



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
ZIDI Mohamed Salah
NACER Ahmed

Le : 12/06/2024

L'effet de la forme géométrique du milieu poreux sur le refroidissement des composants électroniques par des nano fluides

Jury :

Mr.	HAMDI Omar	MCB	Université de Biskra	Président
Mr.	GUERIRA Belhi	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Mr.	HADEF Sadek	MCA	Université de Biskra	Examineur
Mr.	CHADI Kamel	Maitre de Recherche	CRTI Sétif	Co-Encadreur

Année universitaire : 2023 - 2024

Dédicace

إلى روح والدي الحبيب، الذي رحل عن عالمنا قبل أن يشهد هذا الإنجاز
أهدي هذا العمل المتواضع إلى روحك الطاهرة، راجياً من الله أن يجعله في ميزان حسناتك

Et à ma mère et ma tante

A mes frères et sœurs

Surtout ma sœur, qui est chère à mon cœur Dounia

Et ma meilleure amie Lina

A tous mes amis :

Bada, Walid, Dhia-Eddine , Lazher , Haythem , Boualame

Mon collègue Ahmed

Z. Mohamed Salah

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

À la femme le symbole de l'amour, qui m'est la plus noble et la plus chère du monde, pour son soutien moral et l'encouragement dans toute ma vie

Ma très chère et douce mère.

ET à mon cher père.

À mes frères : Ayoub et Ilyse.

N.Ahmed

Remerciement

Au terme de cette étude, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à :

Dieu Tout-Puissant de m'avoir accordé la force, le courage et la patience pour faire ce travail, ainsi que l'audace de surmonter toutes les difficultés.

Mes parents pour leur patience et leurs encouragements qui m'ont été très utiles tout au long de mes études et à ma chère famille pour leur soutien moral et financier Ma gratitude va particulièrement à :

*Je remercie encadreur **Pr. GUERIRA Belhi** et mon Co-encadreur **CHADI Kamel** pour leur engagement dans ce modeste travail. Leur soutien quotidien, leur patience inébranlable, leurs conseils avisés et leur indéniable intérêt pour tous les étudiants ont été inestimables.*

*Aux membres du jury **Mr.HADEF Sadek** et **Mr.HAMDI Omar** pour avoir pris la peine d'évaluer ce modeste travail*

*Tous mes professeurs et membres du personnel du Collège de génie mécaniqueénergétique qui ont contribué directement ou indirectement à ma formation surtout, Père de l'Energétique Pr **BELGHAR Nourredine**.*

*À mon ami **Mahmoud Kalfali**, étudiant au doctorat qui me soutient, merci de m'avoir encouragé à traverser les moments difficiles et d'avoir été à mes côtés pour terminer ma thèse de fin d'études. Que Dieu éclaire votre chemin et que Dieu vous accorde le succès*

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui, par un geste, moral ou physique, ont participé à la réalisation de cette thèse.

-Merci beaucoup-

Zidi Mohamed Saleh et Naceur Ahmed

SOMMAIRE

Dédicace	
Remerciement	
Sommaire	iii
Liste des tableaux	vi
Liste des Figures	viii
Nomenclature	x
Introduction Générale	2
Chapitre 1 : Revue Bibliographique	
1.1. Introduction	5
1.2. Synthèse bibliographique	5
1.3. Conclusion	19
Chapitre 02 : Généralité sur technique de refroidissement des composants électroniques	
2.1. Introduction	21
2.2. Systèmes de refroidissement des composants électroniques	22
2.2.1. Les composants électroniques	23
2.2.2. Problèmes de température des composants électroniques	24
2.2.3. L'influence de la température sur les circuits électroniques	24
2.2.4. Systèmes de refroidissement des composants électroniques	24
2.2.4.1. Refroidissement à l'air	25
2.2.5. Refroidissement par liquide caloporteur	27
2.2.6. Spray cooling	29

2.2.7. Systèmes de refroidissement diphasique	30
2.3. Les milieux poreux	33
2.3.1. Paramètres caractéristiques d'un milieu poreux	33
2.3.2. Différents modèles d'écoulements dans les milieux poreux	35
2.4. Nano-fluide	37
2.4.1. Méthodes de préparation des nano fluides	38
2.5. Les techniques de refroidissement des composants électroniques par utilise les milieux poreux et nano fluide	41
2.6. Conclusion	42
Chapitre 03 : Modélisation Mathématique et propriété thermo-physique nano fluide	
3.1. Introduction	43
3.2. Equations générales en régime laminaire	43
3.2.1. Equation de continuité	43
3.2.2. Equation de quantité de mouvement	44
3.2.3. Equation de conservation d'énergie	44
3.3. Equations générales avec un milieu poreux	45
3.3.1. La vitesse de Darcy et l'équation de continuité	45
3.3.2. Equation de quantité de mouvement avec milieux poreux	45
3.3.3. Equation d'énergie en milieu poreux	46
3.4. La géométrie du problème étudié	46
3.4.1. Hypothèses simplificatrices	47
3.4.2. Condition aux limites	48
3.4.3. Equations du problème	48
3.4.4. Les nombres adimensionnels	49

3.5. Les propriétés thermo-physiques de nano fluide	50
3.5.1. Propriétés thermo physiques pour le nano fluide (eau-Cu)	52
3.6. Conclusion	52
Chapitre 04 : Simulation Numérique	
4.1. Introduction	54
4.2. Procédure de la simulation	54
4.2.1. Logiciel ANSYS Workbench	54
4.2.2. Menu principal du logiciel d'ANSYS Workbench	55
4.2.3. Création de la géométrie	57
4.2.4. Le maillage	60
4.2.5. Configuration	62
4.3. Conclusion	65
Chapitre 05 Résultats et discussion	
5.1. Introduction	67
5.2. Résultats et interprétation	67
5.2.1. Test de convergence des résultats	67
5.2.2. Étude de la sensibilité au maillage	69
5.2.3. Distribution de la température de l'écoulement du nano-fluide	69
5.2.4. Distribution de la vitesse de l'écoulement de nano fluide	70
5.2.5. Distribution de lignes du courant	71
5.3. Conclusion	73
Conclusion Générale	75
Références	77
Résumé	

Liste des Tableaux

Tableau	Définition du tableau	Page
Tableau 3.1	Les propriétés thermo physique de nanoparticules et fluide de base.	52
Tableau 3.2	Propriétés thermo physiques pour le nano fluide (eau-Cu) - [3]	52

Figure	Définition de la figure	Page
Figure 1.1	Géométrie du problème Ramdane YOUNSI	7
Figure 1.2	Schéma de la configuration de problème Arunn Narasimhan –	8
Figure 1.3	Schéma du domaine physique Nabila Targui et Henda Kahalerras	9
Figure 1.4	Modèle physique et système de coordonnées Miroshnichenko et al	9
Figure 1.5	Géométrie du mode Ul Haq	10
Figure 1.6	géométrie de problème considéré, BOUSSENAH Hani et BOULAICHE Amir	12
Figure 1.7	Modéliser les microcanaux en tant que milieu poreux saturé de fluide : (a) géométrie des microcanaux et (b) schématique de la modélisation des milieux poreux	13
Figure 1.8	Schématique 2D du micro-canal avec différents position de la couche poreuse Alibeigi et Farahani-	14
Figure 1.9	Configuration de l'étude, Cimpean	15
Figure 1.10	Description schématique de la convection dans une cavité poreuse, un corps interne solide et le système de coordonnées	16
Figure 1.11	Schéma du montage expérimental Dey et al	16
Figure 1.12	Géométrie du problème de Radja Mebrek	17
Figure 1.13	Géométrie du problème de KHERIF Elkhensa	18
Figure 2.1	Les différents domaines d'application de l'électronique de puissance	22
Figure 2.2	Présentation type des composants électroniques	23
Figure 2.3	(1) : Image d'une carte mère (2) : Thermographie infrarouge	25
Figure 2.4	Exemple d'ailette de refroidissement et de nid d'abeille pour augmenter la surface d'échange convectif (ELECTROLUBE)-	26
Figure 2.5	Système de refroidissement forcé Radiateur (Fisher Elektronik) et ventilateur (SEPA)	27
Figure 2.6	Refroidissement liquide à plaque froide	28
Figure 2.7	Refroidissement liquide à micro-canaux	28
Figure 2.8	Refroidissement liquide à mini-canaux	29
Figure 2.9	Principe du spray cooling	29
Figure 2.10	Exemples de modules spray cooling électronique (SPRAY COOL)	30

Figure 2.11	Utilisation de PCM avec du graphite pour refroidir des batteries (3)	31
Figure 2.12	Systèmes de refroidissement par fluide diélectrique avec condensateur externe (A) interne (B)	32
Figure 2.13	porosité (A) d'interstice (B) à fissur	33
Figure 2.14	Image à fort grossissement (a) SEM et (b) TEM des nanoparticules 'Ag' synthétisées par la méthode PWE. L'encart montre une photographie numérique de nanoparticules "Ag" dispersées dans une solution aqueuse	40
Figure 2.15	Distribution différente des particules dans le fluide de base. (A) avant la formation des nanoparticules, (B) après la formation des nanoparticules	40
Figure 2.16	Principe d'un système de refroidissement avec nano fluide caloporteur intermédiaire.	41
Figure 2.17	Simulation du refroidissement de l'électronique par fluide	42
Figure 3.1	Géométrie du problème	47
Figure 3.2	Formes géométriques des milieux poreux	47
Figure 3.3	les conditions aux limites du phénomène pour Cas 1	48
Figure 4.1	Fenêtre lancement du logiciel	55
Figure 4.2	Menu principal de Workbench	55
Figure 4.3	Création d'une analyse (projet) en mécanique de fluide	56
Figure 4.4	Création d'un projet en mécanique de fluide	57
Figure 4.5	Création du modèle de la géométrie	57
Figure 4.6	Création du modèle (plan de vue)	58
Figure 4.7	Création d'esquisse	58
Figure 4.8	Concept surface à partir d'esquisse	59
Figure 4.9	Définition de la zone du fluide	59
Figure 4.10	Le maillage utilisé	60
Figure 4.11	Volume de contrôle bidimensionnel	
Figure 4.12	interface de configuration (Générale pour 1 ^{er} cas) Model (laminaire, équation de l'énergie)	63
Figure 4.13	Création les données du nano fluide	63
Figure 4.14	Création les données de material-solid	64

Figure 4.15	Création les données de milieu poreux	64
Figure 4.16	Condition aux limites –Inlet	64
Figure 4.17	Condition aux limites –Outlet	65
Figure 4.18	Condition aux limites –Composant électronique Wall	65
Figure 5.1	Présentation de l'évolution des résidus de calcul (1 ^{er} Cas et 2 ^{eme} Cas, 3 ^{eme} Cas)	68
Figure 5.2	Profils de la température du composant électronique pour différents maillages	69
Figure 5.3	la distribution de la température du nano fluide pour les trois cas (Re=200)	69
Figure 5.4	La fig. 9 représente la distribution de la vitesse du nano fluide pour les trois cas (Re=200)	70
Figure 5.5	la distribution de lignes du courant pour un nombre de Reynolds égal à 400	71
Figure 5.6	les variations de la température moyenne du composant électronique en fonction du nombre de Reynolds	72
Figure 5.7	les variations de la moyenne du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds	72

Nomenclature

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

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

T_∞ : Température de la surface du solide ($^{\circ}C$).

S : Surface d'échange thermique

T : Température ($^{\circ}C$ ou K)

K : La perméabilité (m^2)

C₀ : Le coefficient de forme

D : Le diamètre de cylindre

S_s : La surface spécifique

L_{cap} : la longueur moyenne d'un tuyau capillaire ondulé

L : la longueur du milieu

V : La vitesse d'écoulement (m/s)

Q : le débit (m^3/s)

S : la surface (m^2)

V_s : Volume de solide (nanoparticules).

V_T : Volume totale (nanoparticules + fluide de base)

C_p : La chaleur spécifique ($J. Kg^{-1}. K^{-1}$)

k : La conductivité thermique

keff : La conductivité thermique effective

g : Accélération de la pesanteur ($m. s^{-2}$)

Nu : Nombre de Nusselt

Pr : Nombre de Prandtl

Re : Nombre de Reynolds

Da : Nombre de Darcy

T_0 : La température de référence. ($^{\circ}C$ ou K)

ρ_0 : La densité du fluide à une température de référence.

u, v : Les composants du champ de vitesse dans les directions x, y ($m \cdot s^{-1}$)

x, y : Les coordonnées cartésiennes

Symbole Grecque :

β : Coefficient d'expansion thermique (K^{-1})

ϕ : Le flux de chaleur

σ : Constante de Stéphan Boltzmann ($W \cdot K^{-4} \cdot m^{-2}$)

Φ : La porosité

μ : La viscosité dynamique ($N \cdot s \cdot m^{-2}$)

ρ : La masse volumique du fluide (Kg/m^3)

μ_{eff} : la viscosité équivalente de même ordre de grandeur que celle du fluide

φ : La fraction volumique

α : Coefficient de diffusion thermique (m^2/s)

ν : La viscosité cinématique (m^2/s)

Indice :

f : Fluide de base

nf : Nano fluides

nfh : Nano fluide hybride

np : Nanoparticules

Introduction Générale

Introduction Générale

Grâce aux progrès rapides de l'industrie électronique, l'étude du transfert de chaleur dans des sources de chaleur discrètes a gagné une importance considérable. Actuellement, l'analyse du comportement thermique des composants électroniques et des ensembles de puissance est cruciale pour la conception de fonctions électroniques dans des environnements sévères. Un échauffement excessif peut non seulement dégrader les performances des composants, mais aussi raccourcir leur durée de vie et éventuellement entraîner des défaillances. Par conséquent, améliorer leur refroidissement est essentiel pour renforcer leur fiabilité.

Le refroidissement des composants électroniques est devenu une priorité majeure dans l'industrie moderne, en raison de l'augmentation constante de la densité de puissance et de la miniaturisation des dispositifs. Une gestion thermique efficace est indispensable pour maintenir la performance, la fiabilité et la longévité des composants électroniques.

Les composants électroniques, tels que les processeurs, les modules de puissance et les LED, génèrent une quantité significative de chaleur pendant leur fonctionnement. Une dissipation thermique insuffisante peut entraîner une surchauffe, provoquant des pannes ou une dégradation des performances. Les techniques traditionnelles de refroidissement, comme les dissipateurs thermiques à ailettes et les ventilateurs, ont des limites en termes de capacité de dissipation thermique et d'efficacité. Par conséquent, des solutions avancées sont nécessaires pour répondre aux besoins croissants de dissipation thermique dans les dispositifs modernes. [1]

Diverses méthodes de refroidissement ont été explorées, parmi lesquelles l'utilisation de nano-fluides et de milieux poreux émerge comme une solution prometteuse. Ces technologies offrent des capacités de dissipation thermique améliorées et répondent aux exigences de performance des dispositifs électroniques de nouvelle génération.

Les nano fluides sont des suspensions de nanoparticules (telles que des oxydes métalliques, des métaux purs, ou des nanotubes de carbone) dispersées dans un fluide de base (comme l'eau, l'huile, ou l'éthylène glycol). Les nanoparticules augmentent considérablement la conductivité thermique du fluide de base, ce qui permet un transfert de chaleur plus efficace. Les principaux avantages des nano fluides incluent [2] :

- Amélioration de la conductivité thermique : Les nanoparticules augmentent la conductivité thermique du fluide de base, permettant une meilleure dissipation de la chaleur.
- Augmentation de la capacité thermique : La capacité thermique des nano fluides peut être ajustée en fonction de la nature et de la concentration des nanoparticules.
- Amélioration des propriétés de convection : Les nano fluides peuvent améliorer les propriétés de convection thermique grâce à une distribution uniforme des nanoparticules.

Un milieu poreux est un matériau qui contient de nombreuses petites cavités ou pores à travers lesquels un fluide peut circuler. Les milieux poreux, tels que les mousses métalliques, les céramiques poreuses et les matériaux composites, sont utilisés pour améliorer les échanges thermiques grâce à leur grande surface spécifique et leur capacité à faciliter la circulation des fluides. [3]

L'intégration de nano fluides dans des milieux poreux réunit les avantages des deux technologies, aboutissant à des performances thermiques accrues. Voici quelques effets spécifiques :

- Amélioration de l'efficacité énergétique : Cette combinaison permet une dissipation de chaleur plus efficace tout en réduisant la puissance nécessaire pour le pompage du fluide, ce qui améliore l'efficacité énergétique globale du système de refroidissement.

La problématique porte sur la mesure dans laquelle la géométrie du milieu poreux influence l'efficacité du refroidissement des composants électroniques par les nano fluides.

Le présent mémoire se concentre sur l'effet de la forme géométrique du milieu poreux sur le refroidissement des composants électroniques par des nano fluides. Il s'articule autour de cinq chapitres et se conclut par une conclusion générale.

Chapitre 01

Revue bibliographique

Chapitre 01

Revue bibliographique

1.1.Introduction

Le transfert de chaleur dans les milieux poreux est un domaine de recherche en plein essor, en raison de son importance pour de nombreuses applications techniques. Ces milieux, caractérisés par une structure de pores interconnectés, sont essentiels dans des dispositifs tels que les échangeurs de chaleur, les isolants thermiques, les réacteurs chimiques et le refroidissement des composants électroniques.

Le refroidissement des composants électroniques est particulièrement critique en ingénierie thermique, surtout avec l'augmentation continue de la densité de puissance des dispositifs modernes. L'utilisation des milieux poreux pour le refroidissement présente des avantages significatifs, notamment en améliorant le transfert de chaleur et en gérant efficacement les flux thermiques. [4] Voici une revue des principales recherches et développements dans ce domaine.

1.2.Synthèse bibliographique

Selon la revue scientifique américaine (YEH'S REVIEW - 2002), une étude de l'U.S. Air Force a révélé que plus de 52 % des défaillances des systèmes électroniques sont étroitement liées à une augmentation incontrôlée des températures [5]. Les ventilateurs installés dans les PC, bien qu'ils soient souvent peu coûteux, présentent des inconvénients majeurs : ils génèrent du bruit, occupent de l'espace et sont donc peu efficaces et peu fiables. Ainsi, les études sur la convection sont essentielles pour gérer les flux thermiques et concevoir des équipements électroniques, fabriquer des films fins, décomposer les vapeurs chimiques, et bien d'autres applications [6].

Les problèmes de dissipation thermique revêtent une grande importance dans le domaine de l'industrie électronique. L'étude et la maîtrise de ces problèmes sont indispensables pour garantir le bon fonctionnement et la fiabilité des systèmes. Une génération excessive de chaleur nécessite une évacuation efficace, faute de quoi la durée de vie des composants électroniques sera compromise [5].

De nombreux travaux numériques et expérimentaux ont été réalisés par les chercheurs concernant la convection sous ses trois formes. Parmi ces travaux publiés, on peut citer celui de *Castro et Robins* (1977) [6]. Dans leur étude expérimentale, ils ont utilisé un anémomètre à fil chaud (HWA) pour mesurer le champ de vitesse autour d'un cube monté sur une plaque

plane. Ils ont observé que la taille de la zone de recirculation derrière le cube, dans la région du sillage, et la dimension du tourbillon sur le cube dépendent des conditions de l'écoulement en amont et des conditions aux limites à l'entrée. Une autre série d'études expérimentales a été réalisée par *Hussein et Martinuzzi* (1996) [7]. Larousse et al. (1991) et *Martinuzzi et Tropea* (1993) [8]. Leur objectif était d'étudier l'écoulement autour d'un cube monté dans une soufflerie à couches multiples développant un écoulement turbulent. Ces études fournissent une description détaillée du nombre de Reynolds, calculé en fonction de la hauteur du cube et de la vitesse moyenne (bulk velocity), avec un $Re = 40\ 000$.

➤ *L'effet du milieu poreux*

Les premières études sur le sujet comprennent les travaux de *Nield* [9], qui ont porté sur des couches horizontales soumises à des gradients opposés de température et de concentration. Nield a prédit le nombre de Rayleigh critique, délimitant le seuil de l'apparition de la convection, pour diverses conditions aux limites. *Tauton et Lightfoot* [10] ont également étudié le problème de la stabilité dans une couche poreuse horizontale saturée par un fluide binaire, avec des parois maintenues à des températures et des concentrations constantes. Ils ont utilisé la théorie de la stabilité linéaire pour déterminer les nombres de Rayleigh critiques marquant trois régimes de convection distincts. Une étude expérimentale menée par *Murray et Chen* [11] sur des billes en verre et de l'eau distillée a confirmé le nombre de Rayleigh critique de filtration obtenu par Nield. Par la suite, *L. Boubendir et S. Chikh* [12] ont cherché à caractériser le transfert de chaleur d'un écoulement turbulent dans un échangeur à plaques doté d'une couche poreuse, avec des parois maintenues à température constante. Ils ont utilisé les équations classiques de conservation, notamment l'équation moyennée de Darcy-Brinkman-Forchheimer, ainsi qu'un modèle statistique en un seul point ($k - \varepsilon$) adapté à l'écoulement turbulent en milieu poreux. Leurs résultats ont mis en lumière l'influence de l'épaisseur de la couche poreuse, de la perméabilité et de la conductivité thermique effective sur l'écoulement et le transfert thermique. Ils ont également observé une forte influence de la perméabilité et de l'épaisseur de la couche poreuse sur l'énergie cinétique turbulente, ainsi qu'une amélioration notable du transfert de chaleur sous certaines conditions grâce au rapport des conductivités thermiques.

Ramdane YOUNSI [13] Les transferts de chaleur et de masse par convection naturelle en milieux fluides et poreux ont été étudiés numériquement. Les parois verticales sont soumises à des températures et concentrations constantes, tandis que les parois horizontales sont adiabatiques et imperméables. Le phénomène de la convection thermosolutale est régi par les

équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie et de la concentration. Le milieu poreux est modélisé suivant le modèle général de Darcy – Brinkman – Forchheimer. L'écoulement convectif est régi par différents paramètres de contrôle, à savoir le nombre de Rayleigh (Ra), le rapport des forces de volume (N), le nombre de Prandtl (Pr), le nombre de Lewis (Le), le nombre de Darcy (Da) et la porosité ε de la matrice poreuse. La méthode des volumes de contrôle a été employée pour résoudre les équations de base en milieux fluide et poreux. Concernant la validation du code de calcul, l'accord obtenu entre nos résultats et ceux disponibles dans la littérature s'est avéré excellent. L'influence des paramètres physiques et géométriques est examinée. L'augmentation de l'épaisseur de la couche poreuse de faible perméabilité réduit considérablement les transferts thermique et massique. La décroissance du transfert de chaleur avec l'accroissement du rapport des forces de volume à nombre de Lewis élevé est mise en évidence. Par ailleurs, dans un souci de mettre à la disposition de l'ingénieur un outil lui permettant d'évaluer les transferts thermiques et massiques ayant lieu dans une configuration de type considérée, des corrélations sont proposées.

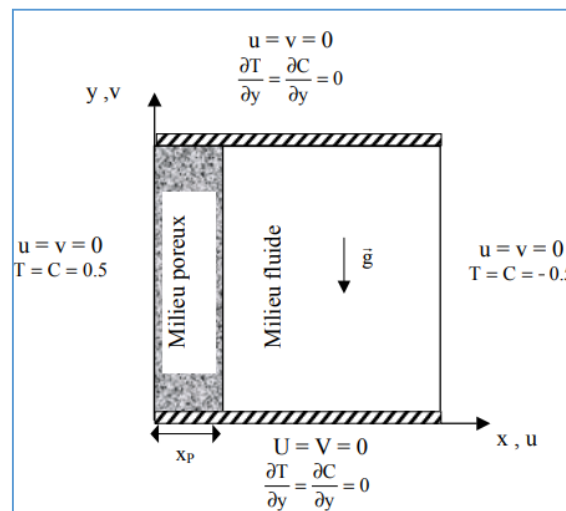


Figure 1.1 - Géométrie du problème Ramdane YOUNSI-

L'étude de *Arunn Narasimhan* [14] Le milieu poreux bi dispersé (BDPM) est constitué d'un milieu macroporeux dont la phase solide est remplacée par un milieu microporeux. Cette étude étudie, à l'aide de simulations numériques, la convection naturelle constante à l'intérieur d'une enceinte BDPM carrée constituée de blocs poreux carrés uniformément espacés et déconnectés qui forment le milieu microporeux. Les parois latérales sont soumises à un chauffage différentiel, tandis que celles du haut et du bas sont maintenues adiabatiques. La convection naturelle constante à l'intérieur d'une enceinte carrée chauffée à parois latérales remplie d'un

milieu poreux bi dispersé est étudiée à l'aide de simulations numériques. Des blocs poreux conducteurs uniformément répartis ont été traités comme le BDPM. L'effet de bi dispersion est étudié en faisant varier le nombre de Darcy interne Da des blocs poreux et le nombre de Darcy externe des macropores Da .

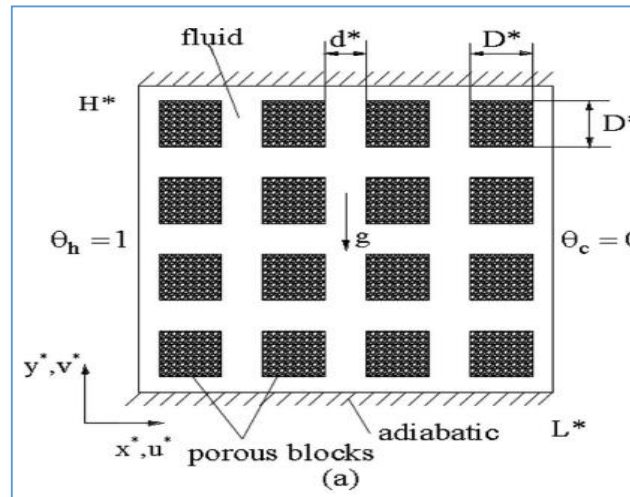


Figure 1.2 - Schéma de la configuration de problème Arunn Narasimhan –

L'étude réalisée par *Nabila Targui et Henda Kahalerras* [15] se concentre sur la caractérisation numérique du transfert de chaleur et de la chute de pression dans un échangeur de chaleur tubulaire équipé de chicanes poreuses. L'impact de la perméabilité, de la hauteur et de la conductivité thermique effective des chicanes est examiné dans cette étude. Les résultats de cette recherche mettent en évidence l'intérêt de l'utilisation de chicanes poreuses dans les échangeurs de chaleur tubulaires pour améliorer leurs performances. En particulier, pour un matériau poreux faiblement conducteur de chaleur ($Rk = 1$), le taux de transfert de chaleur le plus élevé est observé avec des perméabilités faibles et des hauteurs importantes. De plus, une augmentation du rapport des conductivités thermiques entraîne une amélioration du transfert thermique, en particulier pour des valeurs élevées du nombre de Darcy. Cependant, l'insertion de chicanes poreuses conduit à une augmentation de la chute de pression dans l'échangeur de chaleur, particulièrement notable pour des valeurs faibles du nombre de Darcy et des hauteurs importantes. Les résultats montrent que l'utilisation de telles structures peut considérablement améliorer le transfert de chaleur, tout en entraînant une chute de pression raisonnable pour des valeurs optimales de ces paramètres.

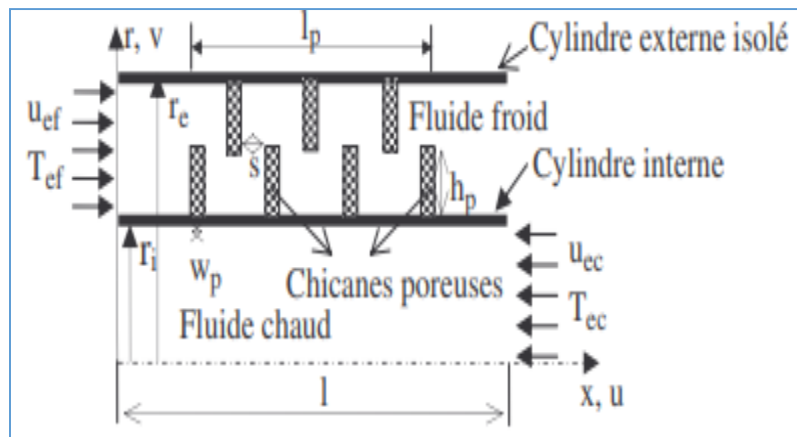


Figure 1.3 - Schéma du domaine physique Nabila Targui et Henda Kahalerras-

L'étude menée par *Miroshnichenko et al.* [16] aborde le défi crucial du contrôle des performances de transfert de chaleur dans diverses applications d'ingénierie. Elle se concentre sur la simulation numérique de l'impact des couches poreuses sur la convection naturelle dans une cavité ouverte, où une paroi verticale est chauffée et un nanofluide alumine/eau froid pénètre dans la cavité à partir d'une frontière ouverte. Cette recherche explore spécifiquement la convection naturelle d'un nanofluide alumine-eau dans une cavité ouverte avec deux couches poreuses verticales. Les corrélations expérimentales pour la viscosité effective et la conductivité thermique du nanofluide alumine-eau sont intégrées dans l'étude. Le problème aux limites formulé est résolu numériquement en utilisant la méthode des différences finies. En mettant en œuvre cette approche, l'étude vise à fournir des insights précieux sur les mécanismes de transfert de chaleur dans ce contexte complexe, ce qui pourrait avoir des implications significatives pour la conception et l'optimisation de systèmes de refroidissement et d'échange de chaleur dans diverses applications industrielles et technologiques.

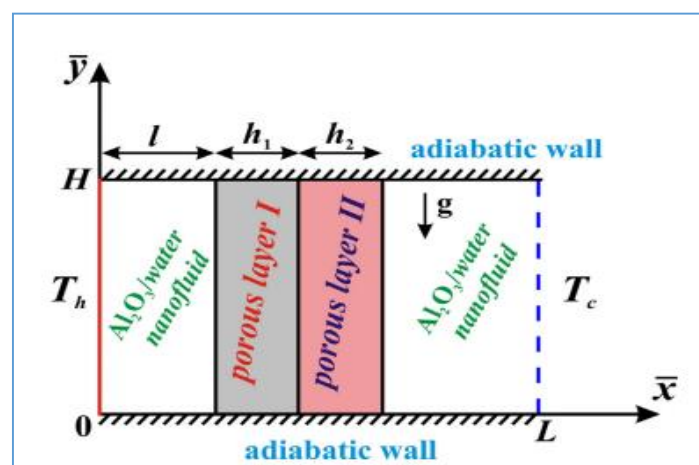


Figure 1.4 -Modèle physique et système de coordonnées Miroshnichenko et al-

Ul Haq et al. [17] Considérons un milieu poreux saturé de fluide visqueux MHD bidimensionnel enfermé dans une cavité de forme rectangulaire avec des surfaces inférieure et supérieure ondulées tandis que les deux autres parois verticales sont lisses. On suppose en outre que la température de la phase solide et de la phase fluide est uniforme pour le milieu poreux. Les caractéristiques d'écoulement de convection naturelle et de transfert de chaleur du fluide MHD à l'intérieur de la cavité rectangulaire ondulée ont été étudiées numériquement à l'aide de la méthode des éléments finis. Les effets du paramètre de longueur d'onde, du nombre de Rayleigh, du nombre de Darcy et du nombre de Hartmann ont été étroitement observés. Il a été constaté que les champs d'écoulement de vitesse et de température ont tendance à augmenter à mesure que la fréquence d'ondulation et le nombre de Rayleigh augmentent alors qu'ils ont un effet inverse sur le taux de transfert de chaleur. Le nombre de Nusselt a augmenté en raison de l'augmentation du paramètre de longueur d'onde et du nombre de Rayleigh. Le nombre de Darcy et Hartmann n'a pas d'effets significatifs sur la distribution de température. On remarque enfin que, plus la longueur de la partie chauffée est augmentée, plus le fluide dans la cavité est chauffé.

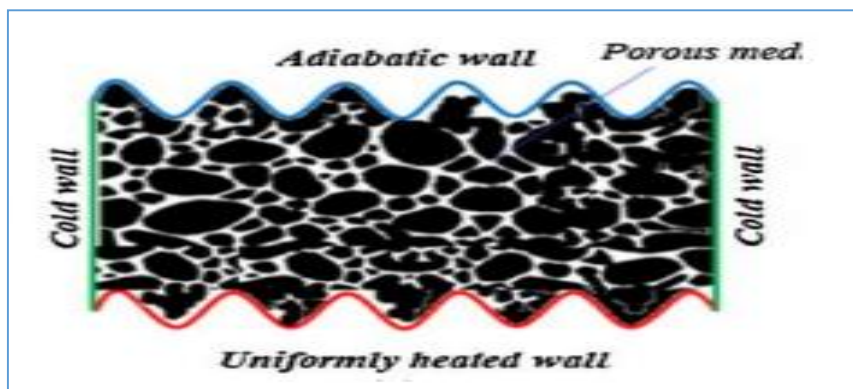


Figure 1.5 -Géométrie du mode Ul Haq-

Jang et Chang [18] ont analysé l'instabilité de la convection dans un milieu adjacent à une paroi horizontale chauffée par le bas, et présentent des résultats numériques pour des nombres de Lewis compris entre 1 et 10 et des rapports de forces de volume variant de -0.5 à 4. Les auteurs ont montré que le nombre de Rayleigh poreux thermique critique augmente avec la décroissance du nombre de Lewis qui caractérise le rapport entre la diffusion thermique et massique. Le transfert de chaleur et de masse dans une couche poreuse avec des températures et des concentrations imposées sur les parois horizontales a été étudié analytiquement par *Trevisan et Bejan* [19] pour des nombres de Rayleigh poreux thermiques élevés (50 à 2000) et dans le cas d'un écoulement de Darcy dont les forces de volumes sont essentiellement d'origine thermique. L'analyse des ordres de grandeurs a permis d'établir différentes échelles

pour le transfert de masse en fonction du nombre de Lewis. *Chen* [20] ont considéré cette configuration pour étudier la convection double diffusive en utilisant une équation de conservation générale comptant les termes de Darcy, Brinkman et Forchheimer.

Younsi et al. [21] ont analysé la structure de l'écoulement dans le cas du chauffage par le bas d'une cavité trapézoïdal entièrement poreuse. Ils ont également déterminé les transferts thermique et massique (nombre de Nusselt et nombre de Sherwood) pour des nombres de Rayleigh allant de 103 à 106. L'influence de la perméabilité, de l'inclinaison de la cavité ainsi que le rapport de forme a également été étudiée. Un régime d'écoulement multicellulaire a été mis en évidence pour différentes valeurs du rapport de forme de la cavité.

Cimpean et al. [22] ont étudié le problème de la convection mixte dans une cavité trapézoïdale poreuse remplie d'un nano fluide hybride (Cu- AL₂O₃), et les résultats numériques ont été obtenus et discutés. Les équations gouvernantes, transformées en termes de variables sans dimension, ont été élaborées par l'algorithme numérique développé basé sur la technique des différences finies. Les résultats numériques des lignes de courant et des isothermes sont été étudiés et l'effet de différents paramètres importants, tels que : le nombre de Reynolds, le nombre de Darcy et la fraction volumique des nanoparticules ont été discutés. La variation du nombre de Nusselt moyen et du débit de fluide a été obtenue et ils ont constaté qu'en choisissant des combinaisons de nanoparticules différentes et appropriées dans un nano fluide hybride, le taux de transfert thermique souhaité peut être obtenu.

Dans leur étude, *Hani Boussenah et Amir Boulaiche* [23] ont examiné la convection naturelle impliquée dans le refroidissement d'un composant électronique, considéré comme une source de chaleur, enveloppé par une couche poreuse à l'intérieur d'une cavité carrée. Les parois verticales de la cavité sont maintenues à une température constante et froide, tandis que les parois horizontales sont adiabatiques. Leur analyse repose sur les équations de Navier-Stokes pour la zone fluide, le modèle de Darcy-Brinkman-Forchheimer pour la couche poreuse, et l'équation d'énergie. La résolution numérique est obtenue grâce à la méthode des volumes finis, associée à l'algorithme SIMPLER. Les résultats de l'étude sont présentés sous forme de contours de la fonction du courant, d'isothermes, ainsi que de profils du nombre de Nusselt et de la température. Ils démontrent que l'utilisation d'une couche poreuse dotée d'une conductivité thermique élevée favorise le refroidissement du composant électronique.

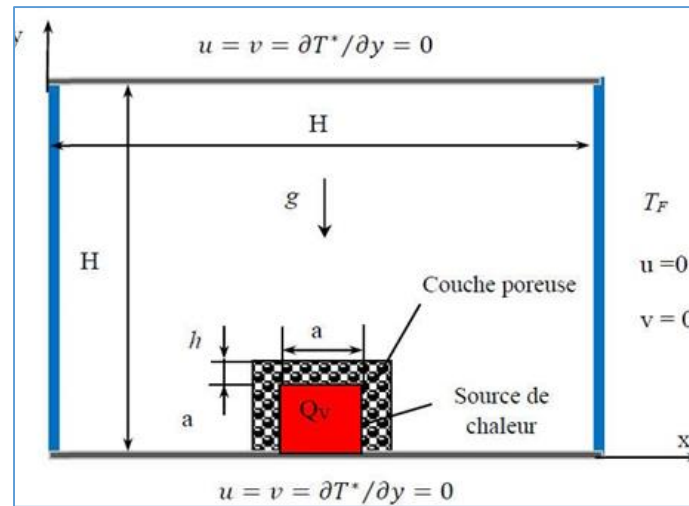


Figure 1.6 -géométrie de problème considéré, BOUSSENAH Hani et BOULAICHE Amir-

Dans l'étude menée par *Jun Jie Liu et al.* [24] Une modélisation de milieu poreux est appliquée au refroidissement par microcanal d'une puce réaliste. Cette méthode de modélisation permet de calculer le coefficient de transfert de chaleur, la chute de pression, la température du fluide et la distribution de la qualité de la vapeur en utilisant des corrélations empiriques, puis d'appliquer ces distributions dans le modèle solide à l'aide de COMSOL. Différentes régions de flux sont prises en compte, et une itération est réalisée entre les calculs de la région du milieu poreux et ceux du substrat solide. Grâce à cette méthode, le temps de calcul est réduit d'au moins 50 % par rapport à la modélisation conjuguée, qui considère des canaux individuels mais utilise toujours des corrélations empiriques. Cette approche permet d'étudier des alternatives de conception "et si" et d'optimiser le système pour refroidir efficacement l'ensemble de la puce. L'étude examine également l'effet de la variation de la largeur du canal. Étant donné que le coefficient de transfert de chaleur par ébullition dépend faiblement du flux massique et de la largeur du canal, l'optimisation de la largeur du canal n'améliore que de manière limitée les performances de refroidissement. Cependant, cette optimisation peut améliorer la répartition du débit massique et la qualité de la vapeur de sortie par rapport au débit total ou à la puissance de pompage de la puce, ce qui réduit le gradient de température sur la puce et améliore la performance globale du système.

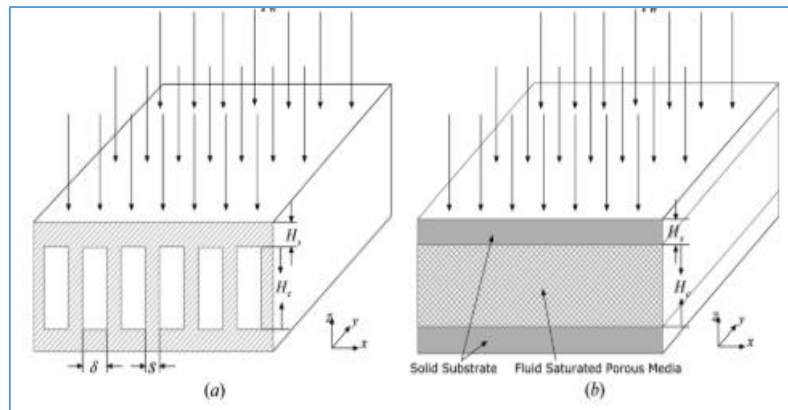


Figure 1.7 - Modéliser les microcanaux en tant que milieu poreux saturé de fluide : (a) géométrie des microcanaux et (b) schématisation de la modélisation des milieux poreux-

L'étude expérimentale menée par *Abderrahmane Bairi et al.* [25] Examine le refroidissement de composants électroniques dans une cavité hémisphérique, avec la coupole maintenue à une température uniforme tandis que sa base est inclinée à des angles variant de 0° (disque horizontal avec la coupole vers le haut) à 135° . Un composant actif en forme de dôme est positionné au centre de cette base. L'espace entre les éléments chauffés différemment de l'assemblage est rempli d'un milieu poreux à forte porosité saturé par un nanofluide eau-cuivre, avec une fraction volumique variant de 0% (eau pure) à 7%. Le nombre de Rayleigh, basé sur le rayon de la coupole, atteint des valeurs élevées jusqu'à $7,29 \times 10^{10}$ en raison du flux thermique superficiel important généré par le dispositif en fonctionnement. Le rapport entre la conductivité thermique de la matrice solide et celle du fluide de base varie de 0 (volume interstitiel sans milieu poreux) à 41,4 pour les applications envisagées. Cette étude, réalisée à l'échelle 1 avec un prototype industriel, quantifie le transfert thermique convectif naturel à l'aide du nombre de Nusselt, déterminé pour de nombreuses configurations en faisant varier le rapport de conductivité thermique solide-fluide, l'angle d'inclinaison, le nombre de Rayleigh et la fraction volumique du nanofluide. Les résultats démontrent que les performances de refroidissement du nanofluide Cu-H₂O se dégradent avec son âge et le nombre d'utilisations. De plus, l'analyse de la reproductibilité des résultats confirme l'irréversibilité des performances. Les valeurs mesurées sont comparées à celles obtenues dans une étude numérique récente basée sur la méthode de contrôle du volume, et les écarts observés, en tenant compte des marges d'incertitude expérimentales, valident le modèle mathématique utilisé dans l'approche numérique.

Alibeigi et Farahani. [26] ont présenté une étude numérique sur l'efficacité de la position du matériau poreux dans un micro canal sur les caractéristiques de transfert de chaleur. Plusieurs

configurations de la couche poreuse ont été testées. La modélisation a été réalisée avec le logiciel COMSOL en utilisant la méthode des éléments finis. Les résultats montrent qu'en augmentant la quantité de ϕ , le nombre de Nusselt (Nu) sans dimension diminue. À mesure que l'épaisseur du film poreux augmente, le facteur de transfert thermique augmente tandis que la vitesse de glissement diminue. Les modifications du transfert de chaleur et de la vitesse de glissement sont proportionnelles à la variation du nombre de Darcy (Da). Le transfert de chaleur est plus important lorsque la couche poreuse est placée près de la paroi plutôt qu'au centre du canal. Le transfert de chaleur le plus élevé se produit lorsque la couche poreuse est située le long du micro canal avec une longueur de $L/5$, avec une amélioration du transfert de chaleur de 86,27 %. Il est précisé que la quantité de transfert de chaleur à partir du micro canal dépend fortement de la localisation du milieu poreux.

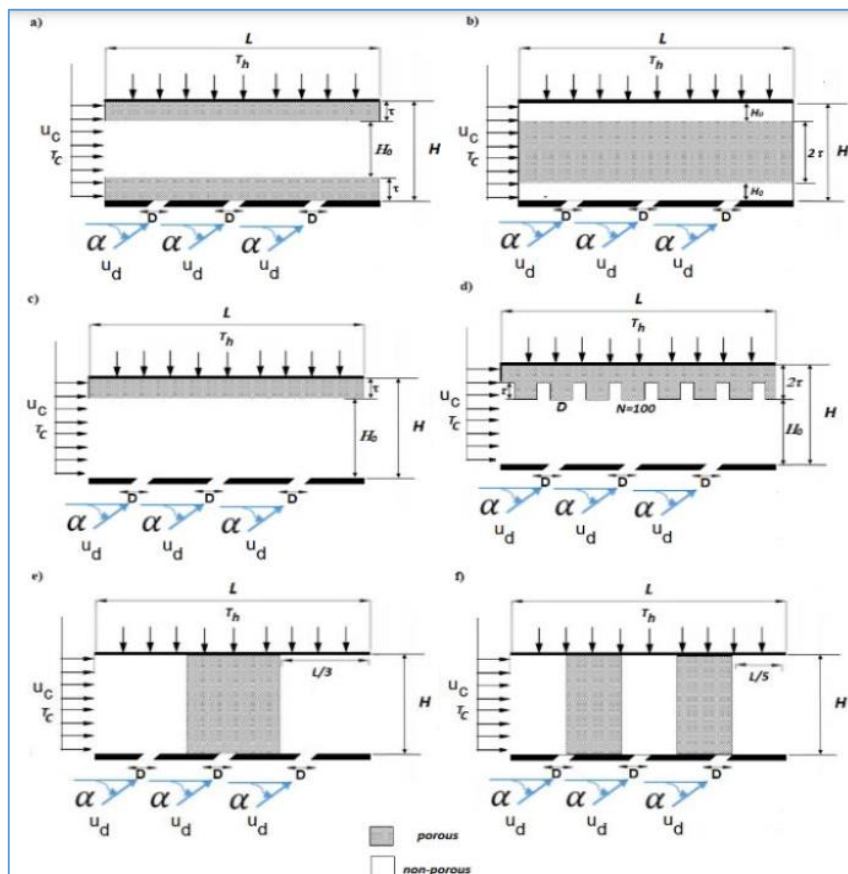


Figure 1.8- Schématique 2D du micro-canal avec différents position de la couche poreuse
Alibeigi et Farahani-

Cimpean et al. [27] ont étudié la convection mixte dans une cavité trapézoïdale poreuse remplie d'un nanofluide hybride (Cu-AL₂O₃/eau). Les résultats numériques obtenus et discutés

reposit sur un algorithme numérique basé sur la technique des différences finies, appliqué aux équations gouvernantes transformées en variables sans dimension. Les lignes de courant et les isothermes ont été analysées, ainsi que l'effet de divers paramètres importants tels que le nombre de Reynolds, le nombre de Darcy et la fraction volumique des nanoparticules. La variation du nombre de Nusselt moyen et du débit de fluide a également été étudiée. Ils ont constaté qu'en choisissant des combinaisons appropriées de nanoparticules dans un nanofluide hybride, il est possible d'obtenir le taux de transfert thermique souhaité.

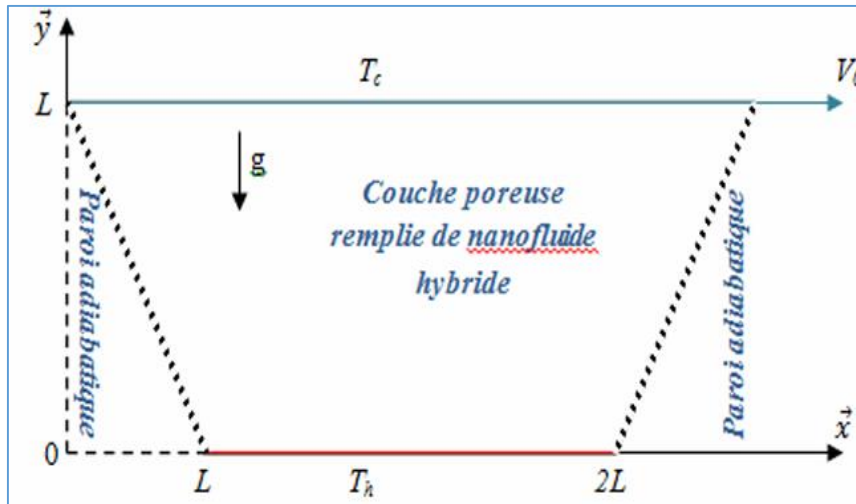


Figure 1.9- Configuration de l'étude, Cimpean-

Alsabery et al. [28] ont étudié la convection naturelle dans une cavité poreuse carrée de longueur L et un corps interne solide de longueur d . Le nanofluide se trouve entre la cavité poreuse et le corps solide. Les résultats montrent que les nanoparticules possèdent une grande uniformité dans le fluide de base et que le nombre de Nusselt augmente avec les valeurs croissantes du nombre de Darcy. La porosité augmente le nombre de Nusselt moyen à un nombre de Darcy plus élevé tandis que son influence reste négligeable à un nombre de Darcy faible. Pour la porosité donnée, il existe une valeur critique de la fraction volumique des nanoparticules lorsque le nombre de Nusselt moyen est maximal.

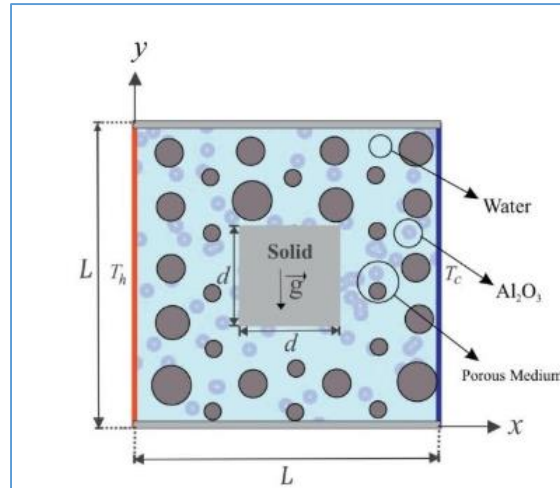


Figure 1.10 -Description schématique de la convection dans une cavité poreuse, un corps interne solide et le système de coordonnées-

Aneja et al. [29] ont mené une étude numérique sur le phénomène de convection naturelle dans une cavité carrée poreuse contenant un fluide de Casson. Pour examiner l'effet d'une zone chauffée sur l'écoulement du fluide et les caractéristiques de transfert de chaleur, ils ont modifié la longueur de la partie chauffée de la paroi. Les résultats de leur étude montrent que l'augmentation du paramètre de fluide de Casson (ι) et du nombre de Darcy entraîne une augmentation du transfert de chaleur et de la circulation de l'écoulement. De plus, le transfert de chaleur par conduction devient prédominant pour un faible nombre de Darcy sur une large plage du nombre de Rayleigh.

Dey et al. [30] ont réalisé un travail expérimental pour découvrir l'effet des nanofluides sur la convection naturelle dans les milieux poreux, ce travail a été réalisé en utilisant trois types de fluides de travail (air, eau du robinet et eau distillée) pour étudier le coefficient de transfert de chaleur dans une enceinte.

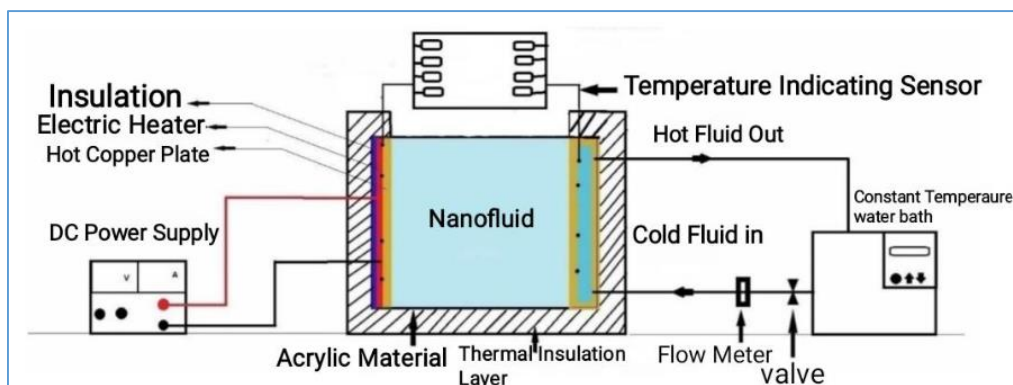


Figure 1.11 - Schéma du montage expérimental Dey et al

Radja Mebrek. [31] a présenté une étude numérique sur l'effet de la convection naturelle à l'intérieur d'une cavité triangulaire bidimensionnelle remplie d'un nanofluid hybride ($AL_2O_3+Cu-H_2O$) en présence d'un milieu poreux. Les équations gouvernantes du phénomène physique ont été résolues par la méthode des volumes finis, et l'effet du nombre de Rayleigh et de la fraction volumique des nanoparticules a été étudié sur les valeurs de débit et d'échange de chaleur. Les résultats de l'étude montrent que l'augmentation du nombre de Rayleigh améliore le coefficient de transfert de chaleur. Il a également été observé une relation inverse entre la porosité du milieu et le transfert de chaleur : plus la porosité du milieu est faible, plus le transfert de chaleur est important. De plus, l'indice de Nusselt est affecté par l'augmentation du nombre de Rayleigh et par la diminution de la porosité du milieu.

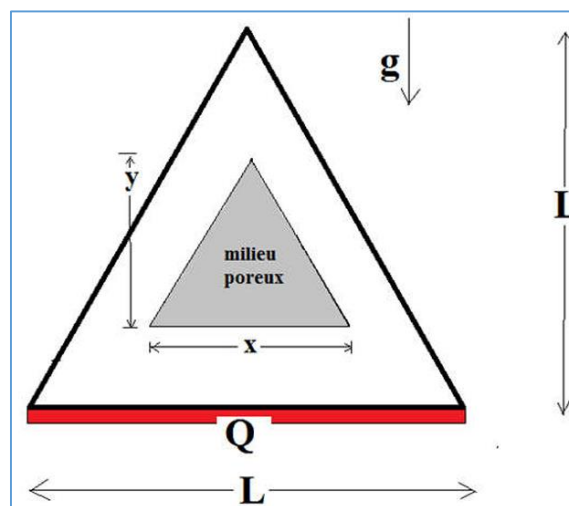


Figure 1.12 - Géométrie du problème de Radja Mebrek-

Izadi et Mohsen. [32] ont réalisé une étude numérique de l'écoulement de la convection naturelle transitoire du nano fluide dans une enceinte triangulaire contenant un milieu poreux. Les résultats suggèrent que l'utilisation d'un nano fluide hybride a des effets néfastes sur le taux de transfert de chaleur. En revanche, à mesure que la fraction volumique de nanoparticules du nano fluide simple à l'intérieur de la chambre augmente, le taux de transfert de chaleur par convection s'améliore. De plus, il a été observé que l'utilisation des deux nano fluides (simples et hybrides) dans un milieu poreux pourrait améliorer la convection.

KHERIF Elkhensa. [33] a présenté une étude numérique sur l'effet des milieux poreux sur le transfert de chaleur en présence de nanofluides hybrides (eau- $CuAl_2O_3$). Les simulations numériques ont été réalisées avec le logiciel ANSYS, en variant les nombres de Reynolds et de Darcy ainsi que les fractions volumiques de nanoparticules pour examiner leur impact sur les

propriétés hydrodynamiques et thermiques dans la géométrie étudiée. Les résultats obtenus ont révélé plusieurs observations importantes :

- L'effet des nanoparticules hybrides sur le profil de température est significatif. L'ajout de différents types de nanoparticules améliore la conductivité thermique par rapport à l'utilisation d'un seul type de nanoparticules, ce qui favorise une meilleure progression du refroidissement.
- L'évolution du coefficient de frottement a été analysée pour deux cas : sans milieu poreux et avec milieu poreux. Les résultats montrent que la présence d'un milieu poreux contribue au processus de refroidissement en réduisant la vitesse du fluide autour d'un obstacle entouré de ce milieu.

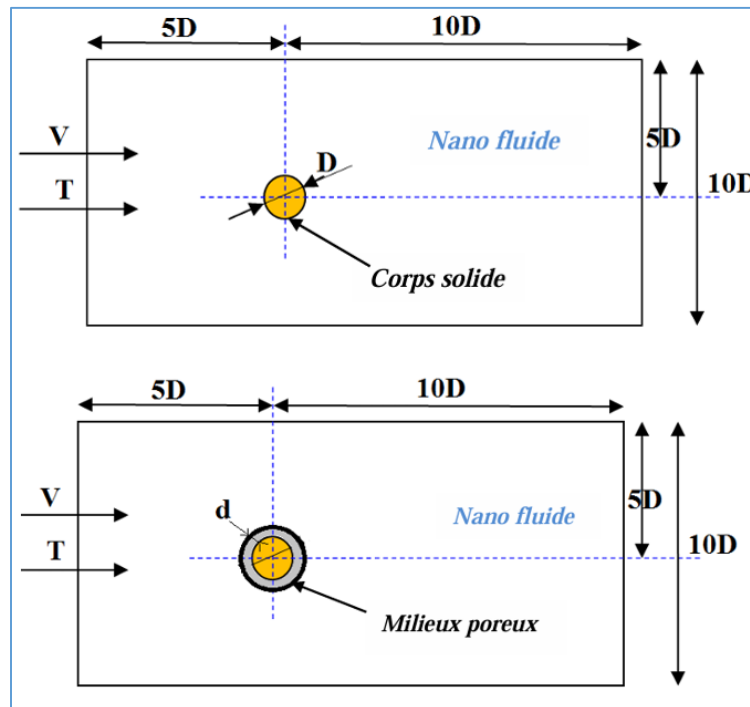


Figure 1.13- Géométrie du problème de KHERIF Elkhensa-

Baameur Walid et Boutiche Samir. [34] ont réalisé une étude sur l'effet des nano fluides dans un milieu poreux sur le transfert thermique. La convection naturelle dans une cavité ondulée avec un bloc carré centré a été choisie comme domaine d'étude. La matrice poreuse est supposée en équilibre thermique local (LTE) avec deux côtés partiellement actifs. La partie active, située sur le côté gauche, est maintenue à une température supérieure à celle du côté droit, tandis que les parois supérieure et inférieure sont adiabatiques. Les équations gouvernant ce phénomène ont été résolues par une approche numérique basée sur la méthode des volumes finis pour un nombre de Rayleigh ($Ra = 10^5$) et différents paramètres de contrôle. La simulation numérique

a été réalisée avec le logiciel commercial ANSYS Fluent. Les résultats ont montré l'influence positive des nano fluides sur l'amélioration du nombre de Nusselt, indiquant une meilleure performance de transfert de chaleur.

1.3.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré une recherche bibliographique approfondie sur le refroidissement des composants électroniques ou des micro canaux en présence de milieux poreux. Dans le chapitre suivant, nous approfondirons notre analyse en examinant de plus près les interactions entre le refroidissement des composants électroniques et les milieux poreux en utilisant des nano fluides.

Chapitre 02

Généralité sur technique de refroidissement des composants électroniques

Chapitre 02

Généralité sur technique de refroidissement des composants électroniques

2.1.Introduction

La dissipation de chaleur est un défi majeur dans la conception des composants électroniques, car une accumulation excessive de chaleur peut réduire les performances et la durée de vie des dispositifs. Les techniques de refroidissement par les milieux poreux et les nano fluides sont deux approches innovantes pour améliorer l'efficacité du refroidissement des composants électroniques.

- ***Refroidissement par les milieux poreux*** : Les milieux poreux, tels que les mousses métalliques, les éponges métalliques, ou les matériaux composites à structure poreuse, sont utilisés comme substrats pour les dissipateurs de chaleur. Ces matériaux offrent une grande surface spécifique, ce qui favorise l'échange thermique avec l'air ambiant. Lorsque l'air circule à travers les pores du matériau poreux, la chaleur est transférée de manière efficace du composant électronique vers l'air. [2]
- ***Refroidissement par les nano fluides*** : Les nano fluides sont des suspensions liquides contenant des nanoparticules dispersées dans un liquide de base, tel que l'eau ou un fluide caloporteur. Les nanoparticules, telles que les nanoparticules de métal ou d'oxyde, augmentent la conductivité thermique du fluide de base. Lorsque les nano fluides sont utilisés comme agent de refroidissement, ils peuvent transporter la chaleur plus efficacement que les fluides traditionnels, ce qui améliore les performances de refroidissement. [1]

Les techniques de refroidissement par les milieux poreux et les nano fluides sont utilisées dans une variété d'applications électroniques, notamment les ordinateurs, les serveurs, les dispositifs de télécommunication, les systèmes de puissance, etc. Ces techniques sont particulièrement utiles dans les applications où l'espace est limité et où des performances de refroidissement élevées sont nécessaires.

2.2. Systèmes de refroidissement des composants électroniques

Il existe trois types d'échelles pour considérer les problématiques de dissipation thermique des éléments électriques : l'échelle du composant (puce, diode...), celle du système (onduleur, KERS...), et celle des applications (automobile, avion, ...). Afin de donner une idée des domaines d'application de l'électronique de puissance, la figure 1 présente le plan puissance apparente en fonction de la fréquence d'utilisation. Les domaines d'utilisation s'étendent de la dizaine de hertz pour les applications fonctionnant à plusieurs mégawatts, jusqu'à plusieurs centaines de kHz (transistors MOS les plus rapides) à de faible puissance (de l'ordre du watt). L'intervalle de puissance va donc du watt jusqu'à la centaine de mégawatts pour les applications les plus puissantes (par exemple les fours à arc électriques). [35]

Les puissances thermiques à dissiper dépendent du rendement des éléments électroniques. Selon la taille de l'élément, le rendement varie de 60% à 99%. A titre d'exemple le rendement d'un moteur électrique est d'environ 90% donc pour un moteur de 100 kW, la puissance thermique à dissiper est de 10 kW.

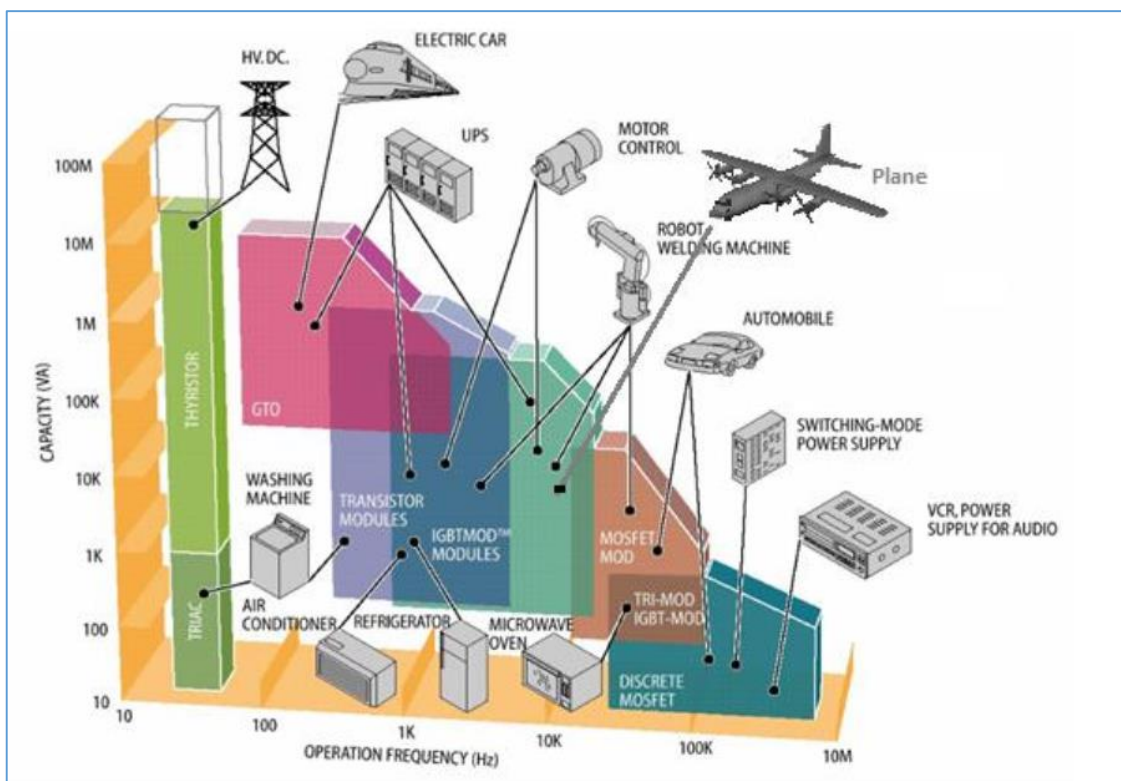


Figure 2.1- Les différents domaines d'application de l'électronique de puissance-

2.2.1. Les composants électroniques

Un composant électronique, essentiel dans un circuit électronique, se caractérise généralement par deux broches métalliques et est encapsulé dans des matériaux tels que le métal, la céramique ou le plastique. Ces composants sont souvent reliés entre eux par des soudures sur un circuit imprimé. Une diversité de types de composants électroniques existe : les composants discrets, tels que les transistors ou les diodes, sont encapsulés individuellement, tandis que les composants intégrés regroupent plusieurs éléments discrets pour former des ensembles complexes. D'autres types de composants incluent les actifs, qui génèrent une excitation électrique, les passifs, qui assurent la connexion des composants actifs, ainsi que les électromagnétiques (comme les transformateurs et les inducteurs), les électroacoustiques (comme les microphones et les écouteurs) et les optoélectroniques. Enfin, les composants semi-conducteurs sont fabriqués à partir de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium, capables de conduire ou d'isoler l'électricité selon la température ambiante. Dans le domaine des circuits électroniques, il est crucial de faire la distinction entre les composants (dispositifs physiques ou appareils) et les éléments (abstractions ou modèles). Par exemple, dans les micro-ordinateurs équipés de processeurs haute vitesse, il est impératif de dissiper la chaleur générée par ces composants. Avec la tendance à intégrer un nombre croissant de composants, la génération de chaleur augmente également, d'où l'importance cruciale du processus de refroidissement, principalement axé sur le contrôle thermique de ces composants. [36]

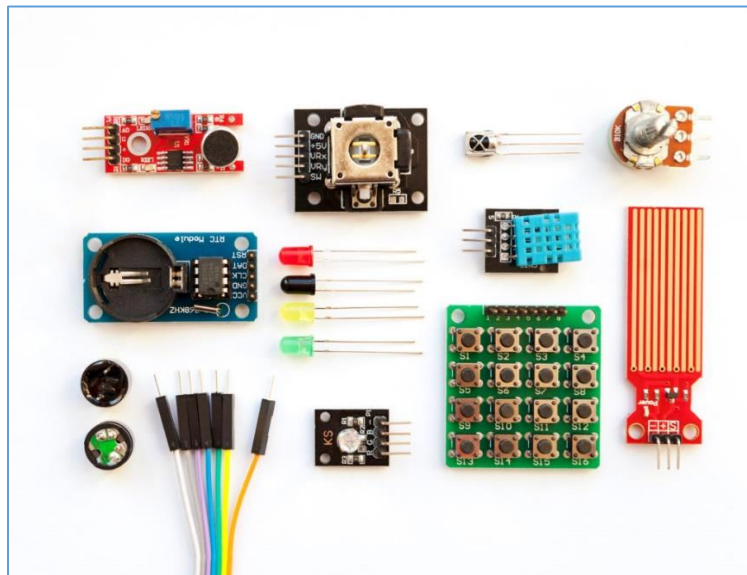


Figure 2.2- Présentation type des composants électroniques-

2.2.2. Problèmes de température des composants électroniques

L'augmentation de la fréquence de fonctionnement et l'explosion de projets de miniaturisation a engendré plusieurs problèmes dus à l'augmentation considérable du flux de chaleur généré par les composants électroniques. Si la chaleur n'est pas dissipée en temps voulu, la température de jonction sera supérieure à la température de fonctionnement maximale mentionnée par le constructeur, le contrôle thermique devient donc de plus en plus complexe.

M. REBAY et al. [37] ont montré par thermographie infrarouge que la température globale d'un microprocesseur ne reflète pas la topographie thermique réelle de la puce intégrée. Comme le montre la figure I-1, une partie dégage plus de chaleur que les autres. C'est ce que l'on appelle un point chaud ("hotspot"), représenté en rouge sur cette figure. J. Donald et M. Martonosi [38] parlent d'une différence de température de l'ordre de 5 à 25°C, entre la température moyenne et le point le plus chaud. Ces pics de température risquent de causer de graves dégâts sur une zone précise du processeur.

2.2.3. L'influence de la température sur les circuits électroniques

- Les performances électriques : la température peut être une valeur limite au-delà de laquelle le fonctionnement n'est plus garanti, des dérivées des paramètres provoquent une diminution des performances pouvant aller jusqu'à la défaillance.
- Le packaging soumis à des gradients de température très importants. Il existe des températures critiques pour lesquelles se produisent des changements d'état, de structure physique. Le fluage et le relâchement des contraintes dans les matériaux sont accélérées par la température et peuvent conduire à des ruptures d'éléments.
- Les cycles thermiques, auxquels sont soumis des matériaux reliés entre eux et de coefficient de dilatation différent, induisent des forces très importantes qui peuvent conduire à une rupture instantanée ou créer une fatigue qui provoque une rupture à long terme. [39]

2.2.4. Systèmes de refroidissement des composants électroniques

Dans tout système de refroidissement, la chaleur doit initialement se propager par conduction thermique à travers les différentes couches de l'assemblage avant d'atteindre le liquide de refroidissement. Il est donc crucial de choisir avec soin les matériaux constituant ces couches et les interfaces correspondantes (telles que les brasures). C'est pourquoi des dispositifs d'échange thermique avec l'environnement ont été élaborés et améliorés. [40]

On distingue 2 modes différents de systèmes de refroidissement :

- *Systèmes de refroidissement actifs :*

Cette méthode repose sur le transfert de chaleur par convection forcée, exigeant l'emploi d'une pompe mécanique pour garantir la circulation du fluide thermique, ainsi qu'un circuit externe pour évacuer la chaleur du système vers l'extérieur. [40]

- *Systèmes de refroidissement passifs :*

Ils ne requièrent aucune source d'alimentation externe, ce qui réduit les coûts énergétiques. Le refroidissement passif peut être subdivisé en deux catégories : direct et indirect, en fonction de si le fluide caloporteur entre ou non en contact avec les composants électroniques. [41]

Les systèmes de refroidissement des composants électroniques sont essentiels pour maintenir des températures de fonctionnement sûres et optimales, assurant ainsi des performances stables et une durée de vie prolongée des dispositifs. Voici un aperçu des principales méthodes de refroidissement utilisées dans les composants électroniques :

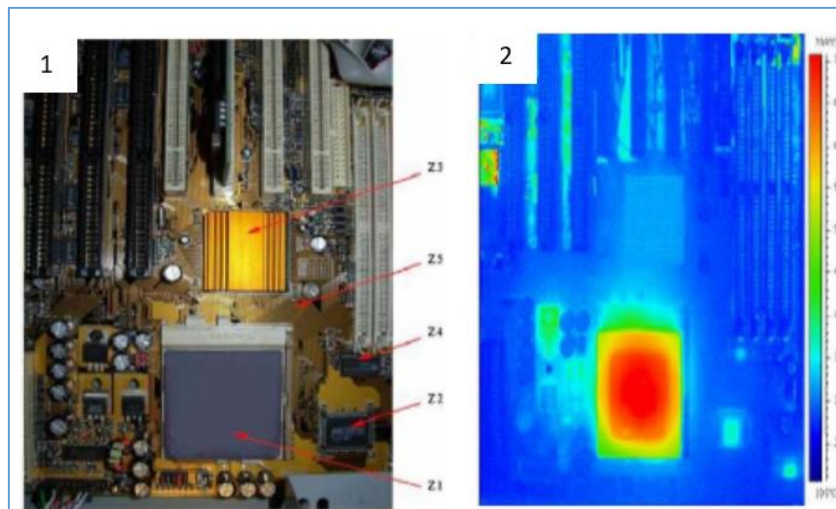


Figure 2.3- (1) : Image d'une carte mère (2) : Thermographie infrarouge-

2.2.4.1. Refroidissement à l'air

Les systèmes de refroidissement à air sont adaptés aux composants électroniques présentant une faible contrainte thermique. Les principaux atouts de ce système résident dans sa simplicité relative et son coût de mise en œuvre abordable. Les transferts thermiques s'opèrent par convection et rayonnement entre l'élément électronique, en tant que source de chaleur, et l'environnement, servant de dissipateur.

▪ *Convection naturelle par air*

Le refroidissement passif implique l'absence de pièces mécaniques en mouvement. Un simple dissipateur thermique, tel qu'un radiateur, est fixé sur le composant à refroidir pour augmenter sa surface de contact avec l'air ambiant, facilitant ainsi la dissipation de la chaleur. Ce système repose sur un dissipateur de chaleur dimensionné en fonction de la surface de refroidissement, choisi pour ses propriétés thermiques telles que la bonne diffusivité et la grande capacité thermique, généralement en cuivre ou en aluminium (voir Figure 2.3). La chaleur émise par le composant est transférée au dissipateur thermique avant d'être dissipée dans l'air environnant. L'ajout d'un dissipateur thermique peut donc considérablement améliorer l'efficacité du refroidissement. [42]

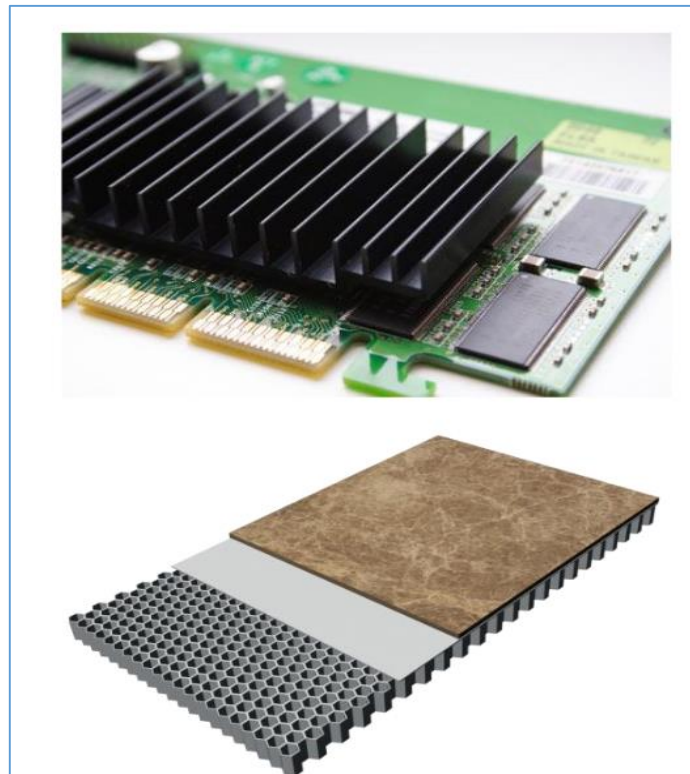


Figure 2.4-Exemple d'ailette de refroidissement et de nid d'abeille pour augmenter la surface d'échange convectif (ELECTROLUBE)-

▪ *Convection forcée à air*

Le refroidissement par soufflage d'air forcé, réalisé à l'aide de ventilateurs, est largement privilégié pour refroidir les composants électroniques en raison de sa simplicité, de son coût abordable et de sa fiabilité. Son fonctionnement repose sur une lame en céramique alimentée en courant électrique, induisant des oscillations à très hautes fréquences.

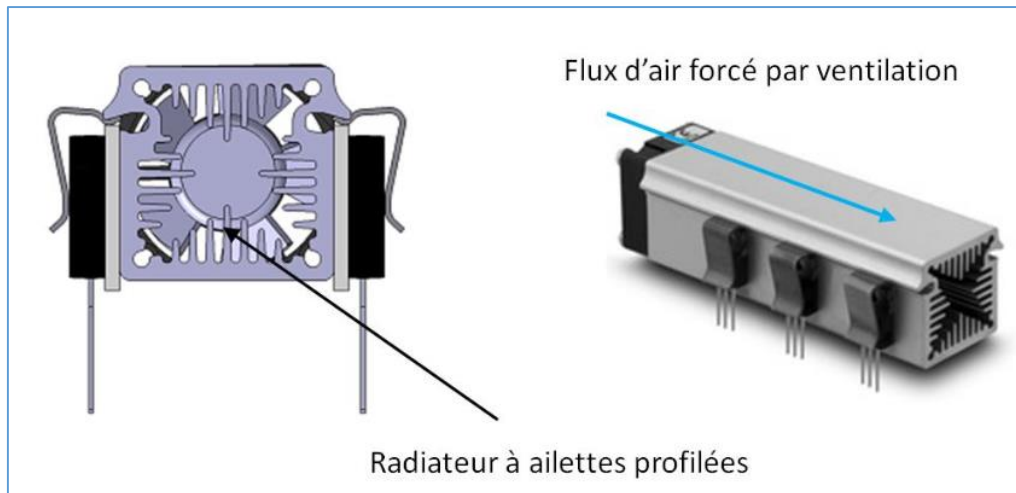


Figure 2.5- Système de refroidissement forcé Radiateur (Fisher Elektronik) et ventilateur (SEPA)-

2.2.5. Refroidissement par liquide caloporteur

Le refroidissement liquide monophasique indirect est utilisé dans les composants électroniques sous forme de plaques à eau, dans lesquelles circule un liquide caloporteur, ou de canalisations fluidiques accolées aux surfaces à refroidir. Un système comprenant principalement une pompe et un échangeur permet d'évacuer la chaleur du liquide caloporteur vers l'extérieur du serveur. Il existe différentes variantes de refroidissement liquide par plaque froide, qui se distinguent par le diamètre hydraulique des canaux de la plaque. La performance thermique de la plaque froide est inversement proportionnelle à la taille des canaux, tandis que les pertes de charge hydraulique sont proportionnelles à cette taille.

Pour des diamètres de canaux allant de 10 à 800 μm , la plaque froide est dite à micro-canaux (figure 2.7). Pour des diamètres de 1 à 10 mm, elle est dite à mini-canaux (figure 2.8). Au-delà de 10 mm, ces systèmes sont généralement appelés plaques froides (figure 2.6) (Meysenc, 1998; Baviere, 2005).

▪ *Refroidissement par plaques à eau*

Une méthode fiable implique l'utilisation d'une cavité située à proximité de la source de chaleur, à travers laquelle le liquide circule de manière turbulente. Cette technique, souvent employée avec un liquide à base d'eau, est appelée plaque à eau. Pour induire cette turbulence, une pompe est requise pour forcer le passage du fluide entre deux plaques après son passage dans un canal étroit. [42]

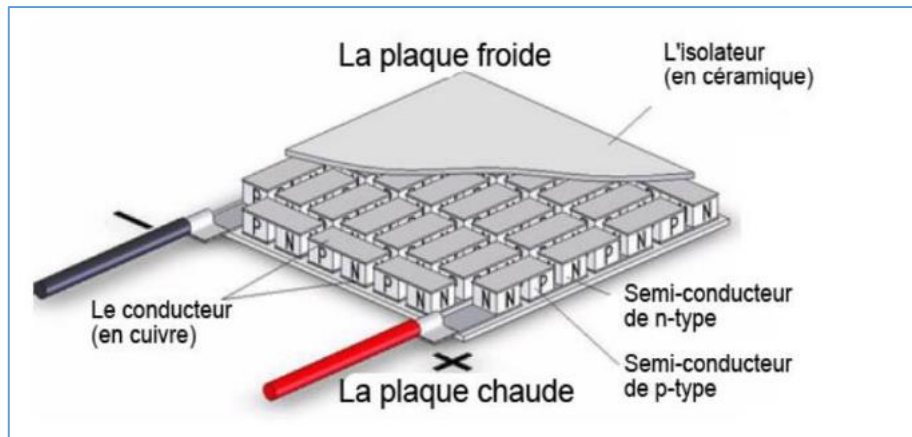


Figure 2.6- Refroidissement liquide à plaque froide-

▪ *Refroidissement par micro canaux*

Avec l'évolution rapide de la microélectronique et l'intégration grandissante de transistors à haute vitesse dans les appareils électroniques, on vise une densité de dissipation thermique future atteignant 500 W/cm^2 .^{24,25} Les micro-canaux sont des dispositifs de refroidissement hautement performants utilisés dans des systèmes embarqués, tels que ceux de l'aérospatiale, ainsi que dans le domaine de l'électronique médicale. Comparés aux échangeurs de chaleur traditionnels, les échangeurs à micro-canaux présentent non seulement un coefficient de transfert thermique élevé, mais aussi une robustesse exceptionnelle face à la pression du liquide. [43]



Figure 2.7 - Refroidissement liquide à micro-canaux-

▪ *Refroidissement par mini canaux*

Le choix du refroidissement par mini-canaux repose principalement sur sa simplicité de mise en œuvre. Cependant, la raison déterminante derrière ce choix est la capacité à restreindre le volume de fluide dans ce type de système de refroidissement. Cette considération est cruciale étant donné la densité élevée et le coût élevé de ce fluide. [43]

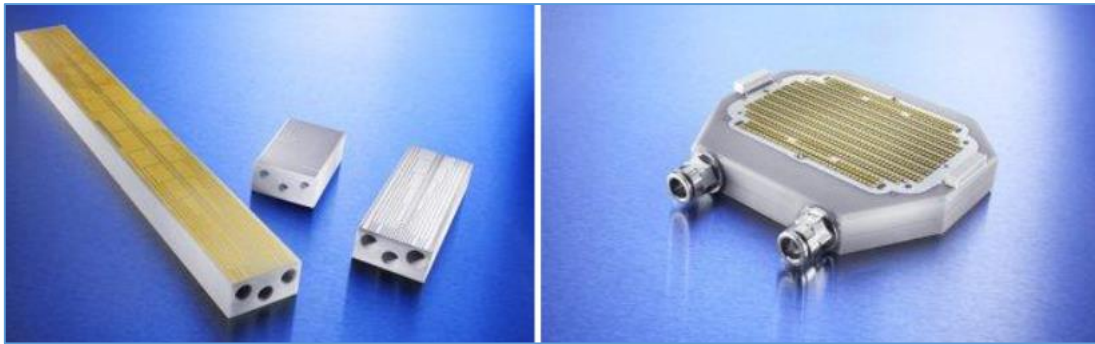


Figure 2.8 - Refroidissement liquide à mini-canaux-

2.2.6. Spray cooling

Le spray cooling, ou refroidissement par pulvérisation, est une technique de dissipation thermique qui utilise un jet de liquide atomisé pour refroidir les surfaces chaudes des composants électroniques. Ce procédé est particulièrement efficace pour les applications nécessitant un refroidissement intense et uniforme. Voici les principes fondamentaux du spray cooling [44] :

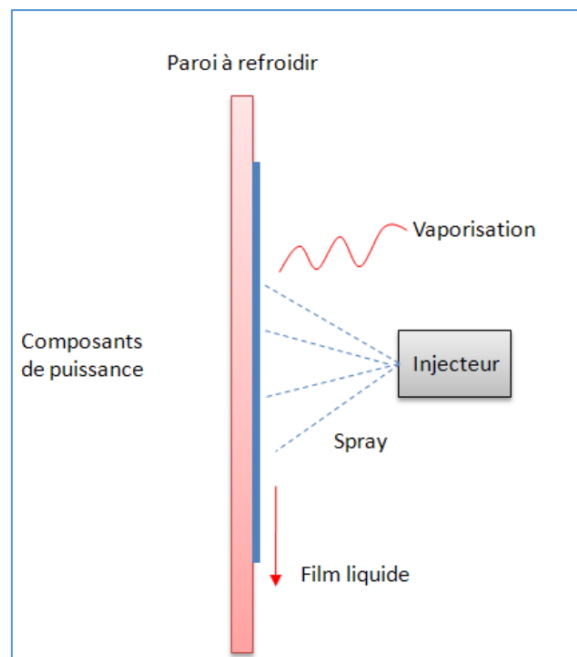


Figure 2.9-Principe du spray cooling-

▪ *Pulvérisation du liquide*

Un liquide caloporteur, souvent de l'eau ou un fluide diélectrique, est pulvérisé sous forme de fines gouttelettes à l'aide de buses de pulvérisation. La pulvérisation crée un brouillard de gouttelettes qui entre en contact avec la surface chaude du composant à refroidir.

- ***Transfert de chaleur par évaporation***

Lorsque les gouttelettes touchent la surface chaude, elles absorbent rapidement la chaleur et s'évaporent, ce qui permet d'extraire une grande quantité de chaleur de la surface. Ce processus d'évaporation est très efficace pour réduire la température de la surface du composant.

- ***Distribution uniforme de la chaleur***

La pulvérisation fine et dispersée permet une couverture uniforme de la surface à refroidir, assurant ainsi un refroidissement homogène et évitant les points chauds.

- ***Système de recirculation***

Le liquide évaporé est collecté, condensé et recirculé dans le système de refroidissement, permettant une utilisation continue du fluide caloporteur. Un système de pompage est souvent utilisé pour maintenir le flux constant de liquide vers les buses de pulvérisation.

AREELIS Technologies travaille sur le développement du spray cooling, en se concentrant sur la réalisation d'un démonstrateur pour prouver l'efficacité de cette technique dans le refroidissement de l'électronique de puissance. La figure 2.10 illustre des exemples de modules de spray cooling utilisés pour refroidir des composants électroniques.

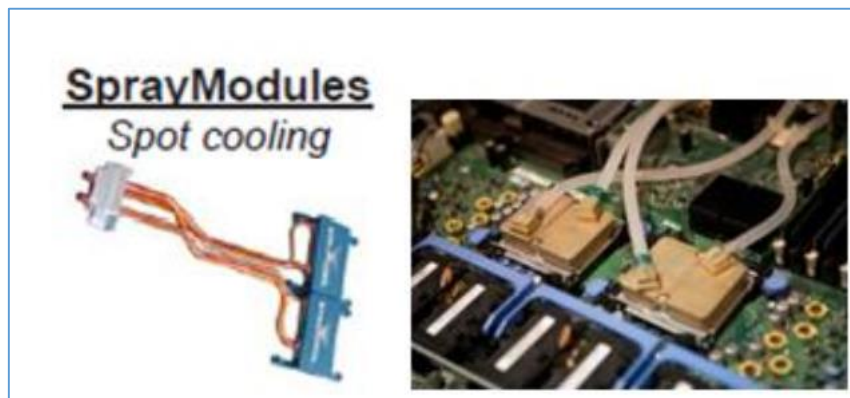


Figure 2.10-Exemples de modules spray cooling électronique (SPRAY COOL) –

2.2.7. Systèmes de refroidissement diphasique

- ***Refroidissement par changement de phase solide-liquide***

Un matériau à changement de phase (PCM) est une substance possédant une grande chaleur de fusion qui peut stocker ou relâcher d'importantes quantités d'énergie lors de son passage de l'état solide à liquide et vice versa. Lors de la fusion (passage de l'état solide à liquide), la chaleur est absorbée, et lors de la solidification (passage de l'état liquide à solide), la chaleur est relâchée.

Chapitre 02 : Généralité sur technique de refroidissement des composants électroniques

La grande chaleur latente des PCM est efficace pour absorber la chaleur et ralentir l'augmentation de la température des puces électroniques, ce qui en fait une solution idéale pour les appareils fonctionnant périodiquement. [45]

Une fois la chaleur latente du PCM épuisée, la chaleur continue d'être générée et la température augmente jusqu'à atteindre un régime permanent. La chaleur dégagée par la puce électronique est conduite par le PCM vers la bordure extérieure du dissipateur de chaleur, où elle est évacuée par convection naturelle de l'air. Cependant, cette convection naturelle étant peu efficace, des techniques de dissipation supplémentaires doivent être mises en place pour garantir le bon fonctionnement de l'équipement électronique.

Pour être utilisé dans un système de gestion thermique, un PCM doit répondre à plusieurs critères spécifiques :

- La température de changement de phase doit se situer dans la plage souhaitée.
- Posséder une grande chaleur latente.
- Avoir une bonne conductivité thermique.
- Présenter une faible expansion de volume.
- Être non inflammable, non explosif, chimiquement stable, non corrosif, et non toxique.
- Avoir un faible coût.

L'intégration d'un PCM dans un système de refroidissement peut ainsi fournir une solution efficace pour gérer thermiquement les composants électroniques, en particulier dans les applications où une gestion périodique de la chaleur est nécessaire.

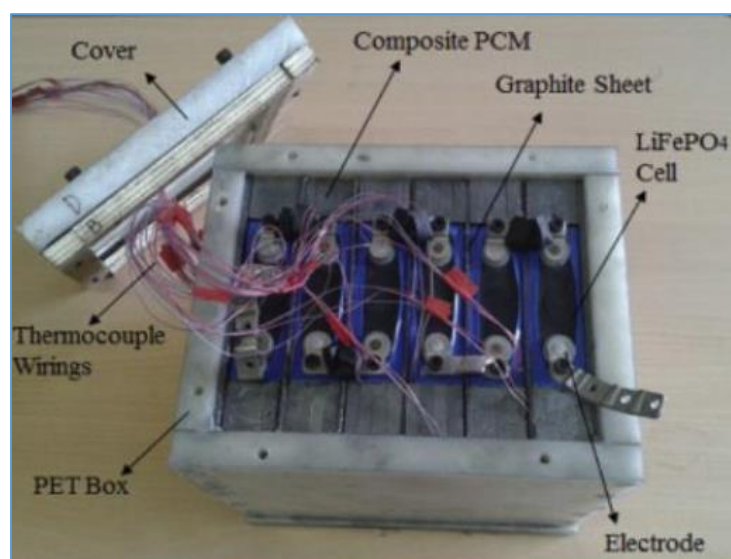


Figure 2.11 - Utilisation de PCM avec du graphite pour refroidir des batteries (3) -

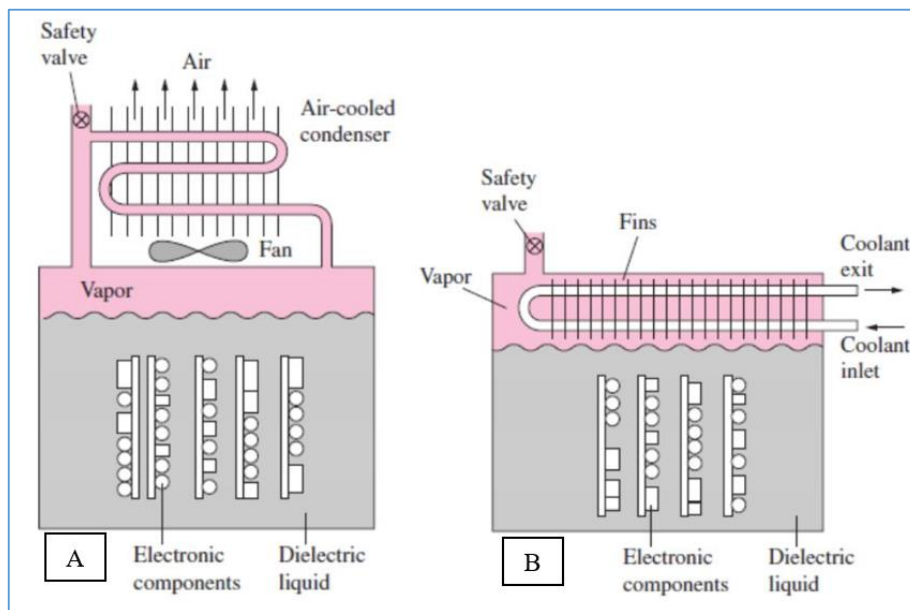
▪ Refroidissement par changement de phase liquide-vapeur

Ce mode de refroidissement par changement de phase liquide-vapeur est considéré comme l'un des moyens les plus efficaces et les plus adaptables pour refroidir les systèmes énergétiques. La quantité de chaleur dissipée dépend du débit massique du fluide caloporteur et de sa chaleur de vaporisation. [45]

L'avantage majeur de ce mode de refroidissement est que le fluide circule sans aucune pompe mécanique. Les inconvénients tels que l'encombrement, le bruit et la consommation énergétique des systèmes actifs sont inexistantes.

On distingue quatre classes de refroidissement selon leur configuration :

- Refroidissement par immersion dans un fluide diélectrique.
- Refroidissement par caloducs.
- Refroidissement par thermosiphon.
- Refroidissement par boucle diphasique à deux lignes.



2.3. Les milieux poreux

Un milieu poreux est constitué d'une matrice solide et de vides (eau, air ou autres fluides) appelés pores. Ces milieux peuvent être de type inconsolidé/granulaire (sables, sols, etc.) ou consolidé (grès, carbonates, calcaire, etc.). On distingue deux types de porosité : la porosité de fissure et la porosité d'interstice (Figure 2.13). [46]

- La porosité de fissure correspond à des fractures ou fissures dans le matériau.
- La porosité d'interstice représente les vides autour de particules solides plus ou moins liées entre elles.

Ces deux types de porosité peuvent coexister dans des matériaux comme les roches, par exemple.

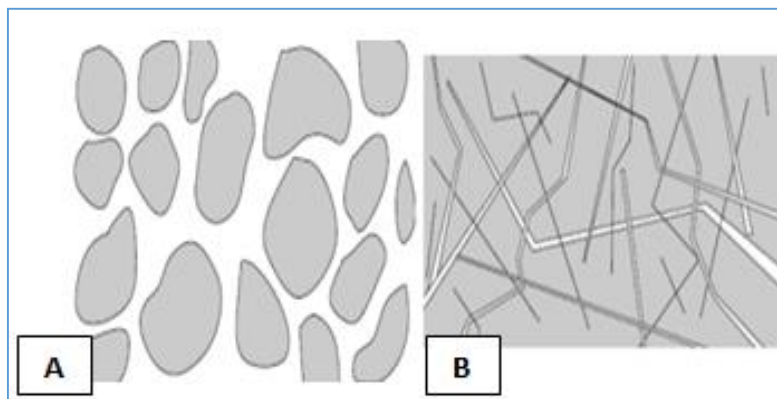


Figure 2.13- porosité (A) d'interstice (B) à fissur-

2.3.1. Paramètres caractéristiques d'un milieu poreux

Porosité : La porosité est définie comme étant le rapport du volume occupé par ces pores (espaces vides) au volume du milieu poreux.

$$\varepsilon = \frac{\text{volume des pores}}{\text{volume total du milieu poreux}} \quad (2.1)$$

Des mesures expérimentales faites par Kaviany [47] donnent dans le tableau (2.1) ci-dessous quelques valeurs de la porosité pour différents matériaux.

Perméabilité : La perméabilité traduit la facilité avec laquelle le fluide s'écoule dans le milieu poreux sous l'effet d'un gradient de pression. La perméabilité notée K dépend uniquement de la porosité et de la géométrie de la matrice solide. La relation de Kozeny – Carmen (1937),

donne une estimation de la perméabilité K pour un milieu poreux non consolidé constitué d'éléments identiques de géométrie simple :

$$K = \frac{d^2 \cdot \varepsilon^3}{36 \cdot C_0 \cdot (1 - \varepsilon)^2} \quad (2.2)$$

Ou d désigne une dimension caractéristique des éléments constituant la matrice poreuse et C_0 une constante dépendant de la forme des grains ($3,6 < C_0 < 5$).

La surface spécifique : Elle permet d'évaluer la surface de contact qu'offre un réseau poreux à un fluide qui circule au travers. Elle se définit comme le rapport de l'air de la surface totale des interfaces solide-pores au volume de l'échantillon [48] :

$$S_s = \frac{Asf}{V} \quad (2.3)$$

La saturation : Dans le cas le plus général, l'espace poreux peut contenir une phase gazeuse, une phase ou plusieurs phases liquides et une phase ou plusieurs phases solides. On définit la saturation S_i comme le rapport du volume de cette phase sur le volume poreux (ouvert). Par définition, la somme des saturations est égale à l'unité. Elle s'exprime comme suit [49] :

$$S_i = \frac{V_i}{V_p} \quad 0 < S_i < 1 \quad (2.4)$$

La tortuosité : définit généralement à partir de l'analogie hydraulique, dans le cas où le milieu poreux étudié se modélise sous la forme d'un réseau de capillaire ondulé est défini comme le rapport de la longueur moyenne d'un tuyau capillaire ondulé sur la longueur au carré du milieu L . [50]

$$\tau = \left(\frac{L_{cap}}{L} \right)^2 \quad (2.5)$$

Viscosité dynamique effective μ_{eff} : Lorsque l'approche des modèles moyennés sur un volume élémentaire représentatif est adoptée, il est nécessaire de définir les propriétés thermo physiques évaluées sur le volume élémentaire représentatif incluant les deux phases fluide et solide. Ainsi la viscosité effective a été introduite par Brinkman (1947) afin de mettre en évidence la discontinuité des contraintes aux interfaces fluides poreux et d'obtenir une expression pour la perméabilité. En combinant l'écoulement de Stocks avec celui de Darcy, il a obtenu l'équation vectorielle suivante [51] :

$$\Delta P = -\frac{\mu}{k}\vec{V} + \mu_{eff}\nabla^2\vec{V} \quad (2.6)$$

Ce modèle a été validé plus tard par Landgren qui démontra aussi que la viscosité effective était une fonction de la viscosité du fluide et de la porosité. Brinkman a considéré la viscosité dynamique effective comme étant égale à la viscosité du fluide considéré.

Conductivité thermique effective K_{eff} : Le transfert de chaleur par conduction à travers un milieu poreux nécessite la contribution des deux phases, fluide et solide, constituant la matrice poreuse, qui se fait généralement avec des proportions différentes. A cet effet, l'introduction d'une conductivité qui tient compte de l'apport de chaque phase est importante dans la modélisation du transfert de chaleur dans un milieu poreux. Ainsi, la notion de la conductivité thermique effective est apparue pour donner un sens à un milieu hétérogène poreux. Cette dernière est fortement dépendante de la porosité et des conductivités thermiques des phases solide et fluide. D'une manière générale, les modèles proposés sont tous des combinaisons pondérées des modèles en série et en parallèles basés sur l'analogie électrique [52].

$$\text{En série} \quad \frac{1}{K_{eff}} = \frac{\varepsilon}{K_f} + \frac{1 - \varepsilon}{K_s} \quad (2.7)$$

$$\text{En parallèle} \quad K_{eff} = \varepsilon \cdot K_f + (1 - \varepsilon)K_s \quad (2.8)$$

2.3.2. Différents modèles d'écoulements dans les milieux poreux

Il existe différents modèles pour décrire les écoulements dans les milieux poreux qui sont construits à partir du modèle de base qui est le modèle de Darcy avec les différentes extensions en tenant compte de certains effets présents dans les milieux poreux, on distingue à cet effet [52] :

- **Modèle de Darcy**

La dynamique des fluides homogènes dans les milieux poreux, est décrite par la loi de Darcy [53], établie en 1856 sur des fondements expérimentaux. Cette loi, établie à partir d'écoulements unidirectionnels sur des colonnes de sables, a mis en évidence la proportionnalité du gradient de pression appliqué et le débit d'eau traversant la colonne de sable. Depuis, les sciences hydrogéologiques sont basées sur la loi de Darcy même pour les écoulements multidirectionnels. Elle s'écrit :

$$V = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.9)$$

- V est la vitesse de filtration,
- μ est la viscosité dynamique du fluide,
- K est la perméabilité du milieu poreux,
- ∇P le gradient de pression appliqué.

Mais la loi de Darcy, encore largement utilisée, s'est avérée insuffisante. Parmi ses insuffisances réside dans le fait qu'elle ne peut pas traduire l'influence de la nature du fluide sur l'écoulement notamment près des parois. En effet, avec ce modèle, la condition de non glissement aux parois est retenue quel que soit le fluide considéré. Cette équation ne tient pas compte non plus d'éventuels effets inertiels.

▪ Modèle de Darcy-Brinkman

Pour de grandes valeurs de perméabilité et de porosité, les effets de viscosité et du non glissement sur les surfaces solides ne sont plus négligeables. Le modèle de Darcy-Brinkman dérivé du modèle de Stokes pour des forces visqueuses autour d'une sphère peut s'écrire sous la forme générale suivante [54] :

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} V + \mu_{eff} \nabla^2 V \quad (2.10)$$

Cette équation a l'avantage d'approximer pour les bases et hautes valeurs de perméabilité K d'un milieu poreux.

▪ Modèle de Darcy-Forchheimer

Dans le cas d'un écoulement de faible intensité, l'équation de Darcy suffit pour décrire l'écoulement. En revanche, avec l'augmentation de la vitesse, l'effet inertiel, non linéaire devient important et l'équation de Darcy devient insuffisante pour décrire l'écoulement. Ward [55] propose dans ce cas de remplacer l'équation de Darcy par l'équation :

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} V + K^{0.5} \rho \beta |V|^2 \quad (2.11)$$

Le premier terme du second membre est le terme de Darcy et le second terme est connu sous le nom de terme de Forchheimer, β étant une constante adimensionnelle. L'étude de Ward a montré que pour des vitesses relativement faibles, le terme de Darcy est prédominant, l'équation de Darcy constitue alors une bonne approximation de l'équation de Darcy-Forchheimer. En

revanche, pour des vitesses d'écoulement assez élevées, le terme convectif de Forcheimer devient prépondérant. Le rapport de ces deux termes représente, à une constante près, le nombre de Reynolds à l'échelle du poreux $\mathbf{Re}_p = \frac{v.K^{0.5}}{\nu}$

▪ Modèle de Darcy-Forchheimer-Brinkman

Pour tenir compte de tous les effets cités précédemment, on associe à l'équation de Darcy, les termes de Brinkman et de Forchheimer. Le modèle ainsi formé est obtenu sous le nom du modèle de Darcy- Brinkman- Forchheimer. L'équation vectorielle de conservation de la quantité de mouvement à travers un milieu poreux s'écrit alors [56] :

$$\rho \left[\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} \vec{\nabla} \left(\frac{\vec{V}\vec{V}}{\varepsilon} \right) \right] = -\frac{1}{\varepsilon} \vec{\nabla}(\varepsilon\rho) + \rho\vec{g} + \frac{\mu_{eff}}{\varepsilon} \nabla^2 \vec{V} - \frac{\overline{\mu}}{K} \vec{V} - F \frac{\rho_f}{\sqrt{K}} |\vec{V}| \vec{V} \quad (2.12)$$

- $\rho \left[\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon} \vec{\nabla} \left(\frac{\vec{V}\vec{V}}{\varepsilon} \right) \right]$: Forces inertielles macroscopiques.
- $\frac{\rho}{\varepsilon} \vec{\nabla} \left(\frac{\vec{V}\vec{V}}{\varepsilon} \right)$: est généralement négligé sauf dans les régions d'entrée de l'écoulement.
- $\frac{\mu_{eff}}{\varepsilon} \nabla^2 \vec{V}$: Terme visqueux de Brinkman.
- $-\frac{\overline{\mu}}{K} \vec{V}$: Terme De Darcy.
- $-F \frac{\rho_f}{\sqrt{K}} |\vec{V}| \vec{V}$: Forces inertielles microscopiques.
- $\rho\vec{g}$: Force de volume.

2.4. Nano-fluide

Les nano-fluides sont des suspensions colloïdales de nanoparticules solides dans un liquide. Des recherches récentes ont montré que ces nano-fluides possèdent une conductivité thermique nettement supérieure à celle des fluides de base. Parmi les nombreux avantages des nano-fluides par rapport aux suspensions liquides-solides conventionnelles, on peut citer une surface spécifique plus importante, une stabilité accrue de la suspension colloïdale, une moindre puissance de pompage nécessaire pour obtenir un transfert de chaleur équivalent, et une réduction du colmatage des particules par rapport aux colloïdes classiques. De plus, il est possible d'ajuster les propriétés thermodynamiques et de transport des nano-fluides en modifiant le matériau, la concentration, la taille et la forme des particules. [57]

Malgré les efforts déployés pour expliquer les raisons physiques de cette amélioration des performances des nano-fluides, plusieurs défis persistent. Il existe au moins quatre raisons pour lesquelles une théorie définitive sur les nano-fluides n'a pas encore été pleinement établie.

Le comportement thermique des nano-fluides est très différent des composites solides-solides ou des suspensions solides-liquides traditionnelles. Le transport thermique dans les nano-fluides est plus efficace que dans les suspensions solides-liquides conventionnelles et est influencé par des variables non conventionnelles telles que la taille, la forme et la surface des particules. La compréhension de la physique sous-jacente des nano-fluides nécessite une approche multidisciplinaire.

L'un des défis les plus redoutables est lié aux problèmes multi-scalaires, car les nano-fluides impliquent au moins quatre échelles différentes : moléculaire, microscopique, mésoscopique et macroscopique. L'optimisation de l'interaction entre ces échelles constitue un défi majeur.

Les applications des nano-fluides sont diverses et variées. En plus de contribuer à améliorer le transfert d'énergie, ils peuvent réduire la dépendance aux carburants conventionnels, à l'électricité ou au gaz. Voici quelques exemples d'applications importantes des nano-fluides :

- Échangeurs de chaleur.
- Refroidissement d'éléments électroniques (production d'un nano-fluide stable compatible avec les circuits et composants électroniques).
- Nanoparticules pour l'efficacité des réfrigérateurs (formulation de lubrifiants et liquides de refroidissement mélangés avec des nanoparticules pour augmenter l'efficacité énergétique des réfrigérateurs).
- Refroidissement des systèmes nucléaires.
- Transport (gestion de refroidissement pour les véhicules à moteur thermique).
- Autres applications : piles à combustible, chauffage solaire de l'eau, forage, stockage thermique

2.4.1. Méthodes de préparation des nano fluides

La préparation des nano-fluides peut généralement être effectuée selon deux méthodes : la méthode en une étape et la méthode en deux étapes. La méthode en une étape est adaptée à la production à petite échelle, tandis que la méthode en deux étapes est plus économique pour la production en masse. [58]

- Méthode en une étape : Évaporation de fil d'impulsion (PWE)

Cette méthode est fondamentale pour la production de nano-fluides. Elle utilise un dispositif comprenant un banc de condensateurs, une alimentation haute tension en courant continu, une chambre de condensation et un interrupteur à écartement haute tension. Le procédé consiste à faire passer une impulsion de haute tension (300V) à travers un fil mince, provoquant son évaporation en plasma en quelques microsecondes sous l'effet du chauffage non équilibré. Le plasma est ensuite mis en contact avec un gaz inerte, tel que l'argon ou l'azote, conduisant à la condensation du plasma en une poudre de nano-taille.

Pour obtenir le nano-fluide final, un fluide de base avec une concentration volumique spécifique est placé dans une bouteille explosive contenue dans l'appareil PWE, puis mélangé avec la poudre de nano-taille. Cette méthode est considérée comme très prometteuse pour la préparation de nano-fluides à faible coût. Des études ont montré que la taille des nanoparticules dépend du degré de surchauffe appliqué au fil : une augmentation de la surchauffe entraîne une diminution de la taille des particules. De plus, la taille des particules diminue avec l'augmentation de la pression du gaz inerte et avec la diminution du diamètre du fil. Cette méthode a été utilisée pour préparer des nano-fluides à base de nanotubes de carbone argenté/à parois multiples (Ag/MWCNT).

- Méthode en deux étapes

Cette méthode implique d'abord la production d'une nano-poudre hybride par des procédés chimiques, physiques ou mécaniques tels que le broyage, la méthode du gel ou la méthode en phase vapeur. Ensuite, cette nano-poudre préparée est dispersée dans le fluide de base à l'aide d'un équipement de mélange à cisaillement élevé ou d'un ultrasonificateur utilisant un vibromasseur à ultrasons. Ce procédé est économique pour la production en masse de nano-fluides.

Certaines études ont utilisé cette méthode pour produire des nano-fluides contenant de l'argent ou d'autres composés. Par exemple, une étude a utilisé une méthode en deux étapes pour produire des nano-fluides Al₂Cu et Ag₂Al avec de l'éthylène glycol et de l'ID comme fluides de base. Les poudres composites ont été obtenues par alliage mécanique. Dans un autre cas, la synthèse de CuO/HEG et la fabrication de nano-fluides avec ce composite ont été illustrées. Le HEG a subi un traitement acide pour introduire des groupes fonctionnels carboxyle et hydroxyle sur le graphène, qui ont ensuite été utilisés pour décorer les nanoparticules de CuO. [59]

Chapitre 02 : Généralité sur technique de refroidissement des composants électroniques

La méthode en une étape (PWE) est idéale pour la production à petite échelle, offrant des coûts réduits et un contrôle précis sur la taille des nanoparticules. La méthode en deux étapes est plus adaptée à la production en masse, permettant l'utilisation de différentes techniques de production de nano poudres et leur dispersion efficace dans le fluide de base.

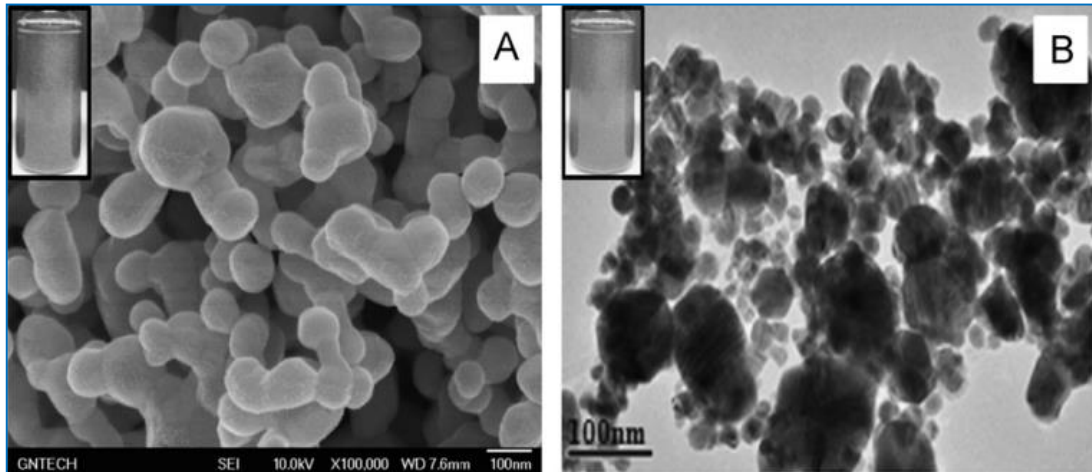


Figure 2.14 - Image à fort grossissement (a) SEM et (b) TEM des nanoparticules 'Ag' synthétisées par la méthode PWE. L'encart montre une photographie numérique de nanoparticules "Ag" dispersées dans une solution aqueuse-

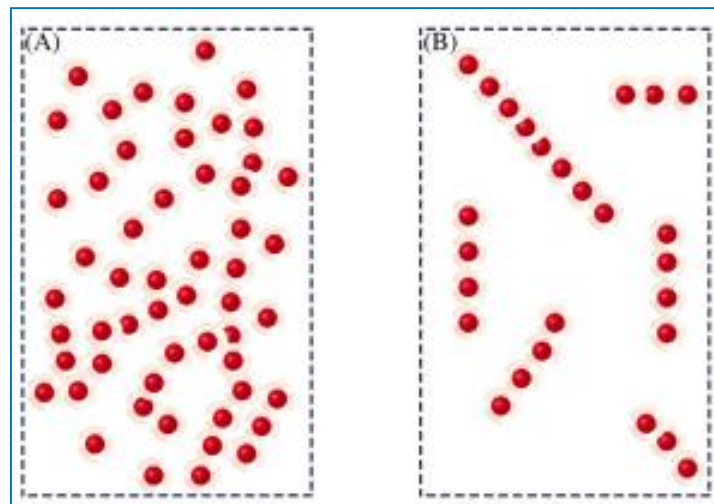


Figure 2.15 - Distribution différente des particules dans le fluide de base. (A) avant la formation des nanoparticules, (B) après la formation des nanoparticules-

2.5. Les techniques de refroidissement des composants électroniques par utilise les milieux poreux et nano fluide

De nombreux chercheurs ont tenté de relever le défi de concevoir des systèmes de refroidissement efficaces. Cependant, le rythme d'innovation en matière de mécanismes de refroidissement peine à suivre l'augmentation rapide des taux de chaleur générés par les puces électroniques. Ainsi, garantir un refroidissement adéquat des composants électroniques reste un enjeu majeur en ingénierie thermique.

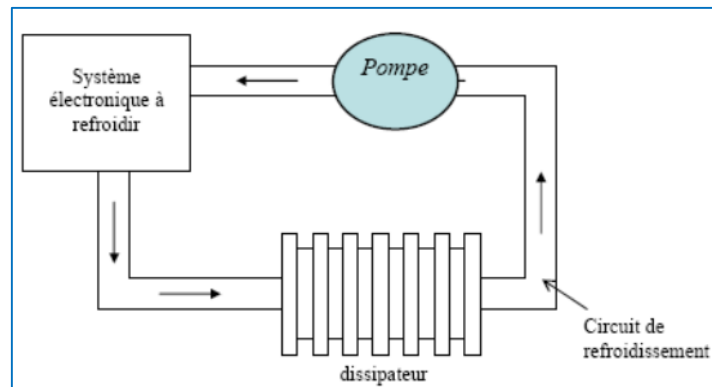


Figure 2.16 - Principe d'un système de refroidissement avec nano fluide caloporteur intermédiaire.

L'impact des nano-fluides et des milieux poreux sur le refroidissement des composants électroniques est significatif en raison de leurs propriétés uniques qui favorisent le transfert de chaleur et la dissipation thermique. Les nano-fluides, composés de nanoparticules dispersées dans un liquide, affichent une conductivité thermique supérieure à celle des fluides traditionnels. Ces nanoparticules augmentent la capacité du fluide à absorber et à dissiper la chaleur, améliorant ainsi l'efficacité du refroidissement des composants électroniques. De plus, les nano-fluides peuvent réduire les gradients de température à travers les composants, minimisant ainsi les risques de surchauffe et de défaillance. [60]

En ce qui concerne les milieux poreux, leur structure offre une grande surface spécifique et favorise la circulation et la dispersion du fluide de refroidissement. Les pores agissent comme des canaux de circulation pour le fluide, améliorant ainsi le contact avec les surfaces à refroidir et favorisant le transfert de chaleur. De plus, les propriétés des milieux poreux, telles que la taille, la forme et la distribution des pores, peuvent être ajustées pour optimiser le refroidissement des composants électroniques dans des applications spécifiques. [61]

En combinant les avantages des nano-fluides et des milieux poreux, il est envisageable de concevoir des systèmes de refroidissement plus efficaces et plus compacts pour les composants électroniques. Cette approche permettrait d'améliorer la performance et la fiabilité des appareils électroniques dans une gamme étendue d'applications.

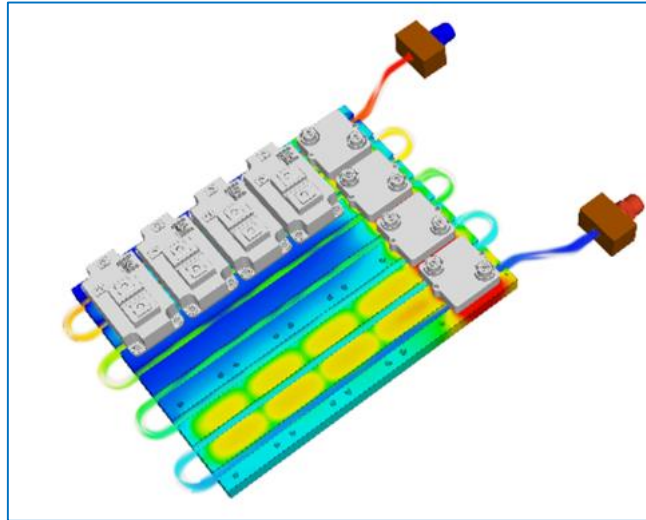


Figure 2.17 - Simulation du refroidissement de l'électronique par fluide-

2.6. Conclusion

L'exploitation des milieux poreux et des nano-fluides dans le processus de refroidissement des composants électroniques marque une avancée significative dans le domaine de l'ingénierie thermique. Ces approches innovantes offrent des solutions pertinentes pour relever le défi croissant de dissipation thermique rencontré dans les dispositifs électroniques de plus en plus complexes et performants. En combinant les atouts des nano-fluides et des milieux poreux, il devient possible de concevoir des systèmes de refroidissement plus efficaces, plus compacts et mieux adaptés aux exigences des dispositifs électroniques modernes. Ces avancées prometteuses ouvrent la voie à une nouvelle génération de technologies électroniques, caractérisées par une performance accrue, une fiabilité améliorée et une durabilité renforcée, et ce, dans une variété d'applications allant des produits grand public aux infrastructures critiques.

Chapitre 03

Modélisation Mathématique
et propriété thermo-physique
nano fluide

Chapitre 03

Modélisation Mathématique et propriété thermo-physique nano fluide

3.1.Introduction

La modélisation mathématique permet de prédire les comportements thermiques des composants électroniques en fonction de divers paramètres tels que la géométrie du système, les propriétés des matériaux, et les conditions environnementales. Elle offre une compréhension approfondie des mécanismes de transfert de chaleur, y compris la conduction, la convection et le rayonnement, et permet de simuler différentes configurations et stratégies de refroidissement sans recourir à des prototypes coûteux.

L'objectif de cette partie est d'analyser le comportement d'un écoulement laminaire. Elle traite de la modélisation et de la formulation des équations du problème, notamment l'équation de continuité, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation de l'énergie, avec les conditions aux limites. Nous y présenterons aussi les nombres adimensionnels de référence et les propriétés thermo-physiques des nanoparticules et du fluide de base utilisés dans la simulation.

3.2.Equations générales en régime laminaire

3.2.1. Equation de continuité

L'équation qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel est connue sous le nom d'équation de continuité en mécanique des fluides. Elle se formule de la manière suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \mathbf{V}) = 0 \quad (3.1)$$

- ρ est la masse volumique.
- \mathbf{V} est le vecteur vitesse du fluide.
- $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ est la dérivée partielle de la densité par rapport au temps.

Cette équation stipule que la variation temporelle de la masse dans un volume de contrôle est compensée par le flux de masse qui entre ou sort de ce volume, assurant ainsi la conservation de la masse.

3.2.2. Equation de quantité de mouvement

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide lors de son mouvement et les causes qui le produisent. Il indique que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées.

Il s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{D(\rho \cdot V)}{Dt} = \rho F - \text{grad}(p) + \mu \Delta V + \frac{1}{3} \mu \text{grad}(\text{div}(V)) = 0 \quad (3.2)$$

Où F est une force par unité de volume et μ est la viscosité dynamique.

Et en présence du champ électrique et magnétique, nous avons :

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) \right) = -\vec{\nabla} P + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho_c \vec{E} + \vec{j} \times \vec{B} \quad (3.3)$$

3.2.3. Equation de conservation d'énergie

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie, soit :

$$\frac{D(\rho c_p T)}{Dt} = \Delta(KT) + q + \beta T \frac{Dp}{DT} + \mu \Phi = 0 \quad (3.4)$$

Avec : $\frac{D(\rho c_p T)}{Dt}$: La variation totale d'énergie (par accumulation et convection).

$\Delta(KT)$: La variation d'énergie par conduction.

q : Puissance volumique dissipée.

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

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

Les coefficients c_p, K, β sont respectivement, la capacité calorifique, la conductivité thermique et le coefficient de dilatation isobare du fluide.

$\frac{D(\rho \cdot V)}{Dt}$: La variation de la masse volumique, qui est estimée par l'hypothèse de Boussinesq.

L'approximation de Boussinesq est une simplification couramment utilisée dans l'étude des écoulements de fluides, particulièrement dans les problèmes de convection thermique. Cette approximation est applicable lorsque les variations de densité sont suffisamment petites pour qu'elles n'affectent pas de manière significative le champ d'écoulement, sauf dans les termes de force de flottabilité. En d'autres termes, les variations de densité sont négligeables partout sauf dans le terme de force de flottabilité (gravité). Un développement de ρ au premier ordre en fonction de la température est donné comme suit (Bejan, (1993): [62])

$$\rho = \rho_0[1 - \beta (T - T_0)] \quad (3.5)$$

Avec T_0 : Température de référence.

β : Le coefficient d'expansion thermique à pression constante.

ρ_0 :Masse volumique du fluide à T_0 .

3.3.Equations générales avec un milieu poreux

3.3.1. La vitesse de Darcy et l'équation de continuité

La méthode de prise de moyenne permet d'établir une équivalence entre le milieu dispersé et réel et le milieu continu fictif. On introduit la notion de vitesse de filtration \vec{v} , qui correspond à la vitesse moyenne du fluide prise sur un volume V_p (comprenant à fois la matière solide et liquide) et on distingue aussi la vitesse intrinsèque \vec{v}_{int} qui correspond à la vitesse moyenne du fluide prise sur volume V_f du milieu constitué uniquement de volume liquide.

La relation entre la vitesse de Darcy et la vitesse intrinsèque est :

$$\vec{v} = \varphi \vec{v}_{int} \quad (3.6)$$

La relation (3.1) est connue par la relation Dupuit-Forchheimer.

L'équation de conservation de la masse dans un milieu poreux s'écrit alors sous la forme suivante :

$$\varphi \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla(\rho_f \cdot V) = 0 \quad (3.7)$$

3.3.2. Equation de quantité de mouvement avec milieux poreux

On utilise le modèle général de Darcy –Brinkman-Forchheimer décrivant l'écoulement du fluide au sein du milieu poreux en prenant en considérations les forces visqueuses et les forces d'inerties.

L'équation de conservation de quantité de mouvement dans le milieu poreux s'écrit sous la forme :

$$\rho \left[\frac{1}{\varphi} \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \frac{1}{\varphi} \vec{\nabla} \left(\frac{\vec{U}\vec{U}}{\varphi} \right) \right] = -\frac{1}{\varphi} \nabla(\varphi\rho) + \rho\vec{g} + \frac{\mu_{eff}}{\varphi} \nabla^2 \vec{U} - \frac{\mu}{K} \vec{U} - F \frac{\rho_f}{\sqrt{K}} |\vec{U}| \vec{U} \quad (3.8)$$

3.3.3. Equation d'énergie en milieu poreux

Tout comme l'équation de Darcy (ou l'équation de Darcy-Brinkman-Forchheimer) décrit l'écoulement du fluide au sein d'un milieu poreux, l'équation de l'énergie (ou les équations de l'énergie, selon le concept adopté) traduisant le transfert de chaleur dans le milieu poreux fait appel au concept de milieu fictif, équivalent au milieu poreux réel. Pour obtenir une description macroscopique des phénomènes de transfert dans un volume élémentaire représentatif de milieu poreux, il est nécessaire d'établir l'équation (ou les équations) de transfert de chaleur. Cela implique l'utilisation de la notion d'équilibre local, une approche largement adoptée.

$$(\rho C_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho C_p)_f \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} \cdot (\lambda_{eff} \vec{\nabla} T) + q_m''' \quad (3.9)$$

Où :

$$(\rho C_p)_{eff} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_s + \varphi (\rho C_p)_f \quad (3.10)$$

ρ : La masse volumique de nano fluide hybride.

φ : La porosité du milieu poreux

$(\rho C_p)_{eff}$: La capacité calorifique effective.

$(\rho C_p)_f$: La capacité calorifique de nano fluide hybride.

K_{eff} : La conductivité thermique effective.

$q_m''' = (1 - \varphi)q_s''' + \varphi q_f'''$: Source d'énergie.

3.4. La géométrie du problème étudié

La figure 3.1 représente un canal en aluminium avec une longueur de L et une hauteur de H. À l'intérieur de ce canal se trouve un composant électronique dont les dimensions sont indiquées sur la figure. Ce composant électronique génère une chaleur. Dans cette étude, nous avons examiné l'effet de trois configurations ou formes géométriques du milieu poreux sur la température du composant électronique (Figure 3.2).

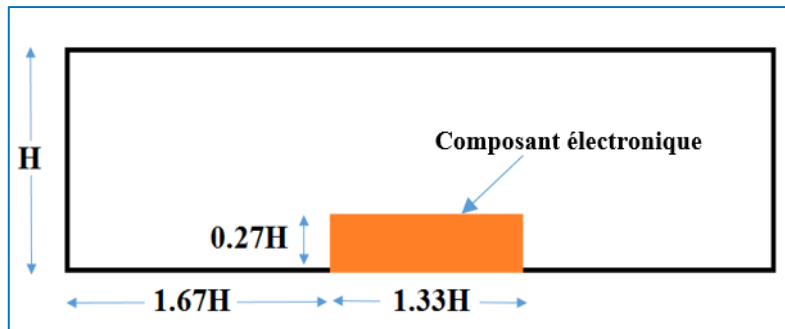


Figure 3.1-Géométrie du problème-

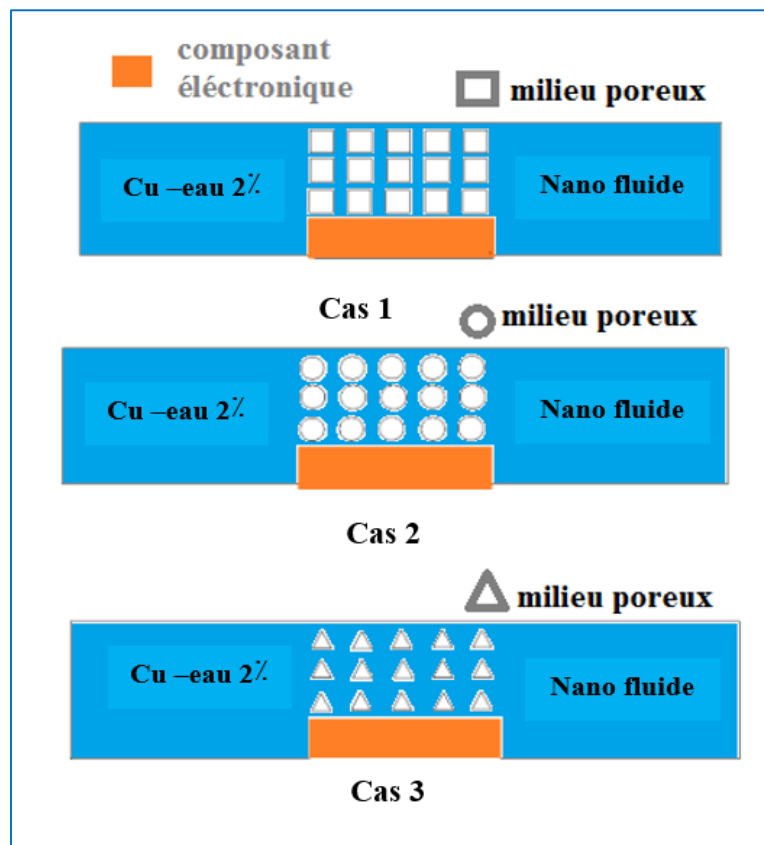


Figure 3.2 - Formes géométriques des milieux poreux-

3.4.1. Hypothèses simplificatrices

Pour établir un modèle mathématique simple qui décrit la physique de ce problème on adopte les hypothèses suivantes :

- ✓ La cavité poreuse est isotrope, homogène, perméable et non déformable.
- ✓ Le nano fluide est newtonien et incompressible.
- ✓ L'écoulement est laminaire bidimensionnel.
- ✓ Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.

- ✓ Les propriétés thermo physiques du nano fluide hybride sont supposées constantes hormis la masse volumique qui obéit à l'approximation de *Boussinesq-Oberbeck* dans le terme de la poussée d'Archimède.

3.4.2. Condition aux limite

Illustre la configuration géométrique liée au problème de la convection force. Le fluide pénètre dans le canal avec une distribution uniforme de la vitesse à l'entrée V et a Température T . Les parois horizontales sont adiabatiques et l'intérieur de ce canal se trouve un composant électronique dont les dimensions sont indiquées sur la figure. Ce composant électronique génère une chaleur. Un milieu poreux homogène et isotrope est placé autour du composant électronique sous trois formes différentes.

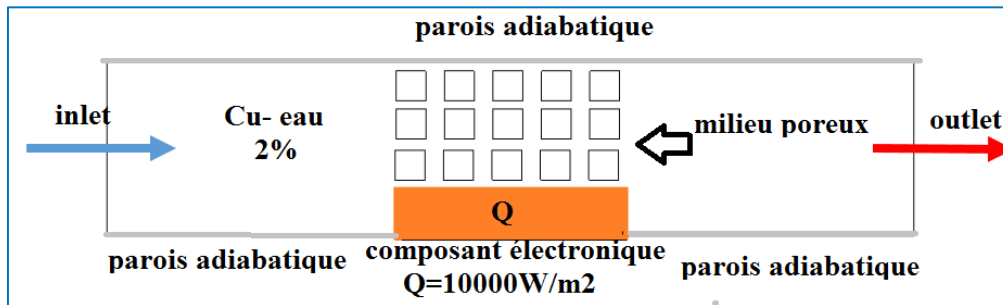


Figure 3.3 - les conditions aux limites du phénomène pour Cas 1-

3.4.3. Equations du problème

En tenant compte des hypothèses simplificatrices ci-dessus, les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, régissant le champ dynamique, s'écrivent de la forme suivante :

- ✓ **Equation de continuité**

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.11)$$

- ✓ **Equation de la quantité de mouvement**

Suivant x :

$$\frac{1}{\varphi} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\varphi^2} \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{v}{\varphi} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] - \frac{v}{k} u - \frac{F}{\sqrt{k}} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3.12)$$

Suivant y :

$$\frac{1}{\varphi} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\varphi^2} \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{v}{\varphi} \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] - \frac{v}{k} v - \frac{F}{\sqrt{k}} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (3.13)$$

✓ **Equation d'énergie en milieu poreux**

Dans notre cas il n'y a pas de génération de chaleur donc $q_m''' = 0$.

On divise l'équation (3.7) par $(\rho C_p)_f$.

Avec :

$\frac{K_f}{(\rho C_p)_f} = \alpha$: Coefficient de diffusion thermique.

$\frac{K_{eff}}{K_f} = K_{eff.f}$: Rapport des conductivités thermiques.

Donc l'équation (3.25) devient :

$$\sigma \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \nabla T = \vec{\nabla} (K_{eff} \alpha \vec{\nabla} T) \quad (3.14)$$

$$\sigma \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{eff} \alpha \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{eff} \alpha \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3.15)$$

σ : Rapport de la capacité calorifique du milieu poreux et celle du milieu nano fluide.

3.4.4. Les nombres adimensionnels

➤ **Le nombre de Reynolds Re**

Reynolds c'est une ingénieure anglaise spécialiste de l'hydrodynamique qui introduit ce nombre qui est constamment utilisé dans les calculs des régimes d'écoulements.

$$Re = \frac{U \cdot D_h}{\nu} \quad (3.16)$$

D_h : diamètre hydraulique

$$D_h = \frac{4 \cdot S}{P} \quad (3.17)$$

➤ **Le nombre de Nusselt Nu**

Est un nombre adimensionnel utilisé dans les opérations de transfert thermique. Il représente le rapport entre le transfert thermique convectif et le transfert thermique conductif à travers une interface (souvent fluide/solide). Si la conduction est le principal mode de transfert, alors le nombre de Nusselt sera de l'ordre de l'unité. En cas de présence de convection (due par exemple

au déplacement du fluide t aura pour conséquence de faire tendre le nombre de Nusselt vers l'infinie.

On le définit de la manière suivante :

$$N_u = \frac{h L_C}{K} \quad (3.18)$$

h : coefficient de transfert thermique

L_C : Longueur caractéristique.

K : conductivité thermique du fluide.

➤ Nombre de Prandtl

C'est un nombre adimensionnel. Il représente le rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement (ou viscosité cinématique) et la diffusivité thermique. On le définit de la manière suivante :

$$P_r = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.19)$$

➤ Nombre de Darcy

C'est un nombre adimensionnel. Il représente le rapport entre la perméabilité du milieu et l'aire de section transversale (généralement le diamètre de poreux au carré) :

$$D_a = \frac{K}{L^2} \quad (3.20)$$

3.5. Les propriétés thermo-physiques de nano fluide

• La masse volumique

Pour calculer la masse volumique d'un nano-fluide que nous supposons parfaitement homogène (bonne dispersion des nanoparticules dans le fluide de base) en fonction de la fraction volumique (ϕ) à une température T donnée. La masse volumique de ce mélange est définie comme suite [63] :

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_f \quad (3.21)$$

• La fraction volumique :

La fraction volumique est la propriété la plus importante pour les nano-fluides, puisque les calculs de toutes les autres propriétés sont basés sur la fraction volumique. On peut la définir comme étant le rapport sans dimension entre deux volumes, le volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules + fluide de base). La valeur de la fraction

volumique est variée entre 0 (fluide de base pure) et 1. La fraction volumique est donnée par la relation suivant [63] :

$$\phi_p = \frac{\text{volume solide}}{\text{volume total nano fluide}} = \frac{V_{np}}{V_f + V_{np}} \quad (3.22)$$

- **la capacité calorifique :**

La chaleur spécifique est la capacité calorifique par unité de masse d'une substance ou d'un système homogène $CP = \frac{dQ}{mdT}$. La chaleur spécifique correspond à l'apport de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de substance de 1 °K lors de la transformation considérée. Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nano-fluide, on a retrouvé suivant les auteurs l'une ou l'autre des deux relations suivantes. [63]

$$(\rho \cdot CP)_{nf} = (1 - \Phi)(\rho \cdot CP)_f + \Phi(\rho \cdot CP)_{np} \quad (3.23)$$

- **La Conductivité thermique**

La conductivité thermique d'un nano-fluide est calculée :

$$K_{nf} = \frac{K_{np} + 2K_f + 2(K_{np} - K_f)\Phi}{K_{np} + 2K_f - (K_{np} - K_f)\Phi} K_f \quad (3.24)$$

- **Le Coefficient d'expansion volumique**

On déduit l'expression suivante :

$$\beta_{nf} = (1 - \Phi)\beta_f + \Phi\beta_n \quad (3.25)$$

- **La Viscosité dynamique**

La dispersion des nanoparticules dans un liquide a un effet sur la viscosité dynamique de ce dernier. La viscosité obtenue devient la viscosité dynamique du 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 du fluide de base et la fraction volumique du nano-fluide. Pour ce qui suit nous allons citer deux modèles pour le calcul des viscosités apparentes [63] :

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \Phi)^{2,5}} \quad (3.26)$$

Les propriétés thermo physiques du fluide de base et du cuivre sont présentées dans le tableau (3.1). La densité effective, la diffusivité thermique, la capacité thermique et le coefficient de dilatation thermique du nano fluide sont calculés en utilisant les expressions suivantes :

Propriétés	H ₂ O	Cu
ρ (kg/m ³)	997.1	8933
Cp (J/kg.)	4179	385
K (W/m. k)	0.613	400
μ (kg/m. k)	0.001002	-

Tableau 3.1 : Les propriétés thermo physique de nanoparticules et fluide de base. [63]

3.5.1. Propriétés thermo physiques pour le nano fluide (eau-Cu)

Les propriétés thermo physiques des nano fluides, tels que le nano fluide eau-cuivre (eau-Cu), dépendent de plusieurs facteurs, notamment la concentration en nanoparticules, la température, et les propriétés des matériaux de base (eau et cuivre).

Nano fluide	ρ (kg/m ³)	Cp(j/kg.k)	K(w/mk)	μ (kg/ms)
Cuivre –eau $\phi=2\%$	1140.7	4112.8	0.682	0.000627

Tableau 3.2 -Propriétés thermo physiques pour le nano fluide (eau-Cu) - [63]

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la géométrie de notre problème, les équations gouvernantes de l'écoulement laminaire, les hypothèses, les conditions aux limites, ainsi que les propriétés thermo physiques des nano fluides. Le chapitre suivant portera sur la simulation numérique de notre problématique.

Chapitre 04

Simulation Numérique

Chapitre 04

Simulation Numérique

4.1.Introduction

Ce chapitre se focalise sur la modélisation de l'écoulement et du transfert thermique entre deux plans parallèles, en se penchant particulièrement sur l'étude du transfert de chaleur dans un canal rempli d'un nano fluide où un composant électronique est placé à l'intérieur. Ce composant génère de la chaleur. Dans cette étude, nous avons examiné l'impact de trois configurations ou formes géométriques du milieu poreux sur la température du composant électronique. Nous abordons ces aspects principalement à l'aide du logiciel Workbench ANSYS, spécialement conçu pour la dynamique des fluides numérique (CFD), une discipline regroupant des méthodes numériques visant à obtenir des solutions approximatives pour les problèmes de dynamique des fluides et de transfert de chaleur. Les équations de la mécanique des fluides sont résolues par des méthodes numériques, notamment les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie, via la méthode des volumes finis avec le code de calcul FLUENT.

4.2.Procédure de la simulation

4.2.1. Logiciel ANSYS Workbench

ANSYS Workbench représente une plateforme de simulation tout-en-un conçue par ANSYS Inc. Cette plateforme propose une interface utilisateur intuitive pour l'analyse numérique et la simulation de divers phénomènes physiques, incluant la mécanique des structures, la dynamique des fluides, l'électromagnétisme et le transfert thermique. Workbench permet aux ingénieurs et aux chercheurs de concevoir, de configurer, de résoudre et d'analyser des modèles complexes en combinant différents outils de simulation ANSYS dans un environnement unifié. Cela simplifie l'intégration et la coordination des différentes étapes d'un projet de simulation, depuis la modélisation géométrique jusqu'au traitement des résultats finaux.

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



Figure 4.1- Fenêtre lancement du logiciel-

4.2.2. Menu principal du logiciel d'ANSYS Workbench

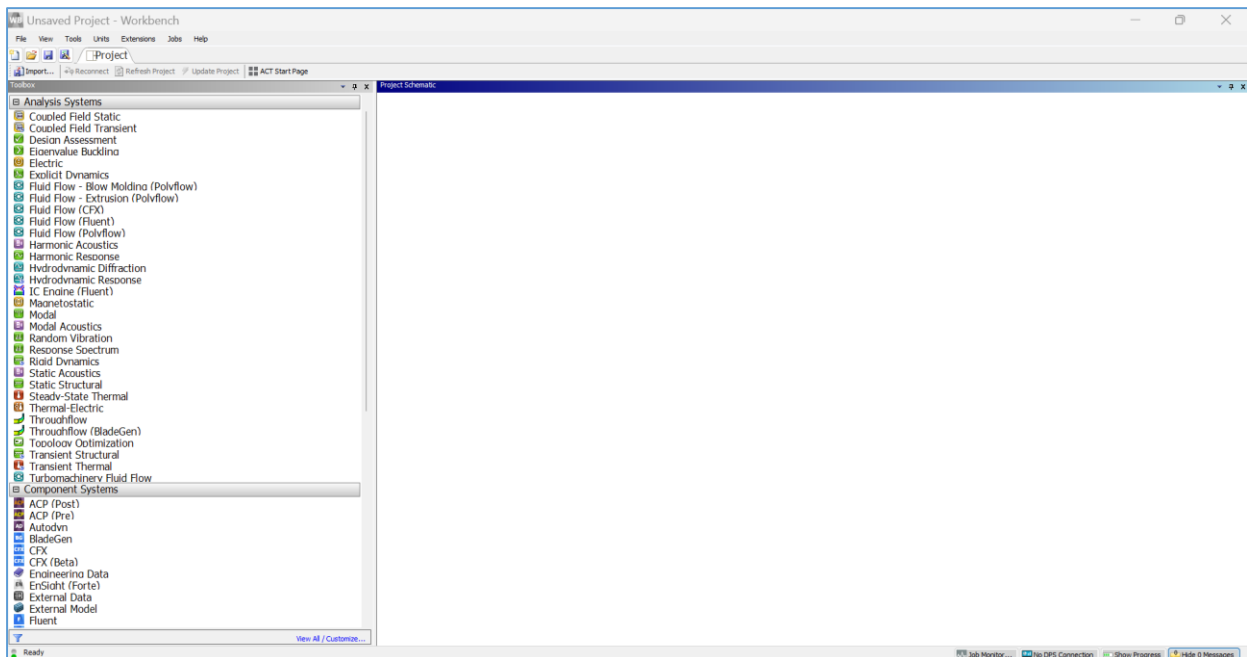


Figure 4.2 - Menu principal de Workbench-

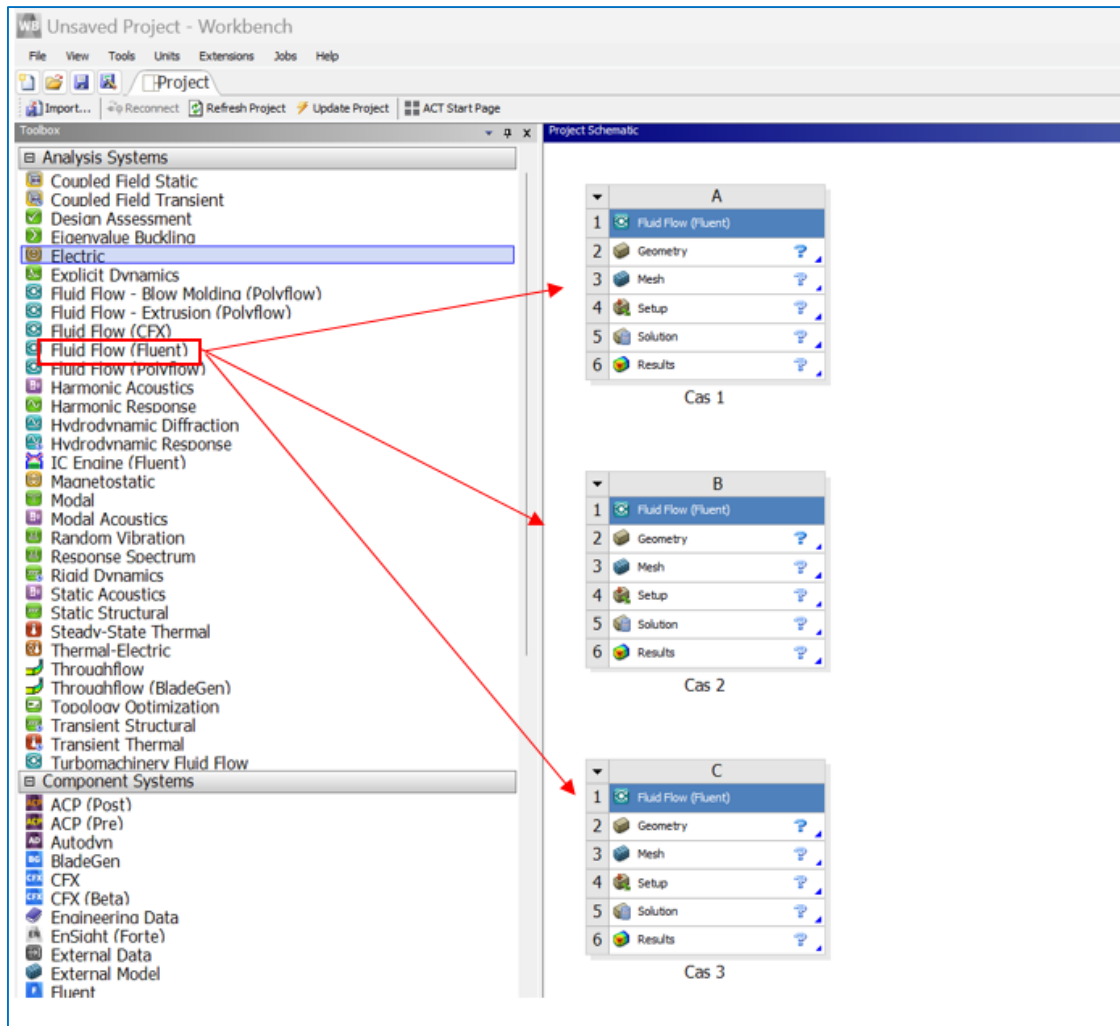


Figure 4.3 -Création d'une analyse (projet) en mécanique de fluide-

Les étapes de calcul se composent de 5 étapes :

- **Géométrie** : utilisé pour importer ou de créer ou de modifier ou de mettre à jour un modèle qui peut être utilisé pour l'analyse.
- **Maillage** : cette cellule est liée à la définition de la géométrie, systèmes de coordonnées et réseau de communication et du maillage dans le module de simulation mécanique, En plus de déclarer des certaines propriétés physiques des certains matériaux.
- **Configuration** : permet de définir les charges et conditions aux limites et une autre configuration pour l'analyse.
- **Solution** : cette cellule permet d'accéder aux données de résolution.
- **Résultats** : cette cellule combine les résultats de l'analyse.

4.2.3. Création de la géométrie

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

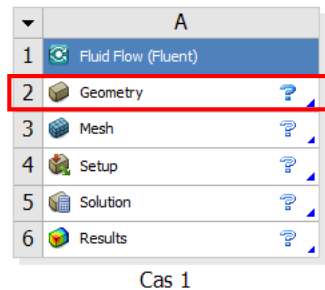


Figure 4.4 -Création d'un projet en mécanique de fluide-

Il faut choisir le type d'analyse 2D OU 3D. Après l'ouverture du module de création une géométrie, nous sélectionnons à partir la liste du « Unités » le centimètre (cm) comme unité de dimension.

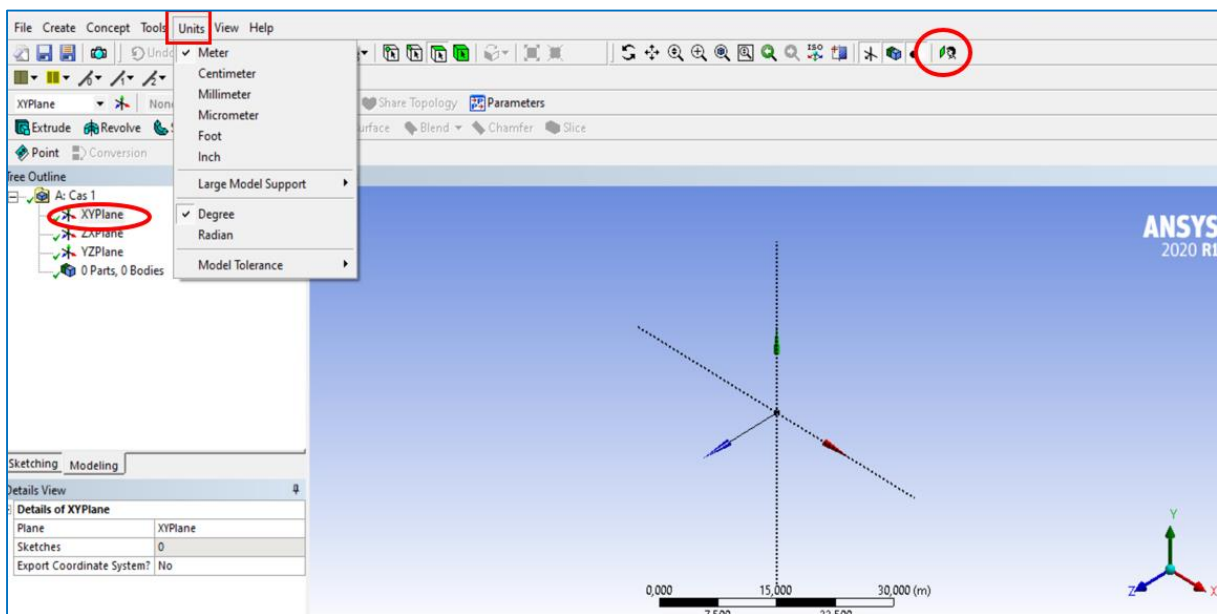



Figure 4.5 -Création du modèle de la géométrie-

Par la suite, On choisit le plan et la vue sur laquelle on va travailler. En cliquant sur le plan XY, et sur  dans la barre d'outils.

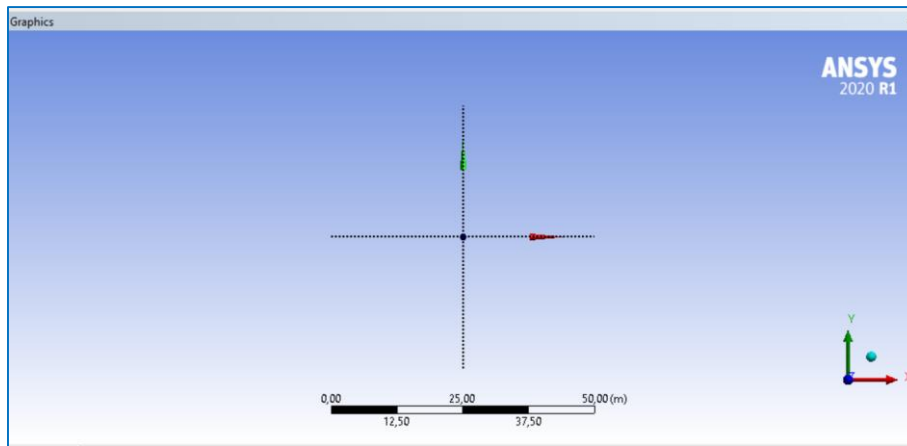


Figure 4.6 -Création du modèle (plan de vue) -

Pour dessiner l'esquisse on clique sur la boîte à outils Esquisse qui va permet de créer la géométrie, d'y ajouter des dimensions et de la contraindre :

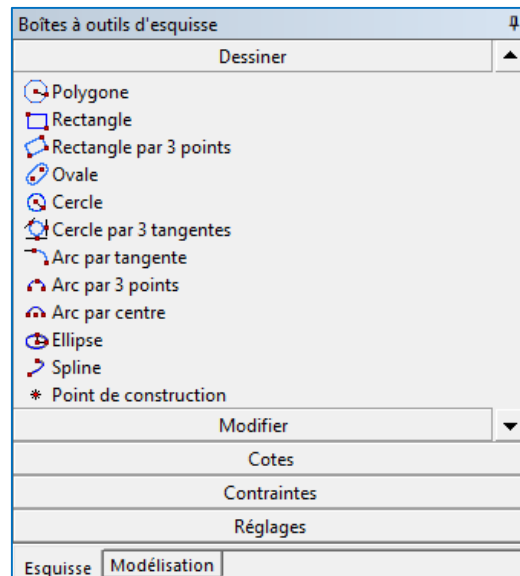


Figure 4.7 -Création d'esquisse-

On obtient les esquisses suivantes :

- 1^{er} Cas : Milieu poreux en forme de carrés.
- 2^{ème} Cas : Milieu poreux en forme de cercles.
- 3^{ème} Cas : Milieu poreux en forme de triangles.

Maintenant la définition des surfaces se fait dans le menu :

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

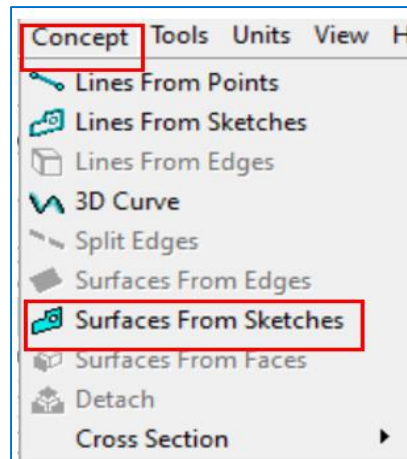


Figure 4.8 -Concept surface à partir d'esquisse-

Il reste une dernière chose à faire, préciser que toutes nos surfaces sont en fait à la même zone de fluide.

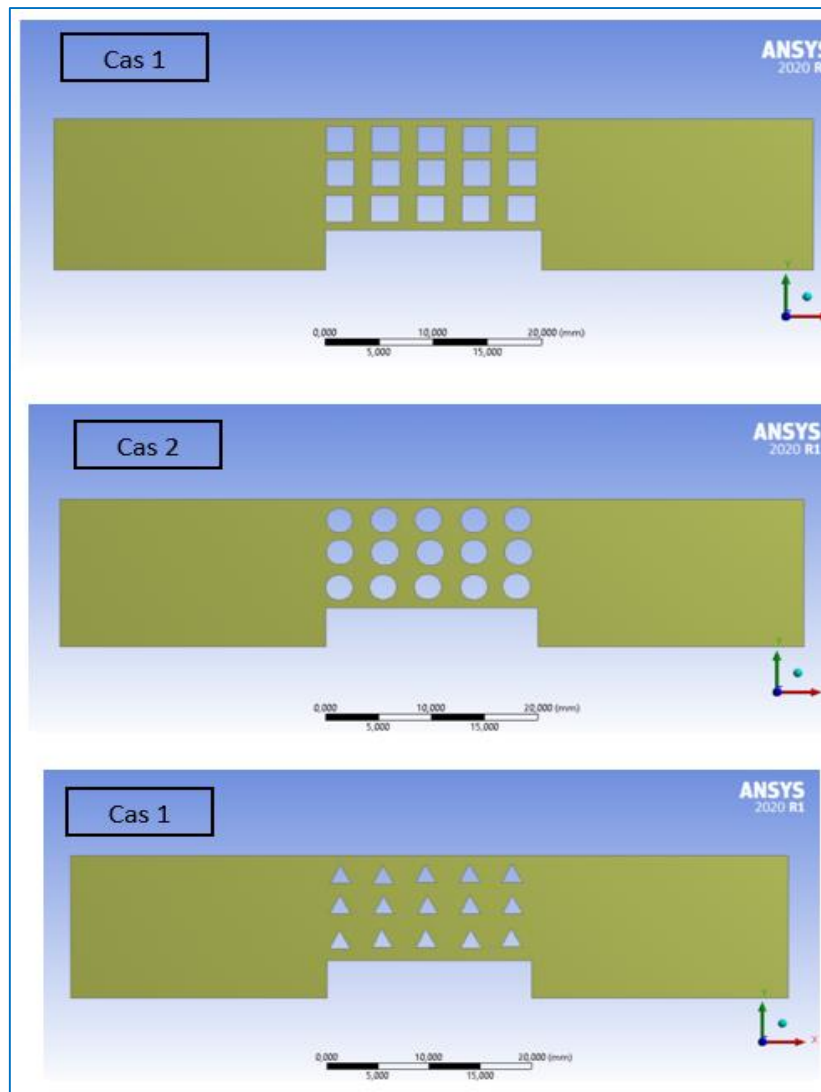


Figure 4.9 - Définition de la zone du fluide-

Sauvegarder la géométrie et quitter Design Modeler pour passer à l'étape de maillage

4.2.4. Le maillage

Le maillage sous Workbench a été réalisé avec double-cliquer sur le maillage dans la boîte Workbench une fois. « Meshing » est lancé.

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

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



: Pour sélectionner les surfaces.



: Pour sélectionner les arrêtes.

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

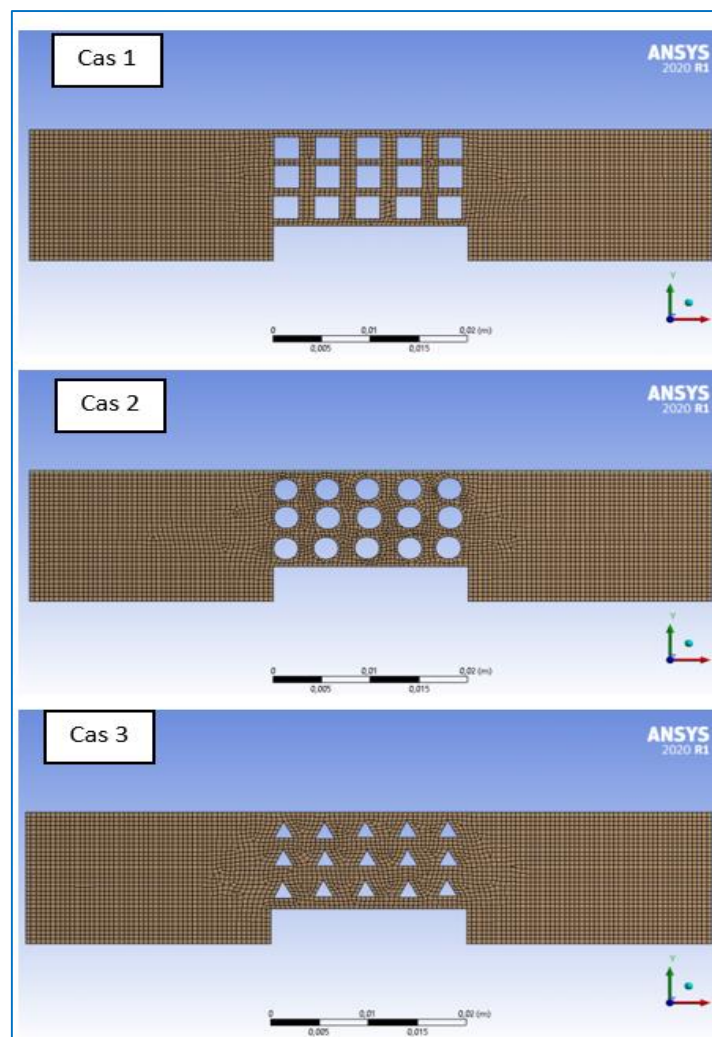


Figure 4.10 -Le maillage utilisé-

➤ **Méthode des volumes finis :**

La méthode des volumes finis a été décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par **Patankar** [64] ; le principe de cette méthode repose sur une technique de discrétisation, qui convertit les équations différentielles aux dérivées partielles en équations algébriques non linéaires, qui peuvent par la suite être résolues numériquement. Elle se distingue par la fiabilité de ses résultats, son adaptation au problème physique, sa possibilité de traiter des géométries complexes, sa garantie pour la conservation de masse et de quantité de mouvement et de tout scalaire transportable sur chaque volume de contrôle, dans tout le domaine de calcul, ce qui n'est pas le cas pour les autres méthodes numériques.

Le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés volumes de contrôle, Chacun de ces derniers englobe un nœud, dit nœud principal, comme il est indiqué sur la **Figure (4.14)**. La technique des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles pour obtenir les équations discrétisées, qui conservent toutes les grandeurs physiques sur chaque volume de contrôle. Elle comporte essentiellement les étapes suivantes :

- La division du domaine considéré en volumes de contrôle ;
- La formulation intégrale des équations différentielles aux dérivées partielles ;
- Ecriture des équations algébriques aux nœuds du maillage ;
- Résolution du système algébrique non linéaire obtenu.

Pour un nœud principal P, les points E et W (Est et Ouest) sont des voisins dans la direction x, tandis que N et S (Nord et Sud) sont ceux dans la direction y. Le volume de contrôle entourant P est montré par des lignes discontinues, alors que les faces sont localisées aux points e et w dans la direction x, n et s dans la direction y. Dans ce mémoire, la résolution du problème est effectuée par le logiciel FLUENT, qui est basé sur la méthode des volumes finis, en utilisant le schéma « loi de puissance » pour la discrétisation de l'équation de quantité de mouvement et de l'énergie.

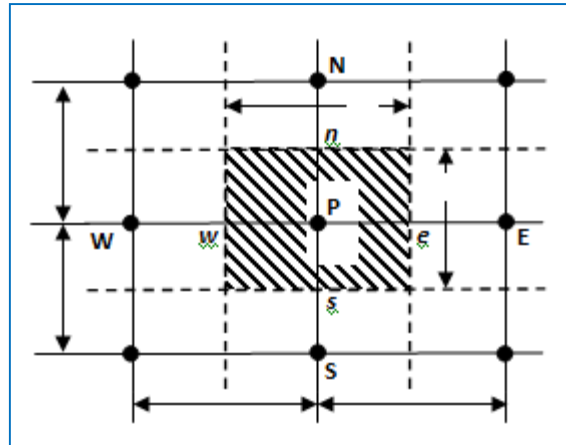


Figure 4.11 -Volume de contrôle bidimensionnel-

4.2.5. Configuration

La configuration dans ANSYS Workbench est réalisée en double-cliquant sur l'option de configuration dans la boîte Workbench. À cette étape, les sélections nommées s'affichent automatiquement. Nous y posons nos conditions aux limites et saisissons les données, comme illustré dans les figures suivantes :

- ✓ **Générale** : stationnaire (Steady).
- ✓ **Model** : laminaire, équation de l'énergie.
- ✓ **Matériels** : On ajoute les matériels utilisés dans notre étude et changeons les propriétés thermiques et physiques (la masse volumique, la chaleur spécifique, la conductivité thermique et la viscosité dynamique) pour le nano fluide hybride.
- ✓ **Cell zone conditions** : Nous avons identifié le nano fluide dans le canal.
- ✓ **Boundary Conditions** : Nous avons identifié les conditions aux limites suivantes :
 - **Inlet** : Température imposée avec vitesse.
 - **Outlet** : pression imposée.
 - **Wall composant électronique** : Flux de chaleur.

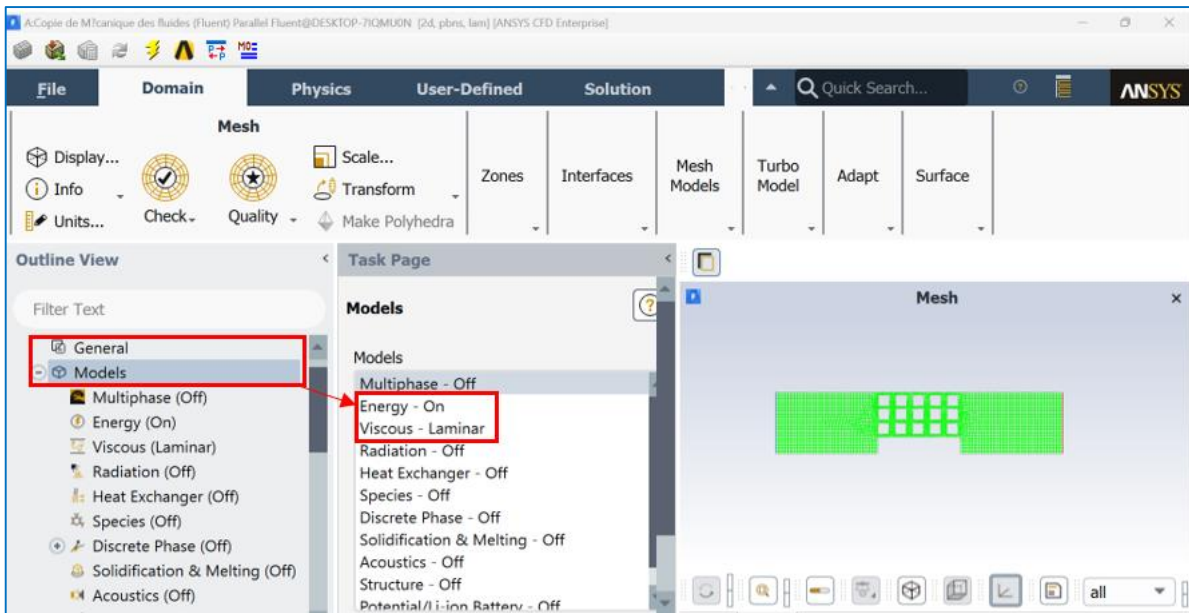


Figure 4.12 –interface de configuration (Générale pour 1^{er} cas)

Model (laminaire, équation de l'énergie) -

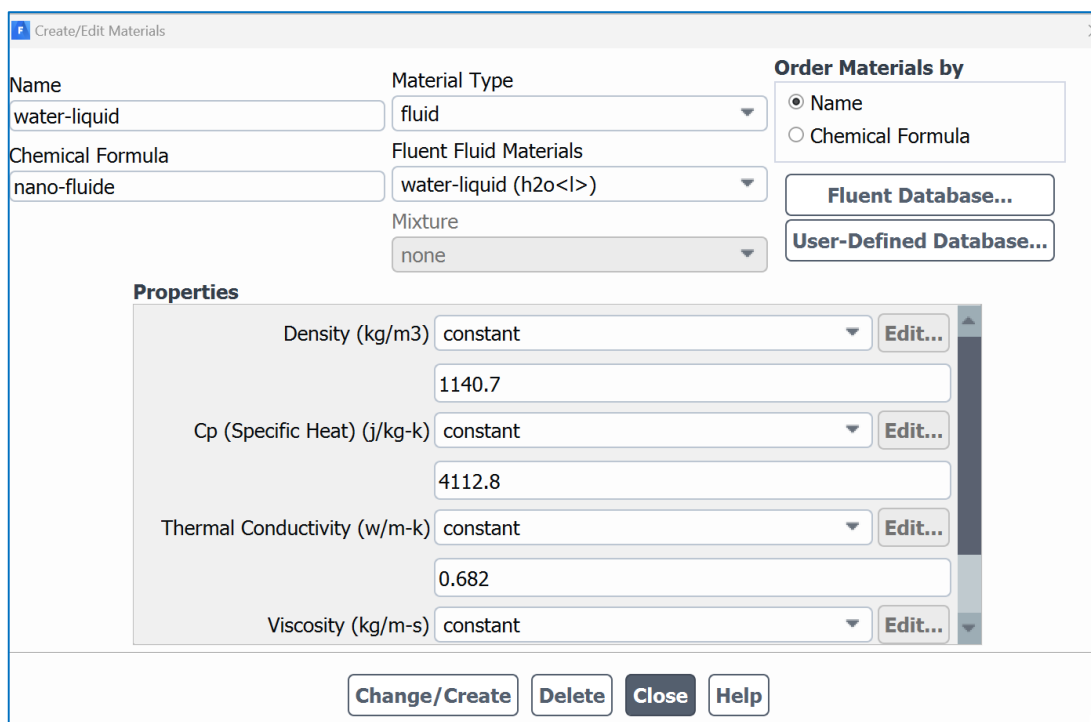


Figure 4.13 - Création les données du nano fluide-

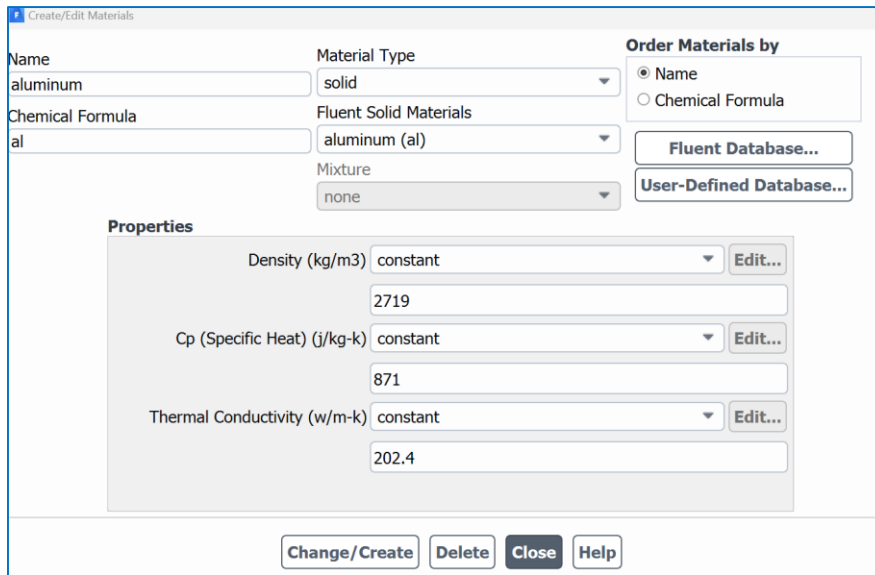


Figure 4.14 - Création les données de material-solid-

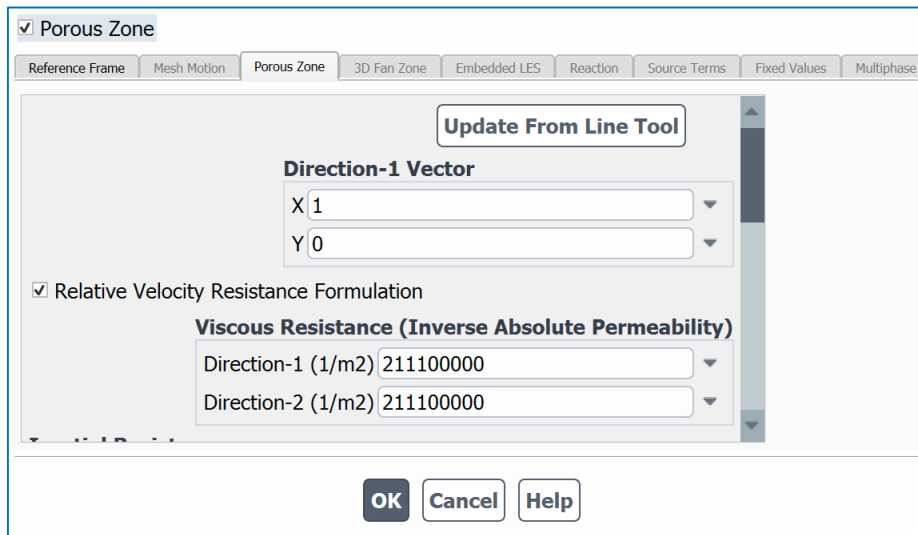


Figure 4.15 - Création les données de milieu poreux-

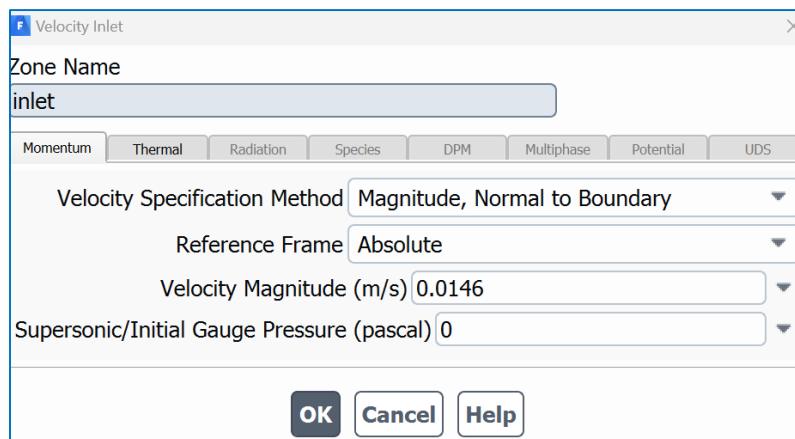


Figure 4.16 - Condition aux limites –Inlet-

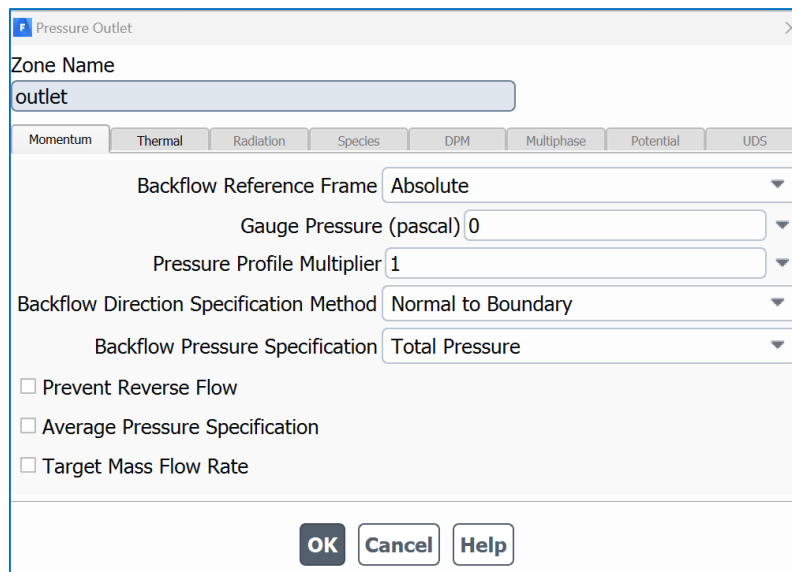


Figure 4.17 - Condition aux limites –Outlet-

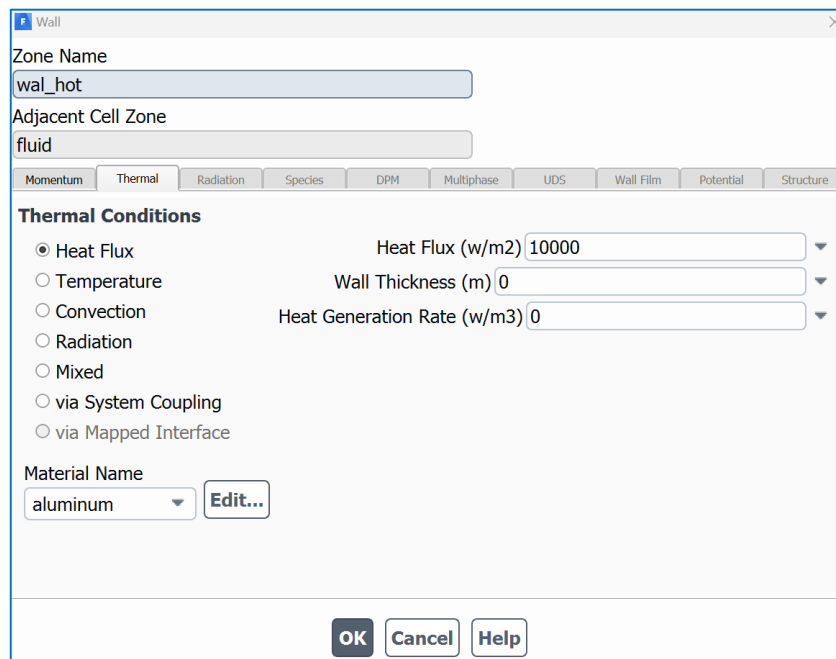


Figure 4.18 - Condition aux limites –Composant électronique Wall-

4.1. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une explication détaillée de l'utilisation d'ANSYS et des étapes de calcul par simulation numérique via CFD. Nous avons mis l'accent sur les résultats relatifs au champ de température et aux lignes de courant, qui seront affichés, interprétés et discutés dans le chapitre suivant.

Chapitre 05

Résultats et discussion

Chapitre 05

Résultats et discussion

5.1.Introduction

Le maintien d'une température adéquate des composants électroniques est crucial pour assurer leurs performances et prolonger leur durée de vie. Les simulations numériques jouent un rôle primordial dans l'étude approfondie des mécanismes de transfert de chaleur et d'écoulement de fluide, offrant ainsi des perspectives précieuses pour un refroidissement efficace. Ce chapitre est dédié à la présentation des résultats numériques de la simulation de l'impact de la forme géométrique du milieu poreux sur le refroidissement des composants électroniques. Cette étude a porté sur trois formes du milieu poreux : carrée, circulaire et triangulaire, placées sur la surface du composant électronique à l'intérieur d'un canal en aluminium. Pour cette étude, nous avons choisi un nombre de Reynolds compris entre 100 et 400. Les résultats obtenus de la simulation sont présentés sous forme de champs de température, de vitesse et de courbes.

5.2.Résultats et interprétation

Les résultats issus de nombreuses simulations numériques réalisées avec le logiciel ANSYS WORKBENCH, version R2020, seront discutés. Nous examinerons les champs de température, de vitesses et les lignes de courant, ainsi que les coefficients pour les différents paramètres de l'écoulement d'un nano fluide ($\phi=2\%$: Cu-eau). Le fluide entre dans le canal avec une distribution uniforme de vitesse à l'entrée et une température déterminée. Les parois horizontales du canal sont adiabatiques, tandis qu'à l'intérieur se trouve un composant électronique qui génère de la chaleur. Un milieu poreux homogène et isotrope est disposé autour de cette source de chaleur selon trois configurations géométriques distinctes.

5.2.1. Test de convergence des résultats

Dans cette étude, les équations de conservation régissant ce phénomène, ainsi que leurs conditions aux limites, sont résolues à l'aide du logiciel commercial Ansys-Fluent. L'algorithme SIMPLE est utilisé pour déterminer le champ de température, tandis que le schéma QUICK est appliqué pour discrétiser les termes de convection dans les équations de mouvement et d'énergie. L'outil de maillage est utilisé pour générer la grille de surface simulée. Le système de grille pour le domaine de calcul est créé à l'aide de cellules structurées. Pour garantir une solution indépendante du maillage, une convergence pour toutes les équations gouvernantes est

recherchée, et celles-ci sont résolues de manière itérative et rapide. La stabilité et la convergence du modèle étudié sont obtenues pour chaque maillage imposé après des nombres des itérations.

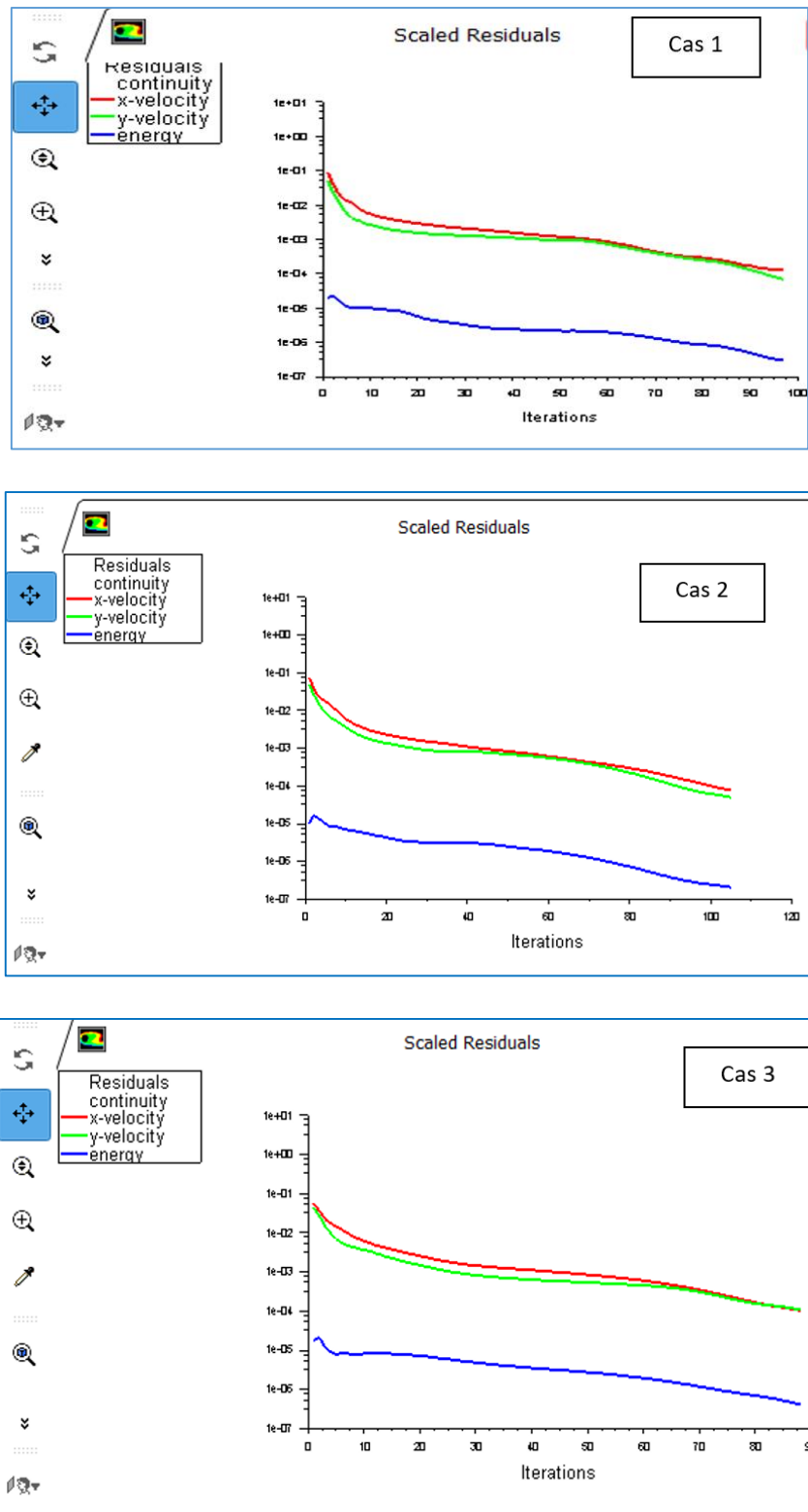


Figure 5.1 - Présentation de l'évolution des résidus de calcul (1^{er} Cas et 2^{ème} Cas, 3^{ème} Cas) -

5.2.2. Étude de la sensibilité au maillage

La figure 5.2 représente l'analyse de l'impact du maillage sur nos résultats numériques, qui se manifestent par des variations de la température du composant électronique à un nombre de Reynolds égal à 400 et dans le cas 01. On observe dans la figure que le maillage est stable au nœud 3000 et au-delà, tandis que pour les nœuds inférieurs à 3000, les résultats sont instables.

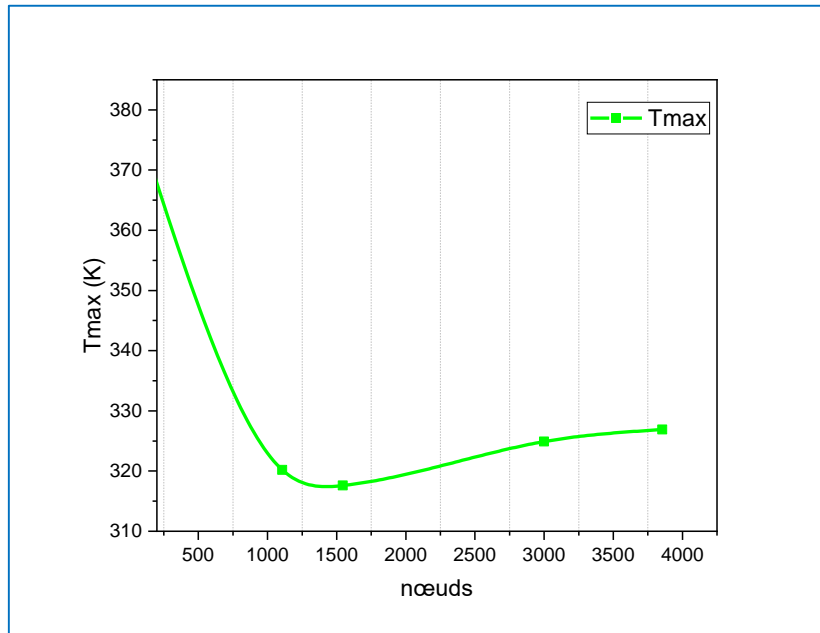


Figure 5.2 - Profils de la température du composant électronique pour différents maillages-

5.2.3. Distribution de la température de l'écoulement du nano-fluide

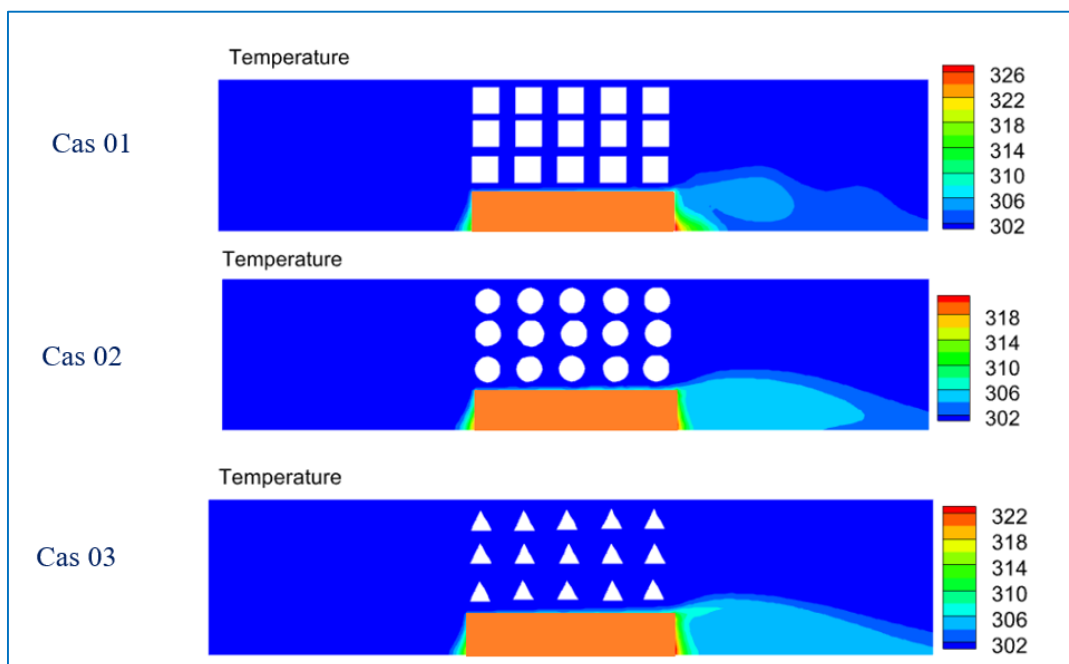


Figure 5.3 - la distribution de la température du nano fluide pour les trois cas (Re=200) -

La figure 5.3 représente la distribution de la température du liquide (nano fluide Cu-H₂O) à l'intérieur du canal et sur la surface du composant électronique pour les trois cas étudiés à un nombre de Reynolds de 200. Selon les résultats de la simulation, nous constatons que la température du composant électronique dans le 2^{ème} cas est plus basse par rapport aux autres cas étudiés, avec une température maximale de 318 K, comparée à 326K et 322K pour les cas 1 et 3, respectivement. Ceci est dû à la forme du milieu poreux présent à l'intérieur du canal dans le 2^{ème} cas.

5.2.4. Distribution de la vitesse de l'écoulement de nano fluide

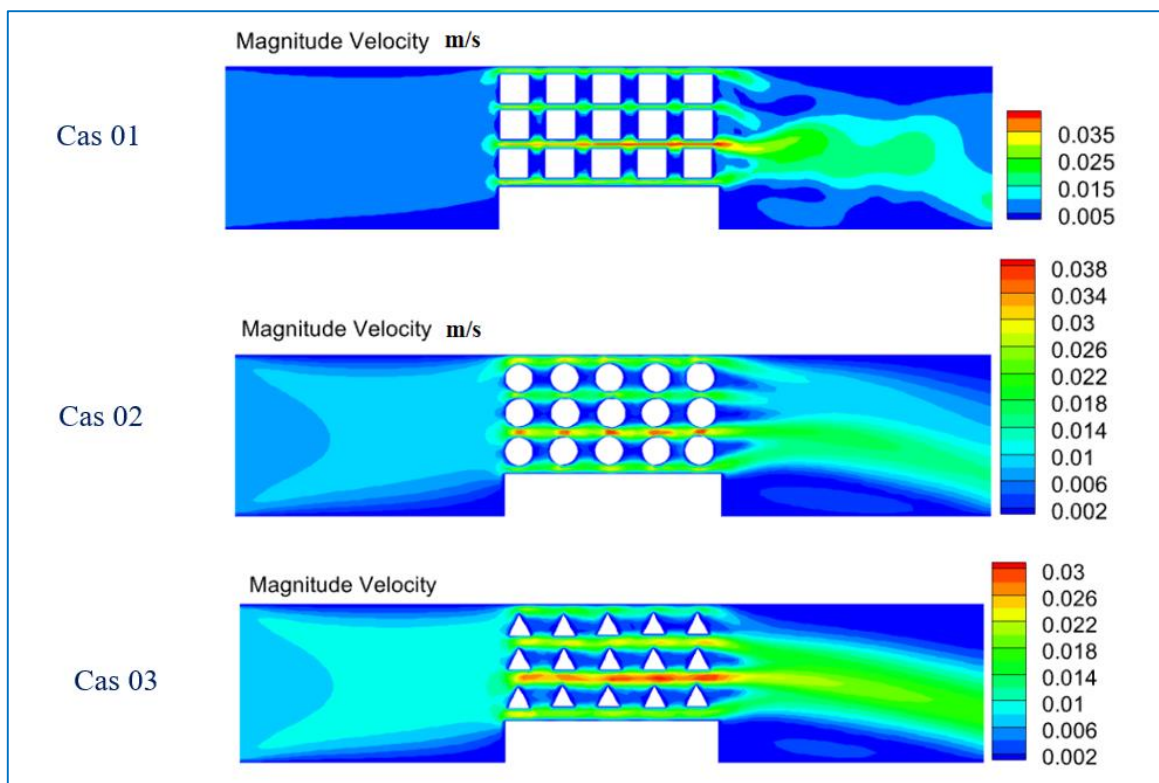


Figure 5.4 - représente la distribution de la vitesse du nano fluide pour les trois cas (Re=200) - La figure 5.4 représente la distribution de la vitesse d'écoulement du liquide à l'intérieur du canal à un nombre de Reynolds de 200 pour les cas étudiés. Selon les résultats, la vitesse maximale du liquide (nano fluide) est observée dans le 2^{ème} cas, avec une vitesse maximale de 0,038 m/s. La vitesse dans le troisième cas est plus faible par rapport aux cas 1 et 2, du fait de la présence de vides dans le milieu poreux du troisième cas, ce qui conduit à un ralentissement de l'écoulement. De plus, la vitesse d'écoulement à l'intérieur du canal augmente au milieu poreux dans tous les cas.

5.2.5. Distribution de lignes du courant

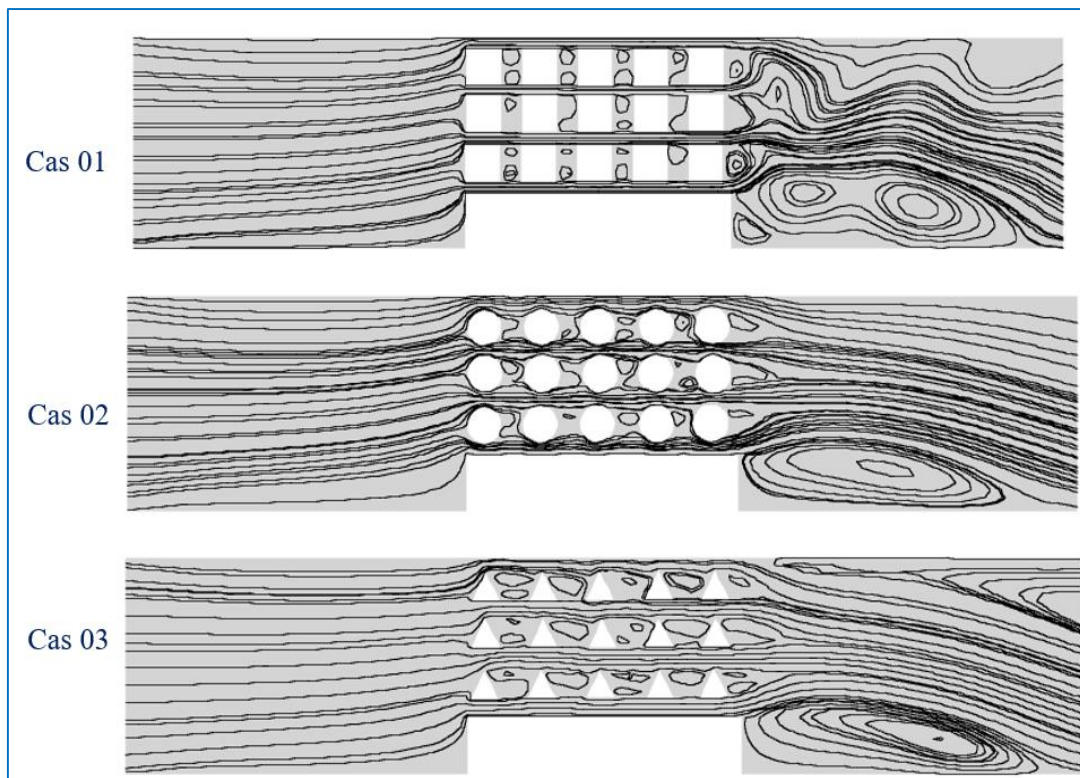


Figure 5.5 - la distribution de lignes du courant pour un nombre de Reynolds égal à 400-

La figure 5.5 montre la distribution de lignes du courant pour un nombre de Reynolds égal à 400 pour les trois cas étudiés. D'après la figure, on constate que les lignes du courant varient selon la forme géométrique du milieu poreux, puisque l'on retrouve la présence de vortex à l'extrémité du composant électronique.

La figure 5.6 montre les variations de la température moyenne du composant électronique en fonction du nombre de Reynolds. On observe que la température du composant électronique diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds ou de la vitesse d'écoulement. Par exemple, lorsque le nombre de Reynolds varie de 100 à 400, la température moyenne du composant électronique diminue de 334 à 326,8 ; de 327,41 à 319,62 et de 331 à 322,03 pour les cas 1, 2 et 3, respectivement. De plus, la température moyenne du composant électronique dans le cas 2 est inférieure que dans les autres cas.

La figure 5.8 illustre les variations de la moyenne du nombre de Nusselt pour les trois cas étudiés. D'après les résultats obtenus, on peut dire que l'échange de chaleur augmente avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement du nano fluide. Lorsque le nombre de Reynolds est compris entre 100 et 400, le nombre de Nusselt moyen est compris entre 46,43 et 78,32. Par contre, il est compris entre 26,97 et 33,13 dans le second cas. Nous constatons également que

le milieu poreux dans le deuxième cas contribue à une augmentation de l'échange thermique de 46 pour cent, dans le premier cas de 17,4 pour cent et dans le troisième cas de 36,5 pour cent à un nombre de Reynolds égal à 400.

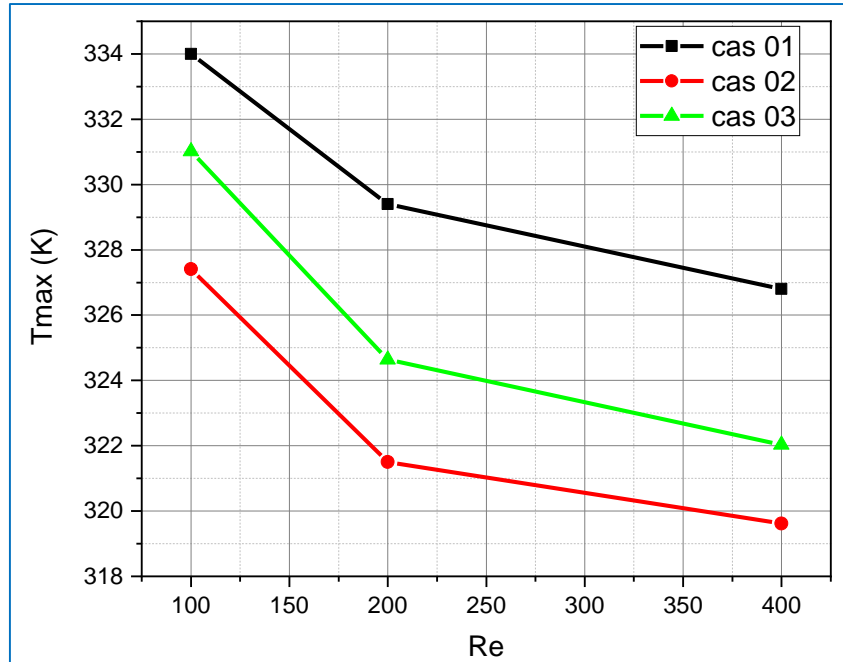


Figure 5.6 - les variations de la température moyenne du composant électronique en fonction du nombre de Reynolds-

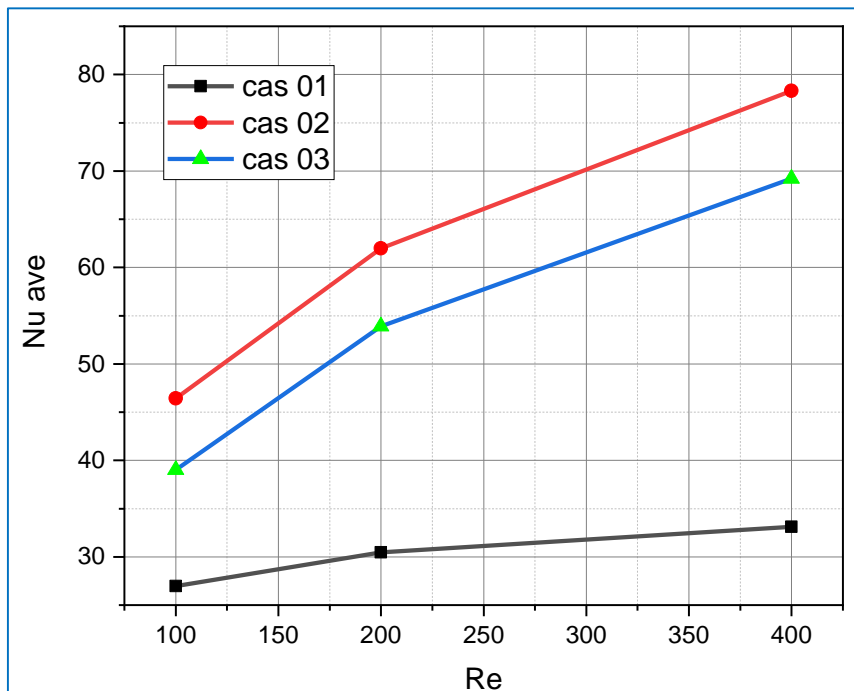


Figure 5.7 - les variations de la moyenne du nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds-

5.3. Conclusion

Les simulations numériques sont essentielles pour une compréhension approfondie des mécanismes de transfert de chaleur et d'écoulement de fluide, ouvrant ainsi la voie à des solutions de refroidissement plus efficaces. Ce chapitre a présenté les résultats des simulations visant à évaluer l'impact des différentes formes géométriques du milieu poreux sur le refroidissement des composants électroniques. Trois configurations ont été étudiées : carrée, circulaire et triangulaire, disposées autour du composant électronique à l'intérieur d'un canal en aluminium.

Avec un nombre de Reynolds variant de 100 à 400, les simulations ont fourni des données précieuses illustrées par des champs de température, de vitesse et des courbes. Les résultats ont démontré que la deuxième configuration, avec une forme circulaire, est la plus efficace en termes de refroidissement. La température maximale du composant électronique dans cette configuration est de 318 K, comparée à 326 K et 322 K pour les configurations carrée et triangulaire, respectivement. Cette efficacité accrue est attribuée à la forme circulaire du milieu poreux dans le canal.

Les résultats ont également montré que la température du composant électronique diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds, indiquant que des vitesses d'écoulement plus élevées améliorent le refroidissement. En particulier, la température moyenne du composant électronique dans la configuration circulaire est inférieure à celle des autres configurations étudiées. Ces observations permettent d'optimiser les conditions de refroidissement en fonction des différentes formes géométriques du milieu poreux.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Le refroidissement des composants électroniques par l'utilisation de nano fluides dans des milieux poreux représente une avancée prometteuse pour la gestion thermique. En tirant parti des propriétés thermo-physiques des nano fluides et de la structure optimisée des milieux poreux, cette approche offre des perspectives significatives pour améliorer les performances, la fiabilité et l'efficacité énergétique des systèmes électroniques modernes.

Les nombreuses simulations numériques réalisées avec le logiciel ANSYS WORKBENCH, version R2020, visaient à évaluer l'impact des différentes formes géométriques des milieux poreux sur le refroidissement des composants électroniques. Trois configurations ont été étudiées : carrée, circulaire et triangulaire, disposées autour du composant électronique à l'intérieur d'un canal en aluminium.

Avec un nombre de Reynolds variant de 100 à 400, les simulations ont fourni des données précieuses illustrées par des champs de température, de vitesse et des courbes. Les résultats ont démontré que la configuration circulaire est la plus efficace en termes de refroidissement. La température maximale du composant électronique dans cette configuration est de 318 K, comparée à 326 K et 322 K pour les configurations carrée et triangulaire, respectivement. Cette efficacité accrue est attribuée à la forme circulaire du milieu poreux dans le canal.

Les résultats ont également montré que la température du composant électronique diminue avec l'augmentation du nombre de Reynolds, indiquant que des vitesses d'écoulement plus élevées améliorent le refroidissement. En particulier, la température moyenne du composant électronique dans la configuration circulaire est inférieure à celle des autres configurations étudiées. Ces observations permettent d'optimiser les conditions de refroidissement en fonction des différentes formes géométriques des milieux poreux.

Référence

Référence

- [1] Nemdili S., « Investigation numérique de l'écoulement turbulent et du transfert de chaleur autour d'un élément cubique avec jet impactant » Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la technologie Mohammed Boudiaf d'Oran, 2015.
- [2] Sadaoui, D., & Boumoula, B. (2020). Nanofluide: Magnétodynamiques: Champ magnetique (Doctoral dissertation, Université Abderahmane MIRA de Bejaia).
- [3] SALHI MASSINISSA et MAMMERI LAMIA, Etude d'un écoulement convectif d'un nanofluide à travers un milieu poreux non Darceen, Université Abderrahmane MIRA BEJAIA, 2019.
- [4] AREELIS Technologies : (Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg), dissipation thermique dans les composantes électroniques ; un enjeu pour la fiabilité des composant/système électroniques quelles solution technologiques. Laboratoire universitaire des sciences appliquées de Cherbourg, 2015.
- [5] Hamouche A. « refroidissement a air des composants électroniques par convection mixte » Thèse de Magister, Université Mentouri-Constantine, 2007.
- [6] Castro, I.P., Robins, A.G., (1977). "The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams". J. Fluid Mech. 79, 307–335.
- [7] Hussein, H.J., Martinuzzi, R.J., (1996), "Energy balance for turbulent flow around a surface mounted cube placed in a channel". Phys. Fluids 8, 764–780.
- [8] Martinuzzi, R.J., Tropea, C., (1993). "The flow around surface mounted, prismatic obstacles placed in a fully developed channel flow". J. Fluids Eng. 115, 85–92.
- [9] A. D. Nield, Onset of thermohaline convection in a porous medium. Water Resources Res., Vol. 4, pp. 553-560 (1968).
- [10] J. W. Taunton, E. N. Lightfoot et T. Green, Thermohaline instability and salt fingers in porous medium. Phys. Fluids, Vol. 15, pp. 748-753 (1972).
- [11] B. J. Muray et C. F. Chen, Double – diffusive convection in a porous medium. J. Fluid Mech., Vol. 230, pp. 147-166 (1989).
- [12] BOUBENDIR, L.; CHIKH, S. Analyse de l'effet de la matrice poreuse sur le transfert thermique en régime turbulent dans un échangeur à plaques. Journal of Renewable Energies, 2009, 12.1: 45–53-45–53.
- [13] Younsi, Ramdane. Simulation numérique du transfert de chaleur et de masse en milieux fluides et poreux. Diss. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2002.
- [14] Arunn Narasimhan. Natural Convection inside a Bidisperse Porous Medium Enclosure. Journal of Heat Transfer. DOI : 10.1115/1.3192134.

- [15] TARGUI, Nabila, and Henda KAHALERRAS. "Analyse du transfert de chaleur et de la chute de pression dans un échangeur de chaleur muni de chicanes poreuses." *Congres*, 2008.
- [16] Miroshnichenko, Igor V., et al. "Natural convection of alumina-water nanofluid in an open cavity having multiple porous layers." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 125 (2018): 648-657.
- [17] Rizwan Ul Haq, Feroz Ahmed Soomro, Toufik Mekkaoui ey Qasem M. Al-Mdallal. MHD natural convection flow enclosure in a corrugated cavity filled with a porous medium. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 121 (2018) 1168–1178.
- [18] J. Y. Jang et W. J. Chang, The flow and the vortex instability of horizontal natural convection in porous medium resulting from combined heat and mass buoyancy effects. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, pp. 769-777 (1988).
- [19] O. V. Trevisan et A. Bejan, Mass and heat transfer by high Rayleigh number convection in a porous medium heated from below. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 2341-2356 (1987).
- [20] F. Chen et C. F. Chen, Double – diffusive fingering convection in a porous medium. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 793-807 (1993).
- [21] R. Younsi, A. Harkati et D. Kalache, Numerical simulation of heat and mass transfer in trapezoidal porous cavity heated from below . 7th European days on contemporary thermodynamics, 312-319 (2001).
- [22] Hamadi hamza et Nassou Mourad, Étude d'un écoulement convectif le long d'une surface inclinée immergée dans un milieu poreux rempli d'un nanofluide, Université Abderrahmane MIRA BEJAIA, 2020.
- [23] BOUSSENAH Hani et BOULAICHE Amir, Convection naturelle lors du refroidissement d'un composant électronique enveloppé par une couche poreuse, Thème Master, Université Mohammed Seddik Ben Yahia – Jijel, 2019.
- [24] Jie Liu, J., Zhang, H., Yao, S. C., and Li, Y. (April 29, 2014). "Porous Media Modeling of Two-Phase Microchannel Cooling of Electronic Chips With Nonuniform Power Distribution." *ASME. J. Electron. Packag.* June 2014; 136(2): 021008. <https://doi.org/10.1115/1.4027420>
- [25] A. Baïri, A. Martín Garín, E. Martín, J.A. Millán García & A. Velázquez. (2023) Experimental study on the influence of a conical cavity's inclination angle and aspect ratio on thermal behavior of a cone cooled with nanofluid saturated porous media. *Experimental Heat Transfer* 36:7, pages 970-983.
- [26] Alibeigi, M., and S. D. Farahani. "Effect of porous medium positioning on heat transfer of micro-channel with jet." *International Journal of Engineering* 33.10 (2020): 2057-2064.
- [27] Cimpean D.S., Sheremet M. A. et Pop I. (2020), Mixed Convection of Hybrid Nanofluid In a Porous Trapezoidal Chamber, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 116: 104627.
- [28] ALSABERY, Ammar I., ISMAEL, Muneer A., CHAMKHA, Ali J., et al. Effect of nonhomogeneous nanofluid model on transient natural convection in a non-Darcy porous

- cavity containing an inner solid body. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 110, p. 104442.
- [29] ANEJA, Madhu, CHANDRA, Avinash, et SHARMA, Sapna. Natural convection in a partially heated porous cavity to Casson fluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 114, p. 104555.
- [30] DEY, Debashis et SAHU, Dibyansu Sekhar. Experimental study in a natural convection cavity using nanofluids. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 41, p. 403-412.
- [31] MEBREK, Radja. L'effet des dimensions de milieu poreux sur l'échange thermique dans une cavité triangulaire. mémoire de master université biskra.
- [32] ABDE-RAHMANE, FENKOUH. *Etude numérique de la convection naturelle dans une cavité poreuse*. 2022. PhD Thesis. university center of abdalhafid boussouf-MILA.
- [33] KHERIF, Elkhensa Etude numérique du transfert thermique d'un corps solide confiné entre deux plaques parallèles. mémoire de master université biskra.
- [34] BAAMEUR, Walid; BOUTICHE, Samir. *Etude de la convection naturelle d'un nanofluide dans une cavité ondulée avec milieux poreux*. 2021. PhD Thesis. Université Ibn Khaldoun-Tiaret-.
- [35] Baviere, R. Etude de l'Hydrodynamique et des Transferts de Chaleur dans des Microcanaux. phdthesis. Université Joseph-Fourier - Grenoble I (2005).
- [36] Bellin, B. Contributions a l'étude des bobinages supraconducteurs :le projet dga du smes hts impulsional. PhdThesis. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG(2006).
- [37] Bouarroudj-Berkani, M. Etude de la fatigue thermo-mécanique de modules électroniques de puissance en ambiance de températures élevées pour des applications de traction de véhicules électriques et hybrides. PhdThesis. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan(2008).
- [38] MATIVET, Anne. *Étude expérimentale d'un procédé de chauffage et de refroidissement par changement de phase du fluide caloporteur*. 1997. PhD Thesis. Paris 11.
- [39] Faraji, M., and Qarnia, H. El Optimisation d'un système de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion : application au refroidissement d'une composante électronique. In *JITH 2007*, J.-J. BEZIAN, ed. (Albi, France: ENSTIMAC), p. 5p(2007).
- [40] Meysenc, L. Etude des micro-échangeurs intégrés pour le refroidissement des semi-conducteurs de puissance. PhdThesis. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG (1998).
- [41] Hasna Louahlia (Lusac), Sebastien You (Areelis technologies), Dissipation thermique dans les composants/systèmes électroniques, Areelis technologies, Lusac (laboratoire universitaire des sciences appliquées de Cherbourg), 2015.
- [42] Adel HAMOUCH, Refroidissement à air des composants électroniques par convection mixte, mémoire de magister de l'université de Frères Mentouri Constantine, 2007.

- [43] Phelan, P.E., Chiriack, V.A., and Lee, T.-Y.T. Current and future miniature refrigeration cooling technologies for high power microelectronics. *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.* 25, 356-365 (2002).
- [44] Zuo, Z.J., and North, M.T. Miniature high heat flux heat pipes for cooling electronics. *Proc SEE* 573-579 (2000).
- [45] Thibault, D. Etude du refroidissement par impact de jets à travers une paroi mince et avec un écoulement cisailant amont : application aux aubes de turbines. phdthesis. ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers (2009).
- [46] B. J. Muray et C. F. Chen, Double – diffusive convection in a porous medium. *J. Fluid Mech.*, Vol. 230, pp. 147-166 (1989).
- [47] Mojtabi, A., et al. "Transferts de chaleur dans les milieux poreux-Conduction, convection, rayonnement." *Techniques de l'Ingénieur Référence BE8250* (2008). APA
- [48] M. Kaviany, *Principles of heat transfer in porous media*. Springer, (1995).
- [49] Bafétigué Ouattara. Prise en compte des caractéristiques thermophysiques des parois dans le processus de séparation des constituants d'un mélange binaire ou d'un nanofluide par diffusion thermogravitationnelle en milieu poreux. *Mécanique des fluides [physics.class ph]*. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2012. Français. tel-00968643.
- [50] Esam DANA, Contribution a la caractérisation des écoulements biphasiques dans les matériaux poreux étude expérimentale sur trois grès, Thèse doctorat Université Lille-1, 1999.
- [51] *HANDBOOK OF POROUSE MEDIA*, second edition. Edited by Kambiz Vafai. 2005 by Taylor & Francis Group, LLC.
- [52] Alexandre Delache. Etude analytique et numérique des instabilités spatio-temporelles des écoulements de convection mixte en milieu poreux: comparaison avec l'expérience.. *Dynamique des Fluides [physics.flu-dyn]*. Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, 2005. Français. tel-00069550.
- [53] Kaci Fodil : Simulation d'un déplacement immiscible eau-huile en milieu poreux, 2012, Tizi-Ouzou.
- [54] Wolfgang Ehlers, Darcy, Forchheimer, Brinkman and Richards: classical hydromechanical equations and their significance in the light of the TPM, 2020.
- [55] H. Darcy, *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris, Victor Dalmont (1856). 44. Wolfgang Ehlers, Darcy, Forchheimer, Brinkman and Richards: classical hydromechanical equations and their significance in the light of the TPM, 2020.
- [56] Jean-Paul Caltagirone. *De la mécanique discrète à la loi de Darcy-Forchheimer*. 2018. hal01762952.
- [57] Sinz C, Woei H, Khalis M, Abbas SA. Numerical study on turbulent force convective heat transfer of hybrid nanofluid, Ag/HEG in a circular channel with constant heat flux. *J Adv Res Fluid Mech Therm Sci* 2016;24:1–11.

- [58] Lee, Geun Hee, Joong Hak Park, Chang Kyu Rhee, and Whung Whoe Kim. "Fabrication of Al nano powders by pulsed wire evaporation (PWE) method." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 9, no. 1 (2003): 71-75.
- [59] Munkhbayar, B., Md Riyad Tanshen, Jinseong Jeoun, Hanshik Chung, and Hyomin Jeong. "Surfactant-free dispersion of silver nanoparticles into MWCNT-aqueous nanofluids prepared by one-step technique and their thermal characteristics." *Ceramics International* 39, no. 6 (2013): 6415-6425.
- [60] Mahmoud, K. "Etude de la convection thermique dans des cavités par l'utilisation des nano-fluides hybrides." *Mémoire de master 2020/2021 Université de Biskra*.
- [61] Salhi, Massinissa, Lamia Mammeri, and H. Ali Agha. *Etude d'un écoulement convectif d'un nanofluide à travers un milieu poreux non Darcy*. Diss. Université Abderahmane MIRA de Bejaia, 2019.
- [62] Bejan, A., and Al M. Morega. "Optimal arrays of pin fins and plate fins in laminar forced convection." (1993): 75-81.
- [63] KROUMA Saadia, *Influence de la géométrie des nanoparticules dans un nano fluide sur le transfert thermique*, mémoire de master université de Mohamed Khider Biskra, 2017.
- [64] Athmani, B. (2014). *Analyse expérimentale et numérique du déversoir en touche de piano «PK-WEIR»* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).

Résumé

Résumé

Ce travail étudie numériquement, l'impact des différentes formes géométriques des milieux poreux sur le refroidissement des composants électroniques en utilisant des simulations numériques. Le nanofluide ($\phi=2\%$: Cu-eau) pénètre dans un canal en aluminium avec une vitesse constante à l'entrée V et une température T . Les parois horizontales adiabatiques du canal sont équipées d'un élément électronique qui génère de la chaleur. Ce composant est entouré d'un milieu poreux homogène et isotrope, de trois formes différentes : carrée, circulaire et triangulaire. On a effectué des simulations avec des nombres de Reynolds allant de 100 à 400. D'après les résultats, il a été démontré que la configuration circulaire est la plus performante pour le refroidissement, notamment en raison de la forme circulaire du milieu poreux. En outre, les résultats montrent que la hausse du nombre de Reynolds, qui correspond à des vitesses d'écoulement plus élevées, réduit la température du composant électronique, ce qui améliore le refroidissement. L'efficacité de la configuration circulaire a été constamment mise en évidence par une température moyenne inférieure à celle des autres configurations.

Mots clés

Composant électronique, Forme géométrique, Milieux Poreux, Refroidissement, Nano fluide.

Abstract

This work studies numerically the impact of different geometric shapes of porous media on the cooling of electronic components using numerical simulations. The nanofluid ($\phi=2\%$: Cu-water) enters an aluminum channel with a constant inlet speed V and a temperature T . The adiabatic horizontal walls of the channel are equipped with an electronic element that generates heat. This component is surrounded by a homogeneous and isotropic porous medium, of three different shapes: square, circular and triangular. Simulations were carried out with Reynolds numbers ranging from 100 to 400. From the results, it was demonstrated that the circular configuration is the most efficient for cooling, particularly due to the circular shape of the porous medium. Additionally, the results show that increasing the Reynolds number, which corresponds to higher flow velocities, reduces the temperature of the electronic component, which improves cooling. The effectiveness of the circular configuration was consistently demonstrated by a lower average temperature than other configurations..

Keywords

Electronic component, Geometric shape, Porous media, Cooling, Nanofluid.

ملخص

يدرس هذا العمل عددياً تأثير الأشكال الهندسية المختلفة للوسائط المسامية على تبريد المكونات الإلكترونية باستخدام المحاكاة العددية. يدخل السائل النانوي ($\phi=2\%$ ماء نحاسي) إلى قناة ألومنيوم بسرعة ثابتة عند المدخل V ودرجة حرارة T . وقد تم تجهيز الجدران الأفقية ثابتة الحرارة للقناة بعنصر إلكتروني يولد الحرارة. يحيط بهذا المكون وسط مسامي متجانس ومتناحي، وله ثلاثة أشكال مختلفة: مربع، ودائري، ومثلث. وقد أجريت عمليات المحاكاة بأرقام رينولدز التي تتراوح من 100 إلى 400. ووفقاً للنتائج، فقد تبين أن الشكل الدائري هو الشكل الأكثر كفاءة للتبريد، خاصة بسبب الشكل الدائري للوسط المسامي. علاوة على ذلك، أظهرت النتائج أن زيادة رقم رينولدز الذي يتوافق مع سرعات تدفق أعلى، يقلل من درجة حرارة المكون الإلكتروني، مما يحسن التبريد. تم إثبات فعالية التكوين الدائري باستمرار من خلال انخفاض متوسط درجة الحرارة عن التكوينات الأخرى.

الكلمات المفتاحية

مكون إلكتروني، شكل هندسي وسائط مسامية، تبريد، مائع نانوي