masse ni d'énergie à l'écoulement.

Aussi, il est à signaler que les valeurs calculées de la vitesse et température présentent des valeurs moyennées dans l'espace du mélange qui peuvent être différentes des valeurs réelles de la vitesse et la température du fluide de base et les nanoparticules. Surtout lorsque les tailles des nanoparticules deviennent plus importantes.

Les propriétés de transport λ_{nf}, μ_{nf} présentent des valeurs effectives de la viscosité et la conductivité pour le nano fluide et sont données par des relations empiriques de fermeture. Ces propriétés de transport font objet de plusieurs travaux de recherche.

I-5. Revue bibliographique succincte sur la convection forcée dans les nano fluides :

Par définition le terme " convection" désigne un mode de propagation de la chaleur. La convection est une science qui groupe la mécanique des fluides et le transfert de chaleur. L'étude de cette dernière est un domaine de recherche depuis plusieurs décennies. Il existe un grand nombre de publications scientifiques consacrées à l'étude de la convection forcée dans les dissipateurs de chaleur à micro-canaux de forme rectangulaire et entre deux disques coaxiaux. Mais peu d'entre elles ont été consacrées aux nano fluides.

La plupart des études ayant été généralement menées avec de l'eau, de l'huile ou de l'air comme fluide de base. On sait que les transferts par convection peuvent augmenter considérablement en modifiant la configuration de l'écoulement ou en augmentant les surfaces d'échange entre la paroi et le fluide.

Pak et al. Se sont intéressés au transfert de chaleur par convection avec un fluide contenant en suspension des particules d'oxydes métalliques **Al2O3** (13nm) et **TiO2** (27nm)). Les mesures sont effectuées dans une configuration de tube chauffé à densité de flux constante en régime turbulent et les résultats les plus significatifs sont obtenus avec une fraction volumique de nanoparticules de 3%. Ils ont montré que le coefficient de transfert de chaleur est accru de 75% par rapport à celui de l'eau. Cependant, à vitesse débitante identique, le même paramètre h devient inférieur de 12% à celui de

l'eau. Ce résultat est dû au fait que la viscosité du nano fluide est nettement supérieure à celle de l'eau.

Xuan et Li. Ont utilisé le nano fluide **(eau /Cu)** pour mesurer le coefficient d'échange en convection forcée pour des nombres de Reynolds variant de 104 à 2,5.104. Ils ont trouvé que l'ajout des nanoparticules améliore considérablement le transfert convectif. Ainsi pour une fraction volumique des nanoparticules de 2%, le nombre de Nusselt du nano fluide croit de 39% comparé à celui dans l'eau. Ce nombre de Nusselt augmente quand on augmente la fraction volumique ou quand on augmente le nombre de Reynolds. L'inconvénient du recours aux nano fluides dans ce cas est lié à l'augmentation de la viscosité du nano fluide. Il faudrait alors rechercher un compromis pour augmenter le coefficient d'échange convectif en augmentant la fraction volumique et ne pas trop augmenter la viscosité du nano fluide pour pouvoir le mettre plus facilement en mouvement.

Qiang et Li. Ont procédé à une expérimentation similaire de celle réalisée par (**Xuan et Li.** Ils ont également mesuré le facteur d'échange en convection forcée pour le même type de nano fluide **Maïga et al.** Ont étudié numériquement l'hydrodynamique et les caractéristiques thermiques des nano fluides dans un tube chauffé en utilisant un modèle monophasique pour les régimes laminaire et turbulent. Leurs résultats montrent que l'addition des nanoparticules conduit à une augmentation du transfert de chaleur comparé au fluide seul. Ils ont trouvé que le nano fluide (**éthylène glycol / γ-Al2O3)** assure un meilleur transfert de chaleur que le nano fluide **(eau/γ-Al2O3)**. Ils ont rapporté que le coefficient de transfert de chaleur augmente de 80% pour le nano fluide **(éthylène glycol /γ-Al2O3)** tandis qu'il augmente de 60% pour le nano fluide **(eau/γ-Al2O3)** pour une fraction volumique φ= 10% de nanoparticule **Al2O3**.

I.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné un bref aperçu des résultats obtenus dans des recherches antécédentes sur les écoulements accompagnés de transferts thermiques, en régimes laminaire ou turbulent, dans les dispositifs nano fluidiques, en particulier dans les dissipateurs à micro-canaux et les systèmes de refroidissements par jets impactant.

Afin de refroidir avec grande efficacité, les performances thermiques et hydrodynamiques peuvent être améliorées en utilisant deux approches. La première approche

consiste à trouver une configuration optimale du système et la seconde approche consiste en l'amélioration des propriétés de transfert de chaleur du fluide de travail. La deuxième approche peut être réalisée par l'ajout de nanoparticules aux fluides de base, ce qui peut produire une augmentation considérable de transfert de chaleur.

Cette recherche bibliographique a aussi montré l'importance de la prise en compte de la variation des propriétés thermo physiques des nano fluides en fonction de la température lors des simulations.

Chapitre II : Ailettes

II.1. Introduction générale :

De notre temps, la gestion optimale de l'énergie est un enjeu stratégique pour toutes Les nations et leur survie dépend de leurs capacités à utiliser et optimiser cette énergie Dans tous les systèmes énergétiques, moteurs de véhicule, réacteur, industrie Pétrochimie les quantités d'énergies mises en jeu sont très importantes. Ainsi, chercheur et industriels ont toujours travaillé à améliorer le rendement de ce système set développé de nouveaux prototypes plus rentables. Dans les machines thermiques (échangeur de chaleur, radiateur) on a besoin de Transmettre la chaleur entre deux fluides ou entre une paroi et un milieu environnant. Lors du changement de phase, il est nécessaire d'évacuer toute la chaleur lors des processus décondensations ou de solidifications.

Ces systèmes ne sont pas toujours performants, lors des opérations de refroidissement Ou de chauffage, particulièrement quand les fluides utilisés présentant un coefficient d'échange faible. Afin de répondre aux exigences en matière de performance, on est appelé à augmenter la surface d'échange en introduisant des ailettes de différentes formes. Ces dernières, offrent de très bonnes solutions en termes d'améliorations du flux de chaleur échangé.

Elles sont très utilisées dans les échangeurs de chaleur, les climatiseurs, les aéroréfrigérants et l'électronique (refroidissement des composants) et elles se présentent sous plusieurs formes géométriques ; rectangulaires, triangulaires, concaves, convexe etc.

Les formes géométriques choisies sont les plus fréquemment rencontrées dans les appareillages thermiques.

Les surfaces étendues ou ailettes sont utilisées pour améliorer le taux de transfert de chaleur entre un solide et un fluide adjacent. Les surfaces étendues de section transversale circulaire sont appelés épingles.

Elles sont largement utilisées dans de nombreux types d'échangeurs de chaleur pour de nombreuses applications en génie thermique telles que, la réfrigération, l'air conditionné (climatisation) et des applications de traitement chimique,…etc. Cependant, dans des procédés de refroidissement et de déshumidification, qui se tiennent dans les équipements de la réfrigération et

du conditionnement de l'air, le transfert de chaleur est accompagné par un transfert de masse en même temps lorsque la température de surface de l'épingle est inférieure à la température de point de condensation (rosée) de l'air entrant.

Dans ce cas, cet air se condense sur la surface de l'épingle. Par conséquent, la performance de ces équipements ou de ces échangeurs de chaleur est principalement fonction de la performance (ou efficacité) d'épingles. Nous cherchons, dans ce thème qui est une initiation à la recherche, d'étudier analytiquement quelques épingles qui fonctionnent sous la condition entièrement humide, c'est-à-dire dans le cas où le transfert de chaleur et de masse se font simultanément en se basant sur les travaux de la référence.

II.1.1. Intérêt des ailettes et de calcul des performances :

La théorie du transfert de la chaleur est une science qui étudie la façon dont la chaleur se propage d'une région à une autre sous l'influence d'une différence de température.

Les phénomènes du transfert de chaleur sont très importants dans beaucoup de domaines technologiques, comme la conception des appareilles thermiques dans l'industrie, le calcul thermique dans les constructions, les industries pétrochimiques, etc.

Le transfert de chaleur reste un domaine très vaste et compliqué car dans les processus réels, les trois modes fondamentaux du transfert à savoir, la conduction, la convection et le rayonnement interviennent simultanément.

L'amélioration du transfert de chaleur d'un système avec le milieu extérieur joue un rôle pertinent dans la conception thermique des appareillages, cette amélioration se fait par le biais des ailettes.

Le calcul et la conception des ailettes trouvent leurs places un champ très vaste extrêmement variées. On peut citer par exemple, les échangeurs thermiques, le refroidissement des composantes électroniques, etc.

Le calcul de la température de quelques ailettes de formes géométriques simples (triangulaire, rectangulaire, demi-sphérique) est nécessaire pour l'efficacité et le rendement des

ailettes , Ce choix de la géométrie n'est pas exhaustif, car les formes géométriques choisies sont les plus fréquemment rencontrées dans les appareillages thermiques.

II.1.2. Mécanismes de transfert de chaleur dans les systèmes :

Afin de maintenir sa température dans des limites où la performance et le fonctionnement ne sont pas compromis, le refroidissement d'un composant générant de la chaleur est essentiel.

D'une manière générale, un transfert de chaleur a lieu par trois mécanismes qui sont la conduction, la convection.et rayonnement En matière d'évacuation de chaleur par conduction, la technique des plaques de fibres de carbone orientées (conduction anisotrope) est incontestablement la plus performante, mais à ce jour réservée à l'aéronautique et au spatial pour une question de coût.

Plus usuellement, la chaleur est transmise à l'air ambiant par des radiateurs et des ventilateurs. Si la charge thermique imposée à l'air ambiant est trop importante, on confine cette chaleur directement dans un fluide caloporteur par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur.

Le transfert de chaleur au fluide réfrigérant peut alors fonctionner soit en mode monophasique en utilisant un liquide ou un gaz (eau simple, eau + glycol, CO2...), soit en mode diphasique (C4 F10, glace binaire (mélange d'eau, méthanol et glace)...)

II.1.3. Convection et Conduction et rayonnement dans une ailette :

II.1.3.1. Convection :

Lorsqu'au sein d'un même fluide (liquide ou gaz) se produit une différence de température, la densité du fluide n'est plus égale partout du fait de la poussée d'Archimède "Tout corps plongé dans un fluide reçoit de la part de ce fluide une poussée verticale dirigée du bas vers le haut, égale au poids du volume de fluide déplacé", cette différence de densité produit un mouvement a sein du liquide. Ce mouvement de brassage, dans lequel les parties les plus

chaudes du fluide ont tendance à s'élever et les parties froides et denses à descendre, s'appelle convection, plus précisément la convection naturelle.

Les mouvements dus uniquement à des différences de température du fluide constituent la convection naturelle comme les mouvements des grandes masses d'air autour de la terre, l'action des vents, la formation des nuages, les courants océaniques ou plus simplement le phénomène d'aspiration d'une cheminée. La convection forcée est obtenue en soumettant le fluide à une augmentation de pression, qui favorisera le brassage du fluide. Lorsqu'un fluide de température∞ est placé en contact avec une surface S de température T, il se crée un flux de chaleur q de la zone chaude vers la zone froide donné par la relation suivante :

$$q = h\,S\,(T - T\infty) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(14)$$

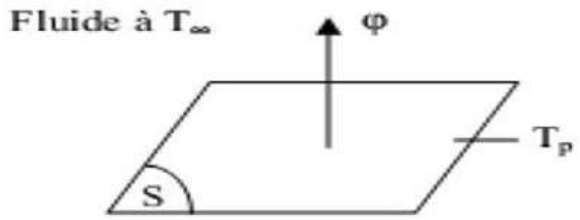


Figure II-1 : Schéma du transfert de chaleur convectif

II.1.3.2. Conduction :

La conduction thermique est le phénomène de transport de la chaleur mis en jeu dans les solides ; elle est également présente dans les liquides immobiles et à un moindre degré dans les gaz. Le phénomène microscopique (à l'échelle atomique) intervenant dans la conduction thermique est la propagation de l'agitation thermique des particules des zones plus chaudes vers celles des zones plus froides. Le mécanisme microscopique consiste dans la vibration moléculaire ou atomique (liquides, gaz) et la vibration cristallin ainsi que dans le déplacement des électrons libres (métaux).

La conduction thermique est donc le phénomène par lequel l'énergie est transférée des zones à haute température vers des zones à basse température. La loi de Fourier (pour un milieu isotrope, à travers une surface isotherme) montre quelle flux thermique, par conduction, dans une direction donnée est proportionnel à l'aire S normale à la direction du flux thermique et au gradient de température à cette direction. Le flux thermique, conformément à la loi de Fourier est donné par la relation :

$$q = \lambda S \frac{dT}{dx} \quad \text{.....(15)}$$

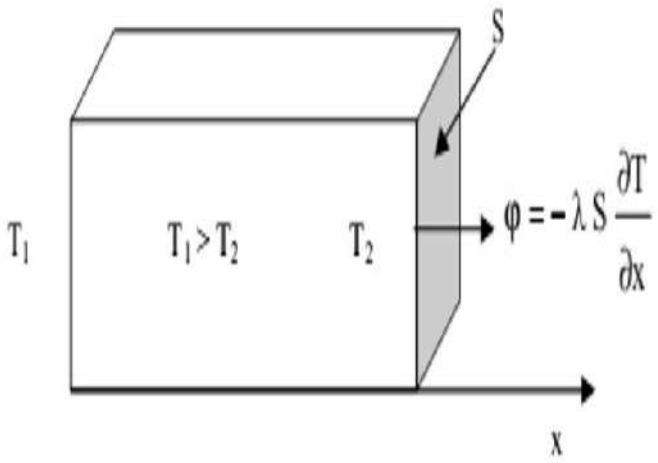


Figure II-2: Schéma du transfert de chaleur conductif

II.1.4. Le rayonnement :

Le rayonnement est l'émission par un corps d'ondes électromagnétiques qui sont les vecteurs de ce transfert de chaleur. Les ondes sont émises dans toutes les directions et appartiennent au domaine de l'infrarouge et du visible. Aucun support matériel n'est nécessaire pour leur propagation.
Tous les corps, quel que soit leur état : solide, liquide ou gazeux, émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Cette émission d'énergie s'effectue au détriment de l'énergie interne du corps émetteur

Le rayonnement se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière, il est constitué de radiations de différentes longueurs d'onde

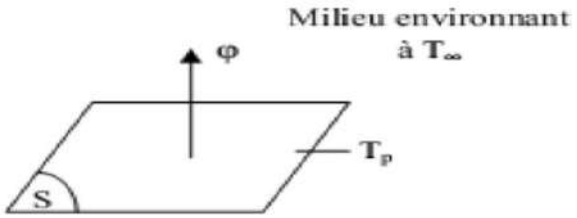


Figure II-3: Schéma du transfert de chaleur radiatif

II.2. Modélisation des ailettes classiques

II.2.1. Introduction :

L'étude complète du comportement de l'ailette classique ou pleine dans les conditions les plus variées nécessite l'écriture de l'équation d'énergie, régissant l'écoulement de la chaleur et par voie de conséquence, la distribution station temporelle de la température.

On commencera donc ce présent chapitre par décrire cette variété d'ailettes puis on passera à l'écriture des équations appropriées traduisant à la fois les modes de transfert thermique ainsi que les conditions aux limites reflétant les différents phénomènes d'échanges puis on passera en revue les différents traitements qui nous ont fait accéder a la forme normalisée de l'équation de l'énergie .

II.2.2. Définition d'une ailette :

L'ailette est un dispositif qui permet de créer des perturbations et de la turbulence au niveau de l'écoulement du fluide entourant l'ailette (elle permet d'augmenter le niveau de la turbulence dans la couche limite) mais surtout la surface d'échange de chaleur, donc le transfert thermique .

II.2.3. Formes des ailettes :

Les formes des ailettes sont tellement varié es qu'il est important délecter .WEBB, BERGLES et JUNKHAN identifient 329 formes d'ailettes brevetées aux U. S. A. les auteurs notent qu'il existe plus de 180 profils et géométrie d'ailette en Aluminium dans le monde. La recherche de nouvelles formes est en développement continu. On distingue classiquement les formes :

- Rectangulaire,
- Triangulaire,
- Parabolique,
- Hyperbolique,

II.2.4. Types d'ailettes :

Plusieurs structures d'ailettes ont été développées, chacune ayant des caractéristiques Particulières et le choix est en fonction de ce que l'on souhaite minimiser ou maximiser. (Performances pures, puissance de la pompe, perte de charge,…) telle ou telle structure Sera plus adaptée car elles ont chacune leur point fort. **Figure (II-4):** nous Ilustre quelques types classiques.

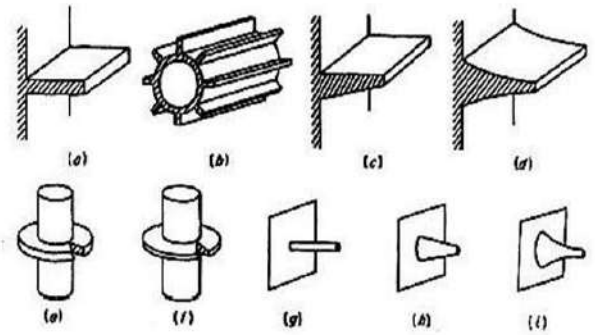


Figure II-4: Types d'ailettes: (a) ailette longitudinale à profil rectangulaire, (b) tube cylindrique avec ailette de type (a), ailette longitudinale à profil triangulaire(c) ; parabolique(d), Tube cylindrique équipé d'une ailette radiale à profil rectangulaire(e) trapézoïdal(f) Epine cylindrique(g) ; conique(h), parabolique (i)

II.2.5. Thermique de l'ailette :

L'étude du transfert thermique extérieur prolongé dans la plupart des cas comporte deux facteurs qui peuvent commodément être séparés. Un facteur considère seulement le mouvement de la chaleur dans le matériau par la conduction.

L'autre facteur considère la façon dont le matériau échange la chaleur dans le milieu environnant, qui comporte habituellement la convection et le rayonnement indépendamment ou simultanément.

De ce fait, le thermique de l'ailette est à priori un problème de conduction où l'on intègre la convection par ces faces par l'intermédiaire des coefficients d'échange supposés connus.

II.2.6. Rendement de l'ailette :

Rappelons que l'ailette est utilisée pour augmenter le transfert thermique par l'augmentation de la surface effective, de quelque manière, l'ailette elle-même représente une résistance de conduction au transfert thermique de la surface primaire.

Pour cette raison il y'a aucune assurance de l'augmentation de flux thermique par l'utilisation de l'ailette. Une estimation de ce transfert peut être faite par l'évaluation du rendement de l'ailette qui est définie comme le rapport du flux thermique d'ailette au flux thermique qui existerait sans ailette. Par conséquent :

$$\varepsilon_f = \frac{qf}{h \cdot A_{cb} \cdot \theta_b} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (15)$$

Pour n'importe quelle conception la valeur de doit être le plus grand possible, et en général l'utilisation de l'ailette peut rarement être justifié pour une $\varepsilon_f \geq 2$ L'installation des ailettes fait changer le coefficient extérieur de convection, cet effet est généralement négligé. Par conséquent, supposant le coefficient de convection à la surface d'ailettes équivalent à celui des parois, donc pour une ailette de longueur infinie :

$$\varepsilon_f = \left(\frac{Kp}{h A_c}\right)^{1/2} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (16)$$

Plusieurs importantes tendances peuvent être trouvées à partir de ce résultat. Evidemment, le rendement d'ailettes est augmenté par le choix d'un matériau d'une conductivité thermique élevée, bien que le cuivre soit supérieur du point de vue conductivité thermique, les alliages d'Aluminium sont le choix le plus commun en raison des avantages additionnels liés au coût Inférieur et de poids.

Le rendement d'ailettes est également augmenté en utilisant un grand rapport périmètre section. Pour cette raison l'utilisation des ailettes minces, mais étroitement espacées, est préférée, à condition que l'espace entre ailettes ne doit pas être réduit à une valeur pour laquelle l'écoulement entre les ailettes est sévèrement empêché, réduisant de ce fait le coefficient de convection. Il s'agit alors de la juxtaposition des couches aux limites.

II.2.7. Efficacité d'ailette :

Elle définit les performances d'une ailette en comparant le flux dissipé à celui qui serait dissipé dans une ailette de mêmes dimensions mais dont la température serait uniforme et égale à celle de la base (conductivité thermique, pas de résistance thermique de conduction donc pas de chute de température dans l'ailette). Le flux échangé par cette ailette idéale serait :

$$\varphi \max = h.p_e.\mathrm{L}\ (\ T_0\ _T_\infty\ ) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(17)$$

Pour une ailette rectangulaire de périmètre pe et de longueur L :

$$\varphi \max = 2.h.\pi\left(\ r_e^2\text{-}r_0^2\right)\ \left(T_0 - T_\infty\right) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots..(18)$$

Pour une ailette circulaire de rayon de base r0et de rayon externe re.

L'efficacité de l'ailette s'écrit donc :

$$\eta = \varpi p/\varpi max \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (19)$$

Nous en déduisons la relation suivante:

$$\eta = \frac{1}{\omega.L} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ (20)$$

II.2.8. Distribution de la température dans l'ailette :

La distribution de la température dans l'ailette n'est pas constante cela est due à la résistance a transfert thermique dans le matériau d'ailette

Les détails de calcul sont complètement complexes. Les résultats dépendent d'un certain nombre de paramètres incluant la géométrie de l'ailette (forme, hauteur, et épaisseur) le matériau de l'ailette, et la température de fluide extérieur et aussi le coefficient du transfert thermique. Il est nécessaire de faire plusieurs suppositions ; par exemple, la plupart des analyses supposent une température constante du fluide extérieur et un coefficient de transfert constant sur tous les points de la surface de l'ailette.

La distribution de la température dans l'ailette n'est pas constante cela est due à la résistance au transfert thermique dans le matériau d'ailette

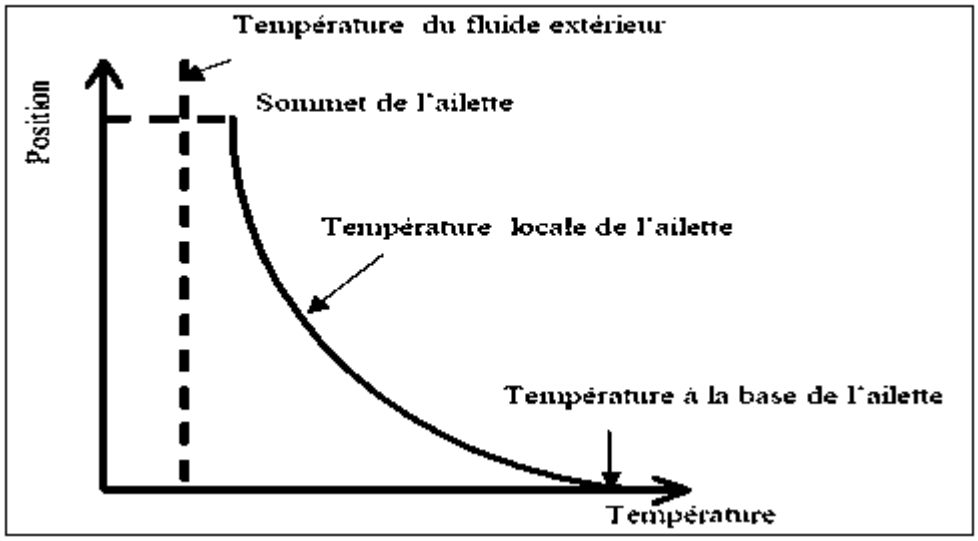


Figure II-5: Distribution des températures le long d'une ailette

II.2.9. Résistance de l'ailette :

La performance de l'ailette peut également être mesurée en termes de résistance thermique.

Traitant la différence de température entre la base et le fluide comme potentiel de conduite, une résistance d'ailette peut être définie comme :

$$R_{t,f} = \frac{\theta_b}{q_f} \qquad \text{…… (22)}$$

De l'équation **(22)** l'expression de la résistance thermique due à la convection à la base est :

$$R_{t,b} = \frac{1}{h.b.A_b} \qquad \text{…… (23)}$$

Et substituant de l'équation **(15),** il suit cela :

$$\varepsilon_f = \frac{R_{t.b}}{R_{t.f}} \qquad \text{…….. (24)}$$

Par conséquent le rendement d'ailette peut être interprété comme rapport des résistances thermiques, et pour l'augmentation de il est nécessaire de réduire la résistance de conduction/convection de l'ailette. Si l'ailette doit augmenter le transfert thermique, sa résistance ne doit pas excéder celle de la base exposée.

II.2.10. L'équation de la barre et modèle mathématique :

Le problème de la barre encastrée schématise le problème pratique important du refroidissement d'un solide par des ailettes.

Considérons une barre de section constante (épaisseur e et largeur ℓ) encastrée entre 2 surfaces à température T0 et baignant dans un fluide à température T.

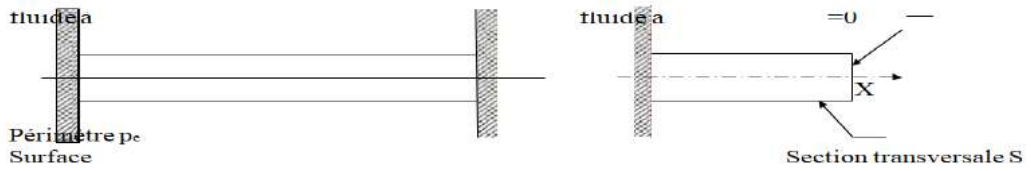


Figure II-6: Représentation d'une barre encastrée et schéma simplifié

La symétrie du problème montre l'existence d'un extrémum de la température au milieu de la barre ce qui permet de simplifier la géométrie et de ne considérer qu'une demi barre avec condition de flux nul à l'extrémité située en contact avec le milieu à T□.

La barre est supposée de section suffisamment faible pour qu'il n'y ait pas de variation de température dans une même section droite à une distance x de l'encastrement dans la paroi à T0.

Effectuons un bilan d'énergie sur le système constitué par la portion de barre comprise entre les abscisses x et x+dx (nous retenons l'hypothèse du régime permanent et nous négligeons le rayonnement) :

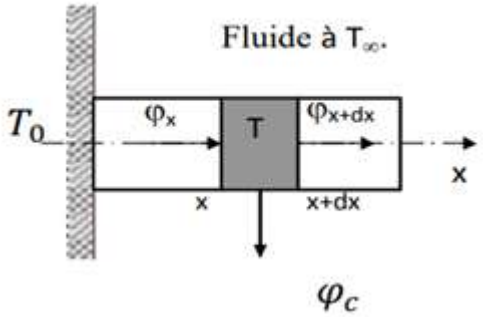


Figure II-7: Représentation des flux élémentaires sur une barre encastrée

Avec :

φx: Flux de chaleur transmis par conduction à l'abscisse x

$$\varphi x = -\left(\lambda . s \frac{dT}{dx}\right) x \qquad \text{…….. (25)}$$

φx: +dx Flux de chaleur transmis par conduction à l'abscisse x+dx

$$\varphi_{x+dx} = -(\lambda . s \frac{dT}{dx})_{x+dx} \qquad \text{…….. (26)}$$

φc: De chaleur transmis par convection à la périphérie de la barre entre x et x+dx

$$\varphi c = \mathrm{h}.P_e.dx\ (T_{(x)} - T_\infty) \qquad \text{…… (27)}$$

Le bilan d'énergie s'écrit :

$$\varphi_x = \varphi_{x+dx} + \varphi_c \qquad \text{…… (28)}$$

Soit :

$$-(\lambda . s \frac{dT}{dx})_x + (\lambda . s \frac{dT}{dx})_{x+dx} = h.P_e.dx\ (T_{(x)} - T_\infty) \qquad \text{…….. (29)}$$

Si λ et S sont indépendants de l'abscisse x, nous obtenons :

$$\lambda . s(\frac{dT}{dx})_x + dx - (\frac{dT}{dx})_x \ /\mathrm{dx}=\mathrm{h}.p_e(T(x) - T(\infty)) \qquad \text{…… (30)}$$

Donc T(x) est solution de l'équation différentielle suivante appelée équation de la barre :

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{h.p_e}{\lambda.s}(T(x - T_\infty) = 0 \qquad \text{…… (31)}$$

L'ailette est d'autant plus performante que sa conductivité thermique est élevée. Le choix des ailettes résulte finalement d'un compromis entre le prix, les pertes de charge et les qualités de performances du transfert de chaleur.

Chapitre III : Ailettes poreuses

III.1.Introduction :

Notre mémoire a pour objet l'étude des ailettes poreuses et leurs intérêt par rapport aux ailettes pleines ou classiques échangeant de la chaleur en milieu de nanofluide. Cette nouvelle configuration est apparue récemment et a montré une utilisation performante. On peut prendre un exemple sur une invention faite par des chercheurs Coréens en Novembre 2000, et qui consiste en un type d'échangeur de chaleur à tubes plats utilisant des ailettes poreuses faites d'une mousse métallique, ce métal peut être de l'Aluminium ou du cuivre.

L'échangeur de chaleur à tubes plats employant de telles ailettes poreuses est d'une excellente possibilité de transfert de chaleur, comparant à un type courant d'échangeur de chaleur à tubes plats utilisant des ailettes conventionnelles.

Ainsi les étapes de production sont plus simples et de ce fait ces échangeurs de chaleur réalisent une excellente rigidité structurale.

III.2.Description de l'historique des échangeurs à ailettes :

Un échangeur de chaleur est un dispositif exécutant un échange de chaleur entre deux fluides, par exemple un gaz et un liquide, ou bien entre un gaz et un autre gaz.

En particulier, quand l'échange de chaleur se fait entre un gaz et un liquide, on peut utiliser un échangeur de chaleur utilisant des ailettes sur son coté de gaz, afin de diminuer la résistance thermique et d'augmenter la surface d'échange avec le gaz.

Un échangeur de chaleur conventionnel peut utiliser une variété de configurations d'ailettes, comprenant des ailettes dites « offset », des ailettes ondulées ou « wavy », des ailettes dites « louvered »

Parmi ces telles configurations d'ailettes, l'ailette « louvered » est connue pour donner de meilleurs résultats.

Pour cette raison, les échangeurs de chaleur à ailettes « louvered » sont généralement appliquées dans les évaporateurs, les condenseurs, dans la climatisation d'une voiture exigeant un type compact d'échangeur de chaleur.

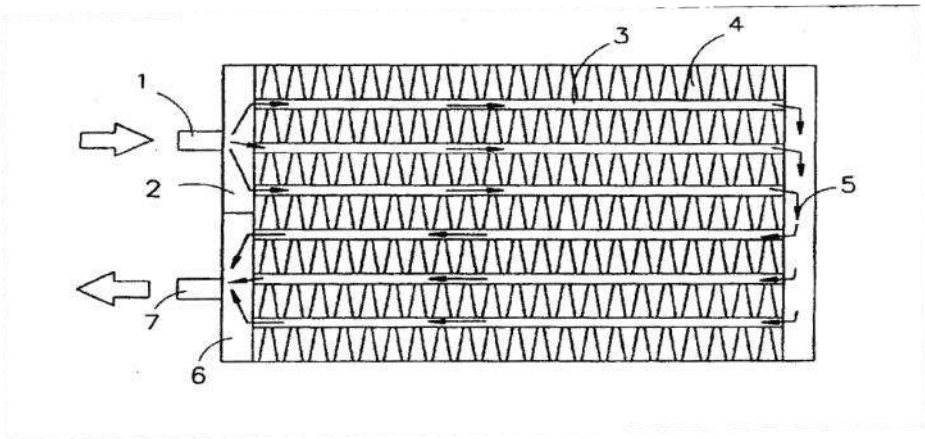


Figure III-1: Echangeur chaleur à tubes plats utilisant des ailettes conventionnelles

La figure **III-1** illustre un exemple d'un échangeur de chaleur à tubes plats utilisant des ailettes « louvered » conventionnelles.

Comme la figure le montre, l'échangeur de chaleur utilisant des ailettes « louvered » contient : le chemin d'arrivée du fluide 1, un réservoir 2, tubes plats 3, ailettes 4, un reservoir5, un réservoir de sortie 6, le chemin de sortie du fluide **III-1**. Ici la résistance thermique des ailettes à travers lesquelles l'air passe est la composante qui influe le plus sur la baisse de l'efficacité de la transmission de la chaleur, et en conséquence il ya beaucoup d'amélioration en ce qui la concerne.

Cependant, les échangeurs de chaleur conventionnels à tubes plats utilisant des ailettes « louvered » sont manufacturés telle une fine plaque en aluminium d'épaisseur d'environ 0.1 mm et continuellement pliée, compliquant de ce fait leur fabrication.

De plus, en raison de sa faiblesse structurale, l'échangeur de chaleur conventionnel peut être tordu une fois exposé à un impact.

Ainsi, il y a une demande d'un nouveau type d'échangeur de chaleur ayant des attributs pour une meilleure transmission de chaleur, une rugosité structurale et un processus de fabrication simplifié.

- **Résumé de l'invention**

L'objet de cette invention est de surmonter les inconvénients du courant échangeur de chaleur. L'invention consiste en des échangeurs de chaleur à tubes plats employant des ailettes poreuses fabriquées par un métal à bulles tel que l'Aluminium mousseux qui est caractérisé par une très grande porosité, une grande conductivité thermique et une large superficie.
La mousse métallique diminue d'une manière significative la résistance thermique du coté air d'un échangeur de chaleur, pour améliorer de ce fait les caractéristiques de transmission de la chaleur.
Les comparant aux ailettes conventionnelles, les ailettes poreuses sont faciles à fabriquer, et peuvent réaliser une plus grande rigidité structurale. Ces dernières sont formées en traitant la mousse métallique, comme de l'aluminium fondu et du cuivre bulbe (bubbled) en utilisant du gaz.
Une mousse métallique avec une conductivité thermique de plus de 100 W/m K et une porosité de plus de 88 % est applicable pour ces ailettes poreuses.
L'échangeur de chaleur avec ces ailettes poreuses a une large surface d'échange par rapport au volume occupé et un chemin irrégulier du fluide, fournissant de ce fait un effet amélioré de transfert de chaleur résultant du mélange du fluide.

- Coefficient de transfert de chaleur et perte de pression

Nous allons décrire à partir des schémas, l'échangeur de chaleur à ailettes poreuses
La figure **III-2**, montre un échangeur de chaleur à tubes plats s'accordant à cette invention. Le fluide d'apport entre dans le chemin du fluide entrant1, et passe à travers le réservoir d'entrée 2, il passe ensuite à travers les tubes plats 3 ,qui communiquent avec le réservoir d'entrée 2 pour effectuer de ce fait l'échange thermique avec un gaz qui traverse verticalement les ailettes poreuses 4, il passe après à travers le réservoir 5 , ensuite dans les tubes plats 3 qui communiquent avec le réservoir de sortie 6 , le fluide ressort enfin par le chemin de sortie 7.

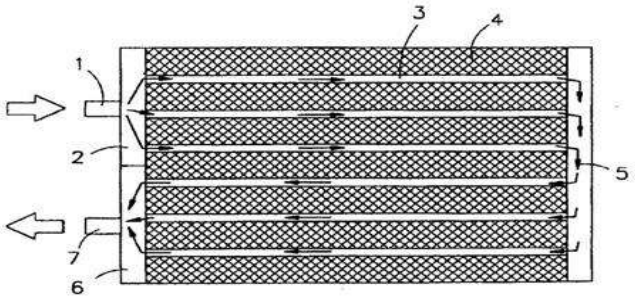


Figure *III-2*: Echangeur de chaleur à tubes plats utilisant des ailettes poreuses

La figure 15 illustre les pertes de pression des ailettes conventionnelles ainsi que des ailettes poreuses en fonction du nombre de Reynolds.

La densité poreuse des ailettes poreuses varie de 10 ppi, 20 ppi et 40 ppi. Ici pour comprendre les caractéristiques de la perte de pression des ailettes poreuses, on définit le facteur f comme

$$f = \frac{\Delta P}{L}\frac{H}{\rho_f V_i^2} \qquad \text{…… (32)}$$

Où H et L sont respectivement la hauteur et la longueur de l'ailette.

Vi est la vitesse moyenne d'entrée du gaz

ρf la densité

ΔP la perte de pression

Le facteur f est le coefficient de perte de charge. (Pour un écoulement laminaire f=64/Re)

Donc ce facteur est inversement proportionnel au nombre de Reynolds.

Selon la figure14 & 15, on remarque que :

Pour un même débit d'air ou pour un même nombre de Reynolds, la perte de pression pour une ailette conventionnelle est moindre que celle pour les ailettes poreuses, et plus le nombre de pores augmentent, plus la perte de pression est grande.

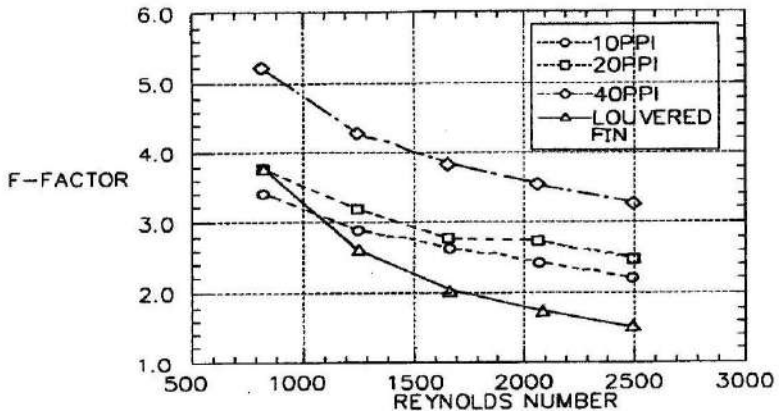


Figure III-3: Pertes de pressions des ailettes conventionnelles et poreuses par rapport au nombre de Reynolds

III.6. conclusion :

les ailettes poreuses constituent une alternative intéressante aux ailettes conventionnelles, en ce sens qu'elles offrent des coefficients de transferts assez importants, bien qu'à contrario, elles laissent passer les fluides suivant une certaine perte de charge. Comme mentionné, notre contribution s'étendra aux ailettes poreuses convectives, ce qui sera développé dans les prochaines sections.

Chapitre IV : Modélisation des ailettes pleines/poreuses

IV.1 Distribution de température dans les ailettes pleines :

Pour des ailettes de section uniforme, on effectue le changement de variable ɵ = T-Tf, l'équation différentielle qui permet de résoudre le problème de l'ailette de section uniforme A, fig 17, et de périmètre P s'écrit :

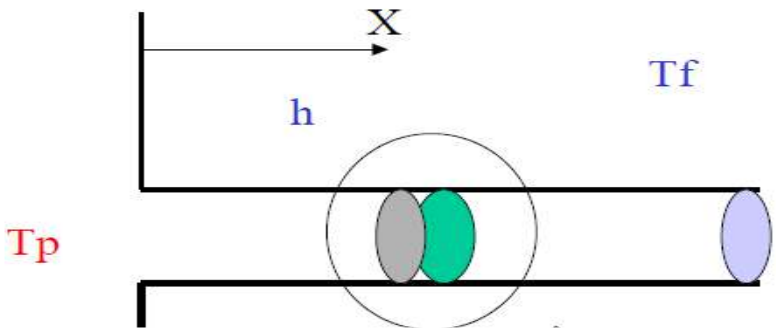


Figure IV-1 : Schématisation d'une ailette

La base de l'ailette étant à la température du mur TP, la solution dépend en définitive de la condition à la limite imposée au bout de l'ailette de longueur L.

Cas où l'on considère la convection au bout de l'ailette

La distribution de température s'écrit :

$$\frac{\theta(x)}{\theta p} = \frac{\cosh m(L-x) + \frac{h}{mk}\sinh m(L-x)}{\cosh mL + \frac{h}{mk}\sinh mL} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (33)$$

Le flux de chaleur est :

$$q = \sqrt{hPkA}\ \theta p \frac{\sinh mL + \frac{h}{mk}\cosh mL}{\cosh mL + \frac{h}{mk}\sinh mL} \qquad \text{…….. (34)}$$

Cas où l'on impose la température au bout de l'ailette

La distribution de température s'écrit :

$$\frac{\theta(x)}{\theta p} = \frac{sinhm(L-x) + \frac{\theta_L}{\theta p}\sinh mx}{\sinh mL} \qquad \text{……. (35)}$$

Le flux de chaleur est :

$$q = \sqrt{hPkA}\ \theta p \frac{\cosh mL - \frac{\theta_L}{\theta p}}{\sinh mL} \qquad \text{…….. (36)}$$

Cas où l'on considère le bout de l'ailette adiabatique

La distribution de température s'écrit :

$$\frac{\theta(x)}{\theta p} = \frac{coshm(L-x)}{\cosh mL} \qquad \text{……. (37)}$$

Le flux de chaleur est :

$$q = \sqrt{hPkA}\ \theta p\ tanh\ mL \qquad \text{……. (38)}$$

Cas limite d'une ailette infinie

La distribution de température s'écrit :

$$\frac{\theta(x)}{\theta p} = e^{-m\ x} \qquad \text{…… (39)}$$

Le flux de chaleur est :

$$q = \sqrt{hPkA}\ \theta p \qquad \text{……. (40)}$$

IV.2 L'efficacité de l'ailette :

On définit l'efficacité d'une ailette comme le rapport du flux qu'elle échange sur le flux qu'elle échangerait si sa température était uniforme.

$$\eta = \frac{q\ transmise\ dans\ l'ailette}{q\ \ idéale} \qquad \ldots\ldots\ldots (41)$$

q idéale c'est la quantité de chaleur qui serait transmise par convection ou rayonnement à partir de la surface de base de la tige si l'ailette était supprimée.

$$q_i = A_a\ h\ \theta_b \qquad \ldots\ldots\ldots (42)$$

où qi est le flux de chaleur ideal, Aa Surface totale de l'ailette et ɵb = Tb-T∞

Si on prend le cas du transfert thermique négligeable à la pointe (sommet adiabatique), on aura :

$$\eta = \frac{th\ mL}{mL} \qquad \ldots\ldots\ldots (43)$$

On observe que lorsque la longueur de l'ailette croit, le rendement diminue. Des ailettes démesurément longues accroissent inutilement le poids et encombrent, sans améliorer significativement les échanges de chaleur.

Si on a plusieurs ailettes :

$$q\ total = q\ ailettes + q\ sans\ ailettes \qquad \ldots\ldots\ldots (44)$$

$$= \eta A_a\ h\ \theta_b + (S_t - A_a) h\theta_b \qquad \ldots\ldots\ldots (45)$$

Aa surface des ailettes

St est la surface totale sujette au transfert thermique, comprenant les surfaces contenant les ailettes et celles ne contenant pas les ailettes

IV.3 Rendement d'une surface ailette :

Le rendement d'une surface ailette est défini comme le rapport du flux échangé sur toute la surface, sur le flux qui aurait été échangé si la totalité de la surface était à la température Tb (la température de la base)

$$\eta = \frac{q\ total}{h\ S_t\ (T_b - T_\infty)} \qquad \text{…….. (46)}$$

Le rendement d'une surface ailette est finalement :

$$\eta = \frac{1+\eta_a(\frac{Sa}{Sb})}{1+(\frac{Sa}{Sb})} \qquad \text{……. (47)}$$

Sa surface d'échange des ailettes

Sb surface d'échange des parties de surfaces mères non recouvertes d'ailettes.

ηa efficacité d'une ailette

IV.4. Distribution de température dans les ailettes poreuses radiales:

IV.4.1. Introduction :

La réduction du cout de fabrication et des couts associés pour la fabrication de nombreux équipements utilisant les ailettes, ont amené les industriels à examiner de plus près cette question. Un des postes les plus importants de ces couts est le poids utilisé de matière pour la réalisation des milliers d'ailettes composants l'équipement. Plusieurs voies s'ouvrent pour arriver à la réduction, tout en maintenant les spécifications techniques. IL s'agit de:

- Augmenter la surface d'échange par rapport au volume de l'équipement, ce qui a conduit à fabriquer des échangeurs dits compacts, par exemple dans cette industrie.
- Augmenter la conductivité thermique du matériau.
- Augmenter le coefficient d'échange thermique par différentes techniques passives et actives.

Ces aspects ont conduit aussi à l'optimisation des grandeurs caractérisant l'ailette et les surfaces prolongées, Cependant, il y a un poste important qu'est le poids de la matière utilisée et qui représente l'essentiel du cout global.

Récemment, une direction intéressante combinant une plus grande conductivité thermique et un allègement substantiel de la matière, a été empruntée. Il s'agit des ailettes poreuses, fabriqués par un matériau très bon conducteur, telles les mousses métalliques. L'apparition de ce substrat a suscité des analyses diverses.

Dans cette section il sera examiné comme mentionné plus haut la convection naturelle dans les ailettes poreuses ; pour ce faire, on prendra un segment de l'ailette poreuse et à partir d'un bilan énergétique, on aboutira à une représentation différentielle.

On groupe tous les paramètres géométriques et d'écoulement qui peuvent influencer la solution du problème en un seul paramètre SH, on trace la température adimensionnelle en fonction de X, pour différentes valeurs de SH, pour trois cas d'ailettes différentes. Les effets de Nusselt et de Darcy sur le flux de chaleur sont aussi tracés et étudiés.

IV.4.2. Formulations mathématiques :

Considérons l'ailette montrée dans la Fig. 18 qui représente la plus simple géométrie. La section transversale est constante. Étant poreuse, l'ailette permet au fluide de s'infiltrer à travers elle.

Les hypotheses simplificatrices sont:

1- Le milieu poreux est homogène, isotrope, est saturé d'un fluide monophasique.
2- Le fluide et la matrice du solide ont tous les deux des propriétés physiques constantes.
3- Les échanges de surfaces apparentes sont négligés.
4- La matrice du solide et le fluide sont à l'équilibre thermique local.
5- La température à l'intérieur de l'ailette est seulement fonction de x.
6- Aucune variation de température à travers l'épaisseur de l'ailette.
7- L'interaction entre le milieu poreux et le fluide net est simulé par la formulation de Darcy.

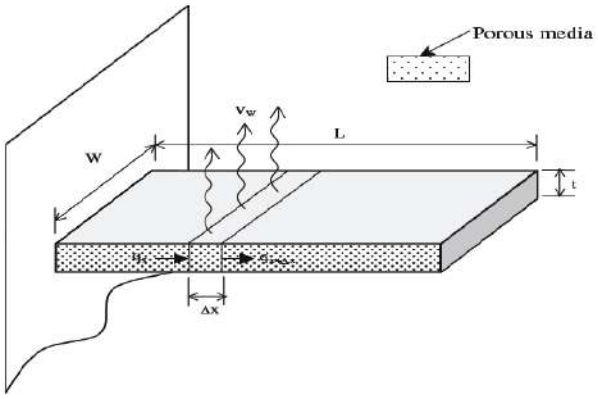


Figure IV-2 : Schéma de l'ailette poreuse convectiv

La balance énergétique s'écrit dans un volume de contrôle:

$$q_r - q_{r+dr} = hA(1-\varepsilon)\,(T(r) - T_\infty) + \dot{m}c_p(T(r) - T_\infty) \qquad (3.1)$$

Où ε est la porosité et (1-ε) c'est la partie solide de l'ailette poreuse. A c'est la surface de l'ailette qui convecte. T∞ c'est la température de l'air environnant.

Le débit massique du fluide passant par le milieu poreux est:

$$\dot{m} = \rho\, v_w S \qquad (3.2)$$

Où S= 2πrdr et r c'est la direction radiale.

La vitesse de Darcy est exprimée en fonction du coefficient de dilatation thermique, de la perméabilité du milieu poreux et de la viscosité cinématique de l'air .

$$v_w = \frac{g K \beta}{\nu}(T(r) - T_\infty) \qquad (3.4)$$

La loi de Fourier de la conduction est :

$$q = -k_{eff} A \frac{dT}{dr} \qquad (3.5)$$

A est la section de l'ailette, A=2πrδ avec δ l'épaisseur de notre ailette, et k_{eff} c'est la conductivité thermique effective de l'ailette poreuse

$$k_{eff} = \varepsilon\, k_f + (1-\varepsilon)\, ks \qquad (3.6)$$

En substituant les équations (3.2) et (3.6) dans l'équation (3.1) d'une part et on normalisant les variables, tel que :

$$\theta = \frac{T(r) - T_\infty}{T_b - T_\infty} \qquad (3.8)$$

$$R = \frac{r}{r_b} \qquad (3.9)$$

On trouve

L'équation gouvernante s'écrit finalement:

$$\frac{d^2\theta}{dR^2} + \frac{1}{R}\frac{d\theta}{dR} - Ra^*\theta^2 - (1-\varepsilon)N^2\theta = 0$$

Les conditions aux limites sont : le bout de l'ailette est isolé, donc pas de transfert de chaleur au bout et la base de l'ailette possède une température, d'où:

$$\theta(1) = 1$$

$$\frac{d\theta}{dR}(\mathrm{Re}) = 0$$

En définissant les paramètres suivants:

$$Ra^* = \frac{RaDa}{\psi k_r} \; ; le\ nombre\ de\ Rayleigh\ modifié.$$

$$Ra = \frac{g\beta r_b^3 (T_b - T_\infty)\rho c_p}{\nu k_f} \; ; le\ nombre\ de\ Rayleighhhh$$

$$N^2 = \frac{h\ r_b^2}{\delta k_{eff}} \; ; le\ paramètre\ de\ l'ailette.$$

$Da = \frac{K}{r_b^2}$ *le nombre de darcy, K étant la perméabilité de l'ailette*

$\Psi = \frac{\delta}{r_b}$ *épaisseur relative de l'ailette*

$k_r = k_{eff} / k_{f,}$; *le rapport des conductivités thermiques*

Chapitre V : Simulations numériques

Le modèle mathématique précédent d'une ailette poreuse radiale est implémentée dans Matlab et considérant l'évacuation de la chaleur dans un milieu environnant représenté par un nanofluide, il est donc possible d' établir un programme de travail afin d'étudier les effets des paramètres agissants sur les distributions des températures.

V. 1. Programme de travail

L'écriture du programme est codifié comme suit:

G est relatif à l'augmentation de la conductivité thermique du nanofluide

Psi est l'épaisseur relative de l'ailette par rapport au rayon de référence.

e c'est la porosité de l'ailette radiale

Interaction des nano-fluides et des ailettes poreuses radiales

- Il y lieu d'établir les huit figures suivantes :

A. <u>Ailette radiale (circulaire) pleine (pas de porosité)</u>

✓ Figure 1 (ailette pleine)

N= 0.1 puis 0.5 puis 1. Puis 5 puis 10

En ayant **G=1; Ra = 0.; Da=0; Psi=0.02; Kr=200; e=0.** pour les courbes dans la même figure

B. <u>Ailette radiale (circulaire) poreuse</u>

✓ Figure 2 (effet du nano fluide)

G= 1 puis 1.25 puis 1.5 puis 1.75 puis 2

En fixant **N= 0.1;Ra = 10;Da= 0.001;Psi=0.1;Kr=50; e=0.7;**

pour les courbes dans la même figure

✓ Figure 3 (effet du paramètre conducto-convectif de l'ailette))

N= 0.1 puis 0.5 puis 1. Puis 5 puis 10

En fixant **G= 1.5;Ra = 10;Da= 0.001;Psi=0.1;Kr=50; e=0.7;** pour les courbes dans la même figure

✓ Figure 4 (effet BT/HT)

Ra= 1. Puis 10 puis 15 puis 30 Puis 60

En fixant **G= 1.5;N = 0.1;Da= 0.001;Psi=0.1;Kr=50; e=0.7;;**pour les courbes dans la même figure

✓ Figure 5 (perméabilité du M.P)

Da= 0.01 puis 0.001 puis 0.0001 Puis 0.000001

En fixant **G= 1.5;N = 0.1;Ra= 10.;Psi=0.1;Kr=50; e=0.7;**pour les courbes dans la même figure

✓ Figure 6 (effet de la porosité du M.P)

e= 0.2 puis 0.4 puis 0.6 Puis 0.8

En fixant **G= 1.5;N=0.1;Ra = 10;Da= 0.001;Psi=0.1;Kr=50;** pour les courbes dans la même figure

✓ Figure 7 (effet de l'épaisseur de l'ailette poreuse)

Psi= 0.02 puis 0.1 puis 0.15 Puis 0.3

En fixant **G= 1.5;N=0.1;Ra = 10;Da= 0.001; Kr=50; e=0.7** pour les courbes dans la même figure

✓ Figure 8 (effet du rapport des conductivités nano fluide/solide)

Kr= 10 puis 50 puis 100 Puis 200 Puis 1000

En fixant **G= 1.5;N=0.1; Ra = 10;Da= 0.001;Psi=0.1; e=0.7;** pour les 04 courbes dans la même figure

V. 2. Ailette radiale (circulaire) pleine (pas de porosité)

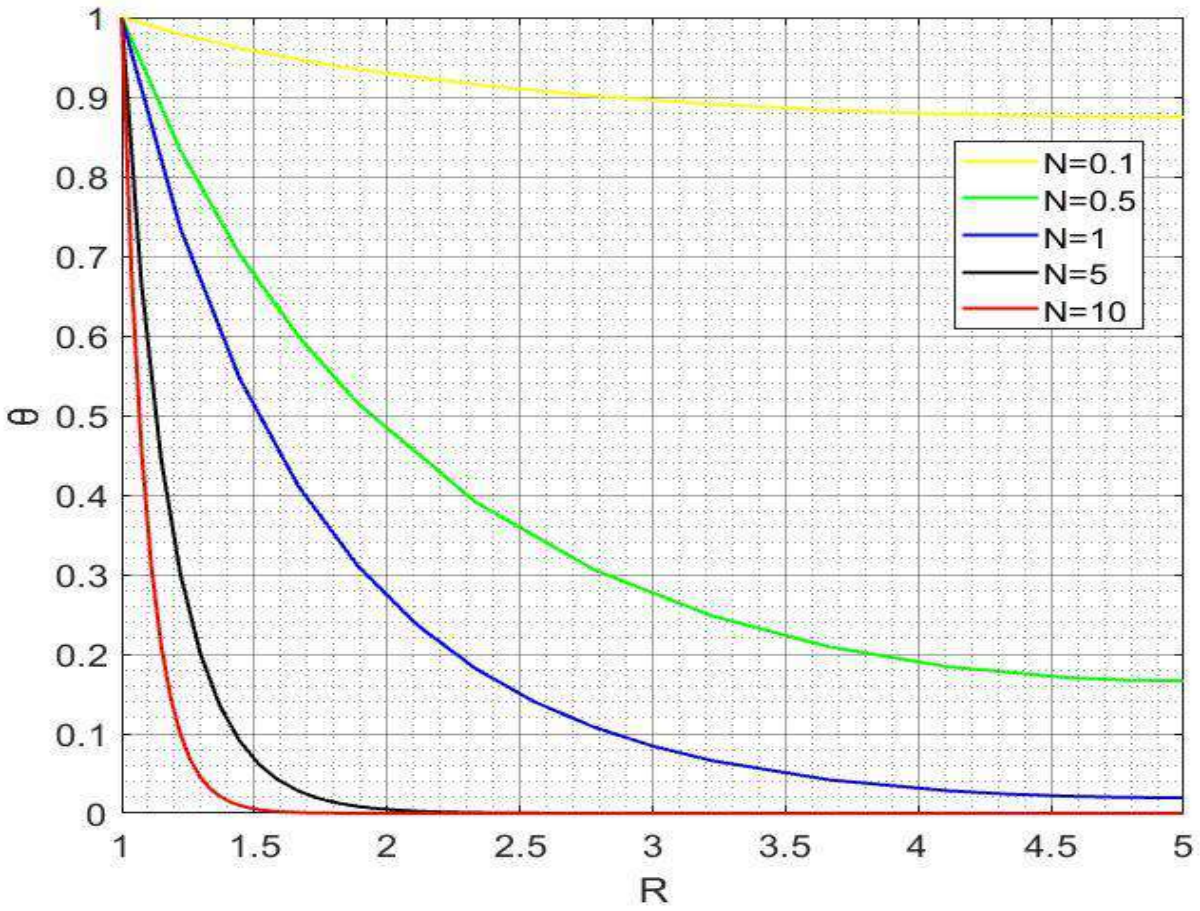


Figure V-1 : ailette pleine

On remarque dans cette figure, qui représente une ailette pleine (pas de porosité ni de perméabilité), que si le paramètre de l'ailette augmente, équivalent à une ailette fortement convective, la distribution des température est moins uniforme et par conséquent l'ailette devient non efficace

V. 3. Effet de la conductivité thermique du nanofluide :

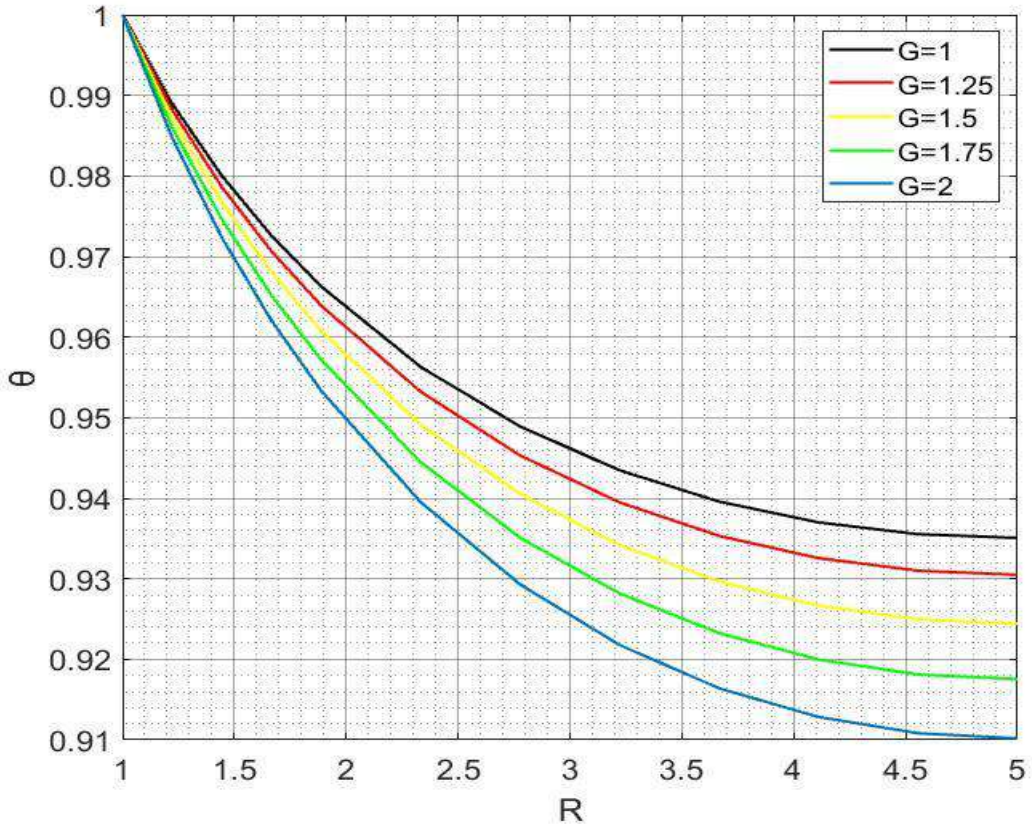


Figure V-2: effet du nano fluide

Un nanofluide se distingue par une conductivité thermique élevée, symbolisée par la grandeur G.

Ainsi, que par rapport à un fluide classique (G=1) ou bien selon le fluide base, et à mesure que G augmente par le biais des concentrations des nanoparticules, et quel que soit le couple fluide de base-type de nanoparticules, une dégradation de l'uniformité de la distribution des températures est observée, ce qui rend l'ailette moins efficace. Ceci peut s'expliquer par l'incidence de la conductivité thermique sur le paramètre de N qui augmente ainsi que sur l'augmentation du nombre de Rayleigh, Ra ce qui est par conséquent synonyme d'un milieu plus résistant, étant donné que c'est l'efficacité

de l'ailette est un compromis contrastant entre une meilleure conductivité de l'ailette et une moindre à plusieurs fois du nanofluide.

V. 4. Effet du paramètre conducto-convectif de l'ailette poreuse :

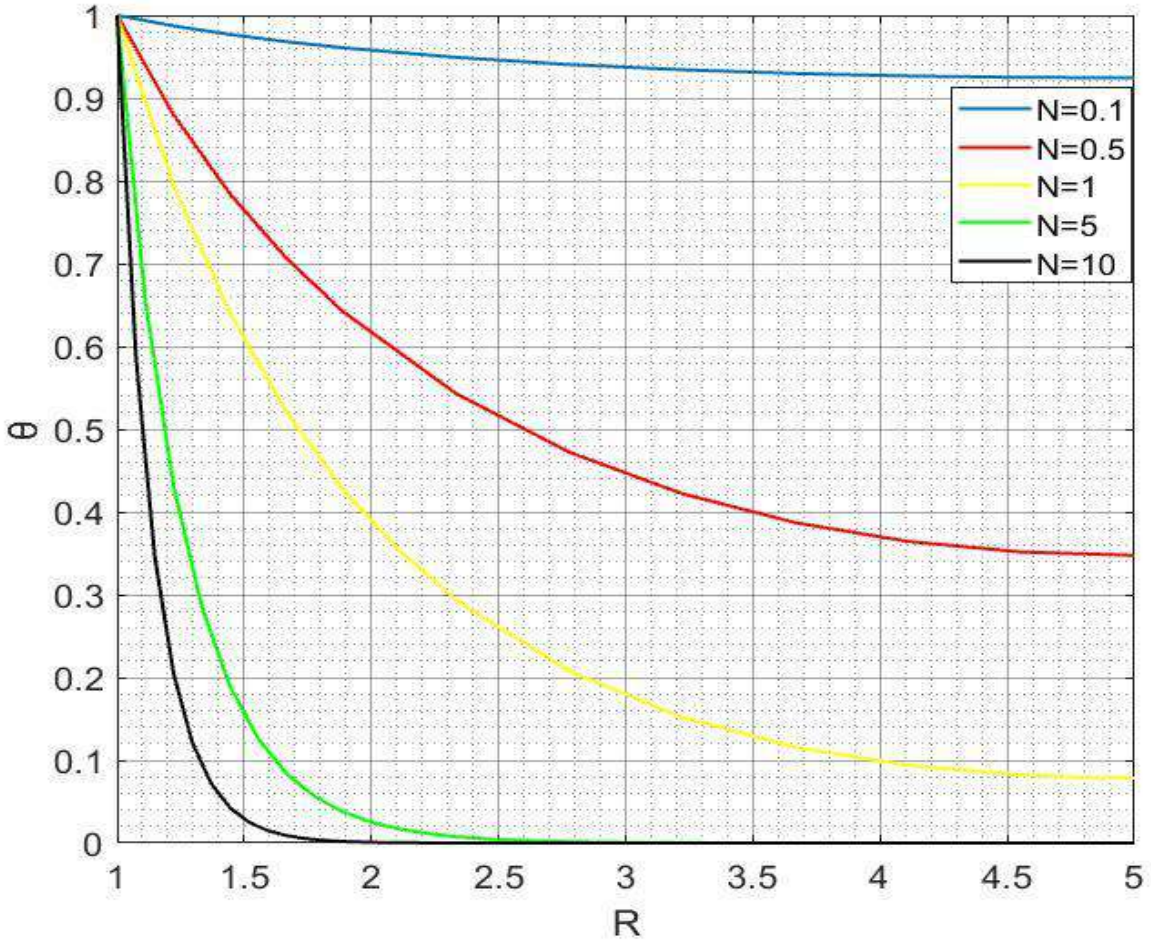


Figure V-3: effet de l'épaisseur de l'ailette

Cette figure est celle relative au paramètre de l'ailette mais poreuse, et là on observe que le nanofluide conduit à une légère amélioration de la distribution des températures par rapport à une ailette pleine, donc une meilleur efficacité. On peut physiquement attribuer à une plus grande

épaisseur de l'ailette, dans le cas classique, économiquement non acceptable, où dans le contexte d'un nanofluide, équivalent à la signification éxprimée dans la précédente figure.

V. 5. Effet de basse ou haute température de fonctionnement :

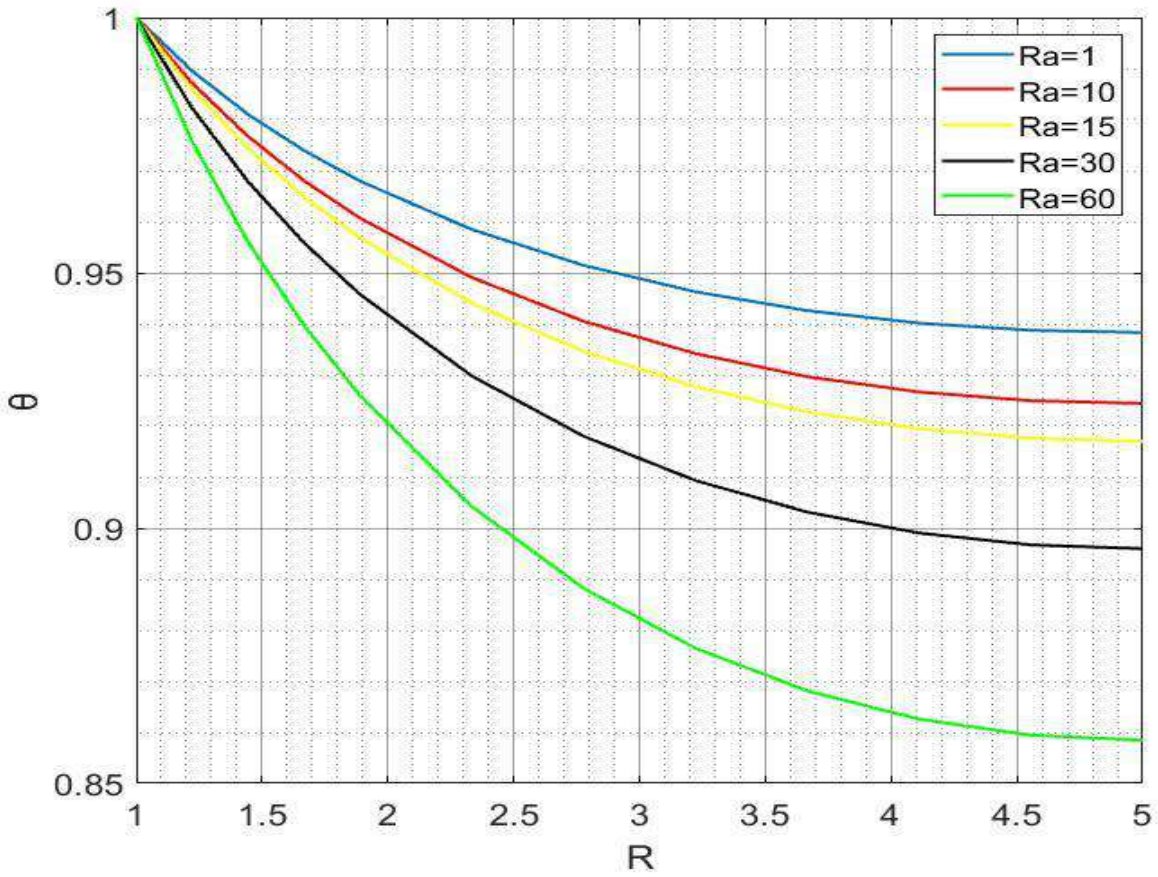


Figure V-4: effet BT/HT

Classiquement une différence de température entre l'ailette et le milieu environnant, conduit à un Ra élevée, autrement dit une entrée de la chaleur à la racine de l'ailette très élevée. De ce fait, les ailettes poreuses et chaudes montreront une plus grande efficacité. A contrario, les fluides froids ne

nécessitent pas d'ailettes. Cette constatation est valable si on travaille avec un nanofluide comme milieu de dissipation.

V. 6. Effet de la perméabilité de l'ailette poreuse :

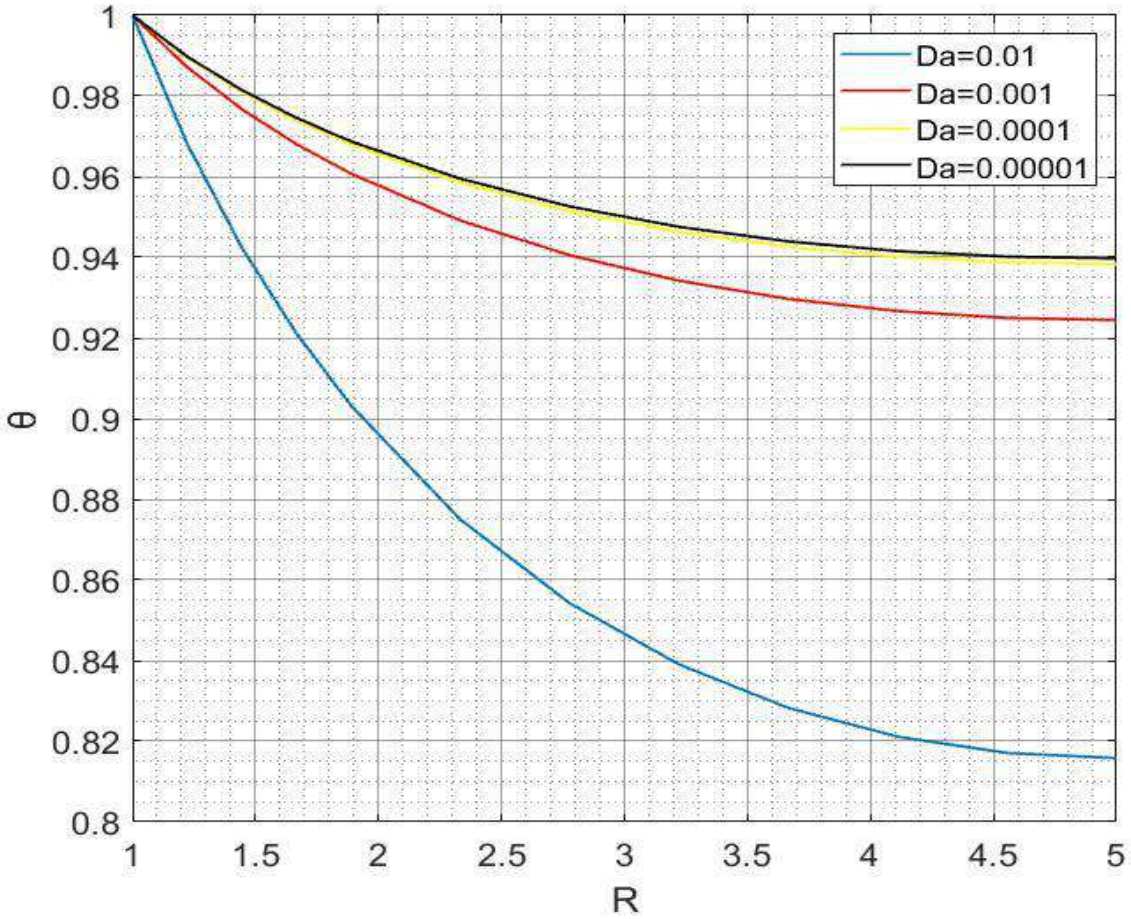


Figure V-5: perméabilité du M.P

La perméabilité K de l'ailette poreuse, signifie la plus ou moins capacité à laisser passer le nanofluide dans le milieu poreux. Ce paramètre primitif est représenté en adimensionnel par le nombre de Darcy, Da. Il est ainsi trouvé que une plus grande perméabilité n'est pas avantageuse dans la mesure où le

fluide recevant la chaleur de l'ailette doit interagir de manière plus avec les flux provenant de l'ailette.

V. 7. Effet de la porosité de l'ailette :

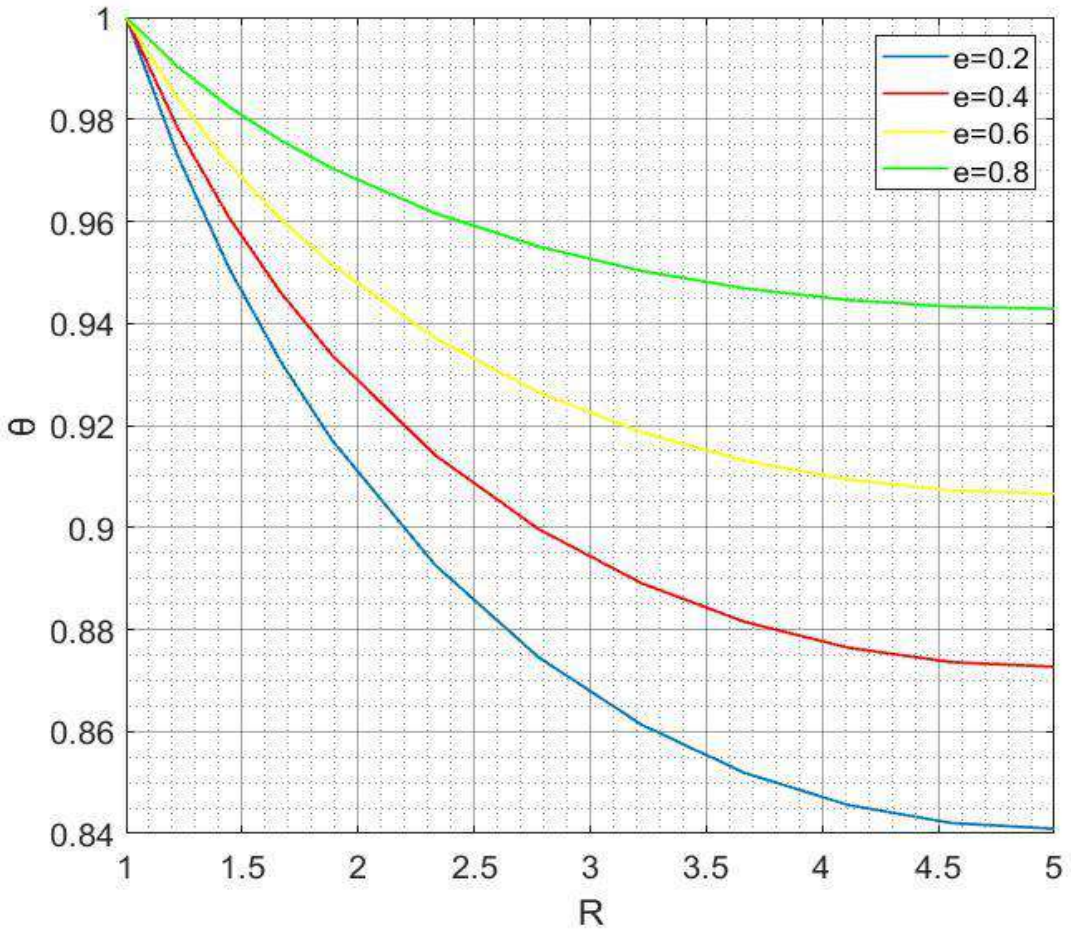


Figure V-6: effet de la porosité du M.P

La porosité de l'ailette exprime le vide par rapport à la partie solide. Plus l'ailette est poreuse, plus est son efficacité. La démonstration de l'usage des ailettes fortement poreuses conduit à une

économie de matière très forte, sachant que la matière utilisée pour la production des ailettes est un poste lourd dans les dépenses de production.

V. 8. Effet de l'épaisseur relative de l'ailette poreuse :

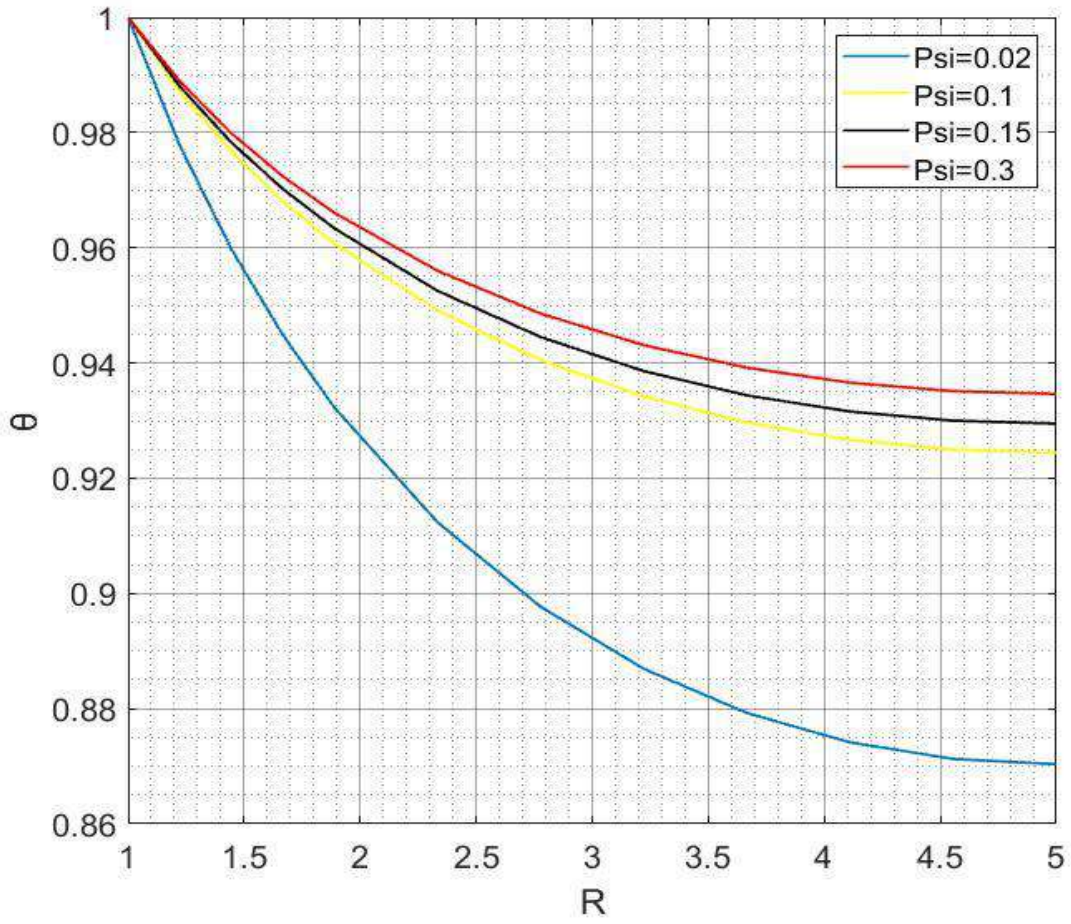


Figure V-7: effet de l'épaisseur de l'ailette poreuse

Cette figure est établie pour montrer l'effet de l'épaisseur de l'ailette sur son efficacité. On observe ce que l'on sait déjà, qu'il vaut mieux utiliser des ailettes minces en quantité que des ailettes épaisses. Cependant une ailette poreuse ayant une épaisseur équivalent au tiers du tube de circulation du fluide est encore performante.

V. 9. Effet du rapport des conductivités nanofluide/solide :

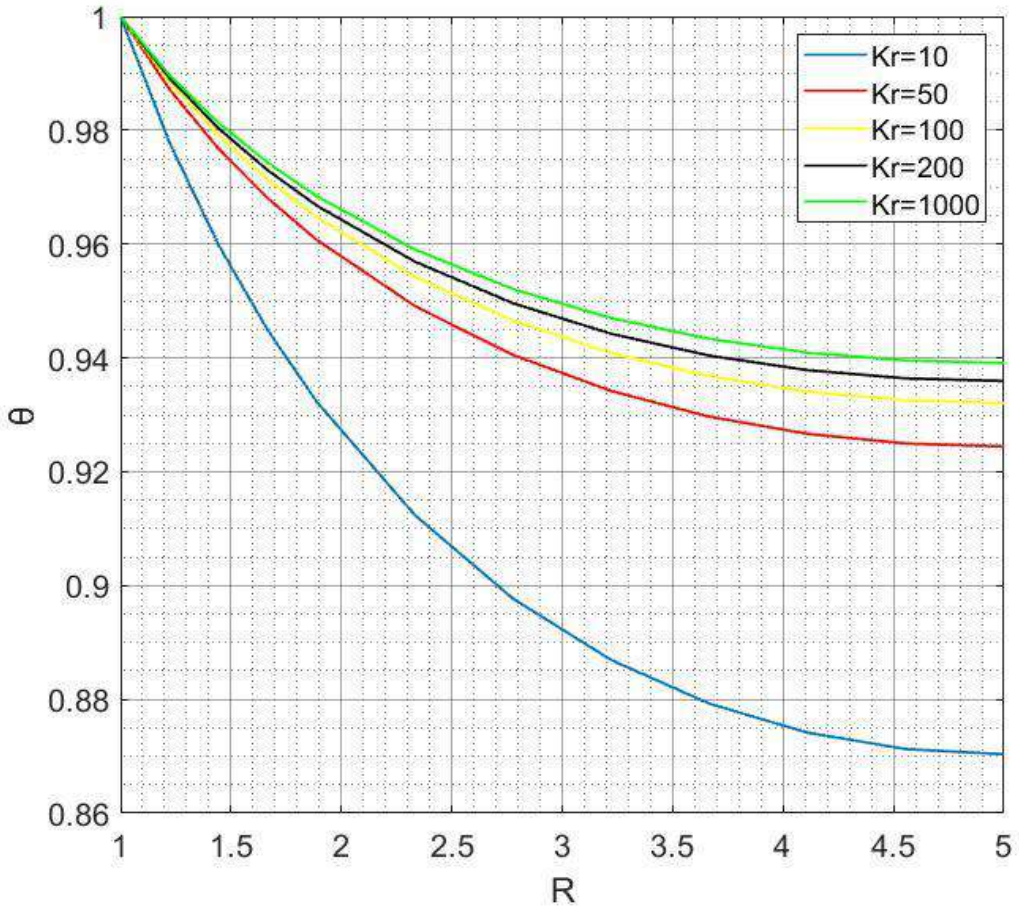


Figure V-8: effet du rapport des conductivités nano fluide/solide

Plus l'ailette est conductive par rapport au nanofluide, plus la distribution des températures est favorable. On note alors que les systèmes de dissipation de chaleur sont intéressants en termes de performances si l'ailette est fabriquée à partir d'un métal plutôt qu'un matériau moins conducteur et que de plus, la présence de cette extension de paroi est fondamentale en cas d'un milieu de conductivité thermique très faible. Ceci, est corroboré par la figure montrant l'usage défavorable d'un nanofluide.

Conclusions :

Ces dernières années et pour un gain de matière, les ailettes poreuses radiales ont peu à peu remplacé les ailettes pleines. En particulier, si l'espace est limité cette technique s'avère adéquate pour une miniaturisation des équipements tels les échangeurs à tubes à ailettes ou à plaques à ailettes. La porosité induite est le siège de l'écoulement d'un fluide classique, notamment l'air, mais souvent les fluides en présence sont de nature liquide et à cet effet on se propose dans ce projet de quantifier le gain en efficacités lors de la présence des nano fluides comme agent de dissipation de la chaleur. Dans ces conditions, L'étude se propose cette tache notamment dans le cas des hautes températures.

Ce mémoire avait pour objectif une compréhension de l'usage d'une ailette poreuse radiale dissipant la chaleur dans un milieu de nanofluide.

Après une connaissance des caractéristiques des nanofluides ainsi que de l'intensification des échanges thermiques (de dissipation) par voie d'ailettes pleines et puis poreuses, une modélisation classique a été reportée, puis une modélisation particulière relative aux ailettes poreuses et radiales a été établie.

Le modèle mathématique a été implémenté dans Matlab via le Bvp4c dédié aux équations différentielles ordinaires avec les conditions aux limites.

Les principaux résultats ont montré que:

- Un ailette poreuse est avantageuse en rapport de l'ailette pleine en termes de performance, ce qui est économiquement bien.
- Il est préférable d'utiliser les ailettes très poreuses et moins perméables.
- Par contre, un nanofluide comme fluide récepteur de chaleur ne conduit pas à une bonne efficacité de l'ailette.
- L'efficacité de l'ailette poreuse est meilleure dès lors qu'un contraste de rapport est grand entre les conductivités thermiques de l'ailette et du fluide.

  Cependant, une optimisation suivant tel ou tel cas est nécessaire pour le bon choix des paramètres influant en termes de performances technique alliées à l'économie.

Références

[1] Keblinski P, Phillipot SR, Choi SUS, Eastman JA. Mechanism of heat flow in suspensions of nano-sized particles (Nano fluids). Int J Heat Mass Transfer 2002; 45:855–63.
[63] Maxwell JC. A treatise on electricity and magnetism. 2nd ed. Clarendon; 1881.
[64] Merrill WM, Diaz RE, LoRe MM, Squires MC, Alexopoulos NG. Effective Medium Theories for Artificial Materials Composed of Multiple Sizes of Spherical Inclusions in a Host Continuum. IEEE Trans Antennas Propag 1999; 47:142–8.
[65] Wen D. et al. Review of Nano fluids for heat transfer applications. Particuology 7 (2009) 141–150
[66] Bruggeman DAG. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. Ann Phys 1935; 416:636–64.
[67] Hamilton RL, Crosser OK. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. Ind Eng Chem Fundam 1962; 1:187–91.
[68] Yu W, Choi SUS. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of Nano fluids: A renovated Hamilton–Crosser model. J Nano part Res 2004; 6: 355–61.
[69] Xuan Y, Li Q. Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nano fluids. J Heat Transfer 2003; 125:151–5.
[70] Kumar DH, Patel HE, Kumar VRR, Sundararajan T, Pradeep T, Das SK. Model for heat conduction in Nano fluids. Phys Rev Lett 2004; 93:144301.
[71] Prasher R, Bhattacharya P, Phelan PE. Thermal Conductivity of Nanoscale Colloidal Solutions (Nano fluids). Phys Rev Lett 2005; 94:025901.
[72] Yamada E, Ota T. Effective thermal conductivity of dispersed materials. Heat and Mass Transfer 1980;13:27–37.
[73] Hesselman DPH, Johnson LF. Effective thermal conductivity of Nano composites with interfacial
thermal barrier resistance. J Compos Mater1987; 21:508–15.
[74] Jang SP, Choi SUS. Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of Nano fluids. Appl Phys Lett 2004; 84:4316.
[75] Wang BX, Zhou LP, Peng XF. A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles. Int J Heat Mass Transfer 2003; 46:2665–72.
[76] Meibodi ME, Sefti MV, Rashidi AM, Amrollahi A, Tabasi M, Kalal HS. A model for thermal conductivity of Nano fluids. Mater. Chem Phys 2010; 123:639–43.
[77] Corcione M. Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of Nano fluids. Energ Convers Manage 2011; 52:789–93.
[78] Hashin Z, Shtrikman S. A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials. J Appl Phys 1962; 33:3125.
[79] Avsec J, Oblak M. The calculation of thermal conductivity, viscosity and thermodynamic properties for Nano fluids on the basis of statistical nanomechanics. Int J Heat Mass Transfer 2007; 50:4331–41.

[80] Pak BC, Choi YI. Hydraulic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. Exp Heat Transfer 1998; 11:151–70.
[81] Chandrasekar M, Suresh S, Ramasamy S, Bose AC. New analytical models to investigate thermal conductivity of nanofluids. J Nanosci Nanotechnol 2009; 9:533.
[82] Leong KC, Yang C, Murshed SMS. A model for the thermal conductivity of nanofluids – the effect of interfacial layer. J Nanoparticle Res 2006; 8:245–54.
[83] Gupta SK, Advani SG, Huq P. Role of Micro-convection due to nonaffine motion of particle in mono-disperse suspension. Int J Heat Mass Transfer 1995; 38: 2945–58.
[84] Xie H, Fujii M, Zhang X. Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. Int J Heat Mass Transfer 2005; 48:2926–32.
[85] Timofeeva EV, et al. Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina Nano fluids: Experiment and theory. Phys Rev E 2007; 76:061203.
[86] Eastman JA, Choi SUS, Li S, Yu W, Thompson LJ. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based Nano fluids containing copper nanoparticles. Appl Phys Lett 2001; 78:718–20.
[87] Das SK, Putra N, Thiesen P, Roetzel W. Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement of Nano fluids. ASME J Heat Transfer 2003; 125:567–74.
[88] Masuda H, Ebata A, Teramae K, Hishinuma N. Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles (Dispersion of γ–Al2O3, SiO2, and TiO2 Ultra-Fine Particles). Netsu Bussei 1993; 7:227–33.