

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE UNIVERSITE
MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT
PHYSIQUE

N° : PH/ENR/27/2024



DOMAINE : Sciences de la
matière FILIERE : Physique
OPTION : Physique
Énergétique et Energie
renouvelable

Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique

Par: Yahoui nour

Intitulé

Étude numérique du transfert de chaleur par l'utilisation des nanofluides dans un moteur Stirling

Soutenu le 10/06/2024 devant le jury composé de:

Fares KHALFALLAH	Université de M'sila	Président
Razik BENDERRADJI	Université de M'sila	Rapporteur
Farouk TAHROUR	Université de M'sila	Examineur
Mourad SILEM	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

Tout d'abord, je remercie « Allah » de m'avoir donné la patience, la force, le courage et la volonté d'accomplir cet humble travail.

Je remercie chaleureusement et sincèrement mon encadreur, monsieur Benderradji Razik, professeur à l'Université de M'sila. Il a accepté de diriger mon travail, a toujours été présent pour résoudre tout problème rencontré, et m'a fourni des conseils précieux et des encouragements constants.

Que monsieur Fares KHALFALLAH, professeur à l'Université Mohamed Boudiaf M'sila, trouve dans ce modeste travail l'expression de mon profond respect et soit remercié d'avoir accepté de présider le jury.

Je remercie en particulier monsieur Farouk TAHROUR et monsieur Mourad SILEM pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour m'avoir honoré de leur présence au sein du jury.

Enfin, je tiens à remercier Brahim Meryem pour son soutien et sa patience tout au long de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en particulier

À mes chers parents

À mes sœurs

À toute ma famille

À tous mes amis et mes collègues

Remerciement

Dédicace

Table des matières

Nomenclature

Liste des figures

Liste des Tableaux

Introduction Générale

Chapitre I : Généralités et Recherche Bibliographique

<i>I.1</i>	<i>Introduction</i>	5
<i>I.2</i>	<i>Généralité sur le moteur stirling</i>	5
<i>I.2.1</i>	<i>Historique</i>	5
<i>I.2.1.1</i>	<i>L'Histoire de Robert Stirling .</i>	5
<i>I.2.1.2</i>	<i>L'Histoire du moteur Stirling</i>	6
<i>I.2.2</i>	<i>Présentation d'un moteur Stirling</i>	8
<i>I.2.3</i>	<i>Principe de fonctionnement</i>	8
<i>I.2.4</i>	<i>Les quatre phases élémentaires</i>	10
<i>I.2.5</i>	<i>Cycles théorique de Stirling</i>	13
<i>I.2.6</i>	<i>Cycles réel de Stirling</i>	13
<i>I.2.7</i>	<i>Types de moteur Stirling :</i>	16
<i>I.2.7.1</i>	<i>Stirling alpha :</i>	16
<i>I.2.7.2</i>	<i>Stirling bêta :</i>	17
<i>I.2.7.3</i>	<i>Le moteur gamma</i>	17
<i>I.2.8</i>	<i>Avantages et inconvénients :</i>	18
<i>I.2.8.1</i>	<i>Avantages</i>	18
<i>I.2.8.2</i>	<i>Inconvénients</i>	18
<i>I.2.9</i>	<i>Applications du moteur Stirling</i>	19
<i>I.2.9.1</i>	<i>La recherche et le monde universitaire</i>	19
<i>I.2.9.2</i>	<i>Domaine spatial et les applications solaires</i>	19
<i>I.2.9.3</i>	<i>Monde industriel avec la cryogénie</i>	19
<i>I.2.9.4</i>	<i>Recherche et exploitation océanographique</i>	19
<i>I.2.9.5</i>	<i>Utilisation domestique</i>	20
<i>I.3</i>	<i>Les Nanofluides</i>	20
<i>I.3.1</i>	<i>Définition des Nanofluides</i>	20

I.3.2	<i>Les nanoparticules et les fluides porteurs</i>	20
I.3.3	<i>Les avantages du nanofluides</i>	22
I.3.4	<i>Les inconvénients des nanofluides</i>	23
I.3.5	<i>Domaines d'applications des nanofluides</i>	23
I.3.6	<i>Propriétés des nanofluides</i>	25
I.4	<i>Le Transfer de chaleur</i>	28
I.4.1	<i>Conduction</i>	28
I.4.2	<i>Convection</i>	29
I.5	<i>Revue Bibliographique</i>	30
I.6	<i>Conclusion</i>	39

Chapitre II : Formulation Mathématiques et Méthodes Numérique

II.1	<i>Introduction</i>	41
II.2	<i>Description du problème</i>	41
II.3	<i>Équations gouvernantes</i>	42
II.3.1	<i>Equation de continuité</i>	42
II.3.2	<i>Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes)</i>	42
II.3.3	<i>L'équation de l'énergie</i>	42
II.4	<i>Les hypothèses simplificatrices :</i>	43
II.5	<i>Equations gouvernantes dimensionnelles</i>	44
II.5.1	<i>Equation de continuité</i>	44
II.5.2	<i>Equations de quantité de mouvement</i>	44
II.5.3	<i>Equations de l'énergie</i>	44
II.6	<i>Formulation adimensionnelle des équations du modèle mathématique</i>	45
II.6.1	<i>Variables adimensionnelles</i>	45
II.7	<i>Conditions aux limites adimensionnelles</i>	48
II.8	<i>Nombres adimensionnels</i>	48
II.8.1	<i>Nombre de Grashof</i>	48
II.8.2	<i>Nombre de Rayleigh</i>	49
II.8.3	<i>Nombre de Prandtl</i>	49
II.8.4	<i>Le nombre de Nusselt</i>	49
II.9	<i>Modèle Numérique</i>	51
II.9.1	<i>Rappel sur la méthode numérique</i>	51
II.10	<i>Maillage</i>	53
II.11	<i>Procédure du calcul numérique</i>	55
II.12	<i>Propriétés thermophysiques</i>	55
II.13	<i>Conclusion</i>	58

Chapitre III : Résultats Et Discussion

<i>III.1</i>	<i>Introduction</i>	60
<i>III. 2</i>	<i>Partie mise en situation</i>	60
<i>III.2. 1</i>	<i>Généralités</i>	60
<i>III.2. 2</i>	<i>Description du concept</i>	60
<i>III.2.3</i>	<i>Principe de fonctionnement</i>	62
<i>III. 3</i>	<i>Partie calcul (Simulation numérique)</i>	64
<i>III.3.1</i>	<i>Analyse du champ des températures</i>	65
<i>III.3.2</i>	<i>Analyse du champ des vitesses</i>	67
<i>III.3.3</i>	<i>Profils de vitesse et de température</i>	68
<i>III.3.3.1</i>	<i>Profils de vitesse</i>	68
<i>III.3.3.2</i>	<i>Profils de température</i>	69
<i>III. 4</i>	<i>Effet de volume fraction de nanoparticules</i>	71
<i>III. 5</i>	<i>Conclusion</i>	73
	Conclusion générale	74
	Références	76
	Résumés	79

Nomenclature

<i>Symbole</i>	<i>Définition</i>	<i>Unité</i>
C_p	Chaleur spécifique à pression constante	$J.kg^{-1} .K^{-1}$
g	Accélération gravitationnelle	m/s^2
H	Hauteur de la cavité	m
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection	$W m^{-2} °C^{-1}$
Gr	Nombre de Grashof	
K	: La conductivité thermique	$W.m^{-1} .K^{-1}$
L	Longueur de cavité	m
Nu	Nombre de Nusselt	
n	Quantité de matière	Kg
Pr	Nombre de Prandtl	
Q	Flux de chaleur transmis par conduction	W
Ra	Nombre de Rayleigh	
u, v	Champ de vitesse	m/s
U, V	Composantes de la vitesse adimensionnelle	
V_s	volume de solide (nanoparticules)	
V_T	volume totale	m^3
x, y	Les coordonnées cartésiennes	(m)
X, Y	Les coordonnées adimensionnelles	

Symbole Grecque

α	la diffusivité thermique	m^2s^{-1}
β	coefficient d'expansion thermique	K^{-1}
ΔT	la différence de température	
λ_{nf}	La conductivité thermique du nano fluide.	
λ_f	La conductivité thermique du fluide de base	

λ_s	<i>La conductivité thermique des particules solides</i>	
μ	<i>Viscosité dynamique</i>	$(N \cdot s \cdot m^{-2})$
μ_{nf}	<i>La viscosité dynamique du nano fluide</i>	
μ_f	<i>La viscosité dynamique du fluide de base.</i>	
φ	<i>La fraction volumique des nanoparticules</i>	
ρ	<i>La masse volumique</i>	Kg/m^3
ρ_{nf}	<i>La masse volumique du nano fluide.</i>	
ρ_f	<i>La masse volumique du fluide de base.</i>	
ρ_s	<i>La masse volumique des nanoparticules.</i>	
Ψ	<i>est la sphéricité définie comme le rapport entre la surface de la sphère et la surface de la particule réelle à volumes égaux)</i>	
Φ	<i>Flux de chaleur transmis par convection</i>	W
θ	<i>Température adimensionnelle</i>	
ν	<i>La viscosité cinématique</i>	m^2/s

Indice

C	<i>chaude</i>
F	<i>froid</i>
n_f	<i>nanofluide</i>
S	<i>Particules solide</i>
f	<i>Fluide de base</i>

List Des Figures

Figure	Titre	Page
Chapitre I		
Figure I.1	<i>Robert Stirling.</i>	2
Figure I.2	<i>Schéma de la machine de Stirling.</i>	3
Figure I.3	<i>Identification des éléments d'un Stirling.</i>	3
Figure I.4	<i>Principe général des machines thermiques.</i>	4
Figure I.5	<i>Schéma simple du moteur Stirling avec Un régénérateur.</i>	5
Figure I.6	<i>Compression isotherme [étape 1-2].</i>	7
Figure I.7	<i>Chauffage isochore [étape 2-3].</i>	8
Figure I.8	<i>Détente isotherme [étape 3-4].</i>	8
Figure I.9	<i>Refroidissement isochore [étape 4-1].</i>	9
Figure I.10	<i>Représentation de cycle théorique de Stirling sur le diagramme de Clapeyron.</i>	9
Figure I.11	<i>Cycle théorique et cycle réel de Stirling.</i>	12
Figure I.12	<i>Configuration du moteur Stirling Alpha</i>	12
Figure I.13	<i>Configuration du moteur Stirling Bêta</i>	13
Figure I.14	<i>Configuration du moteur Stirling Gamma</i>	13
Figure I.15	<i>Nanofluides, vus au microscope électronique (de gauche à droite) : éthylène glycol+ cuivre à 0,5 % ; eau +alumine ; eau +or ; eau +nanotubes de carbone.</i>	16
Figure I.16	<i>Images TEM de quelques exemples de nanoparticules : (a) Nanoparticules sphériques, (b) Nanotubes de carbone et Nanofeuilles de (c)</i>	17
Figure I.17	<i>la configuration géométrique</i>	27
Figure I.18	<i>schéma de la cavité (Ghasemi et al. 2009)</i>	27
Figure I.19	<i>représentation de la cavité (Lin et Violi, 2010)</i>	28
Figure I.20	<i>Représentation de la cavité ondulée</i>	29
Figure I.21	<i>Configuration géométrique et conditions aux limites</i>	30
Figure I.22	<i>Description géométrique du problème, (a) source localisée au milieu, (b) source circonscrite à gauche.</i>	31
Figure I.23	<i>Schéma du problème physique avec les conditions aux limites. (a) Cas 0 : Sans</i>	32

	<i>fractionnement, (b) Cas 1 : fractionnement vertical et (c) Cas 2 : fractionnement horizontal</i>	
Figure I.24	<i>La géométrie du problème et le système de coordonnées.</i>	32
Figure I.25	<i>Schématization du problème.</i>	32
Figure I.26	<i>Configuration géométrique</i>	33
Figure I.27	<i>Schéma de la modélisation numérique 2-D du moteur Stirling</i>	34
Figure I.28	<i>Configuration géométrique</i>	35
Figure II.1	<i>Géométrie de la cavité carrée fermée.</i>	37
Figure II.2	<i>Volume de contrôle bidimensionnel</i>	49
Figure II.3	<i>Schéma du volume de contrôle (a), maillage décalé pour μ_e (b), maillage décalé pour v_s (c)</i>	50
Figure II.4	<i>Le maillage utilisé.</i>	50
Figure II.5	<i>Evolution de résidu.</i>	51
Chapitre III		
Figure III.1	<i>Moteur Stirling (Ensemble déplaceur-moteur).</i>	61
Figure III.2	<i>Diagramme P-V (Échauffement isochore à volume constant).</i>	62
Figure III.3	<i>Diagramme P-V (Détente isotherme à température constante).</i>	62
Figure III.4	<i>Diagramme P-V (Refroidissement isochore à volume constant).</i>	63
Figure III.5	<i>Diagramme P-V (Compression isotherme à température constante).</i>	63
Figure III.6	<i>: Cycle idéal thermique du moteur Stirling.</i>	64
Figure III.7	<i>Évolution des positions des pistons d'éplateur en fonction du temps par rapport de l'angle de rotation d'un cycle.</i>	65
Figure III.8	<i>Évolution de la température à l'intérieur du moteur durant le mouvement du déplaceur entre la PMB et la PMH</i>	66
Figure III.9	<i>Évolution les Lignes de courant à l'intérieur du moteur durant le mouvement du déplaceur entre la PMB et la PMH</i>	67
Figure III.10	<i>Profils de vitesse horizontale au plan médian vertical de la cavité en fonction de la forme (rapport d'aspect).</i>	69

Figure III.11	<i>Profils de température à ($X=0.5$) pour différents rapports de forme en fixant le nombre de Rayleigh et la fraction volumique.</i>	70
Figure III.12	<i>Variation du nombre de Nusselt moyen pour différents nombres de Rayleigh en fonction de la fraction volumique.</i>	71
Figure III.13	<i>Variation du nombre de Nusselt moyen pour différents nombres de Rayleigh en fonction du rapport d'aspect.</i>	72
Figure III.14	<i>Effets du nombre de Rayleigh et la fraction volumique sur la variation du nombre de Nusselt.</i>	73

List de Tableaux

<i>Tableau</i>	<i>Titre</i>	<i>Page</i>
<i>Tableau II.1</i>	<i>Conditions aux limites cinématiques.</i>	44
<i>Tableau II.2</i>	<i>les propriétés de l'air et Al_2O_3</i>	53
<i>Tableau II.3</i>	<i>1^{er} Cas les propriétés de nanofluide $\varphi = 0 \%$</i>	53
<i>Tableau II.4</i>	<i>2^{eme} Cas les propriétés de nanofluide $\varphi = 1 \%$</i>	53
<i>Tableau II.5</i>	<i>3^{eme} Cas les propriétés de nanofluide $\varphi = 2\%$</i>	53
<i>Tableau II.6</i>	<i>4^{eme} Cas les propriétés de nanofluide $\varphi = 3 \%$</i>	53
<i>Tableau II.7</i>	<i>5^{eme} Cas les propriétés de nanofluide $\varphi = 4 \%$</i>	54
<i>Tableau II.8</i>	<i>6^{eme} Cas les propriétés de nanofluide $\varphi = 5 \%$</i>	54
<i>Tableau II.9</i>	<i>7^{eme} Cas les propriétés de nanofluide $\varphi = 6 \%$</i>	54

Introduction générale

Les moteurs Stirling sont des machines thermiques alternatives caractérisées par leur apport de chaleur externe, leur cycle fermé sans clapets ni soupapes, et leur fonctionnement avec une enceinte de compression et de détente. Dotés de trois échangeurs thermiques - un régénérateur, un réchauffeur et un refroidisseur - ces moteurs ont été largement utilisés jusqu'au début du XXe siècle. Leur popularité renaît aujourd'hui grâce à leurs nombreux avantages : silence, faible pollution, simplicité de conception et polyvalence des sources de chaleur utilisables (énergie solaire, biomasse, gaz, etc.).

Historiquement, le moteur Stirling a été un succès commercial notable, mais son développement a été limité par des défis technologiques, récemment surmontés. Il s'est avéré particulièrement efficace pour convertir l'énergie solaire en électricité, comme illustré par la technologie du "Dish Stirling System" où un moteur Stirling est placé au foyer d'un concentrateur parabolique. Ce moteur, inventé au début du XIXe siècle par le pasteur Robert Stirling, a connu des périodes d'oubli avant de retrouver un intérêt grâce à des avancées technologiques et des applications modernes. Aujourd'hui, le moteur Stirling est reconnu pour ses rendements élevés et ses faibles émissions comparativement aux moteurs à combustion interne, offrant ainsi des perspectives prometteuses dans le contexte actuel de transition énergétique et de préoccupations environnementales.

Les nanofluides sont des suspensions colloïdales composées de fluides de base, comme l'eau, l'éthylène glycol ou les huiles, et de nanoparticules dont la taille varie généralement entre 1 et 100 nanomètres. Cette combinaison unique permet aux nanofluides de bénéficier des propriétés avantageuses des nanoparticules, telles que l'augmentation significative de la conductivité thermique et l'amélioration des capacités de transfert de chaleur. L'ajout de nanoparticules, qui peuvent être des oxydes métalliques, des métaux purs, des carbures, des nanotubes de carbone ou des autres composés, transforme les fluides conventionnels en systèmes thermiques avancés, adaptés à diverses applications industrielles et technologiques. Le développement des nanofluides a suscité un grand intérêt dans de nombreux domaines en raison de leurs caractéristiques améliorées par rapport aux fluides traditionnels. Par exemple, dans le secteur de la réfrigération et de la climatisation, les nanofluides peuvent optimiser l'efficacité énergétique en améliorant le transfert de chaleur, ce qui permet une meilleure gestion thermique des systèmes. De plus, dans les secteurs des transports et de l'électronique, les nanofluides sont utilisés pour le refroidissement des

moteurs et des composants électroniques, respectivement, contribuant ainsi à prolonger la durée de vie des équipements et à améliorer leur performance.

Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les nanofluides présentent également des défis, tels que le coût élevé de production, la stabilité à long terme et les préoccupations environnementales liées à l'utilisation et à l'élimination des nanoparticules. La recherche continue dans ce domaine vise à surmonter ces obstacles et à maximiser les bénéfices des nanofluides dans diverses applications pratiques. En somme, les nanofluides représentent une avancée prometteuse dans le domaine du transfert thermique, offrant des solutions innovantes pour les besoins croissants en efficacité énergétique et en gestion thermique.

L'objectif principal de notre travail est de réaliser une simulation 2D des transferts d'énergie dans un moteur Stirling à l'aide d'ANSYS FLUENT. Cette simulation prend en compte les dimensions, les conditions initiales et les conditions aux limites du prototype. Les résultats obtenus permettent de tracer les grandeurs caractéristiques du nanofluide utilisé dans le moteur Stirling. L'objectif est d'optimiser les performances du moteur en utilisant ce nanofluide et en ajustant divers paramètres, tels que la fraction volumique des nanoparticules et le nombre de Rayleigh. L'analyse montre l'évolution de la température et des lignes de courant pendant le mouvement du déplaceur pour différentes valeurs de fraction volumique et de Rayleigh. Les équations qui régissent ont été résolues numériquement via la méthode des volumes finis en utilisant un schéma en loi de puissance (Power-Law). Les simulations numériques sont effectuées dans le cas de fluide pur l'air, et des mélanges de ce fluide de base et de nanoparticule (Al_2O_3).

Notre manuscrit est structurée en trois chapitres :

Chapitre I : présente des généralités sur les moteurs Stirling, les nanofluides, les transferts thermiques et une revue bibliographique permettant une compréhension du le phénomène de la convection dans les enceintes.

Chapitre II : expose la formulation mathématique des équations de Navier et stockes régissant le phénomène de la convection dans la géométrie considérée ainsi que les hypothèses simplificatrices et la description des conditions aux limites liées à la résolution du problème.

Chapitre III : nous avons présenté les principaux résultats numériques de cette simulation, ou nous avons met en évidence l'importance de l'optimisation des paramètres de fonctionnement et de la composition du fluide de travail pour améliorer les performances du moteur Stirling. Les résultats fournissent des indications précieuses pour le développement de moteurs plus efficaces et durables, capables de répondre aux besoins énergétiques modernes tout en utilisant des sources de chaleur renouvelables.

Enfin, une conclusion générale, qui résume les principaux résultats obtenus, est donnée à la fin de ce mémoire.

Chapitre I
Généralités et Recherche bibliogra-
phique

1.1 Introduction

Comme le système de production du froid à étudier est basé essentiellement sur le moteur Stirling, une brève présentation de ce moteur semble nécessaire pour préfacier l'accès à la réalisation de l'objectif du présent travail. Les moteurs Stirling constituent une famille de machines thermiques de nature très diversifiée, dont les principales caractéristiques sont d'être des machines alternatives à apport de chaleur externe, à enceinte de compression et de détente, sans clapets ni soupapes, à cycle fermé. Ces moteurs sont dotés de trois échangeurs thermiques, un régénérateur, un réchauffeur et un refroidisseur. Le moteur Stirling, qui fut un succès commercial très important jusqu'au début du XXe siècle, connaît depuis peu une vogue nouvelle, car il possède de nombreux avantages, il est silencieux, peu polluant, facile à concevoir et à construire. Il peut utiliser n'importe quelle source de chaleur (énergie solaire, biomasse, gaz...), il offre la possibilité d'avoir un rendement plus élevé avec moins d'émission par comparaison avec le moteur à combustion interne. En outre, plusieurs obstacles technologiques qui avaient jusqu'ici limité son développement ont été levés. Ce moteur a été utilisé avec succès pour la conversion de l'énergie solaire en électricité en utilisant la technologie dite : 'Dish Stirling System' qui utilise un moteur Stirling placé au foyer d'un concentrateur parabolique.

1.2 Généralités sur le moteur Stirling

1.2.1 Historique

1.2.1.1 L'Histoire de Robert Stirling

Le Pasteur Robert Stirling est né le 25 octobre 1790, à Gloag dans le comté de Perthshire en Ecosse. Il est mort le 6 juin 1878 à Galston, ville située à 30 km environ au sud de Glasgow. Il était le troisième enfant d'une famille en comprenant huit. Son grand-père paternel fabriquait des batteuses, son grand-père maternel était agriculteur. Il poursuivit de brillantes études à l'université d'Edimbourg de 1805 à 1808. Ensuite, il se tourna vers des études de théologie à l'université de Glasgow pour devenir pasteur. Il se maria le 10 juillet 1819 avec Jean Rankin. Ils eurent sept enfants.

La vie de Robert Stirling se déroule durant le dix-neuvième siècle qui voit de nombreuses découvertes scientifiques et techniques. C'est probablement ce bouillonnement d'idées, sa curiosité naturelle et son pragmatisme qui pousseront Robert Stirling à inventer "le moteur à air chaud". Le brevet fut déposé le 27 septembre 1816 et fut effectif le 20 janvier 1817. [1]



Figure I.1 Robert Stirling.[1]

I.2.1.2 L'Histoire du moteur Stirling

Le moteur Stirling a été inventé au début de dix-neuvième siècle. Au cours de ces années, on assista à une réelle révolution des sciences et technique. Les inventions et découvertes de cette époque sont nombreuses et couvrent bien des domaines. Le XIXe siècle a donné lieu à de nombreuses découvertes scientifiques et techniques. C'est peut-être toute cette activité qui a poussé le Pasteur Robert Stirling à inventer le " moteur à air chaud " dont le brevet fut déposé en 1816. Robert Stirling est né en 1790 à Glogag dans le comté de Perthshire. Il était un pasteur, mécanicien et métallurgiste écossais.

Robert Stirling décida de construire un moteur sans chaudière, car à l'époque les accidents avec les machines à vapeur étaient fréquents. Il s'est avéré que son moteur était moins dangereux et surtout plus performant que les moteurs de l'époque. Historiquement, ce moteur fut construit avant que les lois relatives au second principe de la thermodynamique n'aient été formulées (avant le cycle de Carnot). Toutefois le moteur n'eut pas le succès espéré, car le moteur à explosion fit son apparition et s'imposa largement, et la découverte de Stirling fut

oubliée. Il fallut attendre 1938 pour que la société Philips investisse dans le projet, qui prit ensuite le nom de : « moteur de Stirling » ; à cette époque une application majeure fut développée dans l'automobile avec un moteur de 200 chevaux et un rendement supérieur à 30 % vit le jour.

En parallèle, Robert Stirling eu l'idée d'un régénérateur de chaleur permettant d'améliorer le rendement global de l'installation. C'est son frère James qui industrialisa ce moteur en 1843 pour une utilisation dans l'usine où il était ingénieur.

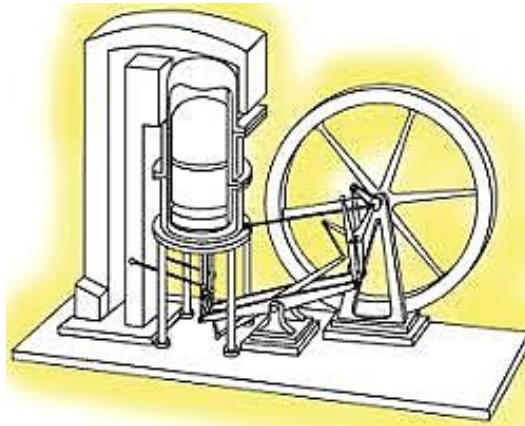


Figure I.2 Schéma de la machine de Stirling.[2]

Cette invention fut beaucoup utilisée dans les fermes et les industries jusqu'en 1922, par exemple pour pomper de l'eau ou entraîner des machines. Mais, dès le début du XXe siècle, ce moteur eut beaucoup de mal à s'imposer face à la concurrence nouvelle des moteurs à combustion interne et des moteurs électriques. Durant la seconde moitié du XXe siècle, différents moteurs, fortement pressurisés, et utilisant soit de l'hélium, soit de l'hydrogène, ont été conçus et réalisés.

Certains de ces moteurs ont des rendements globaux remarquables, en comparaison des moteurs à combustion interne de puissance comparable. Pour différentes raisons qu'il n'est pas opportun de développer ici, les moteurs Stirling ne connaissent pas encore d'industrialisation à grande échelle à l'heure actuelle. Robert Stirling n'a pas la renommée qu'il mérite. Peut-être qu'avec les problèmes d'énergie et d'écologie, on assistera au développement de ce type de moteur et à la réparation de l'injustice subie par cet inventeur [2].

I.2.2 Présentation d'un moteur Stirling

Dans un moteur à combustion interne, l'ensemble « 1 piston et 2 soupapes » peut être considéré comme l'ensemble mécanique de base nécessaire pour produire du travail au travers d'un cycle à 4 temps réalisé sur 2 rotations complètes de vilebrequin. L'équivalent de cet ensemble mécanique dans un moteur Stirling est « 2 pistons » et éventuellement un régénérateur. Il n'y a pas de soupape, donc le moteur possède une architecture plus simple. Cet ensemble fonctionne sur un cycle comportant également 4 temps mais réalisés sur une seule rotation de vilebrequin. Les éléments mécaniques du Stirling ainsi que les volumes gazeux sont représentés sur les figures (1.3) [3].

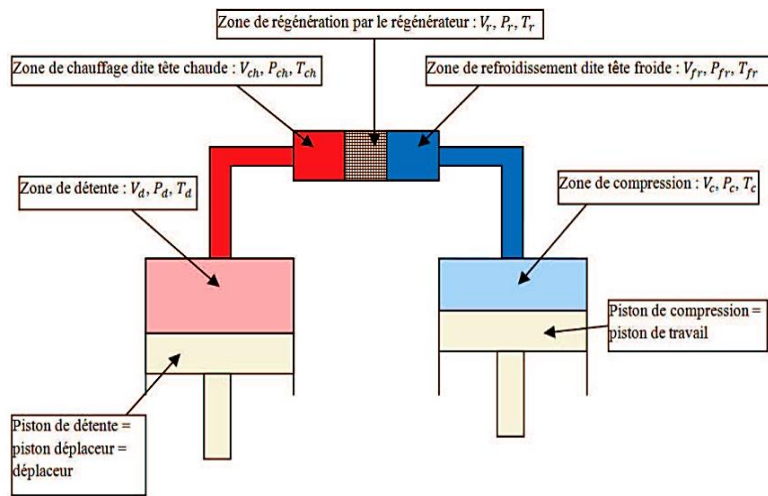


Figure I.3 Identification des éléments d'un Stirling.[3]

I.2.3 Principe de fonctionnement Un moteur Stirling est un mécanisme qui fonctionne selon un cycle thermodynamique fermé et régénératif. Malgré ces deux particularités il permet, comme toute mach thermique, de convertir l'énergie calorifique en énergie mécanique [4].

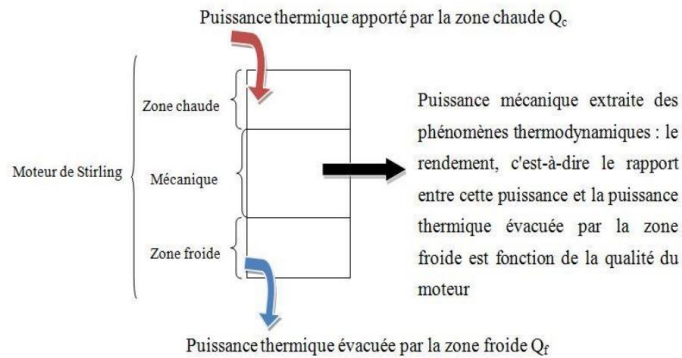


Figure I.4 Principe général des machines thermiques.[4]

Le principe de fonctionnement du moteur Stirling est relativement simple : le fluide de travail, qui produit un travail est un gaz (air, hydrogène ou hélium), est soumis à une modeste pression selon le cycle de Stirling à 4 temps, séparé par deux phases de déplacement : chauffage, détente, déplacement vers la source froide, refroidissement, compression, retour vers la source chaude. Le moteur Stirling est constitué d'un cylindre renfermant du gaz et d'un piston récupérant l'énergie mécanique et à l'intérieur du cylindre glisse un déplaceur. C'est un élément qui ne modifie ni la pression, ni le volume du gaz, mais l'oblige à migrer soit vers la source chaude soit vers la source froide. Le fluide de travail utilisé subit les diverses transformations tout en restant enfermé à l'intérieur du cylindre. En revanche la chaleur est fournie depuis l'extérieur du cylindre, d'où les appellations « Moteur à air chaud » ou « Moteur à combustion externe » que l'on peut dire parfois. La source chaude du moteur Stirling peut être alimentée par une source quelconque : combustion externe des dérivés du pétrole, du gaz naturel, du charbon, du bois, etc. Mais aussi les énergies renouvelables comme l'énergie solaire ou l'énergie géothermique :

Remarque : Le régénérateur est très souvent utilisé dans les moteurs Stirling : une barrière de paille de fer, ou autre milieu poreux, devant posséder une mauvaise conductivité thermique dans la direction axiale et jouer le rôle d'un réservoir thermique transitoire [5].

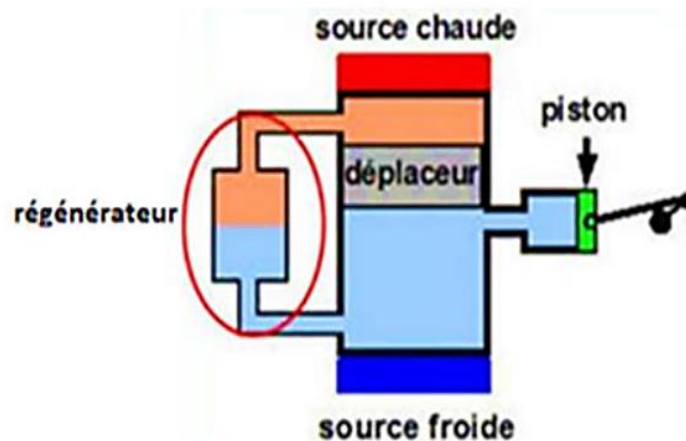


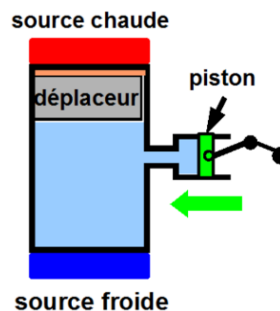
Figure I.5 Schéma simple du moteur Stirling avec un régénérateur.[5]

I. 2.4 Les quatre phases élémentaires

Le cycle thermodynamique du moteur Stirling est dans son principe très simple : il comprend 4 phases pendant lesquelles le gaz utilisé subit les transformations suivantes :

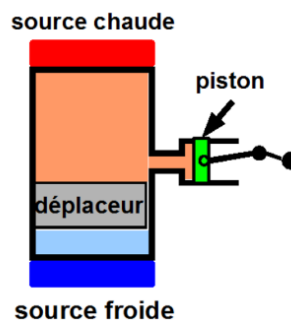
Étape 1 : compression isotherme

Le déplaceur est du côté de la source chaude : au point mort haut, il se déplace peu. Le piston se déplace en comprimant le gaz. Le gaz échange de la chaleur avec la source froide et la transformation est isotherme.



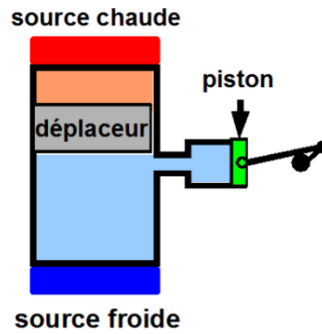
Étape 2 : réchauffement isochore du gaz

Le déplaceur se rapproche de la source froide, laissant le gaz en contact avec la source chaude. Celui-ci se réchauffe alors. Le piston est au voisinage du point mort haut et il se déplace peu, donc la transformation est isochore.



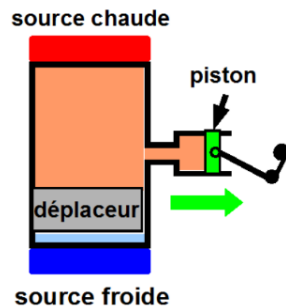
Étape 3 : détente isotherme

Le déplaceur est du côté de la source froide. Étant au point mort bas, il se déplace peu. Le gaz se détend et pousse le piston, fournissant un travail mécanique. Il continue également à recevoir de la chaleur de la source chaude pour que la transformation soit isotherme.



Étape 4 : refroidissement isochore

Le déplaceur se rapproche de la source chaude, permettant au gaz de se refroidir au contact de la source froide. Le piston est au voisinage du point mort bas et il se déplace peu : le volume est constant. [6].



Le mouvement de déplaceur se fait à un volume du gaz constant, ($V = Cte$). On peut résumer tout cela dans quatre phases pendant lesquelles le gaz utilisé subit les transformations suivantes [7].

- **Compression isotherme (étape 1-2)**

Le déplaceur est en position morte bas (PMB), le piston de travail descend de la position morte haut (PMH) à la PMB, la pression du gaz augmente au fur et à mesure que son volume diminue.

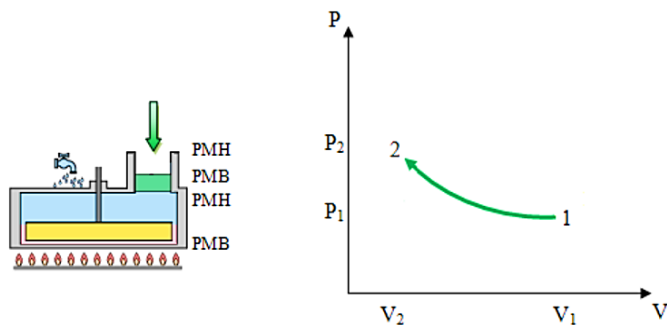


Figure I.6 Compression isotherme [étape 1-2]. [7]

• **Chauffage isochore (étape 2-3)**

Le piston de travail est en PMB, le déplaceur remonte de la PMB à la PMH et porte l'air de la partie froide à la partie chaude, le gaz de travail récupère de l'énergie thermique accumulée précédemment. Par conséquent, la pression et la température de l'air augmentent durant cette phase.

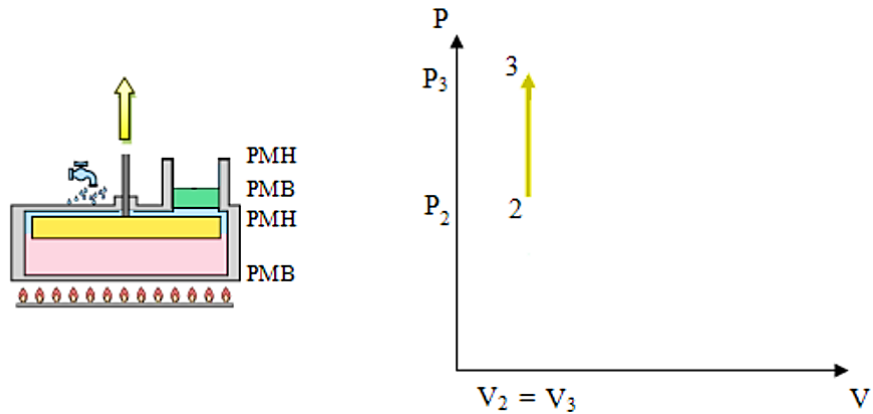


Figure I.7 Chauffage isochore [étape 2-3].[7]

• **Détente isotherme (étape 3-4)**

Le déplaceur est en PMH, le piston remonte de la PMB à la PMH, le volume augmente alors que la pression diminue. C'est pendant cette transformation que l'énergie motrice est produite.

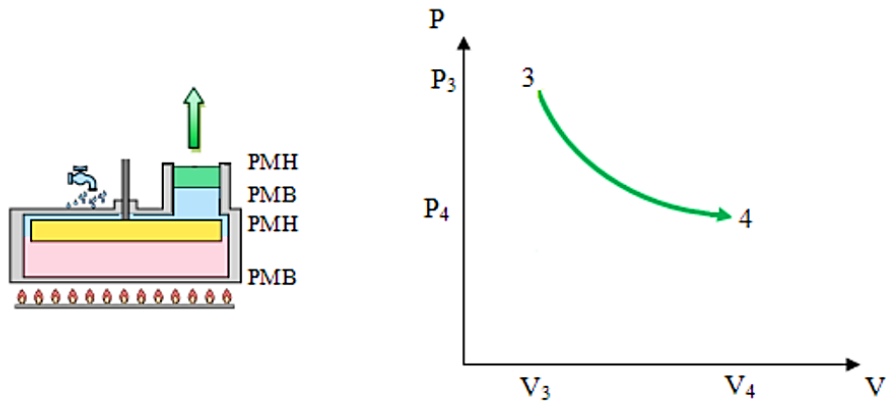


Figure I.8 Détente isotherme [étape 3-4].[7]

• Refroidissement isochore (étape 4-1)

Le piston de travail est en PMH, le déplaceur descend de la PMH à la PMB et déplace l'air de la partie chaude vers la partie froide, le gaz de travail cède de l'énergie thermique accumulée directement vers la source froide du moteur. La température et la pression diminuent pendant cette phase [7].

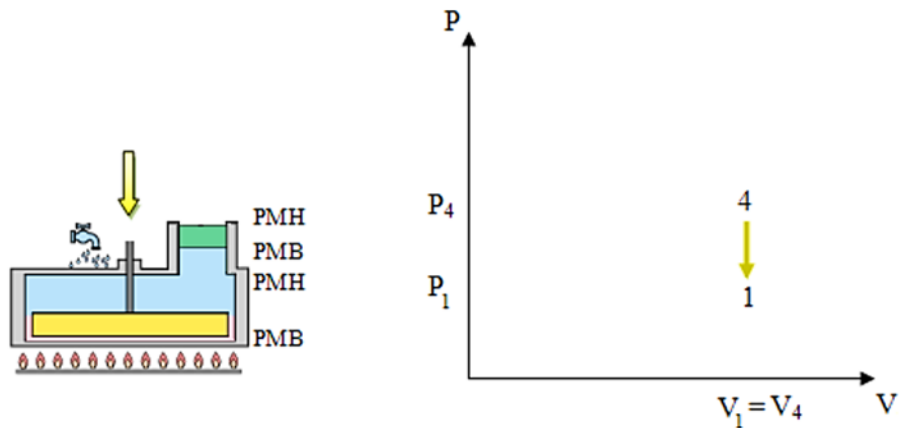


Figure I.9 Refroidissement isochore [étape 4-1].[7]

I.2.5 Cycles théorique de Stirling

Le cycle de Stirling est constitué de deux isothermes et de deux isochores effectuées de manières réversibles. Ce cycle est représenté sur le diagramme de Clapeyron[7].

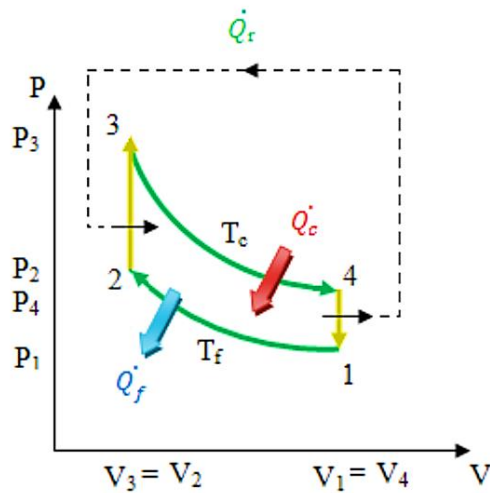


Figure I.10 Représentation de cycle théorique de Stirling sur le diagramme de Clapeyron.[7]

Les quantités de chaleur Q et les travaux W étant calculés par le premier principe de la thermodynamique (Equation I.1), en choisissant comme système le gaz contenu dans le moteur (En supposant le gaz parfait).

$$\delta Q + \delta W = dU \quad (I.1)$$

Où :

$$dU = dmC_v dT \quad (I.2)$$

$$\delta W = -Pdv \quad (I.3)$$

Donc pour les transformations isothermes $dU = 0$, et pour les transformations isochores. Pour les différentes étapes du cycle, on peut établir :

$$\delta W = 0 \quad (I.4)$$

Compression isotherme [étape 1-2]

Le fluide de travail cède de la chaleur à la source froide, on doit fournir de l'énergie mécanique au gaz pendant cette période.

$$Q_{1 \rightarrow 2} = Q_f = nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (I.5)$$

$$W_{1 \rightarrow 2} = -Q_{1 \rightarrow 2} \quad (I.6)$$

Chauffage isochore [étape 2-3]

Le régénérateur interne à la machine cède de la chaleur au fluide de travail.

$$Q_{2 \rightarrow 3} = nC_v(T_c - T_f) \quad (I.7)$$

$$W_{2 \rightarrow 3} = 0 \quad (I.8)$$

Détente isotherme [étape 3-4]

Transfert de chaleur d'une source de chaleur extérieure vers le fluide de travail, le moteur produit le travail utile du cycle.

$$Q_{3 \rightarrow 4} = Q_c = nRT_c \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad I.9$$

$$W_{3 \rightarrow 4} = -Q_{3 \rightarrow 4} \quad \text{I.10}$$

Refroidissement isochore [étape 4-1]

Le fluide de travail cède de la chaleur au régénérateur interne à la machine.

$$Q_{4 \rightarrow 1} = nC_v (T_f - T_c) \quad \text{I.11}$$

$$W_{4 \rightarrow 1} = 0 \quad \text{I.12}$$

Remarque :

$Q_{2 \rightarrow 3} = -Q_{4 \rightarrow 1}$ L'énergie fournie par le gaz à la 4ème phase peut être stockée et restituée au gaz pendant la 2ème phase.

I.2.6 Cycles réel de Stirling

Comme le montre la Figure (I.11), Le cycle réel du moteur Stirling représenté par une ellipse contrairement au cycle théorique où les transformations sont parfaites et complètes (compression isotherme (1-2) à la température T_c , et la détente isotherme (3-4) à la température T_f). Les principales causes, de l'écart entre le cycle réel du cycle théorique, sont les suivantes [8] :

- ✓ Le transfert de chaleur limité.
- ✓ Régénérateur non parfait.
- ✓ Les transformations de compression et de détente ne sont pas isothermes.
- ✓ La synchronisation des pistons n'est pas parfaite. Le mouvement théorique du piston et du déplaceur est synchronisé où il présente des phases de mouvement et des phases de repos, alors que dans la pratique, le mouvement est plutôt continu [8].

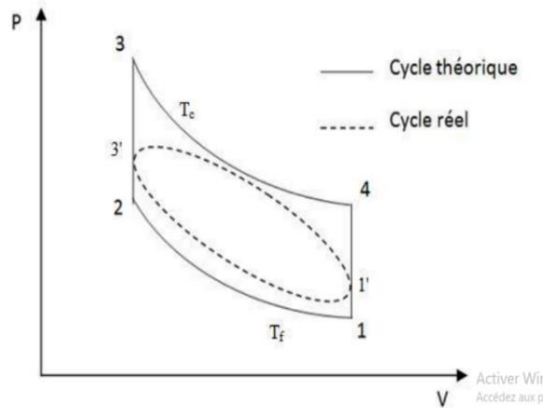


Figure I.11 Cycle théorique et cycle réel de Stirling.[7]

I.2.7 Types de moteur Stirling :

Il existe une très grande diversité de moteurs Stirling. On les classe généralement en fonction de leur configuration géométrique. Selon ce critère, il y a trois types principaux de moteur Stirling : le moteur alpha, le moteur bêta et le moteur gamma. [9]

I.2.7.1 Stirling alpha :

Le moteur bicylindre ou alpha (Figure I.12) est un moteur dans lequel un cylindre est associé à la source froide et un autre est associé à la source chaude. Le couplage cinématique des deux pistons permet au fluide de passer d'un cylindre à l'autre tout en traversant un récupérateur d'énergie (régénérateur) et de faire varier le volume selon les phases s'approchant de celles décrites dans le diagramme indicateur théorique de Stirling.

Ce type de moteur a un ratio puissance-volume très élevé, mais a des problèmes techniques, liés fréquemment aux températures trop élevées du piston chaud pour ses joints. [9]

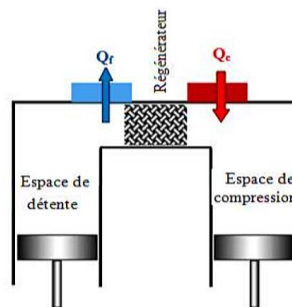


Figure I.12 Configuration du moteur Stirling Alpha [9]

1.2.7.2 Stirling bêta :

Le moteur bêta est un moteur monocylindre constitué de deux pistons :

- ✓ un piston de travail (gris foncé) utile pour la compression et la détente.
- ✓ un piston 'déplaceur' (gris clair) pour mettre successivement le gaz en contact avec la source froide puis la source chaude.[9]

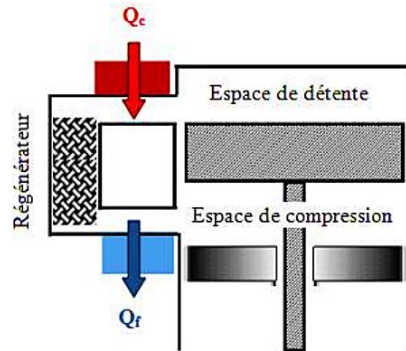


Figure I.13 Configuration du moteur Stirling Bêta [9]

1.2.7.3 Le moteur gamma

Enfin, le moteur que nous avons utilisé dans nos manipulations est le moteur de type gamma (figure I.14). Ce moteur ressemble beaucoup au type bêta car il a aussi un piston de travail et un piston déplaceur. La seule différence réside dans le fait que les deux pistons se meuvent dans des cylindres distincts. [10]

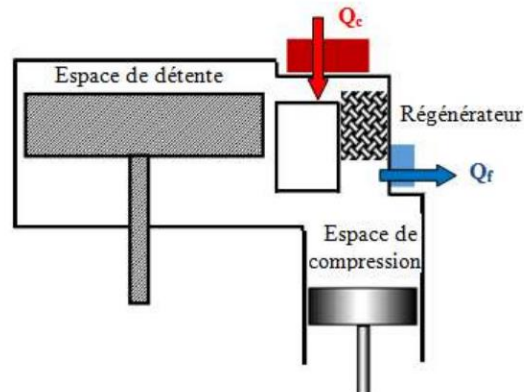


Figure I.14 Configuration du moteur Stirling Gamma [9]

I.2.8 Avantages et inconvénients :

I.2.8.1 Avantages

Plusieurs raisons nous poussent à choisir le moteur Stirling pour nos utilisations dont on note principalement :

- ✓ Le rendement élevé : Comme il est possible de le faire fonctionner en cogénération (puissances mécanique et calorique), le rendement global peut être très élevé.
- ✓ La multitude de sources chaudes : combustion de gaz divers, de bois, sciure, déchets, énergie solaire ou géothermique...
- ✓ Le silence de fonctionnement : il n'y a pas de détente à l'atmosphère comme dans le cas d'un moteur à combustion interne, la combustion est continue à l'extérieur des cylindres. De plus, sa conception est telle que le moteur est facile à équilibrer et engendre peu de vibrations.
- ✓ L'aptitude écologique : à répondre le mieux possible aux exigences environnementales en matière de pollution atmosphérique. Il est plus facile de réaliser dans ce type de moteur une combustion complète des carburants.
- ✓ La fiabilité et la maintenance aisée : la relative simplicité technologique permet d'avoir des moteurs d'une très grande fiabilité et nécessitant peu de maintenance.
- ✓ La durée de vie importante du fait de sa simplicité.[11]

I.2.8.2 Inconvénients

Pendant les années précédentes le moteur Stirling a été écarté de certaines applications et ceci pour plusieurs raisons dont les principales sont :

- ✓ Problème mécanique : Le mouvement théorique des pistons est irréalisable par un mécanisme bielle manivelle simple utilisé sur ce type de moteur.
- ✓ Problème thermique : le temps d'échange de chaleur entre la source chaude et le fluide de travail est très limité. En effet, le mécanisme utilisé n'assure pas le temps nécessaire d'échange entre le fluide de travail et les échangeurs de chaleur et encore une importante quantité de chaleur est rejetée à chaque cycle sans pouvoir la réutiliser convenablement.
- ✓ Les problèmes d'étanchéité sont difficiles à résoudre dès qu'on souhaite avoir des pressions de fonctionnement élevées. Le choix du gaz "idéal", à savoir l'hydrogène pour sa

légèreté et sa capacité à absorber les calories, se heurte à sa faculté de diffuser au travers des matériaux.

- ✓ Le prix : le frein à son développement est aujourd'hui probablement son coût, non encore compétitif par rapport aux autres moyens bien implantés. Une généralisation de son emploi devrait pallier ce problème inhérent à toute nouveauté [11].

I.2.9 Applications du moteur Stirling

I.2.9.1 La recherche et le monde universitaire

Le moteur Stirling fait l'objet d'études théoriques et de travaux pratiques afin de mieux connaître son fonctionnement, d'améliorer son rendement et augmenter sa compétitivité vis-à-vis d'autres sources d'énergie. Ces travaux permettront de modéliser le fonctionnement du moteur, c'est à dire mettre en équations les échanges de chaleur, les écoulements des fluides et simuler certaines configurations. [12]

I.2.9.2 Domaine spatial et les applications solaires

Certains satellites se procurent de l'énergie grâce à un moteur Stirling. Le rendement est particulièrement élevé vu les grandes différences de température disponibles. On utilise une parabole réfléchissante qui concentre les rayons du soleil en un seul point le foyer de la parabole où on installe le moteur Stirling.

I.2.9.3 Monde industriel avec la cryogénie

La réversibilité du moteur Stirling est utilisée afin de produire du froid de façon industrielle. Son rendement est alors excellent. Dans ce type de fonctionnement, on fournit de l'énergie mécanique au moteur. Le résultat est qu'on pompe de la chaleur à la source froide pour la restituer à la source chaude, comme un réfrigérateur domestique. Ce mode de fonctionnement est si efficace qu'on utilise ce type d'installation pour liquéfier des gaz.

I.2.9.4 Recherche et exploitation océanographique

Le SAGA (sous-marin d'assistance à grande autonomie) opérationnel au cours des années 1990, permettait de faire plus de 500 km de distance, de mener une campagne de 10 jours de travail par 300 m de fond. Il déplaçait plus de 500 tonnes en plongée et était muni de deux moteurs Stirling alimentés en fuel et oxygène liquide.

I.2.9.5 Utilisation domestique

De petites installations ont été développées afin de fonctionner en cogénération : fourniture d'électricité et chauffage d'habitations. On utilise le combustible de son choix pour faire sa propre électricité et chauffer sa maison. Si on est relié au réseau électrique, on peut vendre son courant quand on en produit trop (l'hiver), ou en acheter quand on n'en produit pas suffisamment (l'été).

I.3 Généralités sur les Nanofluides

I. 3.1 Définition des Nanofluides

Un nanofluide est une composition d'un fluide caloporteur mélangé avec des particules de taille nanométrique appelé nanoparticules, afin d'augmenter la conductivité thermique et le transfert de chaleur. [13]Le choix des liquides de bases est primordial pour un nanofluide, il permet d'assurer la stabilité de la suspension dans le temps et d'éviter tout phénomène d'agrégation, la sélection d'un tel fluide se fera en fonction de la nature de nanoparticule. On représente dans la figure I.1 une vue microscopique de quelques modèles de nanofluides

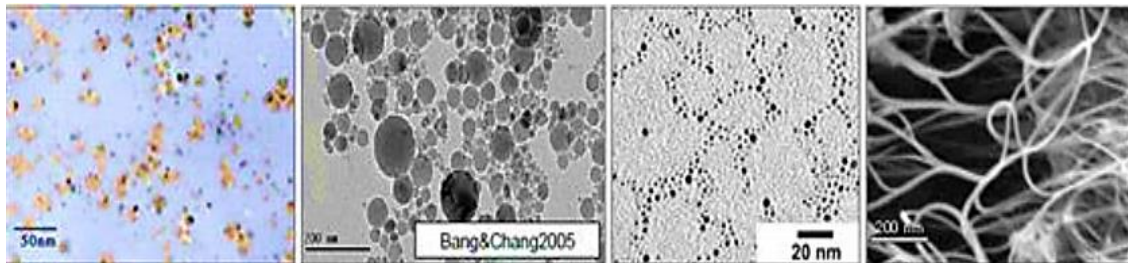


Figure I.15 Nanofluides, vus au microscope électronique. [13]

I.3.2 Les nanoparticules et les fluides porteurs

Une nanoparticule est un assemblage de quelques centaines à quelques milliers d'atomes, conduisant à un objet dont au moins l'une des dimensions est de taille nanométrique (1 à 100 nm). Les nanoparticules se situent à la frontière entre l'échelle microscopique et l'échelle atomique ou moléculaire. Elles ont un intérêt à la fois fondamental qu'appliqué et sont très étudiées de nos jours. D'une manière générale, les nanoparticules peuvent être classées selon leur forme en trois grandes catégories (Figure I.16) . Elles ont généralement

la forme sphérique et cylindrique, ou en forme de tube comme les nanotubes de carbone (NTC). [14].

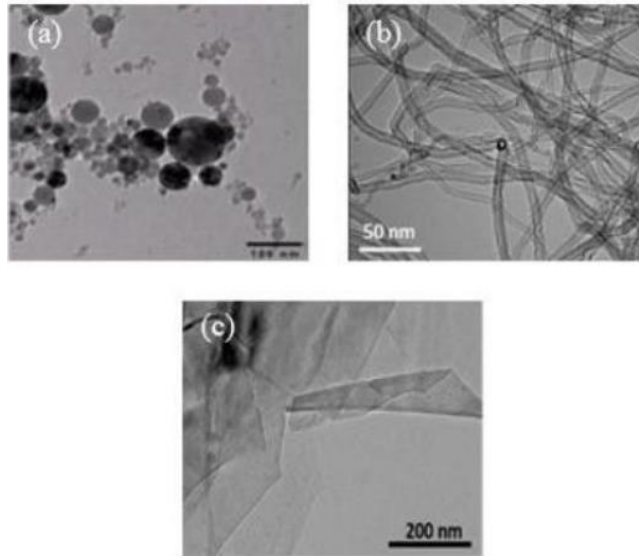


Figure I.16 Images TEM de quelques exemples de nanoparticules :

(a) Nanoparticules sphériques, (b) Nanotubes de carbone et (c) Nano feuilles. [14]

Les nanoparticules les plus utilisées sont classées dans trois grandes familles, à savoir :

Les nanoparticules d'oxydes métalliques

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

Les nanoparticules métalliques :

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

Les nanoparticules non métalliques :

1. *Les nanotubes de carbone (NTC).*
2. *Le diamant (C).*

Les liquides de base les plus utilisés sont :

1. L'eau.
2. L'éthylène glycol (EG).
3. Les huiles.
4. Les fluides frigorigènes (R12, R22, etc.)

I.3.4 Les avantages du nanofluides

Les nanofluides présentent plusieurs avantages par rapport aux fluides traditionnels. Voici quelques-uns des avantages des nanofluides : [15].

- ❖ **Conductivité thermique élevée :** Les nanofluides ont une conductivité thermique plus élevée que les fluides traditionnels, ce qui les rend plus efficaces pour le transfert de chaleur. Capacité de dissipation de chaleur élevée : Les nanofluides peuvent dissiper la chaleur plus efficacement que les fluides traditionnels, ce qui les rend utiles pour le refroidissement de composants électroniques et d'autres applications à haute température.
- ❖ **Augmentation de l'efficacité énergétique :** Les nanofluides peuvent être utilisés comme fluides de travail dans les centrales électriques pour augmenter l'efficacité des turbines et réduire la consommation d'énergie.
- ❖ **Meilleure lubrification :** Les nanofluides peuvent réduire la friction et l'usure des surfaces, ce qui les rend utiles comme lubrifiants pour les machines industrielles et les moteurs.
- ❖ **Amélioration de la dispersion des nanoparticules :** Les nanofluides peuvent améliorer la dispersion des nanoparticules dans les matériaux composites, ce qui améliore les propriétés mécaniques et thermiques des composites.
- ❖ **Réduction de la taille des équipements :** Les nanofluides permettent de concevoir des équipements plus compacts et plus efficaces, grâce à leur meilleure conductivité thermique et à leur meilleure capacité de dissipation de chaleur.
- ❖ **Meilleure stabilité :** Les nanofluides ont une meilleure stabilité que les fluides traditionnels, ce qui signifie qu'ils ne se dégradent pas aussi rapidement et qu'ils peuvent avoir une durée de vie plus longue.
- ❖ **Faible toxicité :** Les nanofluides peuvent être fabriqués à partir de matériaux non toxiques, ce qui les rend plus sûrs pour l'environnement et les êtres humains. En somme, les nanofluides présentent de nombreux avantages par rapport aux fluides

traditionnels, ce qui les rend utiles dans de nombreuses applications industrielles et technologiques.

I.3.5 Les inconvénients des nanofluides

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

- ❖ **Coût** : *Les nanofluides sont plus coûteux à produire que les fluides traditionnels en raison du coût des nanoparticules.*
- ❖ **Stabilité à long terme** : *Les nanofluides peuvent être instables à long terme en raison de la sédimentation des nanoparticules, ce qui peut réduire leur efficacité.*
- ❖ **Impact environnemental** : *Les nanoparticules utilisées dans les nanofluides peuvent avoir un impact environnemental s'ils sont libérés dans l'environnement. Il est donc important de prendre des mesures pour prévenir leur libération et pour les éliminer correctement leur durée de vie.*
- ❖ **Toxicité** : *Certaines nanoparticules utilisées dans les nanofluides peuvent être toxiques pour l'environnement et pour les êtres vivants, ce qui peut avoir des conséquences négatives pour la santé humaine et l'environnement.*
- ❖ **Effets inconnus sur la santé** : *Les effets à long terme de l'exposition aux nanoparticules ne sont pas encore complètement compris, ce qui peut poser des risques potentiels pour la santé humaine.*
- ❖ **Difficulté à la production en grande quantité** : *La production en grande quantité de nanofluides peut être difficile et coûteuse en raison de la complexité de la fabrication et de la nécessité d'un équipement spécialisé. Il est donc important de prendre en compte ces inconvénients lors de l'utilisation de nanofluides et de mettre en place des mesures pour minimiser leur impact négatif potentiel sur l'environnement et la santé humaine.*

I.3.6 Domaines d'applications des nanofluides

Les nanofluides peuvent être employés pour améliorer le transfert de chaleur et l'efficacité énergétique dans plusieurs systèmes thermiques, quelques exemples d'applications seront présentés. [16].

❖ Les systèmes thermiques

Le mélange d'éthylène-glycol et l'eau, sont utilisés comme liquide de refroidissement dans les moteurs des véhicules. L'addition des nanoparticules dans ces liquides ce dernier améliore le taux de refroidissement. Ce point est étudié par plusieurs groupes de chercheurs, Tzeng et al. ont dispersé les nanoparticules de CuO et Al₂O₃ dans l'huile de refroidissement du moteur de transmission. Dans une autre application, Zhang et al ont rapporté une étude pour réduire l'usure (lubrification) à l'aide des nanoparticules, et améliorer les propriétés tribologiques, et la résistance à l'usure avec la réduction du frottement entre les éléments mécaniques mobiles.

❖ Les systèmes électroniques

Dans les circuits intégrés, les nanofluides ont été considérés comme fluides de refroidissement. Pour cela plusieurs études ont été effectuées. Tsai et al. [69] ont employé un nanofluide à base d'eau pour refroidir une unité centrale de traitement dans un microordinateur. De leur côté, Ma et al. ont étudié l'effet du nanofluide sur les possibilités de transport de la chaleur d'un caloduc d'oscillation, ils ont prouvé qu'à la puissance d'entrée de 80 W, et seulement pour une concentration volumique de $\varphi = 1\%$, la différence de température entre le vaporisateur et le condensateur est de 16.6°C.

❖ Les systèmes militaires

Les exemples des applications militaires incluent le refroidissement de l'électronique de puissance et les armes d'énergie dirigée. Ces derniers impliquent des flux thermiques très élevés ($\varphi < 500$ à 1000 W/cm²), où les nanofluides ont montrés leur efficacité pour refroidir ces systèmes, et aussi les autres systèmes militaires, y compris les véhicules militaires, les sousmarins, et les diodes lasers à haute puissance.

❖ Les systèmes spatiaux

Pour les applications dans l'espace, You et Vassallo ont effectué des études pour montrer que la présence des nanoparticules dans le fluide de refroidissement en électronique générale joue un rôle très important dans les applications de l'espace où la densité de puissance est très élevée.

❖ Les systèmes nucléaires

L'institut de technologie de Massachusetts a réservé un centre interdisciplinaire uniquement pour la nouvelle nanotechnologie (nanofluide) dans l'industrie de l'énergie

nucléaire. Actuellement, ils évaluent l'impact potentiel de l'utilisation des nanofluides sur la sûreté neutronique, et de la performance économique des systèmes nucléaires.

❖ **La biomédecine**

Les nanofluides et les nanoparticules ont beaucoup d'applications en biomédicale. Par exemple, pour éviter quelques effets secondaires des méthodes traditionnelles de traitement du cancer, les nanoparticules à base de fer ont été employées comme transporteur des drogues. Aussi pour une chirurgie plus sûre en produisant le refroidissement efficace autour de la région chirurgicale, Jordan et al. ont effectué une étude où les nanofluides pourraient être employés pour produire une température plus élevée autour des tumeurs pour tuer les cellules cancéreuses sans affecter les cellules saines voisines.

I.3.7 Propriétés des nanofluides :

Les nano-fluides ont des propriétés physiques importantes, qui diffèrent selon les nanoparticules utilisées et le fluide de base. Ses caractéristiques sont [13]:

- ✓ La fraction volumique (φ).
- ✓ Conductivité thermique (λ).
- ✓ Viscosité dynamique (μ).
- ✓ La masse volumique (ρ).
- ✓ La chaleur massique (C_p)

❖ **La fraction volumique (φ) :**

La fraction volumique est la propriété la plus important pour le nanofluide puisque les calculs des tous les autres propriétés se basés sur la fraction volumique du

nanofluide. Et on peut défini la fraction volumique comme le volume de solide ou particule (nanoparticules) sur le volume total (nanoparticules+fluide de base). La fraction volumique est donnée par la relation suivante :

$$\varphi = \frac{V_s}{V_T} \quad I.13$$

V_s : Volume de solide (nanoparticules)

V_T : Volume totale

❖ **Conductivité thermique (λ) :**

La conductivité thermique est une propriété très importante. Que joue un rôle important dans le transfert de chaleur. La conductivité thermique est calculée selon deux méthodes suivantes :

➤ **Le modèle de Maxwell :**

Est probablement le plus largement utilisé dans la littérature. Ce modèle de base suppose que les particules sont sphériques, de dimensions millimétriques ou microscopiques et sont dispersées en faible concentration dans une matrice continue. [13]

$$\lambda_{nf} = \frac{\lambda_s + 2\lambda_f + 2(\lambda_s - \lambda_f)\varphi}{\lambda_s + \lambda_f - (\lambda_s - \lambda_f)\varphi} \lambda_f \quad \text{I.14}$$

λ_{nf} : La conductivité thermique du nano fluide.

λ_f : La conductivité thermique du fluide de base.

λ_s : La conductivité thermique des particules solides.

➤ **Modèle de Hamilton-Crosser**

Le modèle de Hamilton-Crosser (1962) est une extension du modèle de Maxwell, qui tient compte de la forme des particules. En effet, pour prendre en compte la non-sphéricité des particules. La conductivité thermique est donnée par la relation suivante[13] :

$$\lambda_{nf} = \frac{\lambda_s + (n-1)\lambda_f + (n-1)(\lambda_s - \lambda_f)\varphi}{\lambda_s + (n-1)\lambda_f - (\lambda_s - \lambda_f)\varphi} \lambda_f \quad \text{I.15}$$

n: est un facteur de forme empirique donnée par : $\frac{3}{\psi}$

n = 3 pour les particules sphériques.

n = 6 : pour les particules cylindriques.

❖ **Viscosité dynamique (μ) :**

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

La viscosité obtenue devient la viscosité dynamique du nanofluide qui peut être influencé énormément par la qualité de la dispersion de la nanoparticule dans le fluide de base et de la température, cette viscosité dynamique peut être calculée à partir de la viscosité dynamique du fluide de base et la fraction volumique du nanofluide, Pour ce qui suit nous allons citer deux modèles pour le calcul des viscosités apparentes [13]:

✓ **Modèle d'Einstein (1906) :**

La viscosité dynamique d'un nano fluide est donnée par Einstein (1906) pour un mélange contenant des suspensions diluées de particules fines sphériques et rigides est la suivante[13] :

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 + 2.5\varphi) \quad \text{I.16}$$

μ_{nf} : La viscosité dynamique du nano fluide

μ_f : La viscosité dynamique du fluide de base.

φ : La fraction volumique des nanoparticules. Cette relation est valable juste pour $\varphi = 0.03$.

✓ **Modèle de Brinkman :**

La viscosité dynamique d'un nano fluide est donnée par Brinkman (1952)[13]

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad \text{I.17}$$

❖ **La masse volumique :**

La masse volumique des nano fluides est proportionnelle à la fraction volumique en particules et augmente avec l'ajout des nanoparticules. Sont souvent calculés à partir de la loi du mélange[13].

La masse volumique de mélange.

$$\rho_{nf} = \frac{m_{nf}}{v_{nf}} = \frac{m_f+m_s}{v_f+v_s} = \frac{\rho_f v_f + \rho_s v_s}{v_f+v_s} \quad \text{I.18}$$

La masse volumique d'un nano-fluide pour une température de référence donnée calculé par :

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_s \quad \text{I.19}$$

ρ_{nf} : La masse volumique du nano fluide.

ρ_f : La masse volumique du fluide de base.

ρ_s : La masse volumique des nanoparticules.

❖ La chaleur spécifique (Cp) :

La chaleur spécifique ou la capacité thermique massique, notée Cp (J/kg.K), est définie par la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un degré Kelvin la température de l'unité de masse d'une substance

Pour la détermination de la chaleur spécifique d'un nano fluide, il y a deux modèles [13]:

➤ *Modèle du Pak et Cho :*

Pak et Cho (1998) ont utilisé la formule suivante[13] :

$$Cp_{nf} = (1 - \varphi)(\rho Cp_f) + \varphi (\rho Cp_s) \quad I.20$$

➤ *Modèle du Xuan et Roetzel :*

Xuan et Roetzel (2000) ont utilisé la formule suivante [13]:

$$\rho Cp_{nf} = (1 - \varphi)(\rho Cp_f) + \varphi(\rho Cp_s) \quad I.21$$

Cp_{nf} : La chaleur spécifique du nano fluide.

Cp_f : La chaleur spécifique du fluide de base.

Cp_s : La chaleur spécifique des nanoparticules.

I.4 Le Transfer de chaleur

Cela correspond à un transfert d'énergie macroscopique désordonnée. Les trois modes de transfert thermique fondamentaux sont la conduction, la convection et le rayonnement. Il est possible d'avoir un transfert thermique par plus d'un mode. De façon spontanée, la direction du transfert thermique se fait depuis la région de plus haute température vers celle de plus faible température. Le transfert thermique s'arrête quand il y a équilibre thermique

I.4.1 Conduction

La conduction est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur entre deux milieux en contact physique. Dans la plupart des cas on étudie la conduction dans les milieux solides, puisque dans les milieux fluides (c'est-à-dire liquide ou gazeux), la conductivité thermique est faible. La conduction thermique peut être décrite mathématiquement

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

$$Q = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad I.22$$

Avec

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

λ : Conductivité thermique du milieu (W/m.K) .

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m²).

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

I.4.2 Convection

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et de mouvement de milieu, elle est considérée comme le mécanisme le plus important de transport de l'énergie entre une surface solide et un liquide ou gaz. Le transport d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacent. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température est l'énergie interne de ces molécules du fluide. Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules et transférer une partie de leur énergie. La puissance transférée par convection est donnée par la relation :

$$\Phi = h.S (TS-Ta) \quad I.23$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par convection (W)

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W m⁻² °C⁻¹)

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

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

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

La transmission de chaleur par convection est désignée selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre (naturelle), convection forcée et convection mixte.

- **Convection naturelle** La convection naturelle dans laquelle le mouvement du fluide est produit par les différences de densité entre les particules chaudes et celles froides existant dans un fluide, situées dans un champ de forces massiques. Cette différence de densité, qui est la plupart du temps provoquée par une différence de température. Elle crée avec la force de gravité une force de flottabilité, qui par conséquent génère une différence de quantité de mouvement.
- **Convection forcée** En convection forcée le mouvement du fluide est provoqué par l'action des forces extérieures (par exemple pompe, ventilateur...etc.), qui lui imprime des vitesses de déplacement assez importantes. En conséquence, l'intensité du transfert thermique par convection forcée sera en liaison directe avec le régime de mouvement du fluide.
- **Convection mixte** Elle correspond au couplage des deux phénomènes précédents (convection naturelle et forcé) quand les vitesses d'écoulement fictives dues aux deux types de convection sont, considérées séparément sont du même ordre de grandeur. Quel que soit le type de convection considéré, on distingue deux régimes d'écoulement : laminaire et turbulent.

I.5 Revue Bibliographique

Différents travaux numériques et expérimentaux que nous allons exposer dans la section revue bibliographique ont été réalisés sur le moteur stirling et la convection naturelle et mixte dans des cavités confinées afin d'étudier l'effet de certains paramètres sur le transfert de chaleur et l'écoulement des nanofluides.

R. Zarrit, M. S. Boumaza Et B. Belfarhi Et A. Laouar (1955) ont étudié numériquement le transfert de chaleur par convection naturelle instationnaire et laminaire dans une enceinte fermée. Les deux parois planes parallèles en regard étant différentiellement chauffées par une

température uniforme et constante, tandis que les deux autres parois sont adiabatiques. Les parois actives (chauffées) sont parallèles avec l'axe des Y, les parois passives (adiabatiques) sont dans la direction de l'axe X. La figure (I.17) illustre la configuration géométrique étudiée.[19]

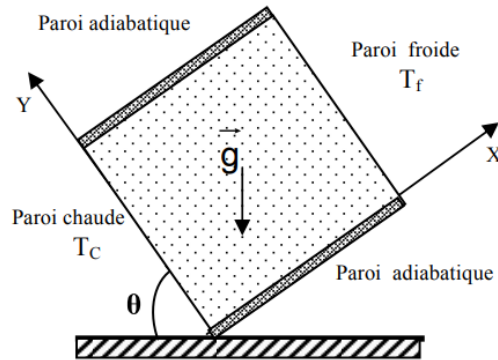


Figure I.17 la configuration géométrique[19]

Les résultats montrent que il y a trois régimes d'écoulements selon le nombre de Rayleigh : Pour les nombres de Rayleigh $Ra > 10^5$, le régime convectif correspondant à la convection (dite de couche limite). Le second régime d'écoulement est conductif. C'est le caractère dominant pour les faibles nombres de Rayleigh $Ra < 10^4$. Alors que pour $10^4 < Ra < 10^5$, le troisième régime est dit transitoire. Les deux régimes convectif et conductif sont responsables du transfert de la chaleur dans la cavité.

Ghasemi et al. (2009) ont numériquement investigué le transfert de chaleur par convection naturelle dans une cavité carrée inclinée remplie du nanofluide CuO-eau. Deux parois opposées de la cavité sont adiabatiques et les deux autres sont maintenues à des températures différentes Figure (I.118).[20]

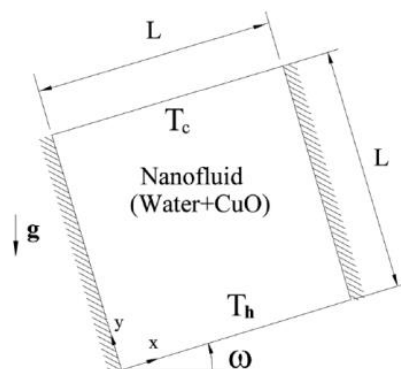


Figure I.18 schéma de la cavité (Ghasemi et al. 2009)[20]

Les résultats indiquent que l'ajout des nanoparticules à l'eau pure améliore ses performances de transfert de chaleur, aussi, il y'a une fraction volumique optimale qui maximise le taux de transfert de chaleur. En outre, l'angle d'inclinaison a un impact significatif sur les champs d'écoulement et de température et les performances de transfert de chaleur pour des nombres de Rayleigh élevés. En effet, le taux de transfert de chaleur est maximisé pour une inclinaison spécifique en fonction du nombre de Rayleigh et de la fraction volumique.

Lin et Violi (2010) ont analysé le transfert de chaleur par convection naturelle et l'écoulement du fluide à température variable dans une cavité remplie du nanofluide Al₂O₃-eau et qui opère sous des parois différentiellement chauffées (voir figure I.19). [21]

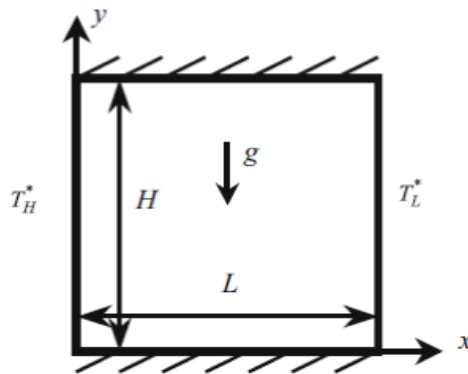


Figure I.19 représentation de la cavité (Lin et Violi, 2010)[21]

Les équations de Navier–Stokes et l'équation d'énergie sont résolues en couplant le modèle de Xu et al(2006) pour le calcul de la conductivité thermique et celui de Jang et al(2007) pour déterminer la viscosité dynamique des nanofluides. Le transfert de chaleur est examiné pour les paramètres pertinents suivants : la taille non uniforme des nanoparticules, leur diamètre moyen, leur fraction volumique et les nombres de Prandtl et de Grashof .

Les résultats montrent que les caractéristiques de transfert thermique du nanofluide peuvent être améliorées lorsque le diamètre des nanoparticules est baissé de 250 à 5 nm. Ils ont attribué ce phénomène à l'effet du mouvement Brownien dominant causé par le transfert de chaleur par convection. Cependant la performance en transfert thermique du nanofluide est moins

significative lorsque la conductivité du nanofluide est proche de 1 et ceci est dû à l'augmentation de la taille des nanoparticules. Cet effet contradictoire des nanofluides est principalement causé par la viscosité dynamique effective.

Abu Nada et al. (2011) ont étudié numériquement l'écoulement et le transfert de chaleur dus à la convection naturelle du nanofluide Al₂O₃-eau dans des cavités ondulées (voir figure I.20). [22]

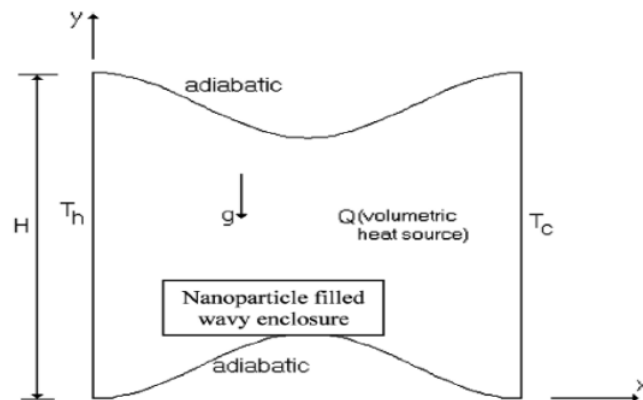


Figure I.20 Représentation de la cavité ondulée[22]

Pour un nombre de Rayleigh ($10^3 \leq Ra \leq 10^5$), différentes amplitudes de la paroi ondulée ($0.85 \leq a \leq 1$) et pour les fractions volumiques ($\phi = 0.05$ et 0.1). Les résultats montrent que le paramètre géométrique est un paramètre de contrôle très important, l'augmenter revient à augmenter le transfert de chaleur pour un nombre de Rayleigh et une fraction volumique fixe. Ils ont conclu aussi qu'augmenter le nombre de Rayleigh, augmente d'une manière significative le nombre de Nusselt moyen. Et dans tous les cas le transfert de chaleur croît lors de l'addition des nanoparticules.

Amira TRODI, Mohammed EL Hocine BENHAMZA (2015). Ont étudié numériquement la convection naturelle d'un nanofluide de nanoparticule de cuivre dans une cavité munie d'un bloc froid et les parois latérales sont différentiellement chauffées. La paroi inférieure et supérieure est adiabatique. Les parois latérales seront supposées isothermes à des températures différentes l'une chaude et l'autre froide. (Figure I.21) [23]

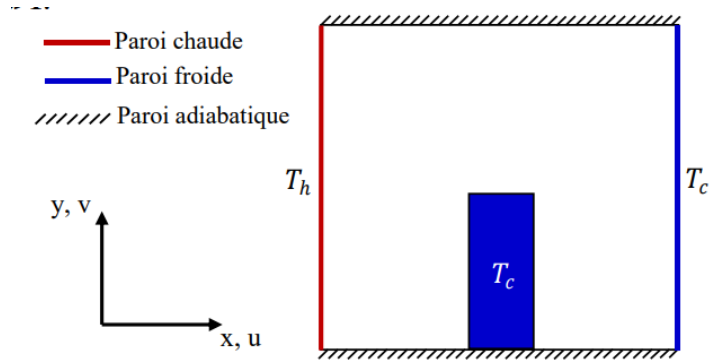


Figure I.21 Configuration géométrique et conditions aux limites[23]

Les résultats indiquent que l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules, le nombre de Rayleigh et la hauteur du bloc augmente le transfert de chaleur. En outre, La hauteur de bloc a une influence sur le transfert thermique du système. En Général l'ajoute d'un bloc a pour objectif de perturber l'écoulement d'origine par rapport à son trajet de référence (sans bloc) engendrait ainsi une modification de la structure de l'écoulement et un changement quantitatif en termes de transfert de chaleur.

A. Bouhelal , S. Lebbihi , N. Benrachi , A. Smaili(2016) Ont effectué une étude numérique La convection naturelle dans une enceinte carrée partiellement chauffée par le bas et remplie de nanofluide (eau-cuivre). Les parois supérieures et verticales de l'enceinte sont maintenues à une température relativement basse. (Figure I.22) [24]

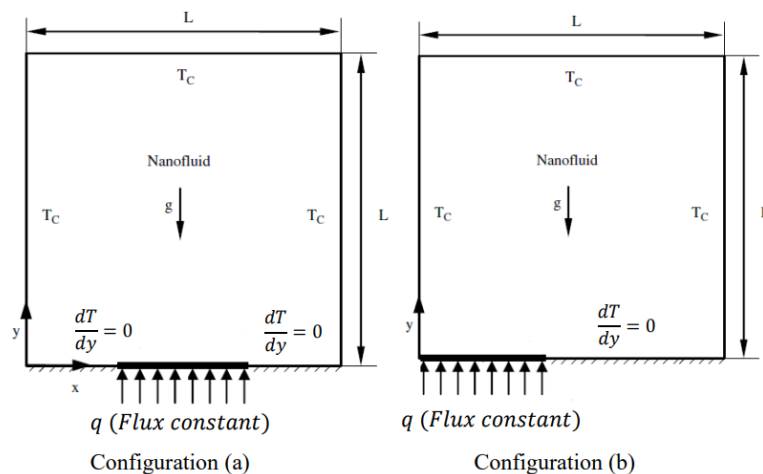


Figure I.22 Description géométrique du problème, (a) source localisée au milieu, (b) source circonscrite à gauche.[24]

Les résultats indiquent que l'ajout de nanoparticules dans l'eau pure améliore ses performances de refroidissement en particulier pour les faibles nombres de Rayleigh. L'augmentation du nombre de Rayleigh renforce les écoulements de convection naturelle qui se traduit par l'augmentation de la température de la source de chaleur. L'écart le plus grand de la réduction de la température maximale de la source de chaleur entre le fluide de base et le nanofluide est obtenu pour les faibles nombres de Rayleigh.

S.-E. OUYAHIAa , Y.K. BENKAHLAa , W. BERABOUa,b, M. BENZEMAa , A. BOU-DIAFa (2017) ont étudié numériquement portant sur la convection naturelle au sein d'une enceinte triangulaire abritant une source de chaleur chaude et remplie d'un nanofluide, TiO₂-eau. Les parois inclinées de la cavité sont froides tandis que la base est isolée thermiquement D'autre part, la cavité est munie d'une source de chaleur isotherme chaude Figure (I.23). [25]

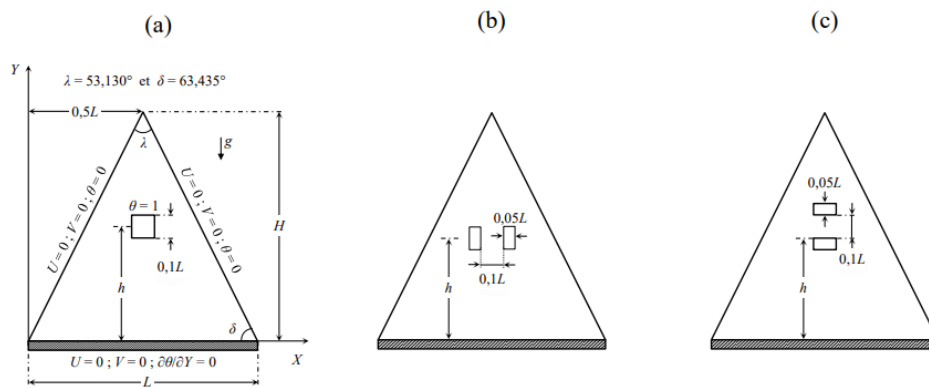


Figure I.23 Schéma du problème physique avec les conditions aux limites. [25]

Les équations aux dérivées partielles couplées régissant le problème considéré dans cette étude sont discrétisées par le biais de la technique des volumes finis. Les résultats de cette étude numérique, montrent que : L'augmentation du nombre de Rayleigh intensifie les champs de vitesse et de température, induisant ainsi un passage d'un mode de conduction en un mode de convection. En outre, L'ajout de nanoparticules affaiblit l'écoulement alors qu'il améliore le transfert thermique en particulier, pour les faibles valeurs du nombre de Rayleigh. Enfin, Le fractionnement de la source de chaleur suscite une augmentation du nombre de Nusselt moyen de la cavité en particulier, lors d'un fractionnement vertical (Cas 1).

L.Eljamali , M.Zaydan , R.Shaqui (2017) ont étudié numériquement l'effet de la fraction volumique dans une cavité carrée inclinée remplie de nanofluide. Le nanofluide utilisé est l'eau de cuivre avec $Pr = 6.2$ et la fraction en volume solide ϕ varie comme 0%, 5%, 10%, 15% et 20%. Le problème étudié est un transfert de chaleur bidimensionnel dans une cavité carrée. La paroi gauche est froide et la paroi droite est chaude. Les autres parois sont maintenues adiabatiques (Figure I.24) [26]

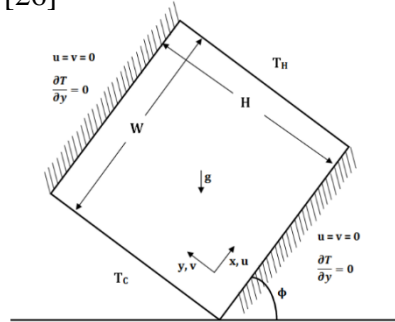


Figure I.24 La géométrie du problème et le système de coordonnées.[26]

Les résultats ont clairement indiqué que l'ajout de nanoparticules de cuivre a produit une amélioration remarquable du transfert de chaleur par rapport à ceux du fluide pur. Le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation du nombre de Rayleigh quasi linéaire, mais l'effet de la concentration des nanoparticules sur le nombre de Nusselt est plus prononcée au nombre de Rayleigh faible qu'au nombre de Rayleigh élevé. L'angle d'inclinaison de l'enceinte est considéré comme un paramètre de commande d'écoulement de fluide et du transfert de chaleur.

S. Bekhadra , Dj. Bellakhal and M. Bekhadra (2020) ont effectué une étude numérique sur le problème de la convection naturelle du nano-fluide (Cu-Eau) à l'intérieur de la cavité carrée partiellement chauffée contenant un corps adiabatique (voir figure I.25).[27]

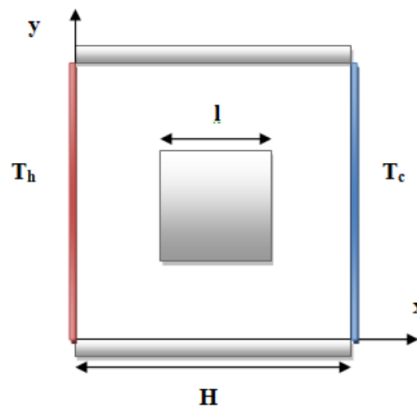


Figure I.25 Schématisation du problème.[27]

Les résultats de cette étude numérique, montrent l'influence du nombre de Rayleigh, la fraction volumique des nanoparticules de Cu sur l'écoulement du fluide, la température, le taux de transfert de chaleur, qui sont:

- ✓ Pour toutes les fractions volumiques des nanoparticules ($\varphi = 0\%$, $\varphi = 0.05\%$, $\varphi = 0.1\%$, $\varphi = 0.2\%$), le taux du transfert de chaleur croît par l'augmentation du nombre de Rayleigh.
 - ✓ À $Ra = 10^3, 10^4, 10^5$ et 10^6 , lorsque le nombre de Rayleigh est maintenu constant, Le nombre de Nusselt moyen augmente par l'accroissement de la fraction volumique des nanoparticules.
 - ✓ À toutes nombre de Rayleigh, pour une fraction volumique constante, le taux de transfert thermique grossit lorsque le nombre de Rayleigh augmente.
- Enfin, la combinaison entre le nombre de Rayleigh et la fraction volumique, permet d'améliorer l'efficacité de transfert de chaleur.

El Alami SEMMA , Abdelkhalek CHEDDADI , Antonio CAMPO , Hassan RIDOUANE ont étudié la convection naturelle dans une cavité triangulaire semi poreuse (Figure I.26). [28]

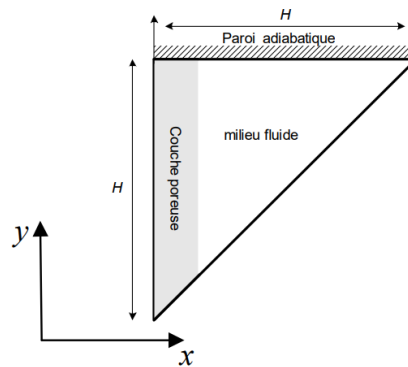


Figure I.26 Configuration géométrique[28]

Les résultats montrent une forte dépendance du transfert thermique à travers les parois isothermes en fonction de la perméabilité du milieu poreux. De même, les faibles épaisseurs de la couche poreuse affectent fortement le mode d'écoulement et le transfert thermique à l'intérieur de la cavité.

Nadia MARTAJ , Pierre ROCHELLE, Lavinia GROSU , Rachid BENNACER , Stéphane SAVARESE ont étudié numériquement un moteur Stirling (LTD) avec un déplaceur régénérateur poreux. Est présenté. Les équations régissant le transfert thermique par conduction et convection, la dynamique des écoulements compressibles, Le moteur est composé de 3 espaces (chaud, froid et régénération). La configuration cylindrique étudiée (Figure I.27) est axisymétrique 2-D. Une tige de faible diamètre, non figurée, actionne le piston déplaceur. [29]

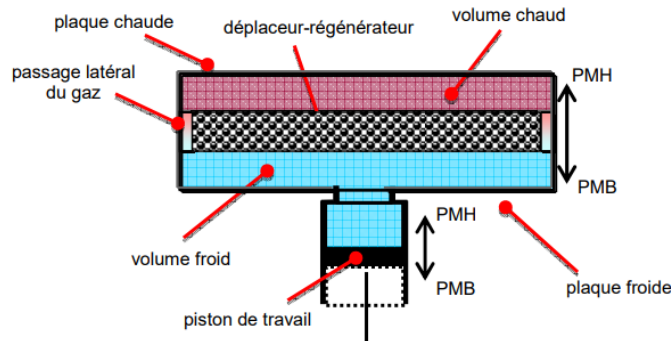


Figure I.27 Schéma de la modélisation numérique 2-D du moteur Stirling[29]

Cette étude confirme l'intérêt de la régénération pour les moteurs Stirling. Elle montre qu'avec un déplaceur poreux faisant office de régénérateur, on peut assez simplement accroître (ici, quasiment doubler) les performances du moteur par rapport à celles du moteur expérimental sans régénérateur.

Saad Aldossarya , Anas Sakoutb , Mouhammad El Hassan(2020) Ont effectué l'amélioration du transfert de chaleur à l'aide d'écoulements de nanofluides Al_2O_3 -air , Dans cette étude, la dynamique des fluides numérique (CFD) est utilisée pour étudier le transfert de chaleur par convection naturelle d'écoulements laminaires.avec et sans suspension de nanoparticules d'alumine synthétique (Al_2O_3) dans l'air (fluide de base).

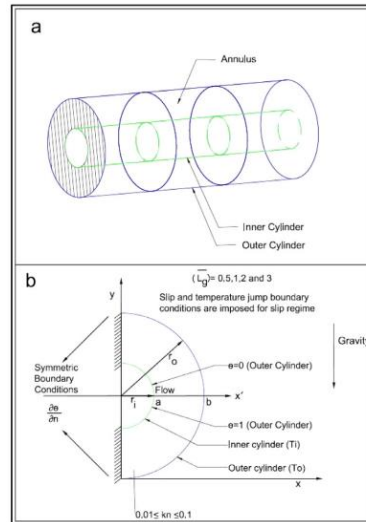


Figure I.28 Configuration géométrique[30]

Les résultats ont montré qu'une amélioration significative des taux de transfert de chaleur est obtenue en suspendant des nanoparticules d'alumine à 1 % de nanoparticules d'alumine. Une amélioration supplémentaire peut être obtenue en augmentant la valeur de ϕ mais avec une augmentation négligeable. Une augmentation du transfert de chaleur est obtenue avec $\phi > 4\%$ et la même conclusion est observée pour $Ra > 10^4$. Le transfert de chaleur (nombre de Nusselt moyen) augmente avec la diminution du nombre Kn pour les mêmes valeurs de AR et ϕ pour le nombre de Rayleigh modifié (RAM). [30]

I.6 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons d'abord fourni une description générale du moteur Stirling et des nanofluides. Ensuite, nous avons présenté les différents modèles des propriétés thermophysiques des nanofluides. Enfin, nous avons effectué une synthèse bibliographique, passant en revue les différentes études afin de mieux comprendre les caractéristiques de l'écoulement et le transfert de chaleur par convection naturelle.

Chapitre II
Formulation Mathématiques et
Méthodes Numérique

II.1 Introduction :

Chaque phénomène physique est souvent formulé par des équations mathématiques (équations différentielles) qui représentent une modélisation de ce phénomène. Une modélisation doit obligatoirement exprimer le comportement du phénomène dans l'espace et dans le temps. En mécanique des fluides, on suppose que le fluide est un milieu continu, ce qui permet d'utiliser les lois classiques de conservation à savoir [1] [2] :

1. Conservation de masse.
2. conservation quantité de mouvement.
3. Conservation d'énergie.

II.2 Description du problème :

Le modèle physique considéré est schématisé sur la figure(II.1) s'agit d'une cavité carrée rempli de nanofluides (Al_2O_3 /air) de dimension (L x H) de longueur caractéristique ,Les deux parois verticales sont froid T_f (froid) , la paroi horizontale supérieure est à une température T_c (chaude) et la paroi horizontale inférieure est adiabatique.

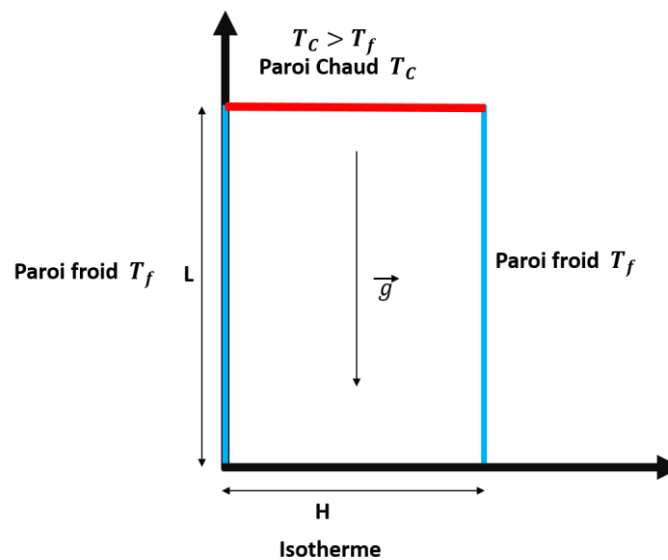


Figure II.1 Géométrie de la cavité carrée fermée.

II.3 Équations gouvernantes

La formulation mathématique des phénomènes de convection repose sur les équations liant les différents paramètres à savoir : la vitesse, la pression et la température. Ces équations sont les équations de continuité (la conservation de masse), de quantité de mouvement (Navier-stokes) et d'énergie (la conservation d'énergie). [3]

II.3.1 Equation de continuité :

C'est l'équation, qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante :

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

Où : ρ est la masse volumique et V est le vecteur de vitesse.

II.3.2 Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes)

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide et son mouvement et les causes qui le produisent. Donc, on peut indiquer que le taux de variation de la quantité de mouvement, contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures, qui lui sont appliquées. L'équation s'écrit sous la forme suivante :

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

Où : F est une force par unité de volume, p est la pression et μ la viscosité dynamique.

II.3.3 L'équation de l'énergie

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

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

Avec :

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

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

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

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

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

II.4 Les hypothèses simplificatrices :

Afin de simplifier notre problème, nous avons retenues quelques hypothèses simplificatrices qui sont les suivantes :

- ✓ L'écoulement est stationnaire et bidimensionnel.
- ✓ Le fluide est Newtonien et incompressible.
- ✓ L'écoulement engendré est laminaire.
- ✓ Le flux de la source de chaleur est constant dans le temps.
- ✓ Le transfert de chaleur par rayonnement est négligeable.
- ✓ La puissance volumique dissipée est négligeable.
- ✓ Le travail, induit par les forces visqueuses et de pression, est négligeable.
- ✓ La masse volumique du fluide varie linéairement avec la température. Cette variation est donnée par la relation :

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta (T - T_0)] \quad (II.4)$$

D'où : T : Représente la température du fluide en un point donné du système.

T_0 : La température de référence qui correspond généralement à la valeur moyenne de la température dans le système.

ρ_0 : La masse volumique du fluide à la température de référence.

β : Le coefficient d'expansion volumique thermique du fluide, il est donné par :

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (II.5)$$

On utilise une hypothèse simplificatrice connue par l'hypothèse de Boussinesq, qu'elle dit: « la masse volumique (ρ) du fluide est supposé constante dans les équations hydrodynamiques, sauf dans le terme générateur de la convection naturelle ($\rho.g$), ou ses variations induisent directement des forces de poussée d'Archimède. Toutes les autres caractéristiques thermo-physiques du fluide (la viscosité dynamique μ , la conductivité thermique k et la chaleur massique à pression constante C_p) sont considérées comme constantes et définies à la température de référence T_0 ».

II.5 Equations gouvernantes dimensionnelles :

En introduisant les hypothèses citées ci-dessus, on aboutit au système d'équations suivant :

II.5.1 Equation de continuité :

$$u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (II.6)$$

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

II.5.2 Equations de quantité de mouvement

Les équations de quantité de mouvement s'écrivent de la manière suivante :

Suivant x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (II.7)$$

Suivant y :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - g \beta (T - T_0) \quad (II.8)$$

II.5.3 Equations de l'énergie

L'équation de l'énergie est obtenue en appliquant le principe de la conservation de l'énergie dans la direction x et y comme suit :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (II.9)$$

$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_P}$: La diffusivité thermique.

Ces équations différentielles aux dérivées partielles forment le modèle mathématique de l'écoulement par convection naturelle laminaire de notre problème. [3][2][1]

II.6 Formulation adimensionnelle des équations du modèle mathématique :

II.6.1 Variables adimensionnelles

Pour adimensionnaliser les variables dépendantes et indépendantes, nous employons des quantités caractéristiques qui sont constantes dans tout le champ d'écoulement et de température. Ces quantités sont : L , V_0 , T_c , T_f , et P_0 .

Nous considérons des coordonnées cartésiennes et définissons les variables adimensionnelles suivantes :

➤ Variables réduites du problème

-Coordonnées adimensionnées : $X = \frac{x}{L}$; $Y = \frac{y}{L}$

-Vitesses adimensionnées : $U = \frac{u}{V_0}$; $V = \frac{v}{V_0}$

-Pression adimensionnée : $P = \frac{P-P_0}{\rho V^2}$

-Température adimensionnée : $\theta = \frac{T-T_f}{T_c-T_f}$

En portant les quantités adimensionnelles définies ci-dessus dans les équations du modèle mathématique (II.6), (II.7), (II.8) et (II.9), on obtient :

➤ Equation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial X} \left(\frac{V_0}{L} \right) \quad (\text{II.10})$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial X} \left(\frac{V_0}{L} \right) \quad (\text{II.11})$$

La substitution de (II.10), (II.11) dans (II.6) Donne :

$$\frac{\partial U}{\partial X} \left(\frac{V0}{L} \right) + \frac{\partial V}{\partial Y} \left(\frac{V0}{L} \right) = 0 \quad (\text{II.12})$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.13})$$

➤ **Equation de quantité de mouvement :**

Selon l'axe des abscisses x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial t} = V0 \frac{\partial u}{\partial \tau} \left(\frac{V0}{L} \right) = \left(\frac{V0^2}{L} \right) \frac{\partial u}{\partial \tau} \quad (\text{II.14})$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = V0 \times U \left(\frac{\partial u}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} \right) = V0 \times U \left(V0 \frac{\partial U}{\partial X} \frac{1}{L} \right) = U \frac{\partial U}{\partial X} \left(\frac{V0^2}{L} \right) \quad (\text{II.15})$$

$$u \frac{\partial u}{\partial y} = V0 \times U \left(\frac{\partial u}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial y} \right) = V0 \times V \left(V0 \frac{\partial U}{\partial Y} \frac{1}{L} \right) = U \frac{\partial U}{\partial Y} \left(\frac{V0^2}{L} \right) \quad (\text{II.16})$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(V0 \frac{\partial U}{\partial X} \frac{1}{L} \right) = \frac{V0}{L} \times \frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{\partial U}{\partial X} \right) \frac{\partial X}{\partial x} \left(\frac{V0}{L^2} \right) \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} \quad (\text{II.17})$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(V0 \frac{\partial U}{\partial Y} \frac{1}{L} \right) = \frac{V0}{L} \times \frac{\partial}{\partial Y} \left(\frac{\partial U}{\partial Y} \right) \frac{\partial Y}{\partial y} = \left(\frac{V0}{L^2} \right) \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \quad (\text{II.18})$$

La substitution de (II-14), (II-15), (II-16), (II-17) et (II-18) dans (II-7) donne :

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\vartheta}{V0L} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right)$$

Introduisant le nombre de Reynolds $Re = \frac{V0L}{\vartheta}$ nous obtenons :

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (\text{II.18})$$

L'équation de quantité de mouvement suivant y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial t} = V0 \frac{\partial v}{\partial \tau} \left(\frac{V0}{L} \right) = \frac{\partial v}{\partial \tau} \left(\frac{V0^2}{L} \right) \quad (\text{II.19})$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} = V0 \times U \left(\frac{\partial v}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} \right) = V0 \times U \left(V0 \frac{\partial V}{\partial X} \frac{1}{L} \right) = U \frac{\partial V}{\partial X} \left(\frac{V0^2}{L} \right) \quad (\text{II.20})$$

$$v \frac{\partial v}{\partial y} = V0 \times V \left(\frac{\partial v}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial y} \right) = V0 \times V \left(V0 \frac{\partial V}{\partial Y} \frac{1}{L} \right) = V \frac{\partial V}{\partial Y} \left(\frac{V0^2}{L} \right) \quad (\text{II.21})$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(V0 \frac{\partial V}{\partial X} \frac{1}{L} \right) = \frac{V0}{L} \times \frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{\partial V}{\partial X} \right) \frac{\partial X}{\partial x} = \left(\frac{V0}{L^2} \right) \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} \quad (\text{II.22})$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(V0 \frac{\partial V}{\partial Y} \frac{1}{L} \right) = \frac{V0}{L} \times \frac{\partial}{\partial Y} \left(\frac{\partial V}{\partial Y} \right) \frac{\partial Y}{\partial y} = \left(\frac{V0}{L^2} \right) \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \quad (\text{II.23})$$

La substitution de (II-19), (II-20), (II-21), (II-22) et (II-23) dans (II-8) donne :

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{v}{V0L} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{g\beta\Delta T}{V0^2} L\theta \quad (\text{II.24})$$

Introduisant les nombres de *Grashof* $Gr = (g.\beta.\Delta T.L^2)/\nu^2$ mesure le rapport des forces de gravité aux forces de viscosité agissant sur le fluide (il représente l'effet de buoyancy) et de Richardson $Ri = Gr/Re^2$ l'équation précédente s'écrit :

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + Ri\theta \quad (\text{II.25})$$

Forme adimensionnelle de l'équation d'énergie :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial t} \right) = \left(\Delta T \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \frac{V0}{L} \right) = \left(\frac{V0 \times \Delta T}{L} \right) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (\text{II.26})$$

$$u \frac{\partial T}{\partial X} = V0 \times U \left(\frac{\partial T}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} \right) = V0 \times U \left(\Delta T \frac{\partial \theta}{\partial X} \frac{1}{L} \right) = \left(\frac{V0 \times \Delta T}{L} \right) U \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (\text{II.27})$$

$$v \frac{\partial T}{\partial y} = V0 \times V \left(\frac{\partial T}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial y} \right) = V0 \times V \left(\Delta T \frac{\partial \theta}{\partial Y} \frac{1}{L} \right) = \left(\frac{V0 \times \Delta T}{L} \right) V \frac{\partial \theta}{\partial Y} \quad (\text{II.28})$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Delta T \frac{\partial \theta}{\partial X} \frac{1}{L} \right) = \frac{\Delta T}{L} \times \frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right) \frac{\partial X}{\partial x} = \left(\frac{\Delta T}{L^2} \right) \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} \quad (\text{II.29})$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\Delta T \frac{\partial \theta}{\partial Y} \frac{1}{L} \right) = \frac{\Delta T}{L} \times \frac{\partial}{\partial Y} \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \frac{\partial Y}{\partial y} = \left(\frac{\Delta T}{L^2} \right) \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad (\text{II.30})$$

Remplaçant par (II-26), (II-27), (II-28), (II-29) et (II-30) dans (II-9):

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha}{\nu_0 L} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (\text{II.31})$$

Prenant $Pr = \nu/\alpha$ on aura :

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Re Pr} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (\text{II.32})$$

II.7 Conditions aux limites adimensionnelles

Les conditions cinématiques et thermiques adimensionnelles relatives à notre domaine physique sont dressées dans la tableau (II.1) suivante :

Tableau II.1 Conditions aux limites cinématiques.

Limite	Conditions hydrodynamiques	Conditions thermiques
Paroi inférieure	$U = 0, V = 0$	$\frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$
Paroi supérieure	$U = 0, V = 0$	$\theta = 1$
Paroi droite	$U = 0, V = 0$	$\theta = 0$
paroi gauche	$U = 0, V = 0$	$\theta = 0$

II.8 Nombres adimensionnels

L'adimensionnalisation des équations de conservation a permis d'obtenir les nombres adimensionnels, qui caractérisent l'écoulement du fluide et le transfert de chaleur à l'intérieur des cavités :

II .8.1 Nombre de Grashof

C'est un nombre sans dimension, utilisé en mécanique des fluides pour caractériser la convection naturelle dans un fluide. Il correspond au rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses. On le définit par :

$$\frac{F_g}{F_\mu} = \frac{\text{force de gravité}}{\text{force de viscosité}} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3 \cdot \rho}{\mu^2} = Gr$$

Où

g : L'accélération de la pesanteur [$m \cdot s^{-2}$].

ΔT : La différence de température [$^{\circ}C$].

II .8.2 Nombre de Rayleigh

C'est un nombre sans dimension, caractérisant aussi le transfert de chaleur au sein d'un fluide. Ce nombre est utilisé en mécanique des fluides. Inférieur à une valeur critique de 2000, le transfert s'opère par conduction, au-delà de cette valeur, c'est la convection libre qui devient importante. On le définit de la manière suivante : [1]

$$Ra = \frac{g\beta}{\nu\alpha} (T_s - T_\infty) L^3 c = Gr \cdot Pr \quad (II.33)$$

Où

T_s : La température de la paroi [$^{\circ}C$].

T_∞ : La température du fluide loin de la paroi [$^{\circ}C$].

ν : La viscosité cinématique $= \frac{\mu}{\rho}$ [$m^2 \cdot s^{-1}$].

II .8.3 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 : $Pr = \frac{\mu C_p}{k}$

II.8.4 Le nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt est un nombre adimensionnel, désigne le rapport entre les quantités de chaleur échangée par convection et par conduction. [1] [2]

$$Nu = \frac{h \cdot L}{\lambda}$$

L : La longueur de la couche de fluide en écoulement entre deux parois solides.

Ce nombre représente le perfectionnement du transfert de chaleur dans la couche de fluide, qui se fait par convection et par conduction. D'où on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Flux convectif} = \\ \text{Flux conductif} = \frac{\lambda \Delta T}{L} \end{array} \right. \longrightarrow \frac{\text{Flux convectif}}{\text{Flux conductif}} = \frac{h \Delta T}{\lambda \Delta T / L} = \frac{h \cdot L}{\lambda} = Nu.$$

➤ **le nombre de Nusselt local**

Les valeurs de ce nombre sur les parois horizontales, sont définies comme suit :

- ✓ Sur la paroi chaude :

$$Nu_c = - \left. \frac{\partial \theta}{\partial X} \right|_{X=0}$$

- ✓ Sur la paroi froide :

$$Nu_f = - \left. \frac{\partial \theta}{\partial X} \right|_{X=1}$$

➤ **le nombre de Nusselt moyen**

Les valeurs moyennes des nombres de Nusselt le long de ces parois sont calculées par les intégrales suivantes :

- Sur la paroi chaude :

$$\overline{Nu_c} = - \int_0^1 \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_0 dY.$$

- Sur la paroi froide :

$$\overline{Nu_f} = - \int_0^1 \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_1 dY.$$

II.9 Modèle Numérique

De nombreuses méthodes numériques existent pour la résolution des types d'équations différentielles, on peut citer à titre d'exemples: [4]

1- *La méthode des différences finis*

2- *La méthode des éléments finis*

3- *La méthode des volumes finis*

Dans notre travail, nous avons effectué une simulation numérique moyennant le code de calcul « FLUENT 6.3.26 », qui acquiesce la résolution des équations de transport par la méthode des volumes finis. Des paramètres adaptés d'écoulement et des conditions aux limites adéquates sont utilisés. Nous avons réalisé le maillage par le pré-logiciel « GAMBIT 2.4.6 [2].

II.9.1 Rappel sur la méthode numérique

La résolution par les méthodes dites numériques consiste à discrétiser des équations différentielles gouvernantes pour obtenir un système d'équations algébriques. Ces équations sont alors mises sous forme matricielle généralement linéaire facilement solvable par des méthodes directes ou indirectes (itératives) . Il existe plusieurs méthodes numériques de discrétisation des équations différentielles aux dérivées partielles, à savoir : la méthode des éléments finis, la méthode des différences finies et la méthode des volumes finis . Dans cette mémoire la résolution de problème est effectuée par le logiciel FLUENT, basé sur la méthode des volumes finis, utilisant le schéma QUICK pour la discrétisation de l'équation de quantité de mouvement et la discrétisation de l'équation d'énergie.[5]

➤ **Méthode des éléments finis**

La méthode des éléments finis, bien connue aujourd'hui, est la méthode la plus utilisée actuellement, son champ d'application ne cesse de s'élargir. Le succès de la méthode réside principalement dans sa formulation, réunit les principes les plus forts de la méthode des différences finies et ceux de la méthode des équations intégrales, respectivement la discrétisation du domaine d'intégration et le principe de construction de l'approximation et sa formulation.

➤ **Méthode des différences finies**

La méthode des différences finies est basée sur l'approximation locale des dérivées apparaissant dans les équations différentielles. En se basant sur le développement de Taylor, les fonctions dérivées sont approchées par plusieurs types de schéma aux différences finies (avant ou à droite, arrière ou à gauche et centrées). La précision du résultat varie d'un schéma à l'autre (ordre de troncature utilisée). La méthode utilise un maillage, ou grille du domaine.

➤ **Méthode des volumes finis**

En utilisant cette méthode, le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de sous domaines élémentaires appelés volumes de contrôle. La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle. Chacun de ces derniers englobe un nœud dit nœud principal, comme indiqué dans la Figure(II.2). La méthode des volumes finis, comporte essentiellement :

- *la discrétisation du domaine considéré en volumes de contrôles.*
- *la formulation intégrale des équations différentielles aux dérivées partielles.*
- *le modèle doit être stable et convergent. Une technique de discrétisation qui convertit les équations de conservation aux dérivées partielles en équations algébriques qui peuvent être résolues numériquement.*

Le domaine de calcul est divisé en un nombre fini de sous-domaines élémentaires, appelés volume de contrôle, Chacun de ces derniers englobe un nœud dit nœud principal. La technique des volumes de contrôle consiste dans l'intégration des équations aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle pour obtenir les équations discrétisées qui conservent toutes les grandeurs physiques sur un volume de contrôle.

Cette méthode va être appliqué sur l'équation de transport qui peuvent être écrient sous la forme générale suivant :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\Gamma \text{grad}(\phi)) + S\phi$$

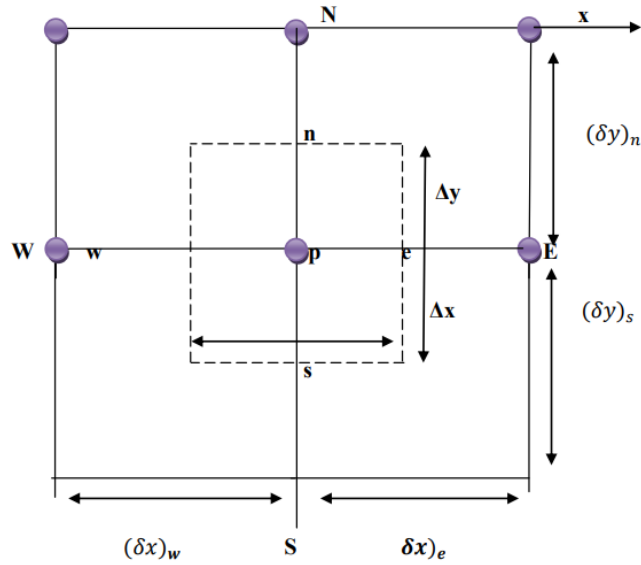


Figure II.2 Volume de contrôle bidimensionnel

II.10 Maillage

Les équations différentielles ponctuelles qui gouvernent notre phénomène sont écrites dans chaque point du domaine physique. Pour les projeter sur ce domaine nous construisons une grille divisée en un certain nombre de volumes finis, et en chaque volume, on considère des points situés en son milieu. Les faces d'un volume de contrôle typique sont localisées au point e, w, n, s (Figure II.3). Notons P le centre du volume de contrôle considéré et E, W, N, S sont les centres des volumes de contrôles adjacents situés respectivement à l'Est, l'Ouest, le Nord et le Sud de celui contenant P. Les quantités scalaires (pression et température) sont stockées aux centres des volumes finis. Par contre, les quantités vectorielles (composantes u et v) sont stockées respectivement aux faces Est et Nord. Pour éviter certains problèmes numériques, les équations de quantité de mouvement sont résolues dans des volumes finis décalés vers la droite pour l'impulsion suivant X et vers le haut pour l'impulsion suivant Y [5].

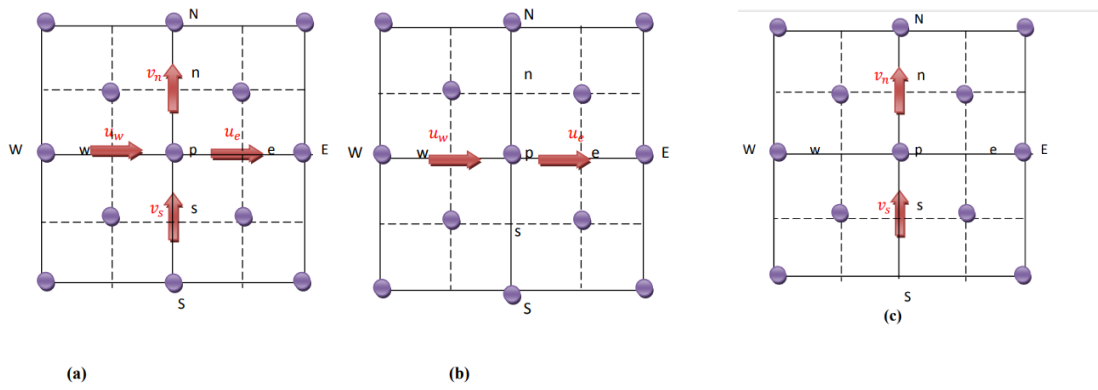


Figure II.3 Schéma du volume de contrôle (a), maillage décalé pour μ_e (b), maillage décalé pour v_s (c)

La figure II.4 montre la grille utilisée dans GAMBIT pour la simulation. Les équations de continuité, de quantité de mouvement bidimensionnelle et d'énergie sont résolues numériquement en utilisant le solveur Fluent.

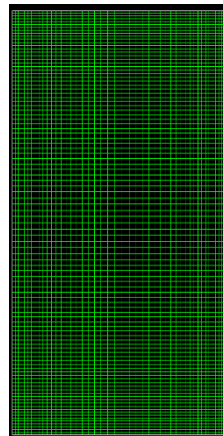


Figure II.4 Le maillage utilisé

La convergence atteinte pour un nombre d'itération environ 550 itérations Avec une erreur d'ordre 10^{-6} (figure II.5).

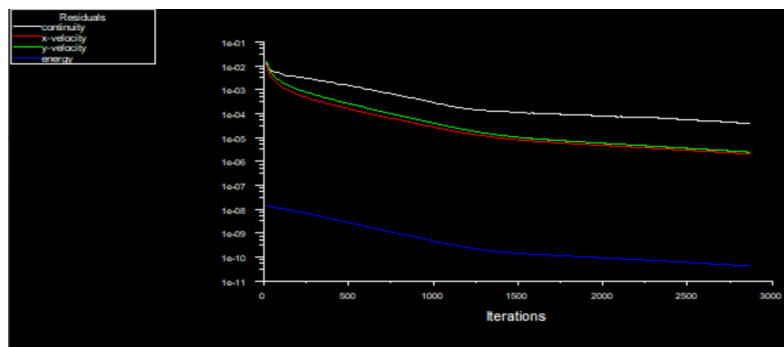


Figure II. 5 Evolution de résidu.

II.11 Procédure du calcul numérique :

La procédure numérique se conçoit en deux étapes, le maillage et le calcul itératif.

➤ **Maillage de domaine dans « GAMBIT » :**

La procédure de création de maillage a été réalisée conformément au protocole suivant :

- ✓ Création du domaine physique 2 DD selon les dimensions choisies.
- ✓ Choix du maillage structuré, uniforme en tous les bords de l'enceinte.
- ✓ Affectation des conditions aux limites en tous les parois de l'enceinte.
- ✓ Vérification de la qualité par le contrôle de forme des maillages et leurs nombres.

➤ **Résolution des équations et calcul avec « FLUENT »:**

Une fois le maillage du domaine d'étude réalisé, nous avons procédé aux calculs selon les étapes suivantes :

- ✓ Importations du maillage 2D.
- ✓ Choix du 'solveur', le régime stationnaire.
- ✓ Choix le schéma implicite non couplé dans la résolution des équations de transport, car cette formulation résout les équations de continuité de quantité de mouvement et quand c'est nécessaire celle de l'énergie, séquentiellement, c'est-à-dire isolées les unes des autres (implicite par défaut).
- ✓ Choix du modèle laminaire pour tous les cas.
- ✓ Introduction des propriétés du nanofluide air – Al_2O_3 (tableaux II.2 , II.3 et II.4 et II.5 et II.6 et II.7 et II.8 et II.9), on considère tous les propriétés sont constant sauf la densité on choisit le modèle de Boussinesq.
- ✓ Choix des caractéristiques des conditions aux limites appropriées (tableaux II.1).
- ✓ Calculs itératifs jusqu'à la convergence.
- ✓ Post-traitement des résultats finaux obtenus.

II.12 Propriétés thermophysiques :

Dans nos calculs nous avons utilisés le nanofluide (air – Al_2O_3), les propriétés thermophysiques sont déterminées sont :

- La conductivité thermique λ .
- Viscosité dynamique μ .
- La masse volumique ρ .
- La chaleur spécifique C_p .
- Le coefficient d'expansion volumique β .

Tableau II.2 les propriétés de l'air et Al_2O_3

Matériaux	$\rho(\frac{g}{cm^3})$	$C_p(\frac{J}{Kg.K})$	$K(\frac{W}{m.K})$	$\mu(\frac{Kg}{m.s})$
Air	1.225	1006.43	0.0242	2.19×10^{-5}
Al_2O_3	3.97	765	40	-----

Le mélange (Al_2O_3 /air)

➤ Pour des nanoparticules a la forme Lame

Tableau II.3 1^{er} Cas les propriétés de nanofluide $\varphi = 0 \%$

$\varphi\%$	$\rho(\frac{Kg}{m^3})$	$C_p(\frac{J}{Kg.K})$	$K(\frac{W}{m.K})$	$\mu(\frac{Kg}{m.s}) \times 10^{-5}$	$\beta(K^{-1}) \times 10^{-3}$
0%	1.225	1006.43	0.0242	2.19	2.08

Tableau II.4 2^{eme} Cas les propriétés de nanofluide $\varphi = 1 \%$

$\varphi\%$	$\rho(\frac{Kg}{m^3})$	$C_p(\frac{J}{Kg.K})$	$K(\frac{W}{m.K})$	$\mu(\frac{Kg}{m.s}) \times 10^{-5}$	$\beta(K^{-1}) \times 10^{-3}$
1%	40.91	1004.01	1.086	2.53	2.06

Tableau II.5 3^{eme} Cas les propriétés de nanofluide $\varphi = 2\%$

$\varphi\%$	$\rho(\frac{Kg}{m^3})$	$C_p(\frac{J}{Kg.K})$	$K(\frac{W}{m.K})$	$\mu(\frac{Kg}{m.s}) \times 10^{-5}$	$\beta(K^{-1}) \times 10^{-3}$
2%	80.60	1001.60	1.16	2.93	2.04

Tableau II.6 4^{ème} Cas les propriétés de nanofluide $\varphi = 3 \%$

$\varphi\%$	$\rho(\text{Kg}/\text{m}^3)$	$C_p(\text{J}/\text{Kg.K})$	$K(\text{W}/\text{m.K})$	$\mu(\text{Kg}/\text{m.s}) \times 10^{-5}$	$\beta(\text{K}^{-1}) \times 10^{-3}$
3%	120.28	999.18	1.26	3.39	2.02

Tableau II.7 5^{ème} Cas les propriétés de nanofluide $\varphi = 4 \%$

$\varphi\%$	$\rho(\text{Kg}/\text{m}^3)$	$C_p(\text{J}/\text{Kg.K})$	$K(\text{W}/\text{m.K})$	$\mu(\text{Kg}/\text{m.s}) \times 10^{-5}$	$\beta(\text{K}^{-1}) \times 10^{-3}$
4%	159.976	996.77	1.35	3.90	1.99

Tableau II.8 6^{ème} Cas les propriétés de nanofluide $\varphi = 5 \%$

$\varphi\%$	$\rho(\text{Kg}/\text{m}^3)$	$C_p(\text{J}/\text{Kg.K})$	$K(\text{W}/\text{m.K})$	$\mu(\text{Kg}/\text{m.s}) \times 10^{-5}$	$\beta(\text{K}^{-1}) \times 10^{-3}$
5%	199.66	994.35	1.45	4.46	1.97

Tableau II.9 7^{ème} Cas les propriétés de nanofluide $\varphi = 6 \%$

$\varphi\%$	$\rho(\text{Kg}/\text{m}^3)$	$C_p(\text{J}/\text{Kg.K})$	$K(\text{W}/\text{m.K})$	$\mu(\text{Kg}/\text{m.s}) \times 10^{-5}$	$\beta(\text{K}^{-1}) \times 10^{-3}$
6%	239.35	991.94	1.54	5.08	1.95

II. 13 Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les bases théoriques et mathématiques nécessaires pour la modélisation et la simulation du problème de convection naturelle dans une cavité carrée remplie de nanofluides ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{air}$). La démarche a consisté à définir le modèle physique du système étudié, à formuler les équations gouvernantes, et à introduire les hypothèses simplificatrices nécessaires à la résolution du problème.

La première partie a détaillé les équations fondamentales de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, qui sont essentielles pour comprendre le comportement dynamique et thermique du fluide dans la cavité. Ces équations, notamment les équations de Navier-Stokes et l'équation de l'énergie, ont été présentées dans leurs formes différentielles et adimensionnelles pour faciliter leur résolution numérique.

Ensuite, les hypothèses simplificatrices ont été énoncées, parmi lesquelles l'hypothèse de Boussinesq, permettant de réduire la complexité des équations en supposant que certaines propriétés thermophysiques du fluide restent constantes. Ces hypothèses sont cruciales pour rendre le problème tractable et pour pouvoir appliquer les méthodes de résolution numérique de manière efficace.

La section sur la formulation adimensionnelle des équations a introduit les variables adimensionnelles et les nombres sans dimension tels que les nombres de Reynolds, de Grashof, de Prandtl et de Nusselt, qui caractérisent l'écoulement et le transfert de chaleur. Cette approche permet de généraliser les résultats obtenus et de comparer différentes situations physiques à l'aide de critères dimensionnels universels.

Enfin, le chapitre a abordé les méthodes numériques disponibles pour la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles, en mettant l'accent sur la méthode des volumes finis, utilisée dans le logiciel de simulation FLUENT. La méthode des volumes finis est particulièrement adaptée à ce type de problème en raison de sa capacité à gérer les complexités géométriques et les variations des propriétés du fluide.

Chapitre III
Résultats ET discussion

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats numériques issus d'une simulation réalisée avec le logiciel de CFD "ANSYS FLUENT" dans un rectangle fermé représentant un piston déplaceur, où un nanofluide (Al_2O_3 / air) est utilisé. Les parois latérales droite et gauche sont maintenues à une température constante, considérée comme froide, tandis que la paroi supérieure est exposée à une température constante considérée comme chaude, en revanche, la paroi inférieure est adiabatique. Dans ce chapitre, nous avons mené des simulations numériques des écoulements à travers cette configuration particulière, tout en ajustant divers paramètres tels que la vitesse, la température et le flux de chaleur.

III. 2 Partie mise en situation**III.2. 1 Généralités**

La question de la conversion de la chaleur (énergie thermique) en énergie mécanique utilisable a été adressée par le pasteur et ingénieur Robert Stirling à travers la conception d'un moteur à air chaud. Ce moteur fonctionne en utilisant un fluide contenu dans une enceinte hermétiquement fermée, chauffée par une source de chaleur externe. Il s'agit donc d'un moteur à combustion externe, offrant plusieurs avantages. La combustion est plus complète et continue, éliminant ainsi le besoin de soupapes et réduisant le bruit. De plus, ce système permet l'utilisation de divers types de combustibles, y compris les énergies renouvelables, suscitant un intérêt croissant pour le développement de prototypes. Ces moteurs peuvent être utilisés pour la production d'électricité, l'exploration océanographique et des applications domestiques.

III.2. 2 Description du concept

Le moteur Stirling fonctionne selon un principe relativement simple. Il repose sur la combustion externe d'un fluide, généralement de l'air à une pression modérée, chauffé à l'extrémité d'un cylindre de chauffe. Ce fluide subit un cycle thermique comprenant les étapes suivantes : chauffage, détente (augmentation du volume de la chambre), refroidissement, puis compression. La configuration du moteur comprend un piston moteur qui actionne un volant d'inertie, ainsi qu'un piston déplaceur disposé en position opposée à 90 degrés. Ce piston déplaceur refroidit le courant de gaz chaud, accumulant ainsi son énergie pour la restituer au gaz froid. En somme, le moteur Stirling peut être divisé en deux parties distinctes :

- ✓ Un ensemble « déplacer », regroupant l'unité de transfert thermique, la bielle déplacé, l'arbre moteur et le châssis.
- ✓ Un ensemble « moteur », regroupant l'unité motrice, la bielle motrice, l'arbre moteur et le châssis. L'arbre moteur en sortie tourne à une vitesse de 500 tr/min.

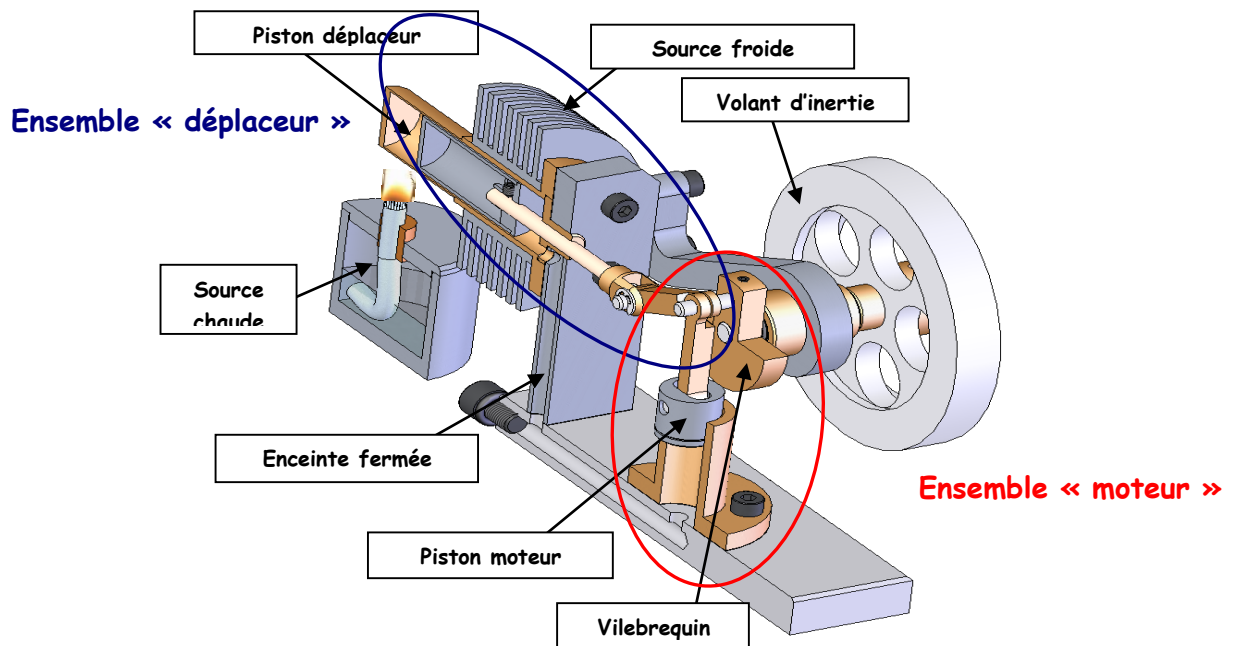


Figure III.1 : Moteur Stirling (Ensemble déplaceur-moteur).

III.2.3 Principe de fonctionnement

- **Phase 1- Échauffement isochore à volume constant (De l'état 1 à l'état 2) :**
Apport de chaleur, sans travail.

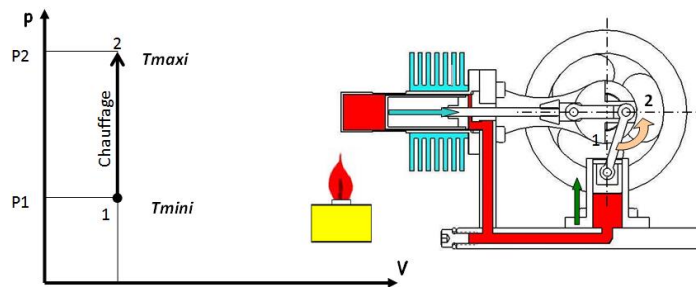


Figure III.2 : Diagramme P-V (Échauffement isochore à volume constant).

Le brûleur (la source chaude) cède de l'énergie thermique. La pression et la température du gaz augmentent durant cette phase. Le déplacementur fait passer le gaz de la source chaude vers la source froide.

- **Phase 2- Détente isotherme à température constante (PHASE MOTEUR, De l'état 2 à l'état 3) :** Apport de chaleur, cession de travail

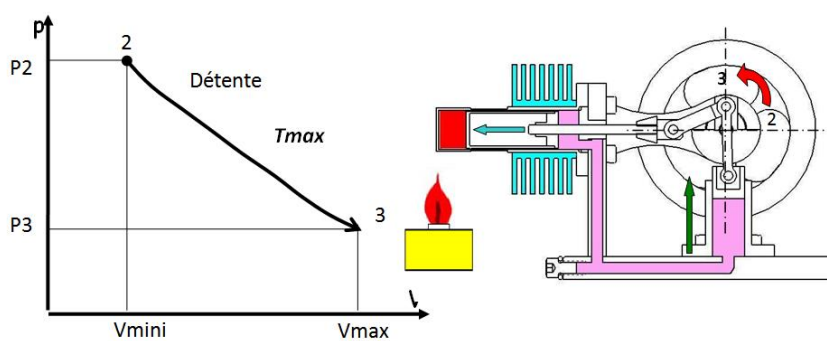


Figure III.3 : Diagramme P-V (Détente isotherme à température constante).

Le volume dans la chambre du piston moteur s'accroît alors que la pression diminue. C'est pendant cette transformation que l'énergie motrice est produite.

- **Phase 3- Refroidissement isochore à volume constant (De l'état 3 à l'état 4)**
: Cession de chaleur, sans travail.

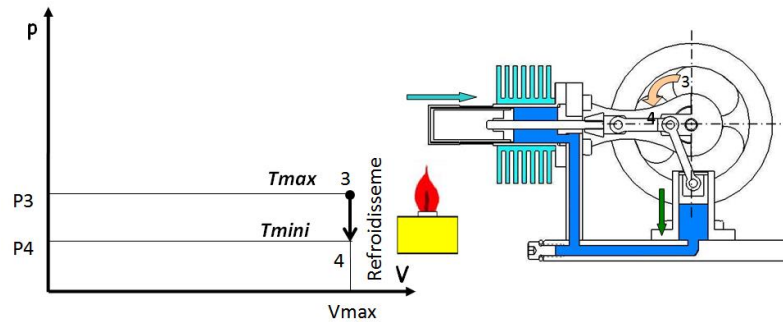


Figure III.4 : Diagramme P-V (Refroidissement isochore à volume constant).

La température et la pression diminuent pendant cette phase. Le déplaceur fait passer le gaz de la source froide vers la source chaude.

- **Phase 4- Compression isotherme à température constante (RETOUR PAR LE VOLANT D'INERTIE, De l'état 4 à l'état 1)** : Cession de chaleur, apport de travail.

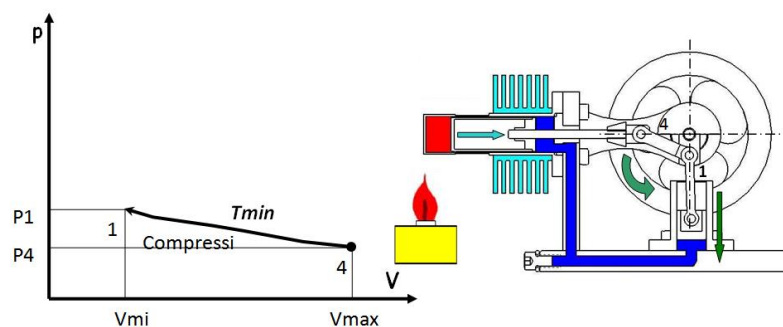


Figure III. 5 : Diagramme P-V (Compression isotherme à température constante).

La pression du gaz augmente au fur et à mesure que son volume diminue. Par l'inertie du volant, on fournit de l'énergie mécanique au gaz pendant cette période. Le moteur a fini son cycle.

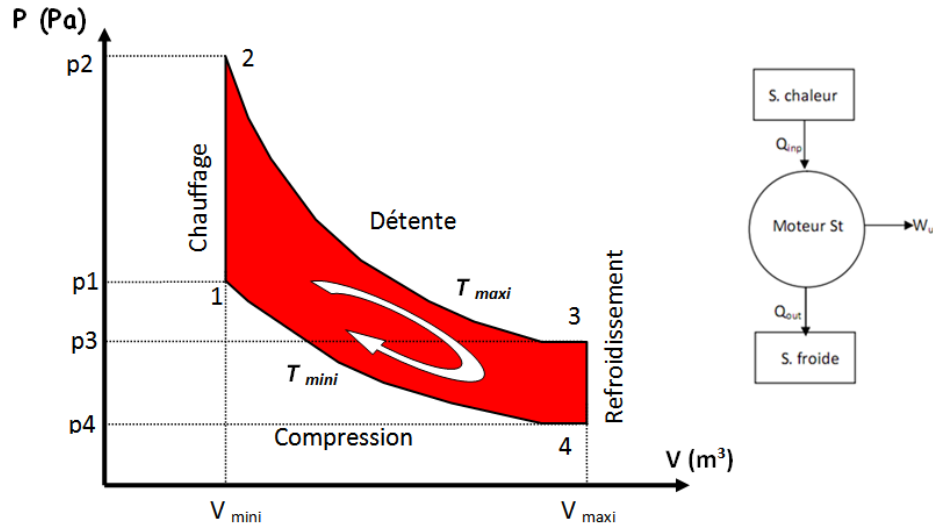


Figure III. 6 : Cycle idéal thermique du moteur Stirling.

III. 3 Partie calcul (Simulation numérique)

Une simulation 2D des transferts d'énergie des écoulements compressibles dans un moteur Stirling a été réalisée à l'aide d'un logiciel adapté à la simulation multiphysique avec maillage dynamique (FLUENT). Cette simulation a pris en compte les dimensions, les conditions initiales et les conditions aux limites du prototype. Les résultats de la simulation numérique nous permettent de tracer les grandeurs caractéristiques du nanofluide de travail pour un moteur Stirling, dans ses espaces chaud et froid. Les performances du moteur dépendent de plusieurs paramètres, tels que l'efficacité de la régénération et les caractéristiques géométriques et physiques du régénérateur (porosité, conductivité thermique de la matrice poreuse, etc.). L'objectif de ce travail est d'étudier le rôle de l'utilisation du nanofluide et de son fraction volumique, dans le but d'optimiser les performances du moteur en choisissant les valeurs optimales de certains de ces paramètres. Les résultats de la simulation sont illustrés dans les figures suivantes. L'analyse de ces figures montre l'évolution de la température ainsi que les lignes de courant pendant le mouvement du déplaceur entre le PMB et le PMH pour différentes valeurs de fraction volumique des nanoparticules comprise entre (0 % et 6%), et le nombre de Rayleigh Ra variant de 10^2 à 10^6 .

La simulation du cas du moteur Stirling avec des températures imposées T_C et T_F respectivement, et dont les conditions de fonctionnement correspondent au déplacement du piston déplaceur représentés sur la figure III.7.

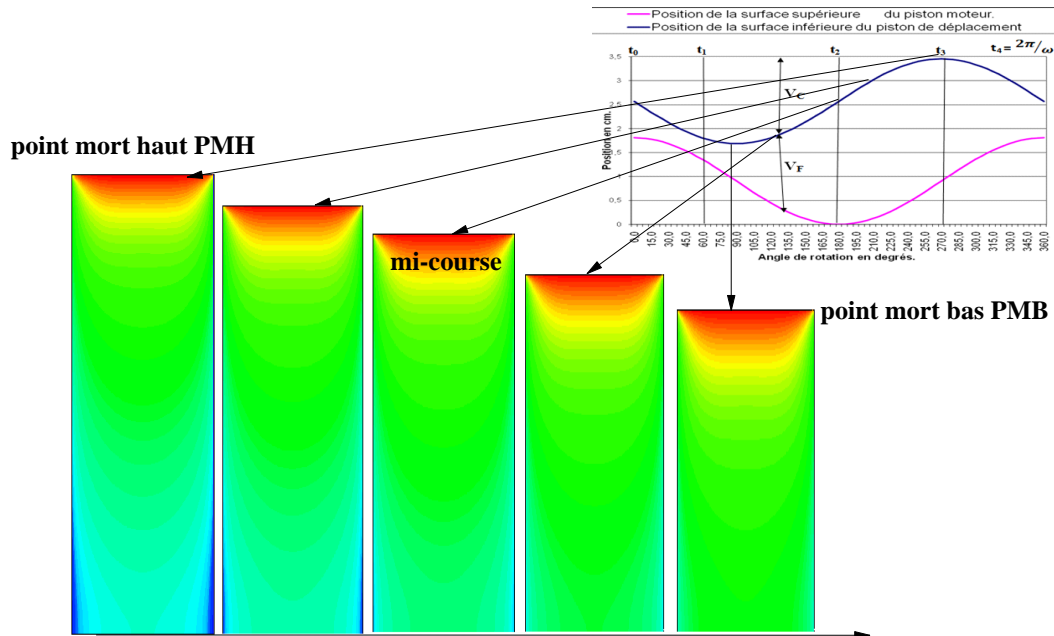


Figure III. 7 : Évolution des positions des pistons d'échangeur en fonction du temps par rapport de l'angle de rotation d'un cycle.

III.3.1 Analyse du champ des températures

Sur la figure III. 8 on peut voir une succession d'images montrant l'évolution des volumes gazeux dans le temps et avec elle l'évolution de la température du gaz de travail (nanofluide). La figure montre les isothermes pour trois nombre de Rayleigh (10^2 , 10^4 et 10^6) et une fraction volumique égale à 6%. L'écoulement est Bicellulaire représenté par deux vortex tournants appelé vortex primaire au sens contraire. Ce phénomène est créé par le fait que le fluide à côté de la paroi chaude reçoit de la chaleur et devient plus léger et ascendant du fait de la poussée d'Archimède. Le champ de température illustre également ce passage de fluide de la zone supérieure chaude vers la zone inférieure froide. L'intrusion du fluide chaud dans le domaine froid est très clairement illustrée par le dégradé de couleur.

Ce champ de température met également en évidence l'importance des échanges au niveau de la paroi inférieure.

Par contre à proximité de la paroi froide il se refroidit et devient plus lourd et descendant le long de cette paroi. Les effets thermiques engendrent une cellule de convection dans la région centrale de la cavité. Il est à noter que le fluide reste bicellulaire en augmentant le nombre de Rayleigh. Toutefois une stratification est obtenue pour les nombres de Rayleigh élevés. Pour de faibles nombres de Rayleigh, le mode de transfert de chaleur dominant est la conduction. L'augmentation du nombre de Rayleigh intensifie la circulation de nanofluide en boucle dans la couche limite près des parois verticales.

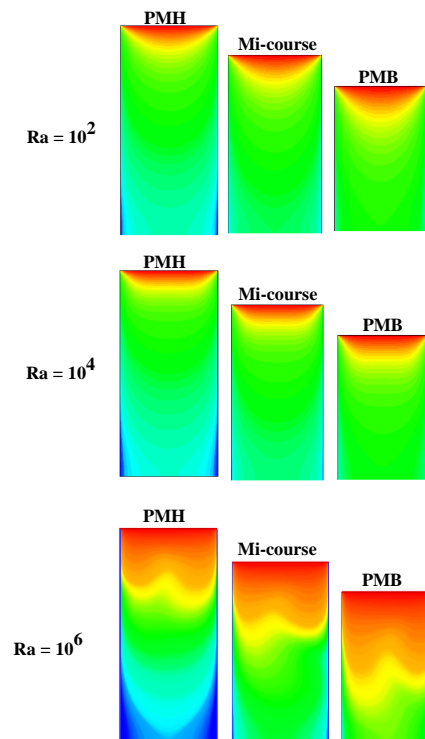


Figure III. 8 Évolution de la température à l'intérieur du moteur durant le mouvement du déplaceur entre la PMB et la PMH

Pour des nombres de Rayleigh égaux à 10^3 et 10^4 , on constate l'existence d'une zone stagnante au centre de la cavité, ce qui signifie que l'échange thermique s'effectue d'une manière intense aux coins de la cavité. Pour un nombre de Rayleigh élevé et en variant le rapport d'aspect (PMH, Mi-course et PMB), on remarque que les lignes de courant deviennent fortement intenses à proximité des endroits actifs. Pour un nombre de Ra, de

l'ordre de 10^6 et quel que soit la valeur du rapport d'aspect, on a remarqué l'existence de deux cellules de recirculation à l'intérieur de la cavité, l'une est au côté haut gauche et l'autre au côté bas droit. Les deux coins restants sont moins actifs.

III.3.2 Analyse du champ des vitesses

L'évolution des lignes de courant, en fonction du nombre de Rayleigh, de la fraction volumique des nanoparticules ainsi que leur forme est rapportée dans les figures III.9. Sur la figure, l'écoulement est divisé en deux catégories : un écoulement bicellulaire exhibant deux structures tourbillonnaires contrarotatives de très faible intensité ($Ra=10^2$ et $Ra = 10^4$) et un autre monocellulaire de forme circulaire montrant une zone rotative dans le sens horaire occupant la majeure partie de la cavité. Ce sens de rotation peut être clairement prévu à partir des isothermes correspondantes.

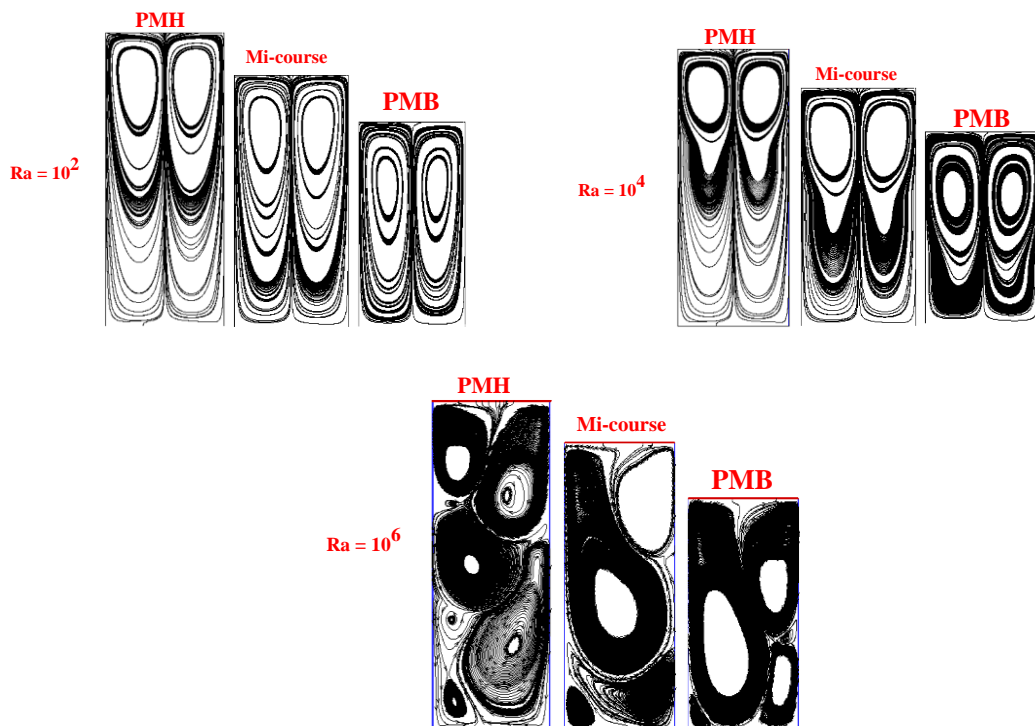


Figure III.9 Évolution les Lignes de courant à l'intérieur du moteur durant le mouvement du déplaceur entre la PMB et la PMH

On remarque que l'influence du nombre de Rayleigh sur les contours de vitesse est très claire surtout auprès des parois chaude et froide. En effet, au fur et à mesure que le nombre de Ra augmente ces contours se rapprochent les uns des autres donnant naissance à une zone de recirculation de flux plus intense. Cette zone principale, occupant la majeure partie de la cavité, indique la dominance de la convection et qui perd de son intensité en formant deux cellules de recirculation secondaires dans les coins supérieur gauche et inférieur droit et ceci à $Ra=10^6$.

III.3.3 Profils de vitesse et de température

Les profils des vitesses et de températures relevés au plan médian ($X=1/2$) le long de l'axe y de la cavité en fonction du nombre de Rayleigh et de la forme (rapport d'aspect) ainsi que de la fraction volumique des NPs sont présentés dans les figures ci-après.

III.3.3.1 Profils de vitesse

Comme indiqué sur la figure III.10, les profils des vitesses horizontales (U) sont similaires aux profils typiques d'écoulement de convection naturelle confinée en milieu clos. Ces profils montrent une symétrie claire de l'écoulement moyen par rapport au centre de la cavité, quel que soit le rapport d'aspect. Il est observé que plus on s'éloigne de l'axe de symétrie, plus la vitesse d'écoulement augmente, avec la formation de zones de recirculation.

On remarque aussi que, pour un nombre de Rayleigh (Ra) de 10^2 et une fraction volumique de 0 %, la vitesse axiale se caractérise par un profil présentant un décollement, ce qui entraîne des vitesses négatives depuis la paroi inférieure jusqu'à $Y = 0,5$, et des vitesses positives en se dirigeant vers la paroi supérieure. Ce décollement tend vers un profil parabolique de la vitesse axiale.

Pour $Ra = 10^6$ et une fraction volumique de 6 %, les profils sont quasiment semblables à ceux du premier cas. Cependant, la vitesse axiale maximale est enregistrée juste au-dessus du premier composant, mais le profil de la vitesse axiale présente cette fois-ci un décollement inverse à celui des cas précédents, c'est-à-dire des vitesses positives en bas et des vitesses négatives en se rapprochant de la paroi supérieure de la cavité. Toutefois, ce décollement tend à disparaître en diminuant le nombre de Ra .

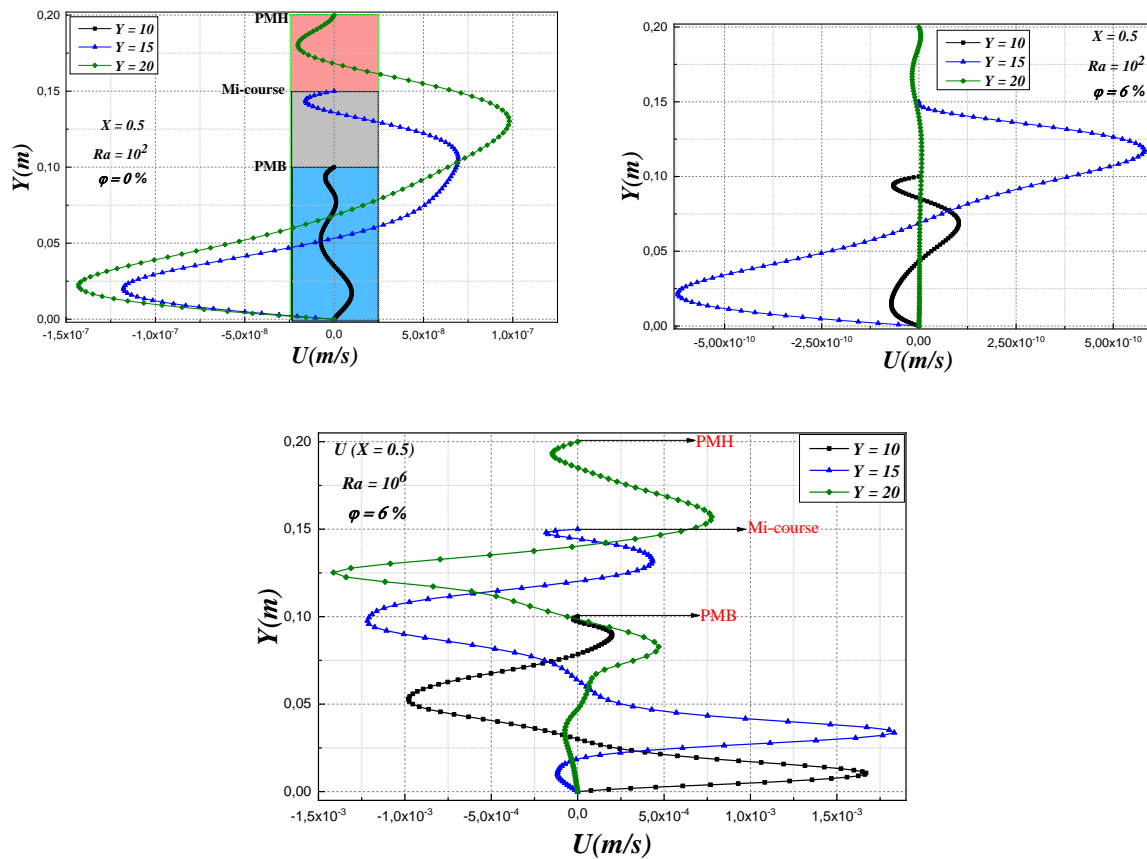


Figure III.10 Profils de vitesse horizontale au plan médian vertical de la cavité en fonction de la forme (rapport d'aspect).

III.3.3.2 Profils de température

La figure III.11 illustre la répartition de la température (au plan médian vertical de la cavité) de l'air pure ainsi que du nanofluide (Al_2O_3/air) de fraction volumique de 0% et 6% pour un nombre de Rayleigh $Ra = 10^2$ et 10^6 .

On observe que, à $Ra=10^3$, les échanges thermiques se font par conduction. Au fur et à mesure que le nombre de Rayleigh s'accroît, les mouvements convectifs s'intensifient dû à l'augmentation des forces de flottabilité thermiques. Néanmoins, la répartition de la température dans le plan vertical médian.

Le mouvement d'écoulement de la convection naturelle est initialisé par la différence de température entre les parois horizontales (haut et bas). Ainsi, le profil de température est un aspect important pour comprendre la dynamique de l'écoulement.

En constate que pour un faible nombre de Rayleigh $Ra = 10^2$, le transfert de chaleur est considérablement amélioré pour le cas de fraction volumique $\phi = 6\%$, où le flux de chaleur se concentre sur la paroi haute. Le flux de chaleur est presque négligeable au milieu de l'enceinte.

La couche limite thermique peut être vue près des parois horizontales où son épaisseur varie considérablement pour tous les rapports de forme, en particulier pour les nombres de Rayleigh inférieurs à 10^6 . De forts gradients de température apparaissent près de la paroi haute avant qu'elle n'atteigne le minimum. Ici, la température est presque constante et approximativement égale à la température maximaux, puis ces gradients commencent à diminuer près de la paroi bas mais avec des valeurs plus faibles à partir de milieu de la cavité.

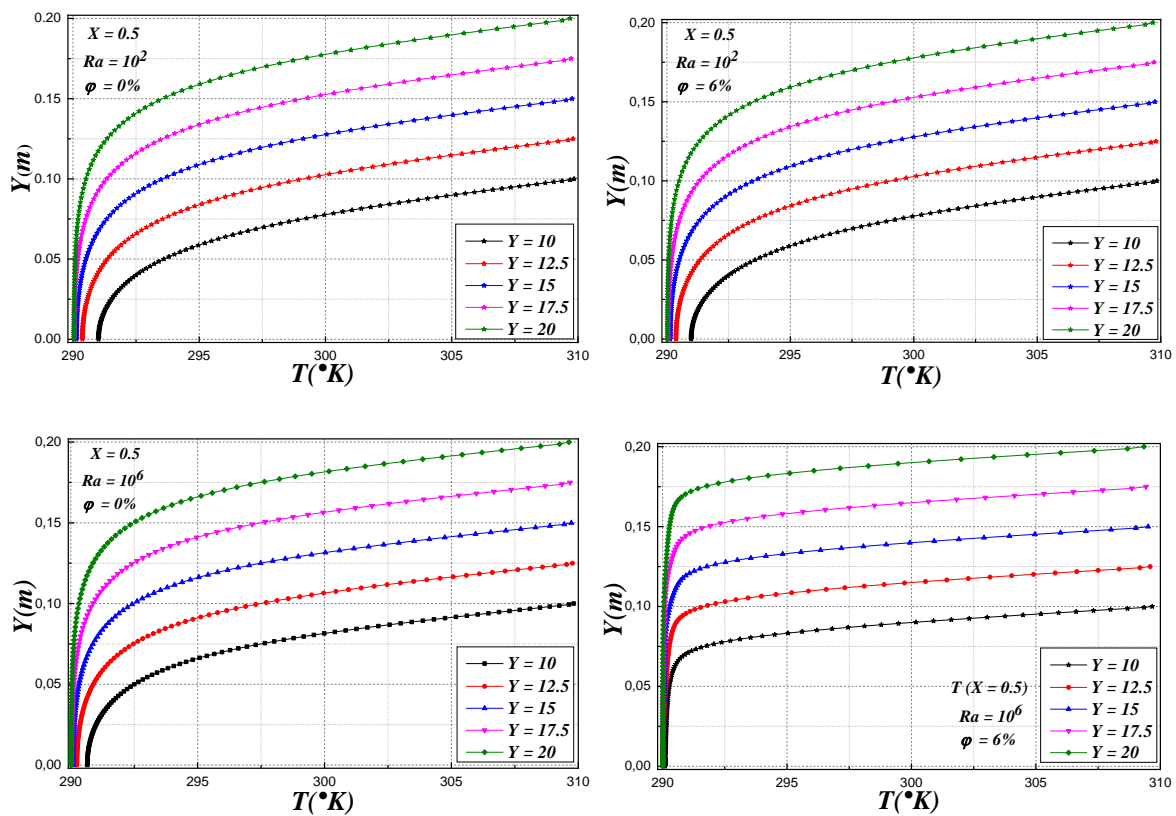


Figure III. 11 Profils de température à $(X=0.5)$ pour différents rapports de forme en fixant le nombre de Rayleigh et la fraction volumique.

III. 4 Effet de volume fraction de nanoparticules

L'effet de la variation des fractions volumétriques du nanofluide φ_{nf} sur le nombre de Nusselt moyen Nu_{avg} à différents nombres de Rayleigh pour le PMB est illustré à la Figure III. 12. Les résultats ont montré que tous le nanofluide à des valeurs Nu_{avg} supérieures à celles de l'aire pure ($\varphi_{nf} = 0\%$). De plus, la figure ci-dessous montre que l'augmentation de Ra de 10^2 à 10^6 et de φ_{nf} dans le fluide de base de 1% à 6% améliore Nu_{avg} en raison des améliorations du processus de convection du nanofluide et la conductivité thermique. Il convient également de noter que le $Ra=10^6$ pour une φ_{nf} de 6% a le taux de transfert de chaleur le plus élevé.

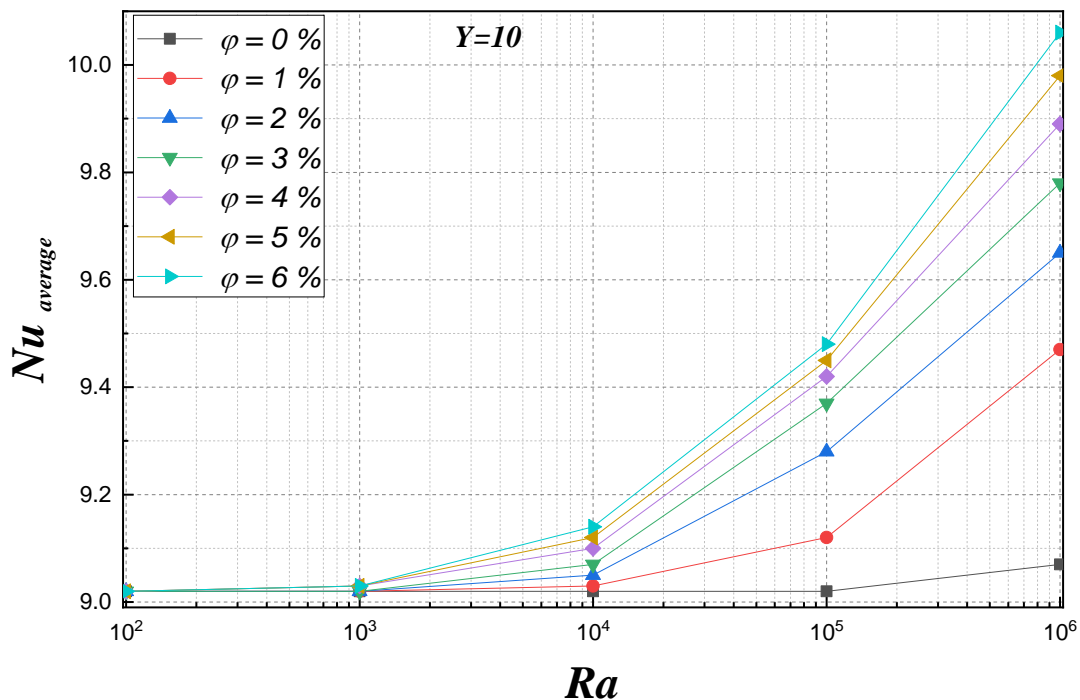


Figure III. 12 Variation du nombre de Nusselt moyen pour différents nombres de Rayleigh en fonction de la fraction volumique.

Afin de quantifier l'échange thermique au sein de chaque cavité, nous proposons de suivre la variation du nombre de Nusselt moyen, sur la paroi chaude, pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh, de la fraction volumique ainsi que du rapport d'aspect (Figures III.13). Il est bien montré que le nombre de Nusselt moyen augmente avec le nombre de Rayleigh et la fraction volumique des NPs. Ce gain thermique se traduit respectivement par l'intensification des forces de flottabilité (prédominance de la convection) et des échanges

de diffusion thermique entre les NPs. Comme prévu par la figure, l'amélioration du transfert de chaleur, selon l'ordre croissant, s'obtient avec le rapport d'aspect $y = 20$ (BMH) et une fraction volumique de 6%. Un comportement similaire enregistré pour une fraction volumique de 0%.

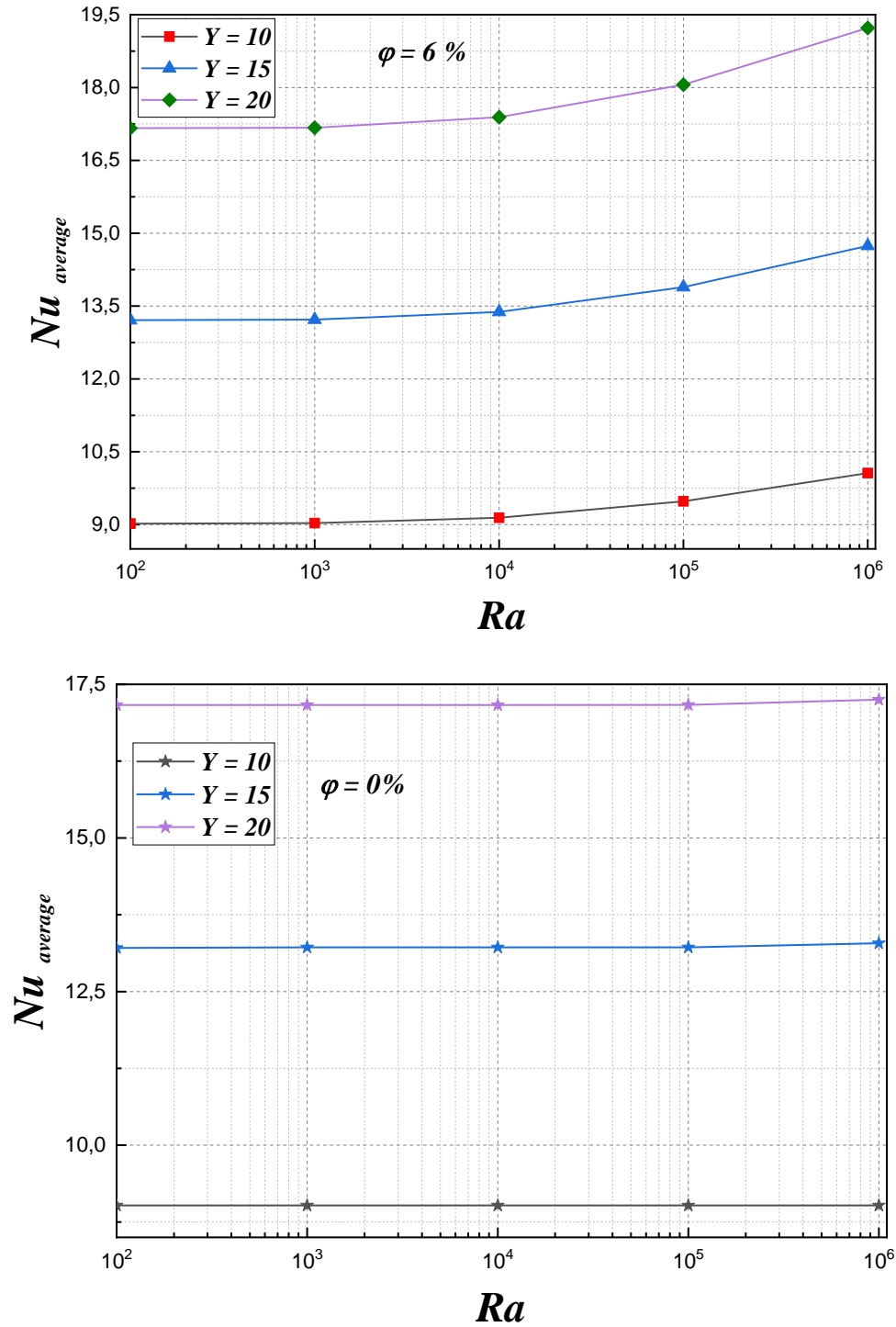


Figure III. 12 Variation du nombre de Nusselt moyen pour différents nombres de Rayleigh en fonction du rapport d'aspect.

La figure III. 14 montre que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation de la fraction volumique et le nombre de Rayleigh. Ce qui montre que l' Al_2O_3 est un bon conducteur de chaleur. Donc, le type de nanofluide est un facteur principal pour le perfectionnement de transfert thermique.

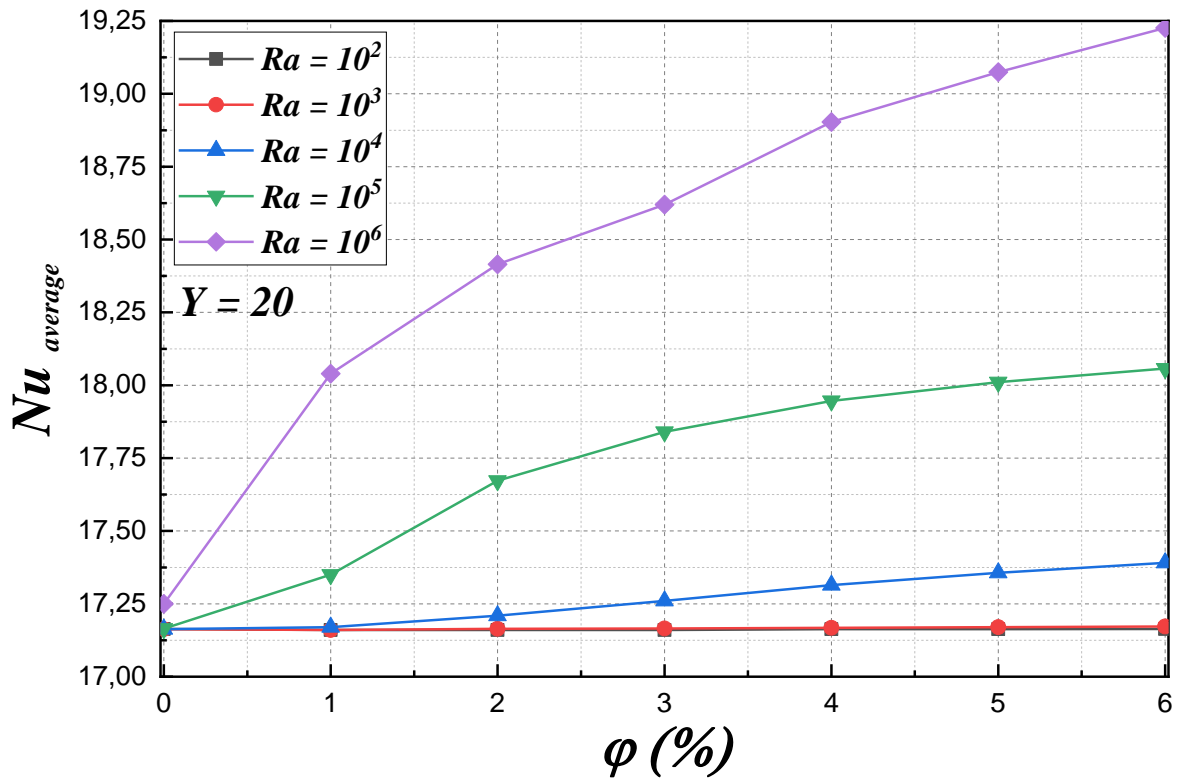


Figure III. 14 Effets du nombre de Rayleigh et la fraction volumique sur la variation du nombre de Nusselt.

III. 5 Conclusion

Cette étude démontre l'importance de l'optimisation des paramètres de fonctionnement et de la composition du fluide de travail pour améliorer les performances du moteur Stirling. Les résultats obtenus fournissent des indications précieuses pour le développement de moteurs plus efficaces et durables, capables de répondre aux besoins énergétiques modernes tout en utilisant des sources de chaleur renouvelables.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, on a présenté une analyse détaillée des résultats obtenus par simulation numérique avec le logiciel ANSYS FLUENT, appliquée à un moteur Stirling utilisant un nanofluide composé d' Al_2O_3 et d'air. La cavité, représentant le moteur, est configurée avec des parois latérales maintenues à des températures constantes (froides), une paroi supérieure chaude, et une paroi inférieure adiabatique.

Nous avons exploré les phénomènes thermiques et dynamiques en simulant les écoulements dans cette cavité, en variant les paramètres de vitesse, température et flux de chaleur. Les résultats mettent en lumière le rôle crucial de ces paramètres sur les performances globales du moteur Stirling.

L'introduction a rappelé les principes de fonctionnement du moteur Stirling, conçu par Robert Stirling pour convertir la chaleur en énergie mécanique. Ce moteur utilise un fluide, généralement de l'air, chauffé de manière externe, éliminant ainsi les soupapes et réduisant le bruit. Il présente l'avantage d'une combustion externe complète et continue, permettant l'utilisation de divers types de combustibles, y compris les énergies renouvelables. Cette polyvalence rend le moteur Stirling attractif pour des applications variées, comme la production d'électricité et l'exploration océanographique.

La section de mise en situation a détaillé le concept du moteur Stirling, expliquant les différentes phases du cycle thermodynamique : échauffement isochore, détente isotherme, refroidissement isochore, et compression isotherme. Chacune de ces phases a été illustrée par des diagrammes P-V, montrant les transformations du fluide de travail dans la cavité.

Les simulations numériques ont révélé des informations précieuses sur le comportement des écoulements et des transferts thermiques dans le moteur. Nous avons observé que l'augmentation du nombre de Rayleigh intensifie la convection naturelle, améliorant ainsi les échanges de chaleur. Les profils de température et de vitesse ont été analysés, mettant en évidence la formation de cellules de convection et les effets des gradients thermiques.

En particulier, l'utilisation de nanoparticules de Al_2O_3 dans le fluide de travail a montré une amélioration notable des performances thermiques. Les simulations ont démontré que l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules améliore le nombre de Nusselt

, indiquant un transfert de chaleur plus efficace. Cette amélioration est particulièrement marquée pour des nombres de Rayleigh élevés, où la convection devient dominante.

L'analyse des champs de température et de vitesse a montré comment le fluide de travail évolue au cours du cycle, avec des zones de recirculation et des stratifications thermiques influençant la performance du moteur. Les résultats ont également mis en évidence l'importance de la géométrie et des caractéristiques physiques du régénérateur, ainsi que de l'efficacité de la régénération.

En conclusion, cette étude a souligné l'importance de l'optimisation des paramètres de fonctionnement et de la composition du fluide de travail pour maximiser les performances du moteur Stirling. Les résultats obtenus fournissent des orientations précieuses pour le développement de moteurs plus performants et écologiques, capables de tirer parti des énergies renouvelables et de répondre aux défis énergétiques actuels. Cette recherche ouvre la voie à de nouvelles améliorations technologiques et à l'optimisation des moteurs Stirling pour une variété d'applications industrielles et domestiques.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, on a présenté une analyse détaillée des résultats obtenus par simulation numérique avec le logiciel ANSYS FLUENT, appliquée à un moteur Stirling utilisant un nanofluide composé d' Al_2O_3 et d'air. La cavité, représentant le moteur, est configurée avec des parois latérales maintenues à des températures constantes (froides), une paroi supérieure chaude, et une paroi inférieure adiabatique.

Nous avons exploré les phénomènes thermiques et dynamiques en simulant les écoulements dans cette cavité, en variant les paramètres de vitesse, température et flux de chaleur. Les résultats mettent en lumière le rôle crucial de ces paramètres sur les performances globales du moteur Stirling.

L'introduction a rappelé les principes de fonctionnement du moteur Stirling, conçu par Robert Stirling pour convertir la chaleur en énergie mécanique. Ce moteur utilise un fluide, généralement de l'air, chauffé de manière externe, éliminant ainsi les soupapes et réduisant le bruit. Il présente l'avantage d'une combustion externe complète et continue, permettant l'utilisation de divers types de combustibles, y compris les énergies renouvelables. Cette polyvalence rend le moteur Stirling attractif pour des applications variées, comme la production d'électricité et l'exploration océanographique.

La section de mise en situation a détaillé le concept du moteur Stirling, expliquant les différentes phases du cycle thermodynamique : échauffement isochore, détente isotherme, refroidissement isochore, et compression isotherme. Chacune de ces phases a été illustrée par des diagrammes P-V, montrant les transformations du fluide de travail dans la cavité.

Les simulations numériques ont révélé des informations précieuses sur le comportement des écoulements et des transferts thermiques dans le moteur. Nous avons observé que l'augmentation du nombre de Rayleigh intensifie la convection naturelle, améliorant ainsi les échanges de chaleur. Les profils de température et de vitesse ont été analysés, mettant en évidence la formation de cellules de convection et les effets des gradients thermiques.

En particulier, l'utilisation de nanoparticules de Al_2O_3 dans le fluide de travail a montré une amélioration notable des performances thermiques. Les simulations ont démontré que l'augmentation de la fraction volumique des nanoparticules améliore le nombre de Nusselt

, indiquant un transfert de chaleur plus efficace. Cette amélioration est particulièrement marquée pour des nombres de Rayleigh élevés, où la convection devient dominante.

L'analyse des champs de température et de vitesse a montré comment le fluide de travail évolue au cours du cycle, avec des zones de recirculation et des stratifications thermiques influençant la performance du moteur. Les résultats ont également mis en évidence l'importance de la géométrie et des caractéristiques physiques du régénérateur, ainsi que de l'efficacité de la régénération.

En conclusion, cette étude a souligné l'importance de l'optimisation des paramètres de fonctionnement et de la composition du fluide de travail pour maximiser les performances du moteur Stirling. Les résultats obtenus fournissent des orientations précieuses pour le développement de moteurs plus performants et écologiques, capables de tirer parti des énergies renouvelables et de répondre aux défis énergétiques actuels. Cette recherche ouvre la voie à de nouvelles améliorations technologiques et à l'optimisation des moteurs Stirling pour une variété d'applications industrielles et domestiques.

Références

CHAPITRE I

- [1] M. Abbas, N. Saïd et B. Boumeddane , optimisation d'un moteur Stirling de type gamma, Revue des énergies renouvelables vol. 13 n°1 (2010) .
- [2] A.Amine,S.Younes,Etude et dimensionnement du moteur Stirling,Mémoire de fin d'étude,Université Akli Mona oulhadj-bouira,2021.
- [3] C.Asma , B. Amina , Le Moteur Stirling et ses Applications (Application : la transformation d'un compresseur d'air en un moteur Stirling) , université d'adras , 13/12/2012.
- [4] B. salah eddin ,R. zakaria , Etude de la performance du cycle inverse de moteur Stirling pour la production du froid par l'énergie solaire , université kasdi marbah ourgla, 31 /05 /2017.
- [5] N. Lanciaux , Contribution au développement d'un moteur Stirling : De la cogénération dans le bâtiment à l'autonomie énergétique, Thèse de doctorat, L'université d'évery-val d'essonne, 13 Janvier 2015.
- [6] A.Amine,S.Younes, Etude et dimensionnement du moteur Stirling, Université Akli Mona oulhadj-bouira, 2021.
- [7] F.Valadier, J.Fourrel de Frettes, Le Moteur Stirling : Analyse, État de l'Art et Modélisation d'un Prototypage, ensta - Projet de Troisième Année 2009.
- [8] A.ridha , Etude du cycle de Stirling pour L'amélioration de la performance d'un moteur, université yahia fares de medea, 2011.
- [9] A.ridha, Etude du système hybride Dish-Stirling Biogaz pour la production d'électricité à usage domestique, thèse de doctorat, Université Yahia Farès de Médéa, 2020.
- [10] M.zad, étude du concentrateur parabolique a moteur stirling, université badji mokhtar annaba, 2016.
- [11] M . walid, Etude D'un Moteur à AIR Chaud (Stirling),Application à La Conversion De L'énergie Théorique Solair, Université de Biskra, Juin 2013.
- [12] S.bonnet, Moteurs thermiques à apport de chaleur externe : étude d'un moteur Stirling et d'un moteur Ericsson,Thèse de doctorat en énergétique, université de Pau et des Pays de l'Adour, 2005.
- [13] G.ramla. Dimensionnement de moteurs Stirling à apport de chaleur externe, Thèse de doctorat en énergétique ,Tunisie, 2008.
- [14] D.Yanis ,D.Adel, Influence de la variation des propriétés du nanofluide sur l'écoulement thermosolutale en convection naturelle dans un milieu poreux non-Darcéen, université Abderrahmane Mira Bejaia ,2021.
- [15] G. Wassila, Modèles prédictifs de la conductivité thermique des nanoparticules pour simulation des nanofluides, Université 8 Mai 1945 Guelma,2021 .
- [16] H.fakher eddine ,H.el walid , Etude numérique d'une cavité rectangulaire remplie d'un nanofluide hybride, Université Hamma Lakhdar -El-Oued,2023.

- [17] F.chahir, Etude et comparaison de deux circuits frigorifiques avec et sans nanoparticules, Université badji mokhtar annaba,2019.
- [18] L. Adel, Effet des nano-fluides sur la convection forcée dans conduite de section rectangulaire, Université Larbi Tébessi – Tébessa –,2021.
- [19] R. Zarrit, M. S. Boumaza et B. Belfarhi et A. Laouar ,convection naturelle dans un cavité rectangulaire chauffée différentiellement : influence de l'inclinaiisan ,1955.
- [20] **Ghasemi** , le transfert de chaleur par convection naturelle dans une cavité carrée inclinée remplie du nanofluide Cuo-eau, 2009.
- [21] Lin et Violi, é le transfert de chaleur par convection naturelle et l'écoulement du fluide à température variable dans une cavité remplie du nanofluide Al₂O₃-eau ,2010.
- [22] A. Nada , étudié numérique l'écoulement et le transfert de chaleur dus à la convection naturelle du nanofluide Al₂O₃-eau dans des cavités ondulées ,2011.
- [23] B.Zoubair, W. Abderrahim, R.sehaqui ,Modélisation de l'échange thermique des nanofluides dans une enceinte rectangulaire avec une paroi munie d'un bloc,2015.
- [24] A. Bouhelal, S. Lebbihi, N. Benrachi, A. Smaili ,simulation de la convection naturelle autour d'une source de chaleur localisee au fond d'une enceinte remplie de nanofluide,2016.
- [25] S.ouyahia,Y.benkahila ,W.Berabou,M.benzema ,A.boudiaf, convection naturelle d'un nanofluide confiné dans une enceinte triangulaire : effet du fractionnement et de la position de la source de chaleur, 2017.
- [26] L.Eljamali , M.Zaydan , R.Sehaqui, Effet de la fraction volumique dans une cavité carrée inclinée remplie de nanofluide,2017.
- [27] S. Bekhadra , Dj. Bellakhal and M. Bekhadra, effectué une étude numérique sur le problème de la convection naturelle du nano-fluide (Cu-Eau) ,2020.
- [28]S. El Alami, C.Abdelkhalek et C. Antonio et R .Hassan , Etude numérique de la convection naturelle dans une cavité triangulaire semi – poreuse,2009.
- [29] N. martaj , P. rochelle et L. grosu et R. bennacer et S. savarese , Etude numérique d'un moteur Stirling LTD à régénérateur poreux,2010.
- [30]S.aldossary,A.sakout, M.hassan,CFD simulation of heat transfer enhancement using Al₂O₃-air nanofluide flows in the annulus region between two long concentric cylinders,2022.

CHAPITRE II

- [1] D.Mouhamed Lamine, Étude de la convection naturelle dans une cavité carrée différentiellement chauffée, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2016.
- [2] L. Saci, Refroidissement Par Convection Naturelle D'une Source De Chaleur Localisée Au Fond D'une Enceinte Remplie De Nanofluide, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.

[3] B.Bourhane ,G.Zouhir, Etude Numérique De La Convection Naturelle Dans Une Cavité Rectangulaire Incliné Saturée Par Des Fluides Et Des Nanofluides', Ecole nationale polytechnique de Constantine, 2018.

[4] B.Abd El Malik, Génération D'entropie Due Au Refroidissement Par Convection Naturelle d'un Nanofluide, Université Des Frères Mentouri – Constantine, 2017.

ملخص

تستكشف هذه المذكرة استخدام المحاكاة العددية لتحليل الأداء الحراري لمحرك ستيرلينغ باستخدام مائع نانوي مكون من جزيئات نانوية من Al_2O_3 والهواء. أجريت النمذجة باستخدام برنامج ANSYS FLUENT لدراسة تأثير المعايير الحرارية والديناميكية على كفاءة المحرك. أظهرت النتائج أن زيادة رقم رايلي يعزز الحمل الحراري الطبيعي ونقل الحرارة، وأن إضافة الجزيئات النانوية إلى سائل العمل يعزز هذه التأثيرات. تسلط الدراسة الضوء على أهمية تحسين ظروف التشغيل وتركيبية السائل لتحقيق أقصى أداء لمحرك ستيرلينغ، مما يمهد الطريق لتطبيقات أكثر صديقة للبيئة وفعالية باستخدام مصادر حرارية متجددة.

الكلمات المفتاحية: محرك ستيرلينغ، السوائل النانوي، المحاكاة العددية، انتقال الحرارة، تحسين الأداء

Résumé:

Ce mémoire explore l'utilisation de simulations numériques pour analyser les performances thermiques d'un moteur Stirling, en utilisant un nanofluide composé de nanoparticules d' Al_2O_3 et d'air. La modélisation effectuée avec ANSYS FLUENT a permis d'étudier l'impact des paramètres thermiques et dynamiques sur l'efficacité du moteur. Les résultats ont démontré que l'augmentation du nombre de Rayleigh améliore la convection naturelle et le transfert de chaleur, et que l'ajout de nanoparticules dans le fluide de travail renforce ces effets. L'étude souligne l'importance de l'optimisation des conditions de fonctionnement et de la composition du fluide pour maximiser les performances du moteur Stirling, ouvrant ainsi des perspectives pour des applications plus écologiques et efficaces utilisant des sources de chaleur renouvelables.

Mots clés : Moteur Stirling, Nanofluides, Simulation numérique, Transfert de chaleur, Optimisation des performances.

Abstract:

This memory explores the use of numerical simulations to analyze the thermal performance of a Stirling engine using a nanofluid composed of Al_2O_3 nanoparticles and air. Modeling conducted with ANSYS FLUENT examined the impact of thermal and dynamic parameters on the engine's efficiency. Results demonstrated that increasing the Rayleigh number enhances natural convection and heat transfer, and that adding nanoparticles to the working fluid strengthens these effects. The study highlights the importance of optimizing operating conditions and fluid composition to maximize Stirling engine performance, paving the way for more eco-friendly and efficient applications utilizing renewable heat sources.

Keywords: Stirling engine; Nanofluids; Numerical simulation; Heat transfer; Performance optimization