



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologie
Département des Sciences et Technologie

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologie*

Filière : *Génie des procédés*

Spécialité : *Génie chimique*

Par : **MAKNI Ahmed**

Thème

*Etude comparative de la performance du radiateur
d'automobile de type Toyota B30 par simulation numérique*

Soutenu publiquement le : 13/09 /2018

Devant le jury :

Mr Faouzi AKERMI	maître Assistant A	Univ. Ghardaïa	Président
Mr Rachid DJEFFAL	Chercheur	URAER. Ghardaïa	Examineur
Mr Djemoui LALMI	maître Chercheur B	URAER. Ghardaïa	Examineur
Mme Amel TRABELSI	maître Assistant A	Univ. Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2017/2018



Dédicace

Ce travail modeste est dédié:

*À ma chère mère qui me donne toujours l'espoir de vivre et
qui n'a jamais cessé de prier pour moi.*

À mon cher père.

qui m'a tout donné pour terminer mes études

A

*tous mes proches de la famille, et plus
particulièrement, mes sœurs et mes frères tout à son nom*

Remerciements

Je remercie tout d'abord , le Dieu, le tout puissant qui m'a donné le courage et la patience pour accomplir ce modeste travail.

*J'exprime ma profonde gratitude et reconnaissances à mon encadreur Mme **Amel TRABELSI** d'avoir accepté de diriger ce travail, pour son attention et pour ses conseils avisés. Pour ces aides afin de corriger ce mémoire, ainsi que pour ces orientations très bénéfiques.*

Mes remerciements très sincères s'adressent également aux messieurs les membres de jury:

- Monsieur **Faouzi AKERMI**, Maître assistant A, à l'université de Ghardaia, d'avoir accepté de présider ce jury.*
- Monsieur **Rachid DJEFFAL**, attaché de recherche, à URAER de Ghardaia, d'avoir accepté d'examiner ce travail.*
- Monsieur **Djemoui LALMI**, Maître de recherche, à URAER de Ghardaia, de m'avoir fait l'honneur d'examiner et juger ce travail.*

J'adresse mes vifs remerciements à tous mes enseignants de la faculté des sciences et technologie pour leur contribution à ma formation de graduation et post-graduation, et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

*Je remercie également tous les travailleurs de l'**entreprise SONERAS** et tous les professeurs et chercheurs, qui m'ont aidé à l'unité de recherche appliquée aux énergies renouvelables de Ghardaïa. Je mentionne surtout Mr **Djemoui LALMI**.*

*Un remerciement chaleureux est adressé à Monsieur **Mehdi OULAD KOUIDER**, qui m'a ouvert les portes pour tenter cette expérience et réaliser ce travail.*

Résumé :

Dans ce travail, nous présentons une étude numérique du phénomène de convection dans un radiateur d'automobile, qui constitue la partie principale du système de refroidissement du véhicule.

On a étudié un modèle réel de type Toyota B30, fabriqué au niveau de la société SONERAS afin d'évaluer la performance de ce dernier, en faisant varier la géométrie des tubes comme paramètre d'étude.

Les équations qui régissent ce phénomène ont été résolues par une approche numérique, basée sur la méthode des volumes finis, en utilisant le code CFD fluent, inclus dans Ansys 18.1, pour différents nombres de Reynolds allant de 1000 jusqu'à 7000.

Les effets de ces paramètres sur les champs thermiques et dynamiques, et sur le taux de transfert de chaleur sont présentés dans cette étude.

Mots clés : Convection, transfert thermique, simulation numérique, radiateur, échangeur compact, ailette, turbulence.

Abstract :

In this work, we present a numerical study of the phenomenon of convection in an automobile radiator, which constitutes the main part of the cooling system of the vehicle.

A real model of the Toyota B30 type, manufactured at SONERAS company, was studied in order to evaluate the performance of the radiator, by varying the geometry of the tubes as a parameter of study.

The equations that govern this phenomenon have been solved by a numerical approach, based on the finite volume method, using the fluent CFD code, included in Ansys 18.1, for different Reynolds numbers ranging from 1000 to 7000.

The effects of these parameters on the thermal and dynamic fields, and on the rate of heat transfer are presented in this study.

Keywords: Convection, heat transfer, numerical simulation, radiator, compact exchanger, fin, turbulence.

ملخص:

في هذا العمل نقدم دراسة حسابية لظاهرة الحمل الحراري في مبرد السيارات، والذي يشكل الجزء الرئيسي من نظام التبريد للمركبة.

تمت دراسة النموذج الحقيقي لنوع تويوتا B30، الذي تم تصنيعه من طرف شركة SONERAS، من أجل تقييم أداء هذا الأخير، من خلال تغيير هندسة الأنابيب كمعامل للدراسة.

حل المعادلات التي تحكم هذه الظاهرة ثم باستعمال طريقة الأحجام المنتهية لأعداد مختلفة من رينولدز يتراوح من 1000 إلى 7000، باستخدام برنامج Fluent، المدمج في Ansys 18.1.

يتم عرض آثار هذه المعاملات على الحقول الحرارية والديناميكية، وعلى معدل نقل الحرارة في هذه الدراسة.

الكلمات المفتاحية: الحمل الحراري، نقل الحرارة، المحاكاة الرقمية، المبرد، المبادل المدمج، الزعنف، الاضطراب.

Liste des figures

Figure (I-1) : Etat d'équilibre thermodynamique d'un système.....	4
Figure (I-2) : Transfert thermique par convection entre la paroi chaude et le fluide froid	6
Figure (I-3) : Echangeur monotube en serpentins.....	11
Figure (I-4) : Echangeur coaxial.....	11
Figure (I-5) : Echangeur à tubes séparés.....	12
Figure (I-6) : Echangeur à tubes rapprochés.....	12
Figure (I-7) : Echangeur à tubes et calandre.....	13
Figure (I-8) : Echangeur à plaques.....	13
Figure (I-9) : Plaques corruguées d'un échangeur à plaques.....	14
Figure (I-10) : Echangeur à courants croisés.....	15
Figure (I-11) : Ailettes continues et indépendantes pour les tubes.....	15
Figure (I-12) : Principaux composants du circuit de refroidissement d'un moteur d'automobile.....	18
Figure (I-13) : Radiateur avec ailettes planes, type Toyota B30.....	19
Figure (II-1) : Systèmes fabriqués par SONERAS.....	22
Figure (II-2-a) : Radiateur normal de Toyota b30.....	23
Figure (II-2-b) : Radiateur normal modélisé ANSYS 19.1.....	24
Figure (II-3-a) : Ailettes planes fabriquées à SONERAS.....	24
Figure (II-3-b) : Ailette plane modélisée sous ANSYS 19.0	24
Figure (II-4) : Dimensions réelles du radiateur étudiée	25
Figure (II-5) : Configuration physique en 2D sous ANSYS 18.1.....	26
Figure (II-6) : Schéma du maillage utilisé.....	31
Figure (II-7) : Interface générale de l'ANSYS.....	32
Figure (II-8) : Interface de Fluent.....	34
Figure (III-1) : Variation du nombre de Nusselt en fonction du nombre des nœuds.....	37

Liste des figures

Figure (III-2) : Variation du nombre de Nusselt moyen pour différents nombres de Reynolds.....	38
Figure (III-3): Contours de température pour $Re=4000$	39
Figure (III-4): Contours de vitesse pour $Re=4000$	40
Figure (III-5) : Profil de vitesse à travers l'ailette	40
Figure (III-6-a-b-c-d) : Contours de température pour différents nombres de Reynolds....	42
Figure (III-7-e-f-g-h) : Contours de vitesse pour différents nombres de Reynolds.....	44
Figure (III-8): Différentes géométries des tubes à étudier.....	44
Figure (III-9) : Variation du nombre de Nusselt moyen pour différents nombres de Reynolds pour la forme carrée.....	46
Figure (III-10) : Contours de température pour $Re =1000, 4000$ et 7000	47
Figure (III-11) : Contours de vitesse pour $Re =1000, 4000$ et 7000	49
Figure (III-12) : Variation du nombre de Nusselt moyen pour différents nombres de Reynolds pour la forme triangulaire.....	49
Figure (III-13) : Contours de température pour $Re =1000, 4000$ et 7000	51
Figure (III-14) : Contours de vitesse pour $Re =1000, 4000$ et 7000	52
Figure (III-15) : Variation du nombre de Nusselt moyen pour différents nombres de Reynolds pour la forme circulaire.....	53
Figure (III-16) : Contours de température pour $Re =1000, 4000$ et 7000	54
Figure (III-17) : Contours de vitesse pour $Re =1000, 4000$ et 7000	56
Figure (III-18) : Variation du nombre de Nusselt moyen pour les différentes formes.....	57
Figure (III-19) : Différents contours de températures pour les différentes géométries étudiées pour $Re=4000$	58
Figure (III-20) : Différents contours de vitesses pour les différentes géométries étudiées pour $Re=4000$	59

Liste des tableaux

Tableau (II-1) : Caractéristiques de l'air a $T = 300K$	29
Tableau (II-2) : Différentes formes de maillage des faces	31
Tableau (III-1) : Optimisation du maillage.....	36
Tableau (III-2) : Dimension de différentes géométrie étudiées	45

Listes des abréviations

<i>Symbole</i>	<i>Description</i>	<i>Unité</i>
φ	<i>Flux de chaleur transmis par conduction</i>	<i>(W)</i>
λ	<i>conductivité thermique</i>	<i>(W m⁻¹ °C⁻¹) (W m⁻¹ K⁻¹)</i>
X	<i>Variable d'espace dans la direction du flux</i>	<i>(mm)</i>
S	<i>Aire de la section de passage du flux de chaleur</i>	<i>(mm²)</i>
T_s	<i>la température absolue de la surface</i>	<i>°C ou K</i>
σ	<i>constante de Stefan-Boltzmann</i>	<i>($\sigma = 5.6697 \cdot 10^{-8}$ W m⁻² K⁻⁴)</i>
ε	<i>l'émissivité</i>	<i>varie entre 0 et 1</i>
D_h	<i>Diamètre hydraulique du canal</i>	<i>mm</i>
g	<i>Accélération la pesanteur</i>	<i>m.s⁻²</i>
x	<i>Coordonnée cartésienne selon l'axe (ox)</i>	<i>mm</i>
y	<i>Coordonnée cartésienne selon l'axe(oy)</i>	<i>mm</i>
z	<i>Coordonnée cartésienne selon l'axe (oz)</i>	<i>mm</i>
p	<i>Pression</i>	<i>Pa</i>
t	<i>Temps</i>	<i>s</i>
V	<i>vitesse</i>	<i>m/s</i>
H	<i>hauteur</i>	<i>mm</i>
L	<i>longueur</i>	<i>mm</i>
l	<i>largueur</i>	<i>mm</i>

NOMBRES SANS DIMENSION

<i>Symbole</i>	<i>Description</i>
<i>Re</i>	<i>Nombre de Reynolds</i>
<i>Nu</i>	<i>Nombre de Nusselt</i>
<i>Pr</i>	<i>Nombre de Prandtl</i>
<i>Ra</i>	<i>Nombre de Rayleigh</i>
<i>Gr</i>	<i>Nombre de Grashof</i>

INDICES ET EXPOSANTS

<i>CFD</i>	<i>Computational fluid dynamics</i>
<i>EDP</i>	<i>Equation aux dérivées partielles</i>
<i>VFCN</i>	<i>Volumes finis centré aux nœuds</i>
<i>VFCE</i>	<i>Volumes finis centrés aux éléments</i>

Table des matières

Dédicace

Remerciement

Résumé

Listes des figures

Listes des tableaux

Listes des abréviations

Introduction générale1

Chapitre I : Généralités et synthèse bibliographique

I-1- Introduction :.....3

I-2- Modes de transfert de chaleur3

I-2-1- La conduction :.....4

I-2-2- La convection :.....5

I-2-3- Le rayonnement :.....6

I-3- Les échangeurs de chaleur7

I-3-1- Domaines d'applications des échangeurs :.....7

I-3-2- Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur:.....7

I-3-3- Critères de classement des échangeurs :.....8

I-3-3-1- Type de contact :.....8

I-3-3-2- Classement suivant les types d'échange :.....8

I-3-3-3- Classement suivant la disposition des écoulements :.....9

I-3-3-4- Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange :.....9

I-3-3-5- Classement suivant la compacité de l'échangeur :.....9

I-3-4- Différentes configurations géométriques des échangeurs de chaleur :.....9

I-3-4-1- Les échangeurs de chaleur tubulaires :.....10

I-3-4-1-1- Echangeur monotube10

I-3-4-1-2- Echangeur bitube ou coaxial :.....11

I-3-4-1-3- Echangeurs multitubulaires :.....11

I-3-4-2- Les échangeurs de chaleur à plaques:.....13

I-3-4-3- Les échangeurs à ailettes:.....	14
I-4- Système de refroidissement du moteur d'automobile	15
I-4-1- Rôle du système de refroidissement:.....	16
I-4-2- Principaux éléments d'un système de refroidissement dans un véhicule :.....	16
I-4-3- Fonctionnement d'un radiateur d'automobile:.....	18
I-5-Conclusion	19

Chapitre II : Matériels et méthodes

II-1- Introduction :.....	20
II-2- Présentation de l'entreprise SONERAS :.....	20
II-2-1- Historique:.....	20
II-2-2- Domaines d'activité de SONERAS :.....	21
II-3-Modèle physique et formulation mathématique :.....	23
II-3-1-Description du problème :.....	23
II-3-2- Equations du modèle mathématique :.....	26
II-3-2-1- Equation de continuité :.....	27
II-3-2-2- Equation de quantité de mouvement (ou équation de Navier-Stokes) :.....	27
II-3-2-3- Equation de l'énergie :.....	27
II-3-3- Hypothèses simplificatrices :.....	28
II-3-4- Conditions aux limites :.....	28
II-4- Résolution numérique :.....	29
II-4-1- Principe de la méthode des volumes finis :.....	30
II-4-2- Choix du maillage :.....	30
II-4-3- Présentation des logiciels ANSYS et Fluent :.....	31
II-4-3-1- Présentation du préprocesseur ANSYS :.....	31
II-4-3-1-1-Interface de l'ANSYS :.....	32
II-4-3-1-2- Principaux produits.....	33
II-4-3-2-Code Fluent :.....	33
II-4-3-2-1-Interface du code Fluent :.....	34
II-4-3-2-2- Etapes à suivre pour la simulation numérique par Fluent :.....	35
II-5- Conclusion :.....	35

Chapitre III : Résultats et discussion

III-1- Introduction.....	36
III-2- Etude du maillage :.....	36

III-3-Résultats :	37
III-3-1-Etude thermique et dynamique du modèle réel du radiateur d'automobile Toyota B30 avec tubes sous forme rectangulaire :.....	37
III-3-1-1-Etude de l'influence du nombre de Reynolds (Re) sur l'échange thermique :...37	
III-3-1-2-Etude de l'influence du nombre de Reynolds (Re) sur les champs thermique et dynamique :.....	38
III-3-2-Etude comparative de plusieurs formes des tubes du radiateur Toyota B30 :.....	44
III-3-2-1-Etude de l'influence du nombre de Reynolds (Re) sur les champs thermique et dynamique et sur l'échange thermique de l'écoulement:.....	45
III-3-2-1-1- Forme carré :.....	46
III-3-2-1-2- Forme triangulaire :.....	49
III-3-2-1-3- Forme circulaire.....	53
III-4- Conclusion	59
Conclusion général.....	60

Références bibliographiques

Annexes

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, la maîtrise des énergies en diminuant la consommation énergétique constitue un enjeu majeur à l'échelle nationale et internationale, en particulier l'habitat et le transport[1].

Cependant, aujourd'hui, l'énergie fournie par de telles sources est beaucoup trop faible pour assurer une consommation énergétique suffisante [1]. Il s'avère donc nécessaire d'optimiser notre consommation d'énergie afin de préserver nos ressources naturelles et de diminuer le rejet des gaz à effet de serre, qui nuit à l'environnement.

Dans le secteur de l'habitat, la principale utilisation de l'énergie concerne le confort, à savoir le chauffage en hiver et la climatisation en été. Le chauffage et la climatisation entraînent des écoulements de convection naturelle et mixte très importants dans le confort thermique de l'habitation [1].

Dans le domaine des transports, les moteurs diesel restent un défi important pour assurer le bon fonctionnement de certains équipements et véhicules.

Par conséquent, afin d'optimiser ces systèmes, il devient important de connaître les écoulements de convection (naturelle, forcée ou mixte) induits par le chauffage/climatisation de l'habitat ou le refroidissement d'un moteur thermique [2]. Ces phénomènes sont inclus dans la science de transmission de la chaleur, qui a subi une étude intensive pour satisfaire les exigences des autres technologies nucléaires, solaires...etc. C'est pour cette raison, il est devenu indispensable à tout ingénieur, quel que soit le domaine où il sera appelé, à œuvrer de posséder de bonnes connaissances des lois de transfert thermique.

Les problèmes de transfert thermique jouent un grand rôle dans les applications techniques, soit que les échanges doivent être importants et rapides, soit que, au contraire, on cherche à obtenir un excellent isolement thermique [3].

Parmi les équipements thermiques, qui illustrent les phénomènes de convection, on peut citer les échangeurs de chaleur, qui sont utilisés dans de nombreux domaines à savoir (automobile, fusée, moteur Stirling, centrale nucléaire, centrale thermique, etc). Ils sont des éléments omniprésents dans toutes les industries et existent en différents modèles.

L'intérêt considérable de fabriquer des échangeurs de plus en plus compacts a conduit à rechercher des techniques d'intensification des échanges de chaleur entre une source chaude et une source froide, en outre, à réaliser des programmes et des logiciels de simulation qui peuvent illustrer le comportement des fluides lors de l'écoulement.

Dans le domaine de l'automobile, les radiateurs sont des échangeurs de chaleur à tubes à ailettes compacts, utilisés pour le refroidissement des moteurs à combustion interne. Ces dispositifs maintiennent principalement la température du moteur à un niveau optimal afin d'éviter les risques de surchauffe susceptible de causer des dommages irréversibles au moteur du véhicule et l'image de marque du constructeur du radiateur [4] [5].

L'objectif de notre travail consiste à étudier numériquement un modèle de radiateur d'automobile, de type Toyota B30, fabriqué au niveau de la société SONERAS, située à la wilaya de Ghardaïa. Comme paramètres d'étude, on a varié la forme des tubes, où circulent l'eau de refroidissement pour différents nombres de Reynolds, entre 1000 et 7000. On a effectué par la suite une étude comparative afin d'évaluer le taux de l'échange thermique pour chaque forme de tube choisie pour avoir une bonne performance de l'échangeur.

Le présent mémoire est structuré en trois chapitres et clôturé par une conclusion générale. Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique, englobant des notions générales sur les échangeurs de chaleur et le système de refroidissement dans un radiateur d'automobile.

La présentation du code Fluent et le modèle physique, ainsi que la méthode numérique qui a été utilisé pour la résolution du problème sont donnés dans le deuxième chapitre.

Dans le troisième chapitre, les interprétations des divers résultats de l'influence de la géométrie des tubes sur le taux de transfert de chaleur, ainsi que les profils de vitesse et de température ont été données.

Le mémoire est terminé par une synthèse générale et des recommandations pour les études futures.

Chapitre I
Généralités et recherches
bibliographiques

I-1- Introduction :

Les différents procédés utilisés au niveau de l'industrie sont très souvent le siège d'échanges de chaleur.

La transmission d'énergie, et en particulier la chaleur a une importance déterminante pour l'étude et le fonctionnement d'appareils thermiques, tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs, les évaporateurs, les condenseurs...etc., mais aussi pour les opérations de transformations chimiques [6].

Le but recherché est d'avoir un rendement maximal ou une meilleure efficacité de dispositifs d'échange thermique avec le moindre coût de l'installation et des pertes d'énergie minimales

Les problèmes de transfert de chaleur sont nombreux et on peut les identifier et les illustrer par plusieurs exemples, liés à notre vie quotidienne.

Le radiateur d'automobile est un meilleur exemple pour prouver les phénomènes de convection naturelle et forcée à travers un circuit de refroidissement du moteur d'un véhicule, qui est un échangeur de chaleur compact que l'on va étudier dans ce mémoire.

I-2- Modes de transfert de chaleur :

Le transfert de chaleur est le processus irréversible, par lequel l'énergie est échangée sous forme de chaleur entre des corps ou des milieux à des températures différentes.

Un transfert de chaleur au sein d'un système ne se produit que s'il existe des gradients de température entre les différentes parties de ce même système, ce qui implique que celui-ci n'est pas en équilibre thermodynamique (la température n'est pas uniforme dans tout le système). Au cours de la transformation du système vers un état d'équilibre final, la température va évoluer à la fois en temps et en espace. Le but de l'analyse des transferts de chaleur est d'identifier quels sont les modes de transfert mis en jeu au cours de la transformation et de déterminer quantitativement comment varie la température en chaque point du système au cours du temps [7].

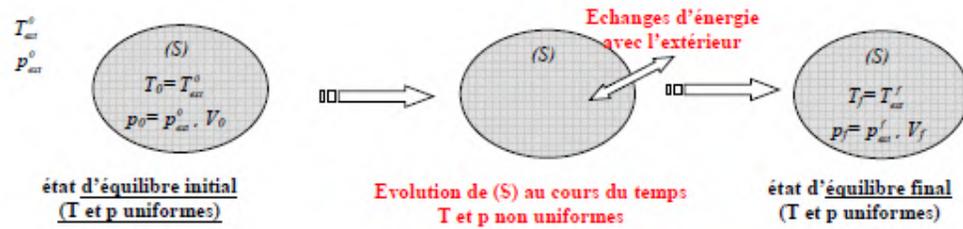


Figure (I-1) : Etat d'équilibre thermodynamique d'un système [2]

Dans l'étude du transfert thermique, on distingue trois modes de transmission de la chaleur: la conduction, la convection et le rayonnement. Le premier phénomène, la conduction, a lieu dans les solides. La convection se rencontre spécialement dans les fluides. L'apport de chaleur par rayonnement peut avoir lieu dans tous les milieux transparents aux ondes électromagnétiques. En réalité la distribution de la température, dans un milieu, est la conséquence des effets de ces trois modes de transfert thermique ; il est impossible d'isoler un mode de transfert thermique d'un autre mode. Pourtant, pour la simplicité de l'étude, on considère ces modes de transfert thermique séparément. Par exemple, on peut étudier la conduction couplée avec la convection et on néglige le rayonnement [3].

I-2-1- La conduction :

La conduction thermique est le phénomène de transport de la chaleur mis en jeu dans les solides ; elle est également présente dans les liquides immobiles et à un moindre degré dans les gaz. Le phénomène microscopique (à l'échelle atomique) intervenant dans la conduction thermique est la propagation de l'agitation thermique des particules des zones plus chaudes vers des zones plus froides [3]. Le mécanisme microscopique consiste dans la vibration moléculaire ou atomique (liquides, gaz) et la vibration cristalline, ainsi que dans le déplacement des électrons libres (métaux). La conduction thermique est donc le phénomène par lequel l'énergie est transférée des zones à haute température vers des zones à basse température.

Le résultat de ce mécanisme de transfert est un flux de chaleur dans la direction opposée au gradient de température, ce flux sera d'autant plus important que la différence de température sera grande et le milieu sera conducteur.

La conduction thermique est régie par la loi de J. Fourier qui s'écrit comme suit [8]:

$$\vec{\varphi} = -\lambda S \text{ grad } (T) \quad \dots\dots\dots (I. 1)$$

Ou sous forme algébrique pour un cas monodimensionnel :

$$\varphi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (I. 2)$$

Avec :

φ : Flux de chaleur transmis par conduction (W)

λ : Coefficient de proportionnalité, appelé conductivité ou conductibilité thermique du milieu ($\text{W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) ou ($\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$)

x : Variable d'espace dans la direction du flux (m)

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2) ou surface d'échange

I-2-2- La convection :

La convection est le mécanisme le plus important de transfert de chaleur entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure (Figure I-2) s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules adjacentes du fluide. La chaleur ainsi transmise sert à faire augmenter la température et l'énergie interne de ces molécules. Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules situées dans une région à une température inférieure et transférer une partie de leur énergie. Dans ce cas, l'écoulement transporte le fluide et l'énergie. L'énergie est, à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement [1] [8].

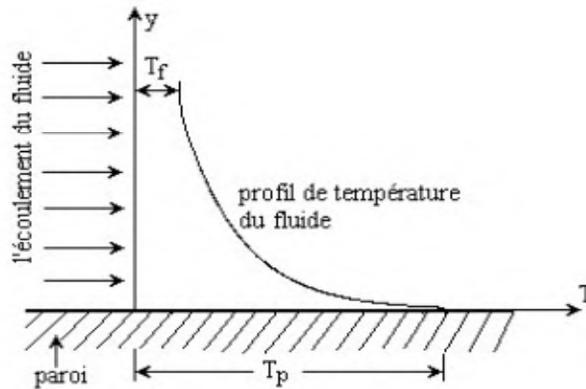


Figure (I-2) : Transfert thermique par convection entre la paroi chaude et le fluide froid [3]

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre ou convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dus simplement aux différences de température, on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre, si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée [1] [8].

On peut exprimer la quantité de chaleur transmise par convection entre une paroi solide et un fluide au moyen de **la loi de Newton** :

On écrit :

$$\varphi = hS(T_p - T_\infty)$$

..... (I. 3)

Où h : est le coefficient d'échange thermique par convection ou coefficient de convection, exprimé en $[W/m^2.K]$. S est la section d'échange en $[m^2]$.

I-2-3- Le rayonnement :

Tous les corps émettent de l'énergie à cause de leur température et cette énergie émise s'appelle le rayonnement thermique.

L'énergie rayonnée par un corps est émise dans l'espace sous forme d'ondes électromagnétiques selon la théorie de Maxwell (la théorie classique des ondes électromagnétiques) ou sous forme discrète de photons selon les hypothèses de Planck.

Les deux concepts ont été utilisés pour l'étude du transfert thermique par rayonnement. On peut donner des exemples de rayonnement : le rayonnement solaire, le rayonnement d'un radiateur infrarouge, d'un filament d'une lampe à incandescence, le rayonnement de l'arc électrique...etc.

L'émission ou l'absorption de l'énergie de rayonnement par un corps est un processus en bloc ; c'est-à-dire, le rayonnement provenant de l'intérieur du corps est émis par la surface. Réciproquement, l'incident de rayonnement sur la surface d'un corps pénètre à la profondeur du milieu où il est atténué sur une distance très courte de la surface, on peut parler donc du rayonnement comme étant absorbé ou émis par la surface.

Tous les corps qui émettent du rayonnement absorbent également celui qu'ils reçoivent.

Certains corps absorbent intégralement le rayonnement incident ; ils sont appelés "corps noirs" et constituent donc les corps idéaux. D'autres corps, les "corps gris", n'absorbent qu'une fraction du rayonnement incident [3].

Le flux émis par rayonnement d'une surface est donné par la loi de Stephan-Boltzmann :

$$\varphi = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (W)$$

..... (I. 4)

T_s : est la température absolue de la surface

σ : est la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

ε : est l'émissivité qui varie entre 0 et 1 (pour tous les corps réels ε est inférieure à 1).

I-3- Les échangeurs de chaleur :

Dans les installations industrielles, il est souvent nécessaire d'apporter une quantité de chaleur importante à une partie du système. Dans la majorité des cas, la chaleur est transmise à travers un échangeur de chaleur. On estime à 90% la part des transferts d'énergie, réalisés par les échangeurs de chaleur dans l'industrie [9].

Le transfert de chaleur qui a lieu au sein d'un échangeur fait intervenir le mode convectif dans chacun des deux fluides et le mode conductif à travers la paroi, qui les séparent. Généralement, le rayonnement est faible et sera négligé.

I-3-1- Domaines d'applications des échangeurs :

Les échangeurs de chaleur sont utilisés principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agroalimentaire, production d'énergie, etc.), les raffineries, du transport (automobile, aéronautique), mais aussi dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, etc.).

I-3-2- Principe de fonctionnement d'un échangeur de chaleur:

Le principe le plus général consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduits qui les mettent en contact thermique. Les deux fluides sont mis en contact thermique à travers une paroi qui est le plus souvent métallique, ce qui favorise les échanges de chaleur. On a en

général un fluide chaud qui cède de la chaleur à un fluide froid. En d'autres termes, le fluide chaud se refroidit au contact du fluide froid et le fluide froid se réchauffe au contact du fluide chaud. Les deux fluides échangent de la chaleur à travers la paroi d'où le nom de l'appareil.

Le principe général est simple, mais il donne lieu à un grand nombre de réalisations différentes par la configuration géométrique. Le principal problème consiste à définir une surface d'échange suffisante entre les deux fluides pour transférer la quantité de chaleur nécessaire dans une configuration donnée. La quantité de chaleur transférée dépend de la surface d'échange entre les deux fluides mais aussi de nombreux autres paramètres, ce qui rend une étude précise de ces appareils assez complexe [10].

Les flux de chaleurs transférées dépendent aussi :

- des températures d'entrée,
- des caractéristiques thermiques des fluides (chaleurs spécifiques, conductivité thermique),
- des coefficients d'échange par convection.

I-3-3- Critères de classement des échangeurs :

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs. Les principaux sont les suivants [11]:

I-3-3-1- Type de contact :

- **Echangeurs à contact direct** : le type le plus simple comprend un récipient ou canalisation dans lequel les deux fluides sont directement mélangés et atteignent la même température finale.
- **Echangeurs à contact indirect** : les deux fluides s'écoulent dans des espaces séparés par une Paroi.

I-3-3-2- Classement suivant les types d'échange :

Echangeur sans changement de phase :

Les échangeurs de chaleur sans changement de phase correspondent aux échangeurs dans lesquels l'un des fluides se refroidit pour réchauffer le deuxième fluide sans qu'il y ait un changement de phase. Les températures des fluides sont donc variables, tout le long de l'échangeur.

Echangeur avec changement de phase:

Les échanges avec changement de phase sont caractérisés par trois cas différents:

1- l'un des fluides se condense alors que l'autre se vaporise : ces échangeurs sont rencontrés dans les machines frigorifiques.

2- le fluide secondaire se vaporise en recevant de la chaleur du fluide primaire, lequel ne subit pas de changement d'état. Ils sont appelés évaporateurs.

3- le fluide primaire se condense en cédant sa chaleur latente au fluide secondaire plus froid, lequel ne subit pas de transformation d'état.

I-3-3- Classement suivant la disposition des écoulements :

Dans les échangeurs à fluide séparés, les modes de circulation des fluides peuvent se ranger en deux catégories :

- ❖ Même sens « co-courants »,
- ❖ Sens contraire « contre-courant ».

Il y a le cas où les vecteurs vitesses sont perpendiculaires l'un à l'autre, il s'agit cette fois de « courant croisés ».

I-3-3-4- Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange :

On retiendra deux types de paroi :

- les échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux : superalliages, métaux ou alliages réfractaires ;
- les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, graphite, verre, etc.

I-3-3-5- Classement suivant la compacité de l'échangeur :

La compacité est définie par le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur. R.K. Shah propose qu'un échangeur soit considéré comme compact si sa compacité est supérieure à $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$; cette valeur est susceptible de varier de 500 à $800 \text{ m}^2/\text{m}^3$ [13].

I-3-4- Différentes configurations géométriques des échangeurs de chaleur :

Les échangeurs de chaleur sont des appareils permettant de transférer de la chaleur entre deux fluides à des températures différentes. Dans la plupart des cas, les deux fluides ne sont pas en contact dont il est le cas de notre étude, et le transfert s'effectue à travers une surface d'échange.

Dans de nombreux cas, les fluides restent monophasiques, qu'ils soient gazeux ou liquides. Il existe toutefois trois grandes catégories d'échangeurs dans lesquelles surviennent des changements de phase : les **vaporiseurs** ou **évaporateurs** où l'on vaporise un liquide, les **condenseurs** où une vapeur est liquéfiée, et les **vapocondenseurs** dans lesquels les deux fluides changent de phase [12].

Dans la pratique, les échangeurs de chaleur utilisés dans les systèmes énergétiques peuvent être classés de la manière suivante :

1- Les échangeurs par mélange ou à contact direct (fluide intimement mélangé).

Exemples d'équipements : les désurchauffeurs de vapeur, les dégazeurs, les tours de refroidissement ...etc.

2- Les régénérateurs ou les échangeurs discontinus, la surface d'échange est alternativement mise en contact avec le fluide froid et le fluide chaud

Exemples d'équipements: réchauffeurs d'air rotatifs.

3-Il y a aussi le type qui nous intéresse de plus, c'est les échangeurs continus, les deux fluides circulent de manière continue de part et d'autre de la surface d'échange. Dans cette catégorie, on distingue:

- les échangeurs tubulaires,
- les échangeurs à plaques,
- les échangeurs à ailettes.

I-3-4-1- Les échangeurs de chaleur tubulaires :

Pour des raisons historiques et économiques, les échangeurs utilisant des tubes comme constituant principal de la paroi d'échange sont les plus répandus. On peut distinguer trois catégories en fonction du nombre de tubes et de leur arrangement, qui autorisent une surface d'échange croissante entre les deux fluides [13]:

I-3-4-1-1- Echangeur monotube :

Dans ce type d'échangeur, le tube est placé à l'intérieur d'un réservoir et a généralement la forme d'un serpentín ou d'un drapeau (Voir la figure (I-3)).



Figure (I-3) : Echangeur monotube en serpentin [13]

I-3-4-1-2- Echangeur bitube ou coaxial :

Dans cette catégorie, les deux tubes sont concentriques et l'échangeur est souvent cintré pour limiter son encombrement ; en général, le fluide chaud ou le fluide à haute pression s'écoule dans le tube intérieur [10] [13].

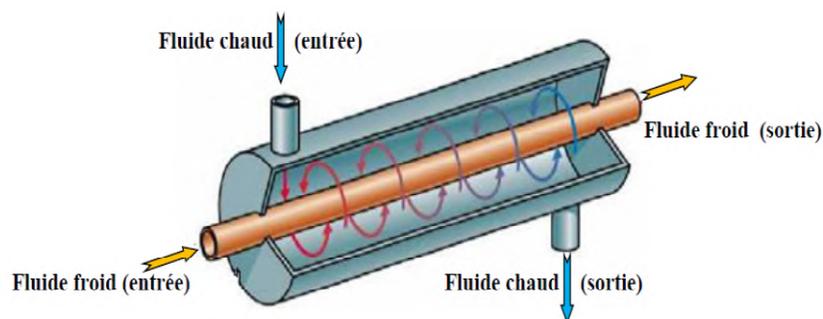


Figure (I-4) : Echangeur coaxial [10]

I-3-4-1-3- Echangeurs multitubulaires :

Ce type d'échangeurs existe sous plusieurs formes, on distingue [13] :

- **Echangeur à tubes séparés :**

À l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant (de l'ordre de 100 mm) se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre (8 à 20 mm), maintenus écartés par des entretoises. L'échangeur peut être soit rectiligne, soit enroulé.



Figure (I-5) : Echangeur à tubes séparés [13]

- **Echangeur à tubes rapprochés :**

Pour maintenir les tubes et obtenir un passage suffisant pour le fluide extérieur au tube, on place un ruban ou un fil, enroulé en spirale autour de certains d'entre eux. Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans. Ils peuvent être soit lisses, soit ailetés, ces derniers permettent d'améliorer le coefficient d'échange thermique.

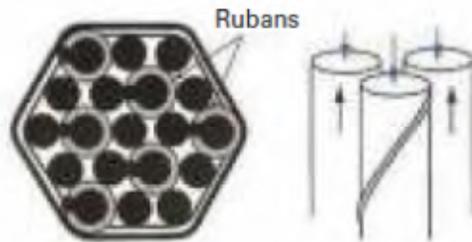


Figure (I-6) : Echangeur à tubes rapprochés [13]

- **Echangeur à tubes et calandre:**

C'est le type d'échangeur le plus répandu dans les industries surtout pétrolières, mais la part qu'il représente ne cesse de diminuer au profit de configurations plus efficaces. Dans ce type d'échangeur, l'un des fluides circule dans un réservoir autour de tubes qui le traversent tandis que l'autre fluide circule à l'intérieur des tubes. Le modèle le plus courant est constitué d'un faisceau de tubes traversant un réservoir de manière longitudinale. D'où l'appellation d'échangeur multitubulaire. Des parois bien placées permettent de forcer la circulation du fluide à travers les tubes de manière à ce qu'il effectue un ou même plusieurs allers-retours. On trouve assez fréquemment des chicanes dans le réservoir pour forcer aussi la circulation du fluide à travers tout le réservoir sans quoi le fluide aurait tendance à prendre le plus court chemin entre l'entrée et la sortie [10] [14]. On peut trouver d'autres classifications dans ce même type d'échangeur.

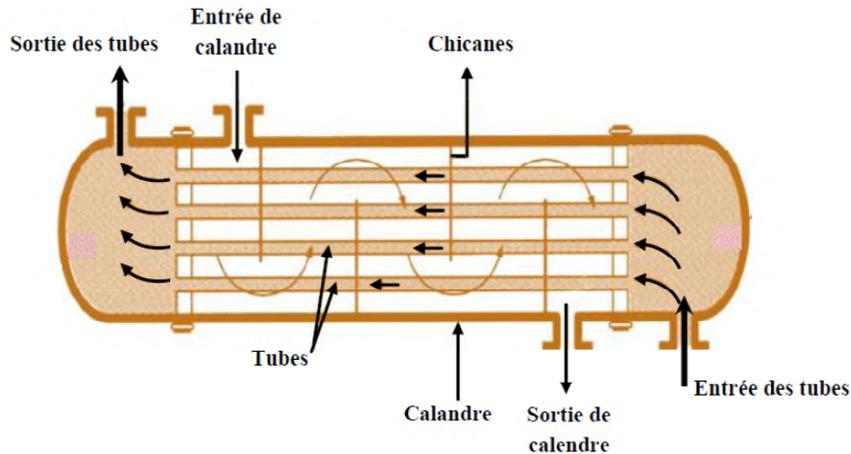


Figure (I-7) : Echangeur à tubes et calandre [10]

I-3-4-2- Les échangeurs de chaleur à plaques:

Les échangeurs à plaques sont constitués de plaques, assemblées de façon que le fluide puisse circuler entre elles. La distribution des fluides entre les plaques est assurée par un jeu de joints de telle sorte que chacun des deux fluides soit envoyé alternativement entre deux espaces inter-plaques successifs. Les fluides peuvent ainsi échanger de la chaleur à travers les plaques. L'avantage principal de ce type d'échangeur est la compacité, qui fournit une grande surface d'échange dans un volume limité, ce qui est particulièrement utile lorsque des puissances importantes doivent être échangées.

Les échangeurs à plaques sont très utilisés dans l'industrie agroalimentaire (processus de pasteurisation du lait) ou l'industrie nucléaire. Les plaques sont généralement en acier inoxydable, en particulier dans l'agroalimentaire pour des raisons évidentes d'hygiène et de santé publique [14] [10].

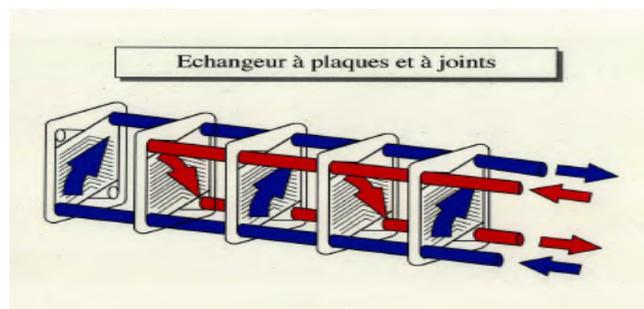


Figure (I-8) : Echangeur à plaques [10] [14]

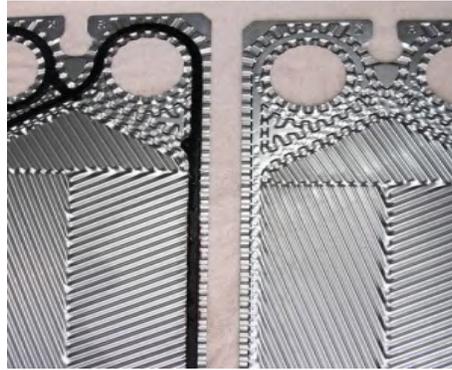


Figure (I-9) : Plaques corruguées d'un échangeur à plaques [13]

I-3-4-3- Les échangeurs à ailettes:

Dans ce type d'échangeur, une circulation de l'un des fluides est dans une série de tubes alors que l'autre circule perpendiculairement autour des tubes. C'est pour cette raison, ils sont appelés échangeurs à courants croisés. Généralement, c'est le liquide qui circule dans les tubes et le gaz à l'entour. Les tubes munis d'ailettes permettent un bon transfert de chaleur échangé en augmentant la surface d'échange. Ces ailettes constituent le composant essentiel dans les échangeurs parce qu'elles augmentent la turbulence au cours de l'échange thermique afin d'améliorer l'efficacité et la performance de l'échangeur.

Le radiateur de refroidissement des véhicules à moteur est un exemple de cet échangeur [10].

Les échangeurs tubulaires à ailettes, appelés batteries à ailettes sont employés pour la climatisation, le chauffage, le conditionnement d'air, la récupération de chaleur,...etc. On rencontre dans les diverses branches les batteries à ailettes continues et les batteries à ailettes indépendantes [15].

- ✚ Les ailettes continues sont traversées par plusieurs tubes. De forme généralement rectangulaire, elles peuvent être planes ou ondulées ; l'ondulation provoque une perturbation de l'écoulement qui améliore l'échange thermique.
- ✚ Les ailettes indépendantes sont traversées par un seul tube. Elles peuvent être pleines ou segmentées [13].

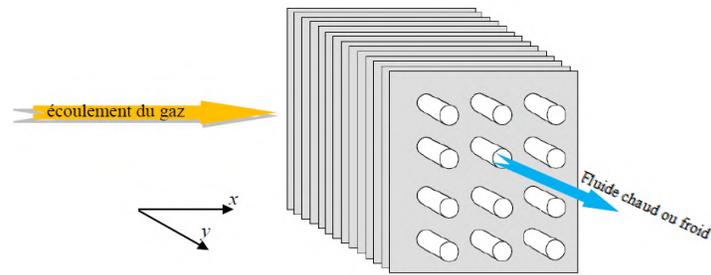


Figure (I-10) : Echangeur à courants croisés [10]

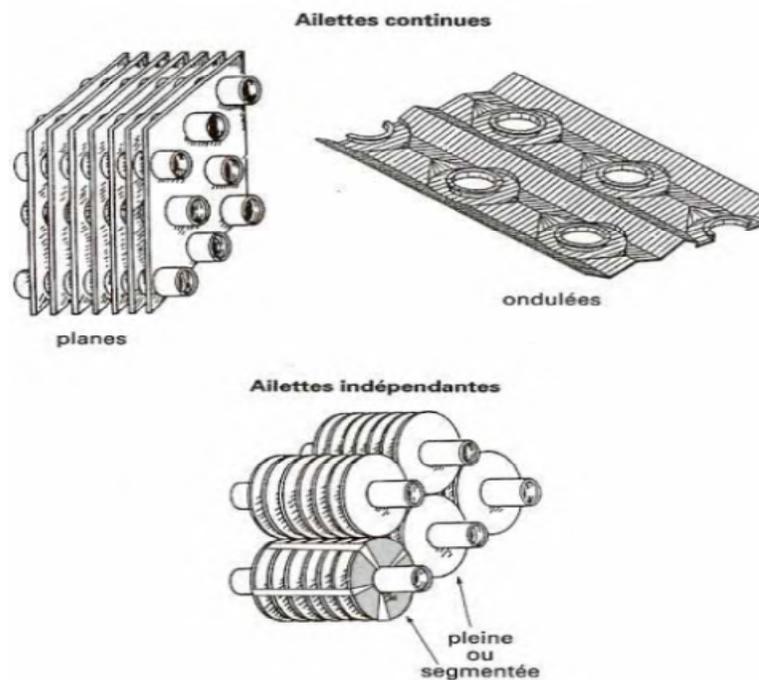


Figure (I-11) : Ailettes continues et indépendantes pour les tubes [13]

I-4- Système de refroidissement du moteur d'automobile :

Le circuit de refroidissement est un système assez complexe mais essentiel au bon fonctionnement du moteur afin d'éviter sa surchauffe.

La dissipation thermique insuffisante peut entraîner cette surchauffe, ce qui entraîne la rupture de l'huile de lubrification et l'affaiblissement du métal des pièces du moteur, ce qui provoque leur usure [16]. Pour réduire au minimum la contrainte sur ce dernier, les radiateurs d'automobile doivent être conçus avec une certaine compacité spécifique et intégrés dans le circuit de refroidissement.

Il y a plusieurs techniques pour refroidir un moteur, mais une seule reste utilisée pour les moteurs modernes. Le système employé actuellement est le refroidissement liquide, c'est à dire le refroidissement par eau. Cependant, il existe aussi le refroidissement par air, qui s'avère techniquement beaucoup plus simple mais évidemment bien moins performant qu'un refroidissement liquide. On trouvera d'ailleurs plus ce système sur les motos que sur les autos. Il y a aussi le système de refroidissement à huile sur certains moteurs en collaboration avec le refroidissement par eau [17].

Le système de refroidissement est nécessaire au bon fonctionnement de n'importe quel véhicule à moteur à combustion interne. Cette combustion produit une grande quantité de chaleur inutilisée, c'est pour cette raison il est nécessaire de l'évacuer. Donc, le radiateur est le dispositif qui permet l'échange de chaleur entre le liquide de refroidissement et l'air ambiant, c'est pourquoi l'importance de concevoir un radiateur de haute performance peut éviter plusieurs problèmes techniques et reste l'objectif à viser par plusieurs chercheurs [17] [18].

I-4-1- Rôle du système de refroidissement:

Le système de refroidissement doit assurer un certain nombre de fonctions [17]:

- Refroidissement des parties chaudes du moteur,
- Refroidissement de l'eau par un radiateur sur lequel circule l'air ambiant,
- Circulation de l'eau à l'aide d'une pompe à eau,
- Régulation de la température d'eau à une valeur déterminée,
- Dégazage pour évacuer les inévitables bulles qui se forment dans le circuit,
- Mise en pression du circuit d'eau pour éviter la cavitation au niveau de la pompe.

I-4-2- Principaux éléments d'un système de refroidissement dans un véhicule :

A la base, tous les circuits du liquide de refroidissement moteur comprennent les composants suivants [17] [19]:

- Le liquide de refroidissement, constituant le circuit d'eau, dans lequel circule l'eau chargée de refroidir les parois du moteur,
- Pompe à eau, qui permet d'obtenir le débit voulu dans le circuit d'eau,

- Radiateur de refroidissement,
- Radiateur de chauffage (ou aérotherme),
- Thermostat,
- Moto-ventilateur (entraîné par courroie ou viscocoupleur),
- Capteur de température (gestion moteur / affichage),
- Vase d'expansion (ou boîte de dégazage),
- Bouchon avec clapet de surpression,
- Tuyauterie.

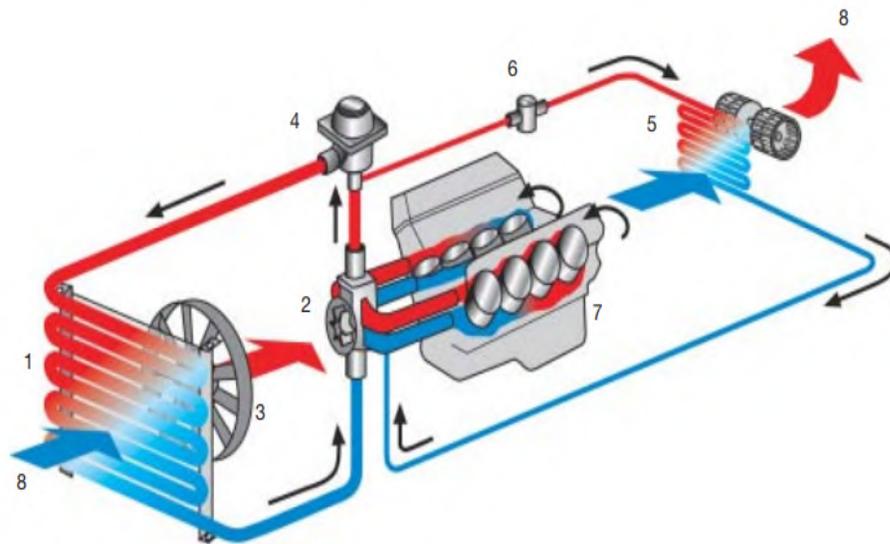


Figure (I-12) : Principaux composants du circuit de refroidissement d'un moteur d'automobile [20]

1- Refroidisseur de réfrigérant	2- Pompe à eau	3- Ventilateur
4- Thermostat	5- Echangeur thermique	
6-Vanne échangeur thermique (optimal)	7- Moteur	8- Air pulsé

I-4-3- Fonctionnement d'un radiateur d'automobile:

Le principe de fonctionnement d'un radiateur de voiture se résume dans les étapes suivantes [17]:

- Un système de pompage pousse la température normale du liquide de refroidissement du radiateur vers le moteur.
- Un moteur en marche produit une grande quantité de chaleur, qui est absorbée par le liquide de refroidissement. Éventuellement, la température du moteur tombe. Ce liquide de refroidissement chauffé est à nouveau pompé vers le radiateur.
- Une fois que le liquide de refroidissement chaud atteint le radiateur, il circule à travers une série de tuyaux du radiateur.
- L'air entourant le radiateur absorbe cette chaleur et abaisse la température du liquide de refroidissement chauffé.
- La procédure se poursuit tant que le véhicule fonctionne.
- En l'absence du radiateur, le moteur cessera de fonctionner en cas de surchauffe.

Les chambres de combustion sont enrobées par des conduites d'eau. L'eau absorbe la chaleur et elle est refroidie dans le radiateur. L'eau refroidie retourne dans le moteur. Un ventilateur améliore le refroidissement, surtout lorsque le véhicule est à l'arrêt ou s'il roule à basse allure. L'aménagement d'une pompe à eau accélère la circulation du circuit d'eau. Entre le moteur et le radiateur se trouve le thermostat. Pour autant que la température idéale du moteur ne soit pas atteinte, le thermostat garde le circuit d'eau fermé. Lorsque le moteur est froid, le thermostat empêche l'eau de passer dans le radiateur. A environ 86 °C, le thermostat commence à ouvrir le circuit. Le thermostat contribue à ce que la température idéale soit atteinte plus rapidement, il garde la température du moteur à l'équilibre [17].

Le radiateur se situe à l'avant du véhicule et reçoit en priorité l'air, qui provient de l'avant lorsque celui-ci roule. En fait, le radiateur a le même rôle que la pièce en métal visible sur le processeur de vos ordinateurs. Le métal du radiateur reçoit l'air et garde particulièrement bien cette fraîcheur. En effet, le métal garde bien la fraîcheur et il devient plus efficace de refroidir un métal qui sera en contact avec l'eau (et donc la refroidira) plutôt que de refroidir directement l'eau avec de l'air projeté dessus. Une hélice se trouve placée devant le radiateur pour s'activer au cas où il y aurait une surchauffe. En effet, lorsque le véhicule n'avance pas, il n'y a pas d'air projeté sur le radiateur, l'hélice est donc là pour pallier à ce problème et permettra de projeter de l'air si nécessaire même à l'arrêt [17].

Pour notre cas, le radiateur que l'on va étudier est celui, fabriqué au niveau de l'usine SONERAS, du type Toyota B30 (voir la figure ci-dessous).



**Figure (I-13) : Radiateur avec ailettes planes, type Toyota B30 [Photo original
MAKNI Ahmed]**

I-5-Conclusion :

A travers ce chapitre, nous avons présenté une vue générale sur les différents modes de transfert de chaleur, ainsi que l'importance de cette technologie.

En revanche, nous avons donné un aperçu sur les systèmes de refroidissement d'automobile et leur rôle essentiel pour éviter l'endommagement des pièces, constituant le véhicule.

Dans ce qui suit, nous allons donner une brève présentation sur la société SONERAS, dont on a utilisé le modèle de radiateur pour effectuer notre étude, où on expose le modèle physique avec les conditions aux limites utilisées.

Chapitre II
Matériels et méthodes

II-1- Introduction :

Le refroidissement du moteur d'automobile est toujours essentiel pour éviter les dégâts, pouvant être prévu dans le véhicule et reste une technique en cours de développement, en subissant des investigations pour améliorer la qualité des pièces, constituant le système de refroidissement, notamment le radiateur, qui est la partie principale dans ce système et qui ne cesse pas à se développer afin d'aboutir à une meilleure performance de l'échangeur, donc une bonne efficacité avec des conceptions multiples.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'échange thermique dans un radiateur d'automobile, où il y a la circulation croisée de deux fluides, l'eau dans les tubes et l'air provenant de l'extérieur à travers un ventilateur.

L'écoulement des fluides est décrit par les champs thermique et dynamique, qui illustrent le comportement réel de ces deux fluides, ainsi que la distribution de la pression qui est toujours couplée avec la vitesse dans les équations, gouvernant l'écoulement.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le modèle physique du radiateur d'automobile, de type normal (avec ailettes planes), ainsi que les différentes équations mathématiques permettant la résolution du problème considéré.

Avant d'illustrer le modèle, on va donner une vue générale sur la société SONERAS qui nous a fourni le modèle du radiateur, dont l'objet de cette étude.

II-2- Présentation de l'entreprise SONERAS :

II-2-1- Historique:

Le fondateur du groupe industriel, OULAD KOUIDER Hadj était pendant les années 50-60 à la tête de la compagnie RBTOK, spécialisé dans le transport de marchandises et carburants dans le grand sud algérien avec un parc, constitué exclusivement de Berliet fabriqués dans l'usine de Rouïba.

Développant un savoir-faire dans le domaine de la mécanique (techniciens formés chez Berliet France) et conscient de l'importance du refroidissement des camions dans les zones de grande chaleur, son président décide de créer l'entreprise SONERAS pour la fabrication de radiateur le 01/07/1969.

Fort du développement de son savoir-faire dans le domaine de la chaudronnerie, de la construction métallique et sa maîtrise du marché de la pièce de rechange automobile, elle développa les systèmes d'échappements automobiles en 1987 dans ses ateliers ; OKI fut créé en 1992 pour prendre en charge ce business.

S'éteignant en 2010, le fondateur du groupe laisse derrière lui deux générations, son fils Mustapha qui a rejoint l'entreprise en 1978 et son petit-fils Mehdi, qui contribuent au développement du groupe jusqu'à présent [17,21].

II-2-2- Domaines d'activité de SONERAS :

SONERAS est implantée à la zone industrielle de Ghardaïa, elle fabrique essentiellement deux types de radiateurs (tropical et normal), pour tous les types de voitures, camions et motos utilisant le cuivre et laiton comme matières premières.

L'entreprise prend en charge la réparation, la rénovation, l'échange et la modification spécifique de tous types de radiateur comme les pièces défectueuses pour le reconditionnement des radiateurs des engins agricoles [17] :

- Tracteurs agricoles,
- Moissonneuses batteuses,
- Récolteuses,
- Pompes pour irrigation,
- Tracteurs et enjambeurs vigneron,

En outre, la société peut effectuer des fabrications sur mesure pour l'industrie : réparations, nettoyages, soudures, rénovation par le remplacement du faisceau par un ensemble tubulaire neuf et par l'échange des pièces défectueuses.

La société approvisionne chez les leaders mondiaux du cuivre et laiton à savoir AURUBIS (Pays-Bas/Suède) et MKM (Allemagne), concernant les produits de soudage à savoir étain, plomb et autres produits chimiques, c'est METACONCEPT INTERNATIONAL, STTS (France) et ICAS (Italie) [21].

La société achète la matière première (tube et tôle) dans le marché algérien (ArcelorMittal, ANABIB, GalvaTube...etc.), elle compte d'importer l'inox pour répondre à la demande OEM (Renault, Mercedes), et de la tôle et tube acier aluminés pour une meilleure résistance à la corrosion et une meilleure esthétique [21].

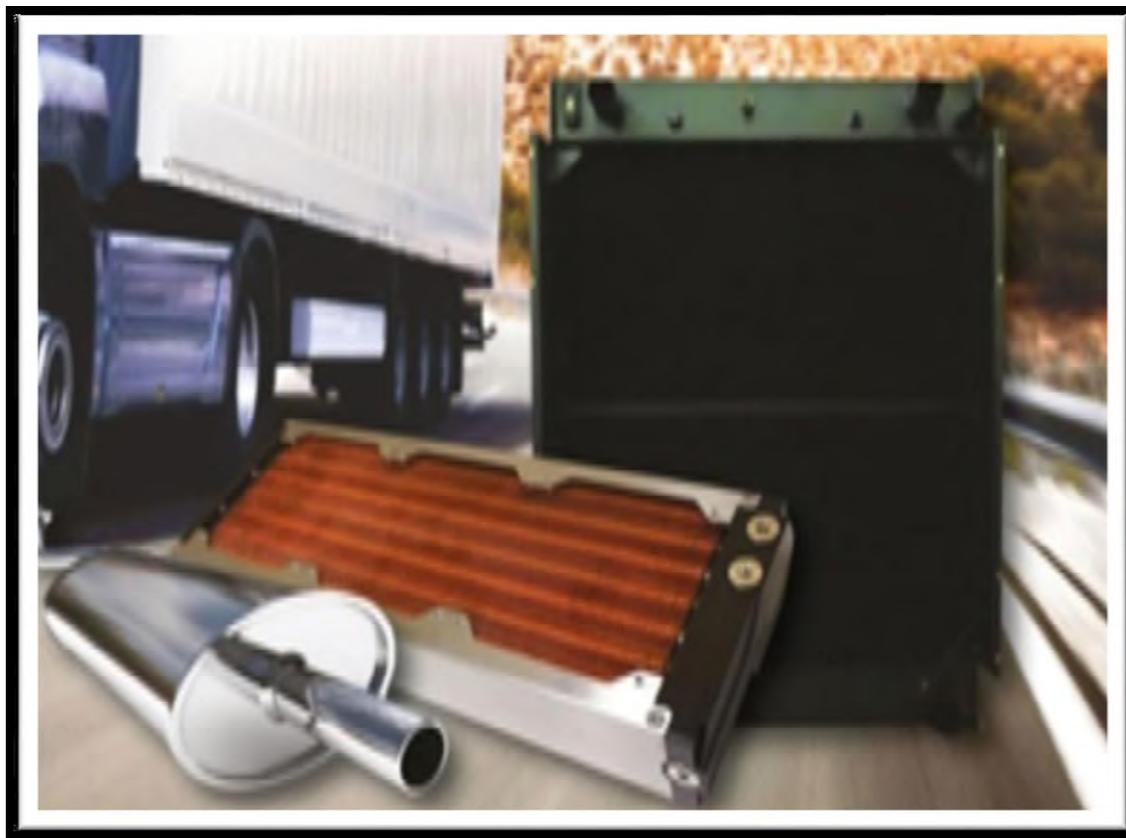


Figure (II-1) : Systèmes fabriqués par SONERAS [22]

II-3-Modèle physique et formulation mathématique :

II-3-1-Description du problème :

Comme nous avons déjà expliqué auparavant que l'entreprise SONERAS fabrique plusieurs types de radiateurs selon la marque de la voiture ou l'engin à utiliser, ces radiateurs sont menus d'ailettes de formes différentes. A partir de la forme de cette dernière, on distingue les ailettes sous forme zig zag et celles sous forme plane, d'où vient respectivement l'appellation du radiateur tropical et normal (les plus fabriqués à SONERAS).

Pour le présent travail, notre choix s'est accentué sur le radiateur normal pour sa simple construction.

Le modèle physique considéré est schématisé sur les figures (II-3-a et b). Il s'agit d'un radiateur d'automobile, de longueur L , de largeur l et de hauteur H . Le radiateur est composé d'un ensemble de tubes de forme rectangulaire, où circule le fluide de refroidissement, provenant du circuit du moteur. Ces tubes sont munis d'ailettes planes, permettant le passage de l'air entre elles. Ce modèle est réalisé par le code CFD ANSYS 19.0 en 3D pour illustrer le cas réel.



Figure (II-2-a) : Radiateur normal de Toyota b30 (A.MAKNI, 2018)



Figure (II-2-b) : Radiateur normal modélisé ANSYS 19.1 (A.MAKNI, 2018)



Figure (II-3-a) : Ailettes planes fabriquées à SONERAS (A.MAKNI, 2018)

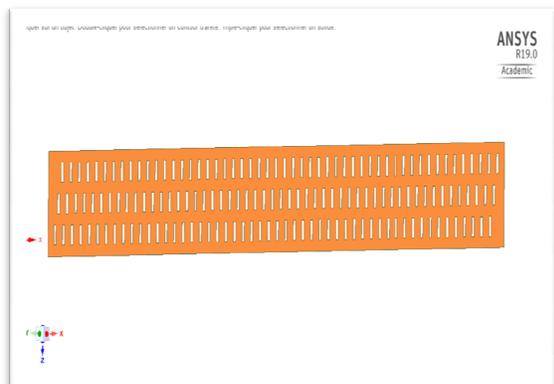
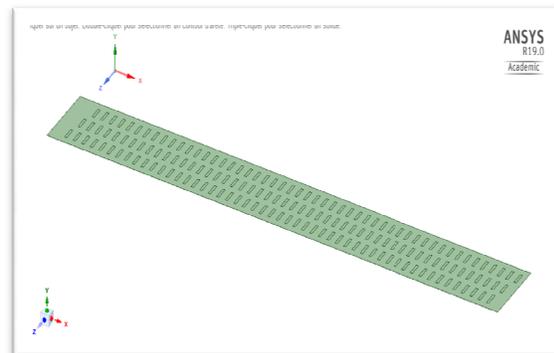
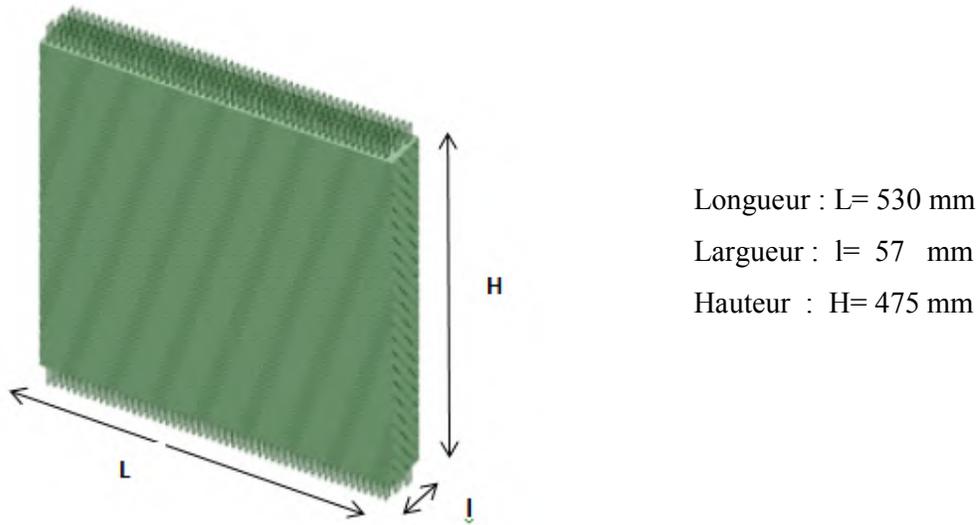


Figure (II-3-b) : Ailette plane modélisée sous ANSYS 19.0

Dimensions du radiateur Toyota B30:**Figure (II-4) : Dimensions réelles du radiateur étudiée**

Suite à la difficulté d'obtenir les calculs de simulation en 3D avec nos micro-ordinateurs, et le manque des centres de calcul intensif en Algérie, qui utilisent le code ANSYS, nous étions obligés d'effectuer notre approche en 2D et étudier uniquement un seul fluide, qui est dans ce cas l'air puisque le but principal est de refroidir le moteur d'automobile. Donc, on a conservé le cas réel de l'écoulement à travers une ailette sous forme d'un rectangle avec trois rangés de tubes sous forme rectangulaire comme la montre la figure ci-dessous.

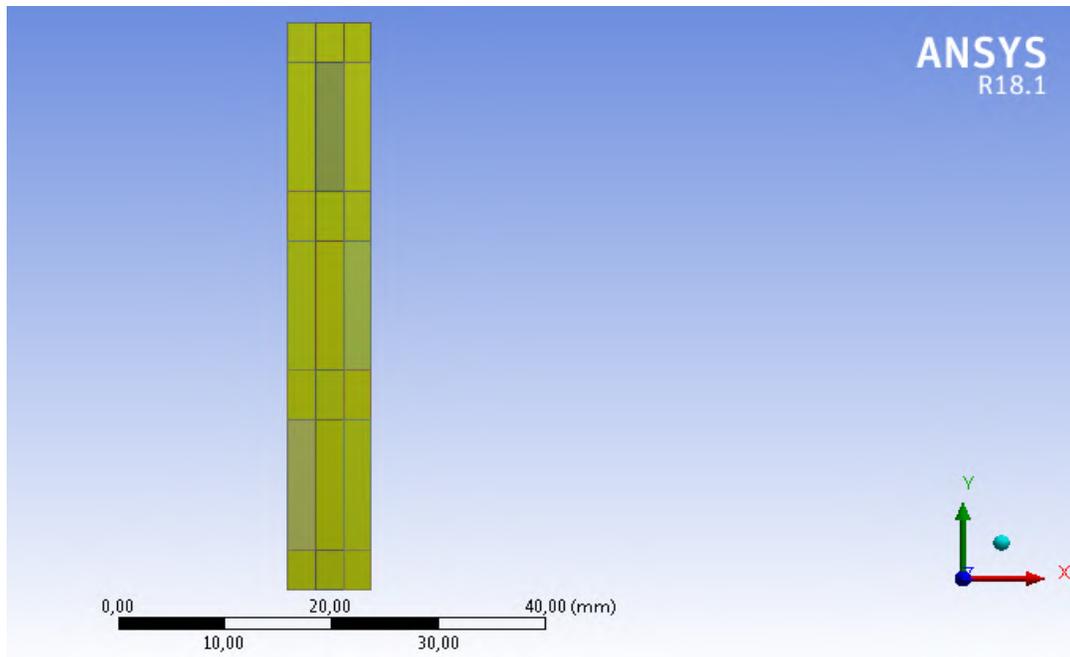


Figure (II-5) : Configuration physique en 2D sous ANSYS 18.1

- **Dimensions de la géométrie étudiée en 2D :**

Pour l'ailette :

$X = 7.8 \text{ mm}$ et $Y = 57 \text{ mm}$

Pour les tubes :

$X = 2.6 \text{ mm}$ et $Y = 13 \text{ mm}$

II-3-2- Equations du modèle mathématique :

La convection engendrée par des transferts de chaleur au voisinage des surfaces chauffées a été largement étudiée tant au niveau théorique qu'expérimental. En mécanique des fluides, en supposant que le fluide est un milieu continu, on peut utiliser les lois classiques de conservation suivantes [3, 23] :

- Loi de Lavoisier (principe de conservation de la masse) pour établir l'équation de continuité ;
- Deuxième loi de Newton (principe de conservation de la quantité de mouvement) pour établir les équations de quantité de mouvement ;
- Loi de conservation d'énergie (Premier principe de la thermodynamique) pour établir l'équation de l'énergie.

Dans les cas laminaire et turbulent, les problèmes d'écoulement de fluide peuvent être traités par la résolution des équations de quantité de mouvement, de continuité et d'énergie.

Nous allons dans ce qui suit présenter les équations qui régissent l'écoulement du fluide en général, et qui ne sont que des cas particuliers d'une même équation générale, traitée dans les modules de discrétisation des équations.

II-3-2-1- 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 [23] [24] :

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

Où V : Le vecteur de vitesse.

II-3-2-2- 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 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 [23] [24]:

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

Où F est une force par unité de volume.

II-3-2-3- Equation de l'énergie :

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 [23]:

$$\frac{D}{Dt}(\rho c_p T) = \Delta(\lambda T) + q + \beta T \frac{Dp}{DT} + \mu \Phi \quad \dots \dots \dots \quad (\text{II. 3})$$

Avec :

$\frac{D}{Dt}(\rho c_p T)$: La variation totale d'énergie ;

$\Delta(\lambda T)$: La variation d'énergie par conduction ;

q : Puissance volumique dissipée ;

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

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

II-3-3- Hypothèses simplificatrices :

Toute simulation repose sur une modélisation du problème. Cette dernière implique certaines hypothèses simplificatrices. Ces hypothèses sont utilisées par la suite dans le code Fluent afin de simplifier les équations intégrées [1] [24].

Les hypothèses utilisées souvent dans l'étude de la convection sont les suivants:

- Absence de source de chaleur,
- Les propriétés thermo-physiques du fluide sont constantes et sont évaluées à la température de référence,
- Le fluide est newtonien et incompressible,
- La dissipation visqueuse est négligée,
- La densité du fluide suit l'hypothèse de Boussinesq.

II-3-4- Conditions aux limites :

La résolution du système d'équations nécessite l'incorporation des conditions aux limites pour chaque variable.

Les conditions initiales et aux limites associées au problème sont :

- **Température du milieu :** $T = 300 \text{ K (26.85 } ^\circ\text{C)}$
- **Température de la source chaude, prise près des parois des tubes:**

$$T = 348.15 \text{ K (75 } ^\circ\text{C)}$$

- **Diamètre hydraulique :** $D_h = 0.3422 \text{ m}$
- **La vitesse de l'air à l'entrée:** $V = 0.1840 \text{ m/s}$ calculée pour le cas du régime turbulent ($Re=4000$)).

Le tableau ci-dessous représente les différentes propriétés physiques de l'air à la température initiale du système :

Tableau (II-1) : Caractéristiques de l'air a T = 300K [25]

Données		
Propriété physique	Valeurs	Unités
Densité	1.1771	Kg /m³
Viscosité dynamique	1.8531.10⁻⁵	Kg /m.s
Viscosité cinématique	1.5743.10⁻⁵	m² /s
Chaleur spécifique: c_p	1.0063.10⁻³	J /kg.K
Conductivité:	0.026107	W /m.K
Numéro Prandtl	0.71432	
Diffusivité thermique:	2.2039.10⁻⁵	m² /s
Coefficient de dilatation thermique	3.3333.10⁻³	1 /K

II-4- Résolution numérique :

La résolution des équations de conservation d'un phénomène physique se fait par l'utilisation d'une méthode numérique bien déterminée. Cette dernière consiste à développer les moyens de la résolution de ces équations [24].

L'objectif des méthodes numériques est de fournir une solution approchée du comportement réel des phénomènes physiques. La physique possède des caractères tridimensionnels, temporels et non linéaires, c'est à dire très complexe. Le rôle du modélisateur est de simplifier suffisamment le problème tout en conservant l'originalité du phénomène physique étudié [26].

En mécanique des fluides, les écoulements que ce soit en régime laminaire ou turbulent, sont décrits par le système d'équations aux dérivées partielles (E.D.P). Ainsi, tous les phénomènes physiques sont régis par ce système formé par les équations de continuité, de quantité de mouvement et d'énergie qu'il convient pour les caractéristiques du champ d'écoulement et du champ thermique [26].

Parmi les méthodes numériques les plus fréquemment utilisées dans les problèmes d'écoulement et de transfert de chaleur:

- La méthode des différences finies,
- La méthode des éléments finis,

- La méthode des volumes finis.

Le choix de l'utilisation de telle méthode numérique va dépendre essentiellement du type et de la complexité du problème à résoudre : la nature du fluide, le comportement thermodynamique, la modélisation du milieu et le problème stationnaire ou instationnaire.

Dans la présente étude, on utilisera la méthode des volumes finis, car elle présente des avantages considérables du fait qu'elle soit simple et c'est la méthode intégrée dans le logiciel FLUENT [27].

II-4-1- Principe de la méthode des volumes finis :

La méthode des volumes finis a été décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par Patankar [3], le principe de cette méthode repose sur une technique de discrétisation, qui convertit les équations différentielles aux dérivées partielles en équations algébriques non linéaires, qui peuvent par la suite être résolues numériquement. Cette méthode passe par quatre étapes principales :

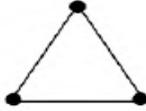
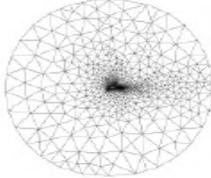
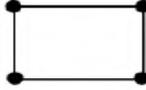
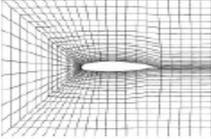
- a) Effectuer un maillage du domaine d'étude : ceci se fait en plaçant un certain nombre de nœuds dans ce domaine et en construisant un volume fini ou un volume de contrôle autour de chaque nœud. Ce volume de contrôle est délimité par des interfaces.
- b) Intégrer l'équation aux dérivées partielles sur chaque volume de contrôle.
- c) Choisir un profil de variation de la quantité à trouver (par exemple : température, pression, etc....) entre deux nœuds consécutifs pour pouvoir évaluer les dérivées à l'interface.
- d) Résoudre le système d'équations obtenu par l'une des méthodes de résolution des équations algébriques linéaires.

II-4-2- Choix du maillage :

Le choix du maillage est un point essentiel dans la précision et l'exactitude des résultats numériques. Pour ce faire, on doit déterminer les paramètres optimaux et choisir une stratégie de maillage qui répond à nos objectifs, parmi ces paramètres, on peut citer [28] :

- Le nombre de mailles,
- La distance entre les mailles (concentration des mailles),
- La forme de la maille,
- Les paramètres de déformation pour le cas du maillage déformable.

Tableau (II-2) : Différentes formes de maillage des faces [27]

Type des cellules en 2D	La forme de maillage	Exemple
Triangulaire		
Quadrilatérale		

Dans ce travail, nous avons opté pour un maillage structuré, uniforme dans les deux directions, horizontale et verticale, resserré près des parois chaudes, vu les gradients de température élevés comme le montre la figure (II-6).

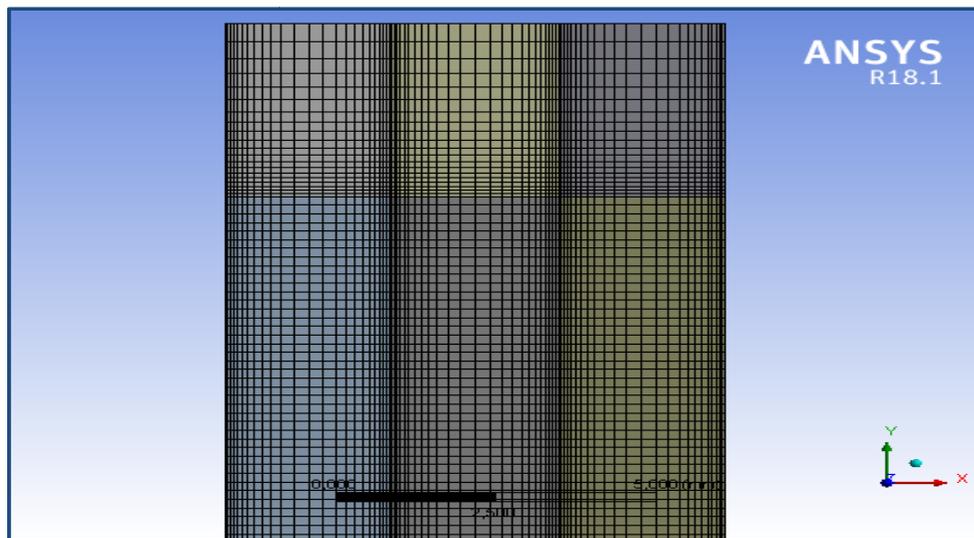


Figure (II-6) : Schéma du maillage utilisé (A.MAKNI 2018)

II-4-3- Présentation des logiciels ANSYS et Fluent :

La résolution par le logiciel de simulation numérique des écoulements FLUENT nécessite la présentation de logiciel ANSYS.

II-4-3-1- Présentation du préprocesseur ANSYS :

ANSYS, Inc est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. Ses produits majeurs

sont des logiciels, qui mettent en œuvre les méthodes numériques citées ci-dessous, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés. La société possède de nombreuses filiales à travers le monde, notamment en Europe et en Asie[29].

II-4-3-1-1-Interface de l'ANSYS :

Après avoir lancé le logiciel, l'interface d'utilisation apparaît comme suit :

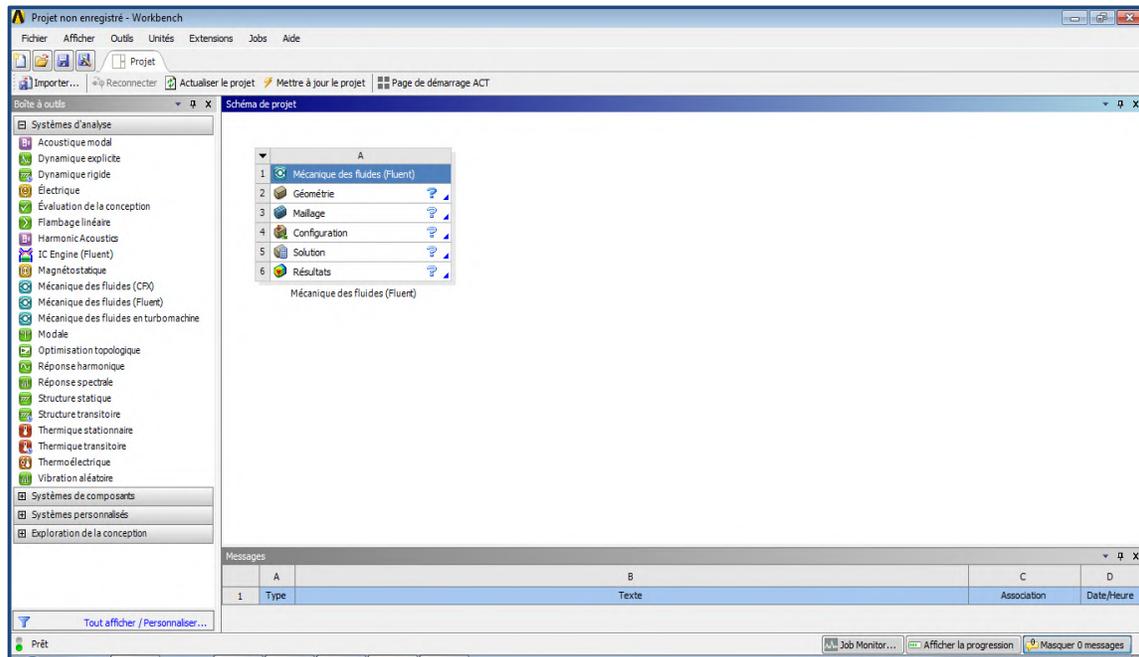


Figure (II-7): Interface générale de l'ANSYS

L'utilisation de l'ANSYS est simple : principalement, il faut prendre les menus en haut à droite et effectuer les tâches en partant du menu de gauche pour aller jusqu'à celui de droite.

Avant même de créer la géométrie, il faut choisir le type de solveur, c'est-à-dire le type de logiciel pour effectuer la simulation, ici c'est le Fluent.

Deux possibilités se présentent pour la création d'une géométrie [27]:

- Créer par point (extrémités) le système, ligne, face, volume (conseillé pour des géométries complexes),
- Créer des surfaces simples existantes (cube, cylindre, sphère,), puis extruder pour obtenir les volumes ou les surfaces voulus.

II-4-3-1-2- Principaux produits

-ANSYS Structural : Ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures. Ses principales capacités sont :

- l'analyse statique,
- l'analyse modale,
- l'analyse harmonique (réponse forcée),
- l'analyse temporelle,
- La gestion des différentes situations non-linéaires (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).

-ANSYS Mechanical : Ce produit dispose des mêmes capacités qu'ANSYS structural, en y ajoutant notamment un solveur thermique, avec une modélisation du rayonnement[29].

II-4-3-2-Code Fluent :

Fluent est un logiciel de calcul numérique en dynamique des fluides CFD (computational fluid Dynamics), destiné à effectuer les simulations numériques des problèmes d'écoulement des fluides. Le package Fluent s'appuie sur la méthode des volumes finis pour résoudre les équations, régissant le mouvement d'un fluide en écoulement et comprend des modèles physiques différents tels que [30] :

- Ecoulement dans des géométries 2D et 3D en utilisant des maillages adaptatifs non structurés,
- Ecoulement incompressible et compressible,
- Analyse stationnaire ou instationnaire,
- Ecoulement non-visqueux, laminaire ou turbulent,
- Ecoulement Newtonien ou non-Newtonien,
- Transfert de chaleur par convection, naturelle ou forcée,
- Transfert de chaleur couplé conduction/convection,
- Transfert de chaleur par rayonnement,
- Repères de références inertiels (stationnaires) ou non-inertiels (en rotation),

- Multiple repère de référence en mouvement, incluant des interfaces glissantes et des plans mélange,
- Mélange et réaction d'espèces chimiques, incluant des modèles de combustion et des réactions de surface,
- Sources volumiques arbitraires de chaleur, masse, quantité de mouvement, turbulence, et espèces chimiques,
- Calculs de trajectoires lagrangiennes pour une phase dispersée de particules/gouttes/bulles, incluant le couplage avec la phase continue
- Ecoulement à travers les matériaux poreux,
- Modèles pour turbine 1D/échangeur de chaleur,
- Ecoulements diphasiques, incluant la cavitation,
- Ecoulements à surface libre avec surfaces complexes.

II-4-3-2-1-Interface du codeFluent :

La première étape à faire quand vous entrez sous fluent est de mettre à jour le maillage et choisir le type de résolution que Fluent va avoir à faire : résolution 2D ou 3D. Puis d'ouvrir ou d'importer un maillage (fichier.msh).

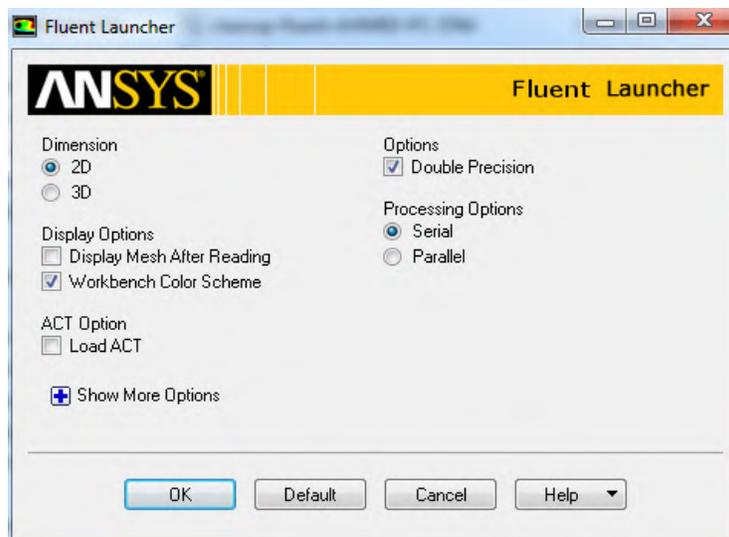


Figure (II-8) : Interface de Fluent

II-4-3-2-2- Etapes à suivre pour la simulation numérique par Fluent :

Les principales étapes à suivre lors du travail sur le logiciel de simulation numérique Fluent nécessitent la connaissance de certaines notions théoriques de base. Ces notions, concernent notamment les définitions des principales équations, régissant l'écoulement.

La résolution numérique par Fluent d'une manière générale, suit les étapes suivantes :

1. Création de la géométrie sous le logiciel ANSYS,
2. Choix de la stratégie de maillage et création de plusieurs grilles,
3. Définition des conditions aux limites sous ANSYS,
4. Calcul avec Fluent pour les différents cas retenus,
5. Analyse des résultats obtenus.

II-5- Conclusion :

A travers ce chapitre, nous avons décrit la géométrie étudiée sous forme d'un rectangle en 2D avec trois rangés de tube, qui est une partie du modèle réel de radiateur Toyota B30 avec les conditions aux limites.

En revanche, nous avons présenté brièvement la méthode des volumes finis, qui est intégrée dans le code CFD et souvent utilisée pour la discrétisation des équations, gouvernant l'écoulement du fluide ainsi que le logiciel de simulation. Les résultats obtenus par ce code sont présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre III
Résultats et discussion

III-1- Introduction

Dans ce chapitre, nous allons discuter les résultats obtenus à l'aide du logiciel ANSYS 18.1, en adoptant les mêmes conditions citées ci-dessus (température des sources chaudes constante).

En premier lieu, nous présentons une optimisation du maillage, dans le but de bien choisir le maillage convenable à notre étude. Pour notre cas, nous présentons les champs d'écoulement, dynamique et thermique. En revanche, les variations de Nusselt moyen à différents nombres de Reynolds sont illustrées dans cette étude.

Pour toutes les simulations réalisées, pour l'étude comparative des différentes géométries des tubes, nous avons adopté un nombre de Reynolds allant de 1000 jusqu'à 7000.

III-2- Etude du maillage :

Pour choisir un bon maillage, nous avons effectué une optimisation préalable, dans laquelle apparaît la variation du nombre de Nusselt moyen en fonction des dimensions de différentes grilles pour un nombre de Reynolds égal à 4000. D'après le tableau (III-1), on a choisi le maillage (54 x 228) en raison de la stabilisation des valeurs du nombre de Nusselt moyen, notamment pour les trois dernières grilles de maillage (voir la figure (III-1)).

Tableau (III-1) : Optimisation du maillage

Maillage	Nombre de Nusselt	Erreur	(X x Y)
M1	2,150511	1,800908697	(6x57)
M2	2,18995	2,258088084	(15x83)
M3	2,140499	0,877272075	(24x114)
M4	2,121721	0,524856944	(30x140)
M5	2,110585	0,454660675	(39x171)
M6	2,100989	0,910523568	(45x197)
M7	2,081859	0,005716045	(54x228)
M8	2,08174	0,117882156	(54x254)
M9	2,079286		(63x285)

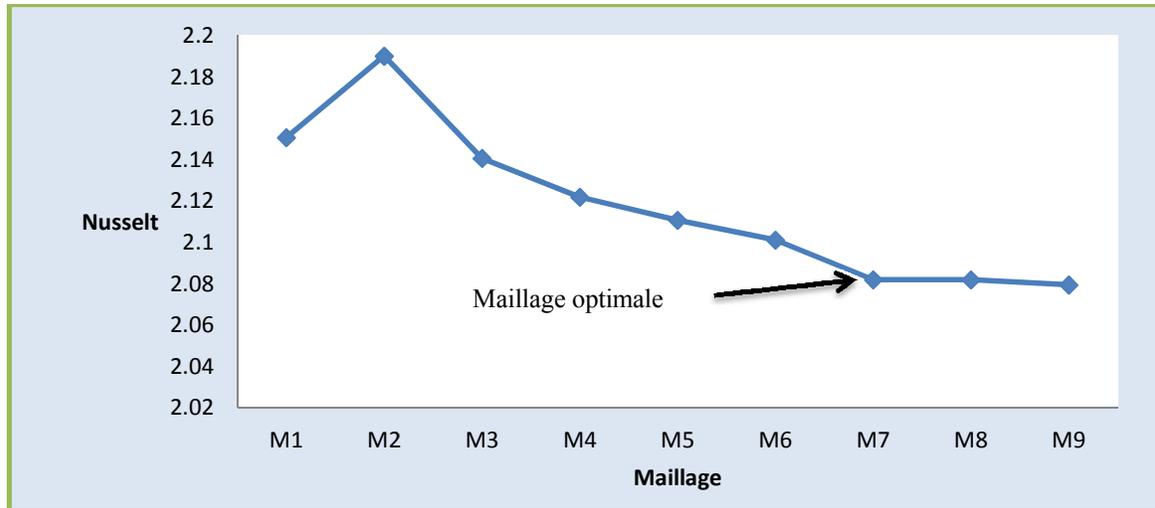


Figure (III-1) : Variation du nombre de Nusselt en fonction du nombre des nœuds

III-3-Résultats :

III-3-1-Etude thermique et dynamique du modèle réel du radiateur d'automobile Toyota B30 avec tubes sous forme rectangulaire :

La configuration étudiée est une géométrie rectangulaire, traversée par l'air comme fluide de refroidissement. L'effet de l'eau est éliminé dans cette étude, pour avoir une géométrie bidimensionnelle en considérant les parties des tubes comme des sources chaudes pour toutes les géométries, prises à une température de 75°C (coté supérieur du radiateur).

III-3-1-1-Etude de l'influence du nombre de Reynolds (Re) sur l'échange thermique :

Les échanges thermiques au cours de l'écoulement du fluide sont caractérisés par le nombre de Nusselt moyen et local. La figure (III-2) représente l'évolution du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Reynolds.

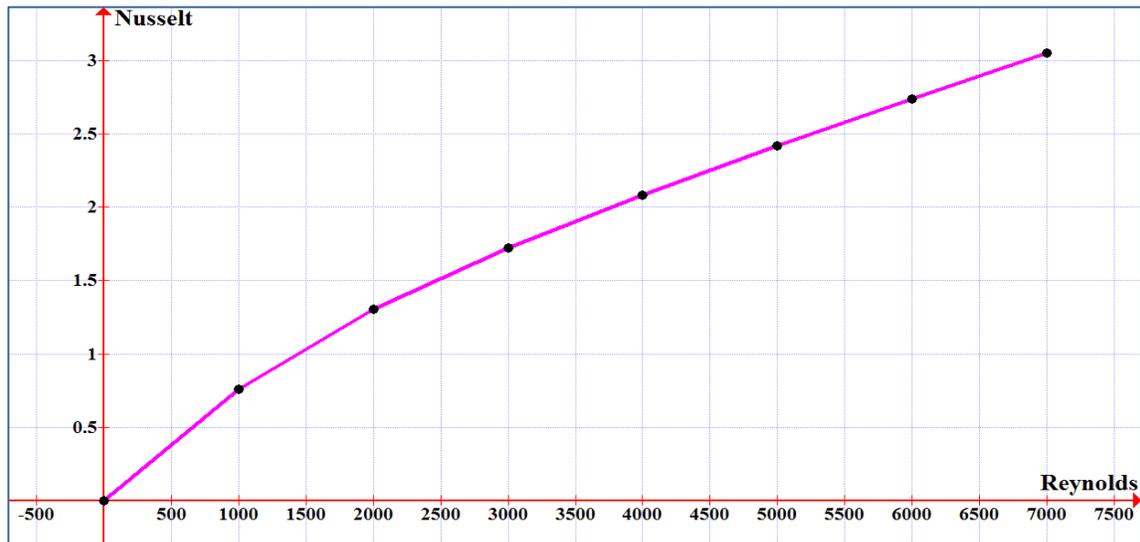


Figure (III-2) : Variation du nombre de Nusselt moyen pour différents nombres de Reynolds

D'après la figure, on constate que le nombre de Nusselt moyen augmente au fur et à mesure que le nombre de Reynolds croît, ce qui signifie que l'échange thermique augmente, cela donne un coefficient de transfert de chaleur élevé. Donc, on améliore les performances de transfert de chaleur, ce qui aide à refroidir rapidement.

III-3-1-2-Etude de l'influence du nombre de Reynolds (Re) sur les champs thermique et dynamique :

A/ Champ thermique :

Le champ thermique est représenté par les contours de température, illustré sur la figure (III-3) pour un nombre de Reynolds égal à 4000 (comme condition initiale de l'étude).

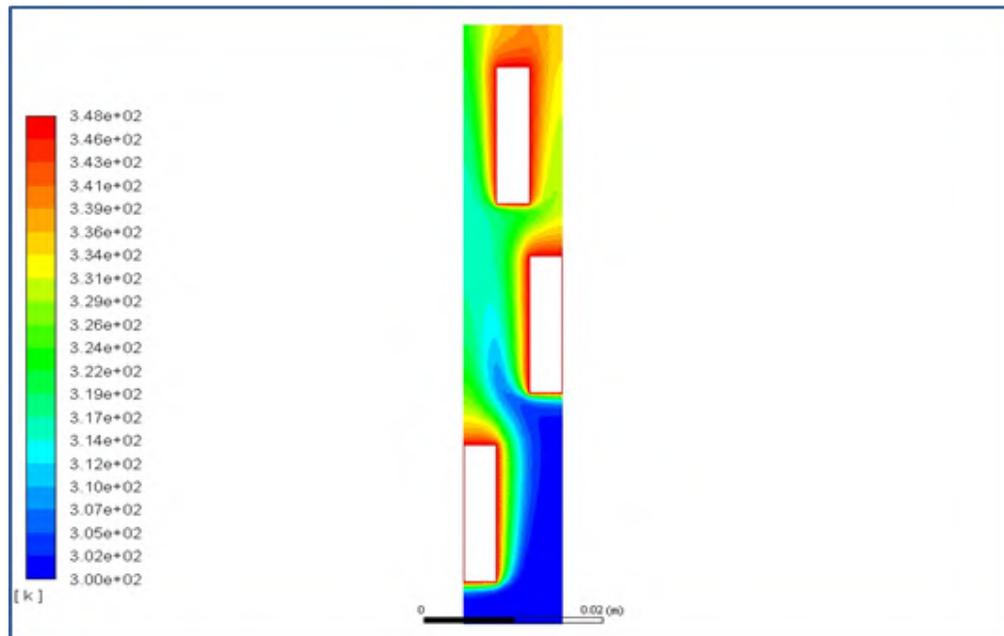


Figure (III-3): Distribution de température pour $Re=4000$

Cette figure montre une diminution progressive de la température près des parois des tubes à cause du flux d'air de refroidissement.

B/ Champ dynamique :

La circulation du fluide à travers les tubes est montrée par les contours de vitesse, qui sont illustrés sur la figure (III-4) pour les mêmes conditions précédentes.

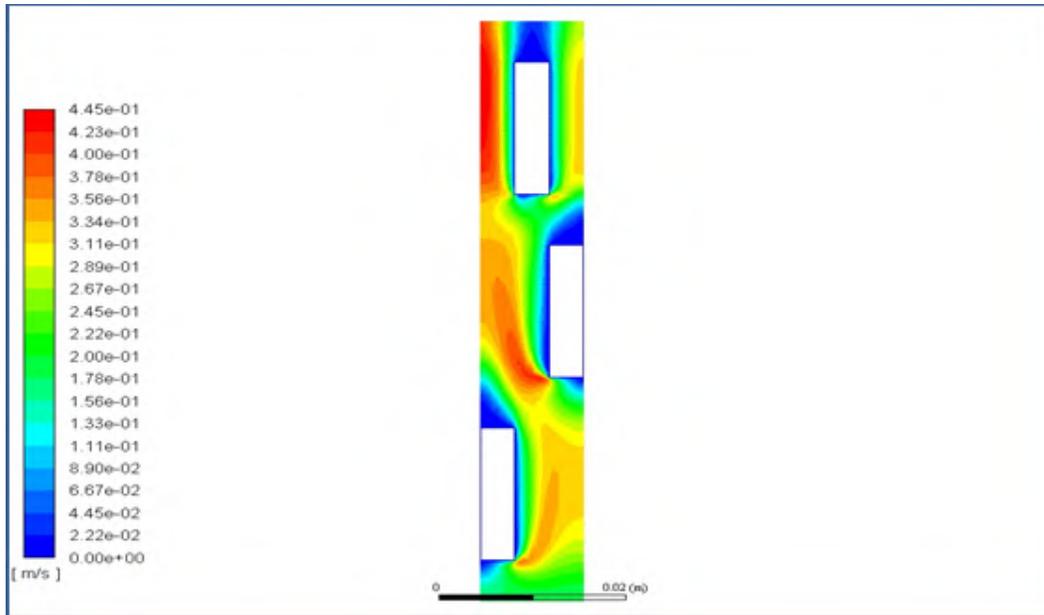


Figure (III-4): Distribution de vitesse pour $Re=4000$

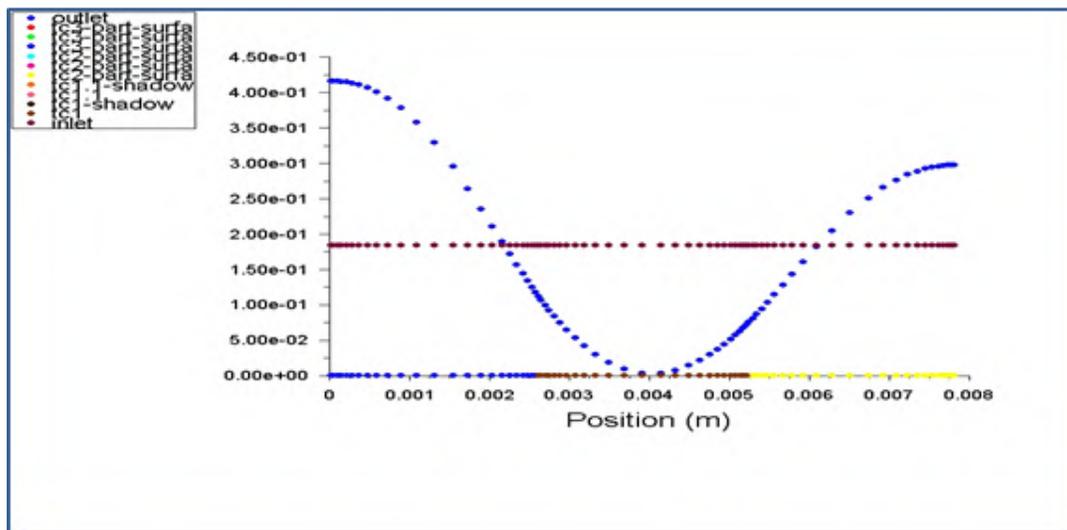
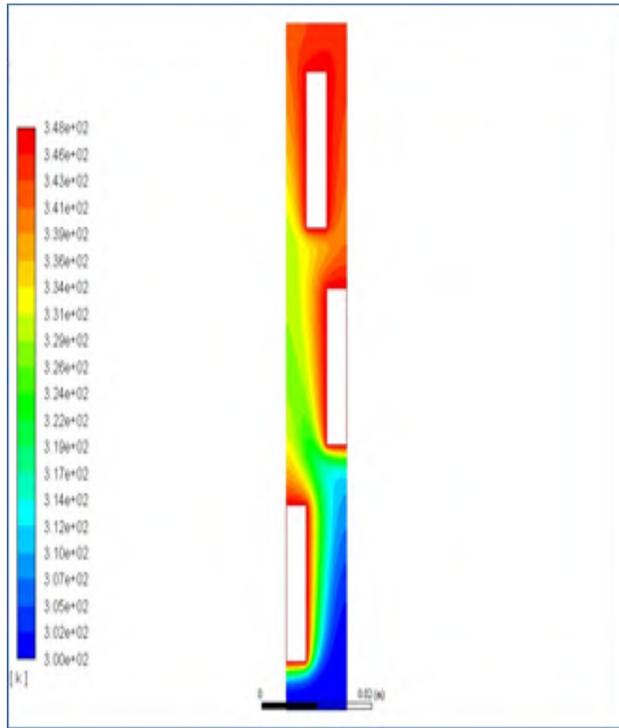


Figure (III-5) : Profil de vitesse à travers l'ailette

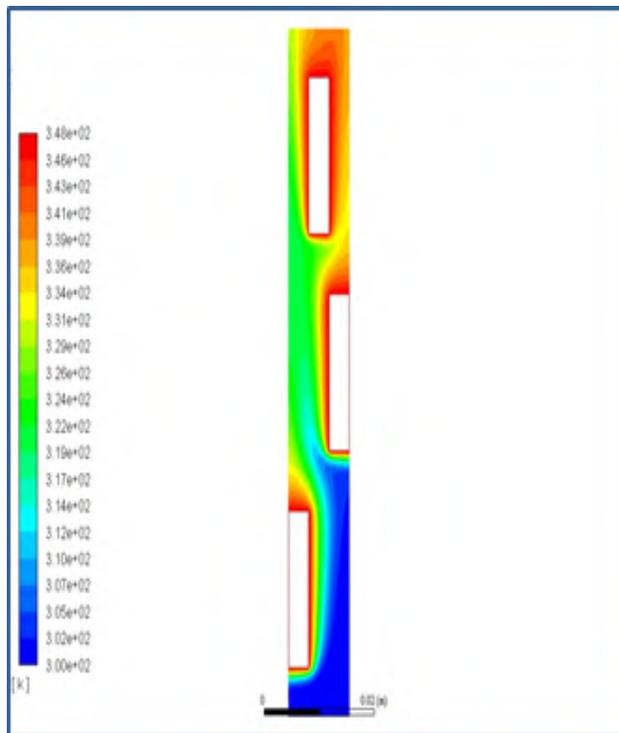
Les résultats numériques sur les valeurs de la vitesse sont très faibles au voisinage des parois, ce qui signifie que les particules près des parois ont une vitesse nulle. Et à chaque fois qu'on s'éloigne de cette partie, la vitesse prend une valeur maximale.

On peut présenter les distributions de température et de vitesse pour quelques nombres de Reynolds pour montrer l'évolution de l'écoulement, donc le refroidissement.



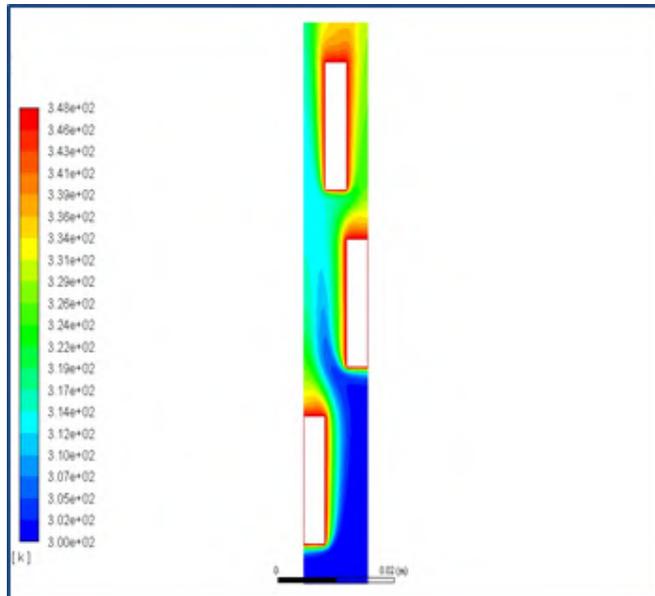
Re=1000

(a)



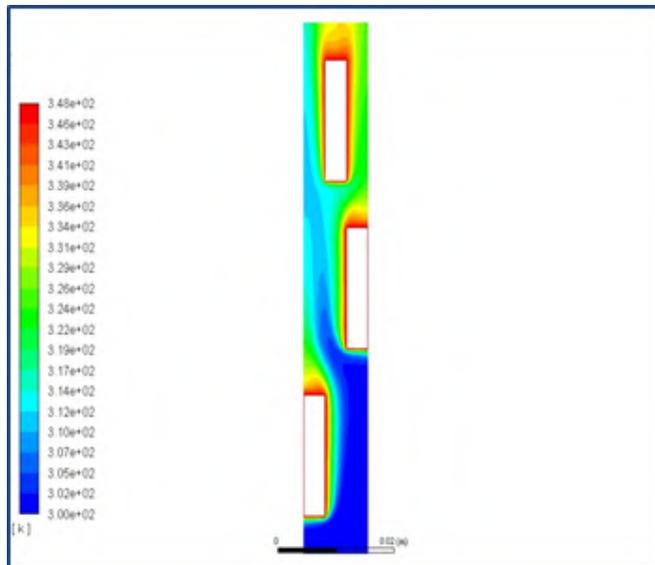
Re=2000

(b)



Re=5000

(c)



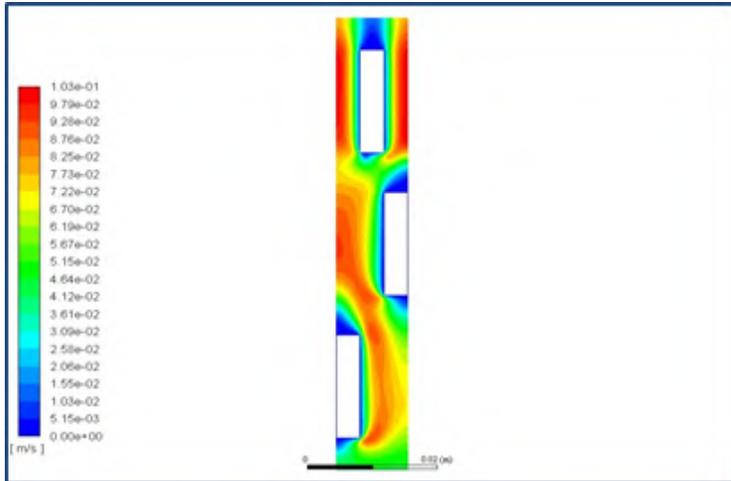
Re=7000

(d)

Figure (III-6-a-b-c-d) : Distribution de température pour différents nombres de Reynolds

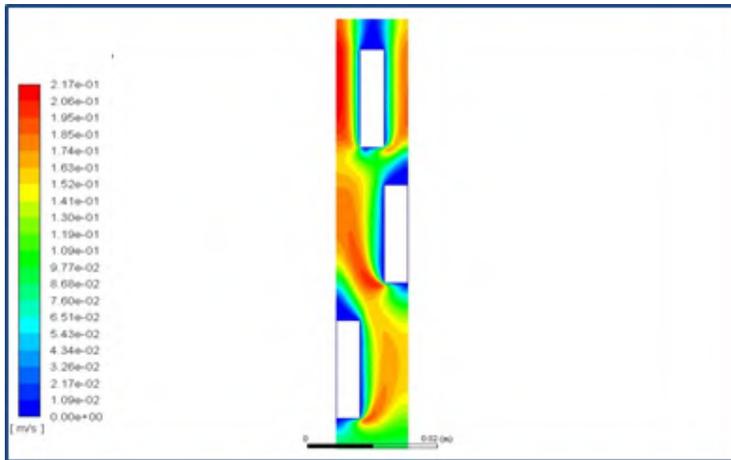
D'après les figures, on peut remarquer que la température diminue d'une façon rapide avec le régime d'écoulement, ce qui favorise un bon refroidissement en augmentant la turbulence.

Dans ce qui suit, on présente les distributions de vitesse pour quelques valeurs de Reynolds.



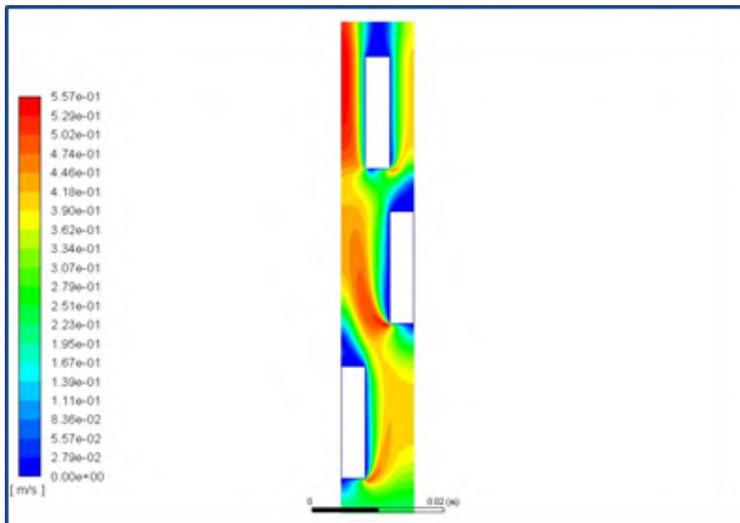
Re=1000

(e)



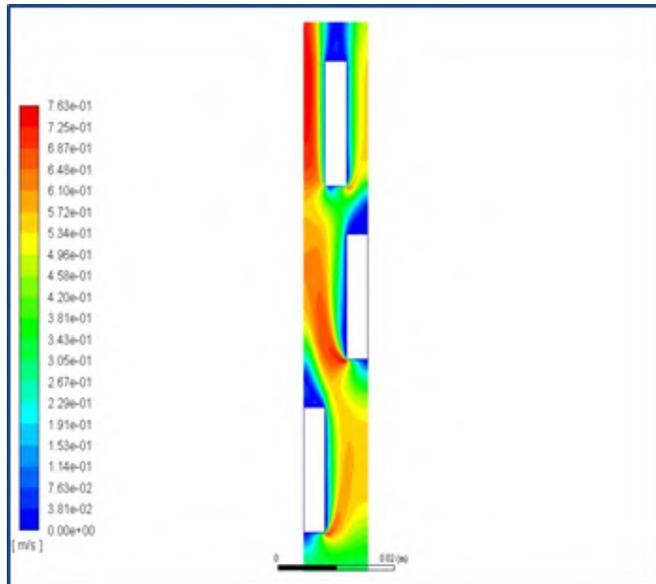
Re=2000

(f)



Re=5000

(g)



Re=7000

(h)

Figure (III-7-e-f-g-h) : Contours de vitesse pour différents nombres de Reynolds

III-3-2-Etude comparative de plusieurs formes des tubes du radiateur Toyota B30 :

Nous avons présenté une variété de géométrie à étudier et à comparer avec une forme réelle du modèle de radiateur étudié dans le but de déterminer la forme qui nous donne plus d'échange thermique, et donc plus de performance et efficacité. La figure ci-dessous montre les différentes formes des tubes à étudier en gardant la même surface de l'ailette avec un écoulement bidimensionnel et les mêmes conditions précédentes.

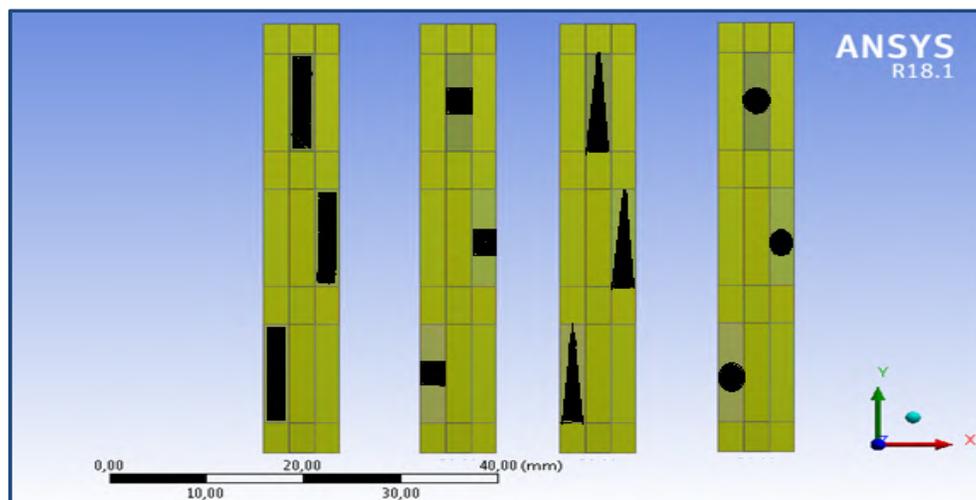


Figure (III-8): Différentes géométries des tubes à étudier

Tableau(III-2) : Dimension du différentes géométrie étudiées

Formes	Dimensions
	Rayon ($R = 2.6 \text{ mm}$)
	Arrêtes ($x = y = 2,6 \text{ mm}$)
	Arrêtes ($X = 2.6 \text{ mm}$ $Y = 13,06 \text{ mm}$)
	Arrêtes ($X = 2.6 \text{ mm}$ $Y = 13 \text{ mm}$)

III-3-2-1-Etude de l'influence du nombre de Reynolds (Re) sur les champs thermique et dynamique et sur l'échange thermique de l'écoulement:

Pour cette étude, on a effectué l'effet du maillage pour chaque géométrie afin d'obtenir un nombre de nœuds, proche à celui de la configuration rectangulaire de base (12 312 nœuds).

III-3-2-1-1- Forme carré :

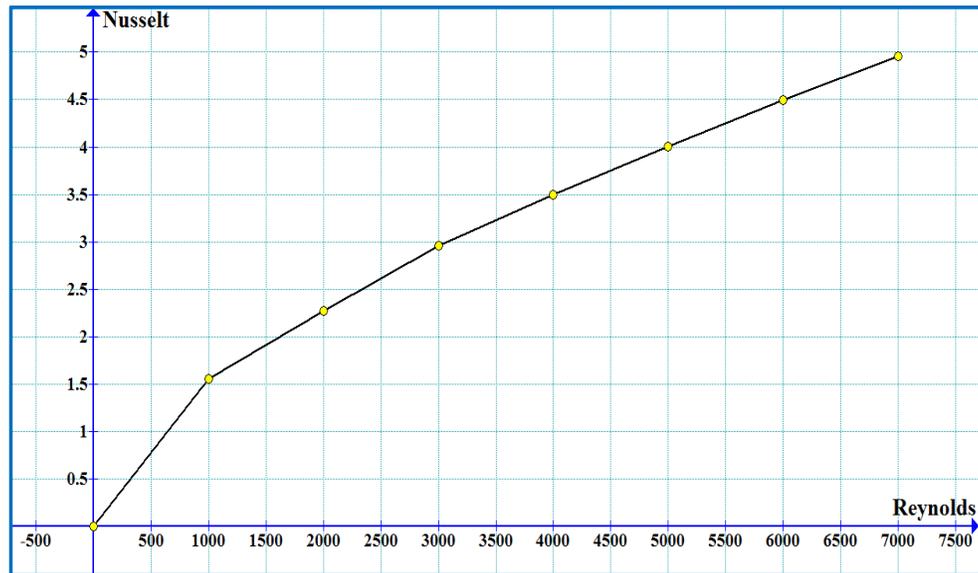
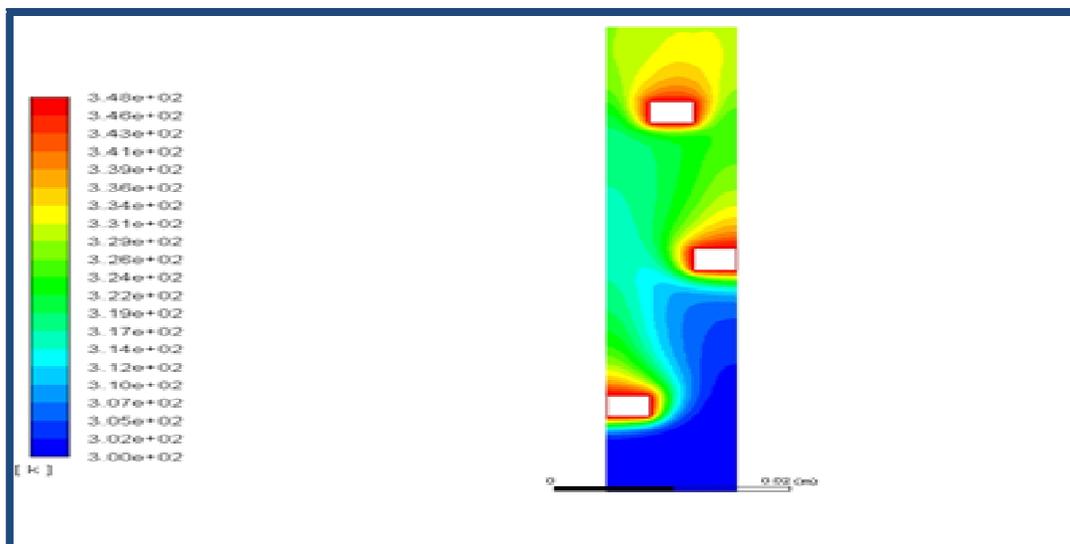


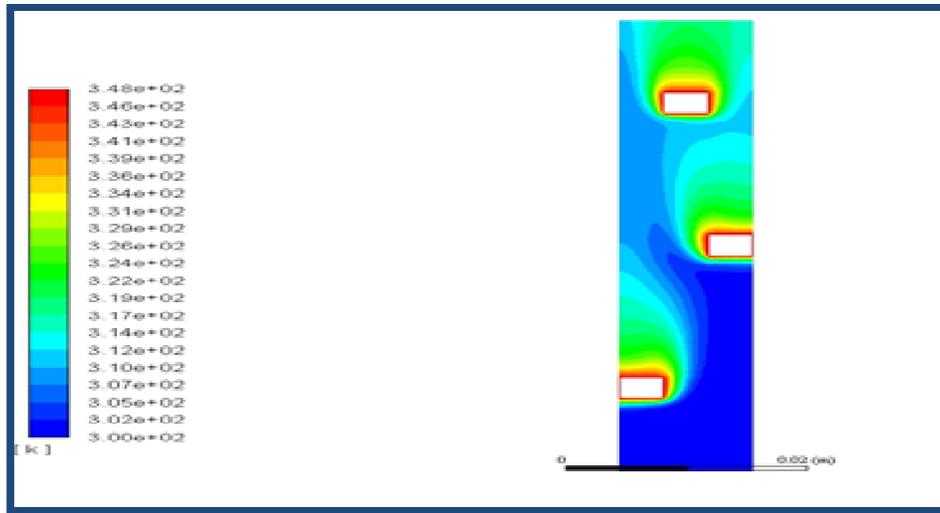
Figure (III-9) : Variation du nombre de Nusselt moyen pour différents nombres de Reynolds pour la forme carrée

On remarque que le nombre de Nusselt augmente avec l'augmentation du nombre de Reynolds, ce qui signifie que le taux de refroidissement augmente.

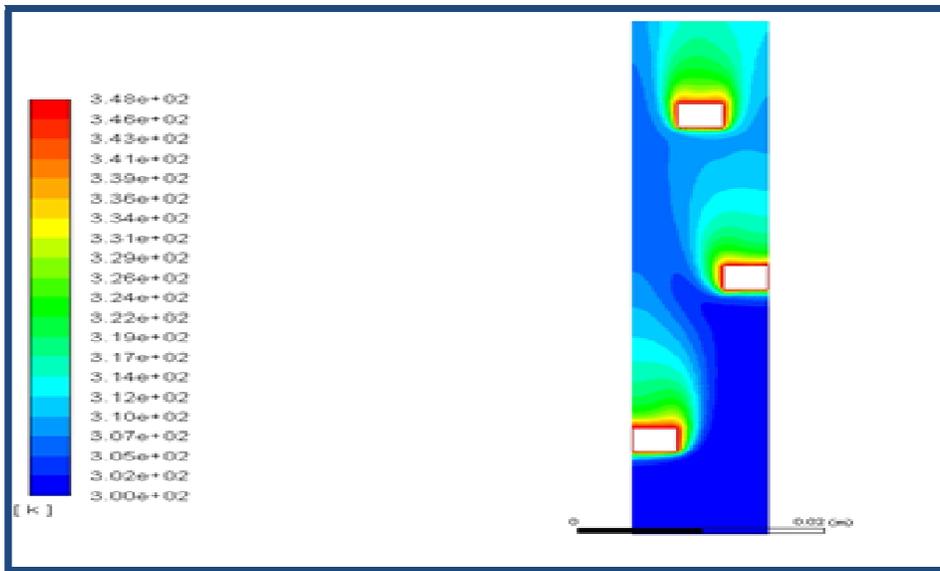
➤ Distribution de la température



Re= 1000



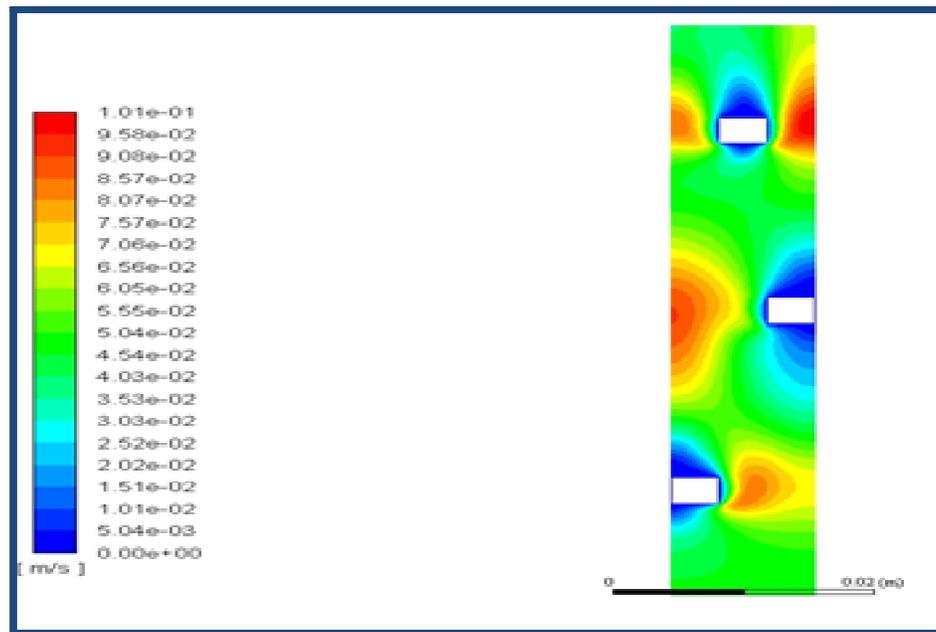
Re = 4000



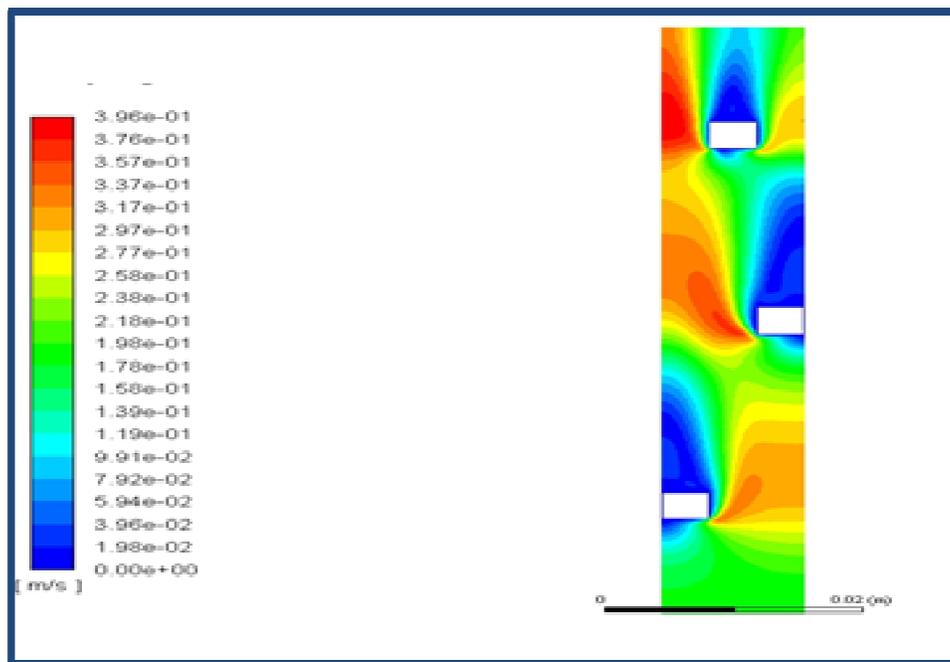
Re = 7000

Figure (III-10) : Distribution de température pour Re =1000, 4000 et 7000

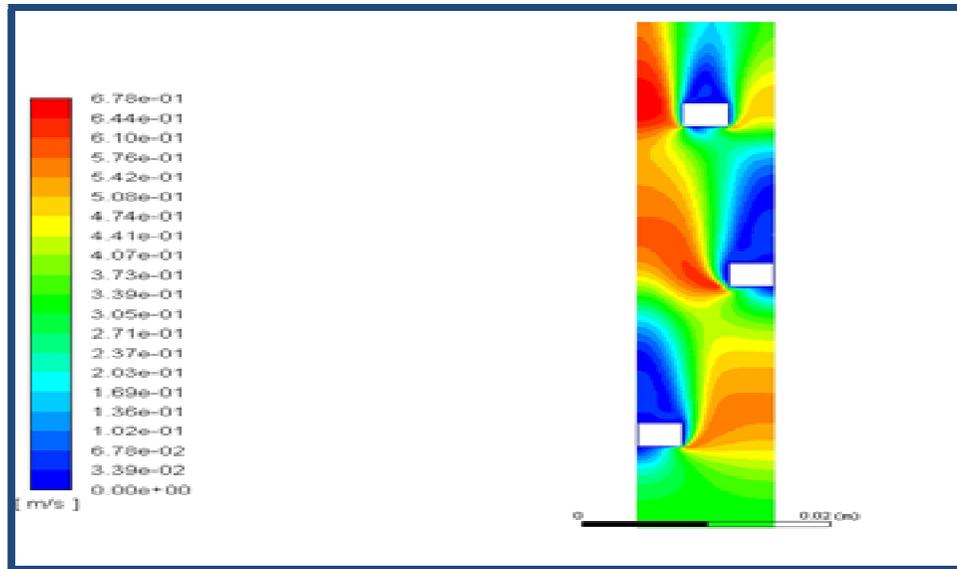
➤ Distribution de la vitesse



$Re = 1000$



$Re = 4000$



$Re = 7000$

Figure (III-11) : Distribution de vitesse pour $Re = 1000, 4000$ et 7000

III-3-2-1-2- Forme triangulaire :

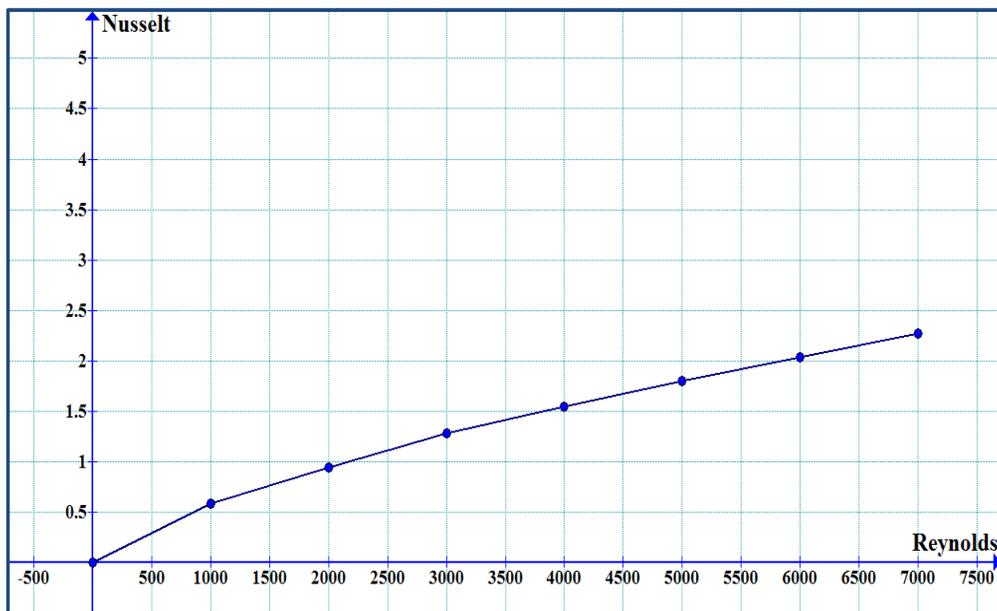
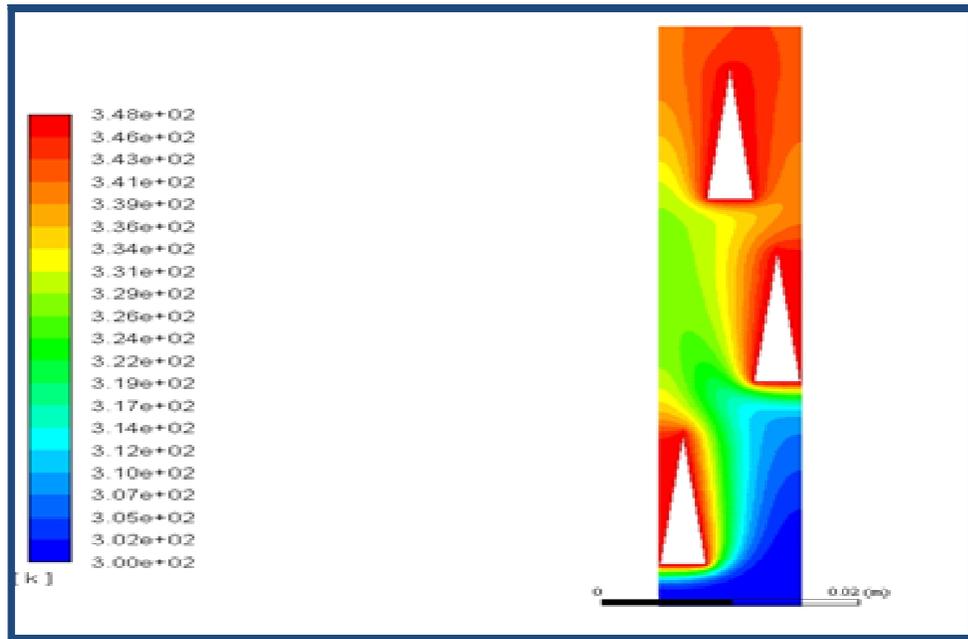
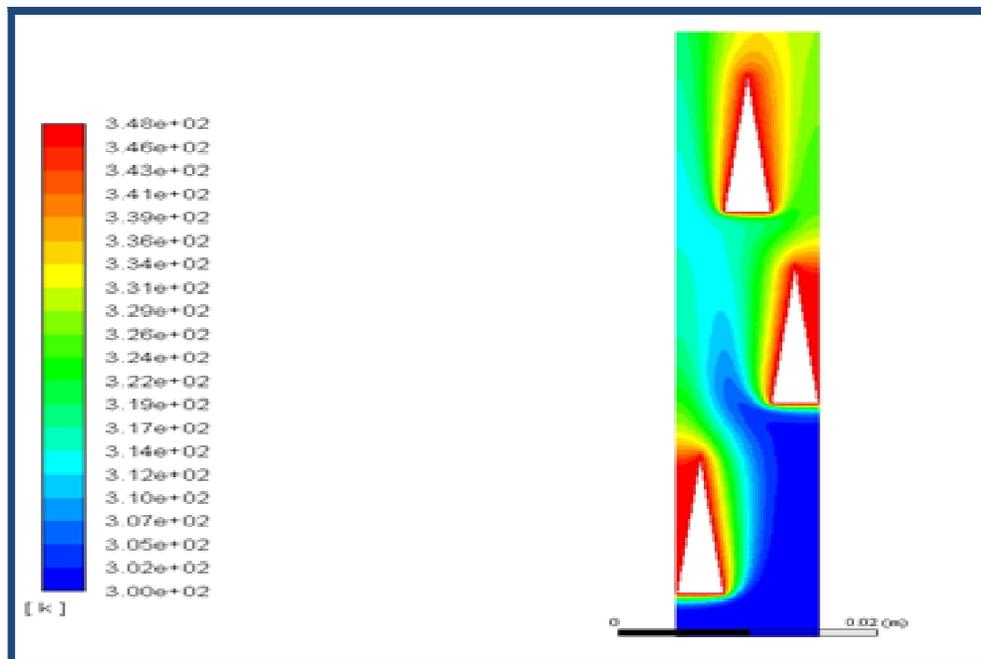


Figure (III-12) : Variation du nombre de Nusselt moyen pour différents nombres de Reynolds pour la forme triangulaire

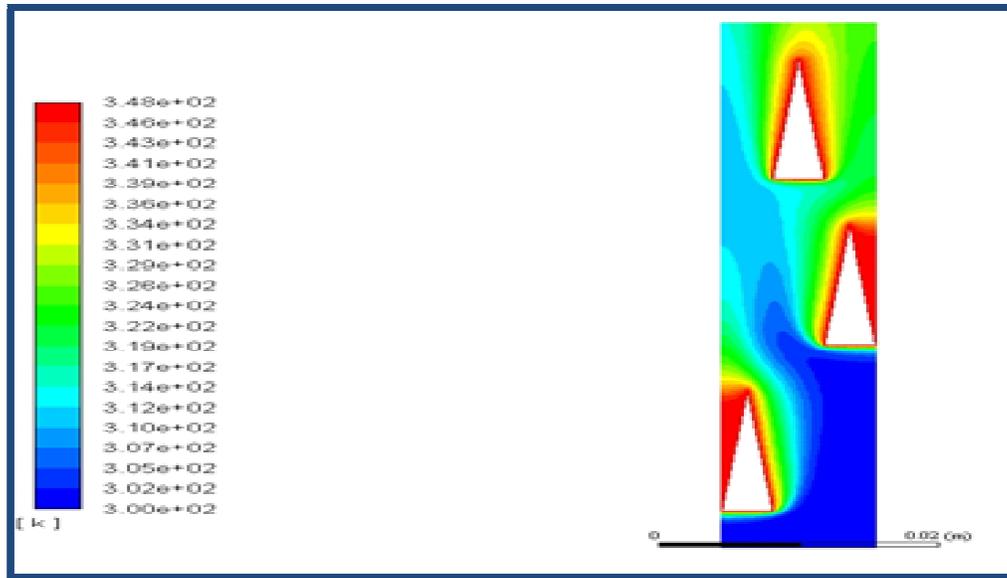
➤ Distribution de température



$Re = 1000$



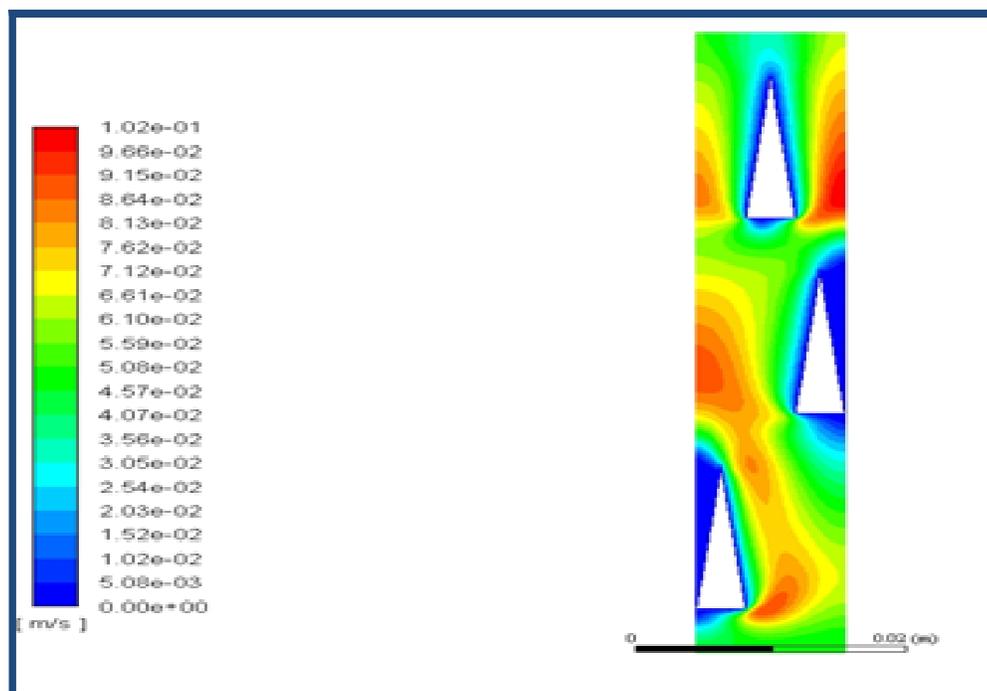
$Re = 4000$



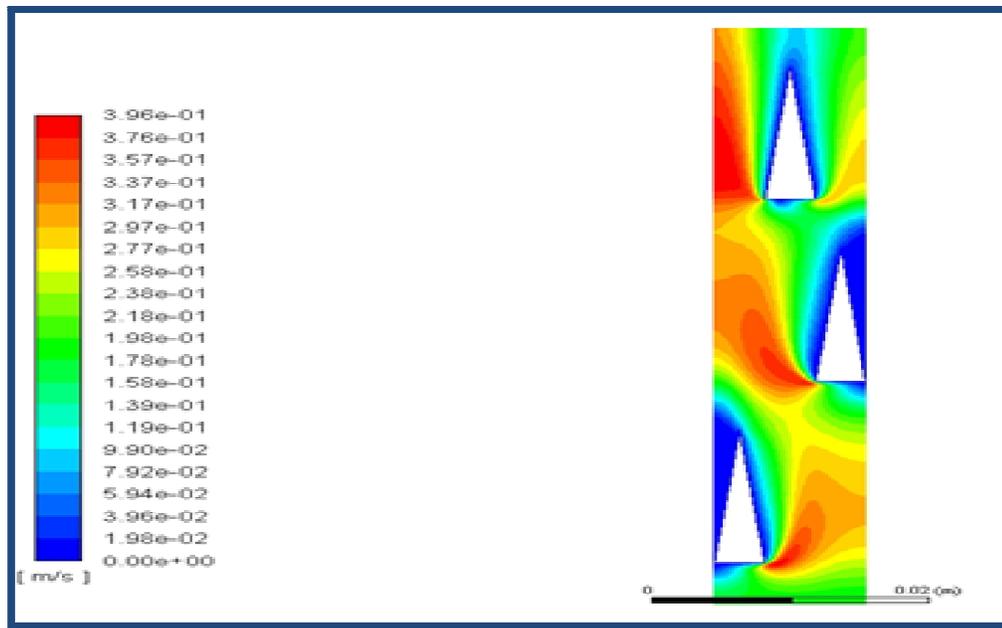
Re = 7000

Figure (III-13) : Contours de température pour Re =1000, 4000 et 7000

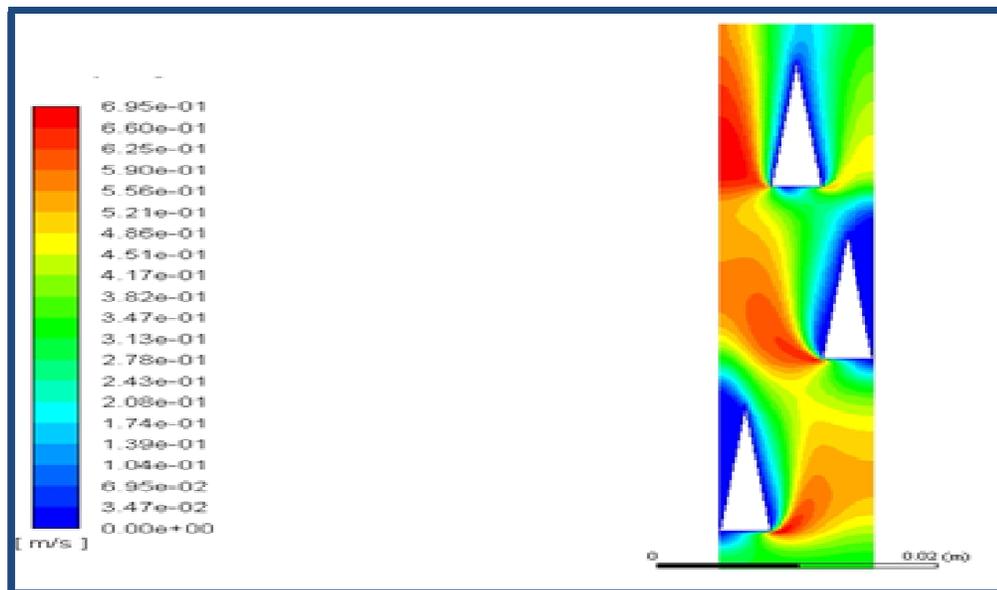
➤ Distribution de vitesse



Re = 1000



Re = 4000



Re = 7000

Figure (III-14) : Distribution de vitesse pour Re =1000, 4000 et 7000

Notez qu'à travers ces contours, nous avons observé que le taux de refroidissement sous cette forme est inférieur à celui de la forme carrée, indiquant la lente diffusion de l'air froid au niveau des ailettes.

III-3-2-1-3- Forme circulaire

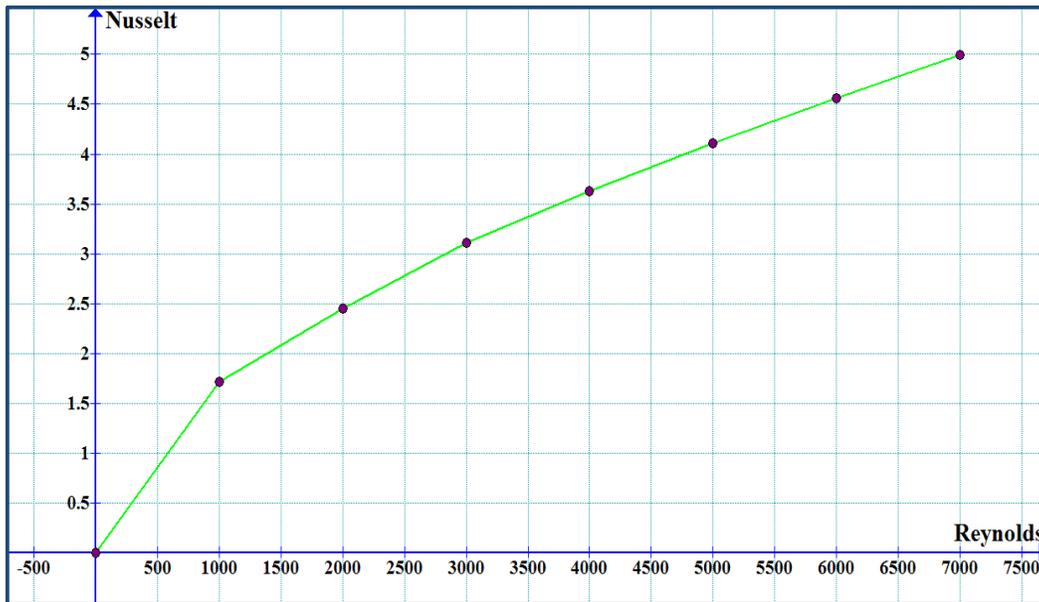
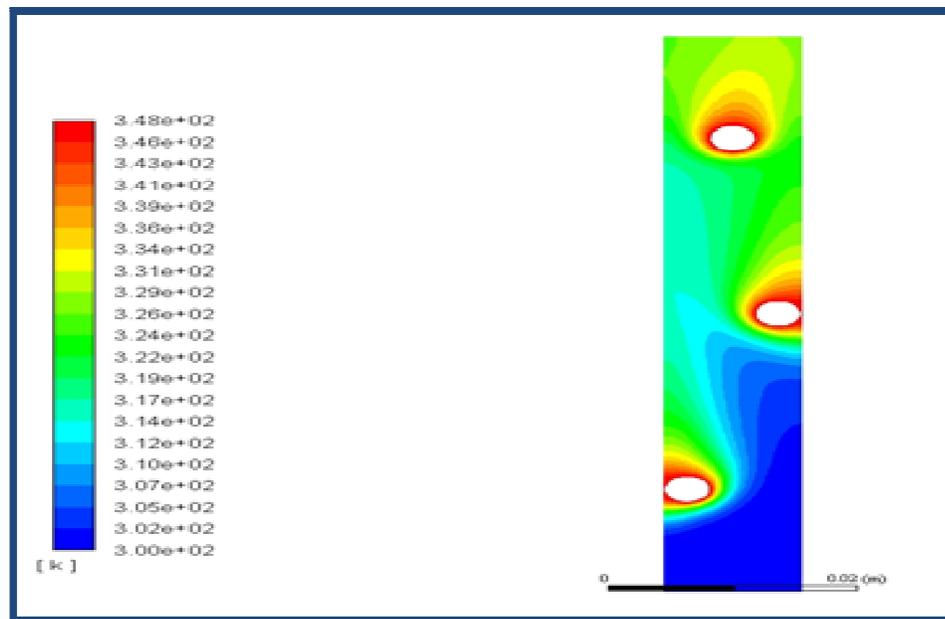
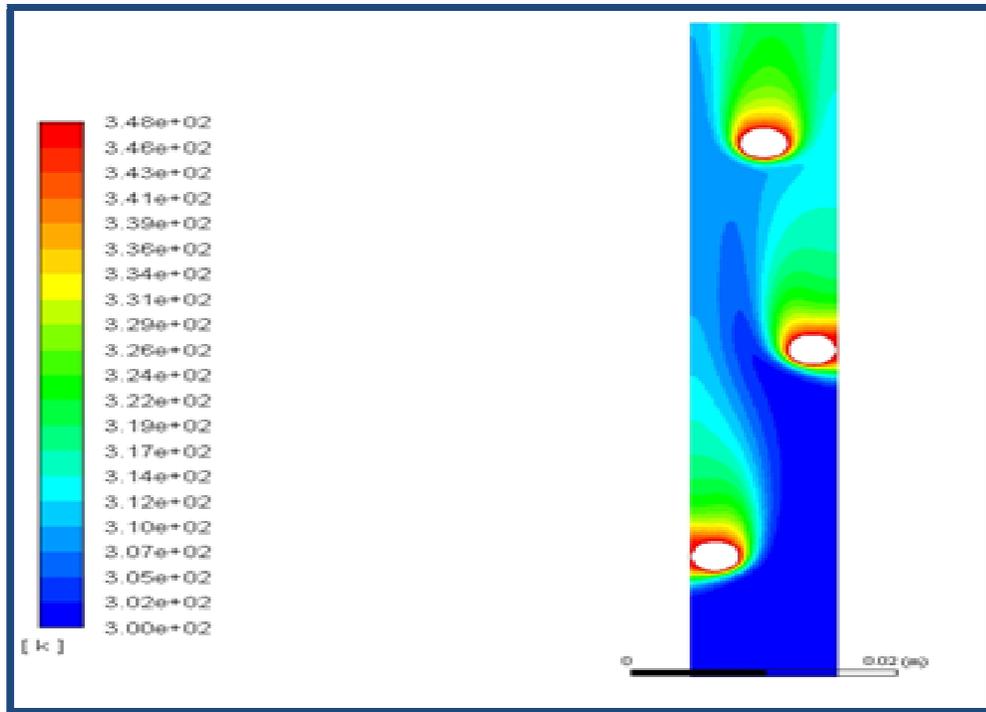


Figure (III-15) : Variation du nombre de Nusselt moyen pour différents nombres de Reynolds pour la forme circulaire

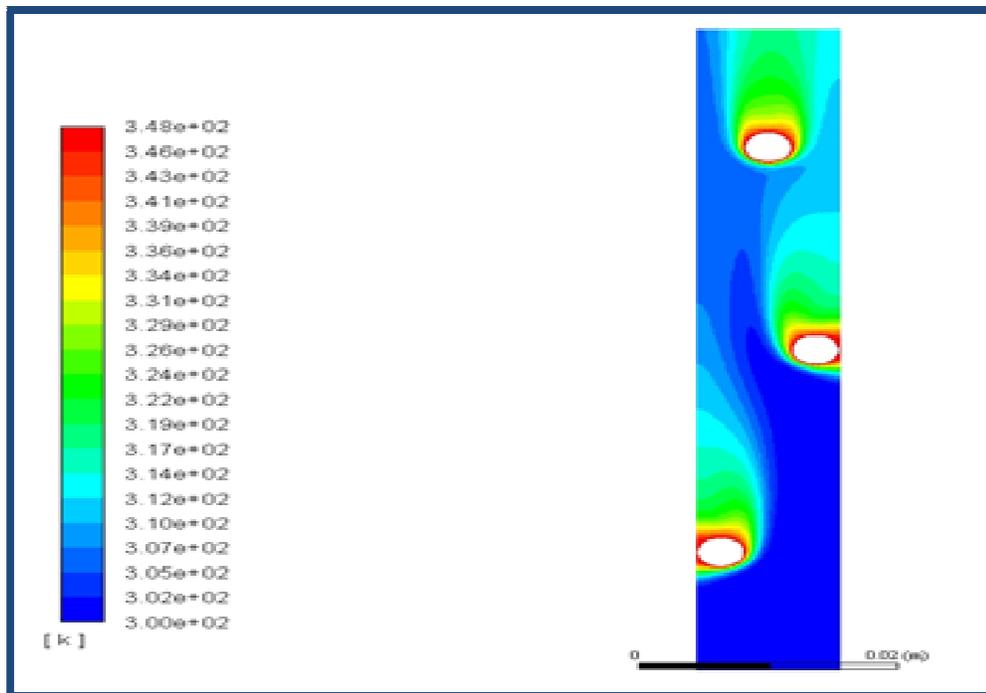
➤ Distribution de température



Re = 1000



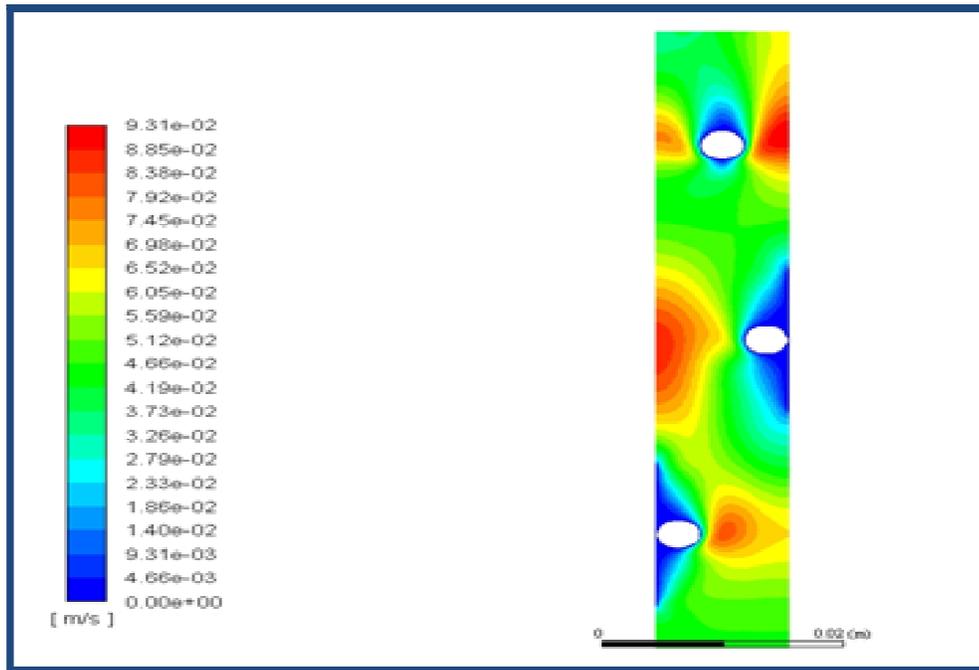
Re = 4000



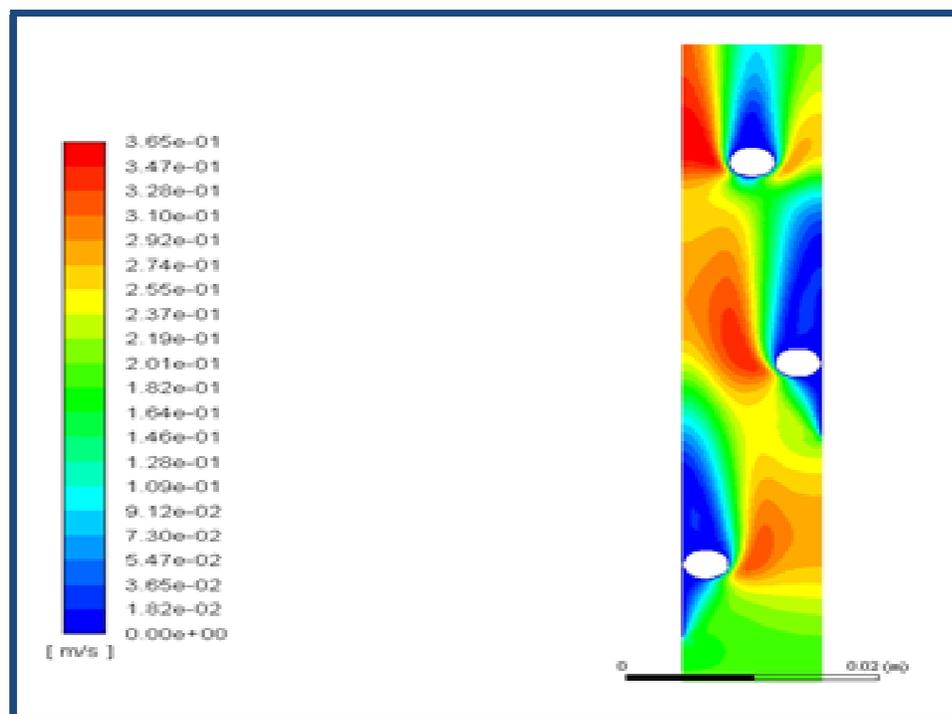
Re = 7000

Figure (III-16) : Distribution de température pour Re =1000, 4000 et 7000

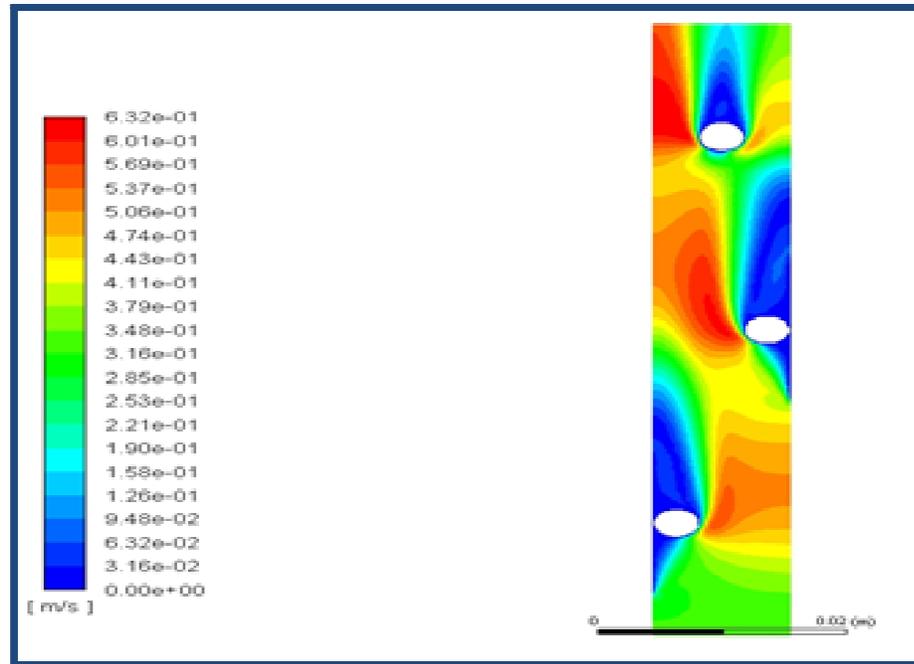
➤ Distribution de vitesse



Re = 1000



Re = 4000



Re =7000

Figure (III-17) : Distribution de vitesse pour Re =1000, 4000 et 7000

Après calcul de toutes les formes géométriques, on constate que la répartition de la chaleur varie d'une forme à l'autre.

La forme circulaire rend le processus de refroidissement plus rapide que les autres. La forme rectangulaire se présente comme un processus de refroidissement lent.

On a observé que la vitesse maximale au niveau de l'ailette pour la forme circulaire est très lente que les autres formes, ainsi la vitesse est très rapide pour la forme rectangulaire, c'est ta dire, plus la vitesse de l'air est lente dans l'ailette, plus le processus de refroidissement sera meilleur.

Pour pouvoir effectuer la comparaison entre les différentes configurations étudiées, on a tracé la courbe de Nusselt en fonction des nombres de Reynolds afin de déterminer la forme qui présente plus de performance.

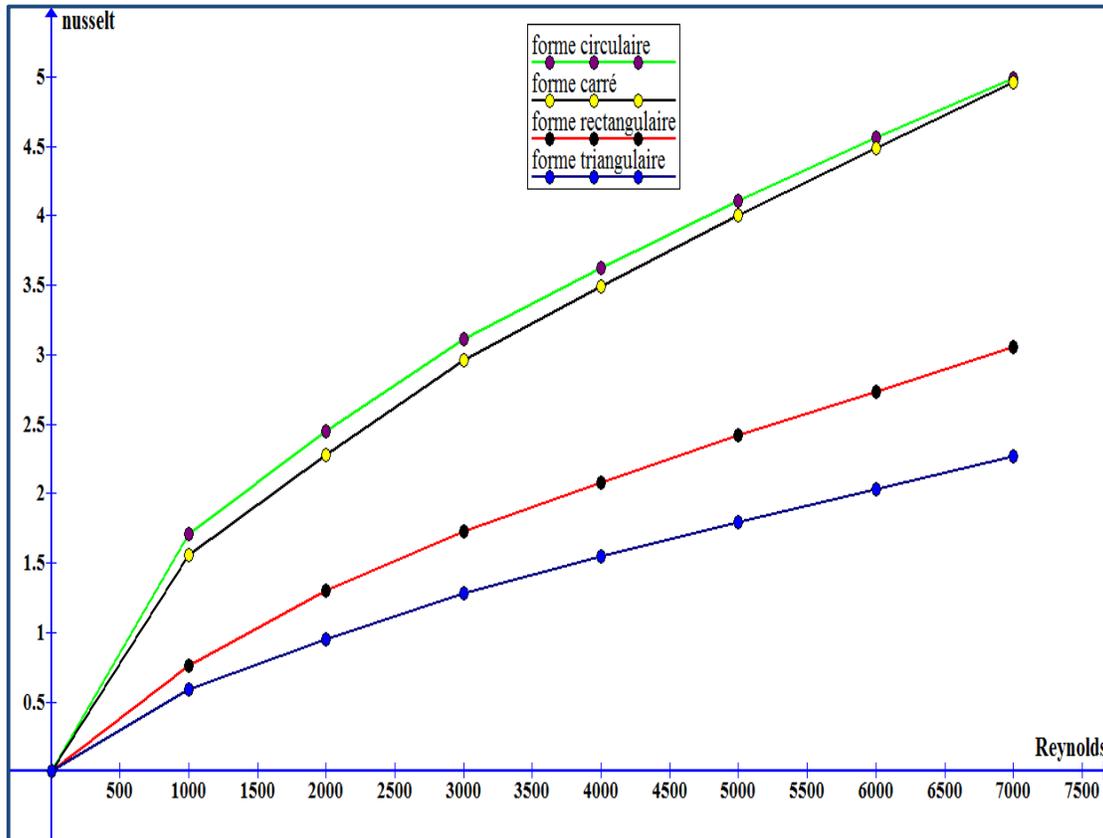


Figure (III-18) : Variation du nombre de Nusselt moyen pour les différentes formes

D'après cette figure et après une série de calculs pour les mêmes conditions aux limites, on a observé une augmentation du nombre de Nusselt en fonction de l'accroissement du nombre de Reynolds dans toutes les formes étudiées.

Nous avons noté également que le nombre de Nusselt dans la forme circulaire est plus grand que les autres formes, suivi par la forme carrée et la forme rectangulaire, tandis que celle de la triangulaire montre le plus petit nombre de Nu.

Dans la figure (III-19), on présente la variation du champ thermique pour les quatre formes étudiées pour Reynolds égal à 4000.

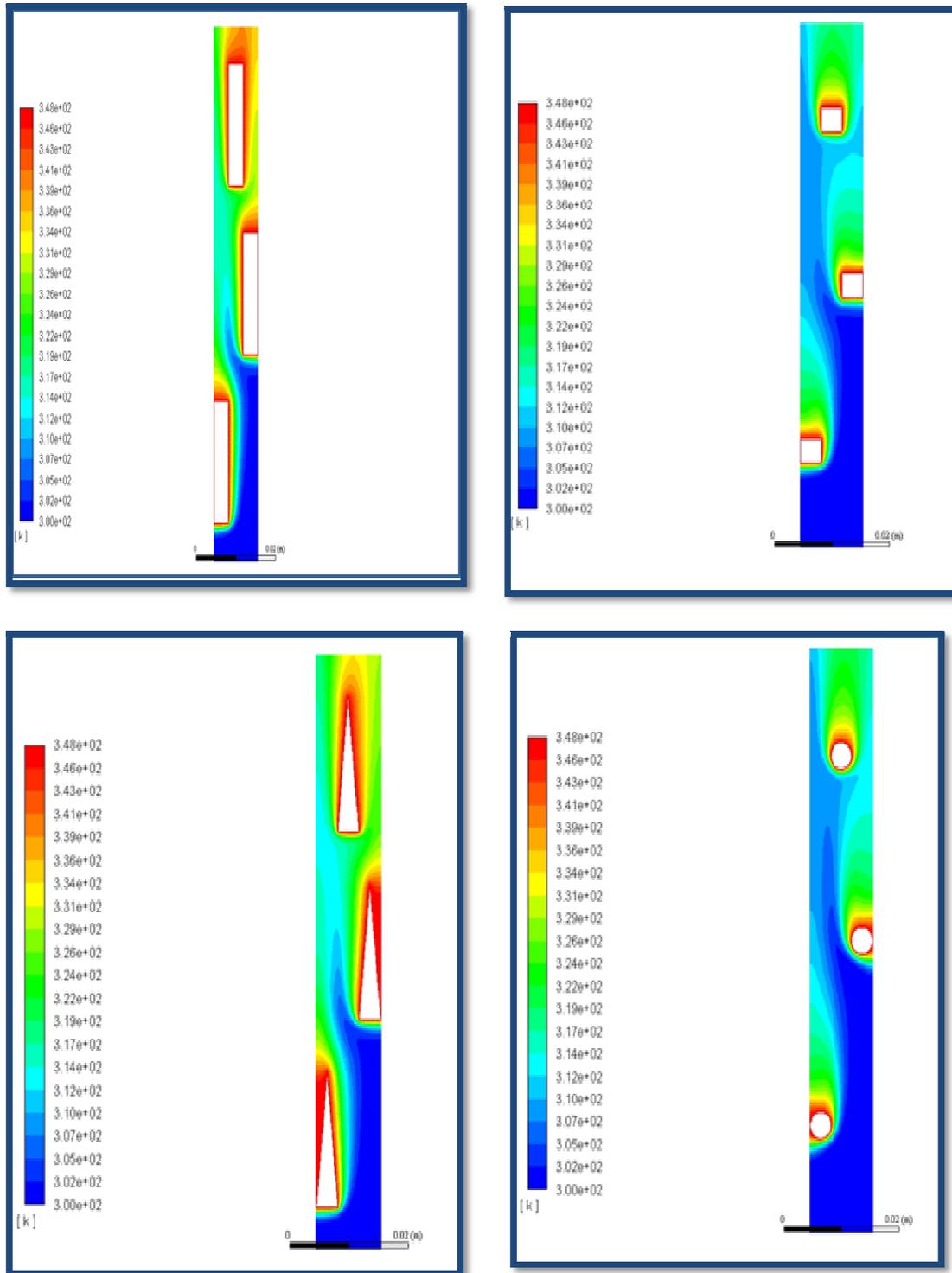


Figure (III-19) : Différents contours de températures pour les différentes géométries étudiées pour $Re=4000$

Pour les distributions de vitesse, ils sont représentés sur la figure (III-20).

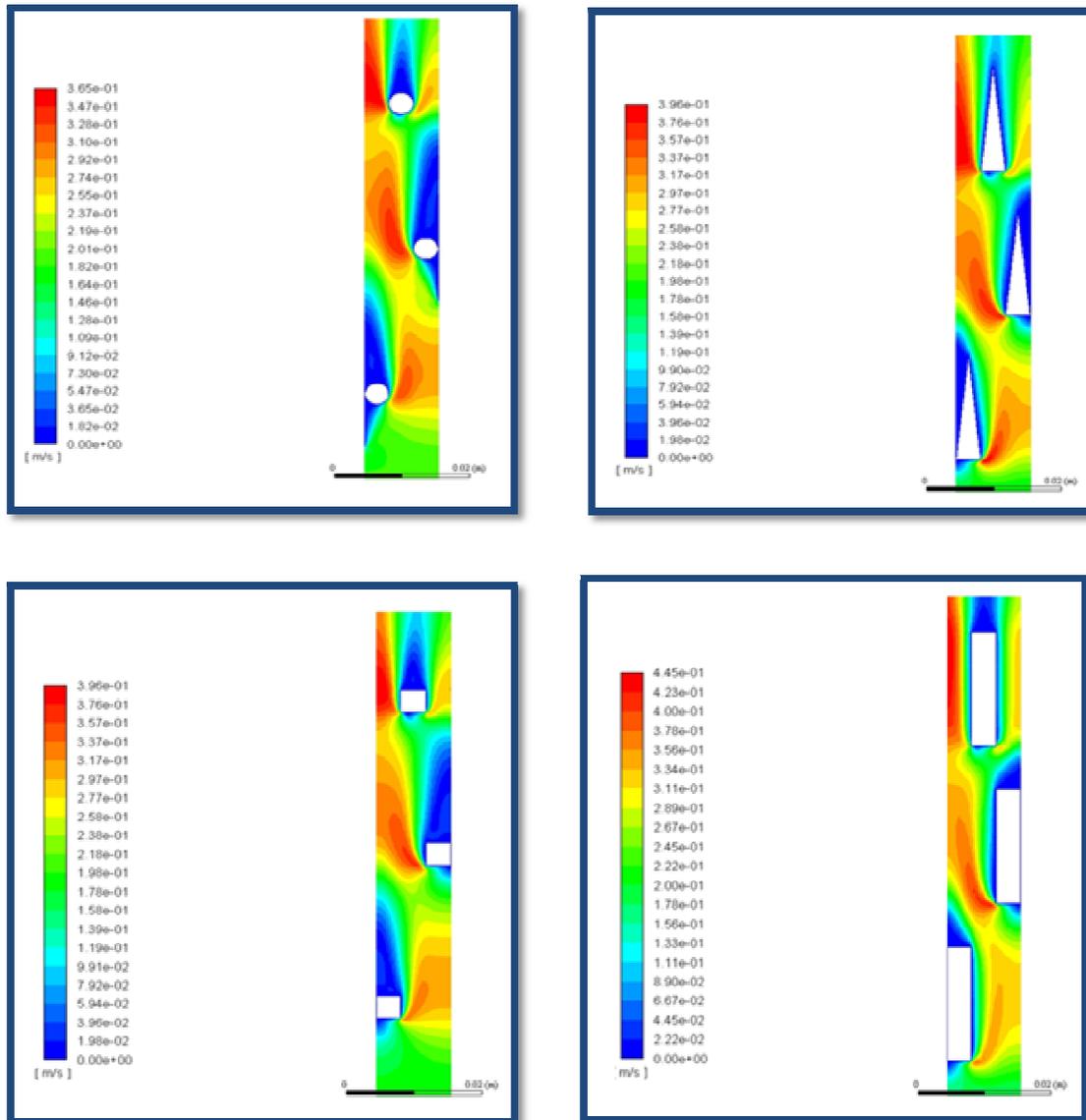


Figure (III-20) : Différents contours de vitesses pour les différentes géométries étudiées pour $Re=4000$

III-4- Conclusion :

En utilisant le code CFD « FLUENT », basé sur la méthode des volumes finis, on a pu déterminer les champs thermique et dynamique, ainsi que les variations du nombre de Nusselt moyen près des sources chaudes pour les mêmes conditions de calcul dans le but de caractériser le taux de transfert de chaleur à travers la partie étudiée.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude présentée dans ce mémoire porte sur l'échange thermique dans un radiateur d'automobile, du type Toyota B30, où il y a la circulation de deux fluides, l'eau à l'intérieur des tubes et l'air ambiant provenant de l'extérieur ou à travers un ventilateur.

La configuration géométrique du modèle physique est exposée sous forme d'un rectangle, contenant des tubes de la même forme, disposés en trois rangés en quinconce, où en les considérant comme sources chaudes dans cette étude bidimensionnelle.

Le problème a été abordé selon une approche numérique, basée sur la méthode des volumes finis en utilisant le code CFD FLUENT, intégré dans ANSYS.

Nous avons pu déterminer les contours de température et de vitesse, qui présentent respectivement les champs thermique et dynamique, ainsi que les variations du nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Reynolds, allant de 1000 jusqu'à 7000.

La détermination de ces champs d'écoulement nous a permis d'analyser le comportement de l'air à travers la surface de l'ailette.

En effet, d'après les résultats obtenus, plus le nombre de Reynolds augmente, plus le nombre de Nusselt moyen le long de la partie chaude augmente.

D'après l'étude comparative des différentes géométries des tubes considérés, on a pu conclure que l'échange thermique de la forme circulaire est très élevé que les autres géométries, ce qui a été vérifié par les courbes de variation du nombre de Nusselt. Cela signifie que la forme circulaire donne plus de performance que les autres formes, donc une meilleure efficacité de l'échangeur étudié.

Afin de continuer les recherches dans notre domaine d'étude, nous recommandons :

- D'élargir le domaine de simulation en trois dimensions ;
- D'étendre cette étude à d'autres formes ;
- D'étudier l'écoulement dans le cas instationnaire.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] S.Morsli. Simulation numérique de la convection naturelle et la génération de l'entropie dans les cavités. Mémoire de magister, option énergétique, université Mohamed Boudiaf Oran (2015).
- [2] M. Rikioua. Etude des performances d'un échangeur de chaleur croisé avec ou sans ailettes poreuses. Mémoire de magister, option énergétique, université de Batna (2011).
- [3] S.V. Patankar. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere McGraw-Hill, Washington, DC, 1980.
- [4] <https://www.boutiqueobdfacile.fr/blog/circuit-refroidissement-p39.html>.
- [5] <https://www.fiche-auto.com/2017/08/quest-ce-quun-radiateur.html>.
- [6] P. Trambouze. Le raffinage du pétrole, matériels et équipements. Livre, édition technip (1999).
- [7] S. Megui. Transferts thermiques. Licence mécanique 2^{ème} année, université de Sorbonne.
- [8] Y. Jannot. Transferts thermiques. Livre, école des mines Nancy (2012).
- [9] P. Tobaly. Echangeurs de chaleur. Licence professionnelle GPI, option MISM (2002).
- [10] F. Mebarek Oudina. Echangeurs de chaleur, cours et exercices corrigés. Livre, édition Al-Djazair, université 20Aout 1955 Skikda (2014).
- [11] F. Taourit. Etude du comportement dynamique et thermique de deux écoulements du fluide dans un échangeur de chaleur (comparaison entre le cas simple et le cas avec ailettes). Mémoire de master, option génie énergétique, université Abou Bakr Belkaid Tlemcen (2013).
- [12] <http://diren.mines-paristech.fr/sites/Thopt/fr/co/echangeurs.html>.
- [13] P. Bandelier, J.A. Gruss, P. Marty, C. Roussel et A. Bricard. Echangeurs de chaleur. Techniques de l'ingénieur, 2^{ème} édition, réf. Internet 42376 (2014).
- [14] B.Bourret. Les échangeurs de chaleur, INSA de Toulouse.
- [15] A.H.Benmachiche. Estimation du coefficient d'échange thermique local sur des ailettes circulaires planes d'un tube d'échangeur de chaleur à faisceau aligné ou quinconcé. Thèse de doctorat en science, option génie mécanique, université de Mohamed Khaider Biskra (2012).
- [16] R. Sathyan. Analysis of automobile radiator using computational fluid dynamics. International journal of latest technology in engineering, management and applied science, volume V, issue VI (2016).

- [17] C. Hadj et S. Hacini. Contribution à l'étude du procédé de fabrication d'un radiateur d'automobile de type R4-GTL au niveau de SONERAS. Rapport de stage de PFE (2018).
- [18] N. Néron, E. Riverin. Système de refroidissement de la formule SAE, université de Québec (2011).
- [19] <https://mecanique-voiture.com/circuit-de-refroidissement>.
- [20] Refroidissement véhicule-hella-sa service Germany.
- [21] Site de l'entreprise : <http://okindustrie.com/cms/fr>.
- [22] Documentation de l'entreprise SONERAS.
- [23] [24] A. Trabelsi. Etude de l'échange thermique dans une cavité rectangulaire avec deux cotés partiellement actifs. Mémoire de magister, option énergétique et procédés, université Kasdi Merbeh Ouargla (2011).
- [25] <http://www.mhlt.uwaterloo.ca/old/onlinetools/airprop/airprop.html>.
- [26] N. khodja et A. Soudani. Etude hydrodynamique et thermique des écoulements dans les microcanaux, édition universitaire européenne (2013).
- [27] B.M. Ismail et T. Mansour. Etude numérique comparative entre deux conditions thermiques symétriques (flux, température) appliquées dans les échangeurs de chaleur. Mémoire de master, université Abou Bakr Belkaid Tlemcen (2013).
- [28] M. Guestal. Modélisation de la convection naturelle laminaire dans une enceinte avec paroi chauffée partiellement. Mémoire de magister, université de Constantine (2010).
- [29] <https://www.google.com/url?q=https://www.techniques-ingenieur.fr/base documentaire/energies-th4/echangeurs-de-chaleur-42376210/echangeurs-de-chaleur.html>.
- [30] M.Younes. Etude numérique comparative entre deux types de chicanes et ailettes (trapézoïdale et triangulaire), utilisées pour améliorer les performances des capteurs solaires. Mémoire de magister, université Abou Bakr Belkaid Tlemcen (2012).

Annexes

Annexes A

Le coefficient de convection

Le coefficient de convection est déterminé si le flux de chaleur et le profil de température (T_∞ et T_p) sont connus.

En général, il est déterminé par un coefficient d'échange adimensionnel appelé *le nombre de Nusselt* (Nu) :

$$Nu = h.L / \lambda_F \quad (\text{A.1})$$

où L est la longueur caractéristique de la paroi prise dans le sens de l'écoulement (m) et λ_{fluide} le coefficient de conduction dans le fluide.

Le nombre de Nusselt est donné par une loi empirique qui dépend de la forme de la paroi et du régime d'écoulement. Il y a deux régimes d'écoulement:

- Écoulement laminaire, quand les filets de fluid restent parallèles à la paroi;
- Écoulement turbulent, quand les particules sont en mouvements désordonnées mais la direction générale de l'écoulement est conservée.

On utilise comme indicateur de régime le nombre sans dimension de Reynolds (qui exprime le rapport entre la force d'inertie et la force de viscosité) qui pour une paroi cylindrique se met sous la forme :

$$Re = v.D / \nu \quad (\text{A.2})$$

où v est la vitesse du fluide (m / s), D est le diamètre du cylindre (m) et ν est la viscosité du fluide (m^2 / s).

Pour un corps cylindrique, le nombre de Nusselt peut se mettre sous la forme :

$$Nu = a + b \cdot Re^n \quad (\text{A.3})$$

où les coefficients a , b et n sont donnés au **tableau A-1**.

Tableau A-1

Type d'écoulement	Rang de Re	a	b	N
Laminaire	0.1 à 1000	0.32	0.43	0.52
Turbulent	1000 à 50000	0	0.24	0.6

Pour une meilleure compréhension du phénomène de convection naturelle, on considère une plaque chaude (froide) placée verticalement dans un fluide de température inférieure (supérieure) à la température de la plaque. Pendant le transfert de chaleur qui se fait en premier lieu par conduction à travers le fluide, il apparaît un gradient de température qui

s'établit dans celui-ci. La variation de température dans le fluide génère un gradient de densité qui fait apparaître une force dit "force gravifique". Si la température de la paroi est suffisante, cette force sera supérieure à la force de frottement (entre le fluide-paroi et entre fluide-fluide). Ceci entraînera un mouvement ascensionnel (descendant) du fluide. Ce mouvement de convection est appelé convection naturelle. La vitesse du fluide ainsi que le coefficient de convection est beaucoup plus faible qu'en convection forcée.

Dans la convection, l'écoulement du fluide ainsi que le gradient de température développent respectivement sur la paroi une couche limite mécanique (d) et une couche limite thermique (δ_t) (la couche limite est la région du fluide dont la température est affectée par la présence de la paroi. Cette couche est théoriquement infinie mais on limite sa profondeur de distance à la paroi à laquelle l'écart de température fluide-paroi vaut 99 % de l'écart maximum ($T_p - T_\infty$)). Pour un fluide gazeux, $\delta = \delta_t$. Dans le cas d'une convection naturelle, la vitesse du fluide est nulle sur la plaque et au large de cette couche.

Elle possède un maximum à $d/3$.

Le régime d'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent) dépend de la grandeur du gradient de température. Ce régime est déterminé par un nombre adimensionnel appelé le nombre de Grashof (Gr). Celui-ci représente le rapport entre la force gravifique et la force de viscosité.

Il est similaire au nombre de Reynolds en convection forcée :

$$Gr = g \beta L^3 (T_p - T_\infty) / \nu^2 \quad (\text{A.4})$$

Où

g - l'accélération de la pesanteur (m/s^2) ;

β - le coefficient d'expansion (K^{-1}) ;

L - la longueur caractéristique de la paroi dans le sens de l'écoulement (m) ;

T_p - la température de la paroi (K) ;

T_∞ - la température du fluide (au large de la paroi) (K) ;

ν - la viscosité du fluide (m^2/s) ;

En toute généralité le nombre de Nusselt est fonction de :

$$Nu = f(Ra) \quad (\text{A.5})$$

où Ra est un nombre adimensionnel appelé *le nombre de Rayleigh* défini comme :

$$Ra = Pr \cdot Gr \quad (\text{A.6})$$

Annexes

avec Gr le nombre de Grashof et Pr aussi un nombre adimensionnel appelé **le nombre de Prandtl** :

$$Pr = \nu / a \quad (\text{A.7})$$

où ν est la viscosité du milieu (m^2 / s) et a est la diffusivité thermique (m^2 / s).

Le nombre Pr quantifie l'importance relative des couches limites mécaniques et thermiques.

Pour des gaz (tel que l'air), $Pr \cong 1$ les couches limites thermiques et mécaniques sont équivalentes ($\delta = \delta_t$). **Le nombre de Rayleigh** s'écrit ainsi :

$$Ra = g \beta \Delta TL^3 / \alpha \nu \quad (\text{A.8})$$