

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

LE MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Génie Mécanique

Option : Énergétique

Intitulé :

COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN BLOC MOTEUR REFROIDI PAR AIR

Présenté par :

- Zeggai Mohamed El Moetazz
- Zahzouh Houcin
- Behloul Sabrina

Soutenu le : 29/06/2021.....devant le Jury :

- | | | | |
|------------------------------------|------------|-----------------------------------|------------------|
| ➤ <i>Dr. Khatir Naima</i> | MCA | <i>Centre Universitaire Naâma</i> | Président |
| ➤ <i>Dr. Medjahed Driss Meddah</i> | MCB | <i>Centre Universitaire Naâma</i> | Encadreur |
| ➤ <i>Dr. Khatir Tawfik</i> | MCA | <i>Centre Universitaire Naâma</i> | Examineur |

Remerciements

بسم الله الرحمن الرحيم

اللهم صل على سيدنا محمد وعلى آله وصحبه وسلم تسليما كبيرا إلى يوم الدين

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à mes chers parents pour leur soutenu constant et leurs encouragements ma reconnaissance et mes sincères remerciements vont à mon encadreur pour m'avoir dirigé tout au long de la réalisation de ce travail, ses orientations, sa compréhension, sa disponibilité constant m'ont été d'une précieuse aide

Je tiens à remercier mes collègues (tayeb nebbou)

Je remercie également toute l'équipe pédagogique du centre universitaire

SALHI AHMED

Dédicace

*Louange et remerciements à Dieu qui nous a permis
d'achever ce travail*

Je dédie mon diplôme à

*A celle qui a tant sacrifié pour moi et chère à mon coeur, ma chère
maman*

*A mon soutien, ma force et mon refuge après Dieu mon Père
A celle qui a partagé mes joies et mes peines, mes chères sœur nahla
imane , chaima oum lkhir ,radia rihab*

*Merci beaucoup à tous les membres de ma famille, en particulier mon
frère achraf abdelmodjib , pour leur amour, leur confiance et leurs
conseils, en plus de leur soutien inconditionnel.*

*À ceux avec qui la plate-forme de connaissance et d'amitié m'a réuni, mes
collègues et collègues à qui j'ai les plus hautes expressions d'amour et
d'appréciation.*

*Merci à tous les enseignants, en particulier à Medjahed driss, qui m'a
enseigné et m'a amené à ce point, qui était la conclusion de mon diplôme.*

***J'espère que cet humble travail sera un phare pour
chaque étudiant***

.Zeggai Mohamed El Moetaz

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

Mon père ,ma mère ,mon frère et sa fille soujoud et son fils mossàab et haroun

*Mes collègues et mes amies surtout Nebbou Tayeb et AMEL a tous mes
professeurs*

Behloul Sabrina

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chers frères, pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible,

Zahzouh Houcin

Dédicace	
Remerciements	
Liste des figures	
Nomenclature	
Résumé	
Introduction générale	

CHAPITRE I : Généralités sur les moteur à combustion interne

I.1. Introduction	6
I. 2. Le moteur à combustion interne	6
I.2.1.définition	6
I.3 . les organes de moteur	6
I.3.1 . Le bloc-moteur	6
I.3.2. Culasse	7
I.3.3 .Carter d’huile	9
I.3.4 Piston	10
I.3.5 Soupapes	10
I.3.6. La bielle	11
I.3.7. Le vilebrequin	12
I.4. Fonctionnement du moteur	12
I.5.caractéristiques des moteurs	13

CHAPITRE II : Transfert de chaleur

II.1.Introduction	15
II ..le transfert de chaleur	15
II.1. définition	15
II.2.modes de transfert de chaleur	15
II.2.1.la conduction	16
II.2.2 .la convection	16
II.2.3.le rayonnement	17
II.3 différents types de refroidissement	17
II.3.1 refroidissement à air	18
II.3.2 refroidissement par liquide	19
II.4. le circuit du système de refroidissement	19
II.4.1 le liquide de refroidissement	19
II.4.1.1.Ethylène-glycol	19
II.4 .2 .La pompe à eau	20
II.4.3 . Le thermostat	20
II.4.4 .Le radiateur	21
II.4 .5 .Le ventilateur	22

CHAPITRE III : Etude théorique d'ailettes

I. Introduction	24
II. Définition :	24
II.1. Flux de chaleur	24
II.2. Densité de flux thermique	24
III. Transfert thermique par conduction :	25
III.1. Conduction :	25
III.2. Définition :	26
III.2.1. Loi de Fourier :	26
III.2.2. Conductivité thermique	26
IV. Transferts thermiques par convection :	27
IV.1 Convection :	27
IV.2. Les différents types de convection :	27
IV.2.1. La convection naturelle ou libre :	27
IV.2.2. La convection forcée	27
IV.3. Loi de Newton	27
V. Transfert thermique par rayonnement :	27
V.1. Rayonnement	27
V.2. Définition :	27
V.2.1. Loi de Planck	27
V.2.2. Corps noir	28
VI. Dissipateur de chaleur	28
VII. Introduction au transfert de chaleur dans les dissipateurs	29
VIII. Les résistances dans un modèle de dissipateur de chaleur	30
VIII.1 Résistance ambiante du dissipateur R_{sa}	31
VIII.2 Résistance de conduction de la plaque R_{bf}	31
IX. Transfert de chaleur par conduction	32
IX.1 Résistance R_{SP}	33
IX.2 Résistance R_{FA}	33
IX.3 Facteur de conduction de l'ailette: $A_p + \eta \cdot A_f$	34
IX.4 Analyse de l'efficacité η	35
IX.5 Démonstration des ailettes longitudinales rectangulaires	36
IX.6 Équations longitudinales trapézoïdales	37
X. Coefficient de convection hc	38
X.1 Coefficient d'équivalence de rayonnement h	38
X.2 Rayonnement dans les dissipateurs thermiques	39
XI. Conclusion	40

CHAPITRE IV : Simulation numérique

I.1. Introduction.....	41
I.2. Géométrie et les conditions aux limites.....	41
I. 3. Optimisation du maillage.....	42
I. 4 L'effet du coefficient de convection sur le transfert de chaleur du moteur.....	43
I. 5. L'effet de la conductivité thermique sur le transfert de chaleur du moteur.....	43
I.6. L'effet de nombre des ailettes sur la distribution de la température.....	44
I. 7. L'effet de la longueur des ailettes sur la distribution de la température.....	45
I.8. Conclusion.....	45

CHAPITRE I : Généralités sur les moteurs à combustion interne

Fig.I.1. Bloc moteur.....	7
Fig I.2 Culasse.....	8
Fig I.3 <i>Vue en coupe de la culasse d'un moteur à essence</i>	9
Fig.I.4. Carter d'huile.....	9
Fig. I.5 . Piston.....	10
Fig I .6 Soupape.....	11
Fig .I.7. La bielle	11
Fig .I.8. Le vilebrequin.....	12

CHAPITRE II : Transfert de chaleur

Fig.II.1 la conduction.....	16
Fig.II.2 la convection.....	17
Fig.II.3. La pompe à eau	20
Fig.II.3. Le thermostat.....	21
Fig.II.4. Le radiateur.....	22
Fig. II.5.Les différents types du ventilateur.....	22

CHAPITRE III : Etude théorique d'ailettes

Fig. III.1. la densité de flux de chaleur.....	25
Fig .III.2 tube de flux de chaleur.....	26
Fig.III.3 exemple de deux géométries d'un dissipateur de chaleur.....	28
Fig.III.4 résistances dans un dissipateur de chaleur.....	30
Fig.III.5. flux communs des dissipateurs de chaleur.....	31
Fig.III.6 diffusion dans la base.....	33
Fi.III.7 surface dans un dissipateur thermique à ailettes parallèles.....	34
Fig.III.8. Profil rectangulaire, profil hyperbolique, profil triangulaire, profil trapézoïdal.....	35
Fig.III.9. Profil d'ailette	35
Fig.III.10. Profil longitudinal rectangulaire	36
Fig.III.11.Profil d'ailette longitudinal trapézoïdal	38
Fig.III.12. Paramètres géométriques du dissipateur de chaleur.....	40

Chapitre IV Simulation numérique

Fig.I: Coupe de la géométrie du moteur.....41
Fig. II : Illustration schématique du domaine de calcul et les conditions aux limites pour chaque surface.....42
Fig. III :Flux de chaleur pour différents maillages.....42
Fig.IV:Variation du flux de chaleur en fonction de coefficient de convection.....43
Fig. V : Variation du flux de chaleur en fonction de la conductivité thermique.....43
Fig. VI : Distribution de la température par rapport a les nombres des ailettes.....44
Fig.VII:Distribution de la température par rapport a les nombres des ailettes.....45

Nomenclature

C_u	Cylindrée unitaire	cm^3
A	Alésage	Cm
C	Course	Cm
n	Nombre de cylindres	
C_t	Cylindrée totale	
ρ	Rapport volumétrique	
v	Volume de la chambre de combustion	
F	Force	N
P	Pression	Bars
S	Surface	W/m^3
R_{th}	Résistance thermique de conduction	$^{\circ}\text{C/W}$
S	Surface	m^2
S	Aire de la surface de contact solide/fluide	m^2
T_p	Température des surfaces solides	$^{\circ}\text{C}$
T_g	Température des gaz de combustion	$^{\circ}\text{C}$
T_{∞}	Température du milieu environnant la surface	$^{\circ}\text{C}$
V	Vitesse moyenne d'écoulement à travers la section considérée	m/s

Introduction Générale

Le bon fonctionnement d'un moteur à combustion interne dépend de la conception du système de refroidissement que se soit par l'air ou par l'eau. Notons que malgré la majorité des moteurs à combustion interne sont généralement équipés d'un système de refroidissement par eau, il existe actuellement aussi des moteurs refroidis par air. Ces derniers se distinguent par leur simplicité, leur faible coût de construction, leur poids réduit, et une absence d'entretien. Dans ce travail, on va étudier le comportement thermique du bloc cylindre d'un moteur diesel refroidi par air à l'aide du logiciel commercial de simulations numérique Comsol en modifiant la géométrie et le nombre d'ailettes de refroidissement.

Nous savons que le fonctionnement d'un moteur est basé sur la combustion produisant une élévation rapide de la pression et de la température lesquelles ne doivent pas affecter les caractéristiques mécaniques et thermiques du moteur. La dilatation du piston et du cylindre a une influence sur les jeux de fonctionnement et par conséquent sur le comportement tribologique des organes du moteur. La température maximale de fonctionnement d'un moteur est limitée par la résistance mécanique et par les variations dimensionnelles dues à la dilatation. Des températures très élevées du moteur peuvent constituer un danger de grippage. Ainsi, une amélioration du transfert de chaleur aux parois du cylindre contribue fortement à une chute de température du cylindre. De ce fait, il est impératif d'optimiser le refroidissement des parois du cylindre constituées d'ailettes.

Historique de moteur Diesel

Le **moteur Diesel** tire son nom des travaux de l'ingénieur allemand Rudolf **Diesel** entre 1893 et 1897. Le **moteur Diesel** peut être soit à deux temps (surtout sur les navires, avec suralimentation par compresseur et injection pneumatique), soit à quatre temps, notamment dans les véhicules routiers et la plupart des navires

Historique de moteur à allumage commandé

C'est en 1860, approximativement à la même période en France et en Allemagne, que naît le « moteur *dit* à explosion ». Le 24 janvier, Étienne Lenoir dépose le brevet d'un « système de moteur à air deux temps dilaté par la combustion des gaz enflammés par l'électricité ». En raison de l'absence de compression des gaz préalablement à l'allumage, le moteur Lenoir souffre d'un rendement médiocre¹.

Il faut attendre le 16 janvier 1862 pour que le physicien Alphonse Beau de Rochas théorise le cycle thermodynamique d'un moteur à allumage commandé à quatre temps. C'est sur ce

principe que fonctionne l'ensemble des moteurs à essence actuels. Néanmoins, Beau de Rochas est un théoricien et non un praticien, si bien que le premier moteur à allumage commandé, exploitant ce cycle thermodynamique, est mis au point par Nikolaus Otto en 1864.

Dans les débuts du moteur à combustion interne à allumage commandé, seule la variation de l'avance à allumage permettait de moduler la puissance du moteur. Bien qu'assez efficace, ce procédé est limité par le phénomène de cliquetis et a l'inconvénient majeur d'une consommation élevée de carburant, quelle que soit la puissance demandée au moteur. Ce système de régulation a été avantageusement remplacé par un réglage du débit du mélange air/carburant, tout en conservant l'avance à l'allumage variable, au début toujours commandée par le conducteur, puis automatiquement asservie à certains paramètres de fonctionnement du moteur.

Une fois conçus, les moteurs à allumage commandé ont très rapidement été utilisés et installés sur des automobiles par les constructeurs naissants : Daimler, Benz, Peugeot, Renault, Panhard & Levassor, etc.

I.1 Introduction

Les moteurs à combustion interne transforment l'énergie chimique stockée dans un carburant en travail grâce à la détente du gaz durant la combustion. Ils sont principalement utilisés pour la propulsion des véhicules de transport : avion à hélice, motos, camions et bateaux.

I.2 Le moteur à combustion interne

I.2.1 définition

Un moteur à combustion interne est une machine thermique où l'énergie thermique dégagée par la combustion est transformée en énergie motrice mécanique directement à l'intérieur du moteur, en opposition au moteur à combustion externe où l'énergie est transportée par un fluide caloporteur à l'extérieur de celle-ci, comme dans un ensemble chaudière, turbine à vapeur ou moteur Stirling. Dans les moteurs à combustion interne (MCI), les produits de combustion (par exemple l'air et le carburant) sont utilisés comme fluides de travail, tandis que dans les moteurs à combustion externe, la combustion produit le transfert de chaleur à un autre fluide de travail au moyen d'échangeurs de chaleur. En outre, alors que dans le MCI la combustion a lieu à l'intérieur du cylindre, dans les moteurs à combustion externe, la combustion est obtenue dans une chambre séparée, appelée habituellement brûleur.

I.3 : les organes de moteur

I.3.1 : Le bloc-moteur

Il supporte directement ou non, les parois latérales des cylindres. Le bloc-cylindres formé d'une seule pièce est plus résistant aux efforts produits. Les matériaux de sa construction, soit les fontes spéciales soit les alliages légers à base de magnésium. Il est soumis à des efforts complexes, l'assemblage au châssis n'est jamais rigide : on interpose des blocs antivibratoires qui ont la propriété de se déformer.

- **Matière :**

Du fait de sa forme complexe, le bloc-moteur est une pièce coulée généralement réalisée en fonte mais parfois aussi en aluminium. Le bloc comporte de nombreuses cavités intérieures permettant le passage du liquide de refroidissement, les pistons sont montés directement sur les blocs-moteur en fonte. Sur les blocs-moteur en aluminium, il faut prévoir

une chemise de cylindre résistante à l'usure, on peut aussi obtenir une surface résistante à l'usure en appliquant une couche de nicasil (alliage de nickel et de carbure de silicium). [1]

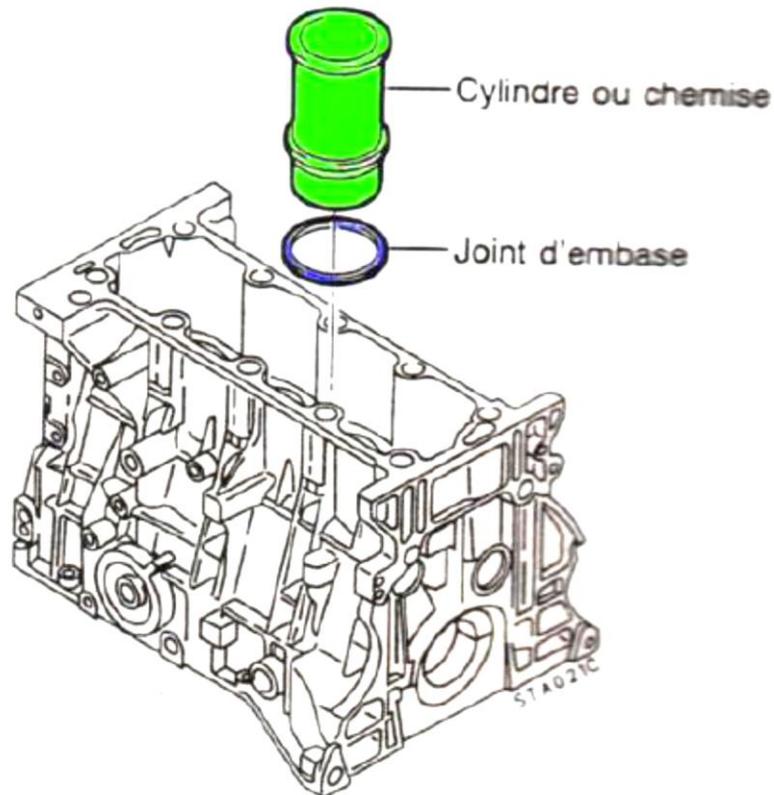


Fig I.1 Bloc moteur

I.3.2. culasse : La culasse ferme la partie supérieure du bloc moteur. Les soupapes sont ménagées dans la culasse. Compte tenu de la grande quantité de chaleur dégagée à cet endroit, le refroidissement doit être très efficace



Figure I.2: la culasse

La culasse assure la fermeture des cylindres dans leur partie supérieure, constituant ainsi la chambre de combustion. Elle permet l'arrivée et l'évacuation des gaz, la mise en position des éléments de la distribution et de l'allumage, l'évacuation rapide de la chaleur. La culasse est obtenue par le moulage puis par usinage de la fonte ou d'alliage en aluminium.

Les contraintes mécaniques étant moins importantes dans une culasse par rapport au bloc-moteur,

les constructeurs ont quasiment abandonné la fonte au profit de l'aluminium, en raison de sa légèreté et sa très bonne conductivité thermique. Un réseau de conduits d'eau et d'huile est pratiqué dans la culasse, l'étanchéité bloc-culasse est assurée par le joint de culasse.[1]

1. Chambre de combustion
2. Cheminée de bougie
3. Chapelles

4. Canalisation de refroidissement
5. Guide soupape
6. Rondelle d'appui du ressort
7. Communication avec le bloc
8. Siège de soupape
9. Plan de joint de culasse

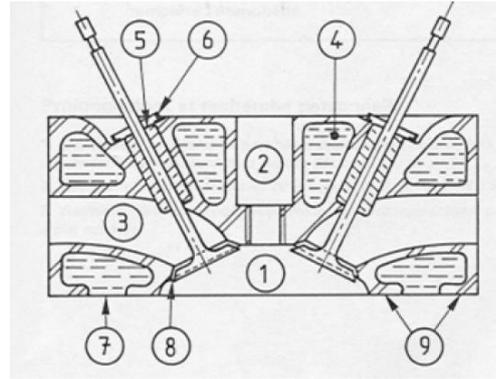


Figure I.3: Vue en coupe de la culasse d'un moteur à essence.

I.3.3. Le carter d'huile

C'est une cuvette en tôle emboutie qui abrite le vilebrequin et les têtes de bielle et qui contient la réserve d'huile de graissage. Il peut être en alliage léger moulé avec des nervures à l'extérieur pour assurer un bon refroidissement de l'huile échauffée par son passage dans le moteur. L'étanchéité entre le carter-moteur et le carter inférieur doit être parfaite. Elle est assurée par un joint plat en liège ou bien par un joint cylindrique, en caoutchouc synthétique ou en silicone, logé dans une gorge.[2]



Fig I.4 carter

I.3.4. Piston :

Animé d'un mouvement rectiligne alternatif, le piston est réalisé en fonte alliée. La tête de piston forme une partie de la chambre de combustion. A ce titre, elle est quelque fois creusée de cavités destinées à créer une turbulence favorable à la combustion. Des segments sont logés dans la partie haute du piston, la tête, assure l'étanchéité de la chambre de combustion.

On distingue le segment de feu, les segments de l'étanchéité et les segments racleurs, dont l'un est souvent disposé plus bas que l'axe de piston. Le segment de feu est le plus souvent chromé. Il est disposé assez loin du bord de piston afin d'éviter qu'il soit soumis directement à la chaleur dégagée lors de la combustion.[2]



Fig I .5 piston

I.3.5. Soupapes :

Une soupape est un organe mécanique de la distribution des moteurs thermiques à quatre temps, permettant l'admission des gaz frais et l'évacuation des gaz brûlés. De manière générale, une soupape d'admission sépare le conduit d'admission de la chambre de combustion, et une soupape d'échappement sépare celle-ci du conduit d'échappement .[1]

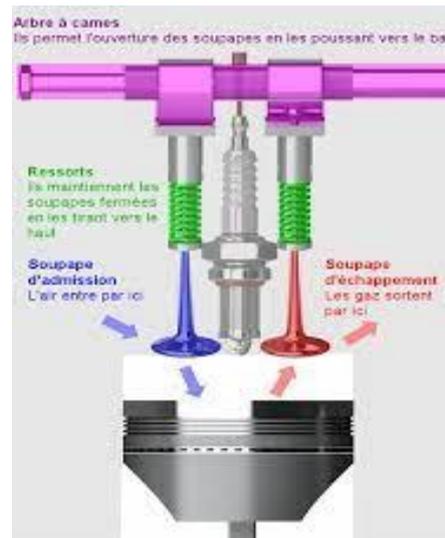


Fig I .6 Soupape

I.3.6. La bielle :

La bielle est un élément intermédiaire qui permet la transmission des forces entre deux éléments animés de mouvements différents : Le mouvement rectiligne alternatif du piston. Le mouvement circulaire continu du vilebrequin. Par la combinaison des mouvements rapides du piston et du vilebrequin, cet élément est soumis à de multiples contraintes : la compression, la traction, la flexion. Elle peut être en fonte GS, en acier forgé ou fritté, et aussi en alliage léger[3]

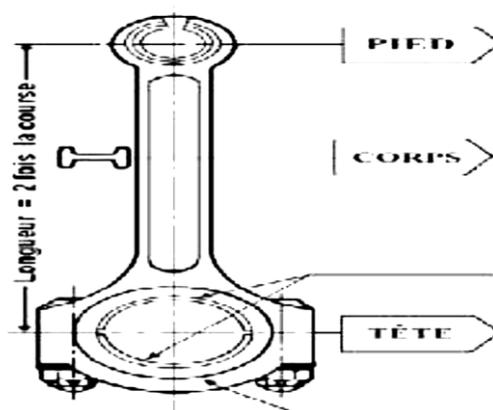


Fig I .7 La bielle

I.3.7. Le vilebrequin

Avec la bielle il termine la transformation du mouvement rectiligne alternatif du piston en mouvement circulaire continu. Les contraintes subies par le vilebrequin sont :

- Torsions provenant des efforts opposés du couple moteur et du couple résistant.
- Flexions, compressions, tractions, cisaillements
- Frottements au niveau des portées
- Vibrations provenant de la masse du vilebrequin lancé à grande vitesse.

Un vilebrequin doit posséder des qualités afin de résister aux efforts qui lui sont soumis :

- Bras de manivelle robuste.
- Géométrie indéformable.
- Equilibrage parfait (Il peut être en acier forgé ou moulé et aussi en fonte GS) [4]



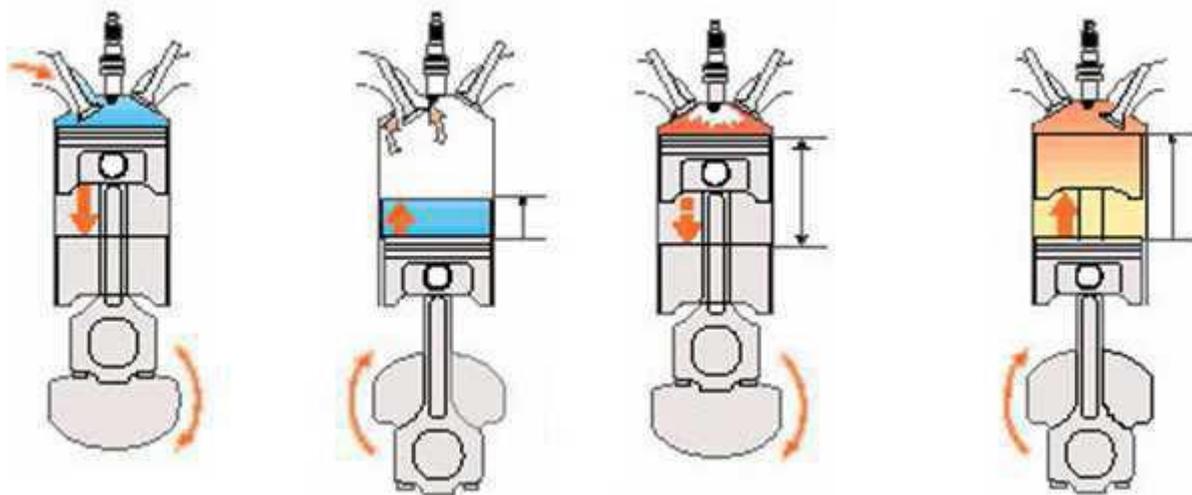
Fig.1.8 le vilebrequin

1.4. Fonctionnement du moteur :

Le moteur à quatre temps correspond à deux tours vilebrequin qui regroupent les quatre temps. Phase d'admission où le piston descend et la soupape d'admission s'ouvre et l'air frais s'engouffre dans le cylindre. Phase de compression où la soupape d'admission se ferme et le piston remonte. L'air ou bien la charge fraîche sont comprimés et s'échauffent fortement. Pour les moteurs diesel lorsque le piston atteint les 9/10ème de sa course environ une quantité de carburant est alors injectée.

Phase de détente où les soupapes sont fermées, le mélange d'air et de carburant contenu dans le cylindre est sous pression et la température est suffisamment élevée pour que ce mélange s'enflamme en créant une surpression qui pousse le piston vers le bas. Phase d'échappement où la soupape d'échappement s'ouvre et le piston remonte en chassant les gaz brûlés vers le circuit d'échappement. Dans le cas d'un moteur à quatre cylindres chacun des pistons effectue les 4 phases décrites précédemment et est décalé de 180° par rapport aux autres pistons suivant un l'ordre d'allumage 1342. Ainsi, pendant que le premier piston est en fin de phase de compression, le troisième est en fin de phase d'admission début de compression, le quatrième en fin de phase d'échappement début d'admission et le deuxième en fin de phase d'explosion début d'échappement

[G. Ferrari, "Motori A Combustione Interna 2nd Ed", Edizioni il capitello, Torino, 2000.].



L'admission

La compression

La détente

L'échappement

I.5. Caractéristiques des moteurs

- L'alésage :

L'alésage « d » (en centimètre) est le diamètre intérieur du cylindre

- La course :

La course « C »(en centimètre) est la distance parcourue par le piston entre son Point Mort Haut (PMH) et son Point Mort Bas (PMB).

- La cylindrée :

La cylindrée unitaire « V »(en centimètre cube) est le volume compris dans un cylindre entre la PMH et le PMB. $V = (\pi.d^2/4).C$

- La cylindrée totale :

La cylindrée totale « Vt »(en centimètre cube) est égale à la cylindrée unitaire multipliée par le nombre de cylindres n. $V_t = V.n$

- Le rapport volumétrique :

C'est le rapport entre le volume total dans le cylindre (quand le piston est au PMB) et le volume restant quand le piston est au PMH (volume mort ou volume de la chambre de combustion). [5]

1 : Introduction

Il est connu que le transfert de chaleur, la combustion et le frottement affectent les performances, l'efficacité et les émissions d'un moteur. Les transferts thermiques dans un moteur ont lieu par conduction, rayonnement et convection. D'un côté le refroidissement de la culasse, du cylindre et du piston est recherché à cause des problèmes de contraintes thermiques dans les régions à haute température. Aussi ces dernières détériorent le film d'huile de lubrification, et favorisent les détonations et les auto-allumages dans les moteurs à explosion. D'un autre côté, une augmentation du transfert de chaleur aux parois de la chambre de combustion va diminuer la température et la pression du gaz à l'intérieur du cylindre, ce qui réduit le travail par cylindre transféré au piston et donc diminue le rendement thermique du moteur. [6]

II :Le Transfert de chaleur

II :1 définition

Lorsqu'un corps plus chaud se trouve en présence d'un corps plus froid l'expérience nous montre qu'il y a transmission de chaleur, c'est-à-dire qu'une augmentation de température se produit dans le corps le plus froid et une diminution de température se produit dans le corps le plus chaud ; la transmission de chaleur demeure jusqu'à ce que les températures des deux corps soient égales. Ainsi, dans le même corps il y a transmission de chaleur lorsque deux points présentent des températures différentes.

D'après ce que nous venons de dire la transmission de chaleur se produit en cas de différence de températures. En effet c'est l'unique condition car, comme nous le verrons par la suite, il n'est pas nécessaire que les corps soient en contact direct pour qu'il y ait transmission de chaleur.

II 2. Modes de transfert de chaleur

Il y a trois modes de transfert de chaleur :

- 1-Conduction
- 2- Convection
- 3- Rayonnement [7]

II 2.1 La conduction

La conduction est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur au sein d'un milieu opaque (solide, liquide ou gazeux), sans déplacement de la matière, en présence d'un gradient de température. Elle s'effectue selon deux mécanismes différents: une transmission par vibration des molécules ou atomes et une transmission par les électrons libres. Ce mode se produit au sein d'une même phase au repos ou mobile, en présence d'un gradient de température. Dans ce cas, le transfert de chaleur résulte d'un transfert d'énergie cinétique d'une molécule à une autre molécule adjacente. Ce mode de transfert est le seul à exister dans un solide opaque (qui absorbe tous les rayons). Pour les solides transparents, une partie de l'énergie peut être transmise par rayonnement. Avec les fluides (gaz ou liquides), la convection et le rayonnement peuvent se superposer à la conduction.

Le rayonnement peut se superposer à la conduction.

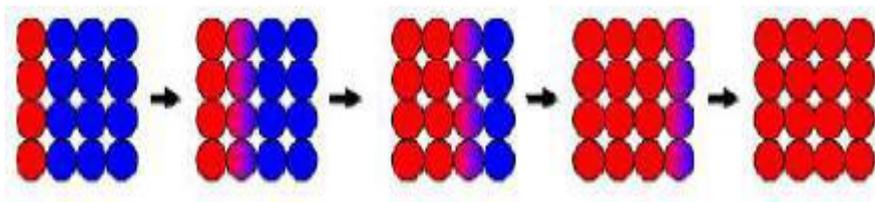


Figure II .1 la conduction

II 2.2 La convection

La convection consiste essentiellement en la transmission de l'énergie par le mouvement ou le déplacement macroscopique d'une parcelle (grand nombre de molécules), généralement d'un fluide d'une région à autre. Ce mécanisme est accompagné toujours par le transfert d'énergie dû au mouvement moléculaire et qui représente le côté conductor de ce mode. On distingue deux types de convection ; la convection naturelle (convection libre) où le mouvement des particules est dû aux différences de température qui sont imposées au fluide. La différence de température implique une différence de masses volumiques (déplacement des particules, dilatation), exemple (chauffage de l'air pour une montgolfière, chauffage de l'eau dans un récipient). La convection forcée où le mouvement des particules résulte de la pression appliquée au fluide par l'intermédiaire des moyens mécaniques, (d'une pompe par exemple)

Le transfert de la chaleur par convection, se produit entre deux phases dont l'une des généralement au repos et l'autre en mouvement, en présence d'un gradient de température. Le mouvement du fluide peut résulter de la différence de masses volumiques (ρ) due aux différences de températures.

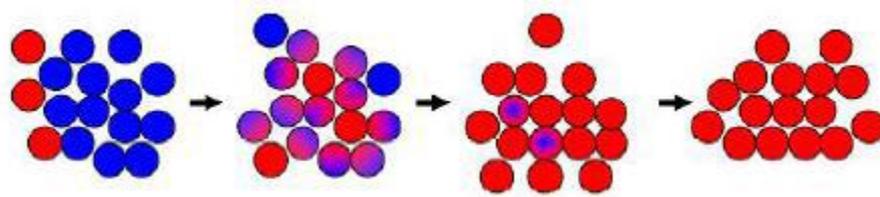


Figure II. 2 *La convection*

II 2.3 Le rayonnement

Le rayonnement est le transfert d'énergie électromagnétique d'un milieu à haute température vers un autre milieu à basse température sans aucun support matériel (il peut s'effectuer dans le vide). En général, tout corps opaque ou partiellement opaque porté à une température supérieure à zéro Kelvin rayonne de l'énergie dans toutes les directions. Cette énergie est transportée sous forme d'une onde électromagnétique dont la propagation n'exige pas du support matériel. Ce type de transport de chaleur est analogue à la propagation de la lumière et il ne nécessite aucun support matériel, contrairement aux écoulements. Les gaz, les liquides et les solides sont capables d'émettre et d'absorber les rayonnements thermiques

II.3 Différents types de refroidissement

Les systèmes de refroidissement sont fondés sur les principes de la thermodynamique. Ils facilitent les échanges de chaleur entre le fluide de procédé et le réfrigérant ainsi que le rejet de la chaleur non récupérable dans l'environnement. Les systèmes de refroidissement peuvent être classés selon leur conception et le type de réfrigérant utilisé: eau ou air ou une combinaison des deux. [8]

II.3.1 Refroidissement à air

Facteurs favorisant le refroidissement:

- la surface des ailettes: plus grandes en haut du cylindre car la température y est plus grande qu'en bas,
- la conductibilité du matériau (fonte ou aluminium),
- l'état de surface (rugosité),
- la vitesse de déplacement du véhicule,
- la vitesse de déplacement de l'air.

- **FONCTIONNEMENT DU REFROIDISSEMENT PAR AIR**

Les cylindres sont munis extérieurement d'ailettes rapportées, ou directement venues de fonderie et orientées pour que le courant d'air provoqué par le déplacement du véhicule circule facilement entre elles.

En automobile, le système est généralement équipé d'un ventilateur ou d'une turbine.

- **AVANTAGE DE CE SYSTEME:**
- **INCONVENIENT DE CE SYSTEME:**

-Simplicité de construction

-Pas d'entretien

-Gain de poids

-Le refroidissement n'est pas uniforme dans les zones confinées (sièges de soupapes).

-Les débits d'air importants imposent une turbine (ventilateur) importante, consommatrice d'énergie [8]

II.3.2 Le refroidissement par liquide

Fluide caloporteur entre les différents éléments du moteur et un échangeur thermique traversé par l'air ce qui permettra le refroidissement du liquide.

Cet échangeur eau/air est appelé radiateur.

La circulation de ce liquide est accéléré à l'aide de la turbine d'une pompe à eau entraînée par une courroie (courroie de distribution ou courroie d'accessoire).[8]

II.4 Le circuit du système de refroidissement

Le circuit de refroidissement a pour but premier de prévenir la surchauffe du moteur. Étant donné qu'un moteur à combustion interne peut atteindre des températures extrêmement élevées, la chaleur ainsi créée doit être dissipée. Il est essentiel que le circuit de refroidissement soit efficace afin d'éviter le dysfonctionnement du moteur, Une autre fonction

du circuit de refroidissement consiste à contrôler la température de l'habitacle, assurant ainsi le confort de passagers [8]

II.4.1.Le liquide de refroidissement

Est un liquide caloporteur utilisé, dans un circuit généralement fermé, dans le but d'évacuer des calories d'un système qui en produit plus qu'il ne peut en évacuer naturellement, Le liquide de refroidissement homologué est un mélange de 50% d'antigel à l'éthylène-glycol pour usage industriel disponible dans le commerce et 50% d'eau douce et propre.

II.4.1.1.Ethylène-glycol

L'éthylène glycol est additionné à l'eau afin d'obtenir un mélange dont la température de congélation serait plus faible que celle de l'eau pure et cela pour plus de précautions contre le gel du liquide de refroidissement pendant les périodes très froides, un gel peut provoquer l'éclatement ou des fissures des tuyauteries.

L'augmentation de la concentration de glycol dans le liquide de refroidissement, améliore non seulement, la protection contre le gel mais également le seuil d'ébullition.

Un mélange comportant 50% de glycol, ne va pas bouillir à 100°C comme le ferait de l'eau (ceci à la pression atmosphérique). Ce mélange aura son seuil d'ébullition à 108°C.

Si ce même mélange est maintenu grâce au bouchon de pressurisation du circuit, à une pression de 1 bar, la protection contre l'ébullition pourra atteindre 129°C.

II.4 .2 la pompe à eau

Rôle:

Elle permet d'augmenter la vitesse de la circulation d'eau créée par l'effet thermosiphon dans le radiateur de refroidissement.

Elle est de type centrifuge et sont entraînée par la Courroie d'accessoire ou la courroie de distribution.

Pour celle entraînée par la distribution, il faut prévoir son remplacement à chaque changement de la courroie Ce qui évitera de rechanger les deux éléments en cas de fuite de la pompe. La pompe étant entraînée en rotation, il se crée à l'intérieur une force centrifuge qui va chasser le liquide à la périphérie des aubes créant ainsi une aspiration à l'entrée de celle-ci.[8]

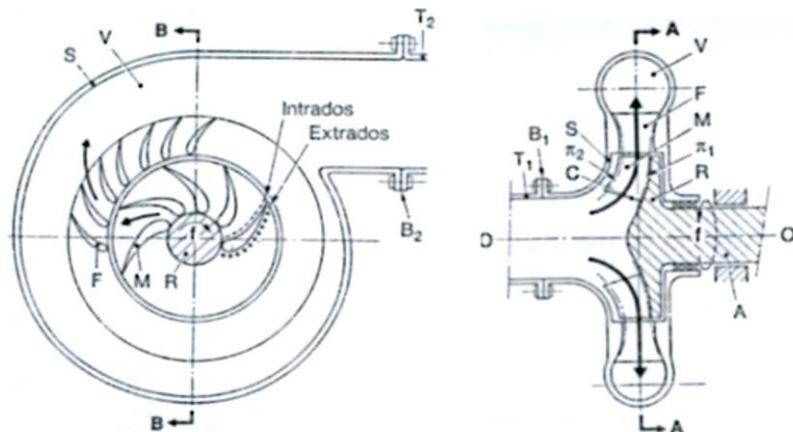


Fig II.3 : La pompe à eau

II.4.3 le thermostat

Le rôle du thermostat est de permettre au liquide de refroidissement d'atteindre rapidement la température idéale pour le bon fonctionnement du moteur et de s'y maintenir. Le thermostat à cire utilise les propriétés de dilatation d'une matière composée de cire, de pétrole et de poudre de cuivre. Ces matériaux ont une bonne conductibilité thermique. Cette matière, enfermée dans une capsule augmente de volume en devenant pâteuse quand la température augmente.[8]

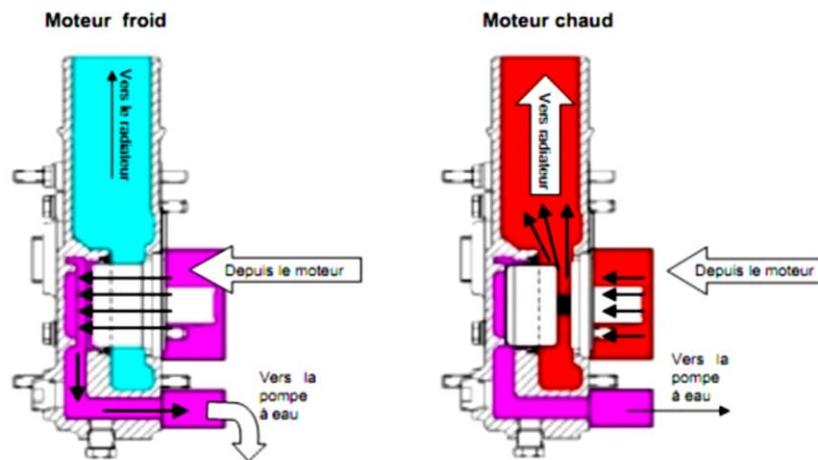


Fig. II 4 : Le thermostat

II.4.4 Le radiateur

Le radiateur refroidit le liquide de refroidissement qui a été chauffé dans les passages d'eau du bloc moteur. Le radiateur se compose d'une boîte à eau supérieure, d'une boîte à eau inférieure, et entre ces deux boîtes à eau, d'un faisceau de tubes. Le liquide de refroidissement arrive dans la boîte à eau supérieure par la durite supérieure, cette boîte à eau supérieure comporte également un bouchon qui permet de faire l'appoint du liquide de refroidissement. Cette boîte à eau est également reliée, par une tuyauterie souple, à un vase d'expansion où le liquide de refroidissement en excédent est récupéré. La boîte à eau inférieure comporte une sortie et un bouchon de vidange.



Fig II.5: Le radiateur

II.4 .5 le ventilateur

C'est un accessoire, placés à proximité du radiateur, les pales du ventilateur forcent l'air à passer au travers de celui-ci, et évite ainsi la surchauffe lors des trajets à petite allure (Embouteillages). Il peut être entraîné mécaniquement à l'aide d'une courroie. Mais en général, il s'agit d'un petit moteur électrique, commandé par une sonde placée sur le radiateur, qui entraîne le ventilateur.[8]

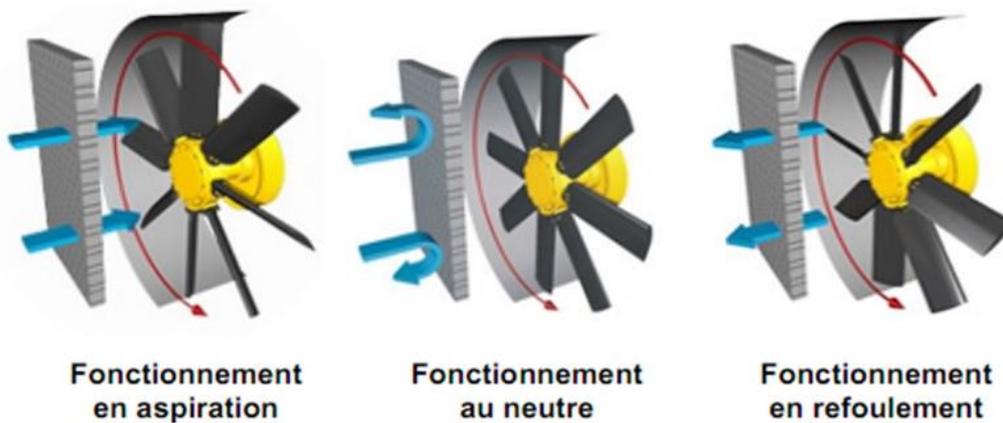


Fig II.6 : Les différents types du ventilateur

1. Introduction :

Les Transferts thermiques forment une discipline qui étudie la propagation de la chaleur. Le transfert de chaleur est en fait un échange de calories, toujours d'un milieu chaud à un milieu froid.

Il existe trois modes de transfert de chaleur différent :

- la conduction
- la convection
- le rayonnement

Deux corps ayant la même température sont dits en "équilibre thermique". Si leur température est différente, le corps le plus chaud cède de l'énergie au corps le plus froid : il y a transfert thermique, ou par chaleur.

L'étude des transferts thermiques complète l'étude de la thermodynamique en décrivant la manière dont s'opère le transfert d'énergie. À la différence de la thermodynamique, la thermocinétique fournit des informations sur le mode de transfert en situation de *non équilibre* ainsi que sur les valeurs de flux de chaleur. [9]

II. Définition :**II.1. Flux de chaleur :**

La chaleur s'écoule sous influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'air de la surface isotherme est appelées densités de flux de chaleur :

$$\Phi = \frac{1}{S} \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (01)$$

Où S est l'air de la surface (m²)

On appelle flux de chaleur la quantité de chaleur transmise sur la surface S par unité de temps [58] :

$$\varphi = \frac{dQ}{dt} \quad (W) \quad (02)$$

II.2. Densité de flux thermique :

Soit un élément de surface $d\Omega$, orienté par la normale \vec{n} , $d\Phi$ est le flux d'un vecteur $\vec{\varphi}$ au travers la surface élémentaire $d\Omega$

$$d\Phi = \vec{\varphi} \cdot \vec{n} d\Omega = \varphi \cos \alpha d\Omega \quad (03)$$

Où $\cos \alpha d\Omega$ représenté la surface utile.

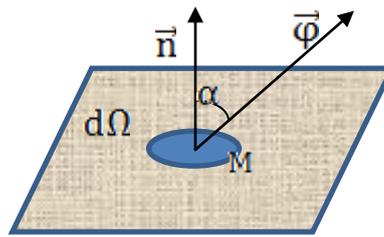


Figure III.1. la densité de flux de chaleur

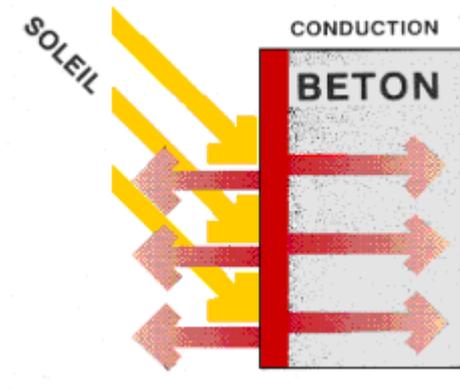
$\vec{\phi}$ Est la densité locale de flux de chaleur au point M. Ce vecteur caractérise, en chaque point du milieu, la direction, le sens et l'intensité du flux de chaleur. [10]

III. Transfert thermique par conduction :

III.1. Conduction :

La conduction est le moyen par lequel la chaleur circule de proche en proche dans un matériau ou passe d'un corps à un autre en contact physique direct, par simple interaction moléculaire. Les molécules du secteur le plus chaud se

Heurtent vivement entre elles et transmettent leur énergie de vibration aux molécules voisines. Le flux de chaleur va toujours des zones chaudes vers les zones froides.



Lorsque les molécules s'échauffent à la surface d'un corps sous l'effet du rayonnement solaire, elles transmettent cette chaleur aux molécules voisines ; et de proche en proche, la chaleur captée se répartit dans toute la masse du corps, jusqu'à atteindre à l'uniformité des températures.

La vitesse de progression du flux de chaleur à travers un corps, sa conductivité thermique, dépend de l'aptitude de ses molécules et de ses électrons à recevoir et à transmettre la chaleur. Par exemple, un métal paraîtra plus froid au toucher qu'un morceau de bois, pourtant à la même température. Cela tient au fait que le métal a une conductibilité plus élevée et que la chaleur s'écoule de la surface vers l'intérieur plus rapidement que dans le bois. La sensation de froid est d'autant plus intense que la chaleur retirée de la main vers le métal par conduction est plus importante.

Les gaz sont généralement de mauvais conducteurs. Aussi, les matériaux comportant de minuscules cellules d'air en grand nombre sont habituellement de mauvais conducteurs et donc de bons isolants. Les matériaux d'isolation utilisés dans la construction illustrent bien cela : ils renferment une multitude de petits espaces d'air et se caractérisent par leur légèreté. [11]

III.2. Définition :**III.2.1. Loi de Fourier :**

La loi de Fourier est une loi semi-empirique analogue à la loi de Fick pour la diffusion de particule ou la loi d'Ohm pour la conduction électrique (Ohm s'est d'ailleurs servi d'une analogie entre thermique et électricité pour construire sa théorie). Ces trois lois peuvent s'interpréter de la même façon : l'inhomogénéité d'un paramètre intensif (température, nombre de particules par unité de volume, potentiel électrique) provoque un phénomène de transport tendant à combler le déséquilibre (flux thermique, courant de diffusion, courant électrique).

La relation de Fourier est phénoménologique, c'est-à-dire issue de résultats expérimentaux. Pour bien comprendre la signification de cette relation, reportons-nous à la figure. Sur cette figure est représenté

Un matériau homogène et isotrope sous la forme d'un tube supposé parfaitement isolé à sa périphérie. On note S la section du tube et l sa longueur. Les températures aux extrémités du tube, notées T_1 et T_2 , sont imposées et constantes au cours du temps. Un flux de chaleur apparaît dans la direction des hautes températures vers les basses températures. J. Fourier obtient expérimentalement que lorsque les températures sont stabilisées dans le temps (régime stationnaire), il existe une relation liant le flux à l'écart de température entre l'entrée et la sortie sous la forme [12] :

$$\vec{\phi} = \lambda S \frac{T_1 - T_2}{l} \vec{x} \quad (04)$$

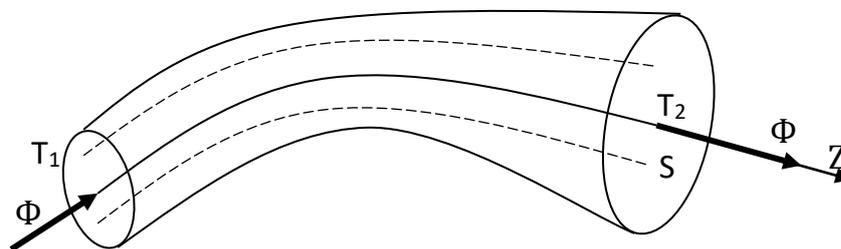


Figure III 2. tube de flux de chaleur

III.2.2. Conductivité thermique :

La conductivité thermique est la grandeur physique qui caractérise l'aptitude d'un corps à conduire la chaleur. Elle est symbolisée par la lettre grecque λ (lambda). La conduction thermique est le mode de transfert de chaleur associée à cette grandeur.

Plus la conductivité thermique d'un matériau est élevée, plus celui-ci conduit la chaleur, et donc moins il est isolant. Dans le système international d'unités, la conductivité thermique est exprimée en watts par mètre par kelvin ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). La conductivité thermique dépend principalement de la nature du matériau et de la température mais d'autres paramètres tels que l'humidité et la pression interviennent également.

Quand la température augmente, un isolant perd de sa capacité d'isolation et, à l'inverse, un conducteur perd de sa capacité de conduction.

En général, la conductivité thermique va de pair avec la conductivité électrique. Par exemple, les métaux, bons conducteurs d'électricité sont aussi de bons conducteurs thermiques. Il y a toutefois des exceptions, le diamant par exemple a une conductivité thermique élevée, entre 1000 et 2600 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, alors que sa conductivité électrique est basse. [12]

IV. Transferts thermiques par convection :

IV.1 Convection :

C'est un transfert qui résulte d'un mouvement d'ensemble du matériau le supportant. La convection a donc lieu dans les fluides (gaz ou liquides). Elle est souvent caractéristique de l'échange à la frontière entre un solide et un fluide et est donc très liée à l'écoulement fluide mais aussi aux géométries d'échange et aux états de surface si un solide intervient. Il convient de distinguer la convection forcée dans laquelle le fluide est mis en mouvement par un apport d'énergie mécanique extérieur (pompe, ventilateur,.....) de la convection naturelle dans laquelle le fluide prend, en son sein, l'énergie nécessaire au mouvement (variation de masse volumique associée à une variation de température par exemple). De façon macroscopique elle est décrite par la loi de Newton(1701). [11]

IV.2. Les différents types de convection :

IV.2.1. La convection naturelle ou libre :

Le fluide est mis en mouvement sous le seul effet :

- Des différences de masses volumiques résultant des différences de températures sur les frontières ;
- D'un champ de forces extérieures (la pesanteur).

IV.2.2. La convection forcée :

Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilateur...). Compte tenu du lien entre le transfert de masse et le transfert de chaleur, il est nécessaire de considérer la nature du régime d'écoulement.

On distingue :

- Ecoulement en régime turbulent
- Ecoulement en régime laminaire.

IV.3. Loi de Newton

La loi de Newton donne l'expression de la quantité dQ échangée entre la surface d'un solide à la température T_s et le fluide à la température T .

V. Transfert thermique par rayonnement :

V.1. Rayonnement :

La matière émet des ondes électromagnétiques (émission qui se produit en surface pour les solides et les liquides opaques, dans tout le volume pour les gaz ou liquides transparents). Ces ondes dépendent de la température. Il s'agit d'une onde électromagnétique et qui donc ne nécessite aucun support matériel pour se propager. Outre le rayonnement thermique on peut s'intéresser à des ondes comme les micro-ondes et leur génération dans le volume. Ce mode de transfert est décrit par la loi de Stefan (1879). [11]

V.2. Définition :

V.2.1. Loi de Planck

Le passage du niveau d'énergie E à un niveau d'énergie

$E - \Delta E$ s'accompagne de l'émission d'un rayonnement de fréquence ν et d'énergie $h\nu$ ou h est la constante de Planck : [13]

$$E = h\nu \text{ avec } h = 6.62 \cdot 10^{-34}$$

$$\text{Avec } [E] = \text{J} \quad [h] = \text{J.s} \quad [\mathcal{V}] = \text{S}^{-1} \quad (05)$$

V.2.2. Corps noir :

Un corps noir est une surface idéale (qui n'existe donc pas dans la nature) possédant les propriétés suivantes :

Il absorbe tout éclairement indépendamment de la longueur d'onde et de la direction de cet éclairement ;

A une température de surface équivalente, le rayonnement d'un corps noir est plus grand que celui de toute autre surface ;

Le rayonnement d'un corps noir est isotrope. [14]

VI. Dissipateur de chaleur

L'électronique a mené la plupart des progrès technologiques des 60 dernières années.

Il existe des technologies avec des domaines particulièrement développés pour l'électronique comme la science des matériaux, l'électromagnétisme, la dynamique des systèmes et aussi le transfert de chaleur.

La relation au transfert de chaleur est due à la génération de chaleur des appareils électroniques. Généralement, ces appareils nécessitent un refroidissement supplémentaire afin d'éviter les températures extrêmes à l'intérieur. Les radiateurs permettent ce refroidissement supplémentaire, ils sont donc omniprésents dans les assemblages électroniques.

Le dissipateur de chaleur peut fonctionner par convection forcée, convection naturelle ou refroidissement liquide (on verra ces trois méthodes dans les chapitres suivants). Normalement, dans les assemblages électroniques, ils sont faits de matériaux ayant une bonne conduction thermique, tels que l'aluminium ou le cuivre.

Le processus de fabrication est généralement par extrusion, mais aussi par des procédés de moulage, de collage, de pliage, de rainurage et d'emboutissage.

Il y a beaucoup de géométries disponibles et elles sont généralement adaptées à chaque besoin spécifique (figure 1).

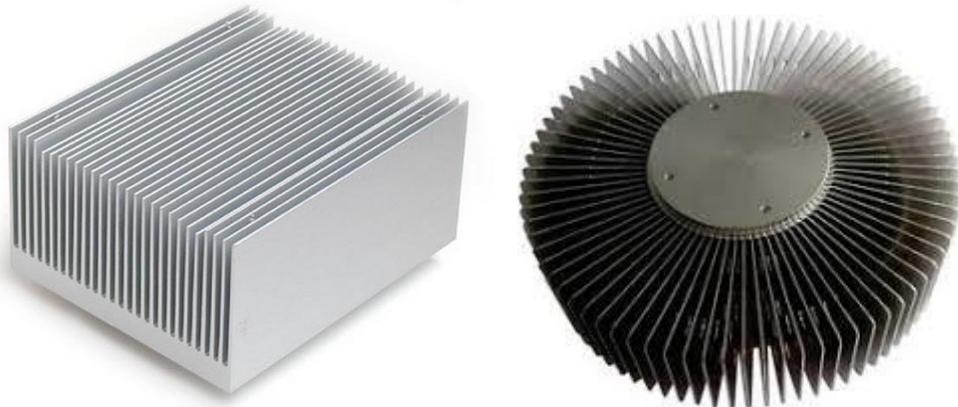


Figure III.3. Exemple de deux géométries d'un dissipateur de chaleur

Cependant, un profil de dissipateur de chaleur très commun est celui à ailettes parallèles rectangulaires. Ce profil forme des canaux U, où le phénomène de convection peut être modélisé par des corrélations empiriques.

La modélisation des dissipateurs thermiques rectangulaires à ailettes parallèles permet une étude analytique. Cette étude peut conduire à déterminer les paramètres d'un radiateur pour une application spécifique, principalement pour l'industrie électronique.

Les processus de transfert de chaleur qui se produisent dans un dissipateur de chaleur sont étudiés dans ce chapitre.

VII. Introduction au transfert de chaleur dans les dissipateurs

Les dissipateurs thermiques sont des éléments qui empêchent la destruction des équipements électroniques en raison de leur surchauffe. La partie la plus critique dans un dispositif électronique est la jonction semi-conductrice. La température de jonction ne peut pas dépasser une température donnée par le fabricant.

Les dissipateurs de chaleur ont des formes différentes selon la nature du fluide de refroidissement (refroidissement par convection naturelle de l'air, refroidissement par convection forcée, refroidissement par liquide ...).

La loi d'Ohm décrit la relation entre le courant I , la différence de potentiel ΔV et la résistance R entre deux points comme:

$$I = \frac{\Delta V}{R} \quad (06)$$

Dans l'analogie thermique, la différence de potentiel ΔV (V) est associée à la différence de température entre deux points ΔT (°C), la résistance électrique R (Ω) est associée à une résistance thermique R (C/W), et le courant (A) est associé à un rapport de flux thermique Q (W).

$$Q = \frac{\Delta T}{R} \quad (07)$$

Le nombre de résistances d'un modèle dépend de la précision souhaitée. Un modèle de haute précision nécessite un grand nombre de résistances. Cependant, un nombre élevé de résistances dans un modèle peut réduire considérablement la vitesse de calcul. Par conséquent, il existe un compromis entre la vitesse de calcul et la précision des résultats.

Généralement, le rapport de chaleur Q est déterminé par les conditions de fonctionnement du semi-conducteur. L'augmentation de température ΔT est également déterminée par la température de jonction maximale et la température ambiante la plus élevée dans des conditions ambiantes extrêmes hypothétiques. Par conséquent, en utilisant l'équation (7), la résistance thermique la plus élevée d'un ensemble est fixée.

VIII. Les résistances dans un modèle de dissipateur de chaleur

L'objectif de l'analyse est de déterminer la géométrie du dissipateur de chaleur et une configuration de l'appareil qui permet une dissipation suffisante de la chaleur pour des appareils et des conditions de travail donnés.

Les dissipateurs thermiques peuvent être maillés par de nombreuses résistances thermiques 3D qui peuvent impliquer une modélisation complexe. Pour une analyse analytique simple, il n'y a pas plus d'une source de chaleur impliquée; il est utile d'utiliser la méthode unidimensionnelle des résistances équivalentes.

Dans ce système linéaire, la résistance globale R peut être divisée en trois résistances thermiques R_{sa} , R_{cs} et R_{jc} (fig 2). L'addition de ces trois résistances est la résistance globale R , donnée dans l'équation (8).

$$R = R_{sa} + R_{cs} + R_{jc} \tag{08}$$

- R_{jc} est la résistance entre la surface du dissipateur et la jonction du semi-conducteur.

Il est généralement donné par le fabricant de l'appareil.

- R_{cs} est la résistance entre le semi-conducteur et le dissipateur de chaleur. Cela dépend de facteurs tels que la méthode d'assemblage, la rugosité de la surface et le type de graisse thermique. Il prend fréquemment des valeurs basses, et il peut être négligé dans la plupart des modèles.

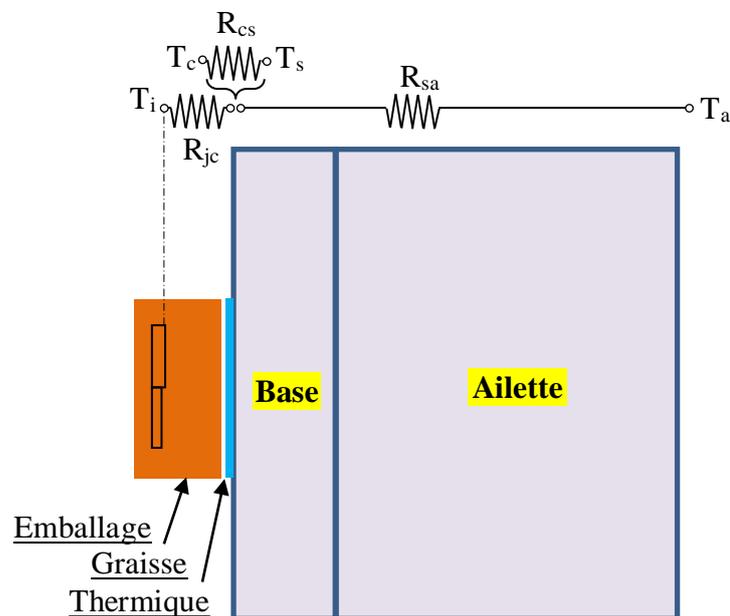


Figure III 4. Résistances dans un dissipateur de chaleur

- R_{sa} est la résistance entre la surface de la plaque à côté du dissipateur et la température ambiante.

C'est la résistance de la source de chaleur pour elle-même et elle implique un transfert de chaleur par rayonnement, convection et conduction. Le rayonnement et la conduction peuvent être

calculés précisément en utilisant des approches analytiques. Cependant, le transfert de chaleur par convection nécessite des corrélations semi-empiriques qui peuvent varier notamment en fonction de l'auteur et des conditions de flux.

Par conséquent, le calcul de R_{sa} nécessite une analyse étendue.

VIII.1 Résistance ambiante du dissipateur R_{sa}

L'analyse conduit à une division de la résistance thermique R_{sa} en trois sous-résistances.

$$R_{sa} = R_{bf} + R_{sp} + R_{fa} \tag{09}$$

- R_{bf} est la résistance due à la conduction limitée d'une plaque plane lorsqu'un flux uniforme s'écoule perpendiculairement à sa surface.
- R_{sp} est une résistance due à l'étalement du flux. Lorsqu'un flux circule à travers une plaque d'une zone de source de chaleur S_1 vers une zone de dissipation S_2 et $S_2 > S_1$, alors le flux n'est pas complètement perpendiculaire et une résistance d'étalement apparaît.
- R_{fa} est la résistance entre la surface de la plaque qui supporte les ailettes et la température ambiante. La chaleur est perdue en raison de la convection et du transfert de chaleur par rayonnement. Les ailettes ont également une résistance conductrice résultant de leur conductivité thermique finie.

Toutes ces résistances seront expliquées avec précision dans les sections suivantes.

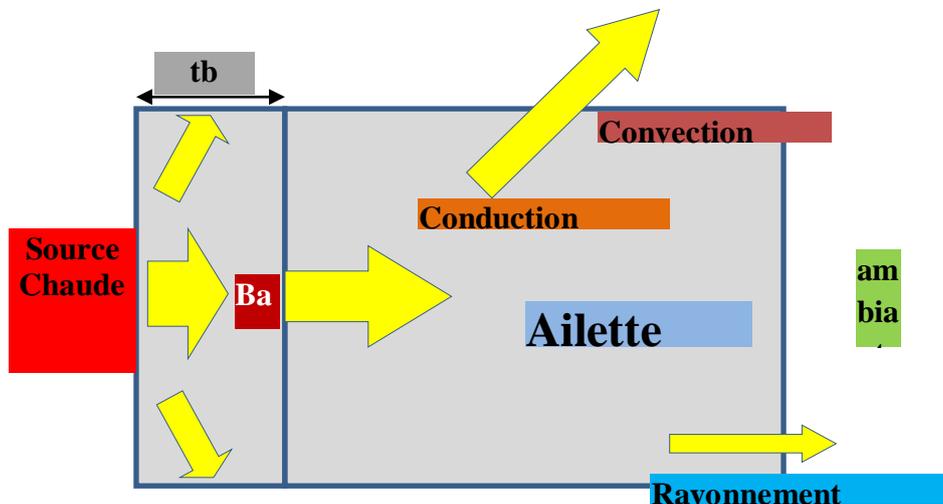


Figure III 5. Flux communs des dissipateurs de chaleur

VIII.2 Résistance de conduction de la plaque R_{bf}

Il est directement calculé en utilisant l'équation (10)

$$R_{bf} = \frac{t_p}{k.A} \tag{10}$$

Lorsque k est la conductivité de la plaque (W/K.m), A est la surface de transfert de chaleur (m^2) et t_b est l'épaisseur de la plaque.

Comme introduction au transfert de chaleur par conduction, la démonstration de l'équation (10) est développée ci-dessous.

IX. Transfert de chaleur par conduction

L'équation suivante (11) est déduite du bilan énergétique dans un volume de contrôle en coordonnées cartésiennes

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho \left(C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{q} \right) \quad (11)$$

Où k est la conductivité de la base (W/K.m), \dot{q} dans la génération de chaleur interne (W/m^3), ρ dans la densité du matériau (Kg/m^3), C_p est la capacité thermique du matériau ($J/Kg \cdot K$), T est la température et t est le temps.

En régime permanent, $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$, dans un flux uniforme passant par l'axe des abscisses

$\frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)$ et dans les matériaux sans génération de chaleur $\dot{q} = 0$, l'équation (11) est réduite à l'équation (12):

$$\frac{d}{dx} \left(k \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (12)$$

En intégrant l'équation (12) et en appliquant les conditions aux limites $T(0) = T_0$ et $T(L) = T_L$, la distribution de la température à travers le mur peut être exprimée comme suit:

$$T(x) = (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{x}{t_p} + T_{s,1} \quad (13)$$

La loi de Fourier pour le flux dimensionnel peut être exprimée comme suit:

$$q_x = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (14)$$

Où q_x est le flux de chaleur (W) dans la direction x , k est la conductivité de la base (W/K.m) et A est la surface de transfert de chaleur (m^2).

La dérivée de l'équation (13) est calculée comme suit:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_{s,2} - T_{s,1}}{t_p} \quad (15)$$

$$T(x) = - (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{K \cdot A}{t_p} = (T_{s,1} - T_{s,2}) \frac{K \cdot A}{t_p} \quad (16)$$

Enfin, la résistance thermique R_{bf} est déduite comme:

$$R_{bf} = \frac{\Delta T}{q_x} = \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{\frac{K \cdot A}{t_p} (T_{s,1} - T_{s,2})} = \frac{t_p}{k \cdot A} \quad (17)$$

IX.1 Résistance R_{SP}

La résistance R_{sp} est due à la propagation du flux à travers l'épaisseur de la base. Une plaque a deux côtés. D'un côté il y a la source de chaleur, et de l'autre côté il y a les ailettes qui dissipent la chaleur. La zone source est généralement plus petite que la zone de dissipation. La direction du flux à l'intérieur de la plaque devient non perpendiculaire à la surface et implique une résistance associée.

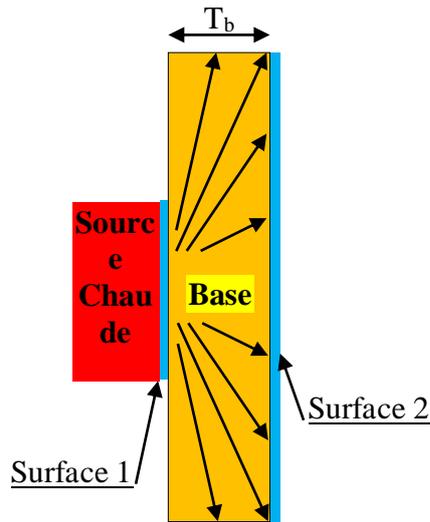


Figure III 6. Diffusion dans la base

Les travaux de Yovanovich et Antonetti[63], conduisent à l'expression suivante pour une source de chaleur centrée dans la surface du dissipateur de chaleur:

$$R_{sp} = \frac{1-1.410\epsilon+0.344\epsilon^3+0.034\epsilon^5+0.034\epsilon^7}{4k.a} \tag{18}$$

Où ϵ est le rapport entre la surface de transfert de chaleur 1 et la surface de transfert de chaleur 2, k est la conductivité de la plaque (W/K·m) et a est la racine carrée de la surface 1: $a = \sqrt{\text{surface 1}}$.

IX.2 Résistance R_{FA}

La résistance entre la surface de la plaque qui supporte les ailettes et l'environnement est la résistance R_{fa} . Cette résistance comprend la conduction, la convection et le transfert de chaleur par rayonnement. La loi de refroidissement de Newton (13) est une expression linéaire qui peut être utilisée pour trouver la résistance R_{fa} dans (18).

$$q = h.A(T_s - T_{amb}) \tag{19}$$

Où q est le taux de transfert de chaleur (W), h est le coefficient de convection (W/K·m²), A est la surface de transfert de chaleur (m²), T_s est la température de surface (K) et T_{amb} est la température ambiante (K).

$$R_{fa} = \frac{q}{(T_s - T_{amb})} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (20)$$

Cependant, cette expression ne comprend pas la résistance de conduction à travers les ailettes et le transfert de chaleur par rayonnement. Cela conduira à modifier l'expression (14) dans l'expression (15) afin d'inclure tout phénomène de transfert de chaleur.

$$q = (h_c + h_r)(A_p + \eta \cdot A_f)(T_s - T_{amb}) \quad (21)$$

Où q est le taux de transfert de chaleur (W), h_c est le coefficient de convection ($W/K \cdot m^2$), h est le coefficient d'équivalence de rayonnement ($W/K \cdot m^2$), A_p est la zone primaire (m^2), A_f est la zone étendue (m^2), η est l'efficacité de l'ailette, T_s est la température de surface de la plaque (K) et T_{amb} est la température ambiante (K).

Toutes ces variables et coefficients seront expliqués dans les sections suivantes.

IX.3 Facteur de conduction de l'ailette: $A_p + \eta \cdot A_f$

Les ailerons ont une conductivité finie. Cela signifie que la température peut varier le long de sa surface. Mais dans l'équation (21) le T_s est inclus comme une valeur fixe, ce n'est pas une fonction comme $T_s(x)$. Pour cela, l'efficacité des ailettes est incluse pour pénaliser la variation de température le long de la surface de l'ailette sans affecter la linéarité de l'équation (21). Cette efficacité va modifier la surface affectée A_f de l'ailette, mais la surface de plaque primaire A_p conservera la température attendue T_s et elle ne sera pas affectée par l'efficacité fig. 5.

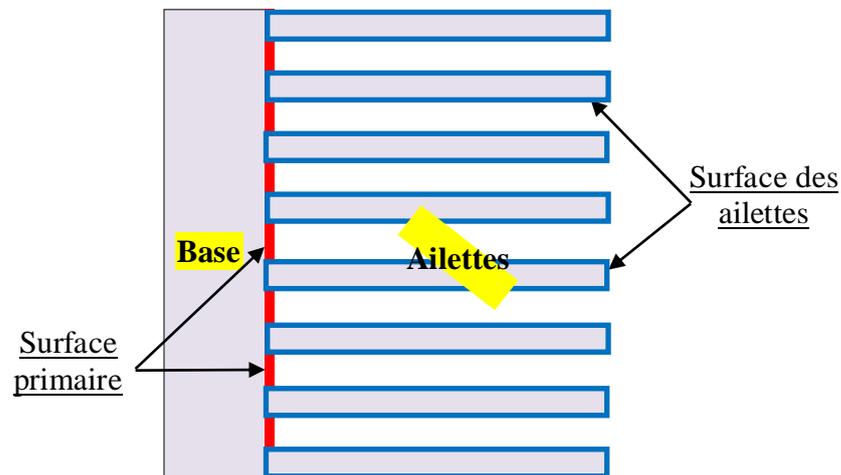


Figure III 7. Surfaces dans un dissipateur thermique à ailettes parallèles

L'efficacité dépend de la géométrie de l'ailette. Dans l'industrie il y a beaucoup de profils d'ailettes disponibles fig. 6, des ailettes d'épingle aux ailettes longitudinales de profil hyperbolique.

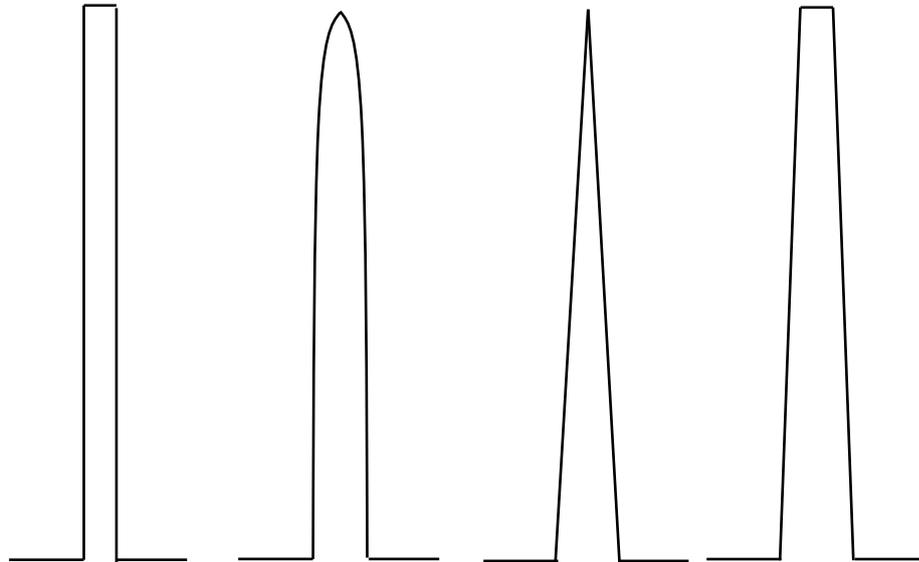


Figure III 8. Profil rectangulaire, profil hyperbolique, profil triangulaire, profil trapézoïdal

IX.4 Analyse de l'efficacité η

A partir des équations de Fourier (9) et des équations de bilan énergétique (6), on déduit:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \left(\frac{1}{A_c} \frac{d A_c}{dx} \right) \frac{dT}{dx} - \left(\frac{1}{A_c} \frac{h d A_c}{k dx} \right) (T - T_\infty) = 0 \quad (22)$$

Lorsque h est le coefficient de convection (W/Km^2), k est la conductivité thermique de l'ailette (W/Km) et les paramètres restants sont représentés sur la Fig. 9.

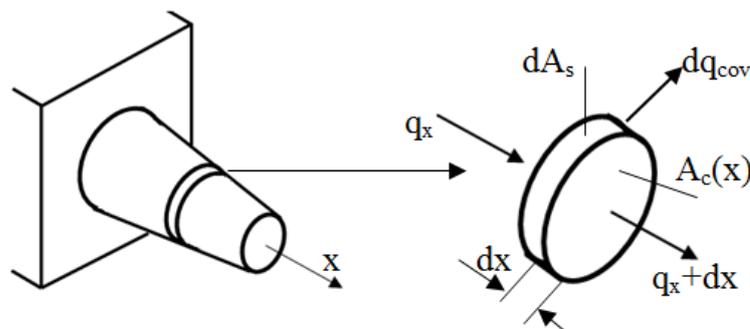


Figure III 9. Profil d'ailette

IX.5 Démonstration des ailettes longitudinales rectangulaires

Dans ce cas, la section A_c est constante. Si on suppose que P est le périmètre de la section:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \left(\frac{P}{A_c} \frac{h}{k}\right) (T - T_{\infty}) = 0 \tag{23}$$

Remplacer

$$\theta(x) = (T(x) - T_{\infty}) \tag{24}$$

$$m = \sqrt{\frac{P}{A_c} \frac{h}{k}}$$

Une équation différentielle de second ordre est obtenue:

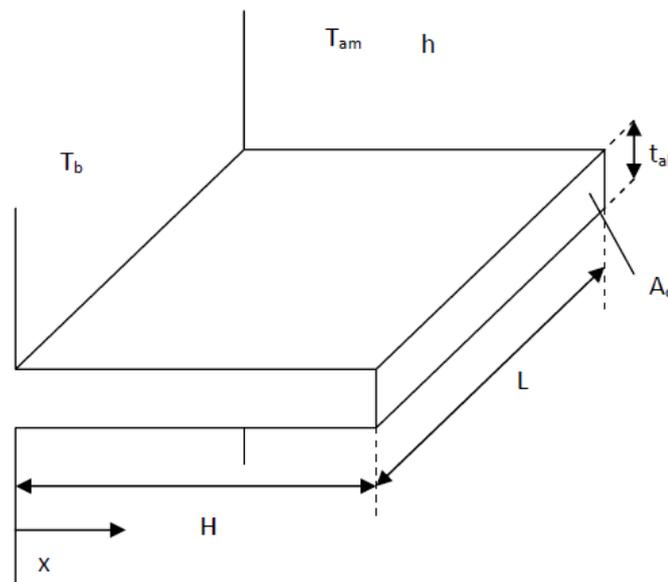


Figure III 10. Profil longitudinal rectangulaire

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} - m\theta = 0 \tag{25}$$

Les restrictions sont la pointe adiabatique ($x = H$) et la température de base fixe T_b .

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=H} = 0 \quad \theta_b = (T_b - T_{\infty}) \tag{26}$$

La solution de l'équation (20) appliquant des restrictions (21) est:

$$\theta(x) = \frac{\cosh\{m(H-x)\}}{\cosh(mH)} \theta_b \tag{27}$$

Où H est la hauteur de l'ailette (m).

Pour connaître la puissance dissipée, le transfert de chaleur à la base des ailettes est analysé.

$$q_b = kA \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0} \tag{28}$$

Substitution de $\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0}$ pour la dérivée de l'équation (29):

$$q_b = \sqrt{hPkA_c} \cdot \theta_b \tanh(mH) \quad (30)$$

L'efficacité est le rapport entre le taux de chaleur maximum qu'une parfaite ailette peut le dissiper et le taux de chaleur qui dissipe une vraie ailette. La puissance maximale pouvant dissiper une ailette parfaite est déduite de la loi de refroidissement de Newton (14), exprimée en:

$$q_{max} = h \cdot A \cdot (T_b - T_{amb}) = hA_f \theta_b \quad (31)$$

Où A_f est la surface de l'ailette et T_b est la température de base de l'ailette.

A partir de l'équation (29) et de l'équation (30), on déduit l'efficacité de l'ailette en supposant que la languette $\ll L$.

$$\eta = \frac{q_b}{q_{max}} = \frac{q_b}{hA_f \theta_b} = \frac{\sqrt{hPkA_c} \cdot \theta_b \tanh(mH)}{hPH \theta_b} = \frac{\tanh(mH)}{mH} \quad (32)$$

Cette équation est également valable pour une pointe d'ailette convective, $\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=H} \neq 0$ substituant le paramètre H dans (29) pour H_c .

$$H_c = H + \frac{t_{ab}}{2}$$

IX.6 Équations longitudinales trapézoïdales

Comme mentionné précédemment, le profil de l'ailette trapézoïdale sera utilisé dans la modélisation des dissipateurs thermiques en raison de son aptitude à la plupart des profils d'ailettes.

Les équations qui déterminent l'efficacité des ailettes sont:

$$\eta = \frac{\mu_b}{2K^2 H_c} \cdot \frac{K_1(\mu_a)I_1(\mu_b) - I_1(\mu_b)K_1(\mu_a)}{I_0(\mu_b)K_1(\mu_a) + I_1(\mu_a)K_0(\mu_b)} \quad (33)$$

Où:

$$H_c = H + \frac{t_{af}}{2} \quad (34)$$

$$K = \text{atan} \left(\frac{t_{ab} - t_{af}}{2H_c} \right) \quad (35)$$

$$K = \sqrt{\frac{\bar{h}}{k \cdot \sin(k)}} \quad (36)$$

$$\mu_a = 2K \left[\frac{t_{af}(1 - \tan(K))}{2 \tan(K)} \right]^{1/2} \quad (37)$$

$$\mu_b = 2K \left[H_c + \frac{t_{af}(1-\tan(K))}{2 \tan(K)} \right]^{1/2} \quad (38)$$

Tous les paramètres utilisés sont définis dans la figure 9 ci-dessous:

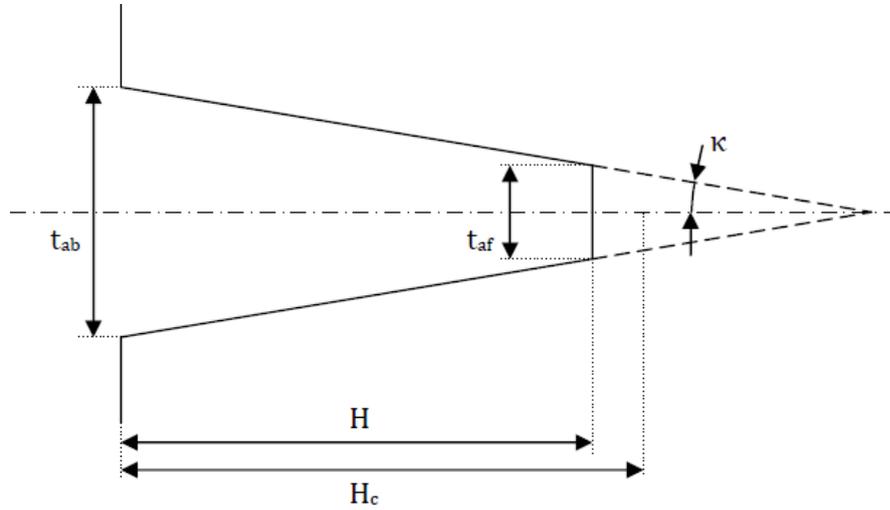


Figure III 11. Profil d'ailette longitudinal trapézoïdal

X. Coefficient de convection hc

La convection est un phénomène qui permet l'échange de chaleur entre un solide et un fluide. Même si la loi de refroidissement de Newton (14) est une expression linéaire, l'analyse du coefficient *h* et de la température de surface *T_s* peut devenir si complexe. La raison en est que le coefficient de convection dépend essentiellement de la température, de la géométrie et du régime de flux, mais qu'une surface réelle ne peut pas avoir une température constante.

X.1 Coefficient d'équivalence de rayonnement h

Tous les corps émettent un rayonnement électromagnétique dû à sa température. La chaleur transmise par rayonnement dépend de la température du corps et de la température ambiante. Le taux de transfert de chaleur *q_r* pour un corps peut être exprimé comme suit:

$$q_r = A \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (39)$$

Où *A* est la surface du corps (m²), *ε* est l'émissivité de surface (sans dimension), *σ* est la constante de Stefan-Boltzmann (W/m²K⁴), *T_s* est la température de surface (K) et *T_{amb}* est la température ambiante (K).

Ainsi, on déduit de l'équation (39) que le paramètre le plus influent est la différence de température entre la surface et la température ambiante.

La valeur de la constante de Stefan-Boltzmann est donnée en SI par:

$$\sigma = 5.6704 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \quad (40)$$

L'émissivité ε est généralement donnée par le fabricant, soit en donnant le type de finition (dégraissé, anodisé noir, anodisé clair ...) soit en donnant directement la valeur d'émissivité de surface.

L'équation (40) est proposée pour les surfaces qui émettent seulement des rayonnements dans l'environnement. Cependant, certaines formes comprennent des surfaces qui émettent un rayonnement vers l'environnement et vers d'autres surfaces simultanément. L'équation de ces géométries inclut un facteur de vue.

Le facteur de vue est la proportion de tout ce rayonnement qui quitte une surface A et frappe la surface B .

X.2 Rayonnement dans les dissipateurs thermiques

La géométrie des dissipateurs de chaleur est compliquée en ce qui concerne l'analyse de rayonnement. Certaines surfaces échangent des radiations entre elles et simultanément avec la température ambiante. Les autres surfaces n'échangent le rayonnement qu'à la température ambiante. Par conséquent, le rayonnement dans les puits thermiques implique plus de paramètres que ceux exprimés dans l'équation (41).

L'article de Younes Shabany [15], simplifie le rayonnement dans les dissipateurs de chaleur. Le taux de transfert de chaleur qr (W) peut être exprimé comme suit:

$$q_r = (n_a - 1)q_{ch,r} + A_d \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (41)$$

Où n_a est le nombre d'ailettes, $q_{ch,r}$ est le taux de transfert de chaleur dans les surfaces de canal (W), A_d est tous les surfaces que ces rayonnements ne frappe pas d'autres surfaces (m^2), ε est l'émissivité du corps, σ est le constante de Stefan-Boltzmann (W/m^2K^4), T_s est la température de surface (K) et T_{amb} est la température ambiante (K).

La formule peut être déduite par:

$$A_d = n_d \left(L \cdot t_{af} + 2 \cdot H \cdot \left(\frac{t_{af} + t_{ab}}{2} \right) \right) + 2 \cdot H \cdot L + 2 \cdot t_p (L + W) \quad (42)$$

Tous les paramètres de l'équation (42) sont définis sur la figure 12.

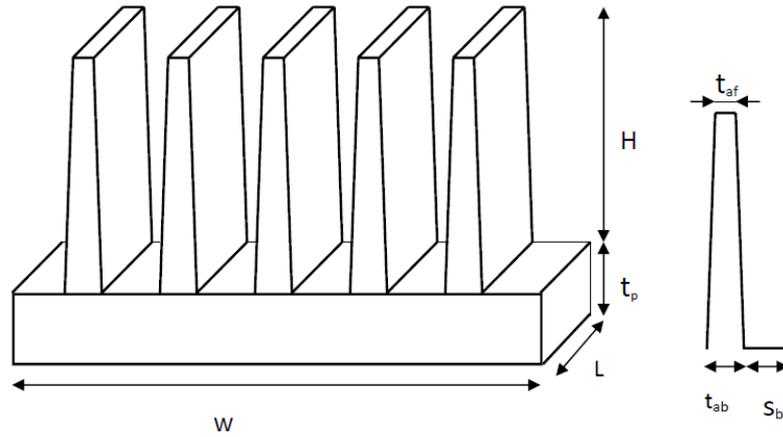


Figure III 12. Paramètres géométriques du dissipateur de chaleur

Le taux de transfert de chaleur d'un canal peut être écrit comme:

$$q_{ch,r} = \frac{\sigma(s_m+2H)L(T_s^4 - T_{amb}^4)}{\frac{1-\epsilon}{\epsilon} + F_{s-surr}} \quad (43)$$

Où F_{s-surr} est le facteur de vue de la surface du canal à l'environnement

En supposant une erreur, F_{s-surr} peut être écrit comme:

$$F_{s-surr} = 1 - \frac{2H[(1+L^2)^{0.5} - 1]}{2HL + (1+L^2)^{0.5} - 1} \quad (44)$$

Où:

$$\bar{H} = \frac{H}{s_m} \quad \bar{L} = \frac{L}{s_m}$$

s_m est l'espace moyen inter-ailette.

Pour connaître le coefficient de convection équivalent h , on propose l'équation suivante (45):

$$h_c = \frac{q_r}{(A_p + A_f)(T_s - T_{amb})} \quad (45)$$

Lorsque A_p et A_f sont les surfaces (m^2) et q_r (W) est le taux de transfert de chaleur par rayonnement.

XI. Conclusion:

L'étude théorique des dissipateurs de chaleur, est l'étape la plus importante dans l'étude du comportement du transfert de chaleur dans ces dispositifs. Tous les logiciels de simulation sur lesquels nous nous appuyons pour analyser les résultats sont basés sur cette étude théorique,

Sauf que, chaque programme utilise une méthode numérique spécifique pour résoudre ces équations, telles que la méthode des différences finies, des volumes finis et des éléments finis.

I.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à l'étude numérique du refroidissement des moteurs à combustion interne par air. En premier lieu, nous présentons une optimisation du maillage, dans le but de bien choisir le maillage convenable à notre étude. Puis nous procédons à l'étude de l'influence du coefficient du transfert de chaleur par convection, conductivité thermique, le nombre des ailettes et sa longueur sur le flux de chaleur cède par le moteur à l'aide du logiciel COMSOL Multiphasiques.

I.2. Géométrie et les conditions aux limites

Le cylindre et l'ailette ont été modélisés à l'aide d'un outil de conception par ordinateur SolidWorks. Les dimensions du cylindre et de l'ailette ont été tirées d'une fiche technique de motocyclette disponible dans le commerce. La géométrie de référence dans ce travail est composée de 8 ailettes cylindriques avec une épaisseur 2 mm et une longueur de 35 mm réparties au long du cylindre. La distance entre deux ailettes est égale 14 mm Fig.1.

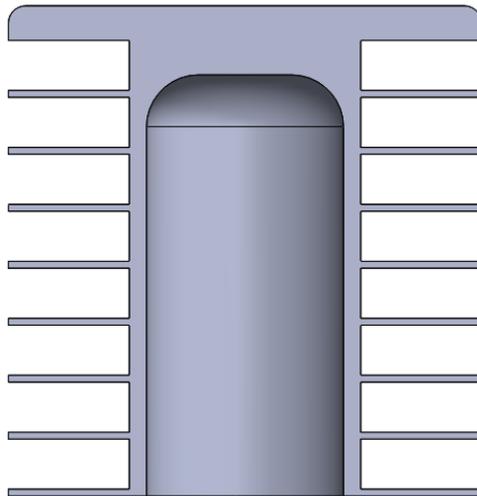


Fig.1 : Coupe de la géométrie du moteur

La Fig. 2 montre les conditions aux limites à chaque face du domaine de calcul pour la face intérieure de notre modèle on considère une température uniforme constant 900 °C. Le modèle stationnaire à température uniforme tient compte de la vitesse de refroidissement en fixant les conditions aux limites des faces extérieurs comme refroidissement par convection, avec une température ambiante est égale 25 °C.

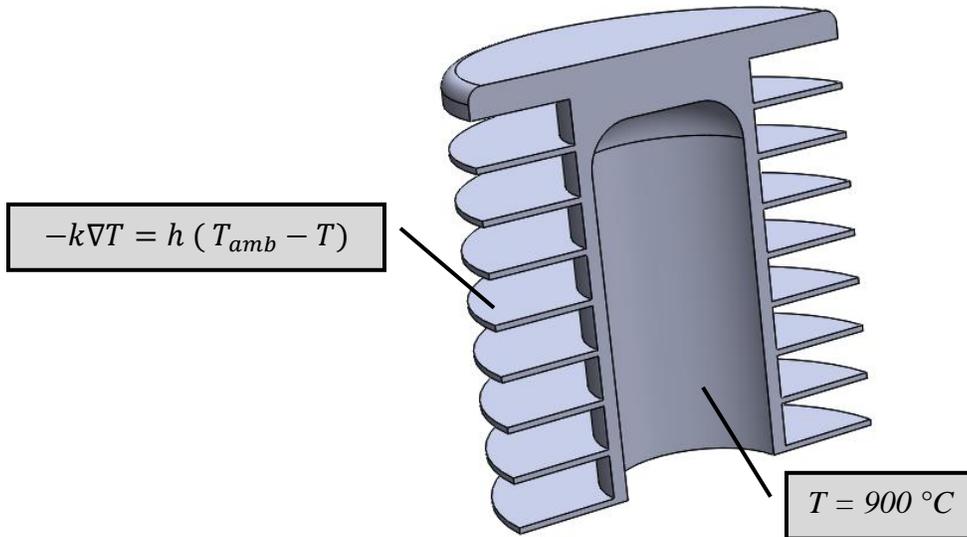


Fig.2 : Illustration schématique du domaine de calcul et les conditions aux limites pour chaque surface.

I. 3. Optimisation du maillage

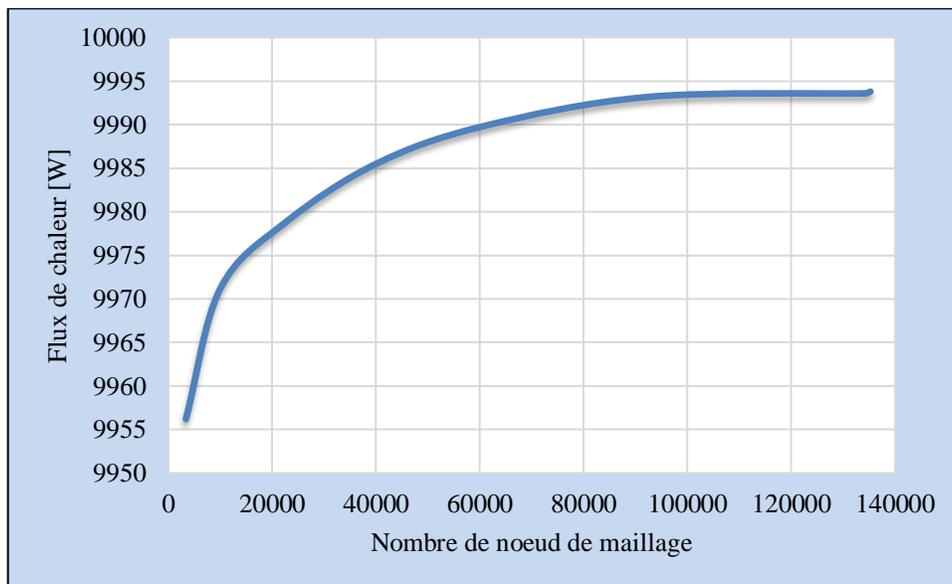


Fig. 3 :Flux de chaleur pour différents maillages

À partir de 100000 nœuds le flux de chaleur prend une valeur presque constante, pour cela nous avons adopté pour les prochaines études un maillage avec ce nombre de nœuds (figure 3).

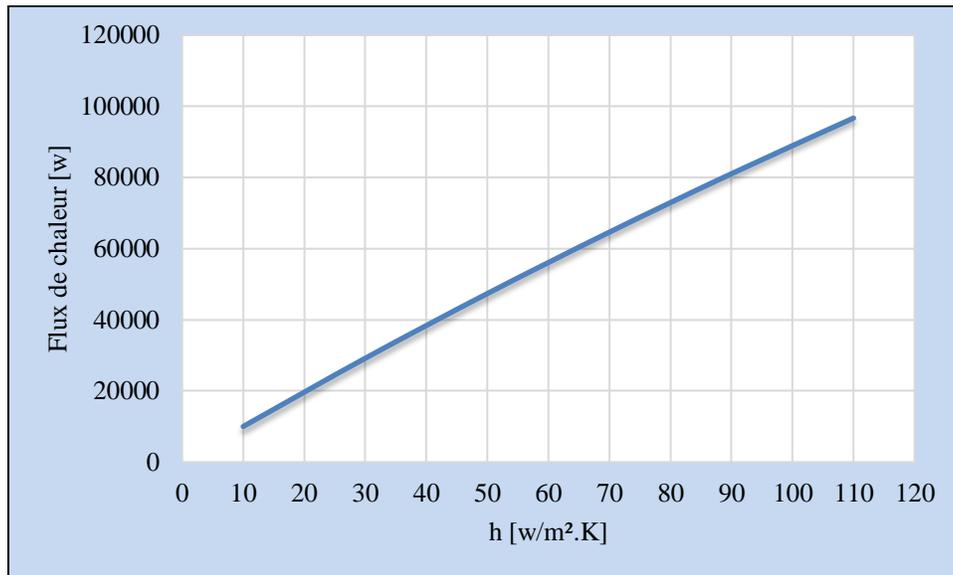
I. 4. L'effet du coefficient de convection sur le transfert de chaleur du moteur

Fig. 4 :Variation du flux de chaleur en fonction de coefficient de convection.

La figure 4 nous montre la proportion directe entre le flux de chaleur et le coefficient de convection, cette proportion directe est logique parce que le coefficient de chaleur est en fonction de plusieurs valeurs qui sert à augmenter le flux de chaleur avec leur augmentation.

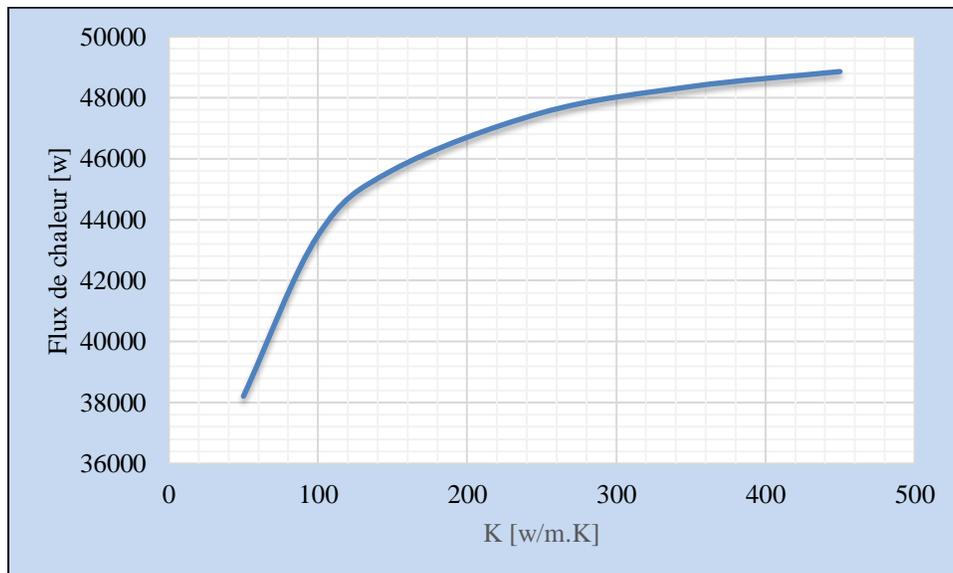
I. 5. L'effet de la conductivité thermique sur le transfert de chaleur du moteur

Fig. 5 : Variation du flux de chaleur en fonction de la conductivité thermique

La figure 5 nous montre qu'il y a une augmentation linéaire du flux de chaleur avec l'augmentation du coefficient de conduction jusqu'à la valeur 100 W/m.K, à ce point la matière du cylindre atteint une saturation et elle n'a pas pu stocké l'énergie thermique, pour cette raison le flux de chaleur reste presque constant à partir de cette valeur.

I. 6. L'effet de nombre des ailettes sur la distribution de la température

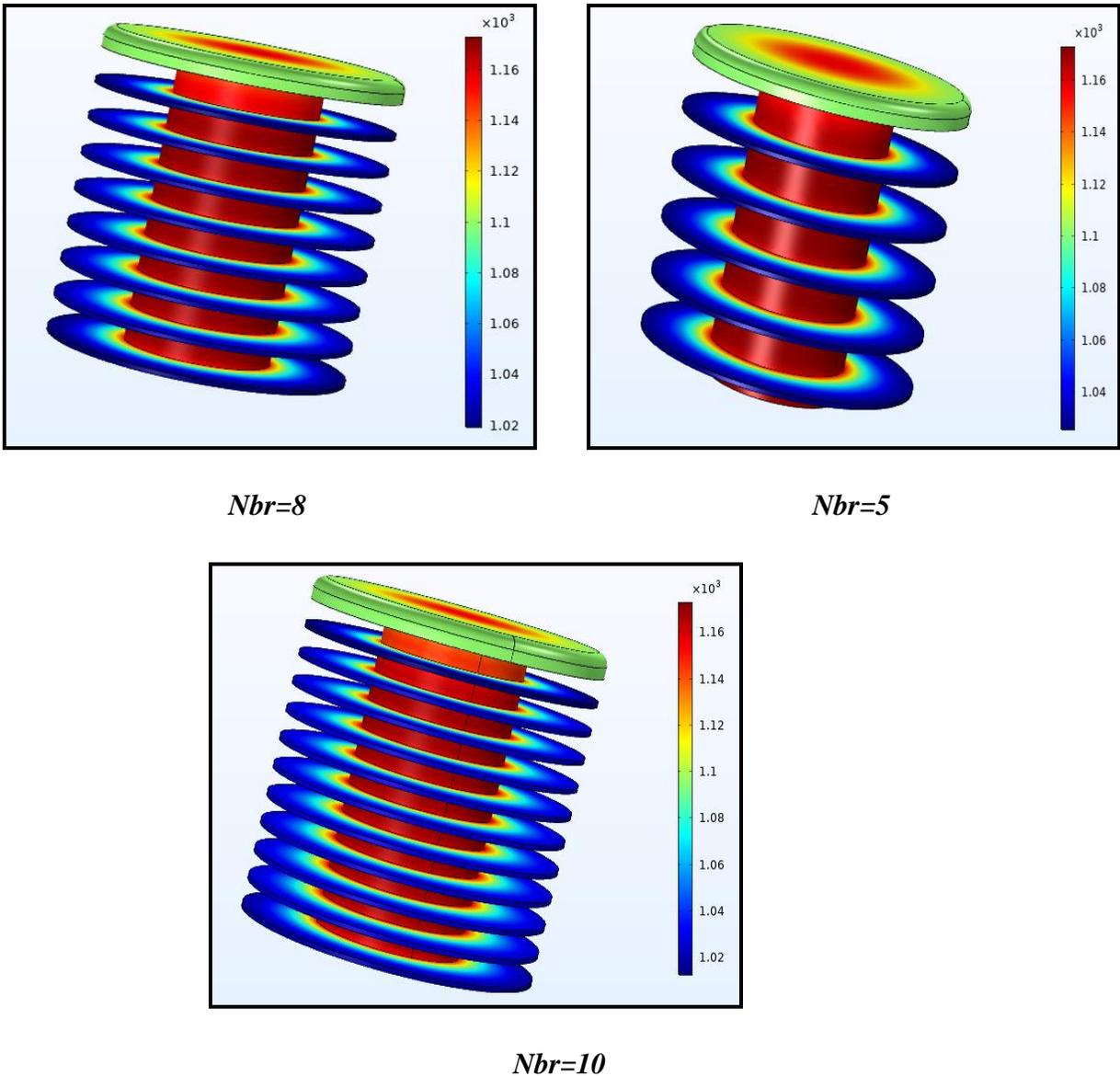


Fig. 6 : Distribution de la température par rapport a les nombres des ailettes

La figure 6 représente la distribution de la température dans la cylindre pour différents nombre d'ailette, il est claire que par l'augmentation du nombre d'ailettes la température du corps est diminué.

I. 7. L'effet de la longueur des ailettes sur la distribution de la température

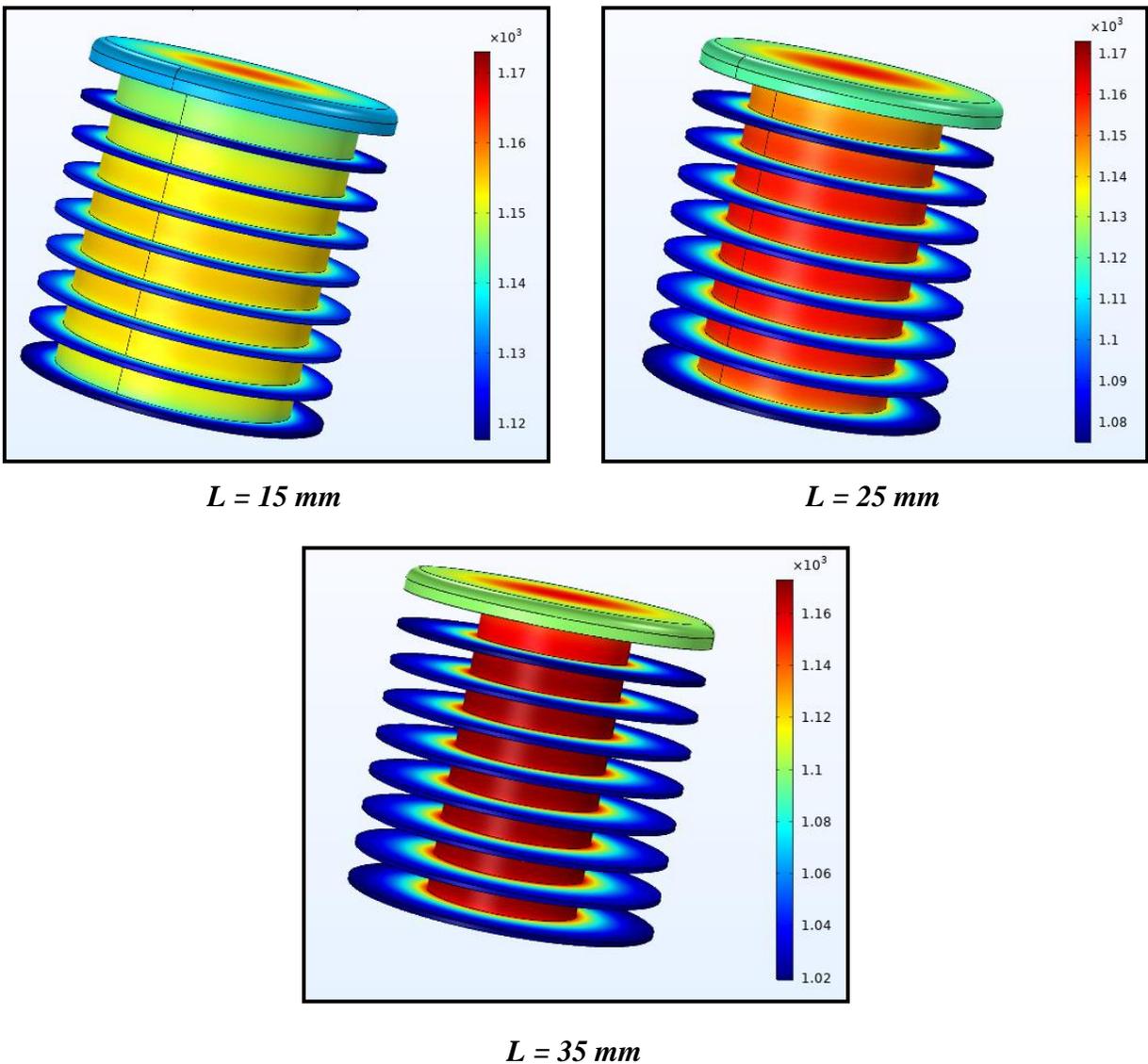


Fig. 7 :Distribution de la température par apport a les nombres des ailettes

La figure 7 représente la distribution de la température dans la cylindre pour différents longueur d'ailette, avec l'augmentation de l'ailette le corps du cylindre est démunie ce qui le expose à une grande température.

I. 8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait un modèle géométrique d'un cylindre qui reproche à un cylindre d'un motorcycle, nous avons commencé par le choix du maillage, ensuite nous avons fait une variation des coefficient de convection et du coefficient de conduction pour étudier le comportement du flux de chaleur, enfin nous avons fait une variation dans la géométrie, premièrement nous avons varié le nombre d'ailette et deuxièmes nous avons fait la variation du longueur d'ailette et nous avons analysé le comportement du flux de chaleur à chaque fois.

Conclusion générale

Puisque les moteur à combustion interne dépendent de la combustion pour leur fonctionnement, Une chaleur indésirable apparaît, peut affecter le matériau du cylindre et peut affecter le fonctionnement total du moteur, C'est pourquoi les concepteurs se soucient toujours par le refroidissement des machines en générale.

Dans ce mémoire nous avons adopté une étude numérique du refroidissement d'un cylindre simple représente un cylindre d'un motorcycle.

Nous avons commencé notre mémoire par une introduction générale suivi par quatre chapitres.

Le premier chapitre était des généralités sur les moteurs à combustion interne, le deuxième chapitre était consacrer sur les généralités du transfert de chaleur ensuite dans le troisième chapitre nous avons fait un recherche sur l'étude théorique des ailettes, en fin nous avons fait une étude de simulation numérique par le logiciel Comsol, nous avons exposé et analysé les différents résultats que nous avons obtenu par la simulation et nous avons finalisé notre mémoire par cette conclusion générale.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G Mai llard, Technologie de l'automobile, juin 1986..
- [2] Moteurs à combustion description, Constructive, Bruxelles, 2012..
- [3] Les organes de moteur, Technologie automobile, Académie de Nancy-Metz, 2008.
- [4] P.ARQUES, [Moteur alternatifs à combustion interne de la théorie de la conception. Ellips 1993.
- [5] F. Bebboukha ,A. Ben Azza ,mémoire fin d'étude, master professionnel forage ,(étude d'un moteur diesel de station pétrolière Caterpillar 3512). Univ. Ouargla.2012.
- [6] Modélisation du transfert thermique, de la combustion et du frottement dans le moteurs Diesel FL912 et B/F6L913 de l'entreprise moteur(EMO) de Oued Hamimime El Khroub.
- [7] Yves JANNOT [Ecole des Mines Nancy] transfert thermique Edition 2012
- [8] Bergerat MONNOYEUR, [Circuit de refroidissement], (Centre de perfectionnement FRANCISMONNOYEUR) 2006
- [9] http://fr.wikibooks.org/wiki/transferts_thermiques/introduction
- [10] Yves JANNOT, « transfert thermique » 2002
- [11] www.energie2.arch.ucl.ac.be/transfert%20chaleur/3-2htm
- [12] Jean-Luc Battaglia, Andrzej Kusiak et Jean-Rodolphe Puiggali « introduction aux transferts thermiques », Dunod, paris ,2010
- [13] André Giovannini & Benoit Bédard, « Transfert de chaleur », cepad 2012
- [14] [www-energie.2.arch.ucl.ac.be/transfert %20 chaleur/3.2htm](http://www-energie.2.arch.ucl.ac.be/transfert%20chaleur/3.2htm)
- [15] Shabany, Younes (2008). "Simplified correlations for radiation heat transfer rate in plate fin heat sinks" <http://www.electronics-cooling.com/2008/08/>

Les références

Résumé

Les moteurs à combustion interne convertissent l'énergie chimique stockée dans les carburants en travail en relaxant le gaz pendant la combustion. L'analyse thermique est un ensemble de techniques qui permettent de mesurer, en fonction de la température. Une simulation numérique qui va nous permettre de déterminer les différentes limites et conditions initiales (vitesse de l'air, direction de l'air, nombre et longueur des ailettes). répartition du champ de température et du champ de flux de chaleur dans les variables (8 ailettes, 5 ailettes, 10 ailettes avec les longueurs suivantes : 35 mm, 25 mm, 15 mm) Nous en déduisons la différence entre les températures maximales dans toutes nos variables.

Mots clés : moteurs à combustion interne, analyse thermique, ailettes, énergie chimique

Abstract

Internal combustion engines convert chemical energy stored in fuels into work by relaxing the gas during combustion. Thermal analysis is a set of techniques that allow measurement, depending on the temperature. Numerical simulations that will allow us to determine the different limits and initial conditions (air velocity, air direction, number and length of fins). We were able to determine the distribution of the temperature field and the field of heat flow in the variables (8 fins, 5 fins, 10 fins with the following lengths: 35 mm, 25 mm, 15 mm) We will deduce the difference between the maximum temperatures in all our variables.

Keywords: internal combustion engines, thermal analysis, fins, chemical energy

ملخص

تعمل محركات الاحتراق الداخلي على تحويل الطاقة الكيميائية المخزنة في الوقود إلى عمل عن طريق إرخاء الغاز أثناء الاحتراق. التحليل الحراري هو مجموعة من التقنيات التي تسمح بالقياس ، اعتمادًا على درجة الحرارة. المحاكاة العددية التي ستسمح لنا بتحديد الحدود المختلفة والظروف الأولية (سرعة الهواء ، اتجاه الهواء ، عدد الزعانف و طولها). تمكنا من تحديد توزيع مجال درجة الحرارة ومجال تدفق الحرارة في المتغيرات (8 زعانف, 5 زعانف, 10 زعانف مع الاطوال التالية : 35م, 25 م, 15م) سنستنتج الفرق بين درجات الحرارة القصوى في جميع متغيراتها.

الكلمات المفتاحية: محركات الاحتراق الداخلي ، التحليل الحراري ، الزعانف. الطاقة الكيميائية