

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

Investigation numérique du refroidissement des composants
électroniques : Etude de cas du Microprocesseur Intel ® Core™ i7

Devant le jury composé de :

MENECEUR.N Président
LARGOT.S Examineur
BOUKHARI.Ali Encadreur

Présenté par :

- GHAZEL Walid
- KHENNOUFA Ilias

2017-2018

Dédicace

Nous dédions ce travail modeste

À la famille, en particulier les parents précieux

En plus de tous les parents et amis

qui nous ont aidés dans notre travail avec l'aide de ce fait,

que ce soit physique ou morale

Et aussi le travail Bachir Laib

Merci

Remerciment

Avant tous, nous remercions Dieu qui nous donne le courage et la patience de faire ce travail, malgré toutes les difficultés. Prière et Salutation pour le plus honorable messager le maître de la création notre prophète "Mohamed".

Commençons par les enseignants

Mr BOUKHARI Ali

Donnez-nous une chance de travailler sur ce sujet merveilleux, et deux

Tous les remerciements et son appréciation.

Nos remerciements vont également à tous ceux qui nous ont apporté

Ou indirectement, des conseils et du soutien et de l'assistance dans la mise en œuvre et

La réalisation de ce travail, en particulier

Enfin une pensée pleine de reconnaissance à tous les enseignants du Faculté

Des Sciences et technique pour leurs efforts et leur

Collaboration lors de notre cursus

Merci

TABLE DE MATIERES

DEDICACE	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIERES	iii
NOMENCLATURE	iv
LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vi
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE REFROIDISSEMENT DES COMPOSANT ELECTRONIQUES	3
I. Introduction	3
II. le Refroidissement des composants électroniques	3
II.1. Principe du refroidissement à air par ailette	4
II.2. Différents modes de transfert de chaleur	4
II.2.1. Conduction thermique	4
II.2.2. Convection naturelle	4
II.2.3. La convection forcée	6
II.2.4. Rayonnement thermique	9
II.3. Définition et applications des ailettes thermiques	11
II.3.1. Refroidissement des microprocesseurs	13
II.4. Dimensionnement d'une ailette en régime stationnaire	14
II.4.1. Définition	14
II.4.2. Champ de température dans une ailette de section constante	15
II.4.2.1. Conservation du flux thermiques	15
II.4.2.2. Conditions aux limites	16
II.4.2.3. Efficacité d'une ailette	17
II.4.2.4. Rendement d'une surface ailettes	18
II.4.2.5. L'équation de la barre	19

II.4.2.6. Flux extrait par une ailette	20
III. Etat de l'art	21
CHAPITRE II : PRESENTATIONS DES TECHNOLOGIES DES MICROPROCESSEURS INTEL	28
I. microprocesseurs Intel® Core.....	28
II. microprocesseurs Intel® Core™ i7	28
II.1. Broadwell 5e generation	29
II.2. Kaby Lake 7e génération	29
II.3. Comparative entre microprocesseurs Intel® Core™ i7 Broadwell 5e génération et Kaby Lake 7e génération	30
II.4. Processeur 14 nm Intel® Core™ i7.....	32
II.4.1. Plus petit = plus performant	33
II.4.2. Fabrication en 14 nm.....	33
CHAPITRE III : METHODE DES VOLUMES FINIS	34
I. Les volumes finis	34
II. Maillage	34
III. Intégration d'une équation générale de transport	36
III.1. Equation général de transport.....	36
IV. Les Schémas numériques	36
V. Validation	38
VI. Déroulement des calculs en CFD FLUENT	41
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	47
I. Résultats thermiques Dissipateur à ailettes	47
I.1. 1 ^{er} Cas d'étude.....	47
I.1. 2 ^{ème} Cas d'étude.....	50
CONCLUSIONS GENERALE	54
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	55
RESUME.....	58

NOMENCLATURE

Symbole	Description	Unité
C_p	Chaleur massique à pression constante	$J.kg^{-1}.k^{-1}$
g	Accélération de pesanteur	$m.s^{-2}$
$nb_{ailettes}$	Nombre d'ailettes	
A	Aire	m^2
P_a	Périmètre d'ailettes	m
W	Largeur globale du radiateur	m
H	Hauteur globale du radiateur	m
L	Longueur globale du radiateur	m
h_b	Epaisseur de la base du radiateur	m
h_a	Hauteur de l'ailette	m
l_c	Largeur du canal	m
l_a	Epaisseur de l'ailette	m
x	Coordonnée cartésienne selon l'axe ox	m
y	Coordonnée cartésienne selon l'axe oy	m
z	Coordonnée cartésienne selon l'axe oz	m
Δx	Pas en espace suivant l'axe ox	m
Δy	Pas en espace suivant l'axe oy	m
Δz	Pas en espace suivant l'axe oz	m
\vec{V}	Vecteur vitesse en un point, $\vec{V}(u, v, w)$	$m.s^{-1}$
u	Composante axiale de la vitesse	$m.s^{-1}$
v	Composante axiale de la vitesse	$m.s^{-1}$
T	Température	$^{\circ}C, k$

Q	Source de chaleur (puissance du processeur)	W
q	Flux thermique	W
q''	Densité du flux thermique	$W.m^{-2}$
h	Coefficient de transfert de la chaleur	$W.m^{-2}.K^{-1}$
R_{th}	Résistance thermique du radiateur	$^{\circ}C, W^{-1}$
\dot{m}	Flux massique	$kg.s^{-1}$
\dot{V}	Flux volumique	$m^3.s^{-1}$
t	Temps	s
n	Vecteur normal à la paroi	
N	Cellule voisine côté nord	
E	Cellule voisine côté est	
S	Cellule voisine côté sud	
W	Cellule voisine côté ouest	
i, j, k	Indices d'espaces	

SYMBOLES GRECQUES

Symbole	Description	Unité
ρ	Masse volumique de l'air	$kg.m^{-3}$
ν	Viscosité cinématique	$m^2.s^{-1}$
μ	Viscosité dynamique	$kg.m^{-1}.s^{-1}$
α	Diffusivité thermique, $\lambda / \rho . c_p$	
λ	Conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
β	Coefficient d'expansion thermique, $1/\lambda$	K^{-1}
δ	Distance franchie par la conduction	m
ε	Critère de convergence	
Γ	Frontière	
Δ	Différence	
η	Efficacité de l'ailette	

NOMBRES ADIMENSIONNELS

Symbole	Description
Re	Nombre de Reynolds, $U \cdot D/h \cdot \nu$
Nu	Nombre de Nusselt, $h \cdot D/h \cdot \lambda$
Pr	Nombre de Prandtl, ν / α
Ra	Nombre de Rayleigh, $g\beta\Delta TL^3 / (\nu\alpha)$
Gr	Nombre de Grashof, $g\beta\Delta TL^3 / \nu^2$

INDICES ET EXPOSANTS

max	Maximum
e	Entrée
p	Parois
f	Relatif au fluide
s	Relatif au solide
∞	Relatif à l'ambiance
CPU	Central Processor Unit
Die	Relative à la matrice du processeur
iso	Parois isolées
cond	Relatif à la conduction
conv	Relatif à la convection
statique	Relatif à la pression statique
dynamique	Relatif à la pression dynamique
P	Relatif au point (i, j) ou (i, j, k)
e, w, n, s, u et d ou E, W, N, S, U et D	Position de nœuds
Jonction	Température de la source
New	Nouvelle itération, N+1
Old	Ancienne itération, N

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1	comparative entre (Broadwell 5e génération et Kaby Lake 7e génération).....	30
Tableau III.1	Définition de ϕ , Γ et S_ϕ des équations gouvernantes.....	36
Tableau III.2	Propriétés physiques D'aluminium.....	37
Tableau III.3	Propriétés thermophysiques de L'air.....	37
Tableau III.4	données utilise don les simulations numériques.....	37

LIST DE FIGURE

Figure I.1	: Convection forcée appliquée à une plaque plane	7
Figure I.2	: Quelques configurations de radiateurs.....	7
Figure I.3	: Jets et formes d'ailettes de radiateurs.....	8
Figure I.4	: Schéma de transfert par rayonnement	10
Figure I.5	: chauffage électrique	11
Figure I.6	: Le radiateur d'une voiture	12
Figure I.7	: Dissipateur de chaleur	12
Figure I.8	: Processeur avec son système de refroidissement.....	13
Figure I.9	: exemple de surface ailetée	14
Figure I.10	: hypothèse simplificatrice	15
Figure I.11	: définition du système thermodynamique utilisé.....	15
Figure I.12	: correction de longueur	17
Figure I.13	: Représentation d'une barre encastrée et schéma simplifié.....	19
Figure I.14	: Représentation des flux élémentaires sur une barre encastrée	20
Figure II.1	: microprocesseurs Intel® Core™ i7	28
Figure II.2	: Processeur Intel® Core™ i7 technologie 14 nm	32
Figure II.3	: comparatif 14 nm contre 22 nm.....	33
Figure II.4	: ces mesures quantifient la densité par rapport à la génération précédente.....	33
FigureIII.1	: Volume de contrôle bidimensionnel	35
FigureIII.2	: Volume de contrôle décalé vers la droite.....	35
FigureIII.3	: Volume de contrôle décalé vers le haut.....	35
FigureIII.4	: Dimensions du radiateur modèle	38
FigureIII.5	: d'une ailette du CPU modèle 3D. SOLIDWORKS	38
FigureIII.6	: distribution de température dans un Dissipateur à 1 ailette	39
FigureIII.7	: Température en fonction de la longueur de l'ailette.....	40
FigureIII.8	: Température en fonction de la Hauteur de l'ailette.....	40
FigureIII.9	: Modèle du dissipateur pour microprocesseur core i7 (3D).....	42
FigureIII.10	: Une partie du dissipateur pour microprocesseur core i7 (3D).....	42
FigureIII.11	: Définition de Condition limite sur la géométrie dans ANSYS FLUENT.....	43
FigureIII.12	: Maillage dans ANSYS-CEM CFD	43
FigureIII.13	: Importation de maillage dans FLUENT	44
FigureIII.14	: Déclaration condition limite (type Flux de chaleur).....	44
FigureIII.15	: Déclaration condition limite (type convection)	45
FigureIII.16	: Définition de valeur de référence	45
FigureIII.17	: FLUENT on Action	46
Figure IV.1	: Contours de la température statique.....	47
Figure IV.2	: valeurs du Nombre de Nusselt	47
Figure IV.3	: Contours du Nombre de Nusselt calculés	48
Figure IV.4	: Répartition des valeurs du Nombre de Nusselt à autres angle.....	48
Figure IV.5	: Dépendance de la température en fonction Nombre de Nusselt....	49

Figure IV.6	: <i>Projection des valeurs du Nombre de Nusselt aux régions latérales colorées par magnitude.....</i>	49
Figure IV.7	: <i>Répartition surfacique (en contours) du Nombre de Nusselt.....</i>	50
Figure IV.8	: <i>Iso-valeurs de a) Température totale, b) Température statique, et c) Température de la base du dissipateur.....</i>	50
Figure IV.9	: <i>Contours des valeurs du Nombre de Nusselt à la base de dissipateur.....</i>	51
FigureIV.10	: <i>Contours de la température statique.....</i>	51
FigureIV.11	: <i>Profils de la température.....</i>	52
FigureIV.12	: <i>corrélation entre coefficient de transfert de chaleur convection et la vitesse de rotation.....</i>	53

Introduction Générale

Introduction Générale

Depuis quelques années, une tendance vers l'assemblage d'un nombre important de puces en un seul module et de multiples modules en une seule carte est apparue. Cette tendance de minimisation et de miniaturisation accompagnée de vitesse plus en plus rapide de fonctionnement, entraîne une dissipation énergétique élevée au niveau de la puce et du module. Cela menacerait sans doute la durée de vie et la fiabilité de ces composants électroniques.

Cette élévation numérique de la génération de la chaleur avec une miniaturisation de plus en plus accrue, a fait de la gestion thermique une des étapes de conception les plus importantes. Enlever la chaleur des surfaces chaudes des dispositifs électroniques est une question d'étude. En fait, pour assurer la performance d'un système électronique, il est impératif de garder les limites de températures optimales pour le fonctionnement de tous les composants électroniques. Il en résulte que l'étude de refroidissement des composants électroniques devient nécessaire afin de permettre à ces systèmes de fonctionner sous des contraintes thermiques idéales.

D'autre part, les avantages inhérents des radiateurs à canaux miniatures ont considérablement attiré les attentions des chercheurs. Le dissipateur à ailette s'est avéré être un moyen de refroidissement de hautes performances. Les micros technologies prennent de l'ampleur dans notre quotidien, par conséquent de nouveaux défis s'imposent à nous en matière de compréhension des écoulements dans le dissipateur à ailette.

Une des méthodes de refroidissement les plus répandues en électronique est le refroidissement par air forcé. Avec la technique de convection de l'air forcé, on recherche non seulement à évacuer l'air chauffé mais également à réduire au maximum la différence de température au niveau du dissipateur à ailette pour réduire le coût et le bruit du ventilateur.

C'est dans cet objectif que s'intègre la présente étude. Nous discutons le refroidissement actif d'un microprocesseur de nouvelle technologie notamment le type Intel[®] Core[™] i7. Le dispositif de refroidissement par convection forcée de l'air est un dissipateur à ailettes de nouvelle géométrie circulaire, chauffées par la base et surmonté par un ventilateur axial en rotation permanente.

L'objectif de cette étude est la modélisation thermique et la résolution numérique du système de refroidissement décrit ci-dessus. Dans le but d'analyser les paramètres qui gouvernent ce phénomène, des simulations moyennant le CFD FLUENT sont faites pour étudier l'écoulement afin de comparer les résultats thermiques entre deux familles de ce type de microprocesseurs (5^{ème}

et 7^{ème} génération). De cette manière, les champs des températures, les nombres de Nusselt et les profils de température décrivant la problématique étudiée en détails, sont analysés.

Les résultats préliminaires sont soigneusement validés en les comparant aux résultats obtenus antérieurement par d'autres travaux induisant le même code de CFD.

Les objectifs du présent travail sont illustrés à travers les chapitres suivants:

- Dans le premier chapitre, nous exposerons des définitions, généralités sur les composants électroniques. Ensuite une recherche bibliographique concernant le refroidissement des composants électroniques. Notre étude est limitée à la convection forcée.
- Le deuxième chapitre constitue des présentations des technologies des microprocesseurs Intel® Core™ i7, ses générations et microarchitectures de cette ère technologique.
- Le modèle mathématique et la résolution en volumes finis via ANSYS® FLUENT feront l'objet du troisième chapitre, illustrant les outils numériques employés dans la simulation, simulation de l'écoulement dans dissipateur à ailette par le biais du CFD Fluent.
- Enfin, dans le quatrième chapitre montre les résultats numériques trouvés, leurs graphiques sont élaborés, présentés et discutés, suivi par une conclusion générale du travail effectué, des résultats obtenues et d'éventuelles perspectives.

CHAPITRE I :
Généralités sur le
refroidissement des composants
électroniques et recherche
bibliographique

I. Introduction :

Avec l'amélioration des puissances des circuits et des vitesses d'exploitation des systèmes électroniques avec des composants de tailles diverses dont certains présentent un fort dégagement de chaleur. Cette dissipation de chaleur rend la conception thermique plus critique. Pour assurer la précision du système, il est impératif de garder tous les composants opérant dans les limites des températures optimales.

Il en résulte que l'étude du refroidissement des composants électroniques devient nécessaire afin de permettre à ces systèmes de fonctionner sous des contraintes thermiques idéales. L'objectif de ce chapitre bibliographique est de faire un état de l'art de quelques travaux et approches existants sur le refroidissement des composants électroniques. Ainsi une vue sur quelques travaux de recherche, déjà apparus dans la littérature, sur le transfert de chaleur à petites échelles

II. le Refroidissement des composants électroniques :

En vertu de l'augmentation de la vitesse d'horloge (vitesse de traitement), la vitesse de la permutation et la densité des transistors, la taille de l'unité centrale de traitement CPU (Central Processing Unit) devient de plus en plus petite mais l'efficacité est de plus en plus grande. Cela entraîne un dégagement de chaleur plus élevé par volume de CPU. Un moyen simple et efficace pour améliorer la dissipation de chaleur du processeur est l'emploi du refroidissement actif.

Avec l'augmentation continue de la puissance dissipée par les composants et les systèmes électroniques, le marché de l'électronique de puissance a besoin de nouvelles techniques de refroidissement plus robustes et plus fiables. Les techniques de refroidissement standards utilisées aujourd'hui sont parfois insuffisantes caloporteurs et plus particulièrement à cause de leur faible conductivité thermique. Nous proposons, dans ce mémoire, d'étudier le refroidissement des composants électroniques par ailette.

II.1. Principe du refroidissement à air par ailette :

L'ailette comme son nom l'indique est un appendice que l'on dispose sur un dispositif que l'on désire refroidir ou chauffer efficacement. L'idée est d'augmenter la surface d'échange. On peut voir des ailettes sur les microprocesseurs dans les systèmes électroniques [1].

Étudions le rôle précis des ailettes thermiques dans certains systèmes de notre vie quotidienne. Application la plus connue les microprocesseurs des ordinateurs qui génèrent beaucoup de chaleur lors de leur fonctionnement. Afin d'éviter que ceux-ci soient endommagés par une surchauffe, ils sont parfois recouverts par un radiateur.

II.2. Différents modes de transfert de chaleur :

La théorie des échanges thermiques a pour objet l'étude de la propagation de la chaleur. Cette propagation se présente sous trois formes fondamentales qui sont la conduction, la convection et le rayonnement.[2]

II.2.1. Conduction thermique :

La conduction thermique est la propagation de la chaleur, de molécule vers une autre, dans un corps ou dans plusieurs corps contigus et non réfléchissants, sans qu'il y ait mouvement du milieu ou que ce mouvement intervienne dans la transmission. Ce mode de transmission caractérise essentiellement les transferts de chaleur dans les solides où entre corps solides contigus. La conduction intervient également dans les liquides et les gaz mais, sauf dans le cas des liquides très visqueux ou des gaz emprisonnés dans des matériaux poreux, son effet, est marginal par rapport à celui de la convection [3,4].

II.2.2. Convection naturelle :

La convection caractérise la propagation et le transport de la chaleur par des molécules en mouvement qui viennent se réchauffer au contact d'un corps chaud et véhiculent cette énergie calorifique pour la céder à un corps froid. Deux types de convection sont généralement distingués, la convection forcée et la convection libre. La convection est dite forcée quand il existe une cause du mouvement autre que les variations de températures du fluide, cette cause étant la seule à prendre en compte en raison de son importance relative [5].

La convection naturelle est due au contact du fluide avec une paroi plus chaude ou plus froide et qui crée des différences de masse volumique, génératrice du mouvement au sein du fluide [6].

Toute autre cause de mouvement de molécule d'air telle que les ventilateurs est éliminée. Dans le la convection libre : mode de convection, l'analyse adimensionnelle intervient afin de pouvoir calculer les caractéristiques du régime d'écoulement et le coefficient d'échange convectif (h). Les quatre nombres adimensionnels critiques dans le cas de la convection naturelle sont:

- Nusselt Nu décrit le rapport entre l'échange par convection et par conduction dans la couche fluide.
- Grashof Gr représente la comparaison entre la force de poussée consécutive à l'échauffement et la force de viscosité.
- Prandtl Pr décrit le rapport entre la diffusion de la quantité de mouvement et la diffusion de la chaleur dans un fluide.
- Finalement le critère pour déterminer l'instabilité de l'écoulement est le Rayleigh . Ce dernier est égal au produit : $Gr \cdot Pr$

La résistance thermique de convection R_{th} est évaluée après le choix de la corrélation adéquate (fonction de Nusselt). Pour une surface d'échange , les formules de la résistance R_{th} , du coefficient h et du diamètre hydraulique D_c [7] sont :

$$R_{th} = \frac{1}{h \cdot S} \quad h = \frac{\lambda \cdot Nu}{D_c} \quad D_c = \frac{4S_c}{p} \quad (I.1)$$

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (I.2)$$

$$Nu = 0.664 Re^{0.5} Pr^{0.33} = \frac{hL}{\lambda_f} \quad (I.3)$$

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda_f}{L} \quad (I.4)$$

Avec λ la conductivité de l'air S_c , et P caractérisent respectivement la section et le périmètre d'un canal d'écoulement. Dans le cas d'un canal de section circulaire par exemple, D_c est égal au diamètre géométrique de la conduite.

II.2.3. la convection forcée :

Comme vu, le refroidissement par air peut être passif ou actif. Étant en convection naturelle c'est la méthode passive et la convection forcée est la méthode active.

Cette dernière méthode est la solution de refroidissement la plus répandue. Nous parlons de convection forcée quand l'écoulement est provoqué par des moyens externes, tels qu'un ventilateur, une pompe, ou les vents atmosphériques. Dans les conditions naturelles, la convection est due au vent qui est lui-même la résultante du gradient local de la pression atmosphérique [8].

Le fluide échange de la chaleur avec des parois, mais son mouvement est pratiquement peu influencé par les différences de températures.

Le transfert thermique à partir d'une surface à la température T_s d'un fluide à la température T_∞ par la convection (voir figure I.1) est exprimé par la loi de Newton de refroidissement :

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (I.5)$$

Où :

q : Flux de transfert de chaleur convectif (W).

h : Coefficient convectif de transfert de la chaleur ($W/m^2.k$).

A : Surface d'aire disponible pour la convection (m^2).

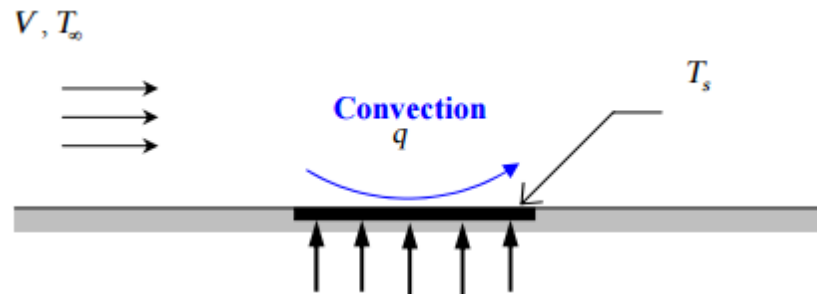


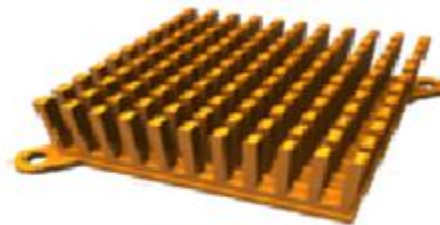
Figure I.1 : Convection forcée appliquée à une plaque plane

Les radiateurs sont souvent utilisés dans beaucoup d'industries pour augmenter la quantité de chaleur évacuée par convection libre ou forcée. Les radiateurs sont des dispositifs qui mettent en valeur la dissipation thermique d'une surface chaude.

Ils peuvent être trouvés sur divers dispositifs électroniques tels que les microprocesseurs et les cartes vidéo à haute performance. Les radiateurs sont fabriqués en substrats solides ayant habituellement une conductivité thermique élevée, tels que le silicium, le cuivre ou l'aluminium. Une des conceptions de radiateur les plus simples et les plus rentables actuellement utilisées est le radiateur en aluminium extrudé. Plusieurs formes de radiateurs possibles sont présentées dans la figure I.2.



(a) Ailettes épingles



(b) Ailettes hexagonales



(c) Ailettes planes



(d) Ailettes planes découpées

Figure I.2 : Quelques configurations de radiateurs.

Un composant électronique est alors monté sur la surface de base du radiateur. La chaleur produite par le composant est d'abord transférée aux canaux par conduction, ensuite évacuée par convection forcée [9].

Les composants électroniques tels que les diodes et les transistors qui sont attachés aux radiateurs, ont une température de jonction critique vis-à-vis leurs performances. C'est un but ultime pour concevoir la géométrie du radiateur afin que la température de jonction estimée du radiateur ne devrait plus être grande que la température de jonction prescrite par le fabricant [10].

Les ailettes sont en contact direct avec de l'air ambiant, ainsi, elles libèrent la chaleur à l'ambiance. Puisque la conductivité thermique de l'air est considérablement inférieure à celle du radiateur, une couche limite thermique se formera autour des ailettes. La présence de cette couche limite est plutôt désavantageuse du point de vue efficacité de refroidissement.

C'est la raison principale d'appliquer un ventilateur additionnel dans un système de refroidissement actif, puisque le transfert de chaleur par convection forcée est beaucoup plus efficace dans le transport de chaleur par convection libre les micro-canaux sont des échangeurs de chaleur intégrés directement avec le composant électronique. Cette technologie augmente la surface pour le transfert thermique et améliore le coefficient de transfert thermique. Cette technologie de refroidissement exige également un schéma efficace pour le rejet de la chaleur à l'ambiance, qui dépend de la conception et de la fabrication des radiateurs sophistiqués.

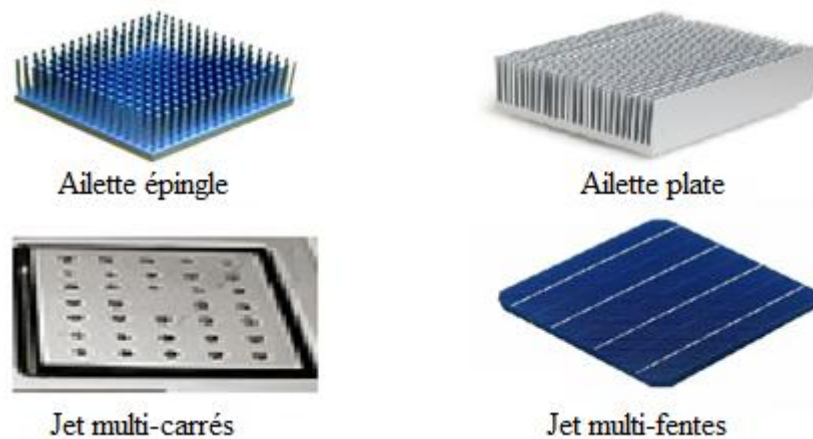


Figure I.3 : Jets et formes d'ailettes de radiateurs

II.2.4. Rayonnement thermique :

Un point matériel chauffé émet un rayonnement électromagnétique dans toutes les directions situées d'un même côté du plan tangent au point matériel. Lorsque ce rayonnement frappe un corps quelconque, une partie peut être réfléchi, une autre transmise à travers le corps (dit diathermique si tout est transmis), et le reste est quantitativement absorbé sous forme de chaleur. Si on place dans une enceinte deux corps capables d'émettre un rayonnement thermique, il existe entre ces deux corps à températures différentes un échange de chaleur dû à l'absorption et à l'émission de ces rayonnements thermiques. Cet échange de chaleur est désigné habituellement sous le nom de rayonnement.

Les transferts par rayonnement se poursuivent même lorsque l'équilibre thermique est atteint, mais le débit net de chaleur échangé est nul. 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.

Dans de nombreux problèmes de transformation d'énergie thermique, les trois modes de transfert de chaleur coexisteront mais, généralement, au moins une des trois formes pourra être négligée, ce qui simplifiera le traitement mathématique de l'appareil de transfert. Nous pouvons dire dès à présent, qu'aux températures ordinaires, le transport par rayonnement est négligeable, mais il peut devenir notable et prépondérant lorsque le niveau de température augmente.

En outre, signalons que certains transferts thermiques sont accompagnés d'un transfert de matière entre deux phases. Le flux de chaleur transféré en présence d'un changement de phase dépend de la nature et des propriétés physico-chimiques des phases en présence. C'est le cas de l'ébullition, de la condensation, mais aussi des problèmes d'humidification, de séchage, de cristallisation, etc.

Dans ce qui suit nous allons présenter, pour les trois types de transport de la chaleur, les lois générales qui les gouvernent. Puis nous traiterons, de manière simple, quelques applications où le mode de transport de chaleur étudié est prédominant. [11].

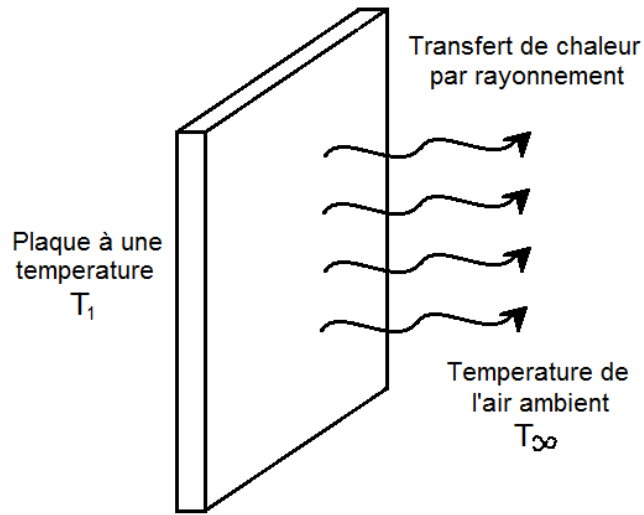


Figure I.4 : Schéma de transfert par rayonnement

Ce mode de transfert est le seul à se réaliser dans le vide, cas du rayonnement solaire arrivant sur Terre. Néanmoins, celui-ci se réalise aussi dans les fluides (l'air par exemple) et dans certains solides (verre). Exemples de transfert par rayonnement : système de chauffage dit par radiant ; le soleil. La loi de Stefan-Boltzmann (ou loi de Stefan) permet de quantifier ces échanges.

La puissance rayonnée par un corps est donnée par la relation :

$$P = \epsilon S \sigma T^4 \quad (\text{I. 6})$$

Avec

- σ : constante de Stefan-Boltzmann ($5,670\ 3 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) ;
- ϵ : émissivité, indice valant 1 pour un corps noir et qui est compris entre 0 et 1 selon l'état de surface du matériau ;
- S : superficie du corps ;
- T : température du corps (en kelvin).

Si le corps récepteur réfléchit certaines longueurs d'ondes ou est transparent à d'autres, seules les longueurs d'onde absorbées contribuent à son équilibre thermique. Si par contre le corps récepteur est un corps noir, c'est-à-dire qu'il absorbe tous les rayonnements électromagnétiques, alors tous les rayonnements contribuent à son équilibre thermique.

II.3. Définition et applications des ailettes thermiques :

Le rôle des ailettes thermiques est de favoriser l'échange de chaleur entre deux milieux, or le nombre de domaines mettant en jeu des échanges thermiques est impressionnant. Etudions le rôle précis des ailettes thermiques dans certains systèmes de notre vie quotidienne.

Application la plus connue, les systèmes de chauffage des particuliers mettent en jeu des systèmes d'ailettes thermiques afin de transmettre la chaleur issue d'une résistance (dans le cas du chauffage électrique), ou d'un fluide caloporteur (porteur de chaleur) en circulation, à l'air ambiant.



Figure I.5 : chauffage électrique

Ci-contre une résistance chauffante composée de la résistance électrique (tube en 'U') cerclée par une ailette thermique en forme de spirale. Il aurait été possible de remplacer la résistance électrique par un tube dans lequel circulerait un fluide caloporteur.

Bien entendu le domaine des appareils de chauffage ne se limite pas aux installations visibles dans les habitations particulières. Ces systèmes servent également dans l'industrie, des lors qu'il est nécessaire de chauffer un fluide. En effet, les ailettes ont pour rôle de favoriser les échanges thermiques entre un élément solide et un fluide. L'élément solide peut très bien être un tube dans lequel circule un second fluide, afin d'autoriser les échanges d'énergie sans pour autant mélanger ces derniers : c'est le principe des échangeurs de chaleur utilisés pour transmettre l'énergie entre plusieurs circuits de fluides caloporteurs.

Les ailettes thermiques peuvent aussi être nommées radiateurs. Leur but est alors de refroidir un élément, en transmettant l'excédent de chaleur au milieu extérieur, c'est à dire l'air dans la plupart des cas.

Le radiateur d'une voiture (image ci contre) permet de refroidir le moteur. Le liquide de refroidissement circule dans des tubes auxquels sont associées des ailettes thermiques qui

transmettent cette chaleur à l'air. La circulation de l'air est assurée par la vitesse du véhicule, ce qui assure un phénomène de convection suffisant.



Figure I.6 : Le radiateur d'une voiture

Les microprocesseurs des ordinateurs génèrent beaucoup de chaleur lors de leur fonctionnement. Afin d'éviter que ceux-ci soient endommagés par une surchauffe, ils sont parfois recouverts par un radiateur. Le plus souvent en aluminium, ce système d'ailettes transmet directement la chaleur du processeur à l'air.

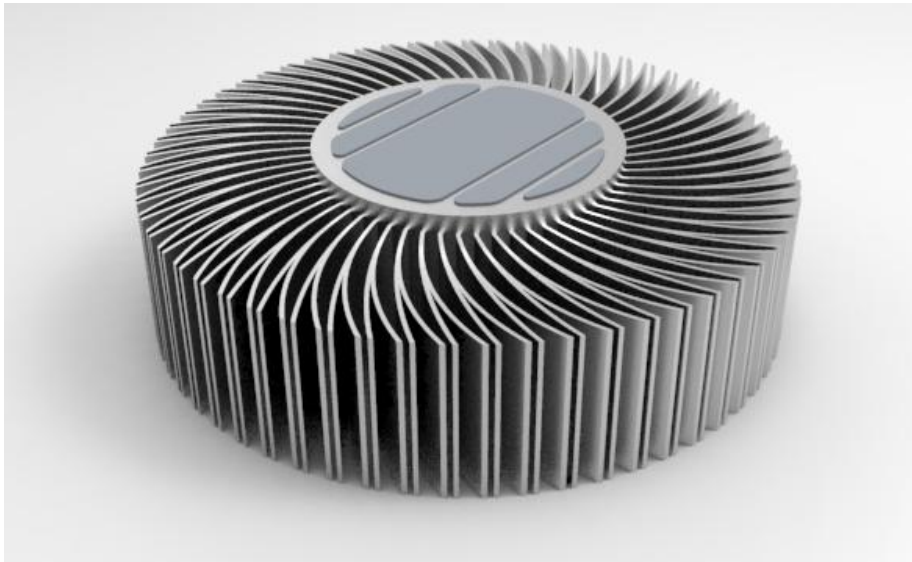


Figure I.7 : Dissipateur de chaleur

Ainsi, même si leur forme peut beaucoup varier, les ailettes thermiques sont indispensables pour améliorer le rendement de tout échangeur de chaleur. Que le but soit de refroidir un élément en transmettant sa chaleur à l'air ambiant, ou au contraire de chauffer un fluide grâce à une

résistance électrique, le principe des échangeurs reste toujours le même, et des ailettes thermiques y sont presque toujours associées [11].

II.3.1. Refroidissement des microprocesseurs :

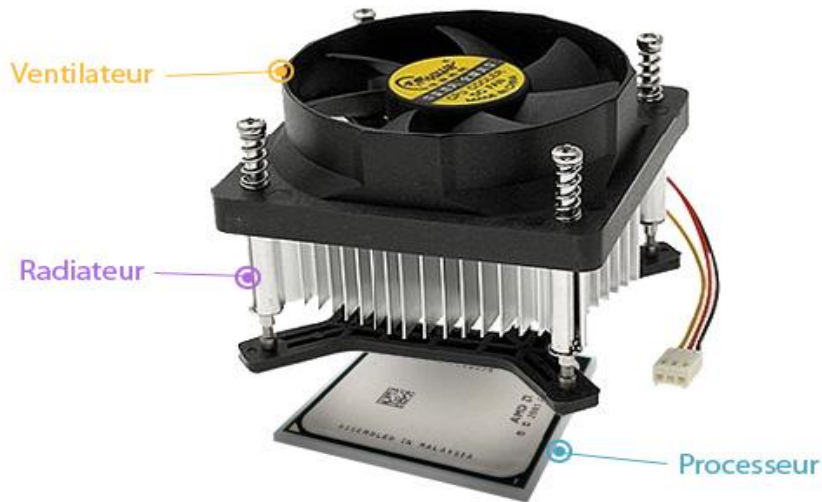


Figure I.8 : Processeur avec son système de refroidissement.

Le processeur est un véritable centre nerveux de l'ordinateur, il contient plusieurs milliers de transistors, qui sont chargés de décoder les informations qui lui sont envoyés. Comme tous les composants électriques, une fois alimentés ces transistors dégagent une certaine quantité de chaleur. Avec les fréquences élevées des processeurs vendus ces derniers mois sur le marché, cette quantité de chaleur n'a malheureusement cessé d'augmenter. Cela explique la présence au-dessus du processeur d'un dissipateur de chaleur et d'un ventilateur. Sans ce dispositif de refroidissement, l'ordinateur ne peut fonctionner correctement.

Bien entendu la température de votre processeur varie en fonction de l'utilisation de votre ordinateur. Plus votre processeur se révèle dans la plupart des cas lors de l'utilisation d'applications gourmandes en ressources comme la lecture de DVD, de Divx, ou le jeu vidéo.

Une surchauffe déclenche en général une procédure d'arrêt d'urgence du PC, d'où un gel de l'écran ou un redémarrage.

Le refroidissement par air correspond à un refroidissement classique à air: un radiateur en contact avec le processeur permet de collecter la chaleur (conduction naturelle), laquelle est évacuée à l'aide d'un ventilateur (convection forcée).

Cependant on constate beaucoup de désavantages à ce système de refroidissement: les ventilateurs sont source de nuisances parfois très élevées lorsque l'unité processeur est exploitée à 100%, ou simplement lorsque la température ambiante est élevée.

De plus, qui dit ventilateur dit appel d'air, c'est pour cela que rapidement la poussière s'accumule à l'intérieur du boîtier, ce qui peut créer une gêne dans le refroidissement de certains composants dépourvus de radiateur, cette poussière créant alors une sorte de "coque" qui empêche la chaleur de s'évacuer.

II.4. Dimensionnement d'une ailette en régime stationnaire :

II.4.1. Définition :

Rappelons l'expression de la loi de Newton, qui donne le flux convectif échangé entre un solide de surface S , de température superficielle uniforme T_p , et un fluide à la température T_f :

$$\dot{Q}_a = hS(T_p - T_f) \quad (I.7)$$

La façon la plus économique d'augmenter le flux de chaleur \dot{Q}_a consiste bien souvent à augmenter S . Ceci peut être obtenu par la réalisation d'ailettes, solution ayant pour avantage de limiter l'encombrement et l'augmentation de poids qui résultent de l'ajout de matière.

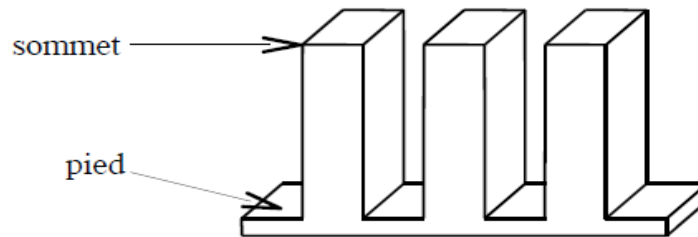


Figure I.9 : exemple de surface ailetée.

Dans les applications, on a besoin de connaître le flux thermique \dot{Q}_a échangé par une ailette. Or, le champ de température dans l'ailette étant à l'évidence multidimensionnel (en d'autres termes, la température dans l'ailette dépend de plusieurs variables d'espace), le flux thermique s'obtient par intégration sur la surface d'échange S_a de l'ailette :

$$\dot{Q}_a = \iint_{S_a} h dS(T_p - T_f) \quad (I.8)$$

Dans l'absolu, l'évaluation de cette intégrale nécessite de résoudre un problème de conduction thermique multidimensionnel, donc compliqué. Heureusement, dans la plupart des cas, il est possible de supposer que la température est quasi-uniforme sur une section droite de l'ailette. En d'autres termes, on suppose que la température ne dépend que de z , distance comptée depuis le pied de l'ailette.

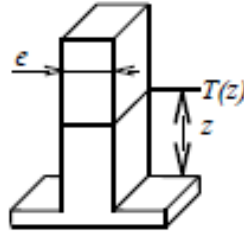


Figure I.10 : hypothèse simplificatrice.

En notant la plus petite dimension transversale de l'ailette et λ sa conductivité thermique, cette hypothèse est valable dès lors que la résistance à la conduction thermique $r = e/\lambda$ est très inférieure à la résistance thermique convective $1/h$. Le critère de validité s'écrit :

$$Bi = \frac{he}{\lambda} \ll 1 \quad (I.9)$$

Bi est le nombre de Biot. Dans ce qui suit, on admettra que l'hypothèse selon laquelle la température ne dépend que de z est toujours vérifiée. En outre, on continuera à supposer que l'on se trouve en régime stationnaire.

II.4.2. Champ de température dans une ailette de section constante :

II.4.2.1. Conservation du flux thermiques :

Appliquons le premier principe de la thermodynamique à une tranche d'épaisseur dz située à la cote z (représentée en noir sur la figure I.11).

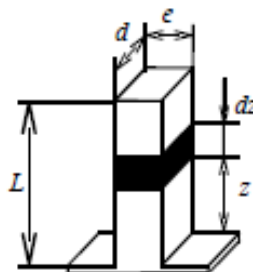


Figure I.11 : définition du système thermodynamique utilisé.

Avec l'hypothèse de régime stationnaire, et en l'absence de tout travail, le premier principe de la thermodynamique impose que la somme algébrique des flux de chaleur qui entrent dans le système doit être nulle :

$$-\lambda \frac{dT}{dz} \Big|_z A_z + \lambda \frac{dT}{dz} \Big|_{z+dz} A_{z+dz} + h p dz (T_f - T_z) = 0 \quad (\text{I.10})$$

Le périmètre de l'ailette est noté p . La section de l'ailette à la cote z est notée A_z . L'ailette étant de section constante, on a : $A_z = A_{z+dz} = A$. Dans le cas d'une ailette rectangulaire telle que celle, on aurait $p = 2(d + e)$ et $A = ed$. Pour une ailette de section circulaire de diamètre D , on aurait $p = \pi D$ et $A = \pi D^2/4$. La su

ite de l'analyse s'applique à n'importe quelle ailette de section constante. Le développement de Taylor au 1er ordre de la dérivée spatiale de la température s'écrit :

$$\frac{dT}{dz} \Big|_{z+dz} = \frac{dT}{dz} \Big|_{z+dz} + \frac{d^2T}{dz^2} \Big|_z dz \quad (\text{I.11})$$

En injectant cette relation dans la relation (I.7), il vient :

$$\frac{d^2T}{dz^2} = m^2 (T - T_f) \quad \text{avec} \quad m = \sqrt{\frac{hp}{\lambda A}} \quad (\text{I.12})$$

La quantité m , homogène à l'inverse d'une longueur, est appelée module de l'ailette.

II.4.2.2. Conditions aux limites :

Le champ de température dans l'ailette s'obtient donc en résolvant l'équation différentielle du 2ème ordre (I.12), avec les conditions aux limites appropriées en $z=0$ et $z=L$. En général, on peut supposer connue la température au pied de l'ailette [13].

$$T(z=0) = T_b \quad (\text{I.13})$$

Au sommet de l'ailette, on peut tenir compte d'un transfert de chaleur convectif, avec le même coefficient d'échange h que sur les faces latérales. La conservation du flux thermique à l'interface solide/fluide aboutit à :

$$\lambda \frac{dT}{dz} \Big|_{z=L} = h(T_f - T_{z=L}) \quad (\text{I.14})$$

Mais si l'ailette est suffisamment longue, la surface d'échange au sommet est négligeable devant celle des faces latérales. Il est alors possible de supposer le sommet adiabatique, ce qui a pour effet de simplifier légèrement les calculs. La condition à la limite s'écrit dans ce cas :

$$\lambda \left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=L} = 0 \quad (\text{I.15})$$

Une solution de compromis consiste à supposer le sommet adiabatique (relation I.12), tout en utilisant une longueur corrigée $L_c = L + e/2$, ce qui revient à « déplier » le sommet de l'ailette (cf. figure I.10). Cette correction a pour effet de reporter sur les faces latérales la surface d'échange que l'on perd en négligeant les transferts de chaleur au sommet [12].

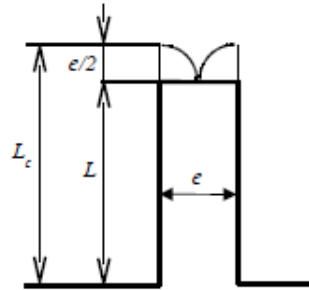


Figure I.12 : correction de longueur.

II.4.2.3. Efficacité d'une ailette :

L'efficacité d'une ailette est définie comme étant le rapport entre le flux de chaleur dissipé par l'ailette et le flux de chaleur qui quitterait la même surface s'il n'y avait pas d'ailette et si la température de base restait identique.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{ailette}}{hA_t(T_s - T_\infty)} = \frac{\text{Taux de transfert de chaleur de l'ailette}}{\text{Taux de transfert de chaleur sans l'ailette}} \quad (\text{I.16})$$

Notations :

- h coefficient de transfert thermique par convection [W/m²K]
- A_t aire transversale de l'ailette (à la base) [m²]
- T_s température de surface [K]
- T_∞ température du fluide [K]

Cas particulier de l'ailette infinité :

$$\varphi_a = \frac{\sqrt{h\lambda P A_t}(T_s - T_\infty)}{hA_t(T_s - T_\infty)} = \sqrt{\frac{\lambda P}{hA_t}} \quad (\text{I.17})$$

Donc, l'efficacité d'une ailette augmente si :

- 1) la conductivité thermique λ augmente;
- 2) le coefficient de transfert thermique par convection h diminue;
- 3) le rapport P/A_t augmente (aillette mince).

Interprétation de l'efficacité d'une ailette :

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{aillette}}{hA_t(T_s - T_\infty)} = \frac{1}{hA_t} \frac{\dot{Q}_{aillette}}{(T_s - T_\infty)} = \frac{R_{th\ conv}}{R_{th\ cond\ ailette}} \quad \text{car} \quad \dot{Q} = \frac{1}{R_{th}} \Delta T \quad (\text{I. 18})$$

Notations : $R_{th\ conv}$ résistance attribuable à la convection à la base
 $R_{th\ cond\ ailette}$ résistance de l'aillette

Ainsi, l'efficacité d'une ailette peut être vue comme étant le rapport entre deux résistances. Si l'aillette sert à augmenter le transfert thermique, il faut que la résistance de l'aillette soit supérieure à celle attribuable à la convection à la base.

II.4.2.4. Rendement d'une surface ailettes :

Le rendement d'une ailette est défini comme étant le rapport entre le taux de transfert de chaleur réel de l'aillette et le taux de transfert thermique de l'aillette qui existerait si elle était toute à la température de la base.

$$\eta_a = \frac{\dot{\Phi}_{aillette}}{hA_{tot\ surf}(T_s - T_\infty)} = \frac{\text{Taux de transfert de chaleur de l'aillette}}{\text{Taux de transfert de chaleur maximal de l'aillette}} \quad (\text{I. 19})$$

Notations : h coefficient de transfert thermique par convection [W/m²K]
 $A_{tot\ surf}$ aire totale de la surface de l'aillette [m²]
 T_s température de surface [K]
 T_∞ température du fluide [K]

Cette notion de rendement est plus rationnelle et plus utilisée que celle d'efficacité. En effet, la dernière condition de l'efficacité : “*et si la température de base restait identique*” recèle le

point faible de cette notion d'efficacité, dans la réalité, la température de base peut modérément changer si l'on enlève l'ailette [11].

En nous plaçant dans les conditions d'une ailette de longueur finie avec extrémité isolée (ou si le flux en bout de l'ailette est négligeable) :

$$\eta_a = \frac{\sqrt{hP\lambda A_t} (T_s - T_\infty) \tanh(ml)}{hPl (T_s - T_\infty)} = \sqrt{\frac{hA_t}{hP}} \frac{\tanh(ml)}{l} = \frac{\tanh(ml)}{ml} \quad (I.20)$$

II.4.2.5. L'équation de la barre :

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

Considérons une barre de section constante (épaisseur e et largeur ℓ) encastrée entre 2 surfaces à température T_0 et baignant dans un fluide à température T_∞ .

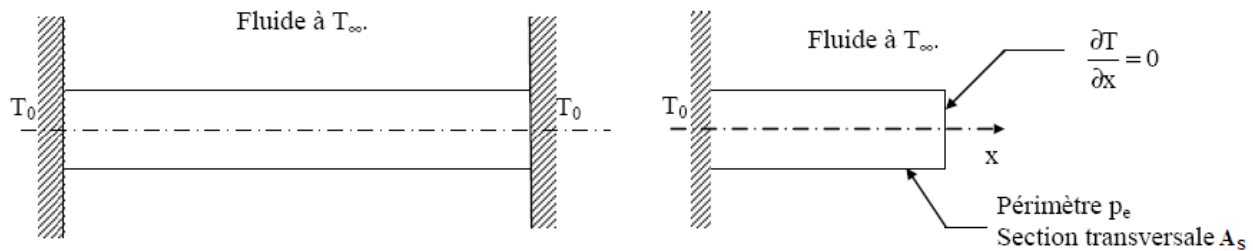


Figure I.13 : Représentation d'une barre encastrée et schéma simplifié

La symétrie du problème montre l'existence d'un extrémum de la température au milieu de la Barre ce qui permet de simplifier la géométrie et de ne considérer qu'une demi-barre avec condition de flux nul à l'extrémité située en contact avec le milieu à T_∞ (cf. figure I.13).

La *barre* est supposée de section suffisamment faible pour qu'il n'y ait pas de variation de température dans une même section droite à une distance x de l'encastrement dans la paroi à T_0 . Effectuons un bilan d'énergie sur le système constitué par la portion de barre comprise entre les abscisses x et $x+dx$ (nous retenons l'hypothèse du régime permanent et nous négligeons le rayonnement) :

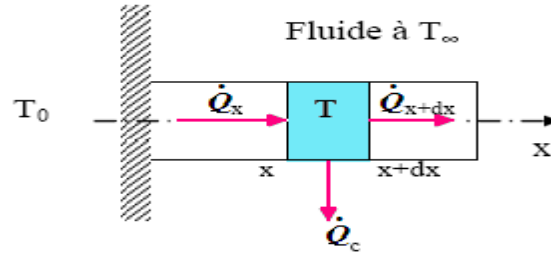


Figure I.14 : Représentation des flux élémentaires sur une barre encastrée

Avec :

$$\dot{Q}_x \quad \text{Flux de chaleur transmis par conduction à l'abscisse } x \quad \dot{Q}_x = - \left(\lambda A_s \frac{dT}{dx} \right)_x$$

$$\dot{Q}_{x+dx} \quad \text{Flux de chaleur transmis par conduction à l'abscisse } x+dx \quad \dot{Q}_{x+dx} = \left(\lambda A_s \frac{dT}{dx} \right)_{x+dx}$$

$$\dot{Q}_c \quad \text{Flux de chaleur transmis par convection à la périphérie} \\ \text{de la barre entre } x \text{ et } x+dx \quad \dot{Q}_c = h p e dx [T(x) - T_\infty]$$

Le bilan d'énergie s'écrit : $\dot{Q}_c = \dot{Q}_{x+dx} - \dot{Q}_x$

$$\text{soit : } \left(\lambda A_s \frac{dT}{dx} \right)_{x+dx} - \left(\lambda A_s \frac{dT}{dx} \right)_x = h p e dx [T(x) - T_\infty]$$

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

$$\lambda A_s \frac{\left(\frac{dT}{dx} \right)_{x+dx} - \left(\frac{dT}{dx} \right)_x}{dx} = h p e [T(x) - T_\infty]$$

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

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{h p e}{\lambda A_s} (T - T_\infty) = 0 \quad (I.21)$$

II.4.2.6. Flux extrait par une ailette :

Une *aillette* est un milieu bon conducteur de la chaleur dont une dimension est grande devant les autres, exemple : barre d'épaisseur e et de longueur L , avec $e \ll L$. Elles sont utilisées à chaque fois que des densités de flux élevées sont à transmettre dans un encombrement réduit : refroidissement de composants électroniques, refroidissement d'un moteur par air,...

On a établi l'équation différentielle vérifiée par la température $T(x)$ d'une ailette encastrée dans

un mur à la température T_0 et baignant dans un fluide à la température T_∞ :

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{h p_e}{\lambda A_s} (T - T_\infty) = 0$$

Où :

h = coefficient d'échange convectif .

p_e = périmètre de l'ailette .

A_s = section de l'ailette .

λ = la conductivité thermique du matériau qui compose l'ailette.

En posant : $\omega^2 = \frac{h p_e}{\lambda A_s}$ et $\vartheta = (T - T_\infty)$ elle peut encore s'écrire : $\frac{d^2\vartheta}{dx^2} - \omega^2 \vartheta = 0$

Si la section A_s est constante, c'est une *équation différentielle* du 2^{ème} ordre à coefficients constants dont la solution générale est de la forme [13] :

$$\vartheta = A \exp(\omega x) + B \exp(-\omega x) \quad \text{ou} \quad \vartheta = A_1 \operatorname{ch}(\omega x) + B_1 \operatorname{sh}(\omega x)$$

III. Etat de l'art :

Tawk et al. [14] ont présenté que l'augmentation continue de la puissance dissipée par les composants et les systèmes électroniques, le marché de l'électronique de puissance a besoin de nouvelles techniques de refroidissement plus robustes et plus fiables. Les techniques de refroidissement standards utilisées aujourd'hui sont parfois insuffisantes à cause des propriétés physiques des fluides caloporteurs et plus particulièrement à cause de leur faible conductivité thermique. D'où la nécessité de faire circuler un fluide dont les propriétés thermiques sont plus élevées. Nous proposons, dans cet article, d'étudier le refroidissement des composants électroniques de puissance avec un fluide métallique (alliage de Gallium). ils ont présentons dans la première partie les systèmes de pompage existants ainsi que les avantages et inconvénients d'utiliser un fluide métallique. Ensuite, nous présentons l'étude et la réalisation expérimentale d'une boucle de test. Le résultats obtenus expérimentalement sont comparés à ceux obtenus par simulation numérique du refroidisseur (logiciel Flotherm). Enfin, ils ont présenté la potentialité des boucles de refroidissement par métal liquide, puis ils sont aboutit dans cet article à l'étude d'un système de refroidissement par métal liquide. Pour cela nous avons présenté au début un bref état de l'art sur cette technologie et sur les systèmes existants soit chez

Nanocoolers, soit chez Danamics. Nous avons ensuite présenté notre boucle de refroidissement et les résultats expérimentaux qui ont été comparés à des simulations 3D effectuées avec le logiciel Flotherm. Dans la dernière partie nous avons présenté l'étude théorique du refroidissement d'une puce de puissance et nous avons pu démontrer l'intérêt de l'utilisation d'un fluide métallique par rapport à l'eau pour une puissance de pompage identique. ils ont également vu que le choix du matériau constituant le refroidisseur est très important si l'on ne veut pas perdre tous les avantages apportés par le métal liquide. Le cas particulier présenté dans cette partie montre qu'une densité de flux de chaleur de l'ordre du millier W/cm² pourrait être obtenue avec cette technique.

Amirouche et Bessaih [15] ont présenté dans un article le résumé des résultats de calcul de la convection naturelle turbulente pour le refroidissement de cinq composants électroniques, placés sur une paroi d'un canal vertical. La méthode des volumes finis a été utilisée pour résoudre les équations de l'écoulement avec transfert thermique dans tout le domaine physique (solide et fluide) sans décomposition. Les résultats obtenus sont comparés avec les données expérimentales et montrent que la largeur du canal et le non-chauffage des composants sont des effets considérables sur l'amélioration du transfert de chaleur à l'intérieur du canal, puis ils ont considéré refroidissement par convection naturelle turbulente tridimensionnelle, conjuguée, de cinq composants électroniques chauffés, montés sur une paroi d'un canal vertical a été étudié numériquement. La méthode des volumes finis a été utilisée pour résoudre les équations du modèle mathématique. Les résultats ont été comparés avec les données expérimentales. Le champ de température dans chaque composant a été trouvé presque uniforme. Un bon et meilleur refroidissement est obtenu lorsque l'espacement entre les parois verticales du canal diminuent et quand d'un composant non chauffé est placé entre deux composants chauffés.

Puis, **Shende et Mahalle [16]** ont considéré le flux de chaleur élevée de dispositifs électroniques, tels que ; projecteur, LED, puce haute puissance, etc., nécessitent des méthodes de refroidissement efficaces pour la dissipation de la chaleur dans une région limitée. Cela signifie maintenir une petite source de chaleur à une température acceptable. Cela a entraîné des défis inévitables dans le domaine de la gestion thermique de l'électronique pour maintenir la température de fonctionnement souhaitable. Leur article passe en revue la littérature traitant de divers aspects des méthodes de refroidissement. Sont inclus des articles sur les travaux expérimentaux sur l'analyse de la technique de refroidissement et sa stabilité, la modélisation

numérique, la convection naturelle et les méthodes de refroidissement avancées. Les questions de la gestion thermique de l'électronique, le développement de nouveaux systèmes de refroidissement efficaces en utilisant des matériaux avancés et des méthodes de fabrication sont également énumérés dans cet article, Après cela, ils ont examiné le refroidissement à flux de chaleur élevé d'équipements électroniques et de dispositifs avec diverses méthodes. En particulier, les dissipateurs de chaleur qui sont utilisés pour la convection naturelle et la convection forcée en tant que dispositif passif sont étudiés. Basé sur les documents examinés, il a révélé que la recherche doit être axée sur la technologie de refroidissement avancée qui utilise un caloduc haute performance, des refroidisseurs thermoélectriques, des micro ventilateurs acoustiques à faible bruit pour le refroidissement par air et un refroidissement par matériau à changement de phase. . Les défis du refroidissement des équipements électroniques devraient se poursuivre jusqu'à la fin de la décennie. Comme la taille des semi-conducteurs diminue de jour en jour et que la dissipation de puissance augmente rapidement, une percée est nécessaire dans le refroidissement avancé pour réduire les coûts sans sacrifier l'efficacité du refroidissement.

Ayli et al.[17] ont présenté l'étude de refroidissement des systèmes électroniques est un domaine de recherche attrayant en ingénierie. Le but de leur recherche est de concevoir des promoteurs de vortex pour le refroidissement des équipements électroniques. Différentes formes de promoteurs de vortex sont utilisées dans l'étude expérimentale pour l'écoulement turbulent et les résultats sont utilisés pour valider les résultats d'un travail de calcul préalable effectué par les auteurs. Un autre but est de choisir un promoteur et un emplacement de promoteur appropriés qui fournissent les meilleurs effets de turbulence et un refroidissement plus efficace. Les valeurs de température sont mesurées avec des thermocouples à plusieurs endroits de surveillance. Les résultats montrent que le promoteur de tourbillon le plus efficace pour le refroidissement est un promoteur de type triangulaire pour les conditions d'écoulement testées Après cela, ils ont lié à l'analyse expérimentale et computationnelle du transfert de chaleur dans les systèmes électroniques. Trois différents promoteurs de vortex sont testés pour les systèmes à double circuit afin de diminuer les valeurs de température maximales atteintes dans les systèmes. Résumé de toutes les valeurs de température quand on examine ce tableau, on voit que les promoteurs de vortex rectangulaires et rhombus ne sont pas très efficaces.

Abidi et al.[18] ont étudié les effets des insertions solides sur l'optimisation du transfert thermique conjugué (convection-conduction) dans une géométrie complexe sont étudiés

numériquement. La géométrie étudiée est constituée par une cavité et des insertions de différentes tailles. La cavité est carrée et possède une paroi supérieure horizontale épaisse, dont la conductivité thermique peut avoir différentes valeurs ($0,1 \lambda_{fl}$ à $5,0 \lambda_{fl}$), où λ_{fl} est la conductivité thermique du fluide. Les frontières horizontales supérieure et inférieure de la cavité sont toutes les deux considérées comme adiabatiques tandis que les deux autres parois verticales sont maintenues isothermes à une température froide T_f . La cavité est munie d'un cylindre elliptique horizontal placé au centre et maintenu à une température chaude T_c . L'excentricité du cylindre elliptique prend des valeurs entre 0,25 et 1 avec un pas de 0,25. Les calculs sont effectués pour des nombres de Rayleigh variant de 10^3 à 10^6 , pour des rapports de conductivité thermique des insertions solides variant entre 0,1 et 100 et pour différentes positions, différentes dimensions, différents nombres des insertions solides. La formulation de la moyenne harmonique est utilisée pour traiter les changements brusques des propriétés aux interfaces solide/fluide et solide/solide. Le fluide employé dans ce problème est l'air qui obéit à la loi de Boussinesq et possède un nombre de Prandtl égal à 0.71. L'écoulement dans la cavité est laminaire, bidimensionnel et le problème est formulé comme un cas stationnaire et résolu en employant le code commercial de calcul FLUENT avec un maillage non-uniforme. Les résultats montrent que le taux de transfert thermique global est fortement affecté par le nombre de Rayleigh, la taille des insertions solides et les rapports de conductivités thermiques.

Douha et al.[19] ont considéré l'écoulement en 2D avec le transfert de chaleur conjugué est développé dans la présente étude. L'application se fait sur un échangeur compact avec chicanes rectangulaires. A cet effet nous avons élaboré un modèle mathématique permettant de simuler le fonctionnement de l'échangeur. Les équations gouvernantes, sont résolues par la méthode des volumes finis à l'aide de l'algorithme SIMPLE en utilisant un CFD (Computational Fluid Dynamics). Les champs des lignes de courant et de température ainsi que la distribution du nombre de Nusselt sont présentés pour un cas d'exemple type. Leur code de calcul a donné des résultats satisfaisants puisqu'on a l'existence des zones de recirculation en aval et en amont de chaque chicanes, qui augmentent avec l'augmentation du nombre de Re et le régime établi est atteint. Les résultats trouvés sont en accord avec ceux de tous les auteurs qui affirment que localement des zones de recirculation apparaissent dans les échangeurs menu des chicanes et qui correspond à un transfert de chaleur plus important. L'augmentation du nombre de Re engendre une augmentation des zones de recirculation, ce qui explique un transfert de chaleur important en

ces zones; et les distributions du nombre de Nu varient avec la géométrie de l'échangeur (chicanes).

Aussi, **Mebrouk et al.[20]** ont présenté dans un travail, l'étude numérique des caractéristiques dynamique et thermique d'un échangeur de chaleur ayant des tubes ailetés. Les calculs supposent un transfert de chaleur et un écoulement en régime permanent. le nombre de Nusselt et le coefficient de frottement qui caractérisent l'échangeur de chaleur sont déterminés pour différentes valeurs du nombre de Reynolds. L'équation de conservation de l'énergie convection-conduction (transfert conjugué) en trois dimensions a été résolue avec les équations de la conservation de la masse et de la quantité de mouvement afin de déterminer ces caractéristiques. Les deux régimes d'écoulement laminaire et turbulent sont considérés. L'effet de la modélisation de la turbulence a été étudié en utilisant trois modèles différents (le modèle Spalart - Allmaras de turbulence à une équation, le modèle k- ϵ standard et le modèle RSM). Les calculs ont permis la détermination des champs dynamiques et thermiques. La validation du modèle a été effectuée en comparant le facteur de frottement f calculé et le facteur j de Colburn avec les résultats expérimentaux puisés de la littérature.

La comparaison a montré un bon accord qualitatif entre les résultats numériques et les données expérimentales. Les résultats obtenus ont également montré que le plus simple des trois modèles de turbulence testés (celui de Spalart - Allmaras) donne les valeurs les plus proches des données expérimentales. Le transfert de chaleur et l'écoulement du à la convection forcée dans un échangeur de chaleur compact à deux rangées de tubes ont été étudiés numériquement. Le paramètre investigué est le nombre de Reynolds du fluide. Les propriétés du fluide ont été supposées indépendantes de la température.

Les deux régimes d'écoulement laminaire et turbulent ont été calculés et les résultats ont été comparés avec les données expérimentales disponibles dans la littérature. Ils ont conclu que les modèles de turbulence RSM et Spalart - Allmaras prédisent avec la même précision le coefficient de frottement.

Tsong Chen et al. [21] ont présenté un article qui examine la conception et le contrôle optimaux des ailettes à plaques pour les processus de dissipation thermique de l'unité centrale (UC). Premièrement, ils ont appliqué une méthode par éléments finis pour étudier les phénomènes de transfert de chaleur d'un processus de puits de chaleur. Pour avoir une meilleure performance de dispersion de la chaleur, un algorithme génétique codé en réel est ensuite utilisé

pour rechercher un ensemble optimal de paramètres de forme plaque-nageoire. La fonction objective à minimiser est le taux de génération d'entropie qui peut prendre simultanément en compte les deux principaux facteurs, le taux de transfert thermique et la résistance à l'air, dans la conception. Le schéma d'optimisation actuel permet d'obtenir une meilleure conception de la dispersion thermique que les méthodes existantes. Pour atténuer les perturbations environnementales et variables dans le temps, un schéma de contrôle adaptatif direct est ensuite développé pour le processus de dissipation thermique du processeur. Il est basé sur l'utilisation d'un contrôleur de neurone unique limité (SNC) avec un algorithme de réglage de paramètre pour réguler la température d'un point de contrôle sélectionné. Des comparaisons approfondies de la performance de contrôle basée sur SNC avec le contrôle tout ou rien ainsi que d'un contrôleur PI montrent que le schéma proposé offre d'excellentes performances de contrôle malgré l'existence d'incertitudes de processus inattendues. Leur article a présenté un schéma d'optimisation et une stratégie de contrôle adaptatif direct pour les processus de dissipation thermique du processeur. Les phénomènes de transfert de chaleur de la plaque-ailette sont étudiés en utilisant logiciel-COMSOL Multiphysics. Un algorithme génétique codé en réel est développé pour la conception optimale des plaques-ailettes avec les flux d'air d'entrée horizontaux ou verticaux. La fonction objective à minimiser est le taux de génération d'entropie, ce qui permet de prendre en compte à la fois les effets de la résistance thermique et de la dissipation visqueuse. Les résultats de la simulation montrent que l'algorithme génétique proposé en code réel peut donner de meilleurs résultats que les méthodes existantes.

En outre, comme indiqué par des expériences de simulation, le processus de dissipation thermique du CPU est sensible aux perturbations environnementales même si la conception est optimale par rapport à certaines conditions de fonctionnement. Pour rejeter ces perturbations, un système de contrôle SNC adaptatif direct a été suggéré. Avec un algorithme de réglage des paramètres, le contrôleur SNC peut ajuster la vitesse du ventilateur de telle sorte que la CPU fonctionne correctement à une condition prédéfinie malgré l'influence des charges supplémentaires comme le changement de la température ambiante. Des comparaisons approfondies ont révélé que le schéma de commande basé sur SNC proposé est supérieur en termes de performances de contrôle par rapport au contrôleur PI classique et au contrôle on-off communément utilisé pour les processus de dissipation thermique du processeur.

Chyn et Chou[9] ont considéré le dissipateur de chaleur qui est devenu un module standard sur CPU pour gérer la gestion thermique du PC en raison de son émission de chaleur efficace et de son faible coût de fabrication. D'après l'expérience antérieure, il est bien connu que l'effet de dissipation de la chaleur varie de manière significative pour différentes dispositions de PC, ce qui diminue la performance du ventilateur en bloquant son chemin d'écoulement. Ainsi, il existe une demande importante pour que les ingénieurs thermiciens réalisent systématiquement cet effet de blocage. En conséquence, cette étude expérimentale a étudié l'effet de blocage sur les performances et les caractéristiques de bruit des ventilateurs à flux axial appliqués sur l'assemblage du dissipateur de chaleur. Pour simuler l'effet de blocage, une plaque plane est placée à une certaine distance sur le dessus du ventilateur à flux axial pour bloquer partiellement son trajet d'écoulement. La performance du ventilateur est déterminée dans une chambre d'essai AMCA 210-99 tandis que les mesures de bruit sont effectuées dans une chambre semi-anéchoïque. Plusieurs tailles de ventilateurs couramment utilisées et les distances de blocage sont étudiées dans cette étude. Les résultats expérimentaux indiquent que la diminution du débit est insignifiante alors que la perte de pression statique est dramatique. En outre, l'effet de blocage contribue principalement à l'augmentation du bruit à large bande tandis que sa contribution au bruit à bande étroite est négligeable. En ce qui concerne la gestion de la chaleur, la plaque de blocage n'a pratiquement aucun effet pour une grande distance de blocage.

La caractérisation thermique du dissipateur à ailettes de géométrie circulaire utilisé dans le refroidissement des composants électroniques par convection forcée d'air sera étudiée.

Les paramètres thermique comprenant les profils de températures, la distribution de la température statique, la température totale et le nombre de Nusselt au sein du solide aileté sont analysés et présentés graphiquement. L'effet d'un paramètre adimensionnel qui est le nombre de Nusselt expliquant l'intensité de la convection thermique dans le fluide de refroidissement par rapport à la conduction a été étudié.

Ce travail de recherche essaye d'établir quelques simulations afin d'inspecter le transfert de chaleur ayant lieu lors du refroidissement des composants électroniques, et des circuits intégrés. Le cas étudié dans ce travail est le microprocesseur Intel Core i7 représenté dans ses microarchitectures ; Broadwell (5ème génération) et Kaby Lake (7ème/8ème génération),et ceci selon une nouvelle conception de refroidissement appliquées dans le domaine industriel.

CHAPITRE II :
Présentations des technologies
des microprocesseurs Intel®
Core

I. microprocesseurs Intel® Core :

Les processeurs Intel Core ne date pas d'hier ! La première génération de ces processeurs est en effet apparue en 2008. Depuis, les Intel Core se sont considérablement améliorés : de nouvelles technologies, de meilleures performances, des graphismes largement optimisés... En 2018, nous en sommes à la huitième génération, nommée **Coffee Lake**. Pour mieux comprendre les caractéristiques des Intel Core et leurs évolutions au fil des générations, le Crabe vous propose une petite rétrospective autour des processeurs phares d'Intel : les Core i3, Core i5 et **Core i7**.

II. microprocesseurs Intel® Core™ i7 :

Le Core i7 correspond au haut de gamme, il offre les meilleures performances possibles pour jouer aux jeux vidéo, faire du montage vidéo et utiliser des logiciels lourds comme les applications de modélisation, d'animation et de rendu 3D. Il n'est pas beaucoup plus performant que le Core i5 dans les jeux vidéo, donc si vous utilisez principalement votre PC pour jouer, économisez et tournez-vous vers le Core i5. En revanche, dès qu'il s'agit d'exécuter des logiciels lourds comme Adobe Photoshop, Adobe Première Pro, VMWare Workstation Pro ou encore Autodesk 3ds Max, le Core i7 et ses 8 Mo de mémoire cache sont clairement ce qui se fait de mieux à l'heure actuelle.



Figure II.1 : microprocesseurs Intel® Core™ i7

II.1. Broadwell 5e génération :

Après de longs mois de retard, les processeurs Broadwell débarquent enfin pour les PC de bureau en juin 2015. Malheureusement, les Core i7-5775C et Core i5-5675C ne resteront pas dans les annales des utilisateurs de PC, non pas pour qu'ils sont décevants (au contraire) mais à cause d'un mauvais timing : les processeurs de la génération suivante (Skylake) arrivent en effet en août 2015 avec une toute nouvelle architecture. Les utilisateurs ont donc logiquement préféré attendre deux mois la sortie de ces processeurs Skylake pour bénéficier des dernières avancées technologiques.

Revenons aux processeurs Broadwell. Ce sont les premières puces de bureau en socket LGA 1150 gravées en 14 nm. Pour rappel, une finesse de gravure supérieure permet une consommation moindre, un échauffement mesuré et une capacité d'over clocking (une montée en fréquence) supérieure. La consommation énergétique se révèle impressionnante, le Core i7 5775C consomme en effet moins qu'un Core i3 Haswell ! Mais là où les processeurs Broadwell frappent (très) fort, c'est avec leur nouveau iGPU, le processeur graphique intégré. Les performances de l'Iris Pro Graphics 6200 sont considérables, Intel se permettant même de dépasser AMD et ses APU. [22]

II.2. Kaby Lake 7e génération :

Kaby Lake est un nom de code Intel pour une microarchitecture de processeur qu'ils ont annoncé le 30 août 2016. Comme le précédent Skylake, Kaby Lake est produit en utilisant une technologie de processus de fabrication de 14 nanomètres. [23] Rompant avec le précédent modèle de fabrication et de conception «tick-tock» d'Intel, Kaby Lake représente l'étape optimisée du nouveau modèle «process-architecture-optimisation» [24]. Kaby Lake a commencé à être expédié aux fabricants et aux équipementiers au deuxième trimestre de 2016 [25] et les puces mobiles ont commencé à être expédiées tandis que les puces Kaby Lake (de bureau) ont été officiellement lancées en janvier 2017.

En août 2017, Intel a annoncé Kaby Lake Refresh (Kaby Lake R) commercialisé comme la 8ème génération de processeurs mobiles, brisant le cycle long où les architectures correspondent

aux générations de processeurs correspondantes. Skylake devait être remplacé par le lac Cannon de 10 nanomètres, mais il a été annoncé en juillet 2015 que Cannon Lake a été retardée jusqu'au deuxième semestre de 2017. Entre-temps, Intel a sorti une quatrième génération de 14 nm le 5 octobre 2017 appelée Coffee Lake.

II.3. comparative entre microprocesseurs Intel® Core™ i7 Broadwell 5e génération et Kaby Lake 7e génération :

Tableau II.1 : comparative entre (Broadwell 5e génération et Kaby Lake 7e génération) [26]

<i>Informations</i>	<i>Cas 1</i>	<i>Cas 2</i>
Collection de produits	5e génération de processeurs Intel® Core™ i7	7e génération de processeurs Intel® Core™ i7
Nom du code	Produits anciennement Broadwell	Produits anciennement Kaby Lake
Segment vertical	Desktop	Desktop
N° du processeur	i7-5950HQ	i7-7700
État	Launched	Launched
Date de lancement	Q2'15	Q1'17
Lithographie	14 nm	14 nm
Prix de vente recommandé	\$623.00	\$303.00 - \$312.00
Nb. de cœurs	4	4
Nb. de threads	8	8
fréquence turbo Maxi	3,80 GHZ	4,20 GHZ

Cache	6 MB	8 MB Smart Cache
Vitesse du bus	5 GT/s DMI2	8 GT/s DMI3
PDT	47 W	65 W
Capacité mémoire maxi (dépend du type de mémoire)	32 GB	64 GB
Type de mémoire	DDR3L 1600/1866 LPDDR3 1600/1866	DDR4-2133/2400, DDR3L- 1333/1600 @ 1.35V
Nb. max. de canaux mémoire	2	2
Mémoire ECC prise en charge †	Non	Non
Sockets gérés	FCBGA1364	FCLGA1151
T _{JUNCTION}	105°C	100°C
Taille du conditionnement	37.5mm x 32mm x 1.8mm	37.5mm x 37.5mm
Options de bas niveau d'halogènes disponibles	Reportez-vous à la section MDDS	Reportez-vous à la section MDDS

II.4. Processeur 14 nm Intel® Core™ i7 :

Le processeur 14 nm Intel® Core™ i7 est conçu pour améliorer le traitement graphique et les performances dans une enveloppe thermique plus petite, en prenant en charge la prochaine génération de solutions pour l'Internet des objets. L'i7 fournit jusqu'à 25 % de performances CPU multi-thread supplémentaires à l'aide de transistors 3-D Tri-Gate, une consommation énergétique pouvant être jusqu'à 20 % inférieure avec une accélération des E/S PCH et un cadre de puissance dynamique et thermique 8.0. Les processeurs Intel Core i7 prennent en charge des performances haut de gamme pour les médias et les graphiques, un décodage et un transcodage ultrarapides (qui libèrent le processeur pour d'autres tâches), accélère les performances de calcul de nombres/matrices et contient de nouvelles instructions Intel Broadwell pour des performances cryptographiques efficaces et sécurisées. Compatibles avec les conceptions de plates-formes existantes [27].

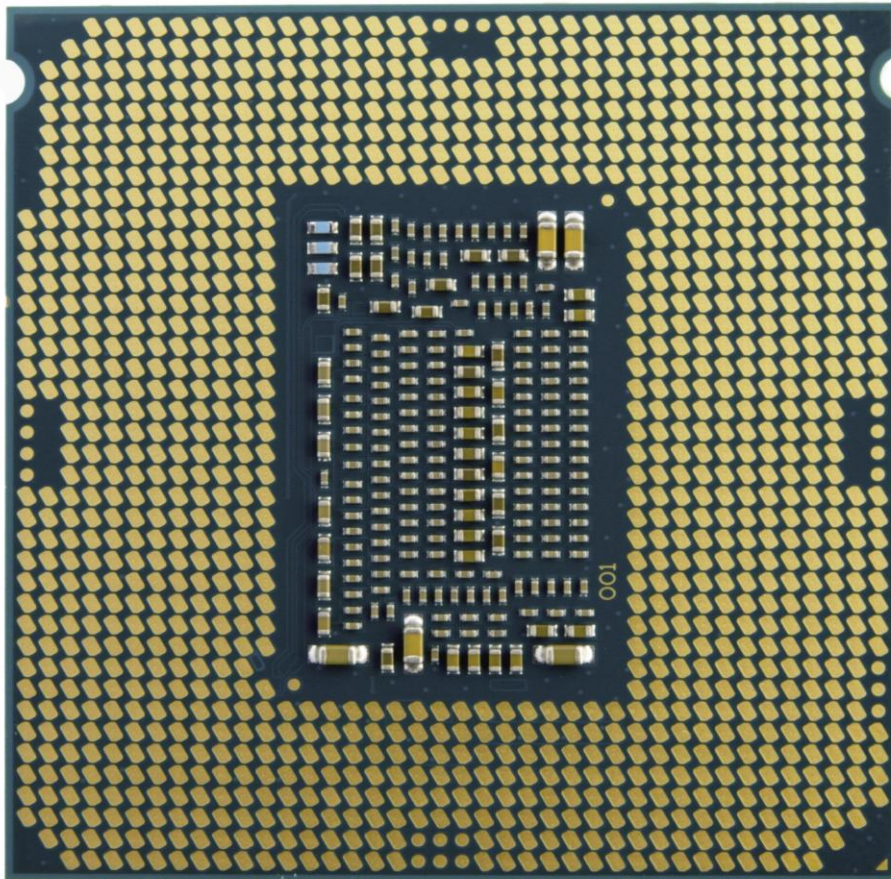


Figure II.2 : Processeur Intel® Core™ i7 technologie 14 nm.

II.4.1. Plus petit = plus performant :

La technologie 14 nm d'Intel améliore les dimensions par rapport au 22 nm. Les ailettes des transistors sont plus hautes, plus fines et plus rapprochées pour augmenter la densité et diminuer la consommation. Enfin, les transistors améliorés nécessitent moins d'ailettes, et la taille des cellules SRAM est presque réduite de moitié par rapport à la technologie 22 nm.

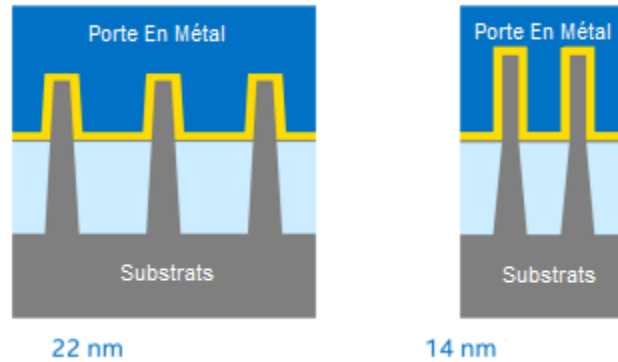


Figure II.3 : comparatif 14 nm contre 22 nm

II.4.2. Fabrication en 14 nm :

Le procédé de fabrication en 14 nm et le système mono puce (Soc) d'Intel sont maintenant qualifiés et produits en série dans nos usines en Oregon (2014), Arizona (2014) et Irlande (2015) [28].

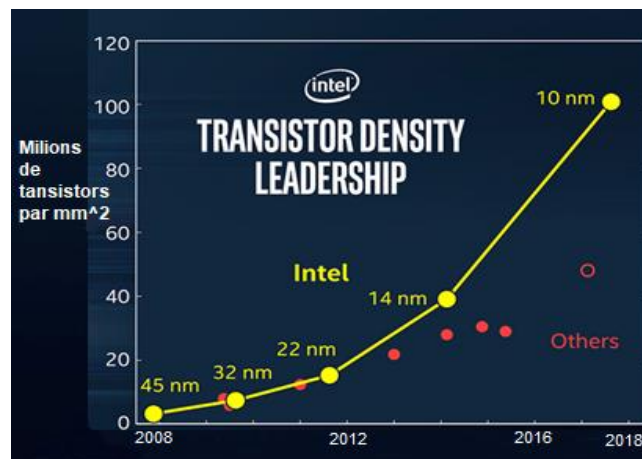


Figure II.4 : ces mesures quantifient la densité par rapport à la génération précédente.

CHAPITRE III :

Méthode des volumes finis

Il existe à l'heure actuelle trois grands types de discrétisations des équations aux dérivées partielles (E.D.P) : les différences finies, les volumes finis et les éléments finis.

I. Les volumes finis :

Dans cette méthode, on intègre des équations de conservation que l'on applique sur chaque volume de contrôle élémentaire. A partir des variables connues aux centres des volumes, on évalue les flux aux surfaces des volumes par interpolation. La grille est a priori quelconque, permettant ainsi de traiter des écoulements à géométrie complexe. Cette méthode donne de très bon résultat, car elle garantit la conservation des bilans massique et thermique sur tout le domaine étudié.

II. Maillage :

Les équations différentielles ponctuelles qui gouvernent notre phénomène sont écrites dans chaque point du domaine physique. Pour les projeter sur ce domaine nous construisons une grille divisée en un certain nombre de volumes finis, et en chaque volume, on considère des points situés en son milieu. Les faces d'un volume de contrôle typique sont localisées aux points e , w , n , s (Fig 3.1). Notons P le centre du volume de contrôle considéré et E , W , N , S sont les centres des volumes de contrôles adjacents situés respectivement à l'Est, l'Ouest, le Nord et le Sud de celui contenant P . Les quantités scalaires (pression et température) sont stockées aux centres des volumes finis (Figure III.1). Par contre, les quantités vectorielles (composantes u et v) sont stockées respectivement aux faces Est et Nord (Figure III.2) et (Figure III.3) Pour éviter certains problèmes numériques, les équations de quantité de mouvement sont résolues dans des volumes finis décalées vers la droite pour l'impulsion suivant X et vers le haut pour l'impulsion suivant Y .

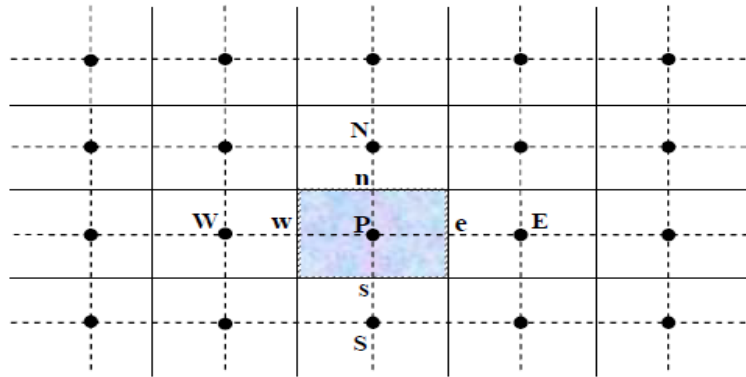


Figure III.1 : Volume de contrôle bidimensionnel.

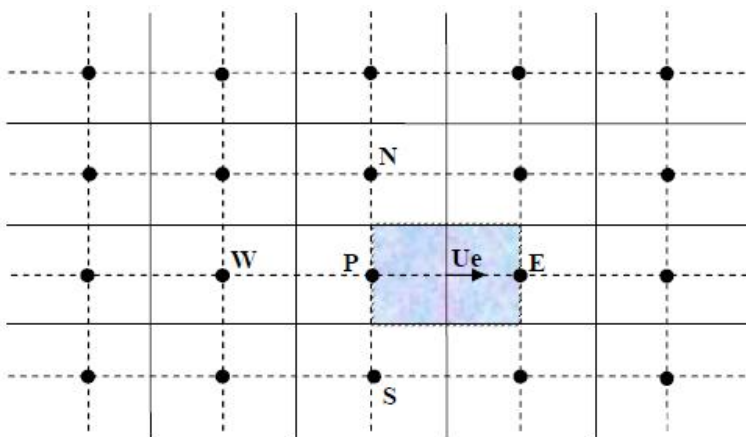


Figure III.2: Volume de contrôle décalé vers la droite.

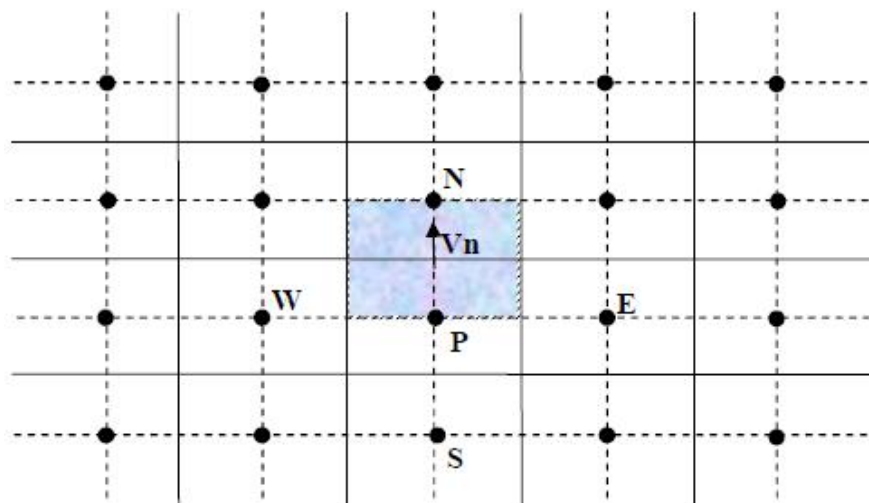


Figure III.3: Volume de contrôle décalé vers le haut.

III. Intégration d'une équation générale de transport :

III.1. Equation général de transport :

Considérons l'équation de transport de la variable ϕ :

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S_\phi \quad (\text{III.1})$$

(j : indice de somme ; j=1, 2 dans le cas bidimensionnel)

$\frac{\partial \phi}{\partial x}$: le terme transitoire.

$\frac{\partial}{\partial x_j} (U_j \phi)$: le transport par convection de ϕ .

$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right)$: le transport par diffusion de ϕ .

S_ϕ : le terme source.

Pour notre problème nous donnons la définition de ϕ , Γ et S_ϕ dans le tableau suivant :

Table III.1 : Définition de ϕ , Γ et S_ϕ des équations gouvernantes

Equation	ϕ	G	S_ϕ
Continuité	1	0	0
Quantité de mouvement suivant X	U	V^*	$-\frac{\partial P}{\partial X}$
Quantité de mouvement suivant Y	V	V^*	$-\frac{\partial P}{\partial Y} + RaPr\theta$
Energie	θ	K^*	$K^* = \frac{K_s}{K_{air}}$ Dans les sources 0 d'ailleurs

IV. Les Schémas numériques :

Nous allons présenter une forme générale de l'équation algébrique discrétisée où le flux total de convection et diffusion est calculé par une fonction $A(|P|)$ [29] :

$$A_P \phi_P^{n+1} = A_E \phi_E^{n+1} + A_W \phi_W^{n+1} + A_N \phi_N^{n+1} + A_S \phi_S^{n+1} + b \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$$A_E = D_e A (|P_e|) + \max(-F_e, 0)$$

$$A_W = D_w A (|P_w|) + \max(-F_w, 0)$$

$$A_N = D_n A (|P_n|) + \max(-F_n, 0)$$

$$A_S = D_s A (|P_s|) + \max(-F_s, 0)$$

$$b = (\bar{S}_\phi + \frac{\phi^n}{\Delta\tau}) \Delta X \Delta Y$$

Tableau III.2 : Propriétés physiques D'aluminium.

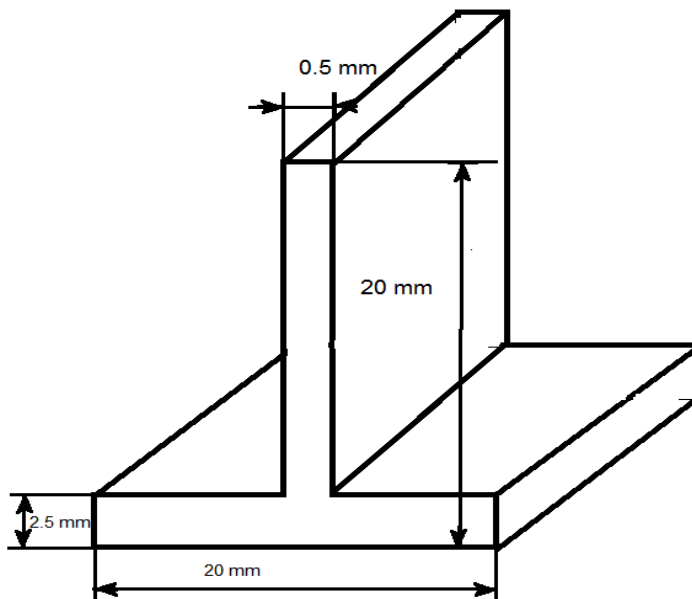
Densité [kg / m ³]	Cp [j / kg.k]	Conductivité thermique [w/m.k]
2700	871	200

Tableau III.3 : Propriétés thermophysiques de L'air

ρ [Kg / m ³]	L [m]	μ [Kg/m.s]	λ_f [w / m.k]	Pr
1.1614	0.035	0.00001846	0.0263	0.707

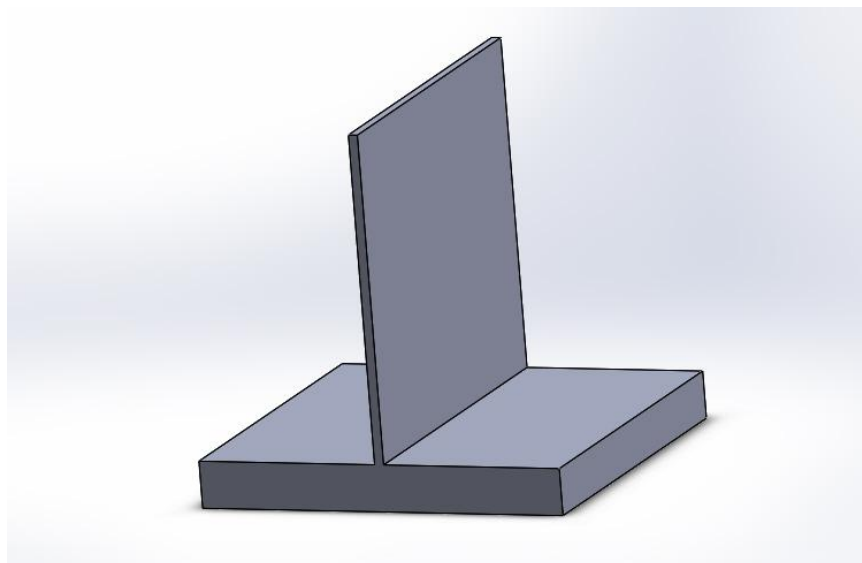
Tableau III.4 : données utilise don les simulations numériques

ω [tr/min]	ω [rad/s]	r [m]	V [m/s]	Re	Nu	h
2500	261.7992	0.0300	7.8540	17294.487	77.7215	58.4022
3000	314.1590	0.0300	9.4248	20753.384	85.1397	63.9764
3500	366.5188	0.0300	10.9956	24212.281	91.9614	69.1024
4000	418.8787	0.0300	12.5664	27671.179	98.3108	73.8736
4500	471.2385	0.0300	14.1372	31130.076	104.2744	78.3547
5000	523.5983	0.0300	15.7080	34588.974	109.9148	82.5931

V. Validation :**Figure III.4 :** Dimensions du radiateur modèle.

$\Phi = 1000 \text{ W/m}^2$. De plus un processeur a généralement des ailettes de longueurs 20mm.

Après résolution du problème thermique par le logiciel ANSYS voici le profil de température dans l'ailette.

**Figure III.5 :** d'une ailette du CPU modèle 3D. SOLIDWORKS

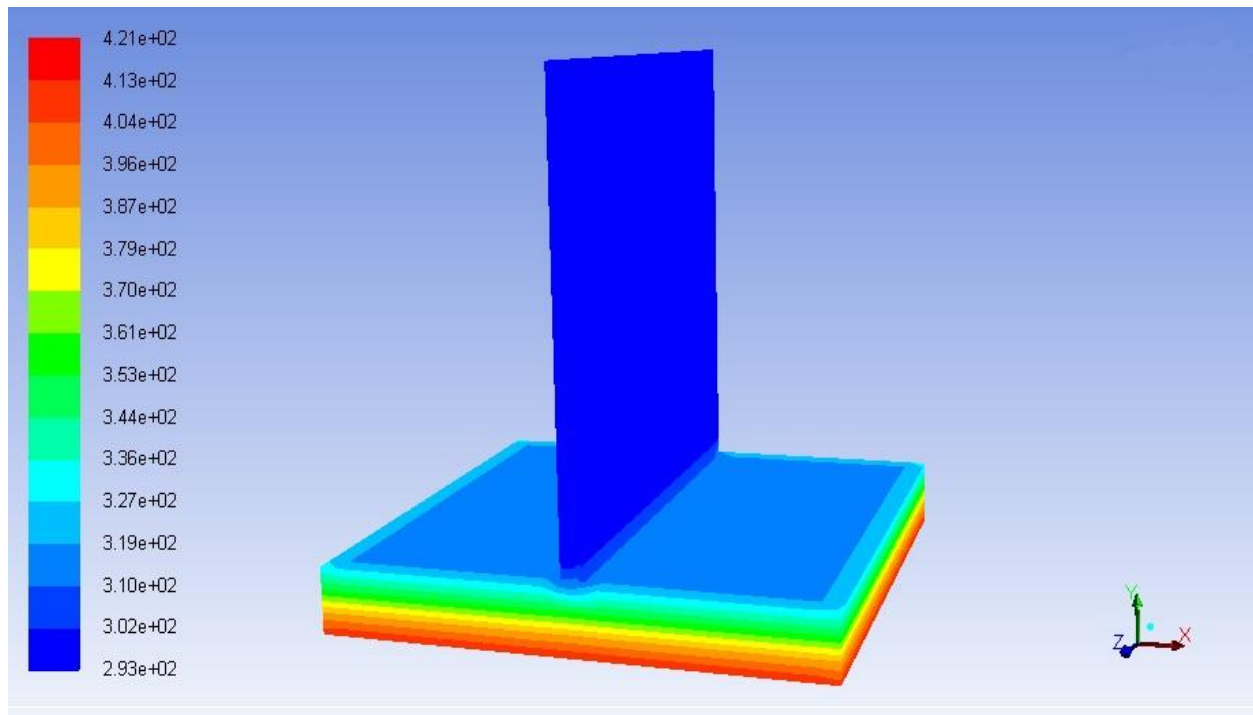


Figure III.6 : distribution de température dans un dissipateur à une ailette

(La figure III.6).montre la distribution de la température sur les différentes facettes de l'ailette. La couleur rouge représente la température la plus élevée et celle bleue représente la température la plus basse. De la figure il est clair que celle maximale se trouve à la base la paroi de l'ailette, où se trouve une source de chaleur générée par le microprocesseur et elle baisse graduellement le long de la direction de l'ailette.

On a obtenu après validation par rapport à un travail antérieur les différentes températures pour le processeur représentées sur le graphique suivant :

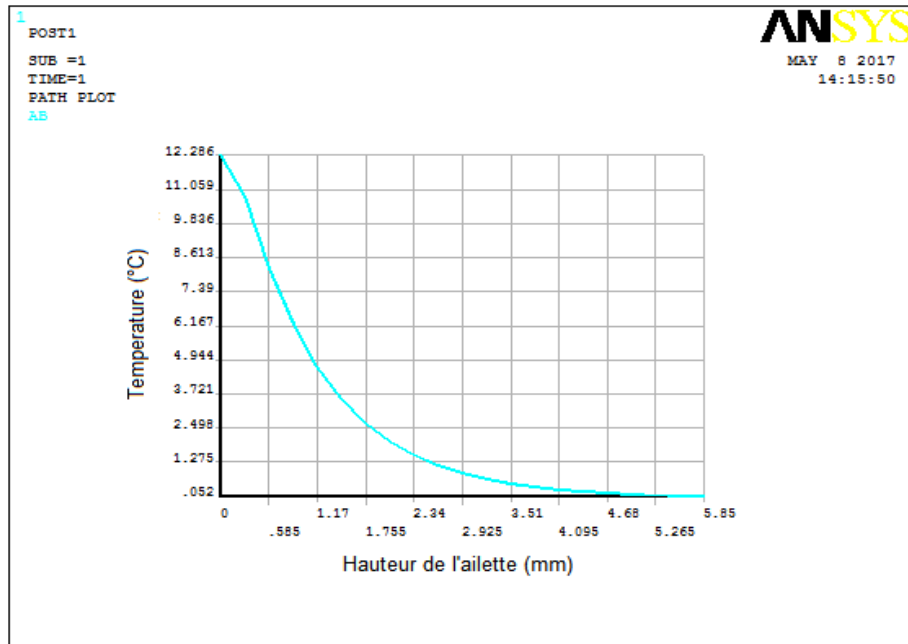


Figure III.7 : Température en fonction de la longueur de l'ailette. [30]

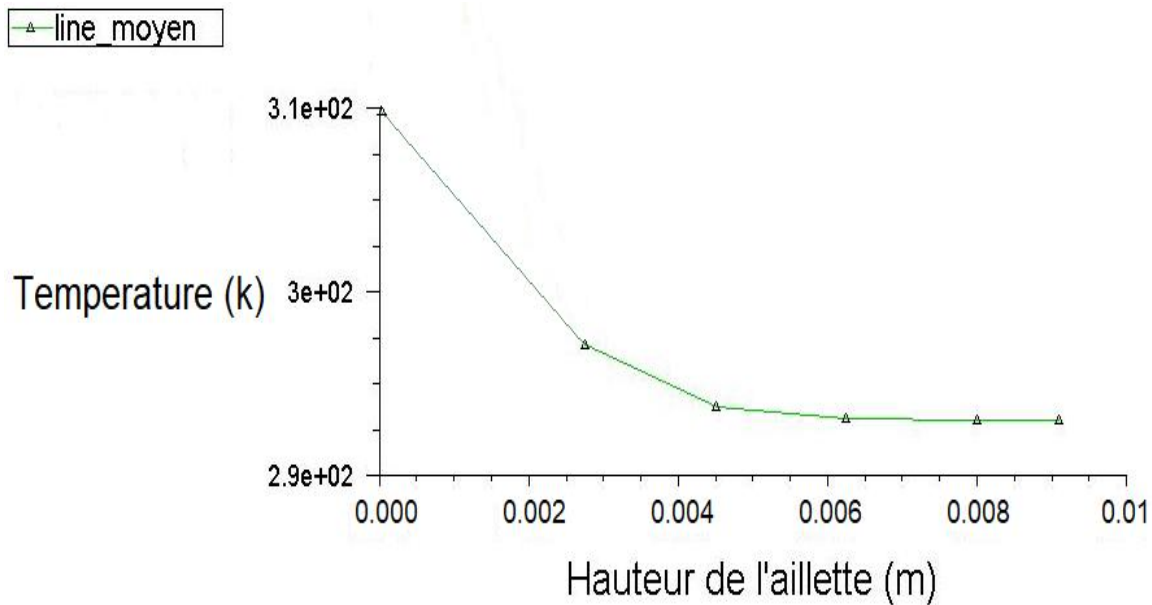


Figure III.8 : Température en fonction de la hauteur de l'ailette.

La validation de nos calculs par rapport aux autres études nous donne les courbes précédentes nous montrent un bon accord entre eux ce qui nous concède d'utiliser le code CFD pour effectuer les calculs de refroidissement des composants électroniques sujet de notre étude.

VI. Déroulement des calculs en CFD FLUENT :

ANSYS Fluent ® est un code de calcul dans le domaine de la CFD 'Dynamique des fluides numérique » qui modélise par la méthode des volumes finis des écoulements très variés dans des configurations plus ou moins complexes.

Ce solveur de la part de ANSYS® offre toutes les capacités computationnelles et mathématiques nécessaires pour la modélisation des écoulements fluides, de la turbulence, des transferts de chaleur, des réactions chimiques et des équations différentielles de la physique mathématique. Le logiciel est utilisé pour des applications industrielles allant de l'écoulement d'air autour d'une aile d'avion, à la combustion à l'intérieur d'un four ; de la conception de salles de sport aux phénomènes de la météorologie. Où des modèles spécifiques sont proposés pour modéliser les phénomènes de transfert de chaleur, d'aéroacoustique ainsi que les turbomachines et les systèmes multiphasiques, ce qui élargit encore son champ d'application.

Ce qui nous a amené à choisir FLUENT comme solveur pour la problématique traitée c'est d'une part, le fait de l'avoir utilisée auparavant pour d'autres projets que nous a déjà réalisé. Le mailler associé à FLUENT et qui a été utilisé pour ce travail n'est autre qu'ICEMCFD le générateur de maillage associé avec ANSYS FLUENT.

Les différentes étapes entreprises pour modéliser et traiter notre problématique au moyen du CFD FLUENT sont représentées ci-après (voir figures III.9 - III.17).

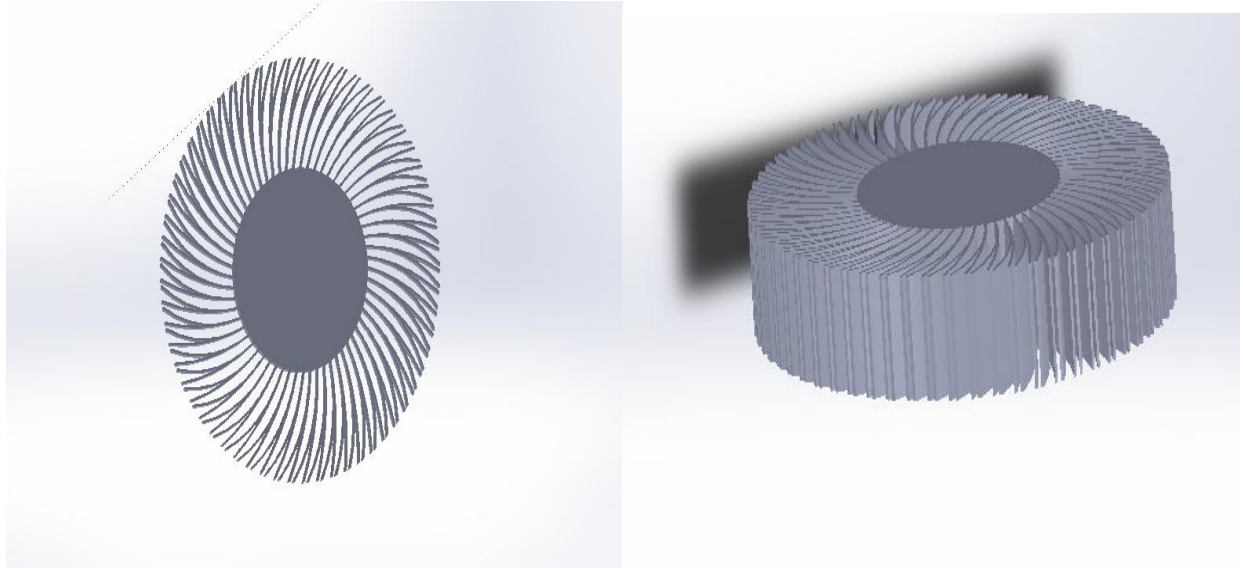


Figure III.9 : Modèle du dissipateur pour microprocesseur Core i7 (3D)

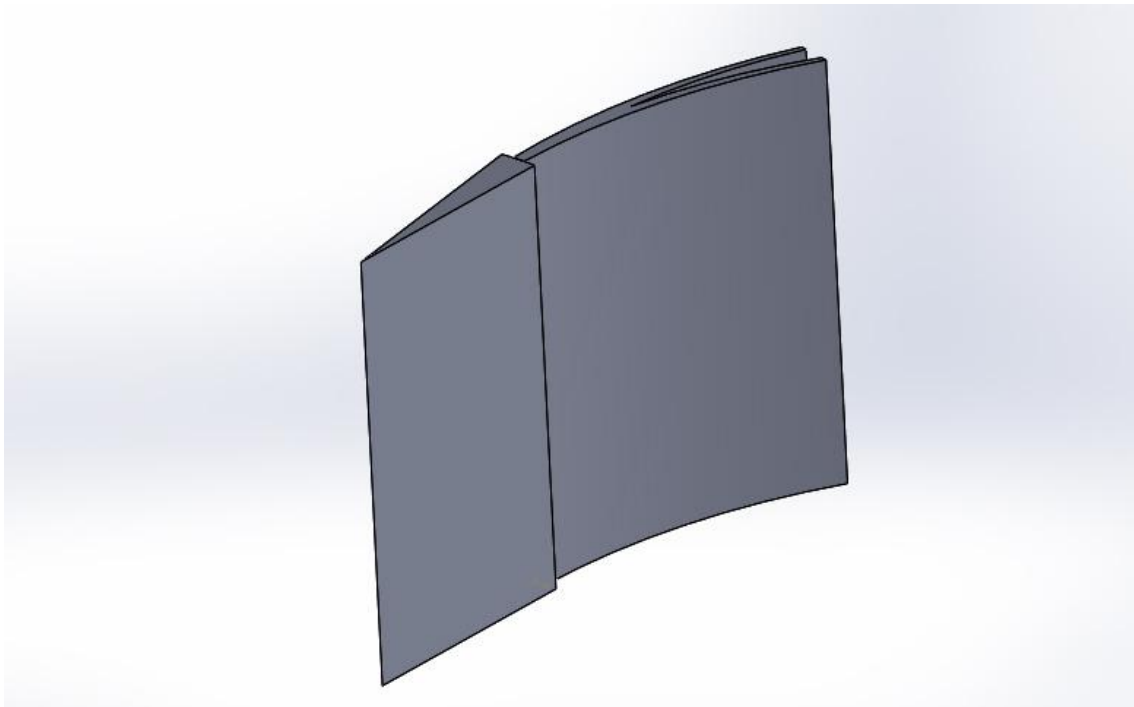


Figure III.10 : Une partie du dissipateur pour microprocesseur Core i7 (3D)

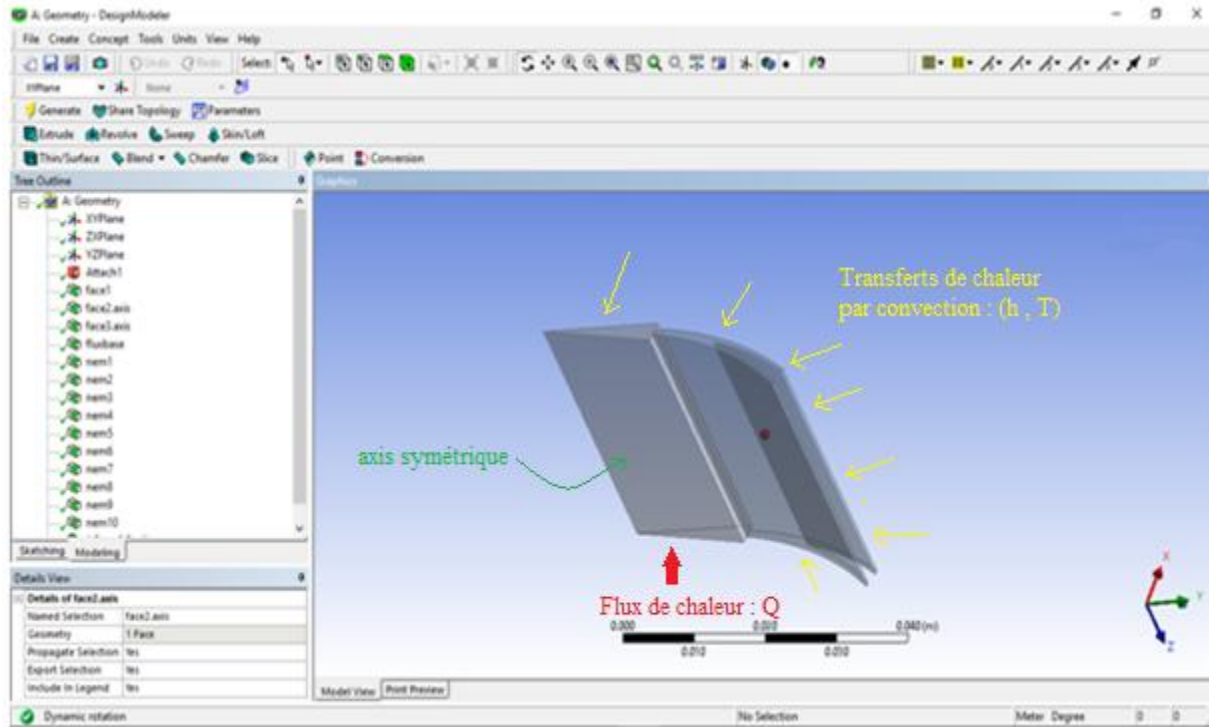


Figure III.11 : Définition de Condition limite sur la géométrie dans ANSYS FLUENT

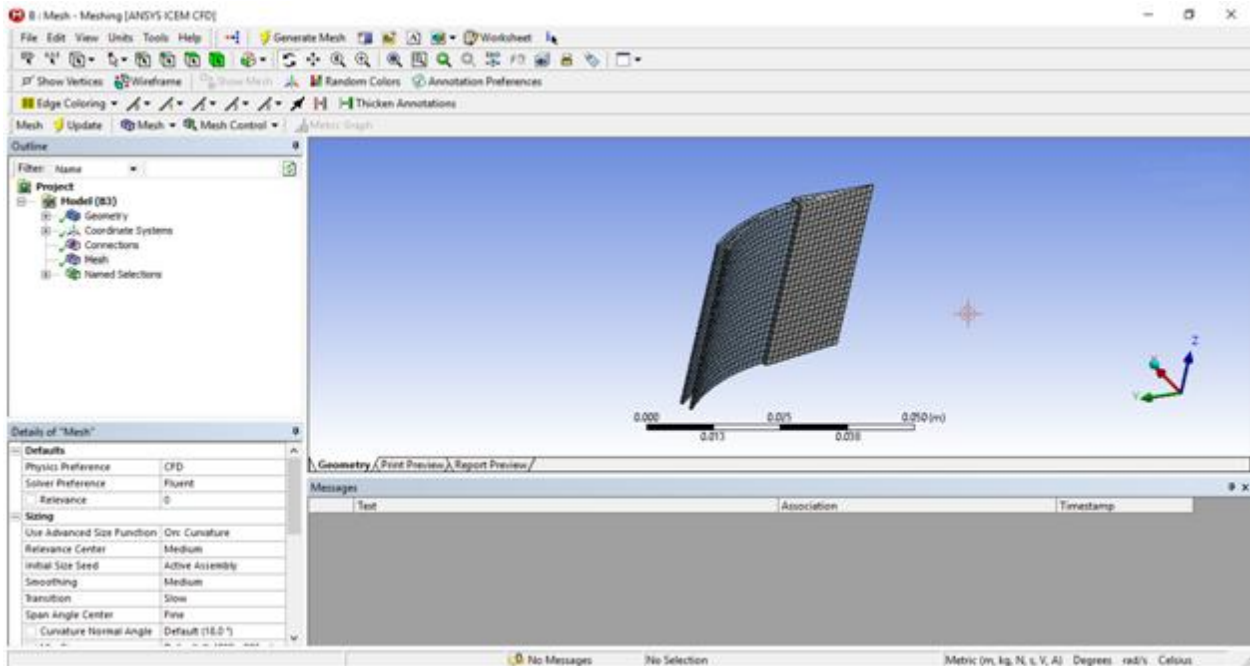


Figure III.12 : Maillage dans ANSYS-CEM CFD

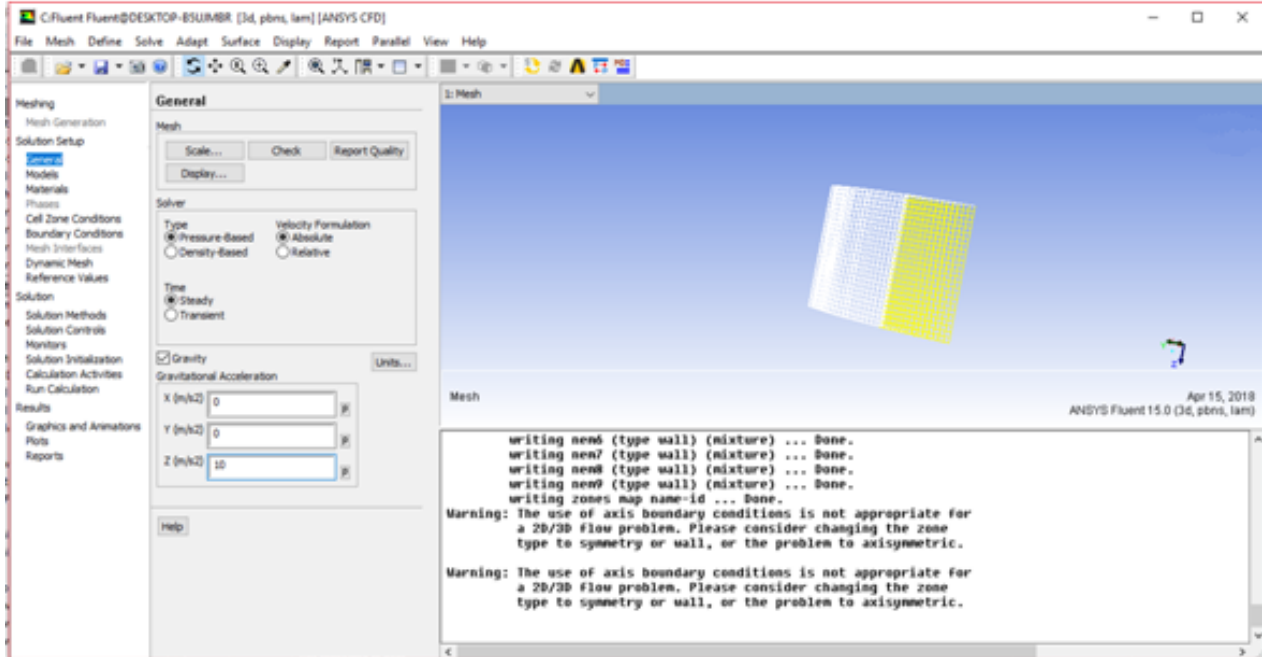


Figure III.13 : Importation de maillage dans FLUENT

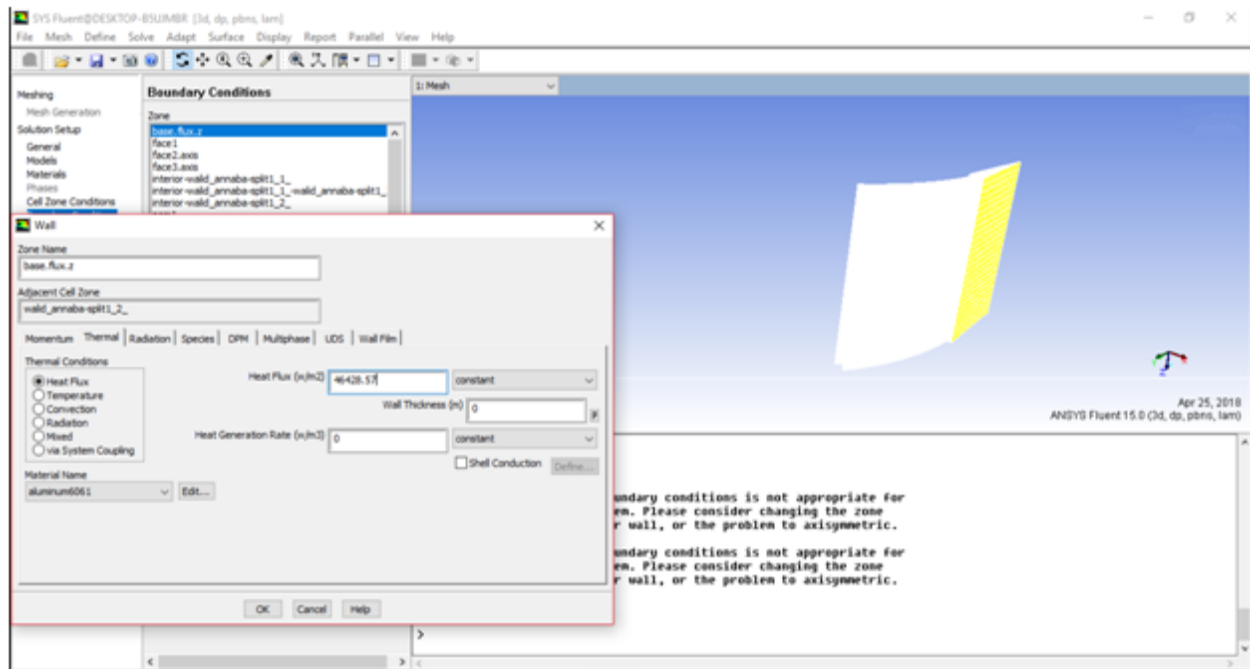


Figure III.14 : Déclaration condition limite (type Flux de chaleur)

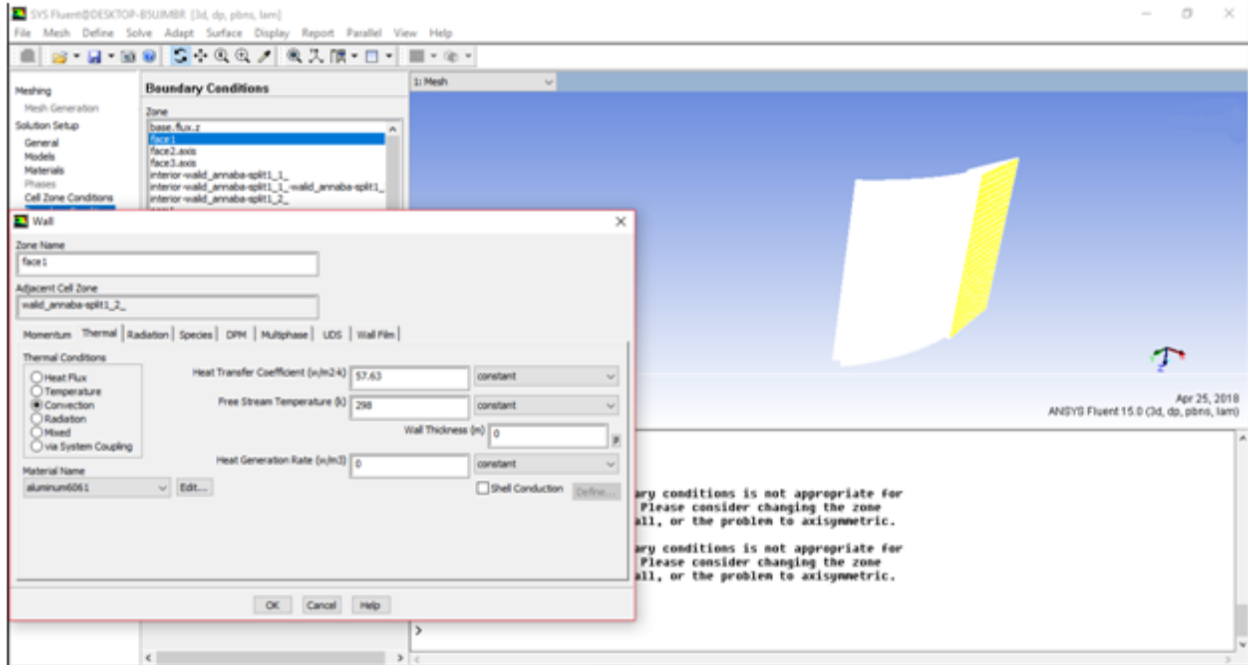


Figure III.15 : Déclaration condition limite (type convection)

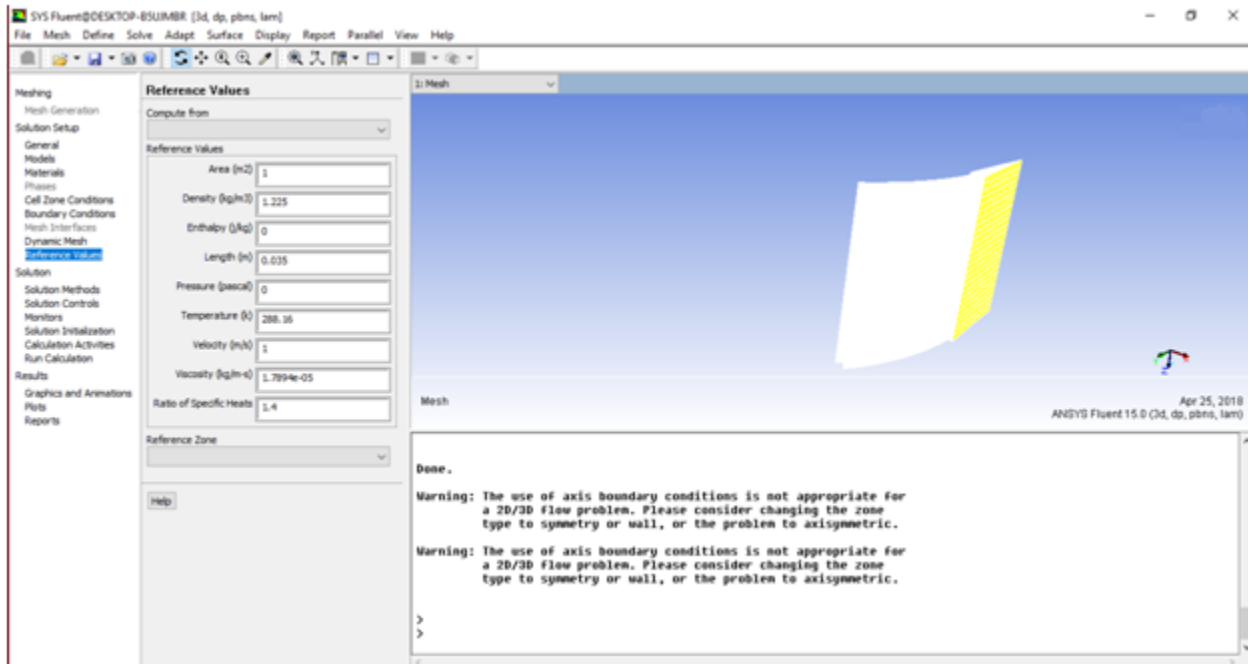


Figure III.16 : Définition de valeur de référence

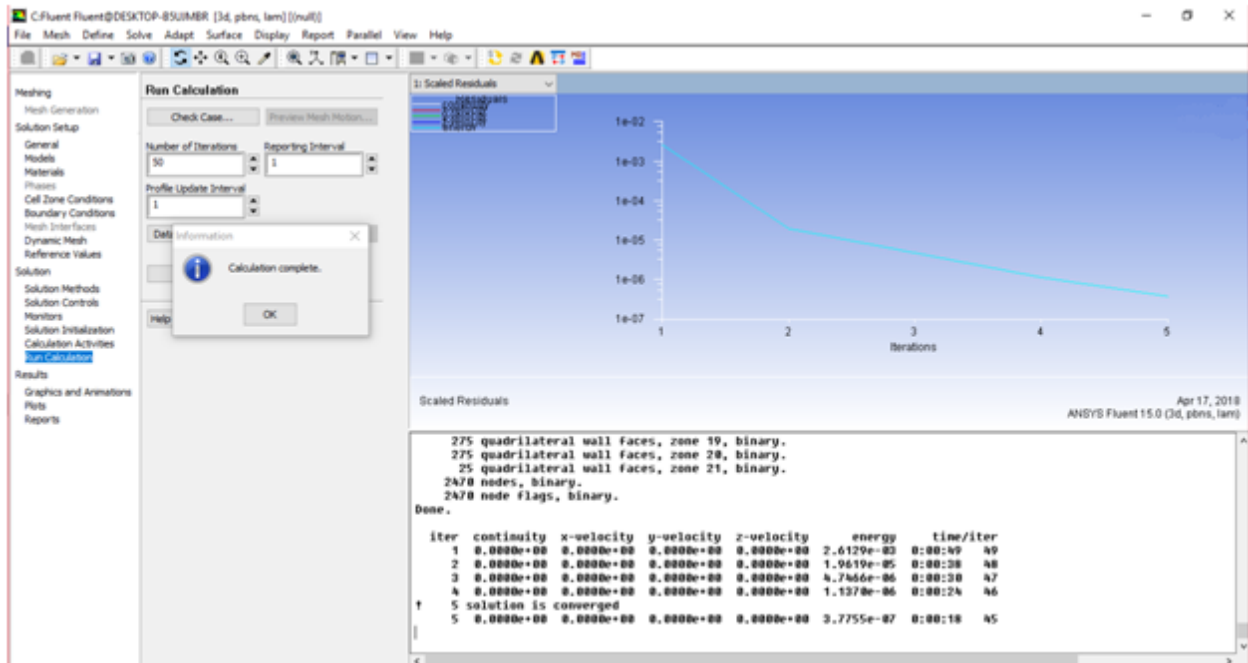


Figure III.17 : FLUENT en Action

CHAPITRE IV :

Résultats et discussions

I. Résultats thermiques Dissipateur à ailettes :

I.1. 1^{er} Cas d'étude : dissipateur pour microprocesseur Intel Core i7 (7^{ème} génération) :

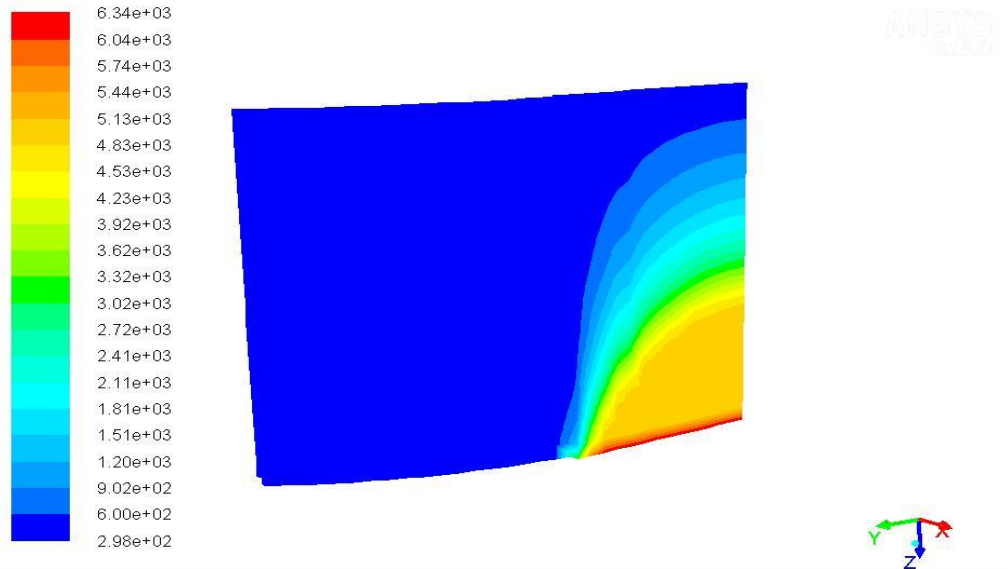


Figure IV.1 : Contours de la température statique (pour $T = 293 \text{ K}$, $h = 58.63 \text{ W/m}^2\text{K}$)

La figure IV.1 représente le contour de la température statique en degré Kelvin d'une portion du dissipateur thermique à ailettes, on remarque que la température proche du microprocesseur est de couleur rouge, c'est la température la plus élevée. Dès qu'on s'éloigne du microprocesseur la température statique du dissipateur à ailettes commence à décroître graduellement, et cela est dû à l'action du refroidissement à l'air.

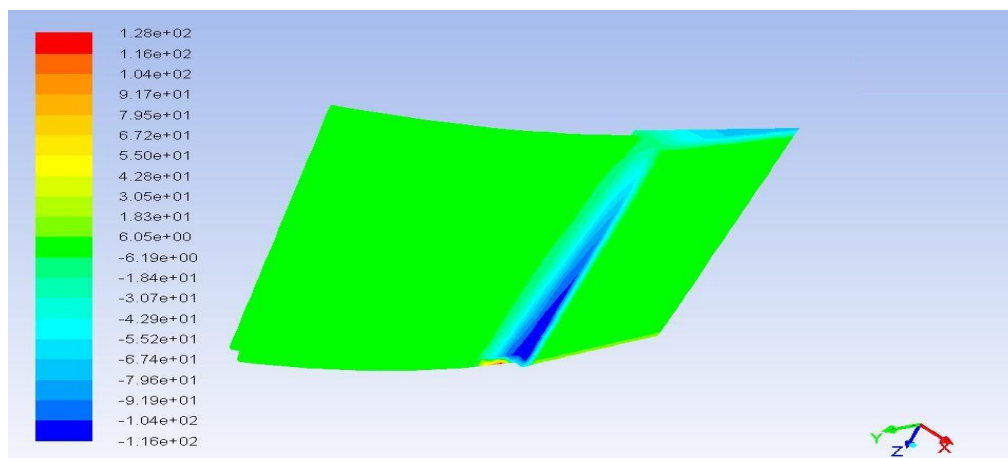


Figure IV.2 : Iso-valeurs du Nombre de Nusselt pour les cas $T = 293 \text{ K}$, $h = 81.43 \text{ W/m}^2\text{K}$

Sur la figure IV.2 on représente le contour de surface du nombre de Nusselt correspondant au cas $T=293\text{ K}$ et $h=81,43\text{ W/m}^2\text{K}$. On remarque que la zone du dissipateur à ailette ayant le plus faible nombre de Nusselt est la zone la plus contiguë au flux d'air, d'ailleurs règnent d'autres valeurs modérées du Nusselt, c.à.d. que la conduction prédomine la convection dans ces zone.

Cependant, sur les figures (IV.3-4.4a et b) lorsque nous considérons un coefficient de convection $h=60\text{ W/m}^2\text{K}$ et une température de l'air environnant $T=288\text{ K}$, on remarque que la surface ayant le nombre de Nusselt maximal est celle près du microprocesseur. Les autres parois montrent des échanges convectifs plus ou moins importants.

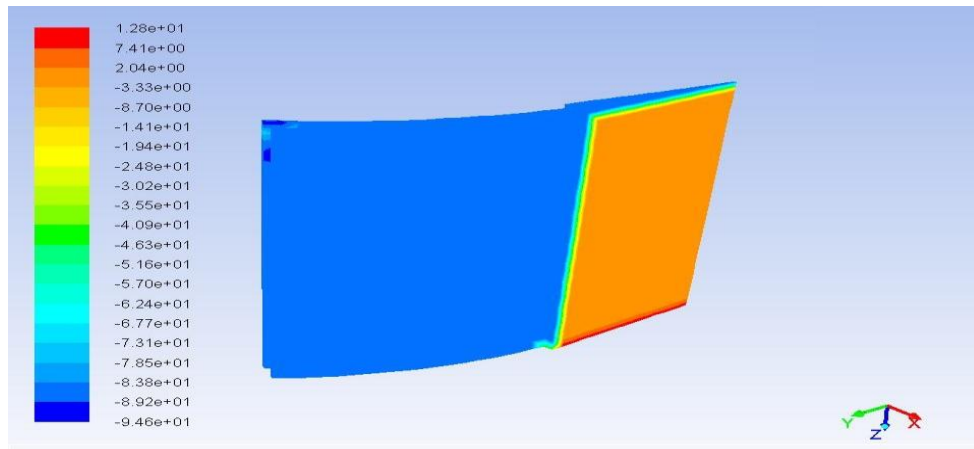


Figure IV.3 : Contours du Nombre de Nusselt calculés pour $h = 60\text{ W/m}^2\text{K}$, $T = 288\text{ K}$

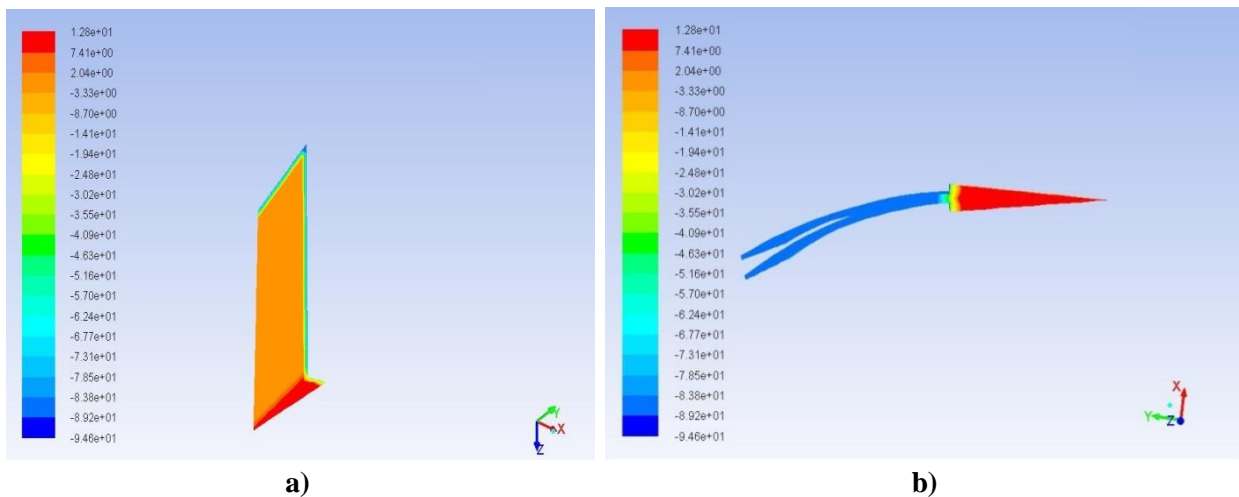


Figure IV.4 : Répartition des valeurs du Nombre de Nusselt à autres angle de vue ($h = 60\text{ W/m}^2\text{K}$, $T = 288\text{ K}$).

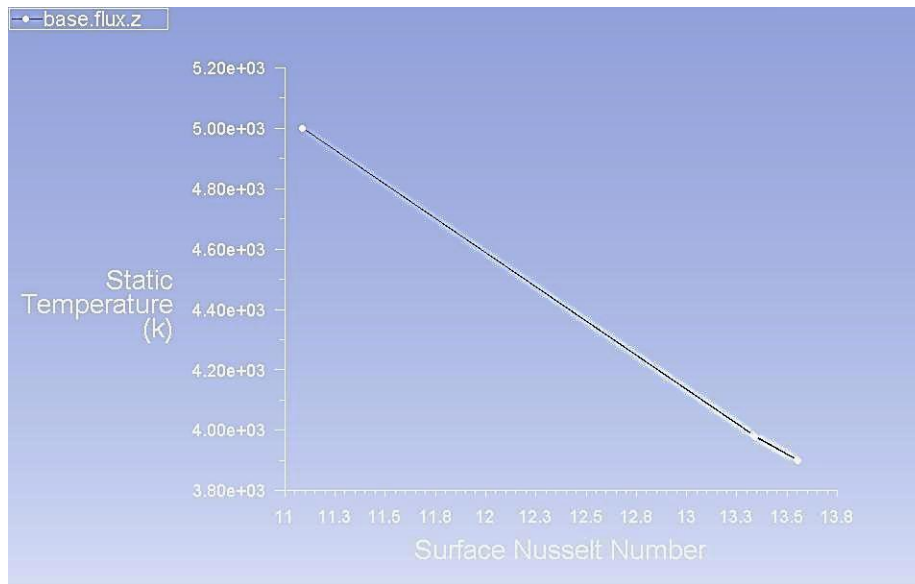


Figure IV.5 : Dépendance de la température en fonction Nombre de Nusselt ($h = 60$, $T = 318$ K)

La figure IV.5 montre la relation de la température on fonction de nombre de Nusselt avec des conditions $h = 60$ W/m²K, $T = 318$ K. On remarque que dès que la température est une fonction décroissante du nombre de Nusselt, ce qui est tout a fait logique puisque ce dernier représente l'intensité des échanges thermiques par convection forcée de l'air.

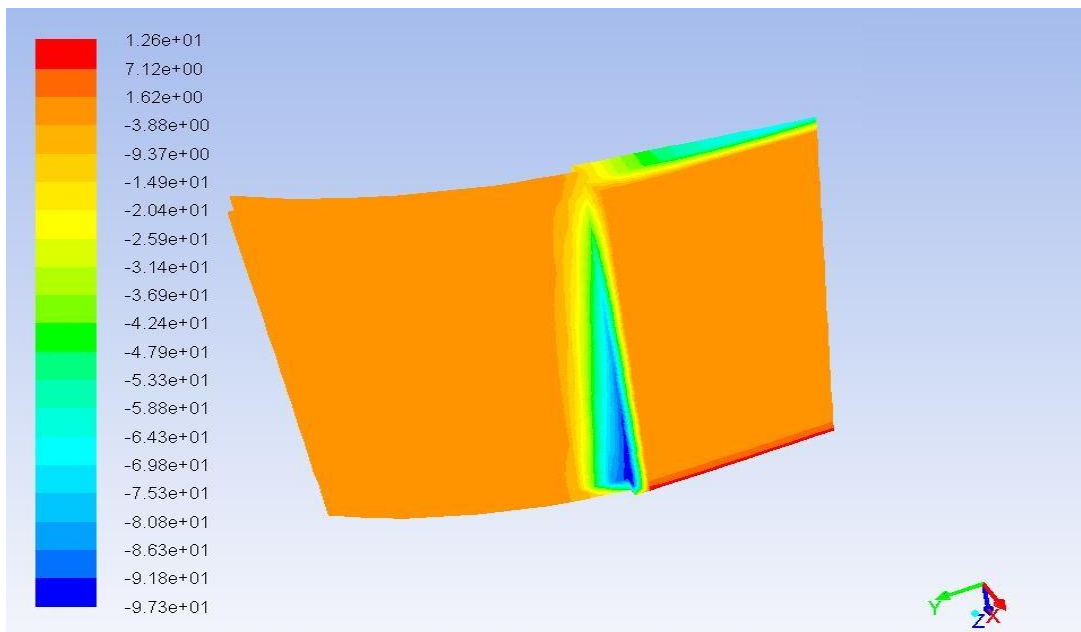


Figure IV.6 : Projection des valeurs du Nombre de Nusselt aux régions latérales colorées par magnitude pour le cas $h = 60$ W/m²K, $T = 318$ K.

I.1. 2^{ème} Cas d'étude : dissipateur pour microprocesseur Intel Core i7 (5^{ème} génération):

Même pour le cas du dissipateur thermique à ailettes monté à un microprocesseur du type Intel Core i7 de la famille Broadwell où exactement de la cinquième génération avec un dopage en transistors de 14 nm dégageant une puissance thermique de 47 W. La figure IV.7 nous montre les régions aux différentes intensités d'échanges convectifs, clairement celles à faible nombre de Nusselt se situent aux régions entre ailettes, indiquant que la conduction est dominante.

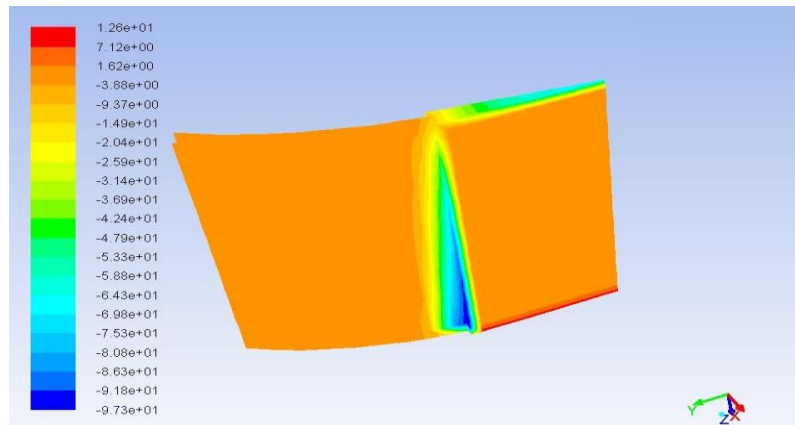


Figure IV.7 : Répartition surfacique (en contours) du Nombre de Nusselt ($T = 298 \text{ k}$, $h = 68.117 \text{ W/m}^2\text{K}$)

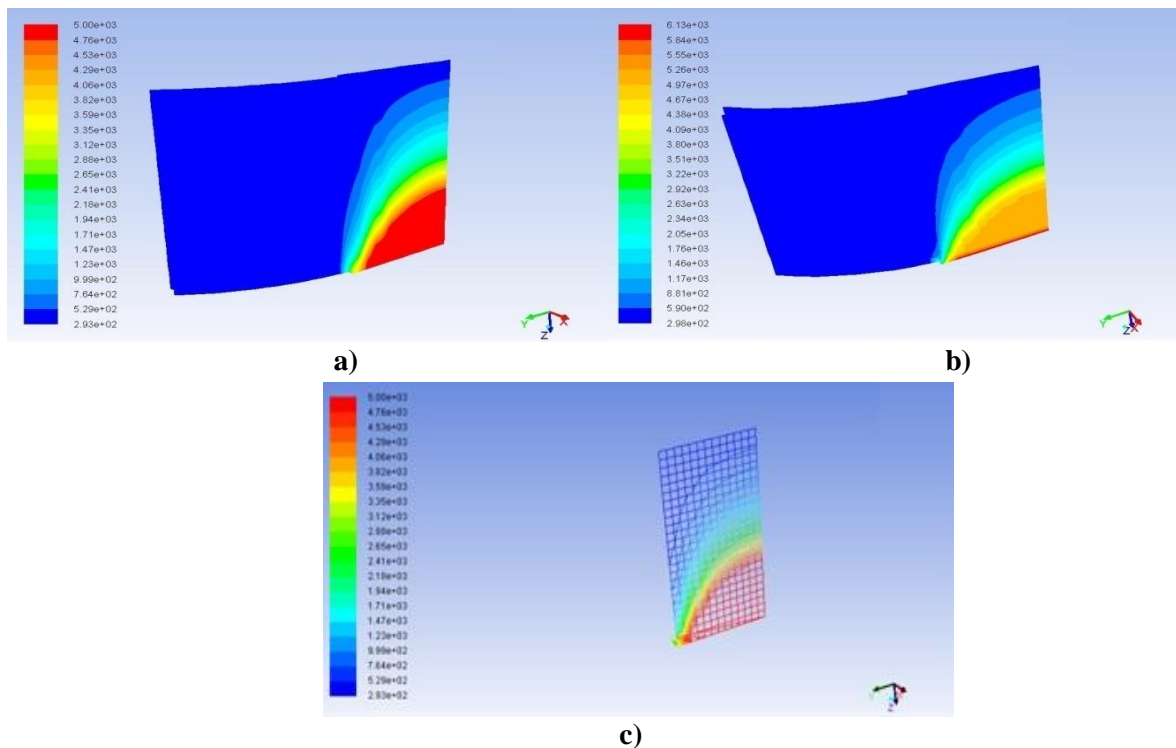


Figure IV.8 : Iso-valeurs de a) Température totale, b) Température statique, et c) Température de la base du dissipateur.

Les résultats représentés sur la figure IV.8 sont aussi confirmés par les résultats montrés par la figure IV.9, où le transfert de chaleur dans le solide commence par la base ayant le plein contact avec le microprocesseur, et la chaleur sera conduite par diffusion au travers le corps solide (ce dissipateur) vers les ailettes extrayant ce flux pour le céder à l'air environnant. Dissipant ainsi le flux de chaleur généré par ce chip électronique. Le coefficient du transfert par convection $h=60 \text{ W/m}^2\text{K}$ est calculé en fonction de la vitesse angulaire (de rotation) du ventilateur qui cause la convection forcée de l'air.

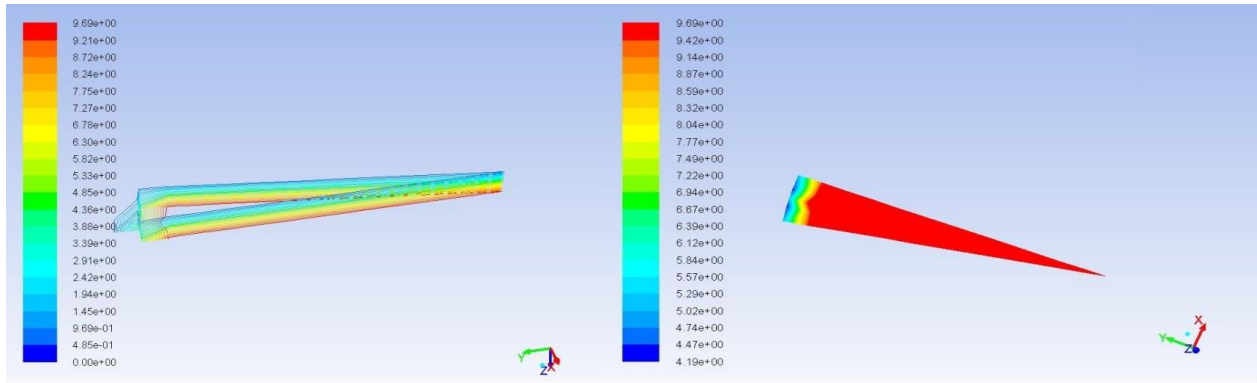


Figure IV.9 : Contours des valeurs du Nombre de Nusselt à la base de dissipateur ($h = 60 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T = 308 \text{ K}$)

L'évolution graduelle (mais stationnaire) du champ de température statique dans le solide constituant le dissipateur de géométrie circulaire à ailettes courbes, est clairement visible dans la figure IV. 10 pour le cas d'un coefficient d'échange de $h=60 \text{ W/m}^2\text{K}$ et une température de l'air ambiant de 308 K.

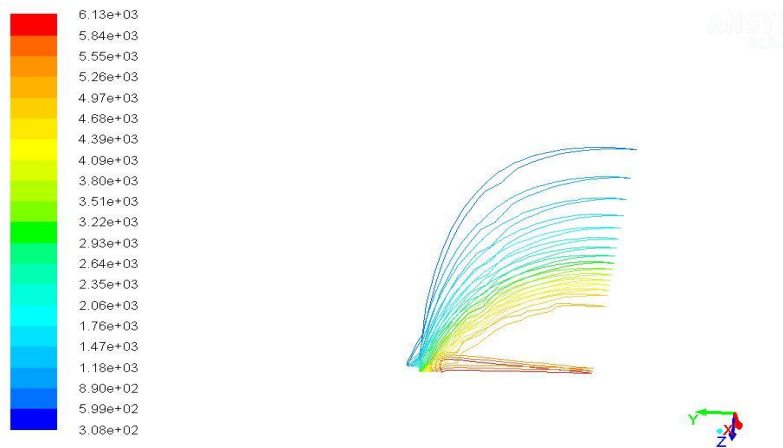
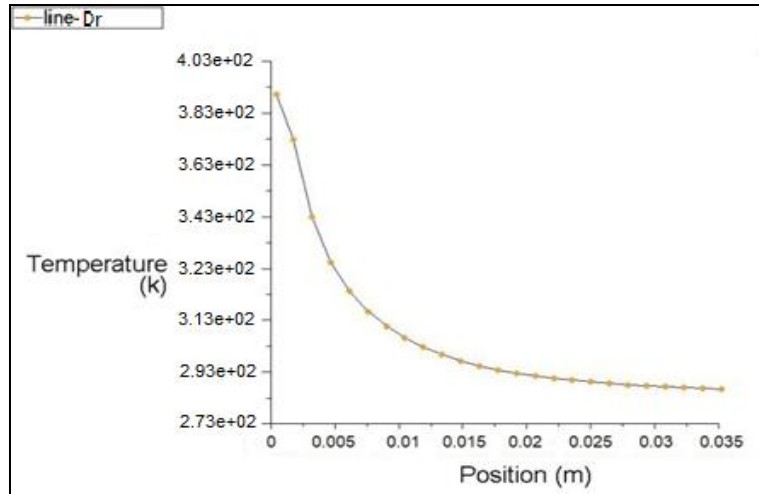
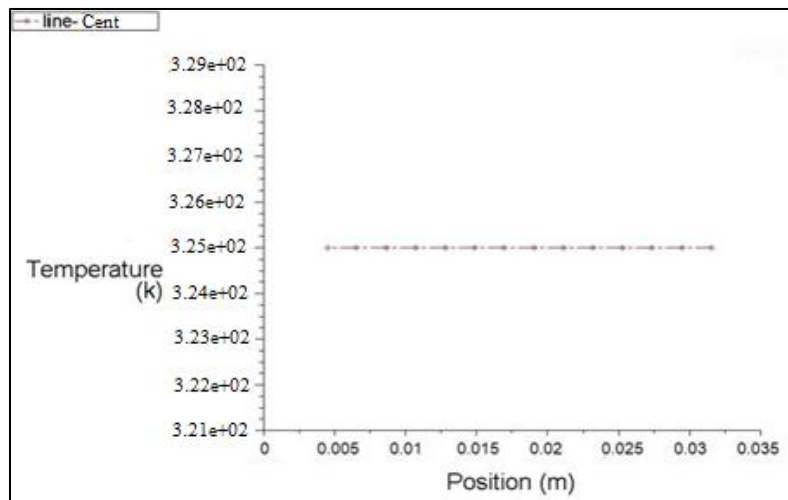


Figure IV.10 : Contours de la température statique pour le cas ; $h = 60 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T = 308 \text{ K}$



a)

Cette courbe représente l'échelle de température (en kelvin) fonction des différentes positions (en mètre) d'un dissipateur à ailette, On remarque que la température à proximité du microprocesseur est maximal à cause de flux de chaleur dégagé du microprocesseur et que si on s'éloigne du microprocesseur la température diminue progressivement.



b)

Figure IV.11 : Profils de la température pour le cas ; $h = 60 \text{ W/m}^2\text{K}$, $T = 308 \text{ K}$

Cette courbe représente les valeurs de température (en kelvin) du solide fonction des différentes positions (en mètre) le long

D'une ligne centrale (des coordonnées $(x_0, y_0) = (0.10114, 0.0012)$ et $(x_1, y_1) = (0.10114, 0.04)$) du dissipateur à ailette étudié, On remarque que la température sort constant parce que la position de monitoring de cette ligne est proche de la surface exposée à l'air ambiant.

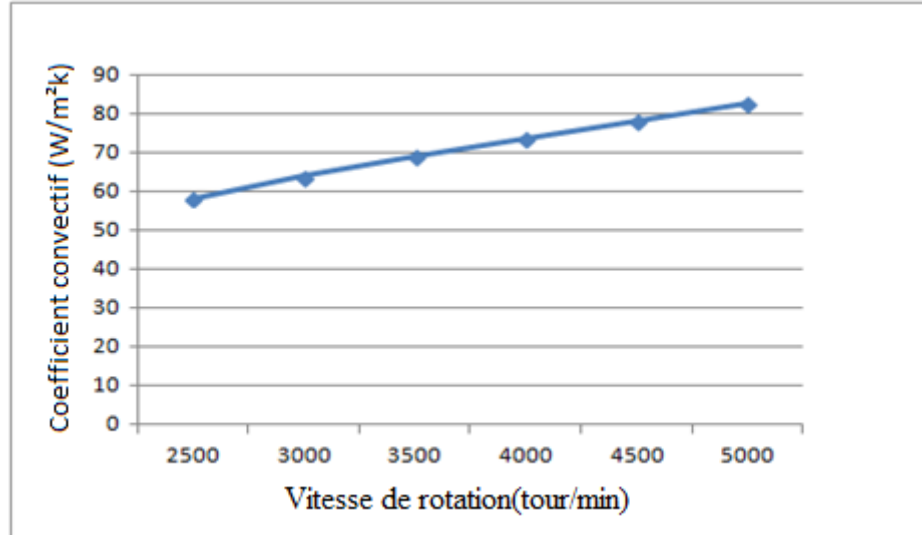


Figure IV.12 : corrélation entre coefficient de transfert de chaleur convection et la vitesse de rotation

La courbe de la figure IV.12 montre une augmentation du coefficient convectif en termes de vitesse angulaire. Nous notons qu'avec l'augmentation de la vitesse rotation l'hélice de refroidissement augmente le coefficient, selon la relation :

$$Nu = 0.664Re^{0.5}Pr^{0.33} = \frac{hL}{\lambda_f} \quad (IV.1)$$

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (IV.2)$$

$$h = \frac{\lambda_f 0.664Re^{0.5}Pr^{0.33}}{L} = \frac{\lambda_f 0.664 \left(\frac{\rho(\omega r)L}{\mu}\right)^{0.5} Pr^{0.33}}{L} \quad (IV.3)$$

Regardez les tableaux (III.3, III. 4)

Donc :

$$h = 3.60948 \omega^{0.5} \quad (IV.4)$$

Où :

ω = Vitesse angulaire [tr/min]

r = Rayon du ventilateur [m]

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Les résultats d'une analyse numérique des performances d'un dispositif de refroidissement pour CPU de nouvelle microarchitecture (c.-à-d. un dissipateur à ailettes) surmonté par une hélice en rotation permanente ont fait l'objet de l'aboutissement du présent mémoire.

L'étude sous-jacente adopte un modèle mathématique global pour le phénomène physique traité numériquement par la méthode des volumes finis. Le même modèle est simplifié et traité.

Les performances thermiques en régime permanent calculées par le code CFD employé montrent bien que ce chip électronique délivrant entre 47 à 65W est convenablement refroidie par le dispositif étudié comme c'est indiqué par le concepteur. Cela reflète d'un autre côté, la performance du nouveau design du dissipateur à ailettes. En conclusion, une amélioration globale de la résistance thermique du radiateur peut avoir lieu en augmentant la vitesse du refroidissement.

En outre on peut conclure que la simplification adoptée pour ce modèle thermique accélère les calculs numériques, en aboutissant aux résultats divers dans des brefs temps.

L'analyse globale des résultats du point de vue performances thermiques nous montre qu'elles peuvent être améliorées, si l'on fait abaisser la résistance à l'écoulement au niveau de la zone de stagnation c.à.d. la région entre ailettes adjacentes où l'écoulement de l'air refroidissant est stagnant, ce qui affecte considérablement le transfert de chaleur. Toutefois, il faut signaler par ailleurs l'effet significatif de la forme des ailettes sur l'amélioration des échanges thermiques dans la configuration étudiée. Une étude d'optimisation est requise sur l'effet des différents paramètres sur les performances des ailettes.

La validation des résultats de cette étude nous donne une grande satisfaction comparée à ceux dans des études antérieures. Enfin, et en perspective pour de travaux futurs, on suggère d'analyser d'autres paramètres adimensionnels, tels que le nombre de Grashoff et le nombre de Richardson, d'étendre l'étude au régime variable, ainsi qu'étudier l'effet de la turbulence sur l'amélioration des échanges par convection dans le dissipateur, et d'élaborer des expériences délicates pour développer davantage la présente étude, ainsi, fournir des informations pratiques pour l'améliorer et l'enrichir.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. **LUCQUIN B, PIRONNEAU O**, «Introduction au Calcul Scientifique», Masson 1997, «Introduction to Scientific Computing for Engineers», Wiley, (Traduit du français) 1998.
- [2]. **MOUMENI A**, «Analyse thermique des ailettes : détermination des profils de températures et des rendements de quelques formes géométriques», Univ. Kasdi Merbah-Ouargla, 2013.
- [3]. **NAIMA T, HADJILA T**, « Dimensionnement d'une unité de récupération de GPL à partir de gaz associé », thèse d'ingénieur, univ. de M'hamed Bougara-Boumerdés, 2008.
- [4]. **BOUBAKER L**, «Optimisation des paramètres de fonctionnement d'une débutaniseur», thèse d'ingénieur, univ. de M'hamed Bougara-Boumerdés, 2006.
- [5]. **LAPLANTE G, Bernier M**, « Convection mixte défavorable et conjuguée dans un tube vertical », J. Heat Mass Transfer, vol. 40, No 15, pp. 3527-3536, 1997.
- [6]. **MARCHIO D, REBOUX P**, Cours d'Introduction aux transferts thermiques, École des mines de Paris, ParisTech, 2008.
- [7]. **AKNOUCHE A, DRAME D, BEDJA W**, Méthode numériques ANSYS, Esiee Parise.
- [8]. **SAIDIA L M**, «Simulation numérique de la convection forcée dans un conduit a rangées de plaques chauffées », Mémoire de Magister, Univ. Hassiba Benbouali–Chlef, 2009.
- [9]. **LIN S-C, CHOU C-A**, “Blockage effect of axial-flow fans applied on heat sink assembly”, Applied Thermal Engineering, 2004.
- [10]. **DONGLYOUL S**, “Thermal Design and Evaluation Methods for Heat Sink”, 2005.
- [11]. **JANNOT Y**, « Transferts thermiques », 2012.
- [12]. **FREDERIC D**, Thermique appliquée, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), Licence de Mécanique L3, Année 2011/2012.
- [13]. **BOUKHARI A**, Essentiel du transfert de chaleur, Cours de 1ère Année Master Energétique et Energies Renouvelables, Univ. d'El-Oued, 2016/2017.
- [14]. **TAWK M, AVENAS Y, LEBouc A, CHARALAMPOUS D, DUBOIS E, CHEVALET J**, "Etude d'un système de refroidissement de composants électroniques de puissance par métal liquide" , Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2Elab) – Grenoble Universités Physicochimie des Electrolytes, 2010.
- [15]. **AMIROUCHE Y, BESSAIIH R**, «Refroidissement par convection naturelle turbulente 3D des composants électroniques montés dans un canal vertical », Applied thermal engineering, vol. 8, pp. 295-309, 2011.

[16]. **MANGESH D S, ASHISH M**, "Cooling of electronic equipments with heat sink: a review of literature", OSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), Vol. 5, Issue 2, pp. 56-61, 2013.

[17]. **ECE A, CANER T, SELIN A**, "Experimental Investigation of Cooling of Electronic Equipment", International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, vol. 1, No. 2, 2013.

[18]. **ABIDI S A, KADJA M, MEBROUK R, REZAIGUIA I**, "Optimisation du transfert de chaleur conjugué dans une cavité par l'utilisation d'insertions solides de différentes tailles et à différentes positions", 21^{ème} Congrès Français de Mécanique Bordeaux, 26-30 août 2013.

[19]. **DOUHA M, BELKACEM A, REBHI M**, "Simulation numérique de l'écoulement et du transfert de chaleur conjugué dans les échangeurs de chaleur compact (géométrie complexe) » 10^{ème} Séminaire International sur la Physique Energétique, Univ. de Béchar, pp. 101-105, 2010.

[20]. **MEBROUK R, KADJA M, FOHANNI S, LACHI M**, "Investigation du transfert de chaleur conjugué dans un échangeur de chaleur ayant des tubes ailetés", 3^{ème} conférence internationale sur l'énergie, les matériaux, l'énergétique appliquée et la pollution ICEMAEP 2016, 30-30 octobre 2016.

[21]. **CHYI-TSONG C, CHING-KUO W, CHYI H**, "Optimal Design and Control of CPU Heat Sink Process", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 31, No. 1, 2008.

[22]. **ANDREW C**, "Lower-end desktop CPUs won't get Broadwell, will need to wait for Skylake", (9/5/2014), [disponible à]: «<https://arstechnica.com/gadgets/2014/09/lower-end-desktop-cpus-wont-get-broadwell-will-need-to-wait-for-skylake/>», [Accès le]: 13/01/2018.

[23]. **SMITH R, HOWSE B**, "Tick Tock on the Rocks: Intel Delays 10nm, Adds 3rd Gen 14nm Core Product "Kaby Lake"", (July 16, 2015), [disponible à]: «<http://www.anandtech.com/show/9447/intel-10nm-and-kaby-lake>», [Accès le]: 20/03/2018.

[24]. **CUTRESS I**, "[Intel's 'Tick-Tock' Seemingly Dead, becomes 'Process-Architecture-Optimization'](http://www.anandtech.com/show/10183/intels-tick-tock-seemingly-dead-becomes-process-architecture-optimization)", (March 22, 2016), [disponible à]: "<http://www.anandtech.com/show/10183/intels-tick-tock-seemingly-dead-becomes-process-architecture-optimization>", [Accès le]: 18/03/2018.

[25]. **KAMPMAN J**, "[Intel begins shipping Kaby Lake CPUs to manufacturers](https://techreport.com/news/30417/intel-begins-shipping-kaby-lake-cpus-to-manufacturers)", (July 21, 2016), [disponible à]: "<https://techreport.com/news/30417/intel-begins-shipping-kaby-lake-cpus-to-manufacturers>", [Accès le]: 23/03/2018.

[26] Site web:[disponible à]:"<https://www.intel.fr/content/www/fr/fr/products/processors/core/i7-processors.html>"[Accès le]: 23/03/2018.

[27]. « Processeur 14 nm Intel® Core™ i7-5600U », [disponible à]:
«<https://www.mouser.fr/new/Intel/intel-i7-5600-processor/> », [Accès le]: 03/02/2018

[28]. « Solutions ultra-rapides et consommant peu d'énergie d'architecture Intel® », [disponible à]: « <https://www.intel.fr/content/www/fr/fr/silicon-innovations/intel-14nm-technology.html?> », [Accès le]: 03/02/2018.

[29]. **BOUTTOUT A**, « Etude de l'instabilité hydrodynamique et thermique lors du refroidissement à air des sources de chaleur », Thèse de Magister, Univ. Mentouri-Constantine, 2006.

[30]. **BEN ALIA M**, **KETMI M**, « Simulation d'une ailette de refroidissement : cas d'un Microprocessor », Mémoire de Master, Univ. Kasdi Merbah-Ouargla, 2017.

Abstract:

This memory focuses on the study and optimization of the cooling of electronic components and integrated circuits. The case studied in this work is the Intel[®] Core™ i7 microprocessor represented in its micro architectures; Broadwell (5th generation) and Kaby Lake (7th / 8th generation), and this according to different cooling techniques applied in the industrial field.

In this memory, a microprocessor is analyzed, modeled and simulated by the CFD ANSYS FLUENT. A numerical work was done by FLUENT CFD to properly conduct the study in order to reach the goal and to make use of the results for applications of forced air convection in electronic cooling.

The cooling by the forced convection of air associated with a finned dissipator is adopted for the thermal evacuation of the electronic devices which are in our case the Intel Core i7 microprocessors. The velocity fields formed by the finned areas and thermal losses are analyzed by the adopted numerical program.

The thermal characterization of fin under forced air convection cooling is studied. The thermal parameters including the angular velocity magnitudes and the distribution of the fluid temperature between inside the solid body of dissipater fins are analyzed and presented graphically. The effect of certain dimensionless parameters influencing the heat transfer in the fin has been studied.

Keywords:

Numerical simulation, CFD, cooling of electronic components, convection, fins.

Résumé :

Ce mémoire porte sur l'étude et l'optimisation du refroidissement des composants électroniques et des circuits intégrés. Le cas étudié dans ce travail est le microprocesseur Intel® Core™ i7 représenté dans ses microarchitectures ; Broadwell (5^{ème} génération) et Kaby Lake (7^{ème}/8^{ème} génération), et ceci selon différentes techniques de refroidissement appliquées dans le domaine industriel.

Dans ce mémoire, un microprocesseur est analysé, modélisé et simulé par le CFD ANSYS FLUENT. Un travail numérique a été fait par CFD FLUENT pour bien mener l'étude afin d'atteindre l'objectif et de se servir des résultats pour des applications de la convection forcée d'air dans le refroidissement électronique. le refroidissement par la convection forcée d'air associée à un dissipateur à ailettes est adopté pour l'évacuation thermique des dispositifs électroniques qui sont dans notre cas les microprocesseurs Intel Core i7. Les champs de vitesse de l'écoulement d'air rectangulaires formés par des surfaces étendues, les pertes de thermiques sont analysés par le code utilisé.

La caractérisation thermique d'ailette sous refroidissement par convection forcée d'air est considérée ici. Les paramètres thermiques comprenant les amplitudes de vitesse de rotation et la distribution de la température statique au sein du solide constituant les ailettes sont analysées et présentées graphiquement. L'effet de certains paramètres adimensionnels influençant le transfert de chaleur dans l'ailette a été étudié.

Mots clés :

Simulation numérique, CFD, refroidissement des composants électroniques, convection, ailettes.

ملخص :

تركز هذه الدراسة على تحسين عملية تبريد المكونات الإلكترونية والدوائر المتكاملة. والحالة التي تمت دراستها في هذا العمل هي المعالجات الدقيقة Intel® Core™ i7 الممثلة في بنيتها الدقيقة؛ Broadwell (الجيل الخامس) و Kaby Lake (الجيل السابع / الثامن)، وهذا وفقا لتقنيات التبريد المختلفة المطبقة في المجال الصناعي.

في هذه الدراسة، تم تحليل المعالجات الدقيقة ونمذجتها ومحاكاتها من قبل الـ CFD ANSYS. تم إجراء العمل الرقمي من خلال Fluent CFD لإجراء الدراسة بشكل صحيح من أجل الوصول إلى الهدف والاستفادة من النتائج لتطبيقات الحمل الحراري القسري في التبريد الإلكتروني. كما تم اعتماد التبريد عن طريق الحمل الحراري القسري المرتبط بمشنت حراري ذو زعانف من أجل الإخلاء الحراري للأجهزة الإلكترونية التي تتمثل في حالتنا هذه في المعالجات الدقيقة Intel Core i7. تم تحليل حقول سرعة تدفق الهواء التي تكونت من مساحات كبيرة للضياع الحراري بواسطة البرنامج المستخدم.

تم دراسة التوصيف الحراري للزعنفة في إطار التبريد الحراري القسري بالهواء. يتم تحليل المعلومات الطاقوية بما في ذلك تأثيرات السرعة الزاوية، وتوزيع درجة حرارة السائل بين السطوح الممتدة وعرضها بشكل تخطيطي. تمت دراسة تأثير بعض المعاملات الأبعديّة على انتقال الحرارة في الزعنفة.

كلمات مفتاحية:

المحاكاة العددية، CFD، تبريد المكونات الإلكترونية، الحمل الحراري والزعانف.