

REFERENCES



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة وهران 2 محمد بن أحمد



Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle
Département: Maintenance en Électromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électromécanique Industrielle

Spécialité : Électromécanique Industrielle

Thème :

Etude de refroidissement d'une plaque électronique

Présenté et soutenu par :

Nom : MEHENNI

Prénom : Walid

Nom : ABBAS

Prénom : Aissam

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
TITAH Mouloud	MCB	IMSI-Univ. D'Oran2	Président
AOUMER Yamina	MAA	IMSI-Univ. D'Oran2	Examineur
HEROUZ Keltoum	MAA	IMSI-Univ. D'Oran2	Encadreur

Année 2021/2022.



REMERCIEMENT

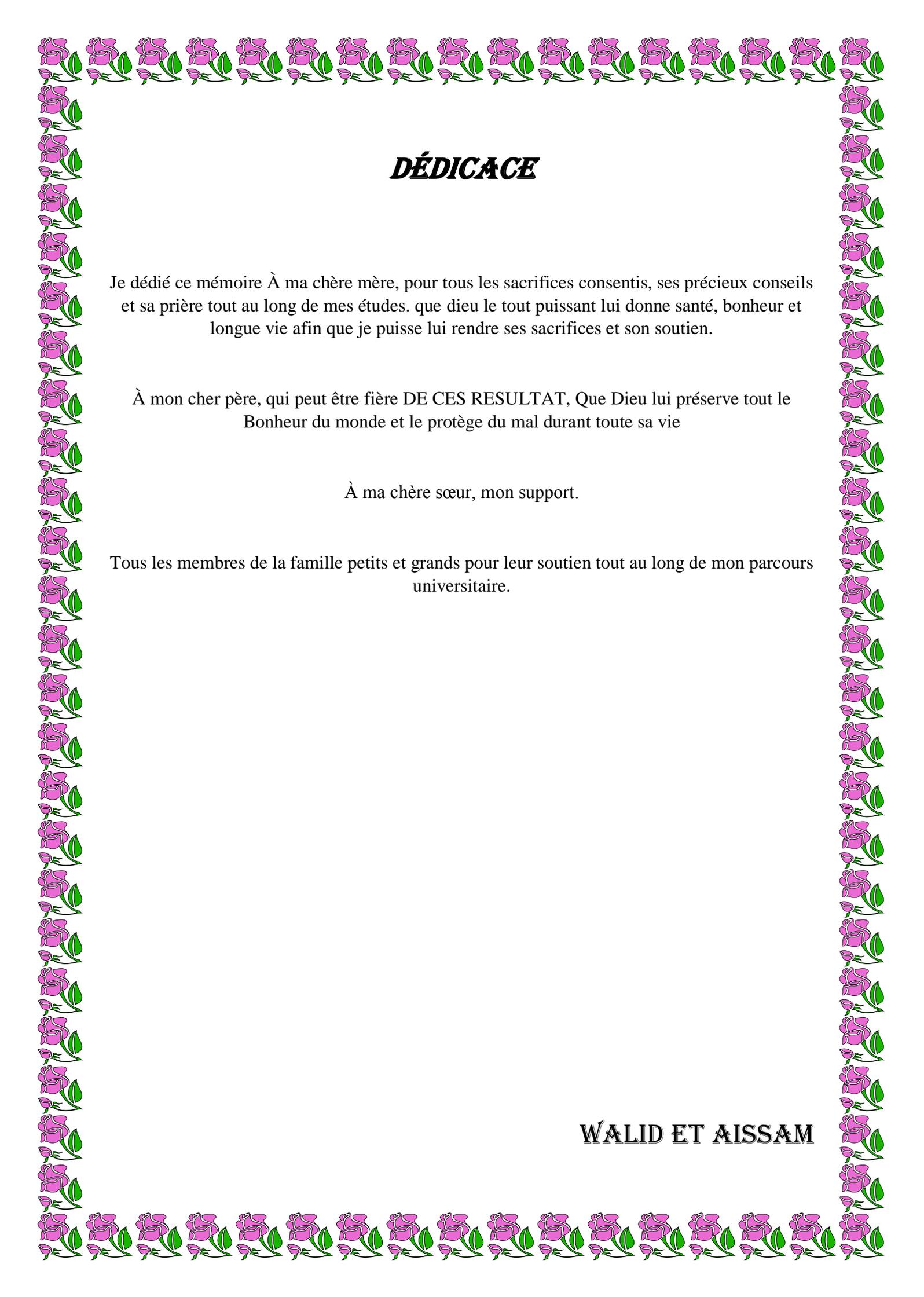
Tout d'abord je remercie infiniment le bon dieu tout puissant de la bonne santé, la volonté et la patience qu'il m'a donné tout le long de mes études.

Nous présentons nos sincères remerciements avec nos profonds respects à notre Encadreur M.HEROUZ pour son suivi, sa patience, ses conseils et son aide, tout au long de la réalisation de ce modeste travail.

Nous tenons à remercier aussi les membres de jury

Tous nos sincères remerciements à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à réalisé ce modeste travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre gratitude à l'ensemble du personnel du département de l'électromécanique et tout le personnel de notre institut de maintenance et sécurité industriel, Université d'Oran2.



DÉDICACE

Je dédie ce mémoire À ma chère mère, pour tous les sacrifices consentis, ses précieux conseils et sa prière tout au long de mes études. que dieu le tout puissant lui donne santé, bonheur et longue vie afin que je puisse lui rendre ses sacrifices et son soutien.

À mon cher père, qui peut être fier DE CES RESULTAT, Que Dieu lui préserve tout le Bonheur du monde et le protège du mal durant toute sa vie

À ma chère sœur, mon support.

Tous les membres de la famille petits et grands pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

WALID ET AISSAM

SOMMAIRE

Chapitre I : Introduction

I.1. Introduction générale	1
I.2. Historique	2
I.3. Etude Bibliographique	4

Chapitre II : Généralités sur les plaques électroniques

II.1. Introduction	8
II.2. Plaque ou circuit électronique	8
II.3. Circuit imprimé	9
II.4. Classification des Circuits imprimés	10
II.5. Composants électroniques	10
II.5.1. Composants actifs	10
II.5.2. Composants passifs	11
II.6. Classification par type d'intégration	12
II.6.1. Composants discrets passifs	12
II.6.2. composants discrets actifs	12
II.7. Classification par boîtier	13
II.7.1. Boîtier	14
II.7.2. Fonctions du boitier	14
II.8. Domaines d'application	15
II.8.1. Capteur	15
II.8.2. Électronique de puissance	15
II.8.3. Électronique analogique	16
II.8.4. Électronique numérique	16
II.8.5. Interface humaine	16
II.9. Fabrication d'un circuit imprimé	17
II.9.1. Réalisation du schéma	17

II.9.2. Router le schéma électrique	17
II.9.3. Fabrication du circuit imprimé	19
II.10. Etude thermique d'une carte électrique	23
II.11. Conclusion	24

Chapitre III : Généralités sur les systèmes de refroidissement

III.1. Introduction	25
III.2. Systèmes de refroidissement actifs	25
III.3. Systèmes de refroidissement passifs	25
III.4. Refroidissement à air	26
III.4.1. Convection naturelle par air	26
III.4.2. Convection forcée à air	27
III.5. Refroidissement par liquide caloporteur	27
III.6. Refroidissement par plaque à eau	28
III.7. Refroidissement par micro-canaux	29
III.8. Refroidissement par Spray cooling	30
III.9. Refroidissement par jets	32
III.10. Refroidissement diphasique (les caloducs)	33
III.11. Diamant CVD	35
III.12. Différence entre le refroidissement par huile et le refroidissement par eau	36
III.13. Conclusion	36

Chapitre IV : Présentation du code commercial ANSYS CFX

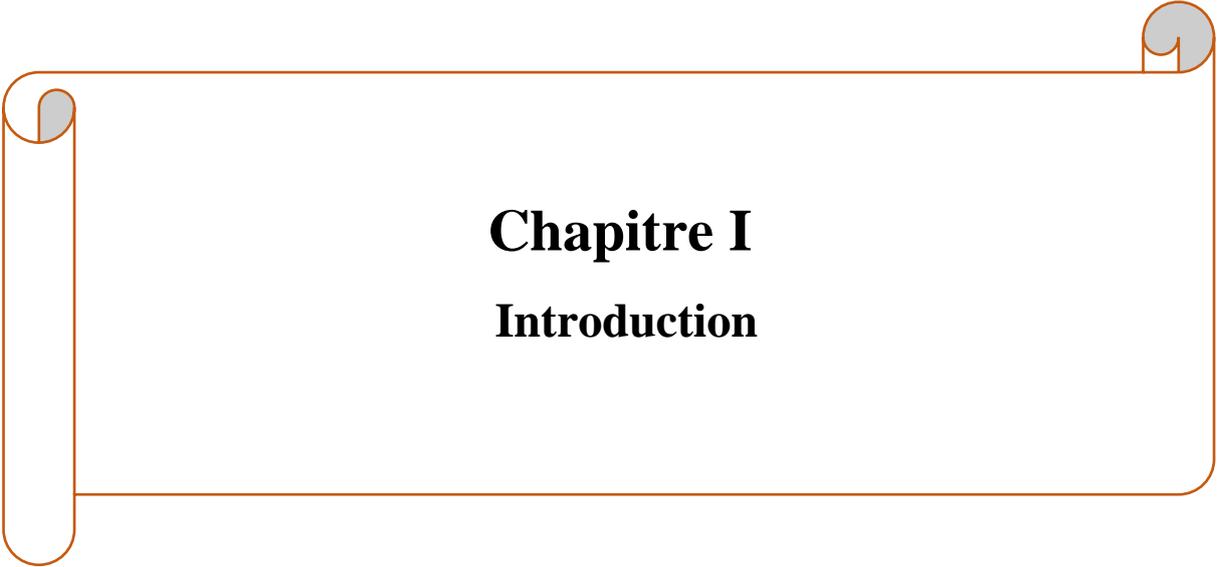
IV.1. Introduction	37
IV.2. Présentation de l'ANSYS ICEM CFD	37
IV.2.1. FONCTIONS	38
IV.2.2. L'arbre de commande d'affichage	40
IV.2.3. Build Topology (Réparer la géométrie)	41

IV.2.4. Creat Body (Créer le volume)	41
IV.2.5. Meshing (Le Maillage)	42
IV.2.6. Prismes	43
IV.2.7. Exporter le fichier du maillage	43
IV.3. Deuxième partie : Simulation numérique	43
IV.3.1. Structure du code ANSYS CFX	44
IV.3.2. CFX-Pre	44
IV.3.3. CFX-Solver	45
IV.3.4. CFX- Solver Manager	45
IV.3.5. CFX-Post	45

Chapitre V : Simulation Numérique

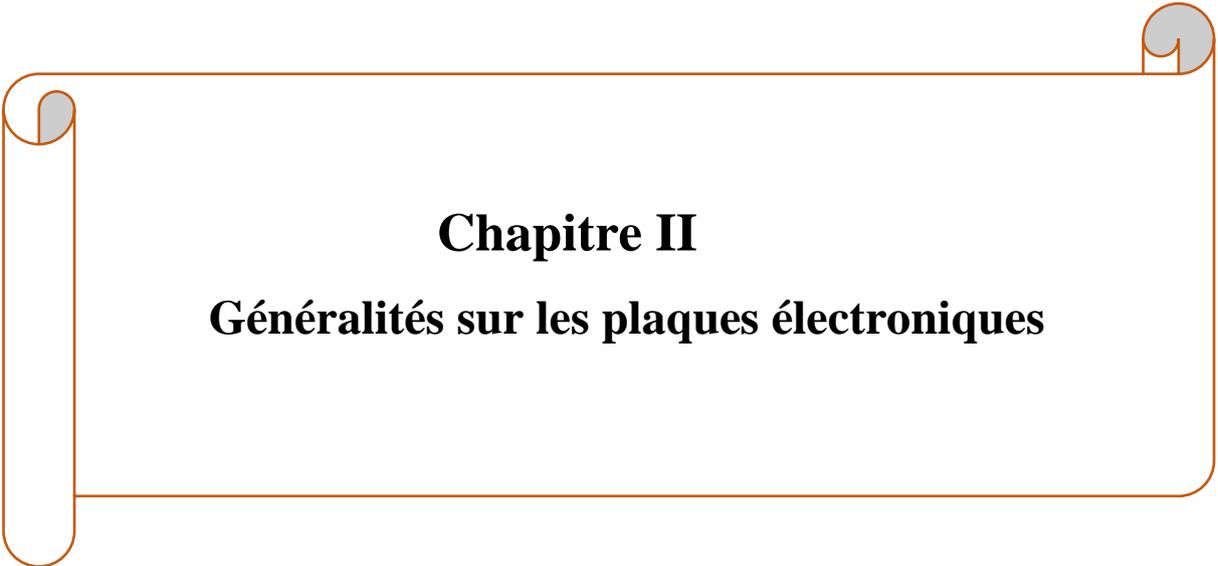
V.1. Introduction	46
V.2. Résolutions numériques	46
V.2.1. Méthode des différences finies	46
V.2.2. Méthode des éléments finis	46
V.2.3. La méthode des volumes finis	47
V.3. Définition de la CFD	47
V.4. Modèle de turbulence	47
V.5. Equation gouvernantes	48
V.5.1. Equation de continuité	48
V.5.2. Équation de quantité de mouvement	49
V.5.3. Équation d'énergie	50
V.6. Cas étudié	50
V.6.1. Représentation des différentes géométries avec leurs maillages et le nombre d'éléments	51
V.6.2. Conditions aux limites	53
V.6.3. Résultats et discussions	53
V.6.3.1. Test de convergence	53
V.6.3.2. Distribution de la vitesse	56

V.6.3.3. Champs de pression	57
V.6.3.4. Champs de températures	59
V.7. Conclusion	60
Conclusion Générale :.....	61

A decorative border in a light brown color, shaped like a scroll. It has rounded corners and a vertical strip on the left side that looks like a scroll's edge. There are small grey circular accents at the top-left and top-right corners of the scroll's main body.

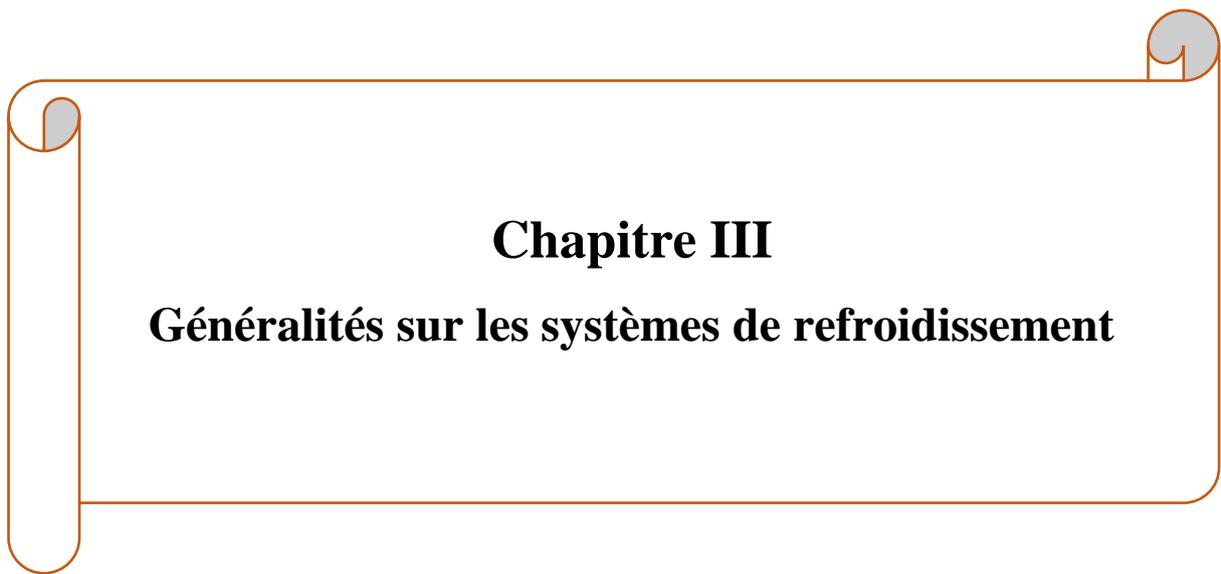
Chapitre I

Introduction

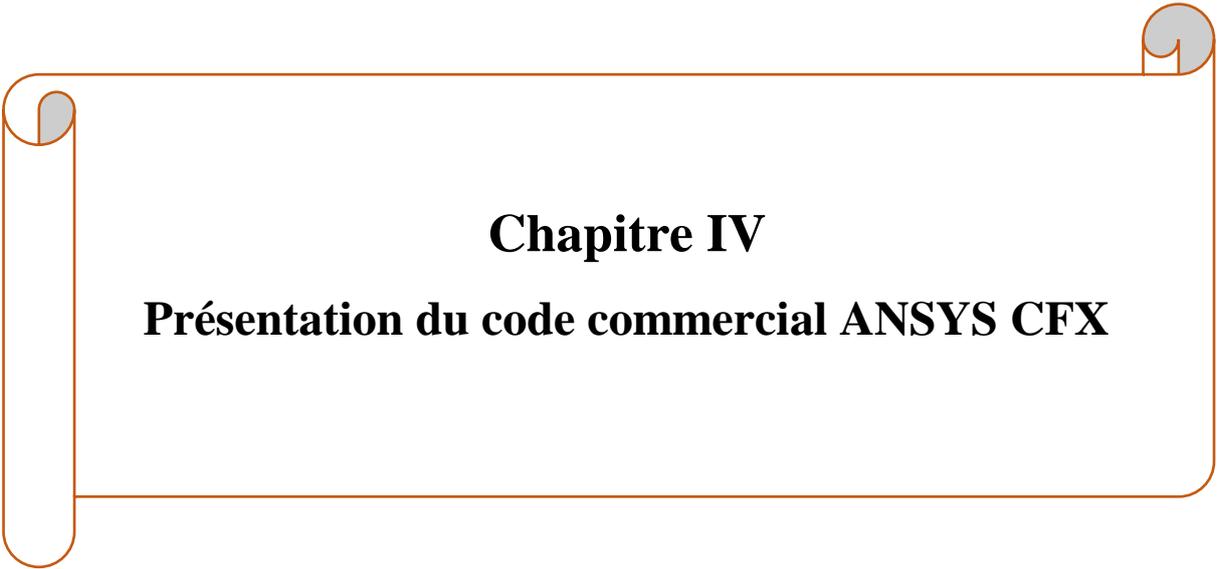
A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both with rounded ends and a light gray shadow effect.

Chapitre II

Généralités sur les plaques électroniques

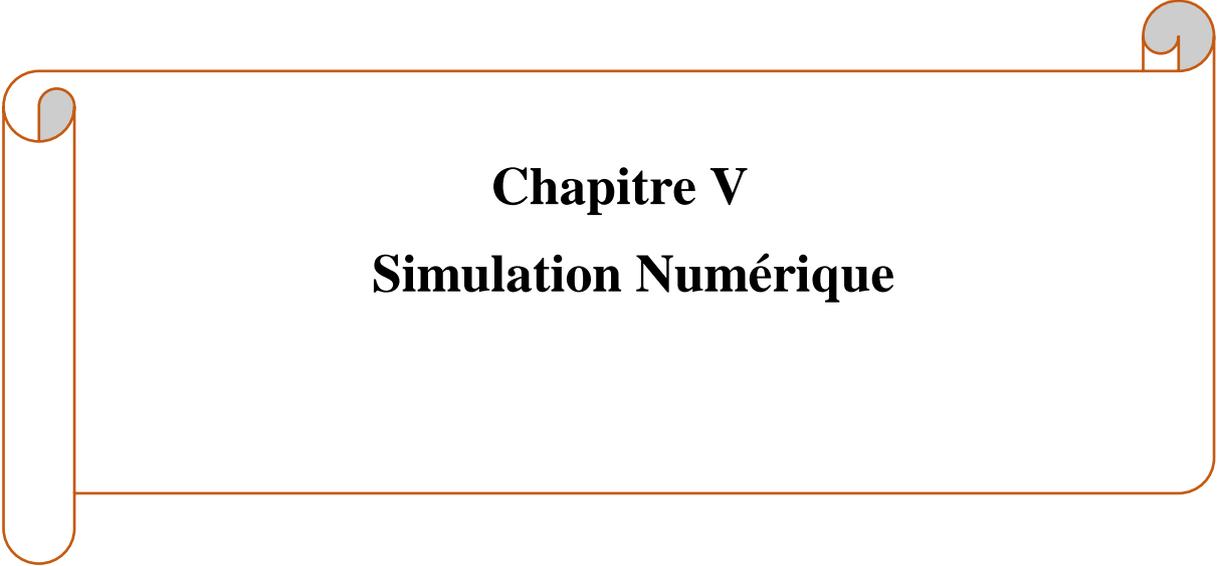


Chapitre III
Généralités sur les systèmes de refroidissement

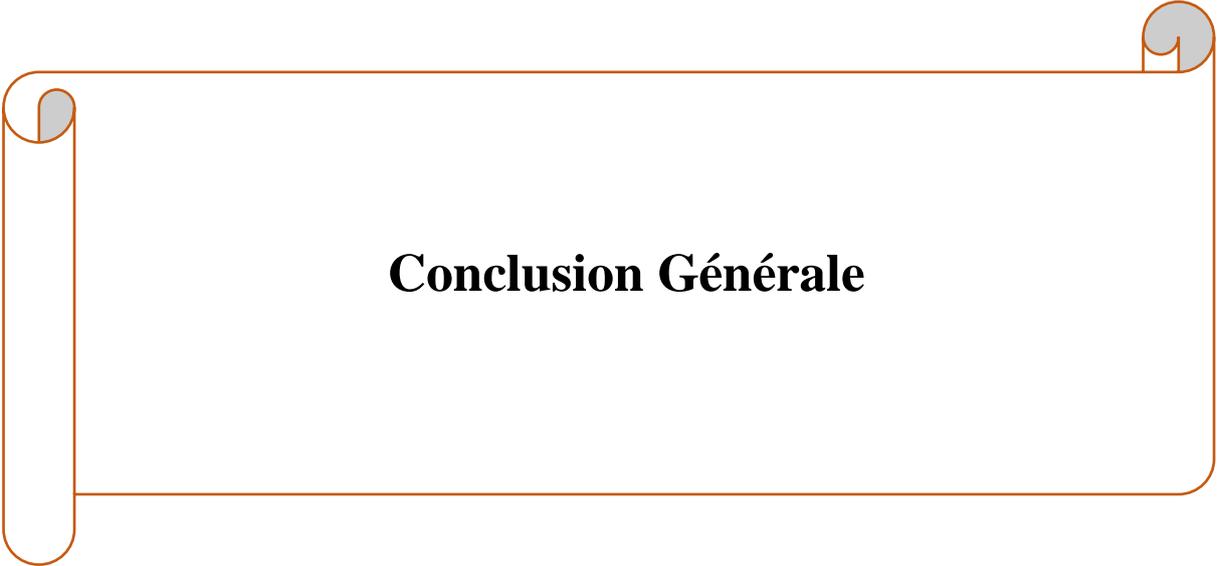
A decorative border resembling a scroll, with a brown outline and grey circular accents at the corners and along the left edge.

Chapitre IV

Présentation du code commercial ANSYS CFX

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and rounded corners on the right, all outlined in a light brown color. The text is centered within this frame.

Chapitre V
Simulation Numérique



Conclusion Générale

I.1. Introduction générale

L'électronique intervient aujourd'hui dans la vie quotidienne de chacun, que ce soit avec le téléphone mobile ou avec l'ordinateur personnel, le téléviseur ou le lecteur de disques compacts.

Les composants étaient initialement des constituants élémentaires que l'on assemblait pour réaliser des fonctions. L'évolution de la technique et particulièrement des circuits intégrés avait étendu cette définition à des éléments d'assez petite dimension assurant des fonctions plus ou moins complètes, voire très complexes (microprocesseurs).

Aujourd'hui les centres de données qui font fonctionner l'internet qui alimente l'économie basée sur l'informatique consomme des pourcentages importants de l'électricité produite à l'échelle mondiale, environ 50% de cette énergie sert seulement à refroidir les serveurs et particulièrement ceux qui faisaient des calculs de haute performance pour s'assurer qu'ils fonctionnent sous une température sécuritaire pour leur fonctionnement.

Pour résoudre cette problématique plusieurs recherches ont été développées suivant plusieurs axes de recherche en faisant varier un ou plusieurs paramètres à savoir :

- Le modèle du système (ventilateur, échangeur de chaleur, ...etc).
- Le design (géométrie, dimension, ...etc).
- La nature du fluide de refroidissement (gaz, liquide, air, eau, huile, réfrigérant, ...etc).
- Les paramètres thermodynamiques du fluide (pression, débit, température, ...).
- Caractéristiques physicochimiques (densité, viscosité, diélectricité, ...etc).
- Type de refroidissement (conduction, convection, forcé, naturelle, ...etc).

A notre niveau on a étudié le refroidissement d'une plaque électronique par des micro-canaux de plusieurs géométries. On a utilisé le code commercial ANSYS CFX pour étudier le transfert de chaleur entre les micro-canaux et la source de chaleur.

Les résultats obtenus ont été validés avec les résultats de la référence [].

En fin un nouveau modèle est proposé pour améliorer le refroidissement.

Ce mémoire est constitué de cinq chapitre ;

- Le premier chapitre est consacré pour l'historique des systèmes de refroidissement ainsi qu'une étude bibliographique.

- Le deuxième chapitre représente une étude théorique des plaques électroniques et leurs composants.
- Le troisième chapitre est une étude théorique des systèmes de refroidissement.
- Le quatrième chapitre est une présentation du code commercial ANSYS CFX.
- Le modèle étudié et les résultats obtenus sont discutés au cinquième chapitre

En fin ce mémoire est clôturé par une conclusion générale.

I.2. Historique

Le premier système de refroidissement par eau est dû à l'Anglais Samuel Brown qui, en 1823, avait breveté un véhicule qui fonctionnait au gaz et dont le moteur était refroidi par eau afin d'améliorer les performances du refroidissement. Dans son moteur l'eau entraînée par une pompe circule autour des cylindres entourés d'une chemise, l'eau est refroidie par contact direct avec l'air ambiant. Plus tard, on ajouta à l'eau différents adjuvants qui devient alors le liquide de refroidissement .Le radiateur fut inventé en 1897 par l'ingénieur allemand Wilhelm Maybach. Après de nombreux tâtonnements, il mit au point le radiateur qui permet le refroidissement très efficace d'un liquide il est composé d'un faisceau de conduits courts et étroits entre lesquels circule l'air. L'air peut être accéléré par un ventilateur placé devant ou derrière lui. Ce radiateur est situé dans un circuit ou semi-fermé emplit d'un liquide (à base d'eau) assurant le refroidissement du moteur.

En 1875, le Français Alexis de Bishop utilisa pour la première fois le refroidissement par air. Ce type de refroidissement est surtout utilisé pour les moteurs équipant les vélomoteurs et motocyclettes de faible cylindrée et sur les automobiles. Le refroidissement à air a longtemps été la référence pour les moteurs de motocyclette, mais les problèmes entraînés par le haut rendement de ces moteurs ont conduit au quasi généralisation du refroidissement liquide. Il peut être optimisé par l'utilisation d'un ventilateur, dont la présence ne révèle toutefois pas toujours un refroidissement à air, car il dissipe parfois la chaleur du radiateur d'un système de refroidissement liquide.

D'autres utilisations incluent le refroidissement à huile : tous les moteurs internes utilisent déjà un liquide pour la lubrification des pièces en mouvement, l'huile qui circule propulsée par une pompe, il suffit donc de faire circuler ce liquide dans les zones chaudes pour assurer le refroidissement correct.

La première utilisation du refroidissement à eau dans un ordinateur en 1985 par la société Cray. A partir des années 1990 est apparu le refroidissement liquide dans les ordinateurs personnels traditionnellement équipés de refroidissements à air. Mais les composants de la plaque électronique générant relativement peu de chaleur, son utilisation ne s'est avérée réellement justifiée que quelques années plus tard .la généralisation des jeux sur ordinateurs et des applications nécessitant d'importantes capacités de calcul ont poussé les constructeurs à fournir des processeurs toujours plus puissants. Ces modifications affectent de manière très importante la chaleur dégagée par le composant qui est dans la plaque électronique d'où la nécessité de systèmes de refroidissement toujours plus performants.

C'est pourquoi les configurations refroidies à l'eau connaissent depuis quelques années une popularité croissante.

A l'heure actuelle la majorité des ordinateurs possèdent un dispositif de refroidissement à air sur la plaque électronique et ses composants électroniques qui chauffent le plus et ces performances diminuent fortement avec l'augmentation de leurs températures et l'évacuation de la chaleur.

Les refroidissements à air récents utilisent souvent le transfert thermique par caloduc, ce qui permet de réduire les points chauds et d'améliorer l'efficacité de la ventilation .La méthode qui est rarement utilise c'est le refroidissement à huile : permettant de refroidir silencieusement (c'est-à-dire sans ventilateur ou pompe) tous les composants et les immerger de l'huile végétale ou minérale , En Europe ce type de refroidissement n'est pas commercialisé.

Il existe d'autre méthodes de refroidissement comme (le refroidissement a changement de phase, et le refroidissement à l'azote liquide qui été utilisé en 1984 dans les laboratoires IBM mais il peut provoquer des court-circuit si l'eau atteint l'électronique , ces dernières années la technique du refroidissement par spray a attiré l'attention des chercheurs pur diverses applications de refroidissement en électronique et électronique de puissance , vue son efficacité à dissiper de grands flux de chaleur sur des petites surface. La méthode la plus utilisé reste le refroidissement par convection naturelle en raison de sa facilite d'intégration dans les systèmes et son faible cout.

Dans le domaine de les téléphones et les tablettes, l'espace d'un appareil mobile est extrêmement confiné et la chaleur s'y dissipe difficilement ,ce qui est un casse-têtes pour les

ingénieurs, pour le moment les fabricants utilisent des feuilles de métal ou de graphite qui conduisent la chaleur émise par les puces électroniques vers les endroits les plus froids du téléphone, mais la technique est en phase d'atteindre ses limites, C'est pourquoi l'entreprise japonaise FUJITSU a annoncé l'invention d'une nouvelle technologie de refroidissement par fluides, spécialement adaptée pour les appareils mobiles.

I.3. Etude Bibliographique

- Yahiaoui Mustapha et KESSI Farid de l'université d'El Bouira ont étudié le refroidissement des composants électroniques par convection forcée. Ils ont constaté que l'échauffement excessif réduit la durée de vie du composant électronique et peut provoquer sa défaillance. une étude numérique du transfert convectif forcé d'un écoulement laminaire d'air de vitesse uniforme à l'entrée, en deux dimensions dans un canal rectangulaire horizontal ouvert, et contenant un composant électronique (sources de chaleur) sur sa paroi inférieure a été faite. Les résultats obtenus montrent que pour $Pr = 0.71$, $10 \leq Re \leq 2000$ le nombre de Reynolds, le blocage partiel de l'écoulement, ont des effets considérables sur l'augmentation du nombre de Nusselt au niveau des composants et par conséquent sur l'amélioration du transfert de chaleur à l'intérieur du canal.
- Mimoun Med Yassine et Sebki Abdeslam de l'université d'Oran 2 Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle ont fait une étude numérique du refroidissement d'un composant électronique basé sur un code commercial résolvant les équations de Navier-Stokes et l'équation de l'énergie moyennant la méthode des volumes finis. Le travail représente une simulation d'écoulement autour d'un cube chauffé à une température de 75°C , placé dans un écoulement d'air forcé à 25°C . Le cube est exposé aussi à un jet perpendiculaire à une température de 25°C . Un bon accord a été observé entre les différents résultats, qui sont présentés sous forme de contours, de vitesses et de température.
- BOUREKHOUM Sami de l'université d'Oran 2 Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle a étudié l'impact de la rugosité sur le refroidissement d'un composant électronique. une étude numérique basée sur le code résolvant les équations de Navier-stokes ; le CFX .15.0 du transfert convectif forcé d'un écoulement d'air principale et un jet

impactant perpendiculaire au composant (source de chaleur), ce travail est validé avec l'étude expérimentale de Masip Yunesky 2012. La configuration géométrique représentée sous forme d'un cube chauffé à 75° C placée dans la paroi inférieure d'un canal horizontal soumise à un écoulement principal et un jet perpendiculaire à 20° C. L'écoulement principal est maintenu à deux nombres de Reynolds de 3410 et 8880 et du côté jet impactant, les nombres de Reynolds sont calculés à partir des rapports $\alpha = Re_j/Re_h = 0.5; 1.0$ et 1.5. La simulation est reproduite pour des valeurs différentes de rugosité du cube 0.05 et 0.1 (mm) dans le but est de vérifier si le changement de rugosité de composant améliore l'efficacité du refroidissement ou non. Les résultats obtenus ont montré que pour une rugosité de 0.1 (mm) et un Reynolds de 8880 le composant est mieux refroidit.

- NADJI Mohammed Nadir et TAGUIG Ismahene de l'université d'Oran 2 Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle ont simulé numériquement un écoulement de fluide dans Des micros canaux pour le bon refroidissement des composantes électroniques. La Chaleur à évacuer devient très importante dans le domaine de l'électronique qui exige des systèmes de refroidissement très modernes. Les échangeurs à micro canaux peuvent faire face à ce dégagement de puissance qui puisse retarder au maximum la panne d'un système électronique. C'est pour cela qu'une étude d'écoulement laminaire à l'intérieur d'un micro-canal de section rectangulaire pour une seule phase de l'écoulement du liquide à l'aide du logiciel « Comsol Multiphysics 4.2 » a été faite. Le logiciel Comsol Multiphysics version 4.2 permet un traitement numérique assez bénéfique au point de vue des résultats obtenus des différents paramètres tel que la température et le profil de vitesse vis-à-vis de ceux trouvés par le logiciel Fluent. Les résultats numériques montrent clairement que les performances dynamiques et thermiques sont dépendantes de la forme de sections additives.
- Zhongda ZHANG) de l'université de Toulouse a étudié la Gestion thermique des composants d'électronique de puissance par l'utilisation CVD. Il apparaît dans cette étude que le fait d'augmenter la surface d'échange par l'ajout de micro-poteaux améliore nettement la capacité de refroidissement. Avec cette dernière solution, le potentiel de refroidissement peut encore être considérablement amélioré si l'on remplace l'eau par des

métaux liquides comme le gallium, ce qui ferait augmenter le coefficient d'échange convectif à plus de $50.000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

- M. Tawk, Y.Avenas et D. Charalampous de l'université de Pierre et Marie Curie de Grenoble ont étudié l'augmentation continue de la puissance dissipée par les composants et les systèmes électroniques. 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. Les résultats montrent que l'utilisation d'un métal liquide permet d'augmenter les densités de flux de chaleur dissipées par les composants. La prise en compte du matériau du refroidisseur est néanmoins très importante car nous voyons que l'utilisation du tungstène à la place de cuivre dégrade fortement le fonctionnement. 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.
- HAMOUCHE Adel de l'université de Mentouri Constantine a prouvé qu'une mauvaise ou insuffisante évacuation de chaleur a des effets néfastes sur le bon fonctionnement du circuit et sur sa durée de vie. Les effet thermique peuvent se manifester de manières différentes par une dérivé en température des composants, entraînant des variations importantes des performances électriques. La chaleur peut être la cause d'endommagement et de perte de matériel ou de système électronique. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la majorité des paramètres, entraîne l'augmentation du transfert de chaleur, mais à différents pourcentages. Il a conclu que les paramètres géométriques ont une influence considérable sur le transfert de chaleur au niveau des composants électroniques et sur leur refroidissement. Sa recommandation est d'étudier la convection mixte tridimensionnelle en régime instationnaire, en vue d'une approche plus réaliste.
- Chafaa Nasreddine et Benramdane Hassane de l'université d'Abou Bakr Belkaid de Tlemcen ont étudié l'évacuation de la chaleur. Ils ont montré que l'augmentation de l'épaisseur des composants électroniques entraîne une amélioration du taux d'enlèvement de la chaleur avec une augmentation de la vitesse. La géométrie des composants a un grand

effet sur la surface qui sépare. L'augmentation de la surface entraîne une création de grande zone de recirculation alors un bon refroidissement.

- Maria Cristina RIOFRIO ALMEIDA de l'université de Grenoble Alpes a montré que les équipements électroniques ont besoin de dissiper des densités de chaleur localement supérieures à 100 W/cm^2 sélectionné le refroidissement par spray comme technique prometteuse pour dissiper des flux de chaleur au-delà de 100 W/cm^2 d'une part et d'une autre part les surfaces macrostructurées nous ont permis de dissiper des puissances thermiques de l'ordre de 140 W/cm^2 .

Les résultats reportés dans ce mémoire ont permis d'approfondir la compréhension des mécanismes de transfert de chaleur et le refroidissement par spray.

- Harchouch Nabila de l'université de Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem a étudié l'effet thermique dans les composants électroniques et a conclu que la méthode TLM est un bon outil de simulation avant la conception du dispositif, car elle permet l'évaluation et la localisation de la température en tout point quelconque de la structure pour divers dispositifs. Ainsi, la modélisation de problèmes de diffusion de chaleur et l'analyse thermique est possible pour tout module électronique fabriqués avec de nombreux matériaux différents.

II.1. Introduction

L'électronique intervient dans tous les domaines de nos jours. Mais lorsqu'on s'intéresse de plus près à ses bienfaits, ce sont les produits électroniques qui retiennent d'abord l'attention notamment les téléphones mobiles, l'ordinateur, le téléviseur, etc. En effet, les produits électroniques sont multiples et multiformes avec des avantages aussi variés selon leur domaine d'usage. Principalement, lorsqu'on s'attarde sur les téléphones mobiles et les ordinateurs, on se rend compte que l'électronique a révolutionné le monde à travers l'historique invention des puces, plaque ou circuit électronique. Cette puce reste l'élément incontournable dans la fabrication de ces produits indispensables dans le vécu quotidien de l'homme.

II.2. Plaque ou circuit électronique

Un circuit électronique est un ensemble de composants électroniques interconnectés souvent à l'aide d'un circuit imprimé et dont le but est de remplir une fonction.

Un circuit électronique est souvent considéré comme une boîte noire comportant :

- un ou plusieurs circuits d'alimentation électrique,
- une ou plusieurs entrées,
- une ou plusieurs sorties,
- des composants :
 - passifs (résistances, condensateurs, bobines, etc.),
 - actifs (diode, transistor, triac, circuit intégré, microprocesseur, etc.)

Les composants d'un circuit électronique sont essentiellement assemblés sur un support isolant (résine époxy), à une ou plusieurs couches et comportant des pistes conductrices et des connecteurs, appelé circuit imprimé sur lequel les composants sont de tous types dont les circuits intégrés eux même constitués d'un ensemble de circuits électroniques regroupés dans un seul composant et destinés à réaliser une ou plusieurs fonctions. Les microprocesseurs sont constitués d'un ensemble de circuits intégrés et de composants

regroupés dans le même boîtier servant à exécuter des programmes soit pour lesquels ils ont été conçus (par exemple une carte graphique) soit pour ceux qui lui sont fournis.

II.3. Circuit imprimé

Un circuit imprimé (ou PCB de l'anglais printed circuit board) est un support, en général une plaque, permettant de maintenir et de relier électriquement un ensemble de composants électroniques entre eux, dans le but de réaliser un circuit électronique complexe. On le désigne aussi par le terme de carte électronique.

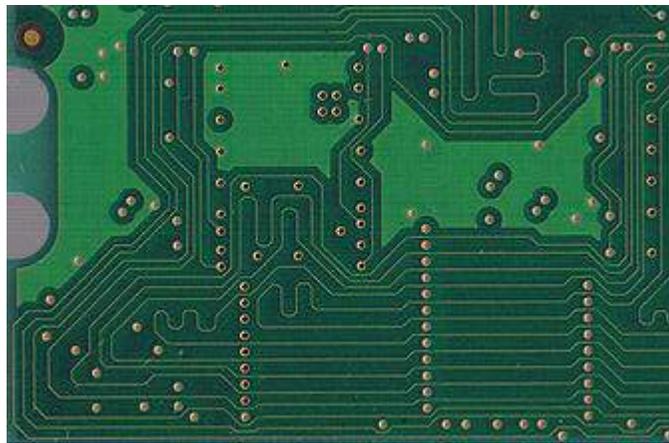


Figure I.1. Circuit imprimé

Il est constitué d'un assemblage d'une ou plusieurs fines couches de cuivre séparées par un matériau isolant. Les couches de cuivre sont gravées par un procédé chimique pour obtenir un ensemble de pistes, terminées par des pastilles. Le circuit imprimé est souvent recouvert d'une couche de vernis coloré qui protège les pistes de l'oxydation et d'éventuel court-circuit.

Les pistes relient électriquement différentes zones du circuit imprimé. Les pastilles, une fois perforées, établissent une liaison électrique, soit entre les composants soudés à travers le circuit imprimé, soit entre les différentes couches de cuivre. Dans certains cas, des pastilles non perforées servent à souder des composants montés en surface.

II.4. Classification des Circuits imprimés

Les circuits imprimés peuvent se classer en différentes catégories selon :

- leur nombre de couches conductrices.
- leur rigidité.
- la présence ou non de liaisons métallisées entre plusieurs couches conductrices.
- le nombre de stratifications nécessaires à leur fabrication.

II.5. Composants électroniques

Un composant électronique est un élément destiné à être assemblé avec d'autres afin de réaliser une ou plusieurs fonctions électroniques. Les composants forment de très nombreux types et catégories, ils répondent à divers standards de l'industrie aussi bien pour leurs caractéristiques électriques que pour leurs caractéristiques géométriques. Leur assemblage est préalablement défini par un schéma d'implantation d'un circuit électronique.

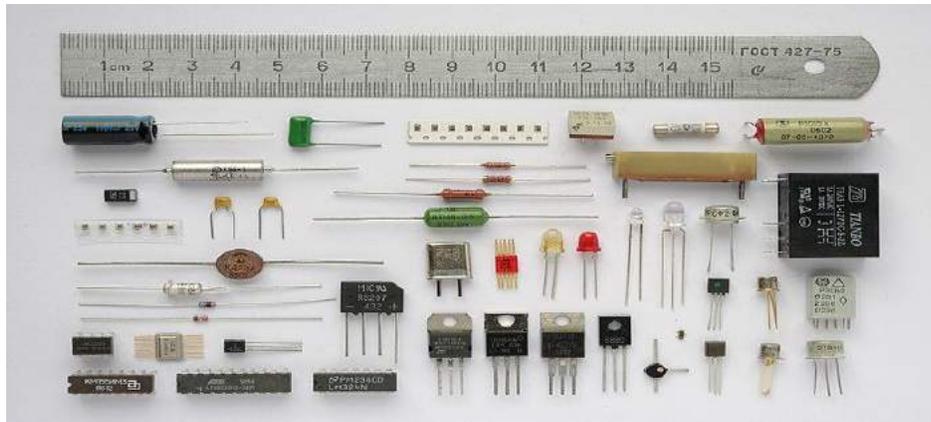


Figure I.2. Composants électroniques

II.5.1. Composants actifs

Un composant actif est un composant qui permet d'augmenter la puissance d'un signal, La puissance supplémentaire est récupérée au travers d'une alimentation. On peut citer en majorité des semi-conducteurs, on y classe : transistor, circuit intégré.

Il existe généralement une connexion électrique interne entre deux bornes du composant où le courant et la tension sont de même signe (orientés dans le même sens sur le schéma). C'est la convention génératrice.

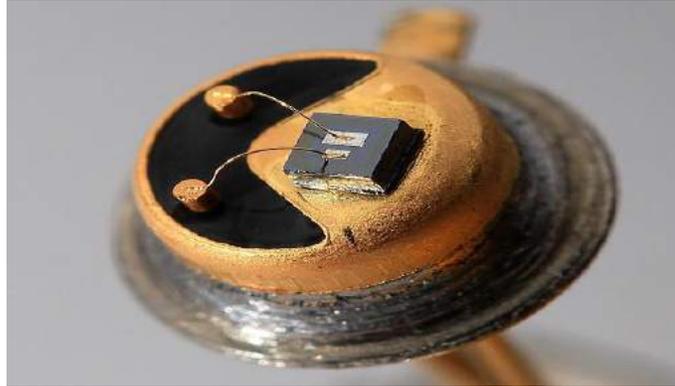


Figure I.3. Transistor, composant actif, boîtier ouvert

II.5.2. Composants passifs

Un composant est dit passif lorsqu'il ne permet pas d'augmenter la puissance d'un signal (dans certains cas, le composant réduit la puissance disponible en sortie, souvent par effet Joule) : résistance, condensateur, bobine ainsi que tout assemblage de ces composants.

De plus en plus apparaissent des composants qui sont des modules ou assemblages de composants actifs et passifs. On les compte alors soit dans les actifs soit comme des circuits électroniques.

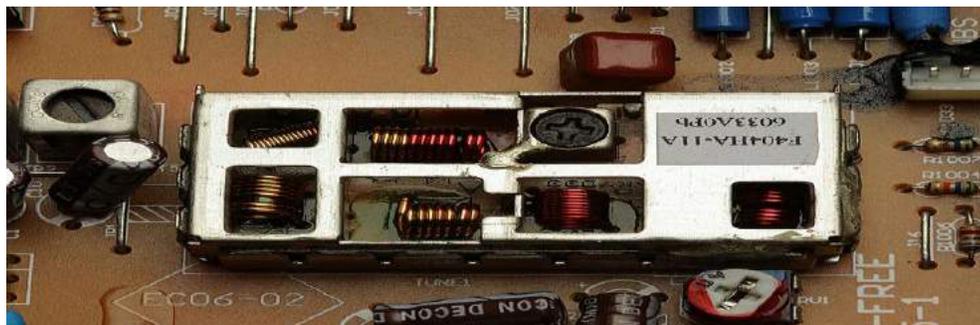


Figure I.4. Composants passifs (bobines, condensateur, potentiomètre).

II.6. Classification par type d'intégration

Un composant électronique discret est un composant ne réalisant qu'une fonction (résistance, condensateur...). Il s'oppose au circuit intégré ou au circuit hybride qui regroupent un certain nombre de fonctions actives ou passives dans un même boîtier. Le besoin de miniaturisation imposé par l'industrie de l'électronique et les progrès de l'industrie des semi-conducteurs engendrent progressivement la disparition de plus en plus des composants discrets. Ceux-ci sont cependant toujours utilisés dans les domaines réclamant de fortes tensions/ puissances comme l'électronique de puissance, l'électrotechnique, etc. Leur emploi se justifie également dans la réalisation de prototypes et des petites séries ou dans l'éducation.

II.6.1. Composants discrets passifs

- résistance,
- condensateur,
- inductance,
- transformateur électrique,
- diode simple.

II.6.2. composants discrets actifs

- transistor,
- tube électronique à grille de commande,
- diode à avalanche, à résistance négative,
- magnétron.



Figure I.5. Composants discrets (résistance).

II.7. Classification par boîtier

Parmi les composants à monter sur un circuit imprimé, on distingue deux catégories principales :

- les composants montés en surface, également appelés CMS ou SMD (pour Surface-Mount Device);
- les composants traversant ou traditionnels.

La différence est importante du point de vue de la fabrication du circuit imprimé support, la deuxième catégorie nécessite le perçage du circuit imprimé, imposant d'autres contraintes de routage, ainsi que de l'assemblage l'utilisation de composants CMS nécessite des contraintes d'assemblage différentes.

Une troisième catégorie, pratiquement disparue aujourd'hui, est la catégorie des composants à wrapper.

Ces catégories comportent de nombreuses variétés que le concepteur doit choisir en fonction de diverses contraintes d'intégration, de prix, d'accessibilité des signaux, de classe de fabrication, de dissipation thermique, etc... Certaines branches de l'électronique telles que l'électronique de puissance utilisent également des boîtiers avec des connexions à visser ou à sertir. Les contraintes de puissance, d'isolation et d'ergonomie ne permettent pas dans certains cas l'utilisation de circuits imprimés.



Figure I.6. Circuit intégré (PROM) (transistor).

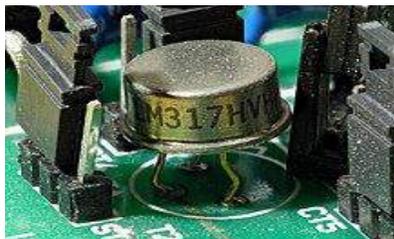


Figure I.7. Boîtier de forme ronde



Figure I.8. Boîtiers de forme rectangulaire (CMS).

II.7.1. Boîtier

Un boîtier de circuit intégré (ou package) est un boîtier servant à la fois de jonction électrique et d'interface mécanique entre la puce du circuit intégré et le circuit imprimé. Il est généralement composé de plastique, parfois de céramique, rarement de métal. Certains boîtiers possèdent des fenêtres transparentes permettant par exemple l'effacement par ultraviolet de certaines mémoires

II.7.2. Fonctions du boîtier

- Assurer la jonction électrique avec l'extérieur. Plusieurs solutions sont possibles :
 - Utilisation de *pins* qui vont être brasés au *circuit imprimé*,
 - Des plages dorées vont être brasées par apport de pâte à braser lors du processus de brasage,
 - Utilisation de billes de brasage pour faire la jonction entre le boîtier et le *PCB*,

- La jonction entre le composant et le boîtier peut se faire de deux manières :
 - Soit par *bonding*, c'est-à-dire l'utilisation de petits fils d'or ou d'aluminium de 15 à 50 μm pour réaliser la jonction entre les plages d'accueil du *die* aux *pins*. L'ensemble est noyé dans une résine d'encapsulation.
 - Soit par assemblage *flip-chip* : Les plages d'accueil du composant sont recouvertes de billes d'or (quelques μm de diamètre), le tout est retourné et brasé sur le PCB

- Assurer la dissipation thermique

- Protéger la puce de l'environnement hostile (chocs, poussière, rayonnements)

- Adapter le composant aux contraintes de fabrication : on passe généralement d'un pas entre *pins* de l'ordre de la centaine de μm au mm. Les contraintes de brasage sont également optimisées (température de brasure plus élevée, procédés standard de brasage par refusion/brasage à la vague).

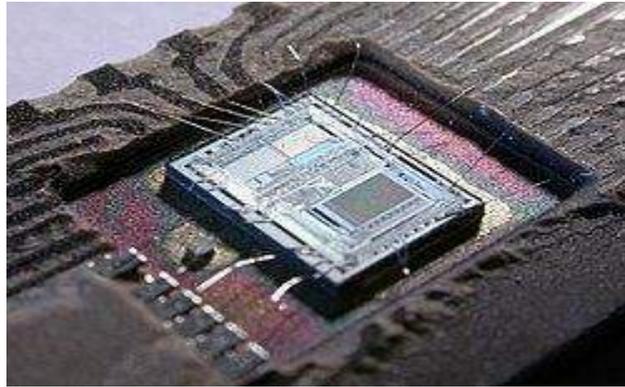


Figure I.9. Exemple de bonding sur un circuit intégré.

II.8. Domaines d'application

On peut lister les composants électroniques en fonction de leur domaine d'application de prédilection. Cette classification est donnée à titre indicatif, car les domaines de l'électronique sont en général interdépendants.

II.8.1. Capteur

- Caméra
- Capteur de pression fluide
- Capteur de champ magnétique (effet Hall)
- Thermistance

II.8.2. Électronique de puissance

- Fusible
- Relais
- Thyristors
- Transformateurs

II.8.3. Électronique analogique

- Condensateur
- Résistance
- Diode
- Inductance
- Transistor
- Photocoupleur
- Memristor
- Régulateur

II.8.4. Électronique numérique

- Microprocesseur
- Microcontrôleur
- Mémoire informatique
- Quartz
- Opto-coupleur ou plus généralement Photocoupleur

II.8.5. Interface humaine

- Afficheur
- Buzzer
- Commutateurs
- Haut-parleur
- Interrupteur
- LED
- Potentiomètre
- Roue codeuse

II.9. Fabrication d'un circuit imprimé

II.9.1. Réalisation du schéma

Une fois le besoin est analysé et le cahier des charges est validé la première grande étape dans la réalisation d'une carte électronique est la conception et la simulation des différentes fonctions de celle-ci. Il existe de nombreux logiciels de CAO qui nous permettent de réaliser ces simulations facilement. On utilise d'abord des outils de simulations fonctionnelles et électriques. A cette étape, on ne prend donc pas encore en compte les composants proprement dits mais on établit les différentes fonctions du circuit selon le cahier des charges établi.

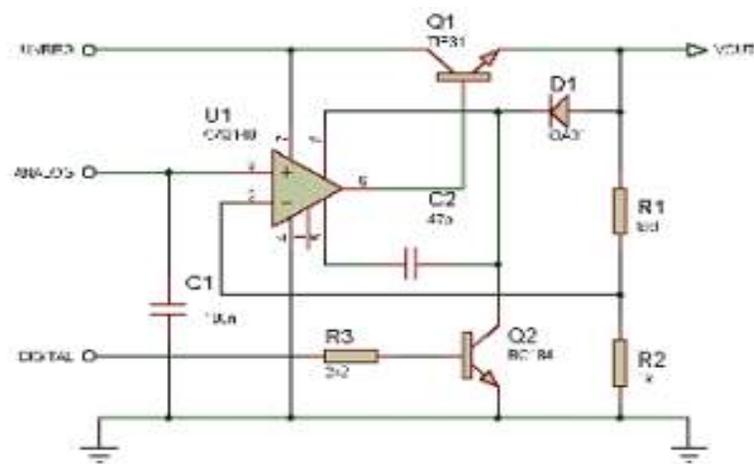


Figure I.10. Un exemple de schéma électrique

On dessine avec des logiciels tel que PSpice, Matlab ou Simulink le schéma électrique en utilisant les bibliothèques de composants incluses dans ceux-ci. Ainsi nous pouvons tester le comportement du circuit grâce aux modes de simulations proposé par ces différents outils de CAO.

II.9.2. Router le schéma électrique

Une fois les tests effectués on étudie comment les composants vont s'organiser physiquement sur la future carte électronique. On choisit donc les composants et on établit, toujours à l'aide d'un logiciel, les liaisons entre ceux-ci. Le choix des composants se fait en fonction des

contraintes auxquelles seront soumis le circuit. Comme par exemple un impératif de place, de dégagement de chaleur, de résistance à certaines conditions (thermiques, électrostatiques, ...).

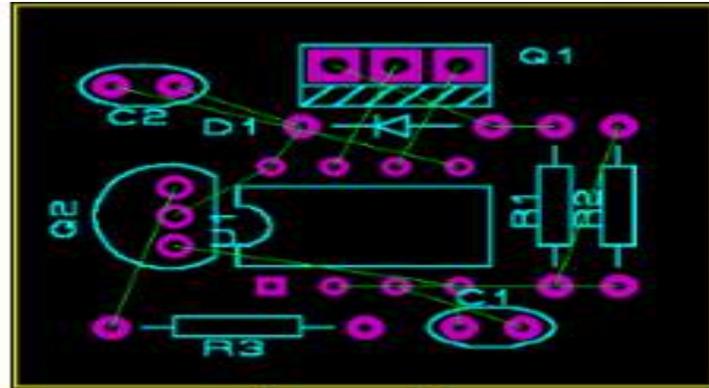


Figure I.11. Schéma non routé

- Les liaisons entre les différents composants sont les traits verts, les pastilles violettes représentent l'emplacement où seront soudées les différentes pattes des composants
- On observe clairement l'emplacement physique des composants.

Cependant, il reste une étape importante à réaliser :

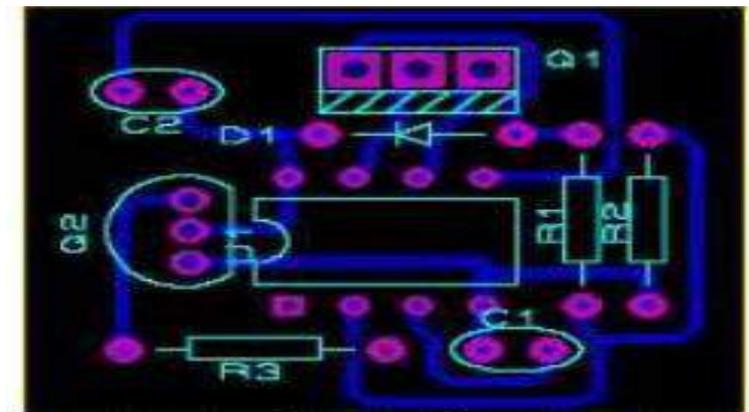


Figure I.12. Schéma routé

- Les pistes reliant les différents composant sont les traits bleus.
- On observe clairement le chemin emprunté par les pistes sur la plaque.

Cependant, il reste une étape importante à réaliser : le routage.

On connaît la place des différents composants, il faut maintenant connaître celui des pistes qui les relieront entre eux. L'objectif est donc d'obtenir le chemin de ces pistes grâce aux fonctions de routage des logiciels

Le routage est régi par des règles rendant sa réalisation parfois plus complexe qu'il n'y paraît.

Un autre paramètre à prendre en compte lors du choix de la largeur d'une piste : la résistance électrique et la puissance dissipée. En effet, celle-ci n'est pas toujours négligeable, surtout si la piste doit faire passer plus de 1 Ampère.

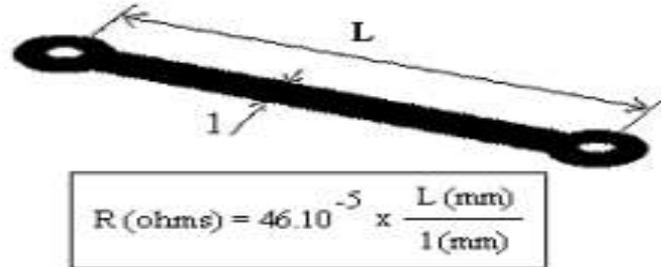


Figure I.13. Calcul de la résistance

Ces deux paramètres font partis de nombreux autres dont nous devons tenir compte. Maintenant que nous avons préparé et simulé correctement le circuit à l'aide d'un logiciel nous avons toutes les cartes en main pour passer à la réalisation du circuit proprement dite.

II.9.3. Fabrication du circuit imprimé

- **Pré requis :** Le support des cartes électroniques est un circuit imprimé. Celui-ci est une plaque en époxy à la surface de laquelle des pistes en cuivre sont gravées. Il ne faut pas confondre « circuit imprimé » qui désigne la plaque et les pistes sur lesquelles seront soudés les composants et « circuit électronique » qui désigne l'ensemble de la carte électronique.

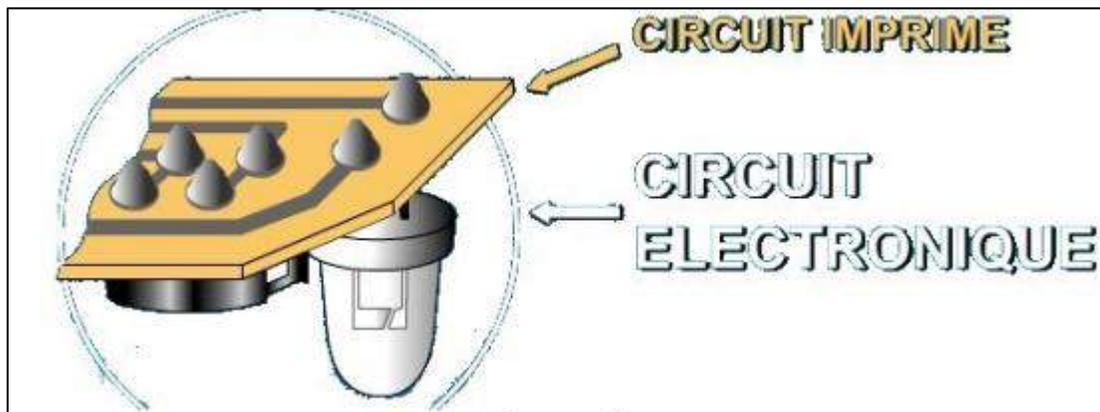


Figure I.14. Circuit Imprimé et Circuit électronique

Pour bien comprendre cette partie il est important de visualiser comment est constitué la plaque qui deviendra le circuit imprimé.

:

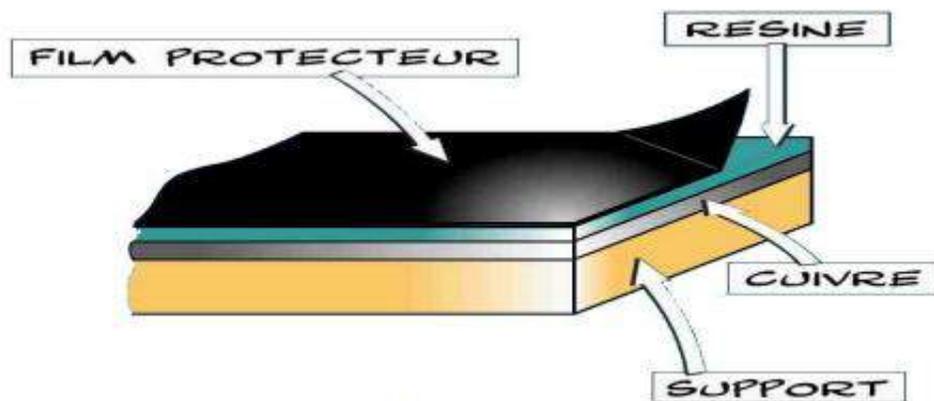


Figure I.15. Constitution de la plaque

Toute la phase de préparation de la plaque a pour but d'enlever la résine puis une partie de la couche de cuivre pour que le cuivre restant forme les pistes que nous avons définies dans l'étape précédente.

- **Imprimer le typon :**

Le typon est un dessin du circuit imprimé (pistes et pastilles) effectué sur un film transparent. Le typon sera utilisé pour réaliser le circuit imprimé par photogravure.

Le typon est donc produit d'après le routage effectué précédemment.

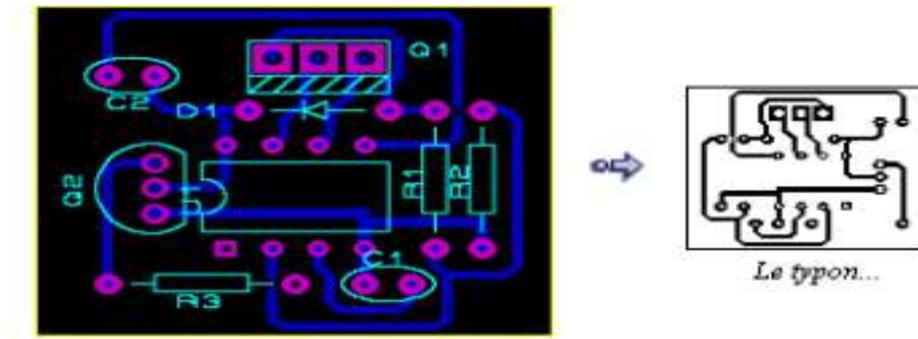


Figure I.16. Le typon par rapport à la simulation

Nous observons facilement comment seront les pistes et où se positionneront les composants. Il nous faut donc à présent réaliser le typon sachant que plus le support est transparent et plus l'encre est opaque, meilleur sera le résultat.

Plusieurs techniques peuvent être utilisées :

- Impression laser sur transparent
- Impression jet d'encre sur transparent spécial (micro-granulé)
- Photocopie d'un original papier bien contrasté sur transparent photocopieur
- Impression laser sur du calque
- Impression jet d'encre sur du calque spécial jet d'encre

Ces techniques sont assez accessibles en terme de coût et de facilité de mise en œuvre, en revanche la qualité du typon est limitée par la qualité d'impression des imprimantes. Pour réaliser des typons avec une forte densité, des pistes très fines et proches les unes des autres, d'autres techniques utilisées dans le monde professionnel et industriel sont disponibles. Ces techniques sont basées sur la photogravure.

Cela consiste à réaliser un film positif du circuit sur un support mylar (niveau professionnel) ou aluminium (niveau industriel). Pour fabriquer ce film, il faut présensibiliser le support grâce à un aérosol spécial. Ensuite il faut l'insoler à partir du typon papier (lumière blanche ou UV suivant le type), puis le développer avec du révélateur spécial. Le résultat est un noir très opaque sur un support bien transparent aux UV, et tout cela avec la précision de la

photogravure qui est bien au-delà des 300 ou 600 dpi de nos imprimantes. C'est une technique complexe et onéreuse qui n'est pas vraiment justifiée pour l'amateur, car elle nécessite un matériel et un savoir-faire particulier.

- **Insolation de la plaque époxy**

Après avoir retiré le film protecteur de la plaque époxy, la résine se trouve à la surface. Cette résine a pour propriété de se modifier lorsqu'elle est exposée aux rayonnements Ultraviolet (UV), elle est dite photosensible. Cette propriété est intéressante car il suffit d'isoler des UV certaines parties de cette résine pour qu'elle ne soit pas modifiée. On comprendra l'intérêt d'avoir modifié une partie de cette résine lors de la révélation.

Il va donc falloir exposer notre plaque aux UV (c'est ce qu'on appelle l'insolation de la plaque). Pour cela on utilise une insoleuse.

- **Révélation :**

Le révélateur est un produit chimique que l'on peut le fabriquer soi-même, puisqu'il s'agit d'une simple solution de soude caustique à 7g/l comme le Destop (produit pour déboucher les canalisations). Cependant on la trouve à l'achat déjà dosée. Sa manipulation nécessite des précautions comme le port de gants. L'efficacité du révélateur est meilleure quand il est tiède.

Le révélateur va dissoudre les zones de la résine qui ont été détruites pendant l'insolation.

La couche de cuivre va progressivement apparaître autour des pistes qui sont encore protégées par la résine.

Une fois la plaque révélée elle est sortie du bac et rincée à l'eau.

- **Graver le circuit imprimé**

Notre plaque est plongée dans un bac à graver qui contient un produit acide : le perchloreure de fer. Cet acide va dissoudre le cuivre autour des pistes protégées par la résine. Le Perchloreure de Fer suractivé est un liquide de couleur marron très foncé. On l'utilise pour graver les circuits imprimés car il a la particularité de détruire (par réaction chimique) tout le cuivre qui n'est pas recouvert de résine photosensible. Cela a pour conséquence de ne laisser sur la platine que les pistes qui nous intéressent.

Une fois que votre circuit est gravé, il reste à enlever les traces de résine qui subsistent sur les pistes protégées. Nous utiliserons pour cela du dissolvant, ou encore de l'acétone. Le but est d'obtenir un circuit avec des pistes bien nettes et sans aspérités.

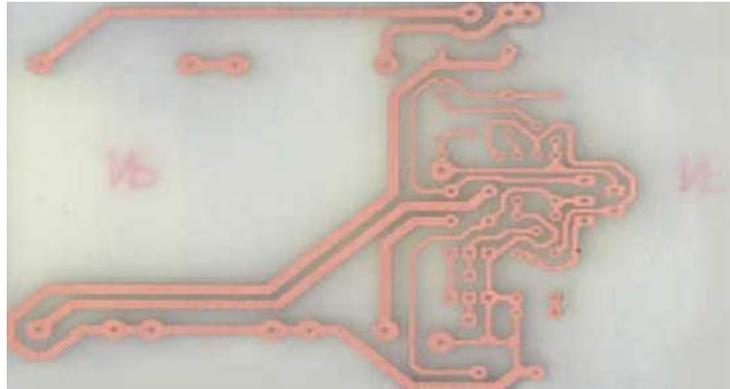


Figure I.17. Circuit Imprimé Final

II.10. Etude thermique d'une carte électrique

La plupart des dysfonctionnements électriques sont indétectables à l'œil nu. Ceux-ci sont provoqués par un échauffement excessif des composants. En effet, dans tout système électrique une partie de l'énergie électrique est dissipée en chaleur par effet Joule, provoquant macroscopiquement un échauffement du composant. Tous les composants électroniques sont sensibles à la température. Ils ont des performances médiocres en dehors de certaines limites de température et peuvent être détruits si la température est largement en dehors de ce domaine de fonctionnement.

La caméra infrarouge Therm-App TH permet de révéler les écarts de température des composants d'un système électrique, tel qu'une carte Arduino

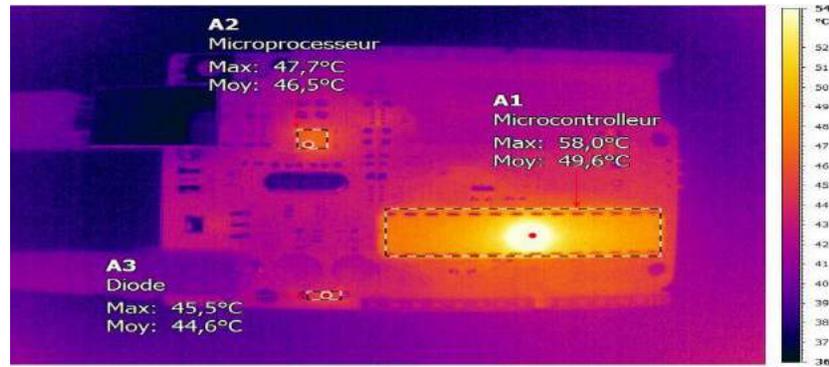


Figure I.18. Ecart de température des composants d'un système électrique par une caméra infrarouge

Pour éviter d'endommager les puces électroniques, il faut installer des systèmes de refroidissement.

Comme solution de refroidissement ont citent ; les méthodes classiques par convection naturelle et forcée avec des écoulements liquides au bien des circuits de refroidissement et refroidissement par caloducs

II.11. Conclusion

Pour conserver plus longtemps son système électronique il faut s'assurer qu'il fonctionne sous une température sécuritaire en adoptant des systèmes de refroidissement fiables et moins coûteux.

III.1. Introduction

Pour éviter d'endommager les composants électroniques, il faut installer des systèmes de refroidissement.

Dans tous les systèmes de refroidissement, la chaleur doit d'abord traverser par conduction thermique les épaisseurs des différentes couches de l'assemblage avant d'arriver au liquide de refroidissement. Un soin particulier doit donc être porté au choix des matériaux constituant ces couches et qui composent les différentes interfaces (brasures). Mais cela ne suffit pas si l'on n'arrive pas à évacuer correctement la chaleur qui arrive à la dernière couche en contact avec l'ambient. C'est pour cette raison que des dispositifs d'échange thermique avec l'ambient ont été développés et perfectionnés.

Il existe différentes technologies de systèmes de refroidissement qu'il est possible de les classer comme suit :

III.2. Systèmes de refroidissement actifs

Cette technique est basée sur le transfert de chaleur par convection forcée et nécessite l'utilisation d'une pompe mécanique pour assurer la circulation du fluide caloporteur ainsi qu'un circuit externe afin d'évacuer la chaleur du système vers l'extérieur.

III.3. Systèmes de refroidissement passifs

Ils ne nécessitent pas d'alimentation externe ce qui diminue le coup énergétique. Un refroidissement passif peut lui-même être classé en deux sections : direct ou indirect suivant que le fluide caloporteur soit ou ne soit pas en contact avec les composants électroniques.

Dans le cas du refroidissement direct, le fluide de refroidissement doit être diélectrique (résistivité électrique élevée, bonne résistance au claquage), il doit présenter une faible viscosité, une faible tension superficielle et enfin une bonne compatibilité chimique avec les matériaux.

Les facteurs intervenant lors de la conception de cette installation sont : la puissance du système, la nature du fluide caloporteur, la température d'entrée, etc.

III.4. Refroidissement à air

Les systèmes de refroidissement à l'air sont utilisés pour les éléments électroniques dont la contrainte thermique est faible. Les principaux avantages de ce système de refroidissement est sa relative simplicité et le faible coût de mise en œuvre technique.

On utilise l'air comme fluide caloporteur qui vient en contact avec des radiateurs sous forme pulsée (convection forcée) ou naturelle (convection naturelle).

III.4.1. Convection naturelle par air

Le refroidissement à air passif est d'abord constitué d'un dissipateur de chaleur dimensionné suivant la surface de refroidissement, celui-ci étant toujours choisi pour ses propriétés thermiques (bonne diffusivité et grande capacité thermiques, cuivre, aluminium).



Figure II.1. Système de refroidissement à air passif.

La chaleur émise par le composant s'épanouit dans le dissipateur thermique avant d'être dissipée dans l'air ambiant. L'ajout du dissipateur de chaleur peut donc grandement améliorer l'efficacité du refroidissement.

L'utilisation de ces systèmes permet d'augmenter le coefficient d'échange h jusqu'à un rapport 20 (de $25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ à $500 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) dans le cas d'une convection naturelle ($3000 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ dans le cas d'une convection forcée)

III.4.2. Convection forcée à air

Pour améliorer le transfert thermique vers le milieu ambiant, on peut utiliser un ventilateur qui augmente le débit d'air à travers la surface d'échange. Le bloc formé par le dissipateur et le ventilateur est souvent appelé ventirad (Ventilateur-Radiateur).

La technologie de refroidissement à air présente plusieurs avantages : la sécurité du fait qu'aucun liquide n'est nécessaire (pas de risque de corrosion), le coût est limité et la durée de vie est satisfaisante. Toutefois, le consensus actuel sur la méthode traditionnelle de refroidissement par air à haute puissance atteindra vite ses limites. L'utilisation de ventilateurs standards qui engendre un niveau de bruit nuisible assure un coefficient de transfert de chaleur maximum de $150 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, soit environ 1 W/cm^2 pour une différence de température de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ entre la source chaude et le milieu ambiant.



Figure II.2. Exemples de ventirad

III.5. Refroidissement par liquide caloporteur

Le refroidissement par liquide (souvent de l'eau additionnée) est une autre méthode d'évacuation de la chaleur vers le milieu ambiant. Le principal mécanisme de refroidissement par liquide est le transfert de chaleur par convection tout comme pour l'air. Le refroidissement par liquide est couramment utilisé pour le refroidissement des moteurs à combustion interne et dans les grandes installations industrielles comme les centrales à vapeur, les générateurs

hydroélectriques, les raffineries de pétrole et usines chimiques. D'autres utilisations incluent le refroidissement à huile lubrifiante dans les pompes, de même on peut trouver à l'intérieur des ordinateurs haut de gamme un refroidissement incluant un liquide. Les avantages d'utiliser un liquide de refroidissement par rapport à l'air sont liés à la possibilité de tirer profit de plus grandes valeurs de chaleur spécifique, de densité et de conductivité thermique, le coefficient d'échange convectif est ainsi beaucoup plus élevé.

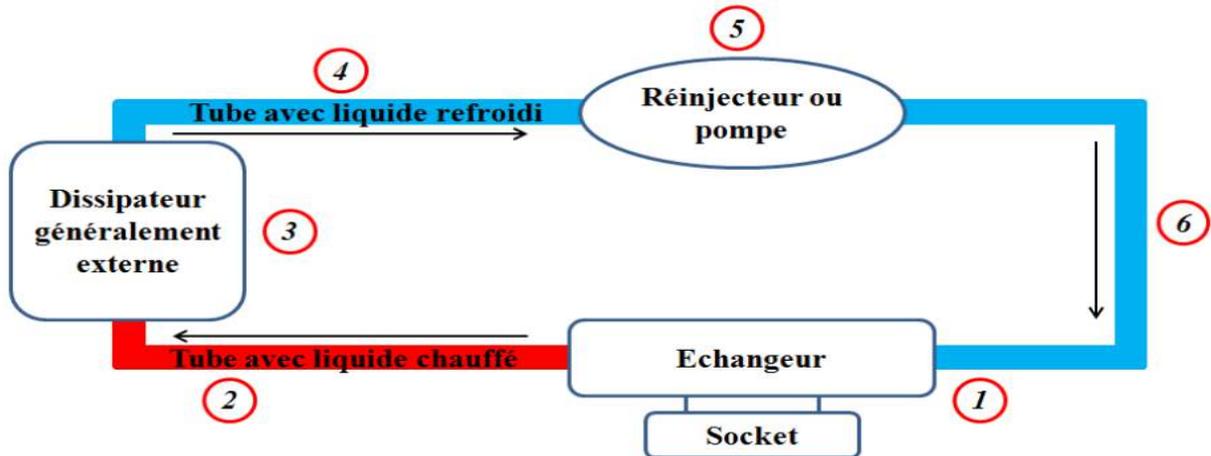


Figure II.3. Schéma simplifié de refroidissement par liquide

Ce système est plus efficace qu'un refroidissement à air et permet d'extraire la chaleur au plus près de la puce et de la dissiper de façon déportée dans un radiateur qui peut être large et performant.

III.6. Refroidissement par plaque à eau

Une technologie robuste consiste à utiliser une cavité assez proche de la source de chaleur dans laquelle le liquide circule de manière turbulente. Comme le liquide utilisé est souvent à base d'eau, cette technologie se nomme plaque à eau.

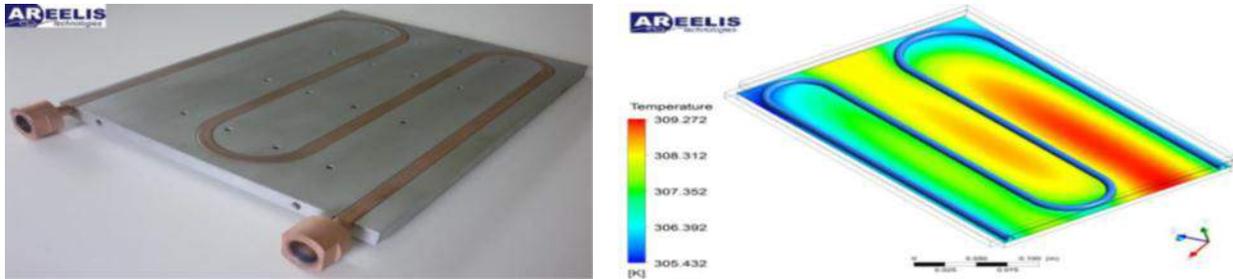


Figure II.4. Refroidissement liquide à plaque froide.

Une pompe est nécessaire pour contraindre le passage d'un fluide entre deux plaques après son passage dans un canal étroit afin de créer de la turbulence.

Les avantages de l'utilisation d'une plaque à eau

- Efficacité du transfert de chaleur : avec un échangeur de chaleur à plaque, le transfert de chaleur est élevé (les valeurs du coefficient de transfert de chaleur sont 3 à 5 fois plus élevées que celles d'un tubulaire simple).
- Fonctionnement régulé : par le biais d'un contrôle précis de la température de sortie, le débit peut être réglé de façon à optimiser l'efficacité du refroidisseur

III.7. Refroidissement par micro-canaux

Le développement rapide du domaine de la microélectronique suit la loi de Moore Avec l'intégration croissante de transistors à haute vitesse dans les appareils électroniques, la densité de dissipation thermique visée devrait atteindre 500 W/cm^2 pour les applications futures. Les micro-canaux qui sont des dispositifs très performants d'échange de chaleur sont venus suppléer les systèmes traditionnels. Les systèmes embarqués liés à l'aérospatiale par exemple, ainsi qu'à l'électronique médicale font largement appel aux échangeurs de chaleur à micro-canaux

Par rapport aux échangeurs de chaleur conventionnels, les échangeurs de chaleur à micro-canaux n'offrent pas seulement un bon coefficient de transfert thermique, mais offre également une excellente robustesse notamment devant la pression du liquide.

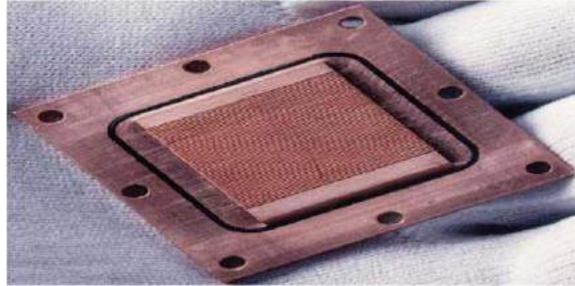


Figure II.5. Mini-échangeur avec Micro-canaux de 0.2mm de largeur

Les avantages de l'utilisation des micro-canaux

- Les micro-canaux agissent comme plusieurs micro-plaque-ailettes. Ils augmentent la surface d'échange. La résistance thermique de convection est donc réduite.
- Pour utiliser les micro-canaux, la semelle est supprimée, donc la résistance thermique de conduction est réduite.
- En faisant appel à la technologie des micro-canaux on peut réduire la taille de système de refroidissement.

III.8. Refroidissement par Spray cooling

Avec les liquides, plusieurs solutions sont possibles : utiliser le fluide comme simple caloporteur, augmenter les échanges convectifs par des jets, ou bénéficier de l'évaporation du liquide. Le refroidissement à l'aide d'un jet de liquide atomisé ou « spray cooling » exploite ces trois modes.

Le principe consiste à pulvériser un liquide proche de la paroi que l'on souhaite refroidir. Les échanges se produisent au niveau de :

- L'impact des gouttelettes du jet atomisé sur la paroi produisant un échange convectif élevé du fait de leur vitesse.
- L'évaporation de la gouttelette qui « capte » l'énergie thermique de la paroi pour compenser l'énergie utilisée pour le changement de phase (chaleur latente).

L'évacuation de la chaleur par le film liquide formé à la surface de la paroi

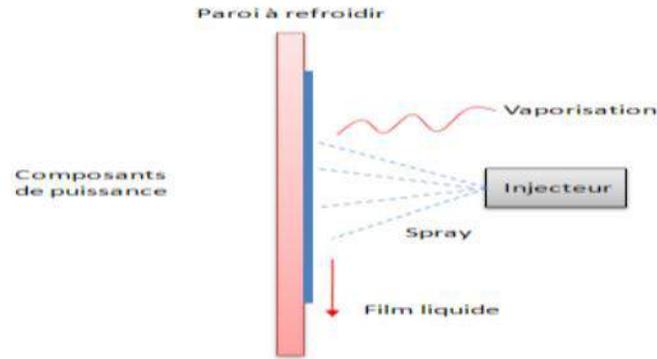


Figure II.6. Principe du spray cooling.

De manière plus précise le principe est le suivant. Lorsque, dans des conditions données de pression, on apporte un flux de chaleur suffisant à un liquide, sa température augmente jusqu'à une certaine valeur, la température d'ébullition, puis une partie de plus en plus grande passe à l'état gazeux, la température restant sensiblement constante. La quantité de chaleur nécessaire à cette transformation d'une unité de masse est l'enthalpie de vaporisation.

Ce phénomène est réversible et, lors du retour à l'état liquide (condensation), cette quantité de chaleur est restituée. La circulation d'un fluide entre deux points, à l'état de vapeur dans un sens et à l'état liquide dans l'autre, permet donc un transfert de chaleur de l'un vers l'autre. La température d'ébullition étant une fonction croissante de la pression, dans les systèmes à volume constant, la pression et la température croissent simultanément au fur et à mesure qu'une quantité plus grande de liquide se transforme en vapeur. La figure **II.7** montre les différents organes d'un système spray cooling: condenseur, compresseur, plaque et zone de pulvérisation.

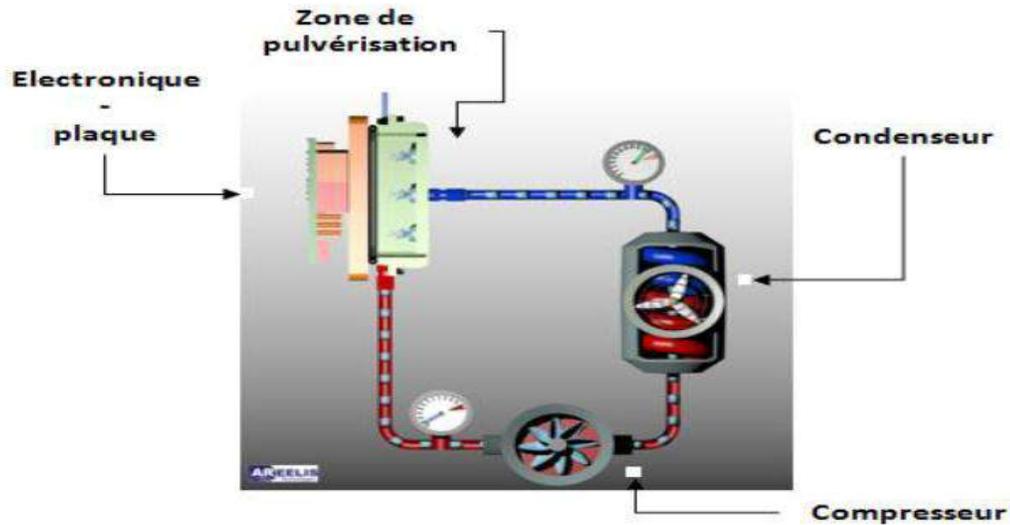


Figure II.7. Description des différents organes du spray cooling.

III.9. Refroidissement par jets

Le refroidissement par jets est une solution privilégiée dans les applications industrielles lorsque l'on cherche à extraire, ou bien à apporter un flux de chaleur intense sur une surface. Dans le domaine de l'aéronautique par exemple, le refroidissement par jets est utilisé pour refroidir les aubes de turbines ou bien les chambres de combustion des moteurs de nouvelles générations.

Ce type d'applications a mis en évidence la nécessité de recherches complémentaires sur le comportement d'un faisceau de jets et de leur interaction mutuelle.

En comparaison aux systèmes de refroidissement par spray, le refroidissement par jets est utilisés dans l'aéronautique sur des éléments de plus grandes surfaces (aubes de turbines, chambre de combustions...). L'élément à refroidir est alors mis en contact avec un échangeur dont les parois par les jets impactant (figure II.6.). Sur des éléments semi-conducteurs, et fluide diélectrique peut être utilisé en projection directe.

L'efficacité de ce système de refroidissement dépend du nombre de jets, du diamètre du jet, du fluide et du débit de liquide, mais la puissance évacuée par le refroidissement par jets est de l'ordre de quelques centaines de $W.cm^{-2}$. Ce type de refroidissement actif nécessite l'implantation d'un circuit hydraulique complet (pompe, échangeur), ainsi qu'un système de pressurisation du fluide.

Comme pour le spray-cooling, le réglage du débit du jet, de la zone d'impact et de la distance du jet sont des paramètres importants à prendre en considération et qui demandent un travail important en amont de l'installation du système.

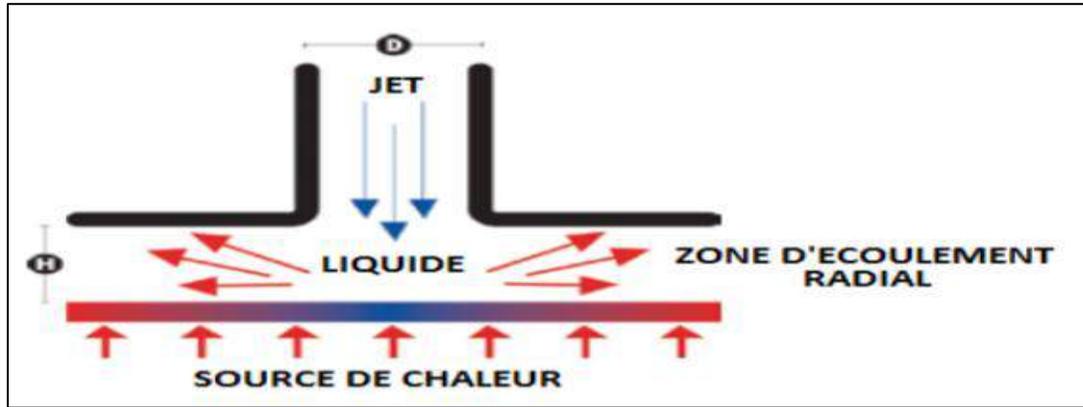


Figure II.8. Refroidissement par jets

III.10. Refroidissement diphasique (les caloducs)

Il est bien connu que le passage de la matière d'un état liquide à un état gazeux ou solide s'accompagne d'un échange de chaleur avec l'environnement. Le passage de l'état solide vers l'état liquide puis gazeux est endothermique, les passages inverses sont exothermiques. Les matériaux à changement de phase (plutôt pour solide liquide) sont utilisés dans le processus de refroidissement par évaporation d'un liquide ou d'un solide (sublimation) à basse température, ce processus de fusion ou de sublimation thermique absorbe la chaleur de l'objet à refroidir à température à peu près constante. Cette chaleur est ensuite restituée plus loin (dans le condenseur) à l'environnement, faisant condenser le gaz formé. Les températures de changement de phase peuvent être modifiées en agissant sur la pression de l'enceinte dans laquelle est enfermé le matériau diphasique. Ce cycle s'auto-entretient assurant ainsi un bon transfert thermique.

Les caloducs sont des dispositifs de transfert de chaleur qui combinent à la fois les propriétés de bonne conductivité thermique et de transition de phase pour gérer efficacement le transfert de chaleur entre deux interfaces.

Le principe du caloduc a été découvert en 1930, mais aucun usage industriel n'avait été trouvé. En 1963, au laboratoire de Los Alamos, grâce aux travaux du physicien nucléaire George M. Grover, une application de ce principe fut mise au point : le premier caloduc était alors né.

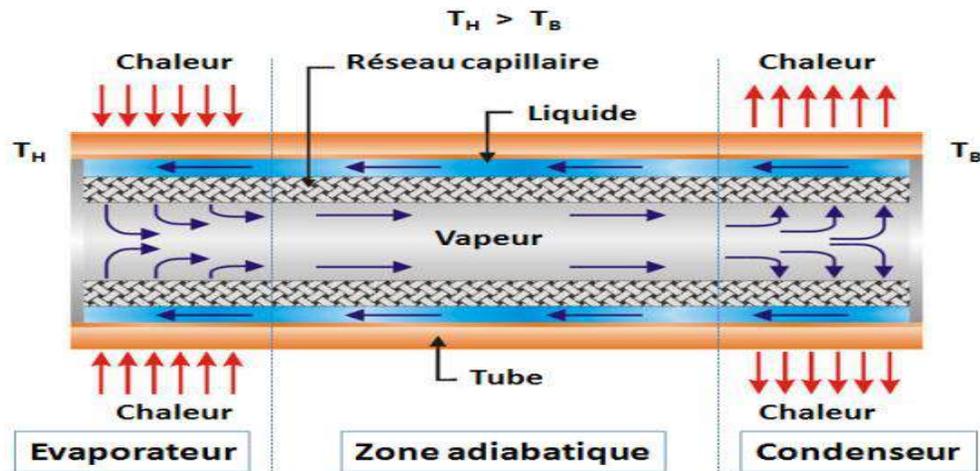


Figure II.9. Schéma de caloduc classique

La figure montre un schéma de caloduc classique. Le caloduc est un mince tube à deux parois métalliques fermées. Un liquide est injecté à l'intérieur. Plusieurs types de liquide peuvent servir de fluide caloporteur, ce qui inclut le potassium, le sodium, l'indium, le césium, le lithium, le bismuth, le mercure, l'eau, l'alcool de bois, l'acétone, les réfrigérants (fréons) l'azote, l'oxygène et d'autres sels inorganiques [20].

Dans ce caloduc classique, il y a trois grandes zones : Evaporateur, zone adiabatique, condenseur. L'échange thermique suit cinq étapes principales :

1. Dans l'évaporateur, la chaleur extraite de la source traverse la paroi du tube et fait chauffer le liquide enfermé.
2. Dans l'évaporateur, le liquide est vaporisé. Un gaz se forme.
3. Comme la température d'évaporateur (T_H) est plus grande que celle du condenseur (T_B), la pression dans l'évaporateur est plus grande que celle du condenseur. La vapeur s'écoule donc vers condenseur en traversant la zone adiabatique.
4. Quand la vapeur atteint la zone du condenseur, celle-ci se liquéfie.
5. Le liquide retourne par capillarité à l'évaporateur pour subir une nouvelle évaporation.

Les principaux avantages du caloduc sont

- Haute conductivité thermique. Le principe du caloduc repose sur la transition de phase du fluide qui absorbe et libère de façon cyclique de l'énergie sous forme de chaleur latente. Ce phénomène traduit en conductivité thermique équivalente peut atteindre des valeurs 100 fois supérieures à celles du cuivre.
- Le caloduc peut être utilisé pour diffuser la chaleur et augmenter ainsi la surface d'échange avec l'environnement.
- Le caloduc ne nécessite pas un grand écart de température (entre évaporateur et concentrateur) pour l'extraction de la chaleur.
- Sa durée de vie est élevée : Il s'agit d'un tube fermé, sans besoin d'ajouter du fluide,
- Il n'y a pas de pièces mobiles, ce qui le rend fiable et silencieux.

III.11. Diamant CVD

Mise à part le cristal semi-conducteur, dont le choix est essentiellement guidé par les propriétés électriques et fonctionnelles, les couches qui forment l'assemblage (support, boîtier et refroidissement) sont choisies pour leurs propriétés thermiques, et souvent pour réaliser une isolation électrique. L'agencement de l'ensemble des couches doit aussi prendre en compte les coefficients de dilation pour assurer une tenue mécanique et éviter des vieillissements prématurés.

Le diamant présente des propriétés physico-chimiques exceptionnelles. C'est théoriquement le meilleur isolant connu à ce jour ($\rho=1014\Omega \cdot \text{cm}$ $E_c=10\text{MV/cm}$) et il présente une conductivité thermique exceptionnelle de $2000\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ (5 fois la conductivité thermique du cuivre à température ambiante). Ce matériau est aujourd'hui réalisé de manière synthétique par dépôt chimique en phase vapeur CVD. Cela permet d'obtenir des substrats de surfaces importantes avec une bonne reproductibilité des caractéristiques.

III.12. Différence entre le refroidissement par huile et le refroidissement par eau

Le refroidissement à huile est une méthode de refroidissement permettant de refroidir silencieusement (sans ventilateur ou pompe) tous les composants d'un ordinateur. Le boîtier est rempli d'huile minérale ou d'huile végétale. Le refroidissement consiste à immerger tous les composants dans de l'huile ; Ces liquides n'étant pas des conducteurs électriques, permettent de dissiper la chaleur dégagée par les composants uniformément dans le liquide. On peut ajouter un ventilateur pour mieux dissiper la chaleur de l'huile dans l'air ambiant.

Le refroidissement par eau (l'eau est un liquide caloporteur):

Un dispositif faisant circuler de l'eau, à l'aide d'une pompe dans un circuit qui passe dans un ou plusieurs water blocks. Ces water blocks, situés sur les composants à refroidir, permettent un transfert thermique entre l'eau et le composant.

III.13. Conclusion

Pour conserver plus longtemps les composants électroniques il faut assurer un bon refroidissement en faisant le choix de la meilleure technologie avec le moindre coût.

Il est possible que pour la même technologie on peut améliorer un système de refroidissement en faisant varier les paramètres géométriques ou thermodynamiques ou encore les paramètres physico-chimiques.

Il est donc nécessaire de faire des essais expérimentaux pour prendre le meilleur choix.

Des méthodes numériques ont été conçues pour minimiser ou encore optimiser ces expériences sous forme de logiciels informatiques ou des codes commerciaux numériques.

IV.1. Introduction

Depuis quelques années, l'accroissement de la puissance des ordinateurs et le développement des méthodes numériques ont permis de conduire des calculs tridimensionnels de l'écoulement dans plusieurs configurations, tout en tenant compte de l'effet de la viscosité et de la turbulence. Ce progrès a fait de la modélisation numérique de l'écoulement ou CFD (Computational Fluid Dynamic) un outil de plus en plus important pour le développement et l'optimisation du dimensionnement de différents procédés industriels. Parmi le large éventail des codes de calcul de l'écoulement connus on peut citer : CFX, Fluent, Numeca, Star-CD, Openfoam etc... Dans ce document on présentera deux outils de simulation numérique qui peuvent être utilisés indépendamment l'un de l'autre. Le premier est le logiciel ANSYS ICEM CFD qui est utilisé pour le dessin de la géométrie et la génération du maillage. Le deuxième est le code ANSYS CFX qui permet la simulation numérique de l'écoulement ; l'utilisation du pré-procésing, la résolution et le post-procésing est démontrée.

IV.2. Présentation de l'ANSYS ICEM CFD

Ce module permet de préparer la configuration géométrique du problème étudié et de générer le maillage de manière assez conviviale bien qu'assez simple. Dans le cas de notre travail on a fait recours à l'ICEM CFD, l'un des avantages de ce logiciel, est sa simplicité ainsi que sa robustesse envers la réalisation des géométries les plus complexes. Pour le maillage, ICEM CFD utilise des structures mono ou multi-blocs en fonction de la géométrie, il permet de générer deux types de maillages, entre autre le maillage tetrahedral et le maillage hexahedral. Pour chaque configuration (géométrie – maillage) un fichier de données (*.cfx5) doit être exporté vers CFX. L'interface graphique de l'ANSYS ICEM CFD est montrée sur la figure IV.1 et contient les éléments suivants :

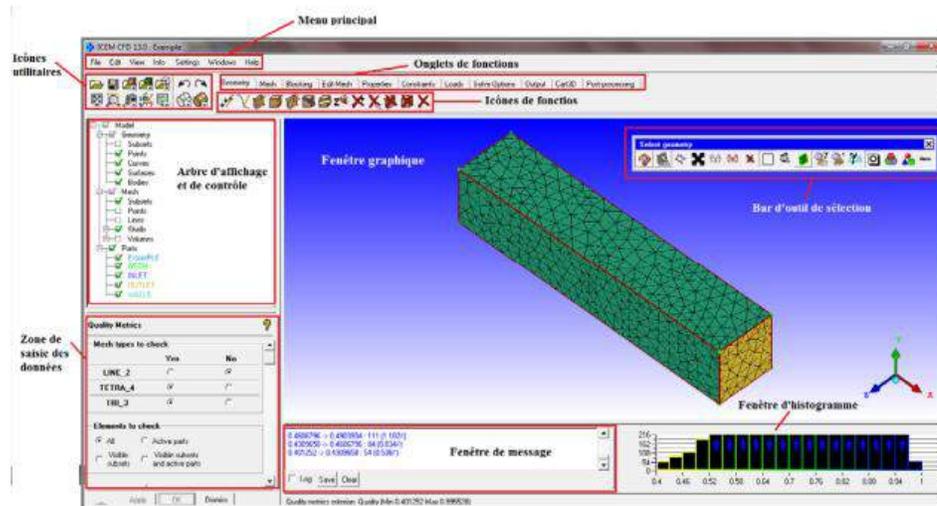


Figure 2. Interface graphique de l'ANSYS ICEM CFD

IV.2.1. FONCTIONS

La fonctionnalité principale pour l'ensemble du processus de génération de grille est accessible via les onglets de fonctions qui incluent: la géométrie, le maillage, le blocage, l'édition du maillage, la sortie, le post-traitement, etc.

a) Menu Geometry (géométrie)

Le menu Géométrie comprend des fonctions pour la création, l'édition et la réparation de la géométrie.



Les fonctions et utilitaires de ce menu incluent : Créer un point - Créer / Modifier la courbe - Créer / Modifier la surface - Créer un corps - Réparation de géométrie (built topology qui sera expliquée ultérieurement) - Transformer la géométrie - Restaurer les entités dormantes- Supprimer le point, - supprimer la courbe - supprimer la surface - supprimer le corps - supprimer toute entité.

b) Menu Mesh (Maillage)

Le menu Mesh contient les modules de maillage CFD ANSYS ICEM ainsi que des options pour définir des tailles de mailles.



Les boutons ci-dessus conduiraient à différents modules de génération de maillage, que la société ANSYS ICEM CFD conserve et développe:

Configuration du maillage global - Configuration du maillage partiel - Configuration du maillage de surface - Configuration du maillage de la courbe - Créer une densité de maillage - Définir les connecteurs - Mailler une Courbe – Calculer le Maillage.

c) Le menu Bloking (Maillage par bloc)

Le menu Blocage contient les fonctions nécessaires pour créer une topologie pour les mailles hexaédriques structurées en blocs. Un fichier de bloc doit être chargé ou un bloc initial créé pour rendre tous les éléments actifs



d) Le menu Edit Mesh (Éditer le maillage)

Contient les outils nécessaires au montage du maillage, à la fois automatisé et manuel.



Remarque : L'édition de maillage est nécessaire pour améliorer sa qualité et possède les outils nécessaires pour modifier tous les éléments qui ne sont pas similaires à l'élément idéal.

e) Menu Output (menu Sortie) :

Contient tous les outils nécessaires pour configurer le modèle et écrire au solveur :



Ce menu permet de Sélectionner le Solveur, Déterminer les Conditions aux limites, Modifier les paramètres et Ecriture au fichier d'Entrée

IV.2.2. L'arbre de commande d'affichage

L'arborescence de contrôle d'affichage, également appelée l'arborescence d'affichage, dans la partie gauche de l'écran, permet de contrôler l'affichage par partie, entité géométrique, type d'élément et sous-ensembles définis par l'utilisateur.

L'arbre est organisé par catégories. Chaque catégorie peut être activée ou désactivée. Chaque catégorie peut être agrandie.

Étant donné que certaines fonctions ne sont exécutées que sur les entités représentées, l'arbre de modèle est une caractéristique très importante à utiliser pour isoler les entités particulières à modifier.

a) Geometry : Contrôle l'affichage des points, des courbes, des surfaces et des corps (volumes de matériau). Les sous-ensembles peuvent également être créés, affichés et modifiés. Un sous ensemble donné peut contenir un nombre quelconque de différents types de géométrie. Une entité donnée peut appartenir à plus d'un sous-ensemble.

b) Mesh : Contrôle de l'affichage de tous les types de maille: points (noeuds), lignes (barres), coquilles (tris ou quads) et volumes (tetras, pyramides, prismes, hexas). Les sous-

ensembles de cette catégorie sont les mêmes que pour la géométrie, mais ne contiennent que des types d'éléments maillés.

c) Parts : Toutes les entités, géométrie ou maillage, sont associées à une partie donnée. Une entité ne peut appartenir à plus d'une partie. Avec cette association, les groupes d'entités, quel que soit leur type, peuvent être activés et désactivés. Les pièces ont une couleur spécifique pour les distinguer des autres pièces. Les pièces peuvent être faites sous-catégories d'assemblages, créées par la sélection de la souris droite sur "Pièces". Les pièces individuelles peuvent ensuite être glissées et déposées dans l'assemblage. L'activation ou la désactivation de l'ensemble active ou désactive toutes les pièces de l'ensemble comme pour toute catégorie / sous-catégorie.

IV.2.3. Build Topology (Réparer la géométrie)

La fonction "Build Topology" Crée une série de courbes et de points à partir des bords extérieurs et des coins selon la proximité des bords des surfaces entre eux. Si les courbes sont en dessous d'une tolérance géométrique, elles sont fusionnées ensemble en tant qu'une. Les courbes sont alors colorées différemment pour illustrer leur connectivité aux surfaces, ces couleurs peuvent être employées pour déterminer tous les lacunes ou trous dans la géométrie :

Jaune ; Courbes simples ou à bord libres (ceux adjacentes à une surface seulement)

Rouge ; Courbes à double bord (courbes à côté de deux surfaces)

Bleu ; Courbes à bord multiples (courbes à côté de trois surfaces ou plus)

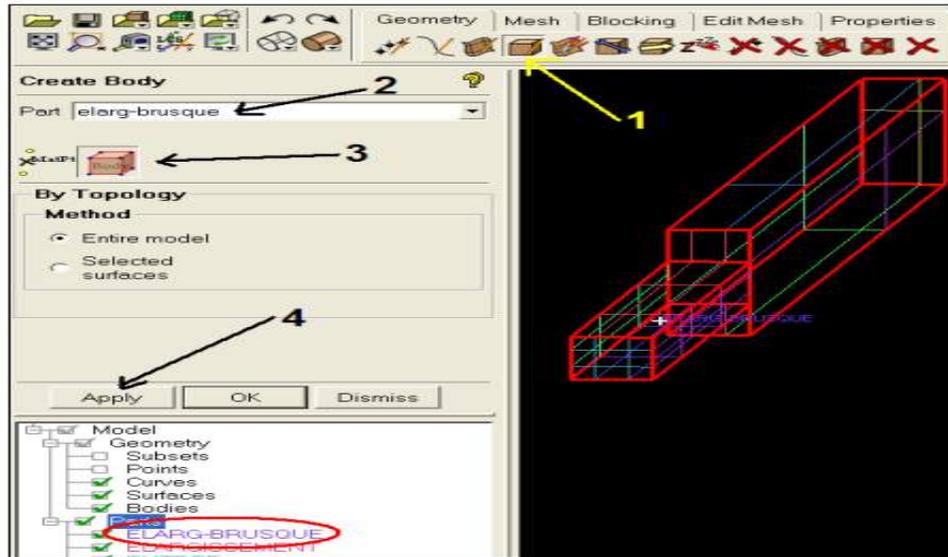
Vert ; Courbes non attachées à la surface.

Tolérance

Cette tolérance est définie dans les unités du modèle, et commande comment exactement l'utilisateur veut traiter la proximité de surface à surface.

IV.2.4. Creat Body (Créer le volume)

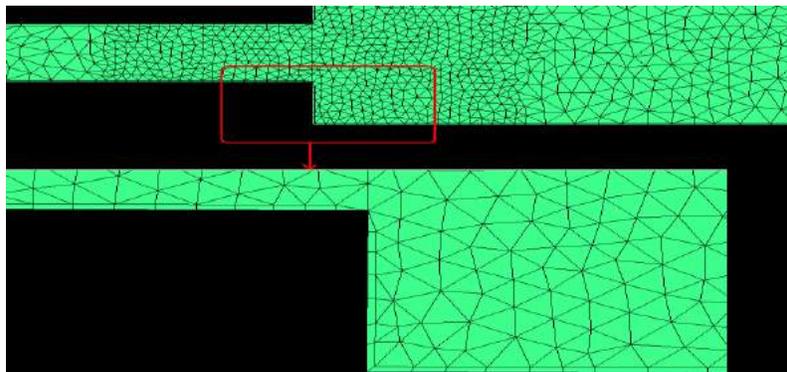
Suivre les instructions de la figure 14 pour créer un volume



IV.2.5. Meshing (Le Maillage) :

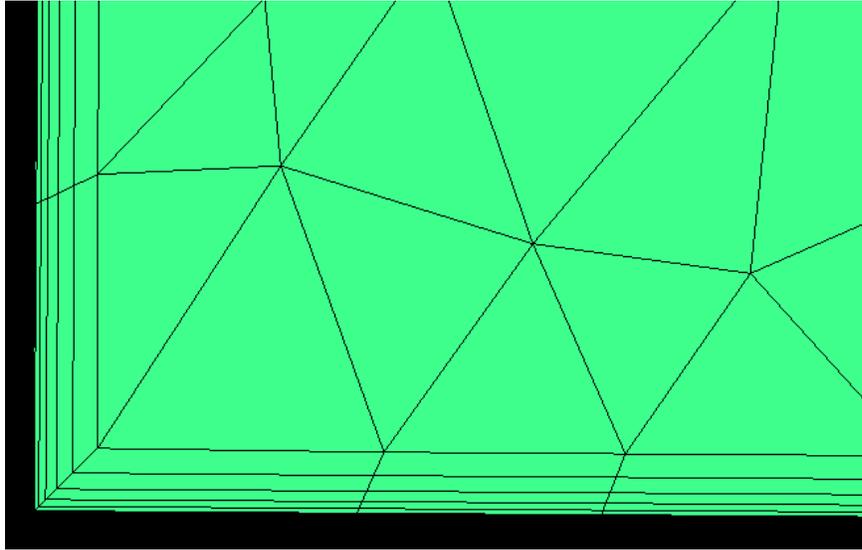
Le domaine de calcul est divisé en une série de sous domaines appelés volumes de contrôle. Ces volumes de contrôle enveloppent tout le domaine de calcul sans chevauchement, de telle façon que la somme de leurs volumes soit égale au volume du domaine de calcul. Un point est positionné au centre de chaque volume de contrôle où les variables inconnues doivent être calculées.

Dans ce qui suit nous allons montrer comment faire un maillage tétraédrique avec prisme. Le maillage sera raffiné dans la région de changement de section et près des parois.



IV.2.6. Prismes :

Pour terminer on va raffiner davantage le maillage près des parois, la couche mince des prismes



IV.2.7. Exporter le fichier du maillage :

Finalement, il faut exporter un fichier de données vers un code CFD, dans notre cas il sera ANSYS CFX.

Les principaux fichiers produits par l'ANSYS ICEM sont les suivants :

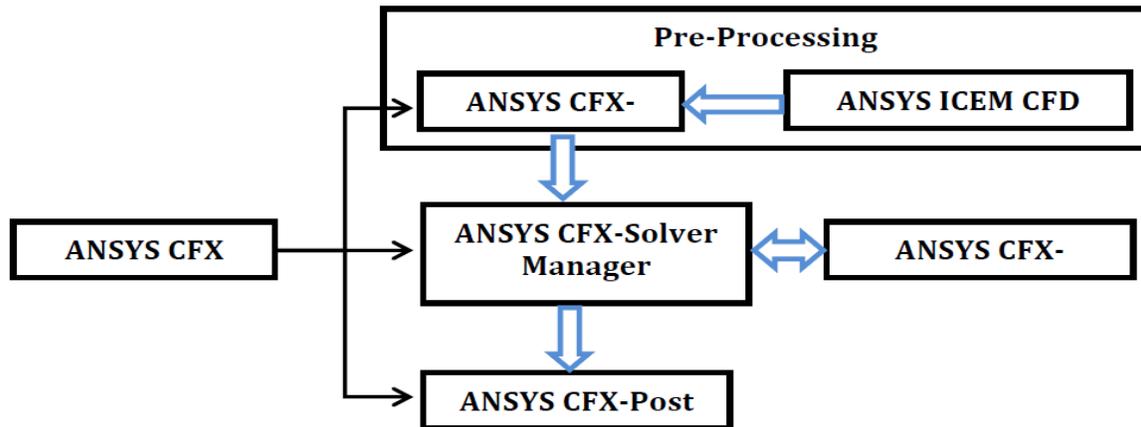
- (* .prj) Fichier d'arrangement du projet.
- (* .tin) Fichier de la géométrie.
- (* .uns) Fichier du maillage non structure.
- (* .cfx5) Fichier d'entrée pour l'ANSYS CFX.

IV.3. Deuxième partie : Simulation numérique

Les principes généraux pour utiliser ANSYS CFX seront montrés, y compris l'installation des modèles physiques, lancer l'ANSYS-CFX-Solver et visualiser les résultats.

IV.3.1. Structure du code ANSYS CFX

ANSYS CFX se compose de trois modules qui communiquent entre eux comme montré sur la figure 28. Un logiciel qui permet la réalisation de la géométrie et du maillage est nécessaire



pour exécuter une analyse de CFD. Dans notre cas le logiciel ANSYS ICEM CFD est utilisé.

IV.3.2. CFX-Pre

CFX-Pre offre une interface moderne, cohérente et intuitive pour la définition des problèmes complexes de CFD. CFX-Pre peut lire plusieurs maillages d'une variété de sources.

L'utilisateur est guidé dans la définition physique en se déplaçant le long de la barre d'outils 'Define', qui présente les étapes principales dans la définition du problème. La création et la modification des objets physiques sont présentées par une interface utilisateur avec les panneaux tabulés fournissant l'accès facile aux détails des modèles. La définition en évolution des problèmes est montrée dans le 'object selector', qui montre les objets principaux qui peuvent être choisis pour accéder à n'importe quelle étape de la définition du problème. Les erreurs qui se produisent pendant la définition ou la modification du problème sont montrées à l'aide d'un codage de couleur dans le 'object selector', ou par l'intermédiaire des messages descriptifs dans le panneau de message physique. Une fois que la définition de problème est complète, il faut exporter un fichier de définition (*.def) vers le module CFX-Solver pour avoir la solution du problème.

IV.3.3. CFX-Solver

Il permet de résoudre les équations de l'hydrodynamique modélisant le problème physique étudié. Toutes les spécifications du problème produites dans le module CFX-Pre sont résolues par CFX Solver pour une erreur bien définie ou un nombre d'itération maximale. Tous les résultats sont stockés dans un fichier (*.res).

IV.3.4. CFX- Solver Manager

Il fournit une interface graphique au CFX-Solver afin de fournir des informations sur l'évolution de la solution et une manière facile de le commander. Ces fonctions principales sont les suivantes :

- Indiquer les dossiers d'entrée au solver CFX-5;
- Lancer ou arrêter la simulation avec le solver CFX-5;
- Modifier certains paramètres dans le fichier de définition;
- Surveiller la progression de la solution avec le solver CFX-5;
- Lancer une autre simulation en parallèle.

IV.3.5. CFX-Post

Il est conçu pour permettre la visualisation facile et le traitement quantitatif des résultats de simulations. Il dispose d'outils graphiques très puissants permettant la présentation et l'analyse des résultats en forme :

- Lignes de courant, Champ de vitesse...
- Visualiser différents paramètres définis par l'utilisateur
- Définir et calculer des nouvelles variables
- Exporter les résultats en différents formats, pour tracer l'évolution des variables avec d'autres logiciels graphiques.

V.1. Introduction

La simulation numérique des écoulements et du transfert de chaleur et de masse est devenue un outil indispensable et privilégié dans plusieurs disciplines. Cette technique est surtout utilisée pour tester et départager les avants projets. Les projets retenus seront impérativement vérifiés expérimentalement en soufflerie. Depuis les années 80 les prévisions des écoulements des fluides par la (CFD) ont été employés par habitude dans la science d'engineering pour produire des résultats utiles.

V.2. Résolutions numériques

La plupart des phénomènes physiques sont gouvernés par des équations différentielles partielles telles que le transfert de masse et de chaleur. Les méthodes numériques sont très utiles dans la résolution des équations aux dérivés partielles, car le non linéarité de ces équations et la complexité des problèmes rend leur résolution difficile par les méthodes analytiques.

Les trois grandes méthodes numériques utilisées dans les codes tridimensionnels sont les volumes finis, les différences finies et les éléments finis.

V.2.1. Méthode des différences finies

Consiste à discrétiser les équations continues aux nœuds d'un maillage prédéfini en calculant chaque dérivée partielle à l'aide de séries de Taylor tronquées pour obtenir des équations linéaires reliant la valeur des inconnues en un nœud aux valeurs de ces mêmes inconnues aux nœuds voisins.

V.2.2. Méthode des éléments finis

La technique des éléments finis discrétise l'espace à l'aide d'éléments géométriques simples (triangles ou quadrangles en général). Comme elle permet de modéliser des géométries très complexes, elle est parfois préférée à la méthode des volumes finis. Ensuite, la forme forte des équations est remplacée par la forme faible dans laquelle les inconnues sont approximées par une combinaison linéaire de fonctions de base dont le support est un des éléments.

V.2.3. La méthode des volumes finis

Cette méthode consiste à subdiviser le domaine physique de l'écoulement en éléments de volumes plus ou moins réguliers dans lesquels les équations, décrivant l'écoulement, écrites sous une forme conservative, sont intégrées.

Le but de cette méthode est de convertir l'équation différentielle générale en un système d'équations algébriques en mettant en relation les valeurs de la variable considérée ϕ aux points nodaux adjacents d'un volume de contrôle typique. Cela est obtenu par l'intégration de l'équation différentielle gouvernante dans ce volume de contrôle avec l'approximation des différents termes (convection, diffusion et source).

La méthode des volumes finis a été décrite pour la première fois en 1971 par Patankar et Spalding et publiée en 1980 par Patankar [40].

V.3. Définition de la CFD

On peut définir La CFD (Computational Fluids Dynamics) comme l'obtention d'informations qualitatives et quantitatives sur les manières dans lesquelles les fluides se comportent en des situations données. Pour cela on utilise d'un côté des calculateurs électroniques (PC's, stations de calcul ou super computer vectoriel) et d'un autre coté une variété de technologies tels que: Les mathématiques ; l'informatique; l'engineering et la physique du problème étudié.

Ces outils doivent être rassemblés pour fournir les moyens de modélisation des écoulements des fluides. La qualité et l'exactitude de ces résultats dépend essentiellement du :

- Niveau de complexité du problème étudié.
- Des logiciels utilisés (pre-processing, simulation et post-processing).
- De la machine de calcul disponible (capacité de stockage, mémoire vif et fréquence de l'horloge du processeur).
- De la compétence et le savoir-faire de l'utilisateur (maîtrise et spécialisation dans le domaine étudié et expérience dans le domaine de la simulation numérique).

V.4. Modèle de turbulence

Le code de calcul ANSYS CFX est doté de plusieurs modèles fermeture basée sur l'approche statistique (RANS):

- ◆ Le modèle k- ϵ et ses variantes.

- ◆ Le modèle de turbulence k- ω standard.
- ◆ Le modèle k- ω SST (Shear-Stress Transport).

On s'intéresse à ces modèles de turbulence, puisque Ansys CFX propose d'autres modèles tels que (LES, Spalart-Allmaras, ...)

V.5. Equation gouvernantes

Les équations de la conservation peuvent se généraliser sous une seule forme d'équations aux dérivées partielles. Si on note toute variable générale mesurée par le symbole ϕ , l'équation différentielle générale s'écrit :

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

Où :

Γ : coefficient diffusion.

S : terme source.

\mathbf{K} : vecteur vitesse.

On peut considérer que les équations suivantes décrivent le phénomène d'écoulement à l'intérieur d'un échangeur de chaleur :

V.5.1. Equation de continuité

Dans le cas d'un milieu continu, s'il n'y a ni apparition, ni disparition de matière au cours du mouvement, le flux de masse est alors nul à travers une surface fermée (théorème de la divergence). L'équation de conservation de la masse s'écrit :

$$\nabla(\rho\vec{V}) = 0$$

Equations dimensionnelles :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

V.5.2. Équation de quantité de mouvement

D'après la loi fondamentale de la mécanique, les forces appliquées à un système sont les sources de quantité de mouvement. Ces forces se divisent en deux catégories :

- Les forces de volume qui proviennent des forces extérieures : forces de pesanteur, forces d'Archimède (convection mixte et naturelle) et forces électromagnétiques (dans les fluides chargés électriquement).
- Les forces de surface : définies par le tenseur des contraintes. Dans le cas où μ la viscosité dynamique est constante.

L'équation de bilan de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\vec{V} \cdot \nabla T = \frac{1}{\rho C_P} \vec{V} \cdot \nabla P + \frac{\nu}{Pr} \Delta T$$

Avec :

ν : viscosité cinématique du fluide [m²/s]

C_p : capacité calorifique à pression constante [J/kg K]

Pr : nombre de Prandtl.

L'équation de bilan de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\nabla(V \otimes V) = \rho g - \nabla P + \mu \Delta V$$

Où p est la pression

Equations dimensionnelles :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

II.5.3. Équation d'énergie

D'après le premier principe de la thermodynamique, les sources d'énergie appliquées au système sont formées par :

- La puissance des forces extérieures au domaine,
- Le flux de chaleur fourni par le milieu extérieur à travers la surface,
- La puissance calorifique créée à l'intérieur du domaine (sources volumiques).

La distribution de température et le mouvement d'un fluide sont reliés par l'expression suivante

$$\vec{V} \cdot \nabla T = \frac{1}{\rho C_P} \vec{V} \cdot \nabla P + \frac{v}{P_r} \Delta T$$

V.6. Cas étudié

Cette partie présente les différents paramètres qui caractérisent le comportement du fluide le long du micro-canal. Les résultats de la simulation numérique ont été validés avec les travaux de Suabsakul Gururatana

Suabsakul Gururatana a fait une simulation numérique et une étude expérimentale sur la convection forcée dans un micro-canal avec des fossettes dans la paroi inférieure, il a étudié thermiquement et dynamiquement un écoulement convectif laminaire pour un nombre de Reynolds < 350. Cette étude a comme objectif d'améliorer le transfert de chaleur dans les micro-canaux destinés au refroidissement des composants électroniques.

Il s'agit de :

- Un échangeur de chaleur de conduit rectangulaire il a 4mm de longueur, 0.2mm de largeur et de 0.1mm d'épaisseur.
- Le même échangeur avec fossettes en bas:
 - Rayon de fossette $r = 0.1\text{mm}$
 - Distance entre chaque centre de fossette est de 0.74mm

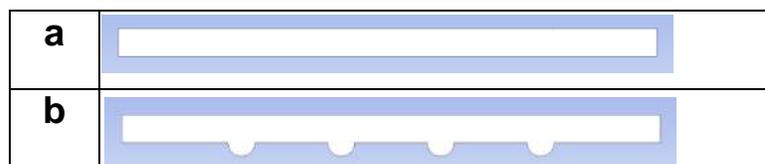


Figure II.2 : Géométrie des différents micro-canaux étudiés.

V.6.1. Représentation des différentes géométries avec leurs maillages et le nombre d'éléments

➤ Géométrie (a)

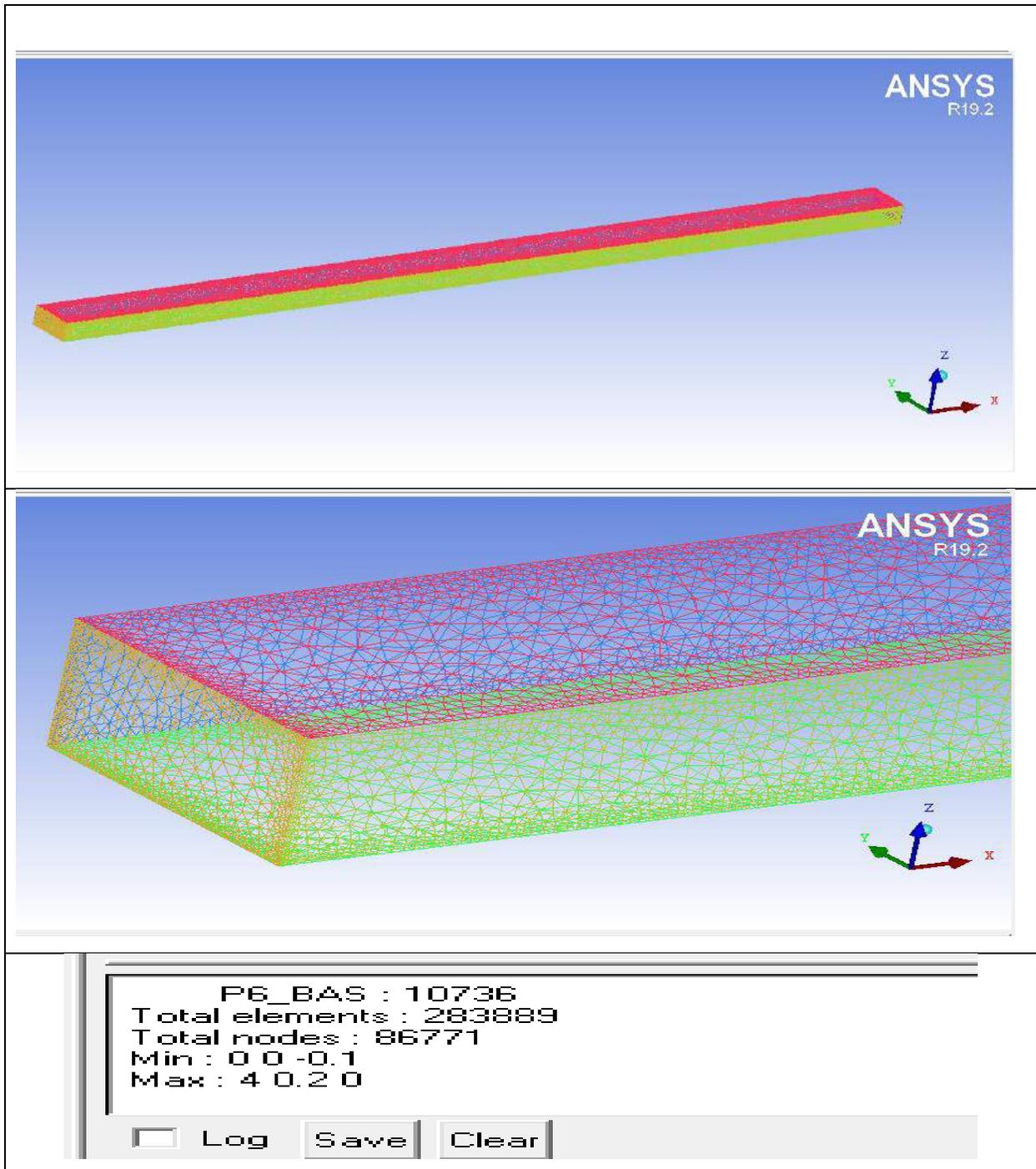


Figure Géométrie a)

➤ Géométrie (b)

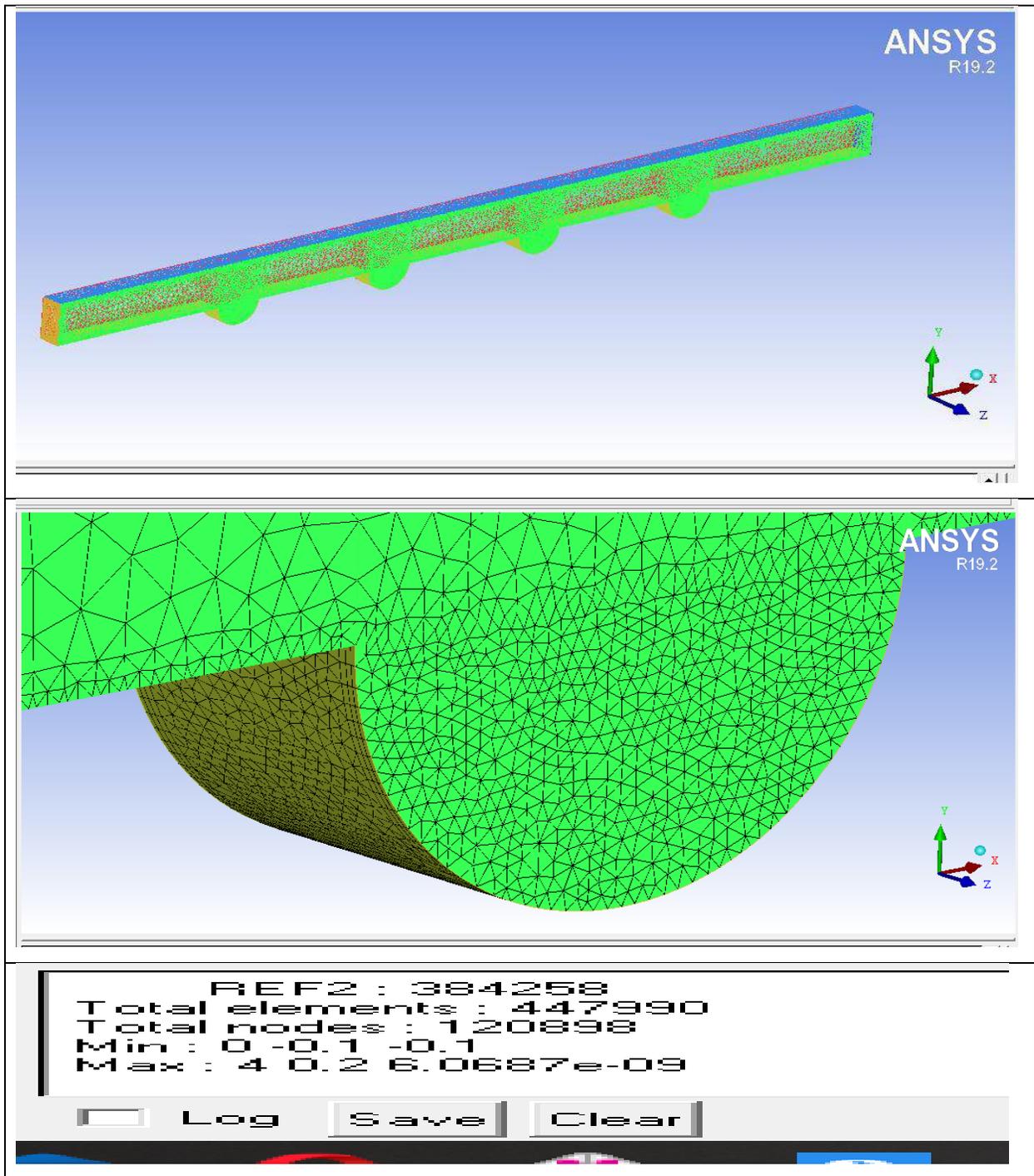
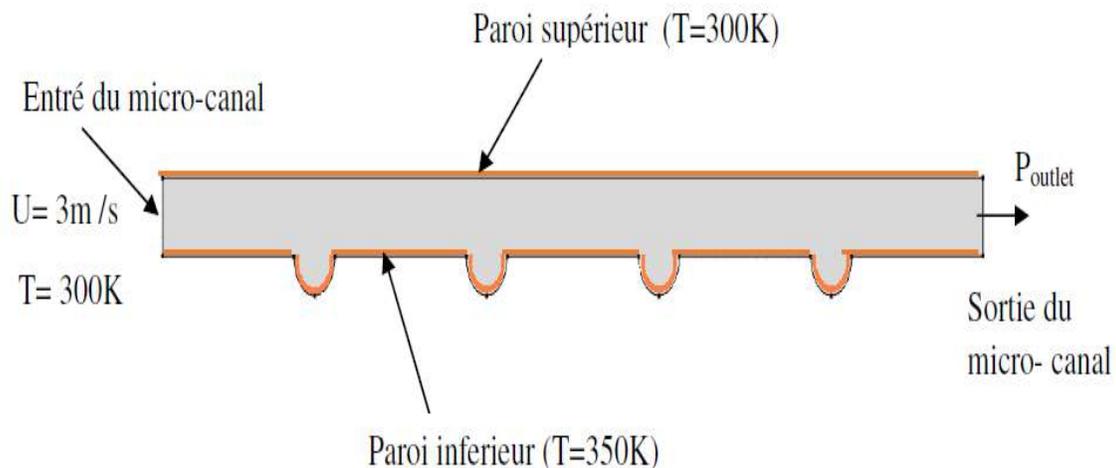


Figure Géométrie b)

V.6.2. Conditions aux limites

- Une température $T=350\text{K}$ à la paroi inférieure
- Une température $T=300\text{K}$ à la paroi supérieur
- Autres parois sont adiabatiques
- On définit dans chaque entrée de micro canal une vitesse initiale de 3m/s pour l'eau qui circule dedans et qui sort avec une pression P .



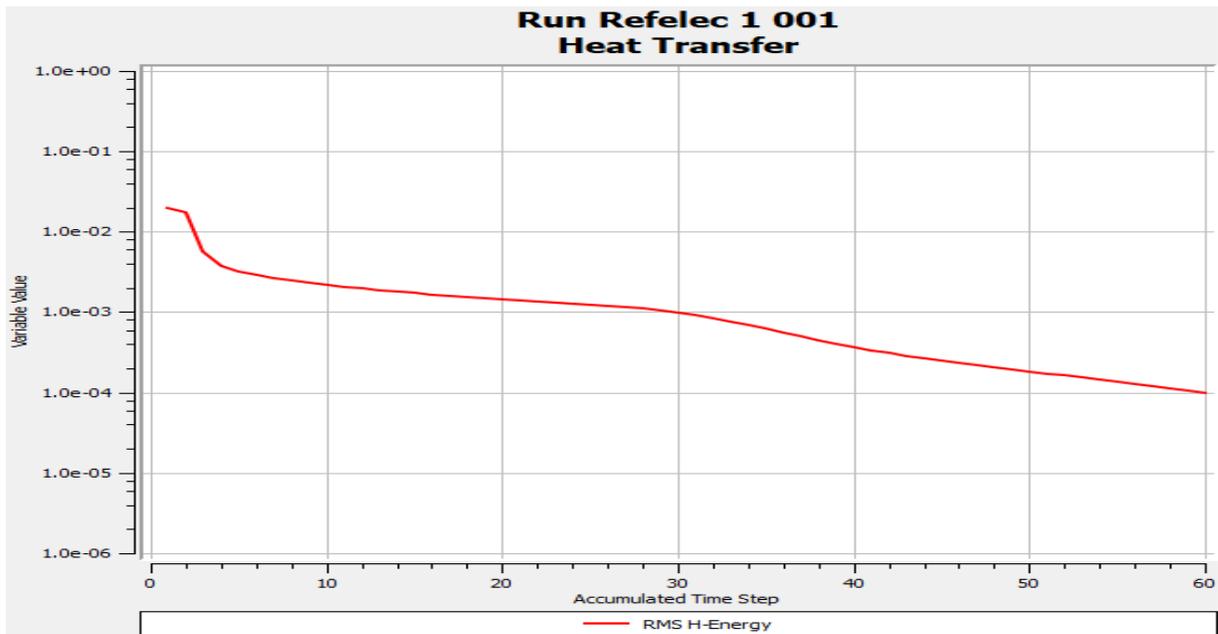
V.6.3. Résultats et discussions

V.6.3.1. Test de convergence

Pour avoir des résultats numériques valables (proches des valeurs exactes) ; il faut que notre méthode numériques satisfait le critère de convergence.

Le type de maillage choisit pour la géométrie étudiée est tetrahedral et un raffinement au niveau des sections additives.

Les résultats obtenus seront discutés en présentant les paramètres dynamiques et les paramètres thermiques.



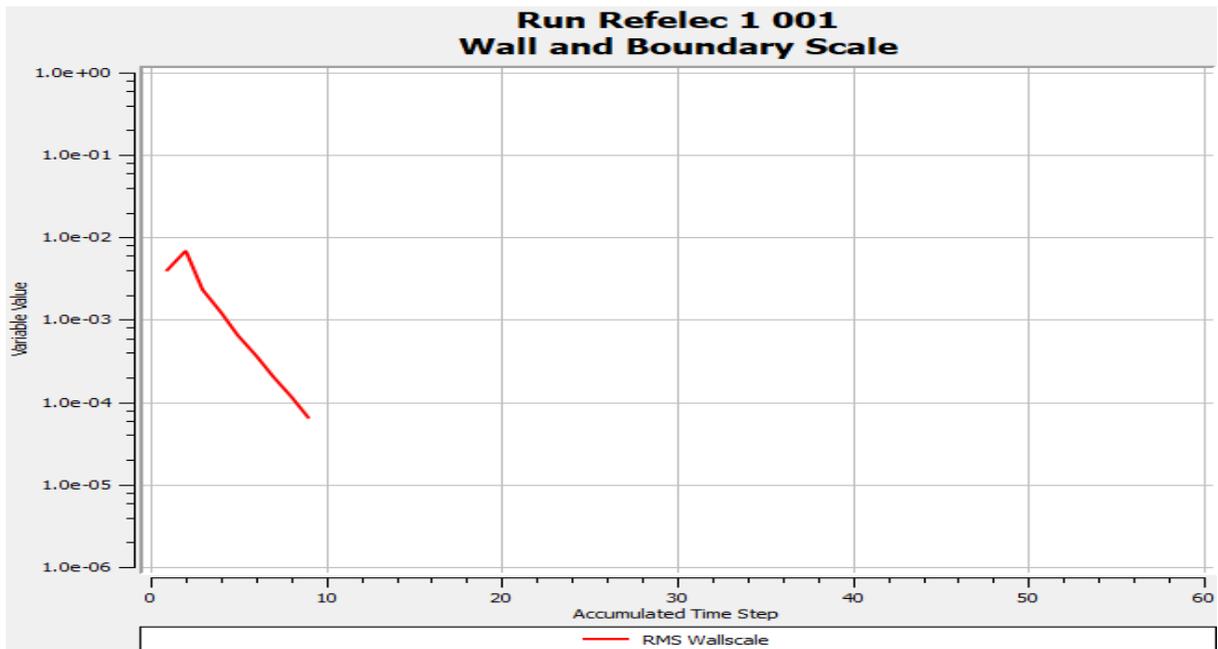
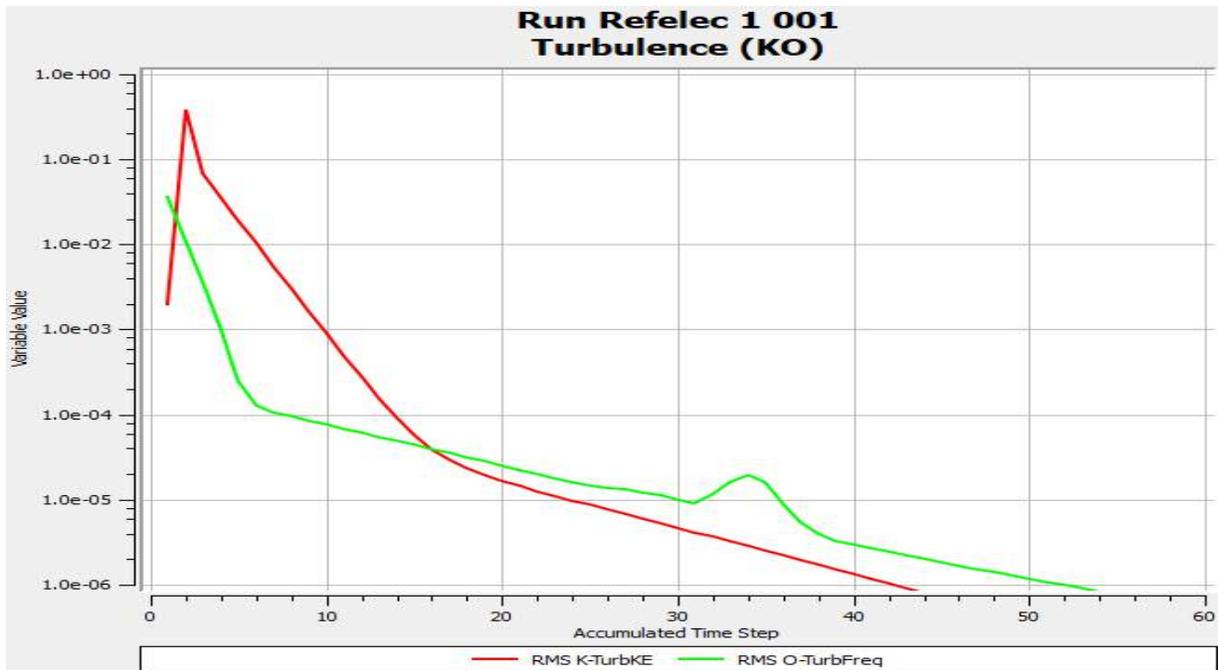


Figure : Test de convergence

V.6.3.2. Distribution de la vitesse

- La vitesse de l'écoulement au milieu du micro-canal atteint sa valeur maximale 4(m/s).
- La vitesse de l'écoulement au voisinage des parois et des sections additives, elle s'annule.
- La vitesse maximale de l'écoulement au milieu du micro canal s'apparait comme une tranche continue.

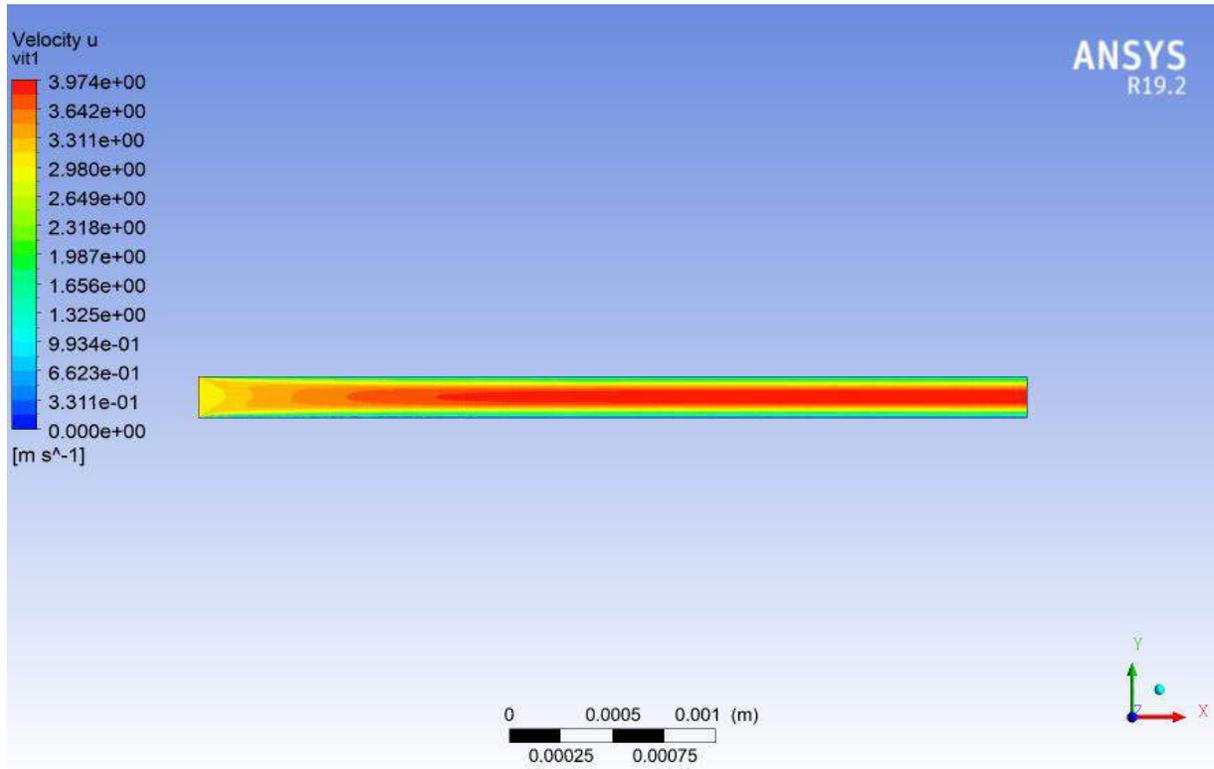


Figure IV.13 : Distribution de la vitesse dans la géométrie (a)

Pour la géométrie (b), les vitesses au voisinage de la paroi inférieure sont très importantes que celles de la paroi supérieure, ce qui est expliqué par l'influence des sections additives sur la vitesse.

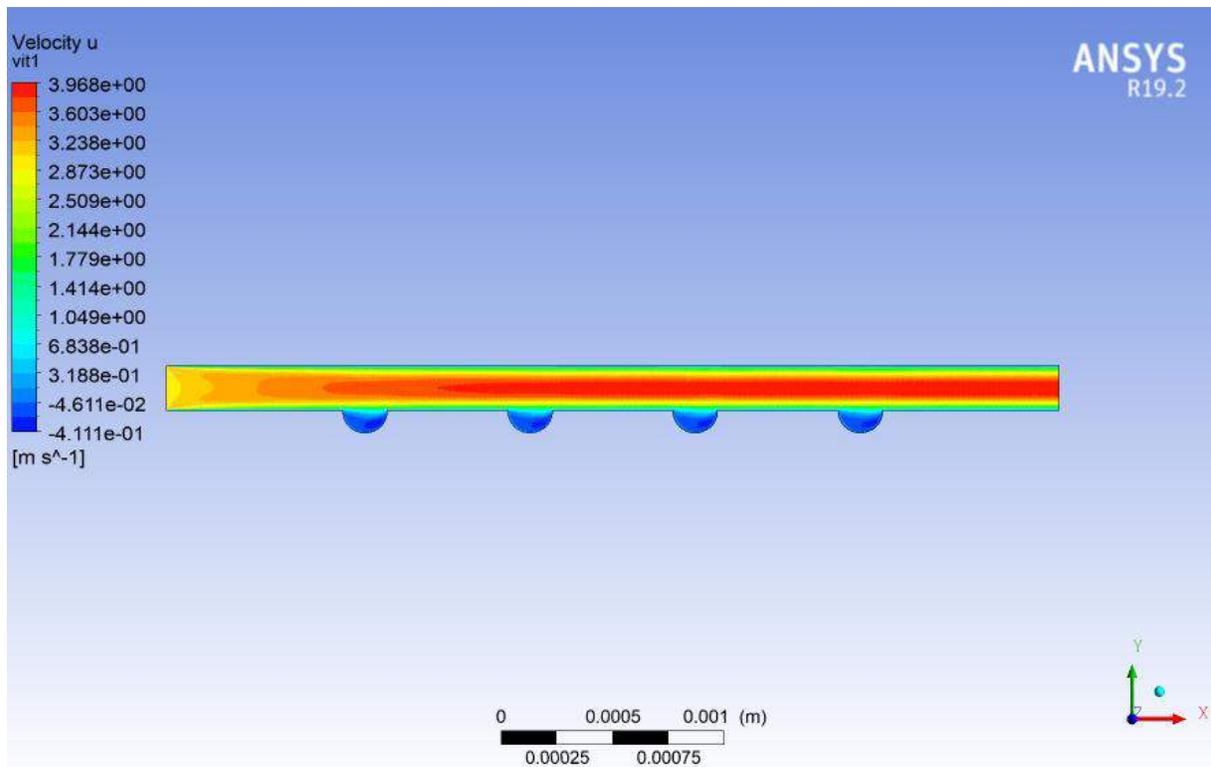


Figure IV.13 : Distribution de la vitesse dans la géométrie (b)

- L'écoulement se ralentit dès qu'il arrive à la section additive.
- Les vitesses sont négatives : il y a un retour de l'écoulement.
- la vitesse d'écoulement s'accroît au milieu, et s'annule au voisinage des sections additives.

V.6.3.3. Champs de pression

On remarque des tranches de pression qui se suivent le long de chaque micro-canal. On peut distinguer trois régimes de pression le long des micro-canaux avec changement de section transversale :

- Zone de pression importante : de l'entrée jusqu'au voisinage de la première section additive.
- Zone de pression faible : qui règne sur la totalité de l'aire du micro-canal, jusqu'à la dernière section additive.

- Zone de pression très faible : elle se commence de la dernière section additive jusqu'à la sortie du micro-canal.

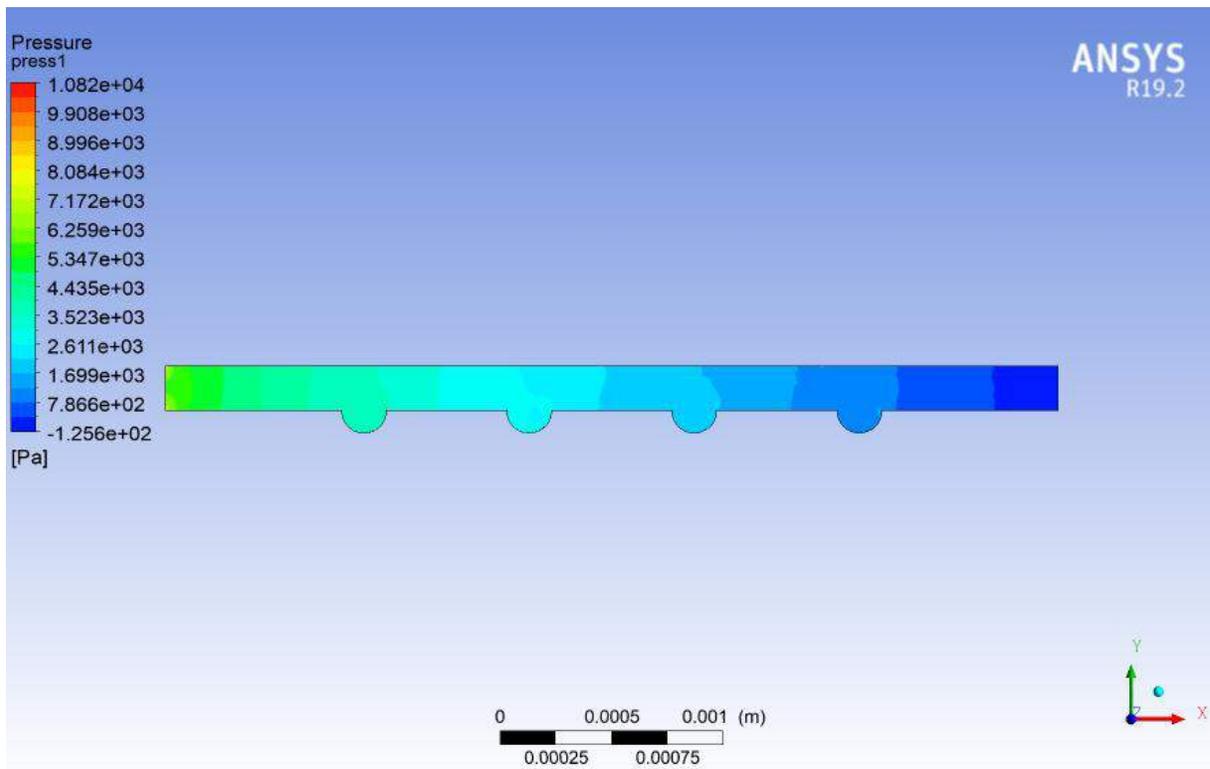
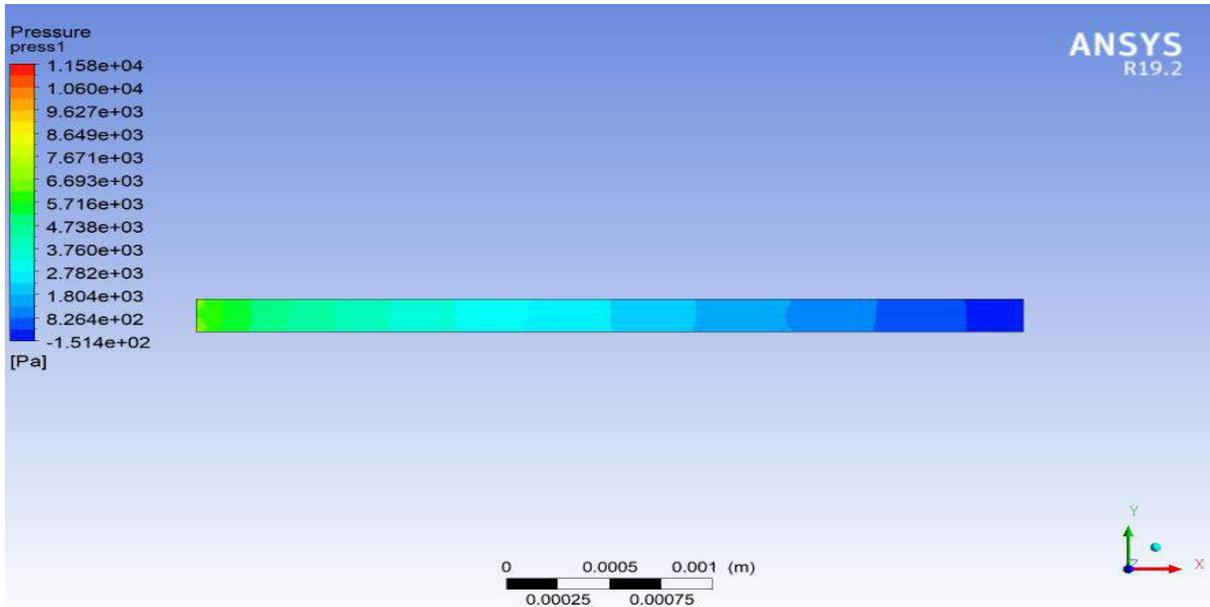


Figure : Test de convergence

V.6.3.4. Champs de températures

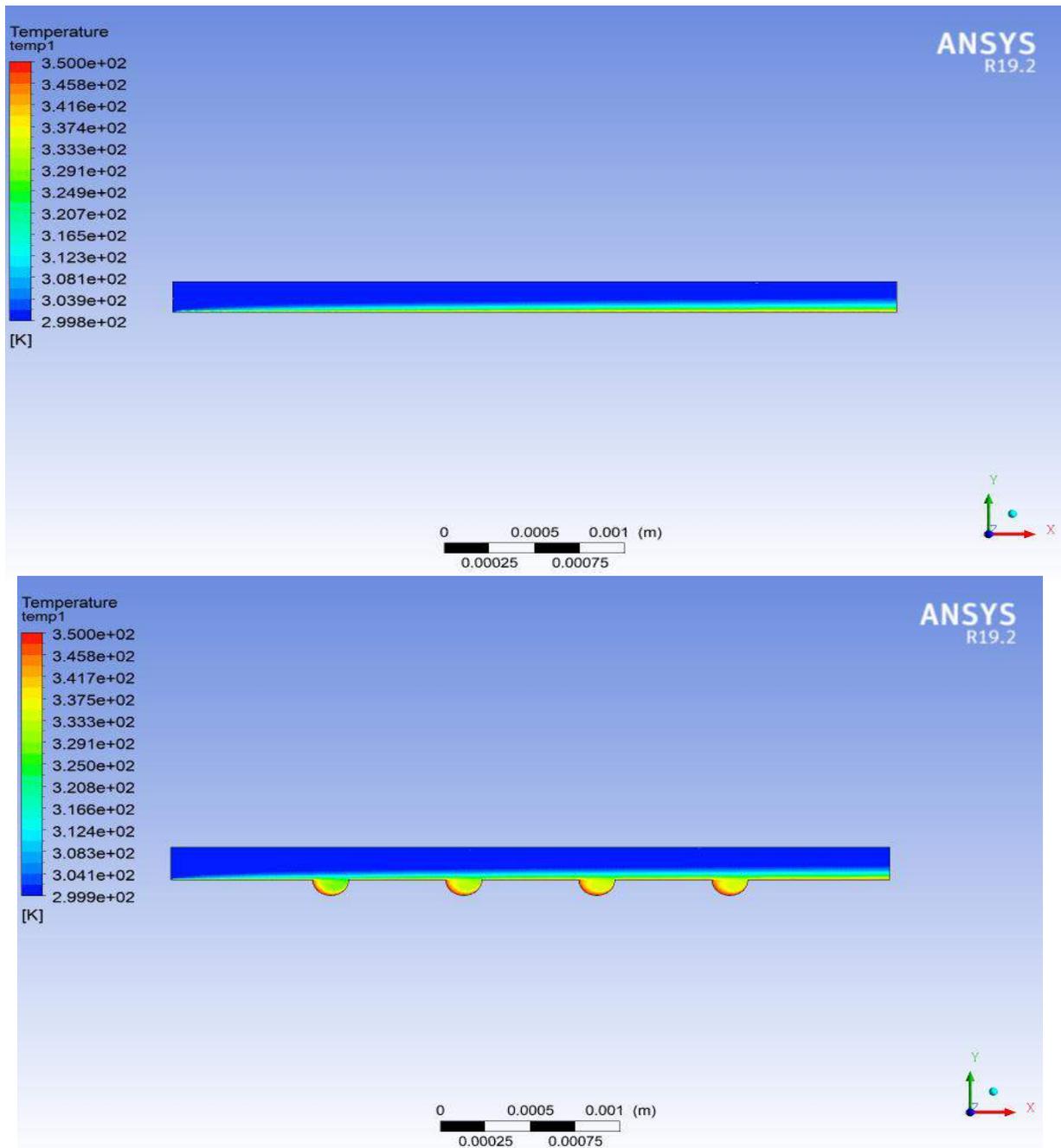


Figure : Test de convergence

On remarque que la température au niveau des fossettes est complètement chaude.

V.7. Conclusion

Le code commercial ANSYS CFX version 19.2 nous a permis un traitement numérique assez bénéfique au point de vue des résultats obtenus des différents paramètres. Cette étape nous a permis encore de voir le comportement de fluide et par la même occasion d'étudier l'influence du changement adapté à la géométrie. Les résultats numériques montrent clairement que les performances dynamiques et thermiques sont dépendantes de la forme de sections additives.

Nomenclature

<i>Lettres latines</i>	
T_{ab}	Température ambiante.
R	Constante d'air.
P	Pression.
Ri	Nombre de Richardson.
Gr	Nombre de GRASHOF.
U_c	Vitesse de convection naturelle.
Re	Nombre de Reynolds supporteurs.
S_θ	Terme source.
L	Longueur de mélange.
C_μ	Constante adimensionnelle
K	L'énergie cinétique turbulente.
$1 f$	Coefficients d'amortissements.
Pr	Nombre de Prandtl.
ν	Viscosité cinématique du fluide incident.
x	Abscisse de la plaque.
U_0	Vitesse du fluide incident.
ρ	La masse volumique.
C_p	La capacité calorifique.
K	La conductivité thermique.
Q_i	La puissance volumique.
D	Diamètre du jet.
H	Hauteur du cube.
H	Hauteur du de la conduite.
S	Hauteur du chanfrein.
U_{inf}	Vitesse de référence.
S_x	Longueur du domaine de calcul.
S_z	Largeur du domaine de calcul.
Re_H	Nombre de Reynolds basé sur la hauteur de la conduite est la vitesse de référence.
Re_j	Nombre de Reynolds base sur le diamètre du jet et la vitesse débitante.
T_e	Température du fluide.
T_p	Température de la paroi.
U	Vitesse caractéristique.
L	Longueur caractéristique.
S	Surface d'échange.
h_c	Coefficient d'échange superficiel Loi de Newton.
T_f	Température du fluide.
T_s	Température de la surface.

Figure2 .1	Un circuit imprimé.
Figure2.2	composants électronique
Figure2.3	Un transistor, composant actif, boîtier ouvert.
Figure2.4	Composants passifs (bobines, condensateur, potentiomètre).
Figure2.5	Composants discrets (résistance).
Figure2.6	Circuit intégré (PROM)
Figure2.7	Boîtier de forme ronde (transistor).
Figure2.8	Boîtiers de forme rectangulaire (CMS).
Figure2.9	Exemple de bonding sur un circuit intégré
Figure2.10	schéma électrique
Figure2.11	schéma non routé
Figure2.12	schéma routé
Figure2.13	Calcul de résistance
Figure2.14	Circuit Imprimé et Circuit électronique
Figure2.15	constitution de la plaque
Figure2.16	typon par rapport à la simulation
Figure2.17	Circuit Imprimé Final
Figure2.18	vue du caméra infrarouge sur une carte arduino
Figure3.1	Système de refroidissement à air passif
Figure3.2	Système de refroidissement forcé par air (ventilateurs)
Figure3.3	Schéma simplifié de refroidissement par liquide
Figure3.4	Refroidissement liquide à plaque froide.
Figure3.5	Mini-échangeur avec Micro canaux de 0.2mm de largeur
Figure3.6	Principe du spray cooling.
Figure3.7	Description des différents organes du spray cooling.
Figure3.8	Refroidissement par jets.
Figure3.9	Schéma de caloduc classique.
Figure3.10	Système de refroidissement par eau
Figure3.11 :	Schéma de refroidissement par eau

Références bibliographiques

- [1] Patrice PAVO . Sciences &Techniques . Radiateur 1897. EurekaWeb En ligne
<https://eurekaWeb.fr/wp/radiateur-1897/>
- [2] Gabet (03 octobre 2012) .moteur a combustion et explosion . Refroidissement, wikipedia
En ligne https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_%C3%A0_combustion_et_explosion
- [3] En ligne https://fr.wikipedia.org/wiki/Refroidissement_%C3%A0_eau
- [4] Antoine Bordas, « Un PC avec un refroidissement à l'huile minérale » sur elogweb.fr, 5 juin 2015 (consulté le 14 mai 2022).
- [5] Guillaume Champeau . Publié le 16 mars 2015 . Fujitsu invente le watercooling pour téléphones et tablettes. Numerama **En ligne** <https://www.numerama.com/tech/32493-fujitsu-invente-le-watercooling-pour-telephones-et-tablettes.html>
- [6] Refroidissement des composants électroniques par convection forcée : Simulation numérique mémoire réalisé par (Yahiaoui Mustapha et KESSI Farid) Université Bouira
- [7] Etude numérique du refroidissement d'un composant électronique mémoire réalisé par (Mimoun Med Yassine et Sebki Abdeslam) Université d'Oran 2 Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle
- [8] Impacte de la rugosité sur le refroidissement d'un composant électronique mémoire réalisé Par (BOUREKHOUM Sami) Université d'Oran 2 Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle
- [9] Simulation numérique d'un écoulement de fluide dans Des micros canaux pour le bon refroidissement des composantes électroniques mémoire réalisé par (NADJI mohammed nadir et TAGUIG ismahene) Université d'Oran 2 Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle.
- [10] Gestion thermique des composants d'électronique de puissance Utilisation du diamant CVD Thèse de Doctorat réalisé par (Zhongda ZHANG) UNIVERSITÉ DE TOULOUSE
- [11] Université Pierre et Marie Curie/Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble /Article /M .Tawk, Y.Avenas, D. Charalampous
- [12] Université MENTOURI-CONSTANTINE /MEMOIRE DE MAGISTER en Génie mécanique /HAMOUCHE Adel
- [13] Université Abou Bakr Belkaid -TLEMCEM / Mémoire de Master en génie mécanique/ CHAFAA NASREDDINE – BENRAMDANE HASSANE
- [14] Université Grenoble Alpes /Mémoire de Doctorat /Spécialité : Mécanique des fluides, énergétiques et procédés/ Maria Cristina RIOFRIO ALMEIDA

Références bibliographiques

- [15] Université abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem / Mémoire de Magister/ Spécialité : Electronique / HARCHOUCH NABILA
- [16] Wikipédia (https://fr.wikipedia.org/wiki/Circuit_%C3%A9lectronique)
- [17] Wikipédia (https://fr.wikipedia.org/wiki/Circuit_imprim%C3%A9#top-page)
- [18] Wikipédia (https://fr.wikipedia.org/wiki/Composant_%C3%A9lectronique)
- [19] Wikipédia (https://fr.wikipedia.org/wiki/Bo%C3%AEtier_de_circuit_int%C3%A9gr%C3%A9)
- [20] Cours 7 La fabrication d'un circuit imprimé (www.electronique-mixte.fr)
- [21] Etude thermique d'une carte électronique – Distrame (www.distrame.fr)
- [22] Thèse de doctorat de l'université de Toulouse institut national polytechnique de Toulouse
- [23] Thèse Master en Electromécanique Spécialité : Thermique des Machines Industrielles Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle Oran 2. Mr. Meghdir Abed
- [24] <https://boowiki.info/art/diamant-2/diamant-synthetique.html>
- [25] <https://www.sawtbeirut.com/technologyandscience/قبل-التفكير-باستخدام-اللايتوب-ل-التع/>
- [26] Wikipédia(https://fr.wikipedia.org/wiki/Refroidissement_%C3%A0_huile)

Conclusion Générale

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier le comportement dynamique et thermique d'un écoulement dans un micro-canal en utilisant l'outil de simulation numérique ANSYS CFX19.2. On a étudié deux types de micro-canaux : sans et avec des fossettes.

L'étude est effectuée en utilisant l'eau comme fluide d'où on a constaté qu'au niveau de chaque section additive, une augmentation de transfert de chaleur en comparant avec un micro-canal sans sections additives. Cette augmentation thermique est expliquée par le ralentissement de l'écoulement l'intérieur des sections additives, cela a permis au fluide d'avoir suffisamment le temps à se chauffer.

L'étude dynamique nous a expliqué ce gain thermique, en effet, le frottement le long de la paroi inférieure est très important à l'entrée de chaque micro-canal, et il diminue le long du micro-canal avec une augmentation considérable au niveau de chaque section additive.

Le principe de ce travail est donc l'étude dynamique du flux thermique à l'intérieur des micro-canaux de géométries complexes d'avoir un effet amplificateur du transfert thermique. En fin, nous pouvons dire que grâce à l'outil de simulation numérique qui est ANSYS CFX, nous avons pu atteindre à identifier quelques phénomènes physiques.