

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

FACULTE DES TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DES SCIENCES TECHNIQUES
GENIE MECANIQUE

N° :.....



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

OPTION : ENERGÉTIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de licence Académique**

**Par : BOURAHAL AHMED.
ABED NASSIF ABDELWAHID.**

Intitulé :

**ÉTUDE D'UN CALODUC UTILISÉ POUR LE
REFROIDISSEMENT D'UN COMPOSANT
ÉLECTRONIQUE.**

Cas des étudiants de 3^{ème} année (Licence) de l'Université
Mohammed Boudiaf de M'Sila.

Soutenu devant le jury composé de :

.....	Université de M'Sila	Président
Dr :BAKHTI FATIMA ZOHRA	Université de M'Sila	Rapporteur
.....	Université de M'Sila	Examineur

Année universitaire : 2022 /2023

Remerciements

Nous remercions tout d'abord ALLAH le tout puissant qui nous éclaire le bon chemin. Nous tenons à remercier notre encadreur Dr. BAKHTI Fatimazohra, pour nous avoir offert les conditions favorables et pour nous avoir parfaitement guidé tout le long de la réalisation de ce travail. Nous avons particulièrement apprécié ses encouragements, ses conseils qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Je remercie mes parents, qui se sont sacrifiés pour mon bien être et ma famille qui m'a encouragé à reprendre les études.

Nous remercions toute personne mes 'ayant aidé de près ou de loin à l'achèvement de ce travail, spécialement tous les enseignants du département d` génie mécanique de l'université de M` sila.

Enfin une pensée amicale à tous mes collègues et mes proches amis pour les moments que nous avons partagés ensemble durant ces années de formation.

DEDICACES

Quand il y'a la soif d'apprendre, tout vient à point qui sait attendre. Les études sont avant tout, notre unique et seul atout. On dédie ce mémoire à nos chers parents, pour leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de nos études. pour leur soutien tout au long de notre parcours institut. À nos enseignants, à nos chers amis et nos collègues. Aux personnes dont on a bien aimé la présence de ce jour. On leur dédie ce mémoire Je le dédie également à tous mes professeurs, en particulier au superviseur.



Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE :

CHAPITRE 1 : Généralité et recherches bibliographiques

I.1. Introduction..... 5

I-2- Importance de transfert thermique 5

I-3- Modes de transfert thermique 6

I-3-1 Conduction 7

I-3-2- Rayonnement..... 7

I-3-3-Convection 8

I-3-3-1- Convection naturel (libre) 9

I-3-3-2-Convection forcée 9

I-3-4-Coefficient de transfert thermique 10

I-3-5-Domains d'applications de la convection naturelle 11

I-3-6- Quelques techniques d'amélioration du transfert de chaleur 11

I-3-6-1- Surfaces traitées 11

I-3-6-2-Surfaces rugueuses 12

I-3-6-3- Surfaces prolongées (ailettes) 13

I-4-Systèmes de refroidissement des composants électroniques 13

- Systèmes de refroidissement actifs 14
- Systèmes de refroidissement passifs 14

I-4-2-1-Refroidissement à l'air..... 15

Convection naturelle par air 15

- Convection forcée à air..... 15

I-4-2-2-Refroidissement par liquide caloporteur..... 16

- Refroidissement par plaques à eau..... 17
- Refroidissement par micro canaux..... 17

Les principaux avantages 18

- Refroidissement par mini canaux..... 19

I-4-2-3-Refroidissement diphasique (caloducs) 19

I-5-1- Huile minérale	20
I-5-2- Huiles végétales ou esters naturels	21
I-5-3- Huiles esters synthétique.....	21
I-7- Conclusion.....	22

CHAPITRE 2 : Généralités sur les caloducs

II-1. Définition de caloduc	25
II-2. Conception,Construction et Structure du caloduc	25
II-3. Matériaux de caloduc et fluides de travail	28
II-4. Types de caloduc	30
II-5. Chambre à vapeur ou caloducs plats	31
II-6. caloduc en boucle	33
II-7. Transfert de chaleur à travers un caloduc	34
II-8. developement caloduc.....	35
II-9. Domaines d'applications	36
II-10. Conclusion.....	37

CHAPITRE 3 : CALODOC CAPILLAIRE

II-1. Introduction	39
II-2. Caloduc capillaire	39
II-3. Boucles diphasiques à pompage capillaire.....	40
II-4. Réseaux capillaire	41
II-5. Résistance thermique du réseau capillaire	42
II-6. Mesure de la limite capillaire	43
II-6.1. Caloduc á plots	43
II-6.2. Caloduc à rainures frittées.....	44
II-7. modele réseaux capillaire.....	45
II-8. Conclusion.....	46
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	
REFERENCÉ BIBLIOGRAPHIQUE.....	



Liste des figures

LISTE DE FIGURE

CHAPITRE I

Figure I.1: Principe de la conduction thermique	10
Figure I. 2: Principe du rayonnement thermique.....	10
Figure I. 3: Schéma de transfert de chaleur par convection.....	11
Figure I. 4: Convection naturelle.....	12
Figure I. 5: Schéma de la convection forcée.....	12
Figure I. 6: Gradient de vitesse dans la couche limite.....	13
Figure I. 7: Exemples de surfaces traitées.....	14
Figure I. 8: Tubes avec rugosité structurée bi et tridimensionnelle.....	14
Figure I. 9: Système de refroidissement à air passif.....	15
Figure I. 10: Présentation type des composants électroniques.....	16
Figure I. 11: Système de refroidissement à air passif.....	17
Figure I. 12: Système de refroidissement forcé par air Radiateur et ventilateur.....	18
Figure I. 13: Schéma simplifié de refroidissement par liquide	18
Figure I. 14: Refroidissement liquide à plaque froide	19
Figure I. 15: Refroidissement liquide à micro-canaux	20
Figure I. 16: Refroidissement liquide à mini-canaux	21
Figure I. 17: Principe de fonctionnement d'un caloduc.....	22
Figure I . 18:Processus de raffinage pour les huiles brutes.....	23

CHAPITRE II

Figure II.1 :Un système de caloduc pour ordinateur portable.....	26
Figure II .2 :Schéma montrant les composants et le mécanisme d'un caloduc contenant une mèche.....	27
Figure II. 3 : Cette animation thermique de conception de dissipateur thermique de chambre à vapeur (dissipateur de chaleur) a été créée à l'aide d'une analyse CFD et montre la surface du dissipateur thermique à contour de température et les trajectoires d'écoulement de fluide prévues.....	29
Figure II .4 : Cette animation de caloduc plat mince (dissipateur de chaleur) a été créée à l'aide d'une analys CFD haute résolution et montre des trajectoires d'écoulement en fonction de la température	30
Figure II .5 : Coupe transversale d'un caloduc pour refroidir le processeur d'un ordinateur portable	30
Figure II.6 : Vue en coupe d'un caloduc plat de 500 µm d'épaisseur avec un mince capillaire planaire (couleur aqua)	32
Figure II.7.: Caloduc plat mince (dissipateur de chaleur) avec dissipateur thermique et ventilateur à distance. Figure II. 8 : loop heat pipe LHP.....	33
Figure II. 9 : principe de fonctionnement du caloduc.....	33
Figure II. 10 : Dissipateur thermique de <u>processeur d'ordinateur</u> avec caloduc en cuivre sur monté d'un ventilateur	35

CHAPITRE III

Figure III.1 : Principe de fonctionnement du caloduc capillaire	40
Figure III .2 : boucle diphasique á pompage capillaire Du type LHP [COQ].....	41
Figure III .3: boucle dyphasique á pompage capillaire Du type CPL [SER].....	41
Figure III. 4 : limite capillaire du montage T1	43
Figure III. 5 : limite capillaire du montage T2.....	43
Figure III .6 : Détermination de la imite capillaire : (a) á partir de la résistance thermique ; (b) á partir de la température du transistor	44
Figure III. 7 : Réseau capillaire á rainures frittées	45
Figure III. 8 : Billes de cuivre écrasées par la fraise	45



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Le transfert de chaleur est une science qui étudie la manière dont la chaleur se propage d'une région à une autre sous l'influence d'une différence de température [2]. Cela constitue un aspect important du domaine technologique et joue un rôle crucial dans le développement de l'industrie dans le pays.

On distingue en général trois modes fondamentaux de transfert thermique : la conduction, la convection et le rayonnement.

De nos jours, les recherches dans le domaine du transfert de chaleur couvrent un large éventail d'applications, étant donné que les études concernées sont diverses. Des exemples incluent la thermique du bâtiment et le refroidissement des composants électroniques, entre autres.

Tous les composants électroniques sont sensibles à leur température : ils présentent des performances médiocres en dehors de certaines limites de température et risquent d'être endommagés si la chaleur dissipée dépasse largement ces limites [6]. Certains composants génèrent beaucoup de chaleur et nécessitent une évacuation efficace pour rester dans les limites de fonctionnement. Le refroidissement des composants électroniques est l'un des principaux défis pour le développement de systèmes plus performants, car il est essentiel de dissiper efficacement la chaleur générée par ces composants.

Le présent mémoire propose une étude sur le refroidissement des composants électroniques en utilisant un caloduc et spécialement un caloduc capillaire, qui assure une bonne évacuation de la chaleur et donc un refroidissement optimal des composants électroniques.

Pour atteindre cet objectif, le mémoire est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités sur le transfert de chaleur et propose une revue bibliographique sur le refroidissement des équipements électroniques en utilisant différents types d'huiles (minérales, végétales et synthétiques).

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté une étude détaillée sur les caloducs qui sont des dispositifs de transfert de chaleur polyvalents, efficaces et fiables qui ont transformé la technologie de refroidissement. Leur fonctionnement passif, leur capacité de transfert de chaleur élevée et leur conception compacte les rendent précieux dans diverses industries.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons le caloduc capillaire cylindrique son principe de fonctionnement et ses différents types. Les caloducs utilisent une structure capillaire ou mèche, généralement constituée d'un matériau poreux, pour faciliter le mouvement du fluide de travail. L'action capillaire aide au transport du liquide du condenseur (dissipateur de chaleur) à l'évaporateur (source de chaleur), en surmontant les forces gravitationnelles.



Chapitre I

I. Généralité et recherches bibliographiques

I.1. Introduction :

Les avancées et l'évolution technologiques récentes en électronique ont permis d'améliorer l'efficacité des composants qui deviennent de plus en plus performants et de plus en plus petits. Cela entraîne des contraintes de fonctionnement pour les composants, notamment au niveau des seuils de température. Les composants électroniques d'aujourd'hui peuvent produire plusieurs centaines de watts par centimètre carré, ce qui pose un problème majeur d'évacuation de la chaleur avant la réalisation des composants [1]. Pour résoudre ce problème, plusieurs études ont été menées afin de déterminer le moyen le plus approprié pour maintenir ces composants à une température de fonctionnement acceptable, en utilisant notamment des huiles minérales, végétales ou synthétiques pour le refroidissement.

Dans ce chapitre, nous avons effectué une étude descriptive des trois modes de transfert thermique, ainsi qu'une synthèse bibliographique sur les différentes méthodes de refroidissement des composants électroniques utilisant des huiles, qu'elles soient minérales, végétales ou synthétiques.

I-2- Importance de transfert thermique :

Le transfert de chaleur est une science qui étudie la manière dont la chaleur se propage d'une région à une autre sous l'influence d'une différence de température. Ce phénomène est d'une grande importance dans les domaines scientifiques, technologiques et industriels . Il s'agit d'un processus complexe qui peut avoir lieu en présence de différents modes fondamentaux, notamment la conduction, la convection et le rayonnement [2]. Lorsque l'un de ces trois modes prédomine, les effets des autres peuvent être négligés, ce qui simplifie considérablement l'analyse du cas étudié [3]. Dans ce chapitre, nous présenterons une étude descriptive des trois modes de transfert thermique ainsi que des exemples d'applications dans différents domaines.

I-3- Modes de transfert thermique :

En effet, il existe trois modes de transmission de la chaleur :

I-3-1 Conduction :

La conduction est un processus de transfert thermique qui se produit entre deux régions d'un même matériau ou entre deux matériaux en contact, en raison d'une différence de température entre eux. Ce processus se produit sans déplacement global de matière. L'énergie thermique se propage dans le matériau de proche en proche, augmentant la température de chaque partie du matériau touché. Par exemple, lorsque la poignée d'une casserole chauffe sur une plaque de cuisson, la chaleur se propage par conduction à travers le métal de la casserole jusqu'à son contenu. Dans les gaz et les liquides, la chaleur est transférée par contact direct entre les molécules, sans déplacement significatif de celles-ci [4].

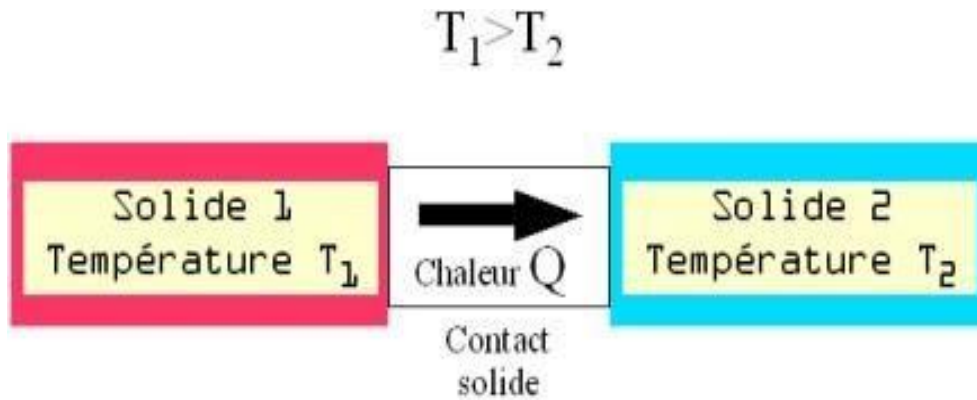


Figure I.1: Principe de la conduction thermique [5].

I-3-2- Rayonnement :

Cela signifie que le rayonnement est un mode de transfert thermique qui se produit à distance entre deux corps, sans qu'il y ait de contact physique entre eux. Il est causé par l'émission d'ondes électromagnétiques par un corps chaud, qui sont absorbées par un corps plus froid. Le rayonnement peut se produire dans le vide ou à travers un milieu transparent, comme l'air ou le verre. Ce mode de transfert thermique est important dans de nombreux domaines, tels que la climatisation, le chauffage et la cuisson des aliments.

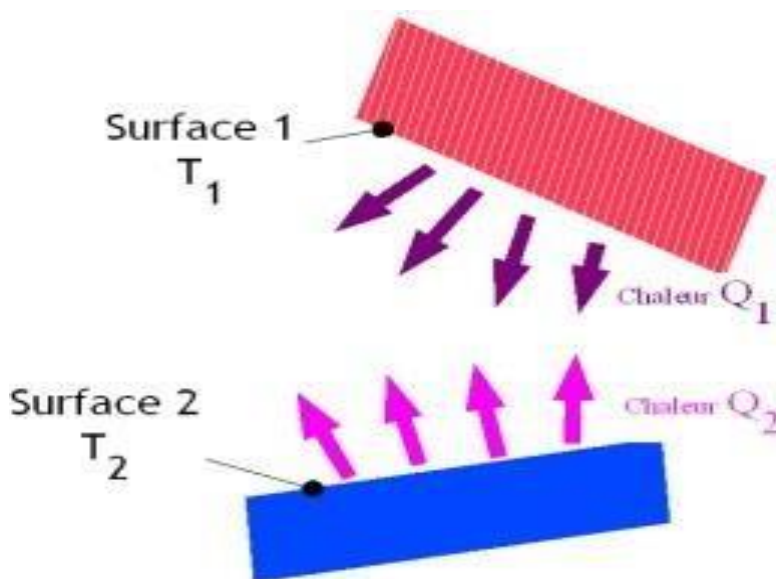


Figure I. 2: Principe du rayonnement thermique [7].

I-3-3-Convection :

La convection est un phénomène qui intervient lorsque la chaleur est transférée entre une surface solide et un fluide, que ce soit un liquide ou un gaz. Dans ce mode de transfert thermique, la chaleur est transférée par l'intermédiaire du mouvement des molécules du fluide. Cela se produit lorsque le fluide se déplace à proximité de la surface solide, ce qui entraîne une différence de température entre les deux. Cette différence de température crée une force qui met en mouvement le fluide, ce qui permet de transférer la chaleur de manière efficace [2]. La

convection est considérée comme le mode de transfert thermique le plus important dans de nombreuses applications, telles que le refroidissement des composants électroniques ou des moteurs, la convection atmosphérique, ou encore la convection océanique [8].



Figure I. 3: Schéma de transfert de chaleur par convection.

En matière de refroidissement des composants électroniques, il existe deux types de transfert de chaleur par convection : le refroidissement par convection naturelle (ou libre) et le refroidissement par convection forcée.

I-3-3-1- Convection naturel (libre) :

La convection naturelle se produit lorsque le mouvement du fluide est induit uniquement par la poussée d'Archimède, qui est provoquée par les variations de masse volumique à l'intérieur du fluide, qui sont elles-mêmes causées par les variations de température dans l'espace. L'air chaud, qui est plus léger, a tendance à monter, tandis que l'air froid descend.

Ce phénomène se produit dans de nombreuses situations : il permet de répartir la chaleur dans une pièce d'habitation (transfert de chaleur du radiateur vers les parties les plus froides de la pièce), mais également de générer des courants marins ainsi que de faire circuler l'air à grande échelle dans l'atmosphère terrestre.

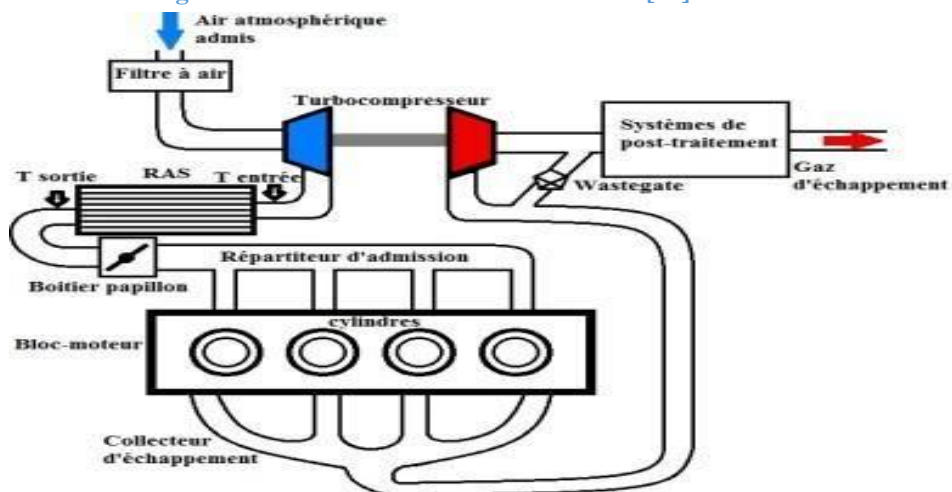


Figure I. 4: Convection naturelle.

I-3-3-2-Convection forcée :

En effet, en convection forcée, le mouvement du fluide est généré par une action extérieure. Dans ce cas, la poussée d'Archimède est négligeable par rapport aux forces qui mettent en mouvement le fluide, comme c'est le cas dans le refroidissement des moteurs à combustion interne, où une pompe à eau est utilisée pour faire circuler le liquide de refroidissement à travers le moteur et l'échangeur [9].

Figure I. 5: Schéma de la convection forcée [10].



I-3-4-Coefficient de transfert thermique :

Selon la loi de refroidissement de Newton, le taux de transfert de chaleur entre une surface à une température T_s et le fluide environnant à une température T_f est représenté par l'équation suivante :

$$Q_{\text{convection}} = h A (T_s - T_f) \quad \text{(I-1)}$$

L'unité du coefficient de transfert de chaleur h est le watt par mètre carré par kelvin ($W/m^2.K$). Le coefficient h n'est pas une propriété thermodynamique en soi, mais plutôt une corrélation simplifiée qui dépend de l'état du fluide et des conditions de flux, raison pour laquelle il est souvent appelé une propriété de flux. La convection est liée au concept de couche limite, qui est une mince couche de transition entre une surface considérée comme étant adjacente aux molécules stationnaires et le flux de fluide environnant [11].

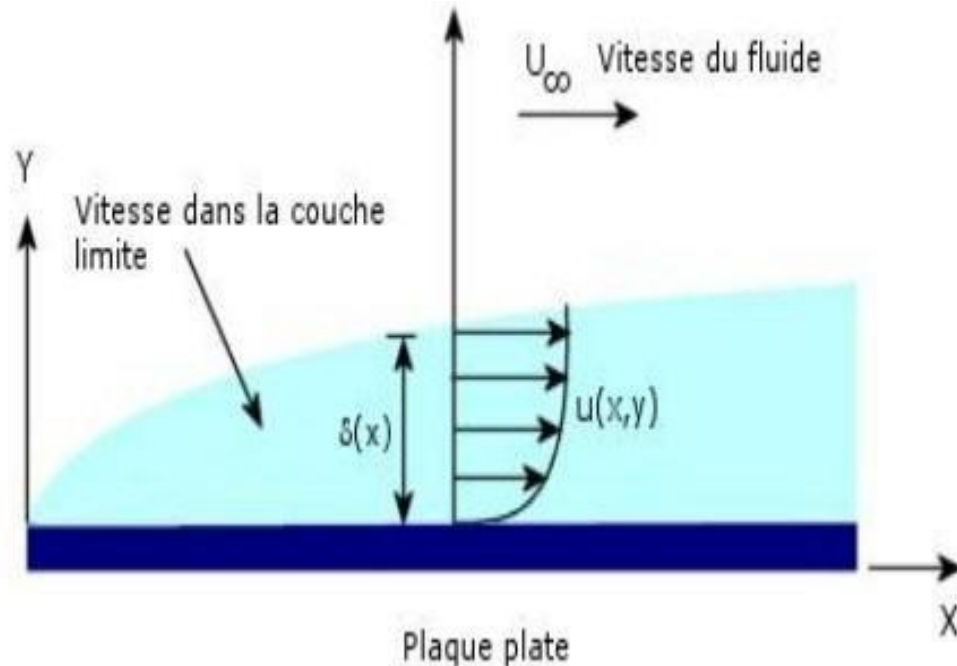


Figure I. 6: Gradient de vitesse dans la couche limite.

I-3-5-Domains d'applications de la convection naturelle :

Les applications du transfert de chaleur par convection sont très vastes et comprennent, par exemple, le refroidissement des circuits électriques et électroniques, la thermique du bâtiment et le confort humain, la dispersion des effluents et des panaches, ainsi que la thermique de l'atmosphère et des océans,... etc. [12].

I-3-6- Quelques techniques d'amélioration du transfert de chaleur :

Pour améliorer le transfert de chaleur, plusieurs possibilités peuvent être envisagées. Parmi celles-ci, nous détaillerons les techniques énumérées ci-dessous :

I-3-6-1- Surfaces traitées :

Il s'agit de surfaces qui ont été rendues rugueuses dans le but d'améliorer leurs performances en termes de transfert de chaleur. Ce type de surfaces est principalement utilisé pour des applications d'ébullition ou de condensation.

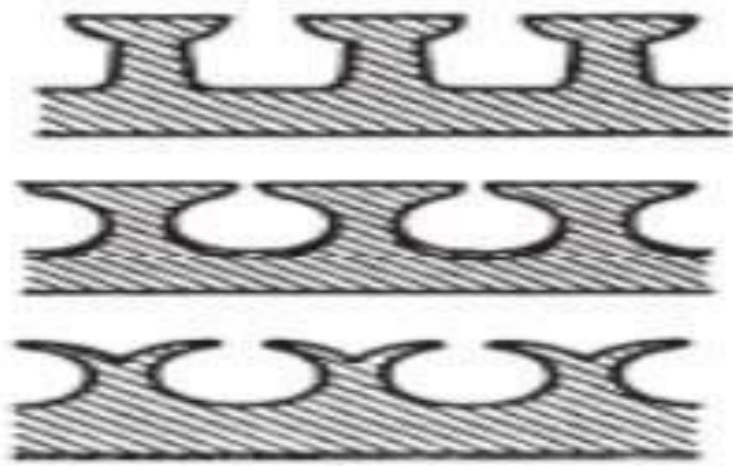


Figure I. 7: Exemples de surfaces traitées [13].

I-3-6-2-Surfaces rugueuses :

Il s'agit généralement de modifications superficielles qui génèrent de la turbulence dans les écoulements monophasiques et qui n'augmentent pas la surface de transfert de chaleur.

Leurs particularités géométriques varient de la rugosité de grain de sable aléatoire aux protubérances discrètes superficielles.

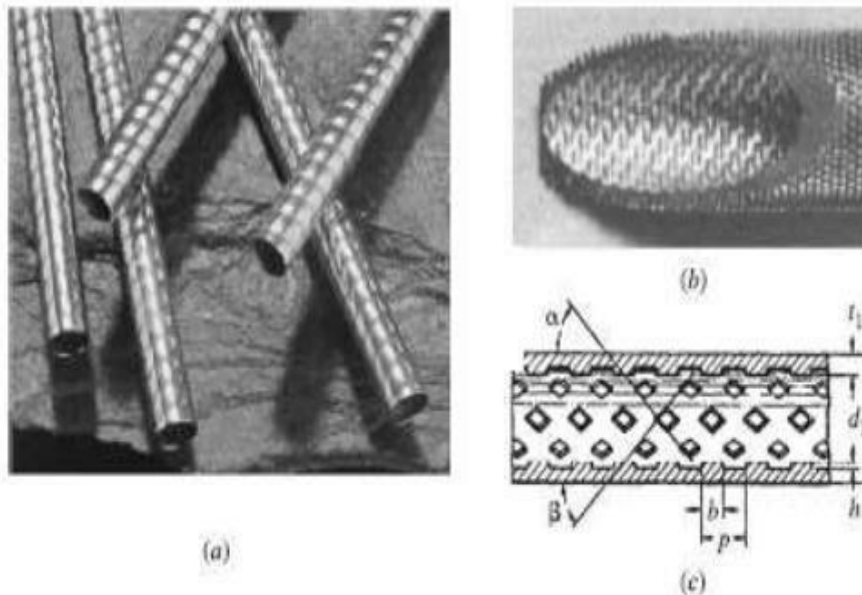


Figure I. 8: Tubes avec rugosité structurée bi et tridimensionnelle [13].

I-3-6-3- Surfaces prolongées (ailettes) :

Généralement appelées surfaces ailettes, elles fournissent une augmentation de la surface d'échange. En particulier, les ailettes plates sont généralement utilisées dans les échangeurs de chaleur

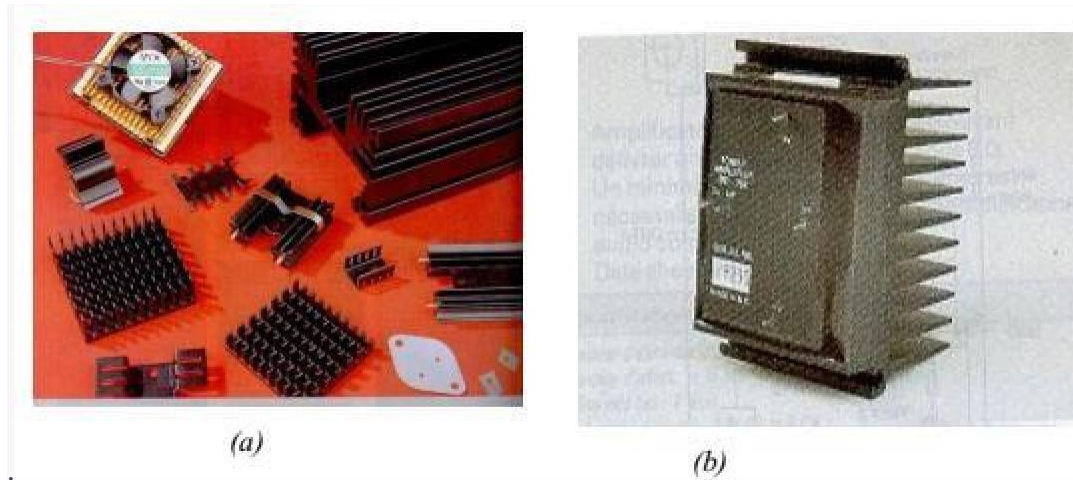


Figure I. 9: Système de refroidissement à air passif [13].

I -4-Systèmes de refroidissement des composants électroniques :

I-4-1-Composants électroniques :

Un composant électronique est un élément de base d'un circuit électronique. En général, il est équipé de deux broches métalliques et est encapsulé dans un matériau métallique, céramique ou plastique. Ces composants sont habituellement reliés entre eux par des soudures au circuit imprimé.

Il y a plusieurs types de composants électroniques. Les composants discrets sont encapsulés individuellement (comme les transistors ou les diodes), tandis que les composants intégrés forment des ensembles plus complexes en combinant plusieurs composants discrets.

D'autres types de composants électroniques incluent les composants actifs qui génèrent une excitation électrique (tels que les amplificateurs ou les oscillateurs), les composants passifs qui sont chargés de la connexion des composants actifs (tels que les résistances, les condensateurs et les inductances), les composants électromagnétiques (tels que les transformateurs et les bobines), les composants électroacoustiques (tels que les microphones et les casques) et les composants optoélectroniques (tels que les diodes électroluminescentes et les capteurs optiques).

Enfin, les composants semi-conducteurs sont des composants électroniques fabriqués à partir de matériaux semi-conducteurs (qui peuvent conduire ou isoler l'électricité en fonction de la température ambiante), tels que le silicium.

Dans le cas des circuits électroniques, il est important de faire la distinction entre les composants, qui sont des dispositifs physiques ou des appareils, et les éléments, qui sont des abstractions ou des modèles utilisés pour concevoir et analyser les circuits.

Il est également important de gérer efficacement la dissipation de la chaleur générée par ces composants, en particulier dans le cas de micro-ordinateurs équipés de processeurs à grande vitesse utilisés pour le traitement de données. Avec l'assemblage de plus en plus de composants sur un même circuit, la production de chaleur augmente considérablement. Par conséquent, le processus de refroidissement est d'une importance essentielle pour assurer un contrôle thermique adéquat de ces composants [15].



Figure I. 10: Présentation type des composants électroniques [16].

I-4-2-Systèmes de refroidissement :

Dans tous les systèmes de refroidissement, la chaleur doit être d'abord dissipée par conduction thermique à travers les différentes couches de l'assemblage avant d'atteindre le liquide de refroidissement. Il est donc essentiel de prendre en compte le choix des matériaux constituant ces couches et les différentes interfaces (telles que les brasures). C'est pourquoi les dispositifs d'échange thermique avec l'environnement ont été développés et améliorés pour assurer une meilleure dissipation de la chaleur [17].

Il existe deux modes différents de systèmes de refroidissement :

•Systèmes de refroidissement actifs :

- Le refroidissement par liquide est basé sur le transfert de chaleur par convection forcée, qui nécessite l'utilisation d'une pompe mécanique pour faire circuler le liquide de refroidissement et un circuit externe pour évacuer la chaleur du système vers l'extérieur [18].

•Systèmes de refroidissement passifs :

Les systèmes de refroidissement passifs ne nécessitent pas d'alimentation externe, ce qui réduit leur coût énergétique. Le refroidissement passif peut être divisé en deux sections : directe et indirecte, selon que le fluide de refroidissement est en contact direct avec les composants électroniques ou non [19].

I-4-2-1-Refroidissement à l'air :

Les systèmes de refroidissement à l'air sont utilisés pour les composants électroniques qui ne génèrent pas une chaleur importante. Les principaux avantages de ce système de refroidissement sont sa simplicité relative et son faible coût. Les échanges de chaleur entre le composant électronique (la source de chaleur) et l'environnement (le dissipateur) se font par convection et rayonnement [20].

-Convection naturelle par air :

Le refroidissement passif signifie qu'il n'y a pas de pièces mécaniques en mouvement. Un simple dissipateur de chaleur (ou radiateur) est fixé sur le composant à refroidir pour augmenter la surface de contact avec l'air ambiant, ce qui facilite la dissipation de la chaleur. Le refroidissement passif à air est principalement constitué d'un dissipateur de chaleur (Figure I.11)

Le dissipateur thermique est conçu en fonction de la surface à refroidir et choisi pour ses propriétés thermiques, notamment sa bonne diffusivité et sa grande capacité thermique, généralement en cuivre ou en aluminium. La chaleur émise par le composant électronique se répand dans le dissipateur thermique avant d'être dissipée dans l'air ambiant. L'ajout d'un dissipateur thermique peut considérablement améliorer l'efficacité du refroidissement. [21]

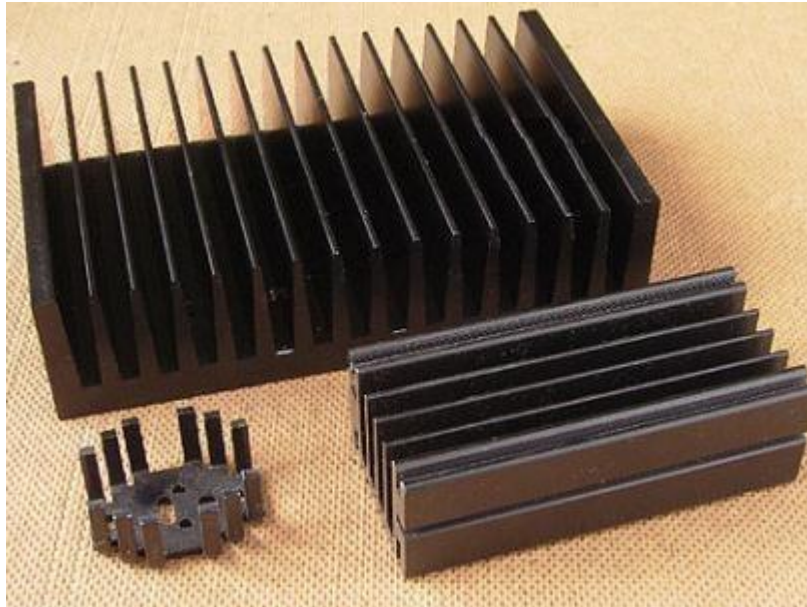


Figure I. 11: Système de refroidissement à air passif.

- **Convection forcée à air :**

Le ventilateur piézoélectrique utilise l'effet piézoélectrique, dans lequel un matériau cristallin, comme le quartz, se déforme lorsqu'il est soumis à une tension électrique. Cette déformation crée des vibrations qui sont transférées à une lame en céramique, ce qui crée un flux d'air. Ce système permet de produire un flux d'air directionnel et peut être contrôlé pour ajuster la vitesse et le débit d'air en fonction des besoins de refroidissement. Les ventilateurs piézoélectriques sont souvent utilisés dans les dispositifs portables et les petits appareils électroniques, car ils sont plus silencieux et consomment moins d'énergie que les ventilateurs traditionnels.

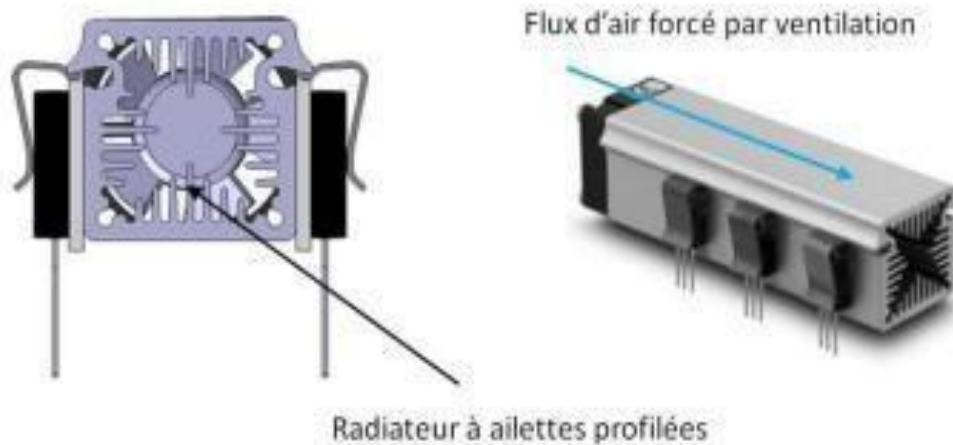


Figure I. 12: Système de refroidissement forcé par air Radiateur et ventilateur [19].

I-4-2-2-Refroidissement par liquide caloporteur :

Les systèmes de refroidissement par liquide sont plus efficaces que les systèmes de refroidissement par air, car les liquides ont une capacité thermique plus élevée que l'air et peuvent transporter plus de chaleur par unité de volume. Dans un système de refroidissement par liquide, le liquide est pompé à travers un échangeur de chaleur où la chaleur est transférée de la source de chaleur, telle qu'un composant électronique, au liquide. Le liquide chaud est ensuite transporté à travers un circuit fermé jusqu'à un radiateur, où la chaleur est dissipée dans l'air ambiant. Les liquides de refroidissement couramment utilisés sont l'eau, les huiles minérales et les liquides de refroidissement à base de glycol [23].

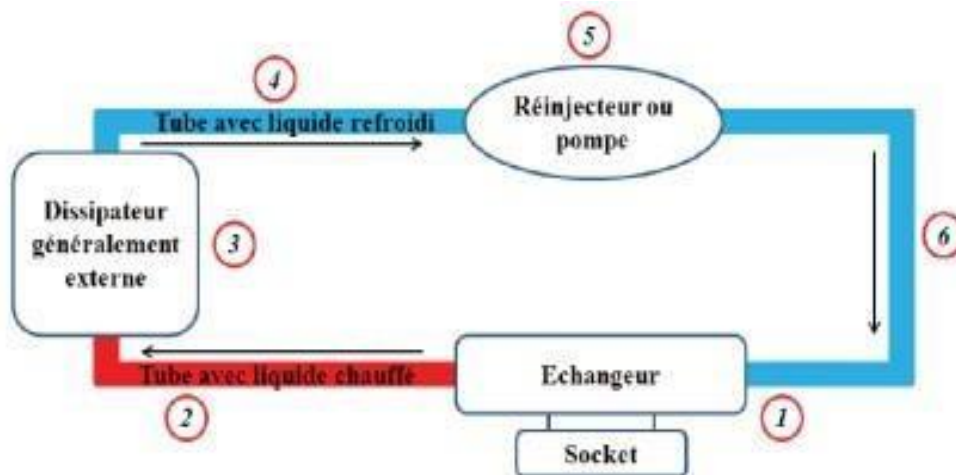


Figure I. 13: Schéma simplifié de refroidissement par liquide.

- **Refroidissement par plaques à eau :**

Cette turbulence permet d'augmenter le coefficient d'échange thermique entre le liquide et la surface à refroidir. Le liquide chaud circule dans le canal étroit de la plaque à eau, ce qui augmente la turbulence et donc l'efficacité du refroidissement. Le liquide refroidi est ensuite renvoyé vers la source de chaleur pour continuer le cycle de refroidissement. Cette technique est très efficace pour les composants électroniques à

haute puissance, mais elle est également plus complexe et coûteuse à mettre en place que le refroidissement par air.

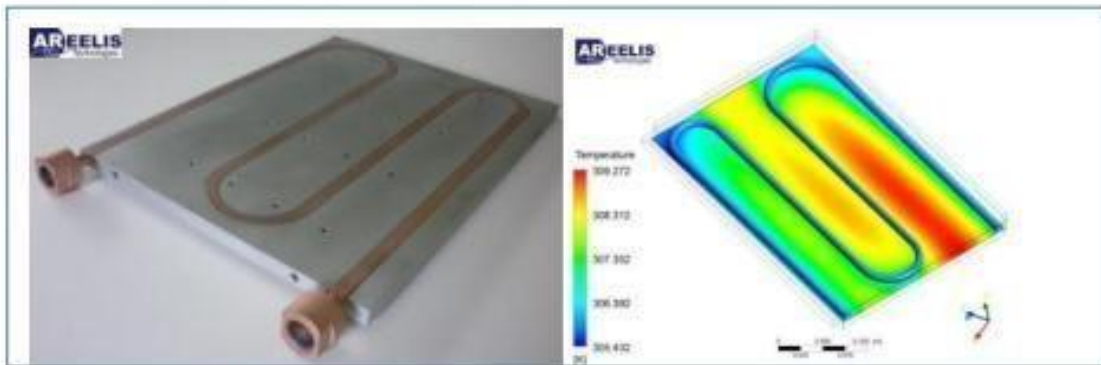


Figure I. 14: Refroidissement liquide à plaque froide [19].

- **Refroidissement par micro canaux :**

En effet, avec le développement continu de la microélectronique et l'intégration de plus en plus importante de transistors à haute vitesse dans les appareils électroniques, la densité de dissipation thermique visée pour les applications futures est de l'ordre de 500 W/cm^2 [24], [25]. Pour répondre à ces exigences, les micro-canaux sont de plus en plus utilisés comme dispositifs de refroidissement performants dans les systèmes embarqués, tels que ceux utilisés dans l'aérospatiale, ainsi que dans l'électronique médicale. Ces micro-canaux permettent une dissipation de la chaleur à des niveaux très élevés grâce à leur surface de contact accrue et à leur capacité à augmenter la vitesse de transfert de chaleur [26].

Exactement, les échangeurs de chaleur à micro-canaux présentent de nombreux avantages par rapport aux échangeurs de chaleur conventionnels. En plus d'un bon coefficient de transfert thermique, ils offrent une excellente robustesse à la pression du liquide. De plus, ils sont compacts et légers, ce qui les rend adaptés aux applications nécessitant une dissipation de chaleur efficace dans un espace restreint. Ils sont également faciles à intégrer dans des dispositifs électroniques tels que les circuits imprimés.

-Les principaux avantages :

1. les micro-canaux agissent comme plusieurs micro-plaques-ailettes, ce qui augmente considérablement la surface d'échange thermique. Ainsi, la résistance thermique de convection est réduite, ce qui améliore l'efficacité du transfert de chaleur. De plus, l'utilisation de micro-canaux permet de supprimer la plateforme sous boîtier, réduisant ainsi la résistance thermique de conduction. Cela signifie que la chaleur est transférée plus rapidement et plus efficacement de la source de chaleur vers le fluide de refroidissement. Cette conception

compacte et efficace rend les échangeurs de chaleur à micro-canaux particulièrement adaptés aux applications où l'espace et le poids sont des contraintes importantes, comme dans les systèmes embarqués de l'aérospatiale et de l'électronique médicale.

2. Effectivement, l'utilisation des micro-canaux permet de réduire la taille des systèmes de refroidissement car ils offrent une meilleure efficacité de refroidissement avec une surface d'échange plus petite. De plus, leur faible résistance thermique permet de réduire la taille des dissipateurs thermiques nécessaires pour évacuer la chaleur. Cela est particulièrement important pour les applications où l'espace est limité, comme dans les dispositifs mobiles ou les ordinateurs portables.

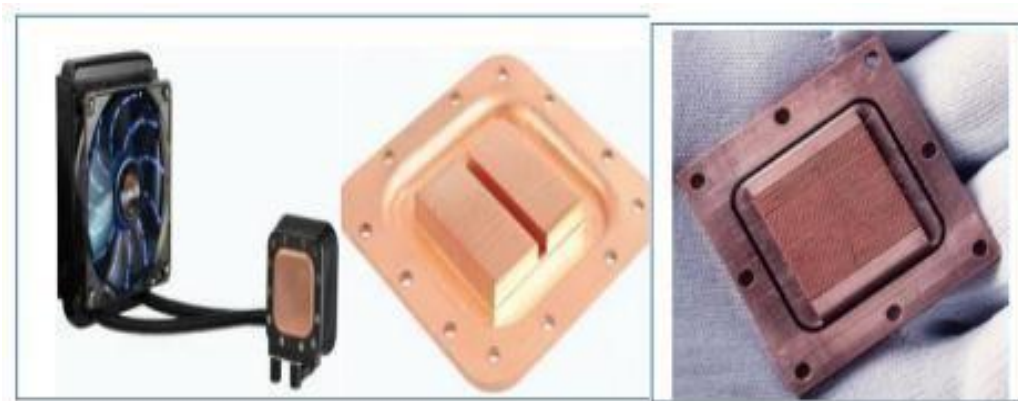


Figure I. 15: Refroidissement liquide à micro-canaux.

-Refroidissement par mini canaux :

Le refroidissement par mini-canaux est en effet une technique de refroidissement à micro-échelle qui consiste à faire circuler un liquide à travers de petits canaux (de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de micromètres) afin de dissiper la chaleur produite par un composant électronique. L'un des avantages de cette technique est en effet la possibilité de limiter le volume de fluide nécessaire pour le refroidissement, ce qui permet de réduire la taille du système de refroidissement dans son ensemble. De plus, les mini- canaux offrent également un bon coefficient de transfert thermique, ce qui permet une dissipation thermique efficace.

Ce paramètre est important car, la masse volumique de ce fluide est assez grande et de plus il est très cher [6].



Figure I. 16: Refroidissement liquide à mini-canaux.

I-4-2-3-Refroidissement diphasique (caloducs) :

Lorsque la source de chaleur est appliquée à une extrémité du caloduc, le liquide est chauffé et se vaporise. La vapeur se déplace alors vers l'extrémité froide du caloduc où elle condense et libère la chaleur transportée. Le liquide ainsi reconstitué retourne alors vers l'extrémité chaude en suivant la structure capillaire. Le processus de vaporisation, de condensation et de capillarité se répète continuellement, permettant le transport de la chaleur sur une distance relativement importante. Les caloducs sont utilisés dans de nombreux systèmes de refroidissement, notamment pour les processeurs d'ordinateurs portables, les écrans plats et les dispositifs de stockage de données.

En effet, contrairement aux méthodes de refroidissement par convection forcée ou naturelle, le caloduc ne dépend pas de la gravité pour fonctionner, ce qui le rend particulièrement adapté aux environnements où les contraintes de gravité sont importantes, comme dans l'espace ou dans les applications mobiles. De plus, le caloduc est très efficace pour transférer de grandes quantités de chaleur sur de longues distances avec une faible différence de température entre les deux extrémités. Le caloduc est donc souvent utilisé dans les applications de refroidissement des composants électroniques tels que les processeurs de micro-ordinateurs, les puces graphiques, etc.

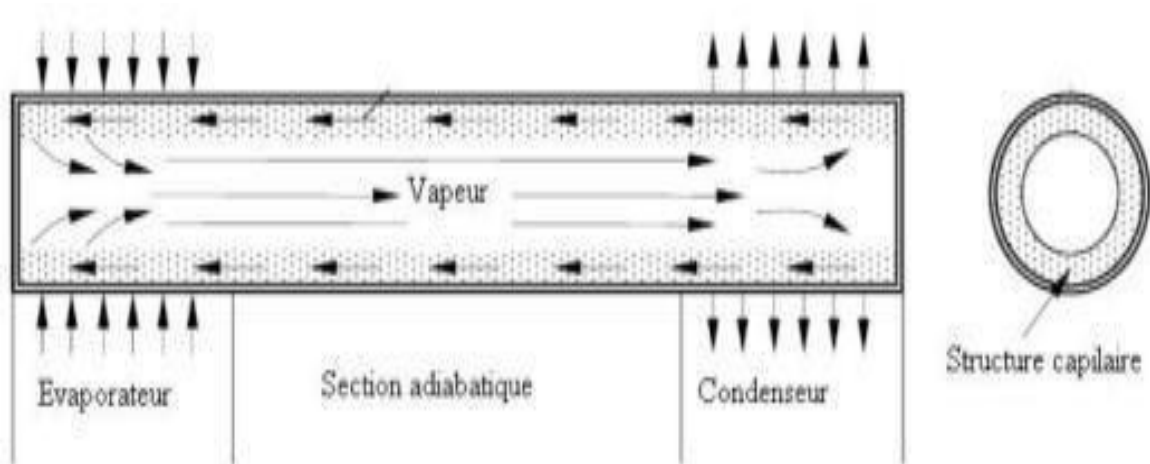


Figure I. 17: Principe de fonctionnement d'un caloduc [26].

Effectivement, le caloduc est très utilisé dans divers domaines tels que la microélectronique, la médecine, l'électronique de puissance et le domaine spatial, car il permet de transférer la chaleur avec un très faible gradient de température et de fonctionner dans toutes les positions, y compris hors gravité. De plus, grâce à la structure capillaire qui tapisse les parois internes du caloduc, la valeur équivalente de la conductivité thermique de l'espace vapeur peut atteindre des valeurs très élevées, ce qui rend le caloduc très efficace pour extraire la chaleur d'un endroit difficilement accessible et la transférer vers une zone facilement refroidie.

I-5-1- Huile minérale :

Les huiles minérales sont un type d'isolant utilisé dans les équipements électriques depuis longtemps. Elles sont obtenues à partir du raffinage du pétrole brut. Le processus de raffinage permet d'éliminer les impuretés de l'huile pour améliorer ses performances. Selon le type de procédé utilisé, on peut obtenir différents types d'huiles minérales, tels que les huiles paraffiniques, aromatiques ou naphthéniques. Ces huiles sont des mélanges très complexes contenant de nombreuses molécules d'hydrocarbures différents. Les huiles minérales sont utilisées pour leur excellente stabilité chimique, leur haute résistance diélectrique, leur faible coût et leur disponibilité Regenerate response.

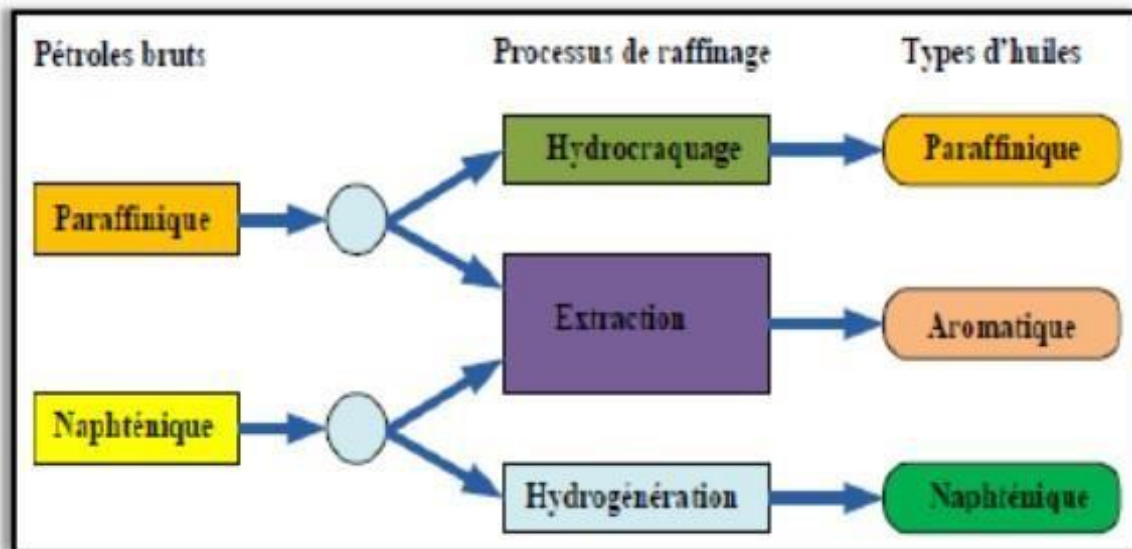


Figure I. 18: Processus de raffinage pour les huiles brutes.

I-5-2- Huiles végétales ou esters naturels :

Les esters naturels ont plusieurs avantages par rapport aux huiles minérales. Tout d'abord, ils sont renouvelables et biodégradables, ce qui les rend plus respectueux de l'environnement. De plus, ils ont une meilleure compatibilité avec les matériaux d'isolation en papier, ce qui peut réduire le risque de défaillance de l'isolation électrique. Les esters naturels ont également une faible toxicité, ce qui les rend plus sûrs pour les travailleurs et pour l'environnement. Cependant, ils ont une faible résistance à l'oxydation et à l'hydrolyse, ce qui peut limiter leur durée de vie. Des recherches sont en cours pour améliorer la stabilité des esters naturels et pour développer de nouvelles formulations qui répondent aux exigences des applications électriques.

I-5-3- Huiles esters synthétique :

Les huiles synthétiques présentent des performances supérieures aux huiles minérales en termes de stabilité thermique, de résistance à l'oxydation, de fluidité à basse température et de protection contre l'usure. Cependant, elles sont plus coûteuses que les huiles minérales et ne sont pas nécessaires pour toutes les applications. Les huiles synthétiques sont souvent utilisées dans les applications de haute performance telles que les voitures de course, les avions, les équipements de haute technologie et les machines industrielles haut de gamme.

I-7- Conclusion

Ce chapitre a été consacré à une introduction au transfert thermique et aux différentes méthodes de refroidissement des composants électroniques. Cette étude nous permettra d'identifier les paramètres les plus influents, tels que le type d'huiles (minérale, végétale, synthétique) et les surfaces traitées.



Chapitre II

II-1. Définition de caloduc :

Un caloduc est un dispositif de transfert de chaleur qui utilise une transition de phase pour transférer la chaleur entre deux interfaces solides[49].

A l'interface chaude d'un caloduc, un liquide volatil en contact avec une surface solide thermoconductrice se transforme en vapeur en absorbant la chaleur de cette surface. La vapeur se déplace ensuite le long du caloduc jusqu'à l'interface froide et se condense en un liquide, libérant la chaleur latente. Le liquide retourne ensuite à l'interface chaude par capillarité, force centrifuge ou gravité et le cycle se répète.

En raison des coefficients de transfert de chaleur très élevés pour l'ébullition et la condensation, les caloducs sont des conducteurs thermiques très efficaces. La conductivité thermique effective varie avec la longueur du caloduc et peut approcher $100 \text{ kW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ pour les longs caloducs, contre environ $0,4 \text{ kW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ pour le cuivre[50].

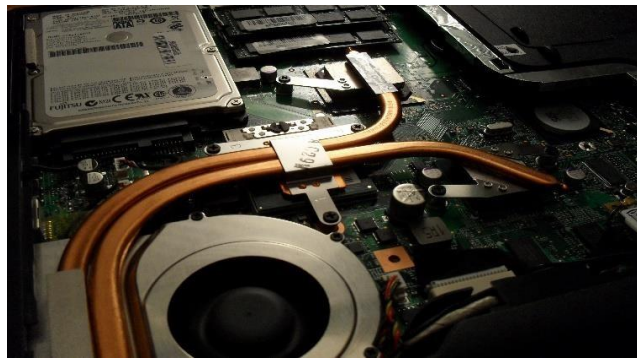


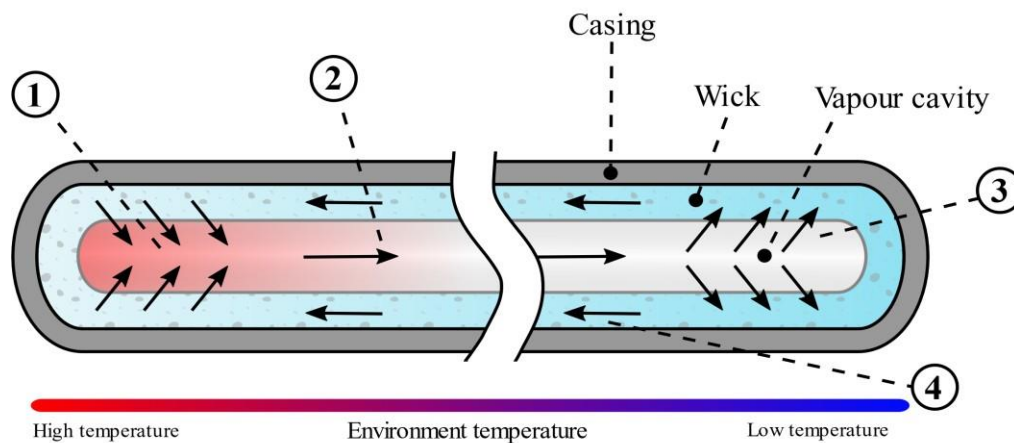
Figure II.1 : Un système de caloduc pour ordinateur portable

II-2. Conception, Construction et Structure du caloduc :

Un caloduc typique consiste en un tuyau ou un tube scellé fait d'un matériau compatible avec le fluide de travail tel que le cuivre pour les caloducs à eau ou l'aluminium pour les caloducs à ammoniac. En règle générale, une pompe à vide est utilisée pour éliminer l'air du caloduc vide. Le caloduc est partiellement rempli d'un fluide de travail puis scellé. La masse de fluide de travail est choisie de sorte que le caloduc contienne à la fois de la vapeur et du liquide sur la plage de température de fonctionnement[49].

La température de fonctionnement indiquée/recommandée d'un système de caloduc donné est d'une importance cruciale. En dessous de la température de fonctionnement, le liquide est trop froid et ne peut pas se vaporiser en gaz. Au-dessus de la température de fonctionnement, tout le liquide s'est transformé en gaz et la température ambiante est trop élevée pour que le gaz se condense. La conduction thermique est toujours possible à travers

les parois du caloduc, mais à un taux de transfert thermique considérablement réduit. De plus, pour un apport calorifique donné, il faut qu'une température minimale du fluide de travail soit atteinte ; tandis qu'à l'autre extrémité, toute augmentation supplémentaire (déviation) du coefficient de transfert de chaleur par rapport à la conception initiale aura tendance à inhiber l'action du caloduc. Cela peut être contre-intuitif, en ce sens que si un système de caloduc est aidé par un ventilateur, le fonctionnement du caloduc peut tomber en panne, ce qui entraîne une efficacité réduite du système de gestion thermique - potentiellement considérablement réduite. La température de fonctionnement et la capacité maximale de transport de chaleur d'un caloduc - limitée par sa structure capillaire ou autre utilisée pour renvoyer le fluide vers la zone chaude (force centrifuge, gravité, etc.) - sont donc inévitablement et étroitement liées [51].



Heat pipe thermal cycle

- 1) Working fluid evaporates to vapour absorbing thermal energy.
- 2) Vapour migrates along cavity to lower temperature end.
- 3) Vapour condenses back to fluid and is absorbed by the wick, releasing thermal energy.
- 4) Working fluid flows back to the higher temperature end.

Figure II .2 : Schéma montrant les composants et le mécanisme d'un caloduc contenant une mèche

Les fluides de travail sont choisis en fonction des températures auxquelles le caloduc doit fonctionner, avec des exemples allant de l'hélium liquide pour des applications à très basse température (2–4 K) au mercure (523–923 K), au sodium (873–1473 K) et même l'indium (2000–3000 K) pour des températures extrêmement élevées. La grande majorité des caloducs pour les applications à température ambiante utilisent de l'ammoniac (213–373 K), de l'alcool (méthanol (283–403 K) ou éthanol (273–403 K)) ou de l'eau (298–573 K) comme fluide de travail. . Les caloducs en cuivre/eau ont une enveloppe en cuivre, utilisent l'eau comme fluide

de travail et fonctionnent généralement dans une plage de températures de 20 à 150 °C[52] .

Les caloducs à eau sont parfois remplis en se remplissant partiellement d'eau, en chauffant jusqu'à ce que l'eau bout et déplace l'air, puis en les scellant lorsqu'ils sont chauds.

Pour que le caloduc transfère de la chaleur, il doit contenir un liquide saturé et sa vapeur (phase gazeuse). Le liquide saturé se vaporise et se déplace vers le condenseur, où il est refroidi et redevient un liquide saturé. Dans un caloduc standard, le liquide condensé est renvoyé vers l'évaporateur à l'aide d'une structure à mèche exerçant une action capillaire sur la phase liquide du fluide de travail. Les structures de mèche utilisées dans les caloducs comprennent la poudre de métal fritté, l'écran et les mèches rainurées, qui ont une série de rainures parallèles à l'axe du tuyau. Lorsque le condenseur est situé au-dessus de l'évaporateur dans un champ gravitationnel, la gravité peut renvoyer le liquide. Dans ce cas, le caloduc est un thermosiphon. Enfin, les caloducs rotatifs utilisent les forces centrifuges pour renvoyer le liquide du condenseur vers l'évaporateur[49].

Les caloducs ne contiennent aucune pièce mécanique mobile et ne nécessitent généralement aucun entretien, bien que les gaz non condensables qui se diffusent à travers les parois du tuyau, qui résultent de la dégradation du fluide de travail ou qui existent sous forme d'impuretés d'origine dans le matériau, puissent éventuellement réduire l'efficacité du tuyau. au transfert de chaleur[49].

L'avantage des caloducs par rapport à de nombreux autres mécanismes de dissipation de chaleur est leur grande efficacité dans le transfert de chaleur. Un tuyau d'un pouce de diamètre et de deux pieds de long peut transférer 3,7 kW (12 500 BTU par heure) à 1 800 °F (980 °C) avec une chute de seulement 18 °F (10 °C) d'un bout à l'autre. Certains caloducs ont démontré un flux de chaleur de plus de 23 kW/cm², soit environ quatre fois le flux de chaleur à travers la surface du soleil [53].

II-3. Matériaux de caloduc et fluides de travail :

Les caloducs ont une enveloppe, une mèche et un fluide de travail. Les caloducs sont conçus pour un fonctionnement à très long terme sans entretien, de sorte que la paroi et la mèche du caloduc doivent être compatibles avec le fluide de travail. Certains couples matériaux/fluides de travail qui semblent compatibles ne le sont pas. Par exemple, l'eau dans une enveloppe en aluminium développera de grandes quantités de gaz non condensables en quelques heures ou quelques jours, empêchant le fonctionnement normal du caloduc.

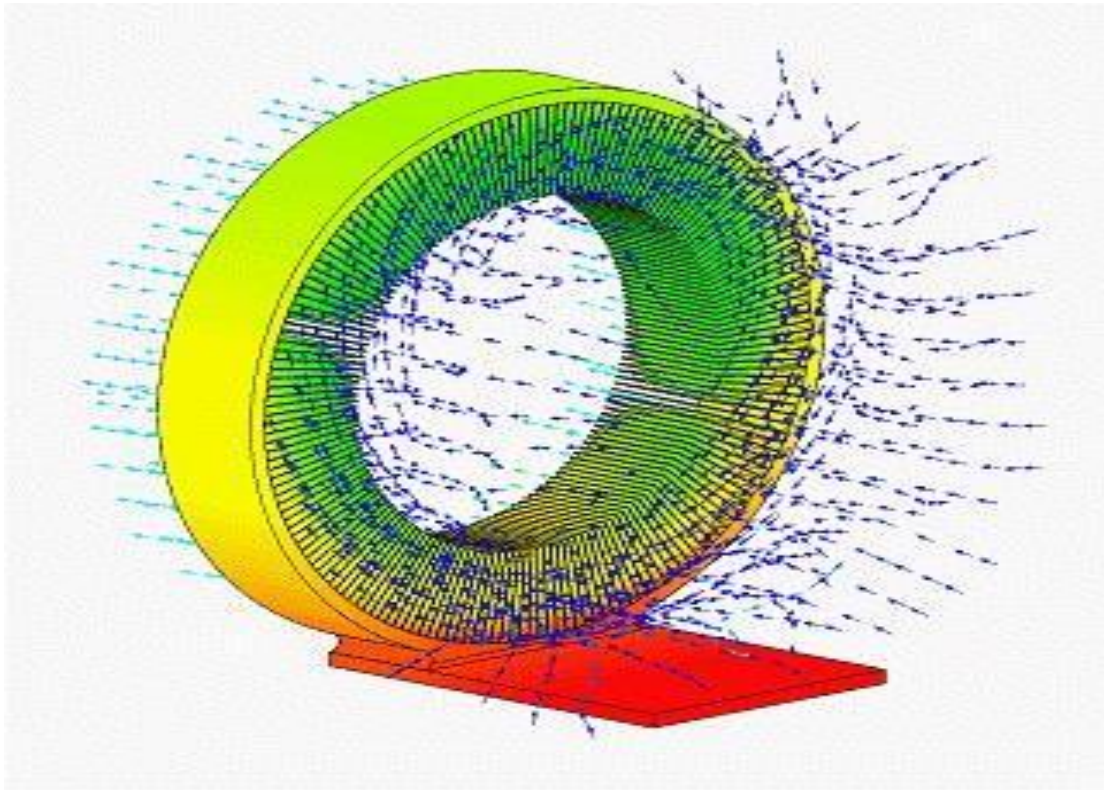


Figure II . 3 : Cette animation thermique de conception de dissipateur thermique de chambre à vapeur (dissipateur de chaleur) a été créée à l'aide d'une analyse CFD et montre la surface du dissipateur thermique à contour de température et les trajectoires d'écoulement de fluide prévues.

Depuis que les caloducs ont été redécouverts par George Grover en 1963, des tests de durée de vie approfondis ont été menés pour déterminer les paires enveloppe/fluide compatibles, certains se poursuivant pendant des décennies. Dans un test de durée de vie des caloducs, les caloducs fonctionnent pendant de longues périodes et sont surveillés pour des problèmes tels que la génération de gaz non condensables, le transport de matériaux et la corrosion[54].

Les paires enveloppe (et mèche)/fluide les plus couramment utilisées comprennent [55] :

- Enveloppe en cuivre avec fluide de travail à l'eau pour le refroidissement de l'électronique. C'est de loin le type de caloduc le plus courant.
- Enveloppe en cuivre ou en acier avec fluide de travail réfrigérant R134a pour la récupération d'énergie dans les systèmes HVAC.
- Enveloppe en aluminium avec fluide de travail à l'ammoniac pour le contrôle thermique des engins spatiaux.

- Enveloppe en superalliage avec fluide de travail en métal alcalin (césium, potassium, sodium) pour caloducs à haute température, le plus couramment utilisé pour l'étalonnage des appareils de mesure de température primaire.

D'autres paires comprennent des enveloppes en acier inoxydable avec des fluides de travail à l'azote, à l'oxygène, au néon, à l'hydrogène ou à l'hélium à des températures inférieures à 100 K, des caloducs en cuivre/méthanol pour le refroidissement de l'électronique lorsque le caloduc doit fonctionner en dessous de la plage d'eau, des caloducs en aluminium/éthane pour contrôle thermique des engins spatiaux dans des environnements où l'ammoniac peut geler, et enveloppe métallique réfractaire / fluide de travail au lithium pour les applications à haute température (supérieures à 1 050 ° C (1 920 ° F))[56].

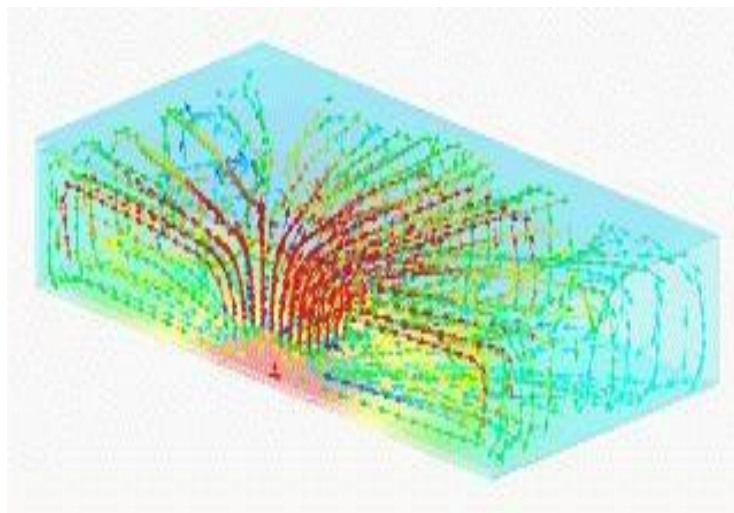


Figure II .4 : Cette animation de caloduc plat mince (dissipateur de chaleur) a été créée à l'aide d'une analyse CFD haute résolution et montre des trajectoires d'écoulement en fonction de la température.

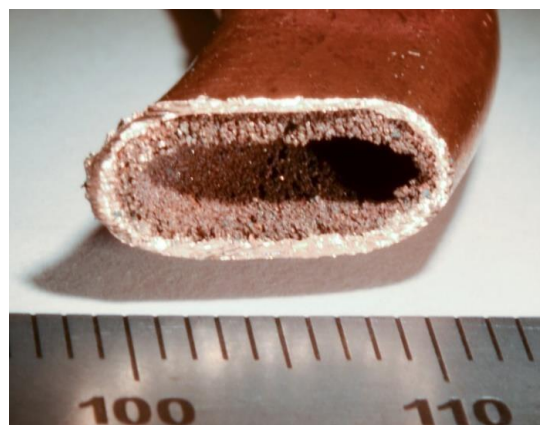
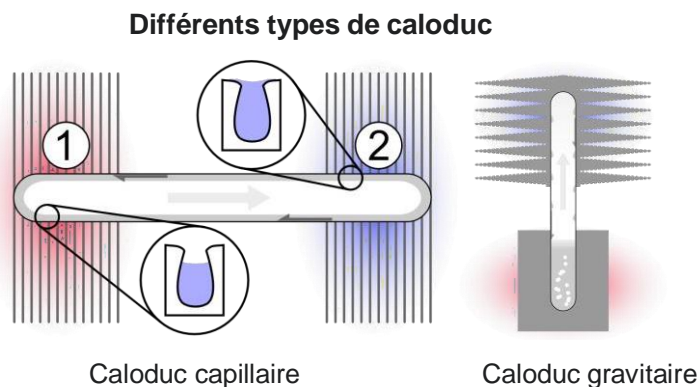


Figure II .5 : Coupe transversale d'un caloduc pour refroidir le processeur d'un ordinateur portable.

II-4. Types de caloduc :

En plus des caloducs standard à conductance constante (CCHP), il existe un certain nombre d'autres types de caloducs[57],notamment :

- Chambres à vapeur (caloducs plans), qui sont utilisées pour la transformation du flux de chaleur et l'isothermie des surfaces .
- Les caloducs à conductance variable (VCHP), qui utilisent un gaz non condensable (NCG) pour modifier la conductivité thermique effective du caloduc lorsque l'alimentation ou les conditions du dissipateur thermique changent .
- Les caloducs à pression contrôlée (PCHP), qui sont un VCHP où le volume du réservoir ou la masse du NCG peuvent être modifiés, pour donner un contrôle plus précis de la température .
- Caloducs à diode qui ont une conductivité thermique élevée dans le sens direct et une faible conductivité thermique dans le sens inverse
- Les thermosiphons qui sont des caloducs où le liquide est renvoyé à l'évaporateur par des forces gravitationnelles/accélérationnelles,
 - Caloducs rotatifs où le liquide est renvoyé à l'évaporateur par les forces centrifuges.



II-5. Chambre à vapeur ou caloducs plats :

Les caloducs planaires minces (diffuseurs de chaleur) ont les mêmes composants principaux que les caloducs tubulaires : un récipient creux hermétiquement scellé, un fluide de travail et un système de recirculation capillaire en boucle fermée.[58] De plus, une structure de support interne ou une série de poteaux sont généralement utilisés dans une chambre à vapeur pour

s'adapter à des pressions de serrage parfois jusqu'à 90 PSI. Cela permet d'éviter l'effondrement du dessus et du dessous plats lorsque la pression est appliquée.

Il existe deux applications principales pour les chambres à vapeur. Premièrement, ils sont utilisés lorsque des puissances et des flux de chaleur élevés sont appliqués à un évaporateur relativement petit[59]. L'apport de chaleur à l'évaporateur vaporise le liquide, qui s'écoule en deux dimensions vers les surfaces du condenseur. Une fois que la vapeur s'est condensée sur les surfaces du condenseur, les forces capillaires dans la mèche renvoient le condensat vers l'évaporateur. Notez que la plupart des chambres à vapeur sont insensibles à la gravité et fonctionneront toujours lorsqu'elles seront inversées, avec l'évaporateur au-dessus du condenseur. Dans cette application, la chambre à vapeur agit comme un transformateur de flux thermique, refroidissant un flux thermique élevé provenant d'une puce électronique ou d'une diode laser, et le transformant en un flux thermique inférieur qui peut être éliminé par convection naturelle ou forcée. Avec des mèches d'évaporateur spéciales, les chambres à vapeur peuvent éliminer 2 000 W sur 4 cm² ou 700 W sur 1 cm² [60].

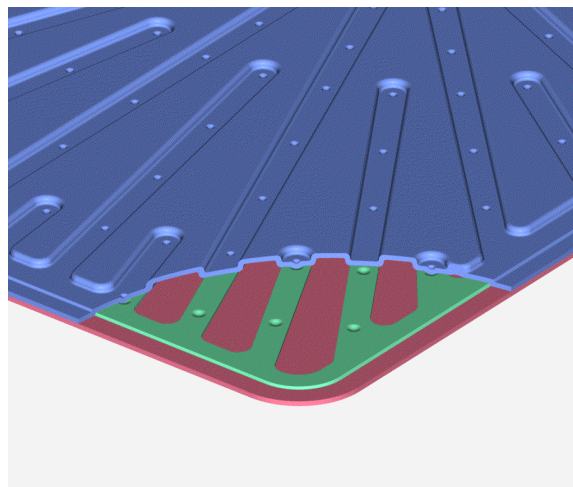


Figure II.6 : Vue en coupe d'un caloduc plat de 500 μm d'épaisseur avec un mince capillaire planaire (couleur aqua).

Une autre utilisation majeure des chambres à vapeur est à des fins de refroidissement dans les ordinateurs portables de jeu. Comme les chambres à vapeur sont une méthode de dissipation thermique plus plate et plus bidimensionnelle, les ordinateurs portables de jeu plus élégants en bénéficient énormément par rapport aux caloducs traditionnels. Par exemple, le refroidissement de la chambre à vapeur de la Legion 7i de Lenovo était son argument de vente le plus unique (bien qu'il ait été annoncé à tort comme tous les modèles ayant des chambres à vapeur, alors qu'en fait seuls quelques-uns en avaient) .

Deuxièmement, par rapport à un caloduc tubulaire unidimensionnel, la largeur d'un caloduc bidimensionnel permet une section adéquate pour le flux de chaleur même avec un dispositif très fin. Ces minces caloducs planaires trouvent leur place dans les applications "sensibles à la hauteur", telles que les ordinateurs portables et les cœurs de circuits imprimés montés en surface. Il est possible de produire des caloducs plats aussi fins que 1,0 mm (légèrement plus épais qu'une carte de crédit de 0,76 mm) [61].

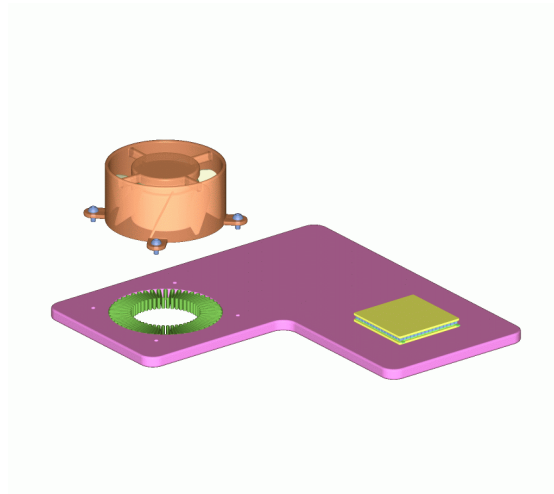


Figure II.7.: Caloduc plat mince (dissipateur de chaleur) avec dissipateur thermique et ventilateur à distance.

II-6. caloduc en boucle :

Un caloduc à boucle (LHP) est un dispositif de transfert biphase passif lié au caloduc. Il peut transporter une puissance plus élevée sur de plus longues distances en ayant un flux de liquide et de vapeur à co-courant, contrairement au flux à contre-courant dans un caloduc.[62] Cela permet à la mèche dans un caloduc en boucle d'être requise uniquement dans l'évaporateur et la chambre de compensation. Les caloducs à micro-boucles ont été développés et utilisés avec succès dans une large sphère d'applications à la fois au sol et dans l'espace.

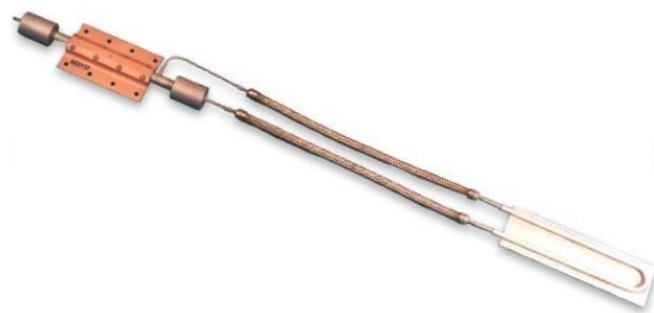


Figure II. 8 : loop heat pipe LHP

II-7. Transfert de chaleur à travers un caloduc :

Les caloducs utilisent le changement de phase pour transférer l'énergie thermique d'un point à un autre par la vaporisation et la condensation d'un fluide de travail ou d'un liquide de refroidissement. Les caloducs reposent sur une différence de température entre les extrémités du tuyau et ne peuvent pas abaisser les températures à chaque extrémité en dessous de la température ambiante (ils ont donc tendance à égaliser la température à l'intérieur du tuyau).

La pression de vapeur sur le fluide de travail liquide chaud à l'extrémité chaude du tuyau est supérieure à la pression de vapeur d'équilibre sur le fluide de travail de condensation à l'extrémité la plus froide du tuyau, et cette différence de pression entraîne un transfert de masse rapide vers l'extrémité de condensation où l'excès de vapeur se condense, libère sa chaleur latente et réchauffe l'extrémité froide du tuyau. Les gaz non condensés (causés par la contamination par exemple) dans la vapeur entravent l'écoulement du gaz et réduisent l'efficacité du caloduc, en particulier à basse température, où les pressions de vapeur sont faibles. La vitesse des molécules dans un gaz est approximativement la vitesse du son, et en l'absence de gaz sans condensation (c'est-à-dire s'il n'y a qu'une phase gazeuse présente), c'est la limite supérieure de la vitesse à laquelle elles pourraient se déplacer dans le caloduc . En pratique, la vitesse de la vapeur à travers le caloduc est limitée par le taux de condensation à l'extrémité froide et bien inférieure à la vitesse moléculaire. [citation nécessaire] Remarque/explication : le taux de condensation est très proche du coefficient d'adhérence fois la vitesse moléculaire multipliée par la densité du gaz, si la surface de condensation est très froide. Cependant, si la surface est proche de la température du gaz, l'évaporation provoquée par la température finie de la surface annule largement ce flux de chaleur. Si la différence de température est supérieure à quelques dizaines de degrés, la vaporisation à partir de la surface est généralement négligeable, comme on peut l'évaluer à partir des courbes de pression de vapeur. Dans la plupart des cas, avec un transport de chaleur très efficace à travers le gaz, il est très difficile de maintenir des différences de température aussi importantes entre le gaz et la surface de condensation. De plus, ces différences de température correspondent bien entendu à une grande résistance thermique effective en elle-même. Le goulot d'étranglement est souvent moins sévère au niveau de la source de chaleur, car les densités de gaz y sont plus élevées, correspondant à des flux de chaleur maximaux plus élevés[63].

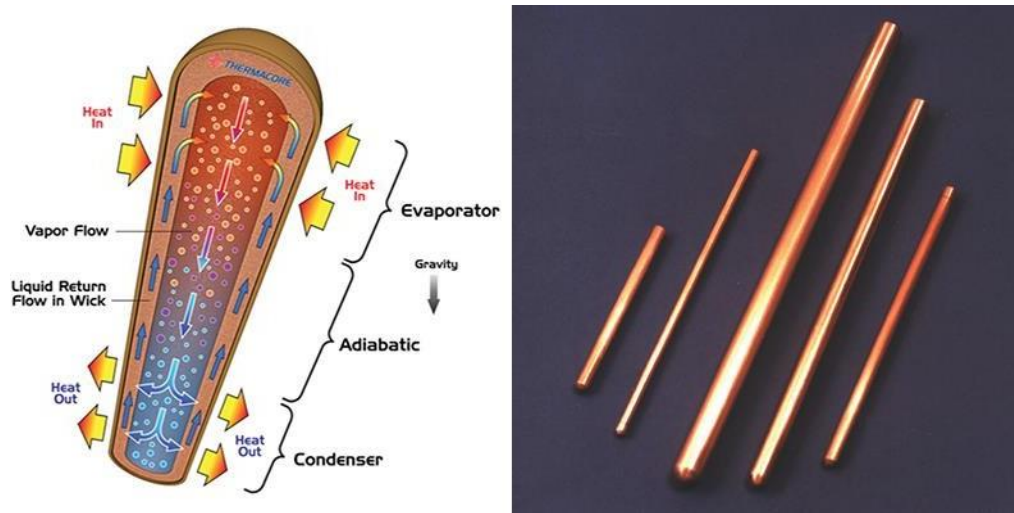


Figure II. 9 : principe de fonctionnement du caloduc.

II-8. Développement du caloduc :

Le principe général des caloducs utilisant la gravité, communément classés comme thermosiphons à deux phases, remonte à l'ère de la vapeur et à Angier March Perkins et son fils Loftus Perkins et le "Perkins Tube", qui a été largement utilisé dans les chaudières de locomotives et les fours de travail. Les caloducs capillaires ont été suggérés pour la première fois par R. S. Gaugler de General Motors en 1942, qui a breveté l'idée [30] , mais ne l'a pas développée davantage.

George Grover a développé indépendamment des caloducs capillaires au Laboratoire national de Los Alamos en 1963, son brevet de cette année [31] étant le premier à utiliser le terme «caloduc», et il est souvent appelé «l'inventeur du caloduc". [32]Il note dans son carnet :[33]

Un tel système fermé, ne nécessitant aucune pompe externe, peut être particulièrement intéressant dans les réacteurs spatiaux pour déplacer la chaleur du cœur du réacteur vers un système rayonnant. En l'absence de gravité, les forces doivent seulement être telles qu'elles surmontent le capillaire et la traînée de la vapeur de retour à travers ses canaux.

La suggestion de Grover a été reprise par la NASA, qui a joué un rôle important dans le développement des caloducs dans les années 1960, en particulier en ce qui concerne les applications et la fiabilité des vols spatiaux. Cela était compréhensible compte tenu du faible poids, du flux de chaleur élevé et de la consommation d'énergie nulle des caloducs - et du fait qu'ils ne seraient pas affectés par un fonctionnement dans un environnement d'apesanteur[65].

II-9. Domaines d'applications :

Ils sont utilisés depuis plusieurs années dans des domaines très variés comme le ferroviaire, l'aérospatial, sur des composants électroniques, le refroidissement de logique et d'électronique de puissance.

Ils sont beaucoup utilisés dans les capteurs solaires à tube en verre pour la production d'eau chaude (sanitaire ou chauffage). Introduits au centre d'une sorte de bouteille isotherme, leur extrémité chaude est en contact avec l'eau qui circule dans le circuit capteur-serpentin du ballon. Les caloducs sont utilisés pour le refroidissement des satellites, notamment de télécommunications, en l'absence d'atmosphère empêchant la ventilation, les caloducs transfèrent la chaleur des équipements situés à l'intérieur du satellite vers les parois, où elle est évacuée par rayonnement.

Les caloducs sont utilisés dans les moules en plasturgie. Pour évacuer les calories d'une broche, ou d'un tiroir, un caloduc est inséré dans l'empreinte ; l'autre extrémité du caloduc est en contact avec le fluide caloporteur, ou éventuellement la carcasse du moule. Cela permet de refroidir efficacement une broche où il est impossible de faire passer un fluide caloporteur, à cause de son faible diamètre par exemple.

L'utilisation de dissipateurs à caloducs s'est démocratisée dans les domaines du refroidissement de microprocesseurs pour micro-ordinateurs, dans le cadre d'aircooling. Les caloducs sont de plus en plus présents, sur beaucoup des nouveaux ventirads milieu et haut de gamme, ce qui permet souvent de s'affranchir du refroidissement liquide délicat à mettre en œuvre.

Depuis 1976, ils sont aussi utilisés pour les panneaux solaires thermiques.

Les caloducs sont parfois utilisés pour le transport d'hydrocarbures afin de maintenir la température du pergélisol suffisamment basse. Par exemple, l'oléoduc trans-Alaska transporte du pétrole en Alaska aux États-Unis. Sous sa forme liquide, la température du pétrole est supérieure à celle du pergélisol. De plus, la circulation du pétrole produit de la chaleur à cause de la friction sur les parois du pipeline ; la turbulence du fluide crée aussi de la chaleur. Cette dernière est en partie transmise aux structures métalliques à proximité, y compris les structures portantes du pipeline. Leur température peut donc faire fondre le pergélisol sur lequel elles s'appuient. Dès lors, les structures peuvent s'enfoncer dans le sol et ainsi provoquer des torsions, voire des bris au pipeline. Pour prévenir le dégel du pergélisol, chaque structure portante de l'oléoduc est pourvue de quatre caloducs verticaux (des thermosiphons)[66].

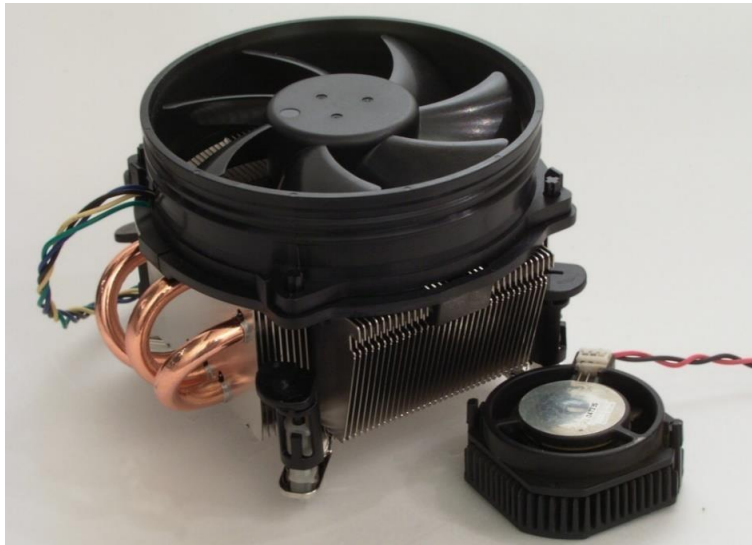


Figure II. 10 : Dissipateur thermique de processeur d'ordinateur avec caloduc en cuivre surmonté d'un ventilateur.

II-10. Conclusion :

En conclusion, les caloducs sont des dispositifs de transfert de chaleur très efficaces qui ont de nombreuses applications dans diverses industries. Ces appareils offrent plusieurs avantages, ce qui les rend largement utilisés à des fins de gestion thermique. Dans l'ensemble, les caloducs offrent un transfert de chaleur efficace, un fonctionnement passif, une uniformité de température, une compacité, une polyvalence et une fiabilité. Ces caractéristiques en font une technologie précieuse pour la gestion de la chaleur dans de nombreuses applications industrielles et technologiques.



Chapitre III

III-1. Introduction :

Dans le premier chapitre nous avons présenté, les systèmes de refroidissement sont essentiels pour maintenir des températures optimales et prévenir les dommages ou la dégradation des performances dans diverses industries. Qu'il s'agisse de refroidissement par air, de refroidissement par liquide, de systèmes de réfrigération ou de technologies de refroidissement avancées, ces systèmes garantissent une dissipation efficace de la chaleur, favorisant un fonctionnement efficace et fiable de l'équipement.

Nous l'avons également présenté dans le deuxième chapitre, Les caloducs sont des dispositifs de transfert de chaleur polyvalents, efficaces et fiables qui ont transformé la technologie de refroidissement. Leur fonctionnement passif, leur capacité de transfert de chaleur élevée et leur conception compacte les rendent précieux dans diverses industries. Les caloducs sont un outil essentiel pour la gestion thermique, assurant le fonctionnement sûr et efficace des appareils et systèmes électroniques.

Dans ce troisième chapitre nous allons présenter le caloduc capillaire est la capacité d'un liquide à s'écouler contre la force de gravité dans des espaces étroits. Les caloducs utilisent une structure capillaire ou mèche, généralement constituée d'un matériau poreux, pour faciliter le mouvement du fluide de travail. L'action capillaire aide au transport du liquide du condenseur (dissipateur de chaleur) à l'évaporateur (source de chaleur), en surmontant les forces gravitationnelles.

III-2. Caloduc capillaire :

Le caloduc capillaire sont des dispositifs qui transfèrent la chaleur avec un très faible gradient de température sans utiliser de pompe en profitant des changements de phase d'un fluide caloporteur. Le principe de fonctionnement d'un caloduc conventionnel est illustré sur la Figure (III.1). Il est constitué d'un matériau enveloppe dont les parois sont recouvertes d'un réseau capillaire saturé de liquide et d'un espace rempli de la vapeur saturante de ce même liquide.

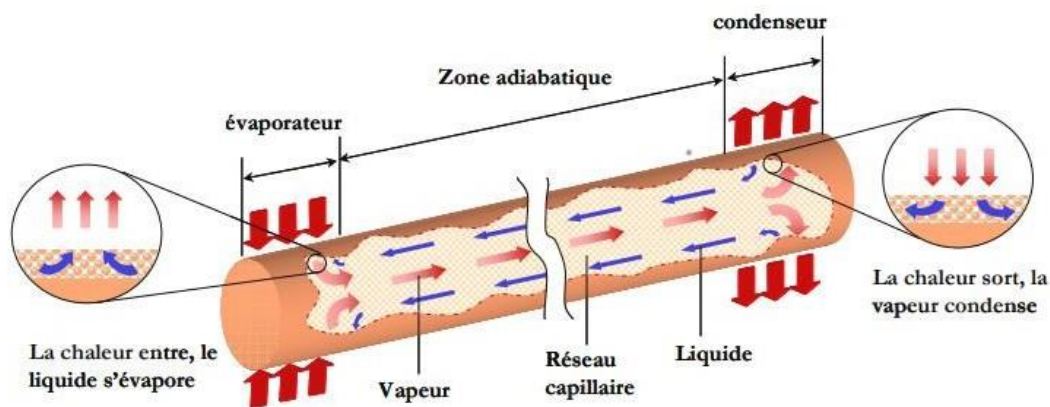


Figure III.1 : Principe de fonctionnement du caloduc capillaire

III-3. Boucles diphasiques à pompage capillaire :

Dans les caloducs conventionnels, la vapeur et le liquide sont toujours en contact et circulent dans des directions opposées. Pour éviter les interactions entre ces deux phases, le liquide et la vapeur peuvent être séparés par des conduits différents comme c'est le cas dans les boucles diphasiques. Développées après les années soixante pour des applications spatiales, les boucles diphasiques sont également exploitées dans diverses applications terrestres [COQ]. Comme les caloducs, ces systèmes de refroidissement utilisent les propriétés de changement d'état d'un fluide caloporteur et la circulation de ce fluide pour transférer d'importantes quantités de chaleur. Ils permettent des échanges de chaleur sur des distances de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Le principe de fonctionnement est le même que celui des caloducs, mais les chemins de la vapeur et du liquide sont découplés (Figure III .2) et Figure III .3). Au niveau de l'évaporateur, un élément poreux joue le rôle de moteur en créant le

pompage capillaire. Le liquide s'évapore grâce à l'absorption d'un flux de chaleur à l'évaporateur. La vapeur se dirige vers le condenseur à travers le conduit vapeur où elle condense. Le condensât revient au niveau de l'évaporateur par le conduit liquide. Le réservoir de contrôle permet d'absorber les fluctuations et l'expansion du fluide qu'il peut y avoir pendant le fonctionnement de la boucle. Il fixe également les conditions de fonctionnement de la boucle à savoir la température et la pression de saturation. Selon le réservoir, il existe deux types de boucle diphasiques à pompage capillaire : type LHP (Looped Heat Pipe) et CPL (Capillary Pumped Loop).

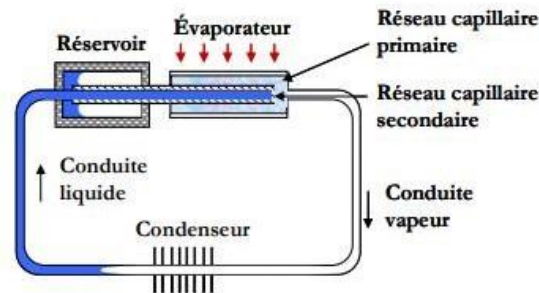


Figure III .2 : boucle diphasique á pompage capillaire Du type LHP

[COQ]

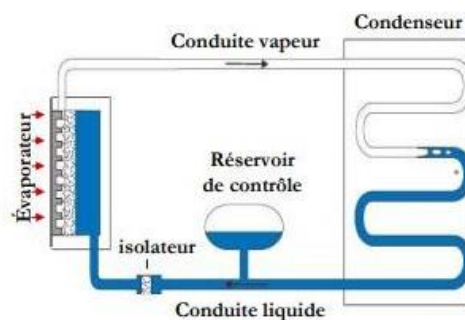


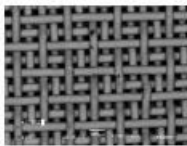
Figure III .3: boucle dyphasique á Du type CPL [SER]

Les boucles diphasiques à pompage capillaire présentent trois avantages. Elles assurent l'isolation thermique entre le liquide et la vapeur ; elles augmentent le choix du design car l'évaporateur et le condenseur sont séparés ; le réseau capillaire est éloigné de l'ensemble du système ce qui réduit les pertes de pression et augmente la limite capillaire [JEF]. Malgré ces avantages, les boucles de pompage capillaire restent compliquées à mettre en œuvre.

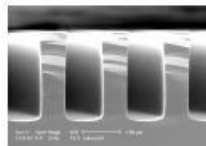
III-4. Réseaux capillaire :

Le réseau capillaire est le moteur du caloduc. Sa fonction principale est de ramener le liquide du condenseur à l'évaporateur. La structure capillaire doit donc générer un gradient de pression maximal tout en limitant les pertes de pression dues à l'écoulement du liquide. D'autre part, la

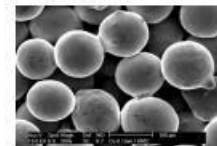
structure capillaire doit assurer un bon transfert thermique de la paroi externe vers l'interface liquide vapeur où se produit l'évaporation (ou la condensation). Les types de réseaux capillaires les plus utilisés sont présentés sur la et le flux de chaleur maximal transporté par ces structures . Un grand pompage capillaire peut être obtenu avec des mèches tissées qui sont très simples à réaliser (Figure (a)). Leurs principaux inconvénients sont le faible coefficient d'échange thermique et la faible perméabilité qui engendre des pertes de pression liquide importantes. Contrairement aux mèches tissées, les rainures axiales (Figure (b)) ont un coefficient d'échange élevé et une très bonne perméabilité. Il existe de nombreux profils de rainures – rectangulaires, triangulaires, circulaires, trapézoïdales, etc. Leur défaut est que le pompage capillaire est souvent insuffisant pour des fonctionnements contre la gravité. Un bon compromis entre les deux types de réseaux capillaires présentés, peut être fait en utilisant les poudres métalliques frittées (Figure (c)). Leur faible diamètre de pores permet d'avoir une pression capillaire très importante, suffisante pour assurer un bon fonctionnement contre la pesanteur. Au niveau thermique le réseau capillaire fritté est également très intéressant. Le frittage à haute température permet d'obtenir un très bon contact thermique entre l'enveloppe la poudre métallique. Le problème de cette structure, comme dans le cas des mèches tissées, est que la faible perméabilité des poudres frittées entraîne des pertes de charge importantes.



(a)



(b)



(c)

III-5. Résistance thermique du réseau capillaire :

Les échanges thermiques dans le réseau capillaire saturé de liquide sont très difficiles à déterminer. La conductivité thermique équivalente de ce milieu dépend fortement de sa géométrie et est comprise entre la conductivité thermique du réseau capillaire et la conductivité thermique du liquide qui le sature. Au transfert conductif dans le réseau capillaire s'ajoute un transfert convectif dû au déplacement du liquide. En plus, il peut se produire un début d'ébullition nucléée.

Dans le cas des poudres métalliques frittées, qui ont été utilisés au cours de cette thèse, la vitesse du fluide est très faible. Pour simplifier le calcul, certains auteurs prennent en compte seulement la conduction à travers les sphères de conductivités (k_s) dispersés dans un milieu de conductivité (k_l) [CHI][FAG]. Un de ces modèles est celui de Chi [CHI] :

$$k_{eff} = \frac{k_s [2k_s + k_l - 2(1-\varepsilon)(k_s - k_l)]}{2k_s + k_l + (1-\varepsilon)(k_s - k_l)}$$

III-6. Mesure de la limite capillaire :

III-6.1. Caloduc à plots :

En faisant varier la puissance du transistor, nous avons observé la variation des températures au niveau de l'évaporateur, du condenseur et de la zone adiabatique. La décroissance de t_{hR} correspond à une amélioration des transferts thermiques du caloduc. Dans le cas du montage T1, la résistance thermique est la plus petite entre 40 W et 63 W, ses valeurs variant entre $0.65^{\circ}\text{C}/\text{W}$ et $0.68^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Nous pouvons considérer que la résistance thermique reste constante dans ces limites parce que l'écart entre ces valeurs est très petit et peut être dû aux erreurs de mesures possibles. La résistance thermique croît brusquement à partir de 63.3 W. Ceci est dû au dépassement de la limite de fonctionnement du dispositif, la température de la zone adiabatique pour cette puissance maximale étant de 69°C .

Dans le cas du montage T2, cette limite capillaire a été mesurée autour des 120 W, pour une température dans la zone adiabatique de 64°C . La puissance maximale est plus élevée parce que la distance entre la source chaude et les sources froides diminue par rapport au montage T1. L'amélioration des échanges thermiques est aussi due à l'augmentation de la surface de la source froide.

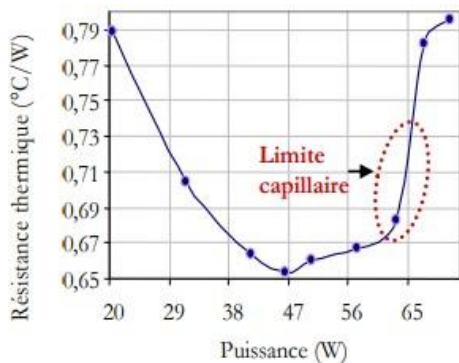


Figure III 4 : limite capillaire du montage T1

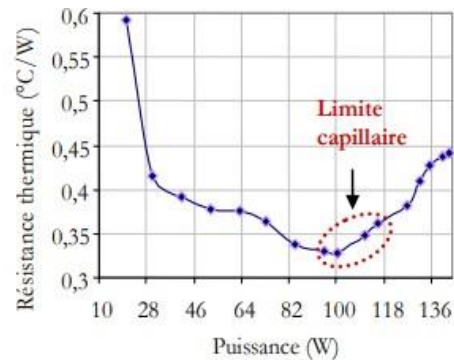


Figure III 5 : limite capillaire du montage T2

III-6.2. Caloduc à rainures frittées :

La limite capillaire peut être aussi estimée en observant la température du transistor. Cette température croît linéairement avec l'augmentation de la puissance injectée. Dans le cas du caloduc à rainures frittées, pour chaque pas de 1W, la température du transistor augmente d'environ 1.3-1.5°C ($\Delta T \approx 4.1$ °C). au moment où la limite capillaire est atteinte (52W), on observe une discontinuité de la courbe de température du transistor. Cette dernière augmente de 83.34°C pour la puissance de 51 W, jusqu'à 89.28°C pour 52.23 W ($\Delta T \approx 6$ °C).

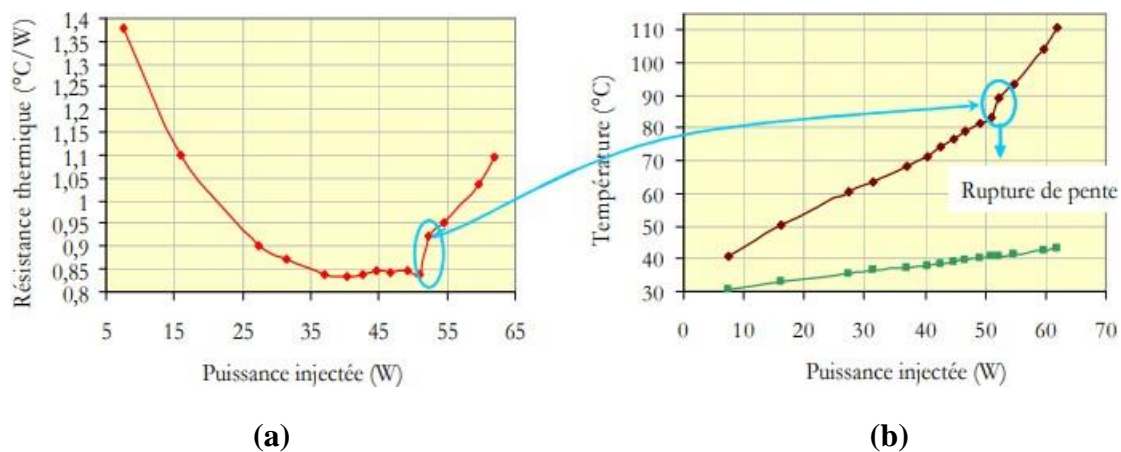


Figure III 6 : Détermination de la limite capillaire : (a) à partir de la résistance thermique ; (b) à partir de la température du transistor

III-7. Modèle réseaux capillaire :

Nous avons choisi de réaliser le réseau capillaire avec de la poudre de cuivre frittée. Ce type de réseau permet d'obtenir un très fort pompage capillaire, nécessaire pour distribuer le liquide vers les sources chaudes . Nous avons déposé une couche de poudre uniquement dans le demi caloduc pour simplifier la structure du dispositif. nous avons conçu le réseau capillaire afin de pouvoir comparer les résultats des tests avec notre modèle en 3D. Pour permettre à l'écoulement de circuler dans trois directions mais aussi pour assurer le passage de la vapeur, nous avons usiné des rainures de profondeur de 0.5 mm dans la poudre de cuivre, après avoir effectué le frittage. Ces rainures servent également à renforcer mécaniquement les parois fines. La structure du réseau capillaire est schématisée sur la (Figure III- 7).

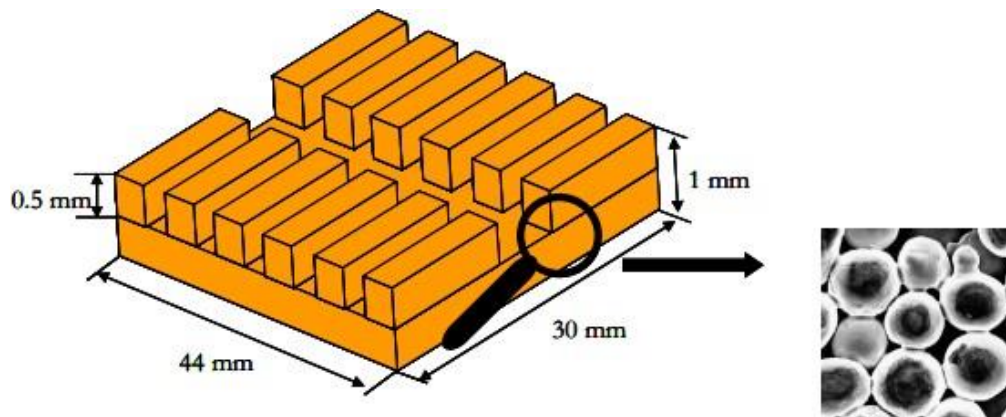


Figure III7 : Réseau capillaire à rainures frittées

Le diamètre de poudre que nous avons déposé est compris entre 40 et 60 μm . Les différentes expériences au laboratoire nous ont montré qu'il était très difficile d'usiner des rainures dans de la poudre frittée aussi fine (de diamètre inférieur à 90-80 μm). Le cuivre, constituant la poudre, perd sa rigidité car le frittage est effectué pendant 20 minutes sous haute température (supérieure ou égale à 1000°C). Nous avons aussi observé que la fraise avait tendance à écraser ce type de poudre, comme le montre la Figure 4-5. Les billes écrasées bouchent alors la surface du réseau capillaire et ne permettent pas au liquide de pénétrer correctement dans la poudre frittée. Même si le liquide peut pénétrer dans la poudre, le liquide ne peut plus s'évaporer ni se condenser, puisque la zone de changement de phase est presque aplatie. En résumé, cet écrasement réduit de façon notable (voire supprime) les échanges thermiques dans le réseau capillaire.

D'un autre côté, des petites billes peuvent être intéressantes pour des caloducs de faibles dimensions où l'épaisseur du réseau capillaire doit être minimisée. Dans ces cas spécifiques, il est important de pouvoir déposer plusieurs couches de billes, même si, en diminuant leur diamètre, la perméabilité du réseau capillaire diminue également.

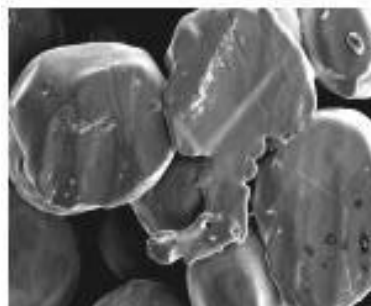


Figure III8 : Billes de cuivre écrasées par la fraise

III-8. Conclusion :

Un caloduc est un dispositif scellé en boucle fermée qui utilise les principes du changement de phase et de l'action capillaire pour transporter efficacement la chaleur. Son objectif principal est de transférer la chaleur d'une région à haute température (la source de chaleur) à une région à basse température (le dissipateur de chaleur) au moyen d'un fluide de travail.

Dans ce chapitre nous avons présenté le caloduc capillaire est la capacité d'un liquide à s'écouler contre la force de gravité dans des espaces étroits. Les caloducs utilisent une structure capillaire ou mèche, généralement constituée d'un matériau poreux, pour faciliter le mouvement du fluide de travail. L'action capillaire aide au transport du liquide du condenseur (dissipateur de chaleur) à l'évaporateur (source de chaleur), en surmontant les forces gravitationnelles.

En résumé, les caloducs sont des dispositifs de transfert de chaleur efficaces et polyvalents qui utilisent le changement de phase et l'action capillaire pour transporter efficacement la chaleur. Leur fonctionnement passif, leur conductivité thermique élevée et leur conception compacte les rendent inestimables dans de nombreuses applications où une gestion thermique efficace est essentielle.

Conclusion générale :

Le refroidissement des composants électroniques par caloduc est une solution efficace et largement utilisée pour gérer la dissipation thermique dans les dispositifs électroniques. Voici les principales conclusions à retenir :

Efficacité thermique : Les caloducs permettent une dissipation thermique efficace en transférant la chaleur générée par les composants électroniques vers une surface de refroidissement plus grande. Cela aide à maintenir les températures de fonctionnement à des niveaux sûrs, en évitant les problèmes de surchauffe et de performances réduites.

Conception compacte : Les caloducs offrent une solution de refroidissement compacte, idéale pour les applications où l'espace est limité. Leur structure fine et légère facilite leur intégration dans les appareils électroniques, tels que les ordinateurs portables, les smartphones et les tablettes.

Fonctionnement passif et silencieux : Les caloducs sont des dispositifs passifs, ne nécessitant pas de ventilateurs ou d'autres composants mécaniques pour le refroidissement. Cela réduit le niveau de bruit et contribue à une expérience utilisateur plus silencieuse.

Fiabilité élevée : Étant donné qu'ils ne comportent pas de pièces mobiles, les caloducs ont une durée de vie plus longue et présentent moins de risques de défaillance. Leur conception robuste les rend résistants aux vibrations, aux chocs et à d'autres contraintes environnementales.

Limites de performance : Bien que les caloducs soient très efficaces, leur performance dépend de facteurs tels que la capacité de transfert de chaleur, la conductivité thermique des matériaux utilisés et les conditions ambiantes. Des températures extrêmes ou une dissipation thermique excessive peuvent atteindre les limites de refroidissement des caloducs.

En somme, le refroidissement des composants électroniques par caloduc offre de nombreux avantages, notamment une dissipation thermique efficace, une conception compacte, un fonctionnement silencieux et une fiabilité élevée. Cependant, il est important de prendre en compte les spécifications thermiques du système, afin de choisir les caloducs appropriés pour répondre aux besoins de refroidissement spécifiques.

Référence bibliographique :

- [1] **Saâd ZOUTENE**, Étude numérique et expérimentale du refroidissement des convertisseurs auxiliaires de puissance dans les trains par convection naturelle, film liquide et caloduc, Thèse de doctorat en Énergétique "Université de VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS Le 06/06/2014, à VALENCIENNES
- [2] **A Bennia, S Rahal**, la convection naturelle dans une cavité simulant un thermosiphon, Editions, *Universitaires Européennes, Saarbrücken(Allemagne)*, p.1-124, (2014).
- [3] **Jean Tain, Franck Enguehard, Estell lacona**, Transfert thermique, Introduction aux transfert d'énergie, 2014.
- [4] **J-Philippe Pérez et A. M. Romulus**, Thermodynamique fondements et applications, Paris, Masson (1993).
- [5] **KHIDER fatma Zohra**, Amélioration de la convection mixte en utilisant des ailettes cylindriques avec des ouvertures au niveau de la base, mémoire de master université de M'sila, 2016
- [6] **ABDEDDAIM Amel**, Gestion des échanges thermiques des éléments électronique, mémoire de master université Biskra 2019
- [7] **Zhongda ZHANG**, Gestion thermique des composants d'électronique de puissance -Utilisation du diamant CVD, Thèse en vue d'obtention du doctorat de l'université de Toulouse, 2012.
- [8] **M. Chaour**, Interaction des structures tourbillonnaires avec la couche limite dans une cavité différentiellement chauffée, mémoire de magister, université Mentouri-Constantine (2010).
- [9] **A.BENNIA**, cours transfert thermique, université Mohamed el Bachir Ibrahimi bordj Bou Arreridj (2013 /2014)
- [10] https://www.researchgate.net/figure/Schema-simplifie-dun-moteur-a-combustion-interne-a-allumage-commande-suralimente-Le_fig37_321777790
- [11] Coefficient de transfert thermique par convection, sur le site : http://help.solidworks.com/2016/french/solidworks/cworks/c_Convection.htm.
- [12] https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://www.sft.asso.fr/Local/sft/dir/user-3775/documents/Ouvrages/livre%20Padet/PTC%202009%20-%20Chapitre%205.pdf&ved=2ahUKEwixwbu_saX2AhWck_0HHd3SAHUQFnoECAQQAQ&usq=AOvVawly0azw_GRscI-LQIaBrqIE.
- [13] **Seddik bouchouicha malika**, Étude des instabilités thermo-convective dans une enceinte différentiellement chauffée munie d'une ailette conductrice et adiabatique, thèse de doctorat en sciences, université de Mohamed Boudiaf Oran.

[14] <https://lesdefinitions.fr/composants#:~:text=Un%20composant%20%C3%A9lectronique%20est%20un,des%20soudures%20au%20circuit%20imprim%C3%A9>

[15] **Adel HAMOUC**H, Refroidissement à air des composants électroniques par convection mixte, mémoire de magister de l'université de Frères Mentouri Constantine, 2007.

[16] https://www.electrolube.fr/articles-techniques/gestion-thermique-des-appareils_electroniques/ (consulté 09/04/2019).

[17] **AREELIS Technologies** : dissipation thermique dans les composantes électroniques ; un enjeu pour la fiabilité des composant/système électroniques quelles solution technologiques. Laboratoire universitaire des sciences appliquées de Cherbourg, 2015.

[18] **Moualek Imane et Zerguine Belqassim** Simulation numérique de la convection mixte dans une nouvelle conception de dissipateur de chaleur rotatif utilisé pour le refroidissement d'un CPU mémoire de master université de Mohamed Boudiaf M'sila, 2019.

[19] **AREELIS Technologies** :(Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg), dissipation thermique dans les composantes électroniques ; un enjeu pour la fiabilité des composant/système électroniques quelles solutions technologiques. Laboratoire universitaire des sciences appliquées de Cherbourg, 2015

[20] **Hasna Louahlia** (Lusac), **Sebastien You** (Areelis technologies), Dissipation thermique dans les composants/systèmes électroniques, Areelis technologies, Lusac (laboratoire universitaire des sciences appliquées de Cherbourg), 2015.

[21] **Frank Fan**, "Electronics packaging simplified radiation heat transfer analysis method with Thermal and Thermo mechanical Phenomena in Electronic Systems", 2004. SEMITHERM '04. The Ninth Inter society Conférence, 2004.

[22] **M.tawk**, "étude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique", L'UNIVERSITE DE GRENOBLE, GRENOBLE.2006.

[23] **Zhongda ZHANG**, Gestion thermique des composants d'électronique de puissance -Utilisation du diamant CVD, Thèse en vue d'obtention du doctorat de l'université de Toulouse, 2012.

[24] **Stephen A. Solovitz**, M.E.L.D.S., Advanced Technology Leader, Ener, Micro channels Take Heat sinks to the Next Level, November 2006, Power Electronic Technology: Power Electronic Technology November 2006. p. 14-20.

[25] "What Does the Future of Thermal Management Hold for Electronics?" (<http://www.me.umn.edu/divisions/tht/tme/tme4.html>).

[26] **Mansour TAWK**, Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un mouvement d'un fluide électrique, Thèse de Doctorat, Université de Grenoble.2011

- [27] **R Hopkins, A Faghri, and D Khrustalev**, « Flat miniature heat pipes with micro capillary groove», *Journal of Heat Transfers*, Vol. 121, pp. 102-109, (1999)
- [28] **Y Cao, M Gao, J.E Beam, and B Donovan**, Experiments and Analyses of Flat Miniature Heat Pipes, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 11, pp. 158-164, (1997).
- [29] **J. Sabau**, Determination of solid suspensions in electrical insulating oils by turbidimetry, in *SAIT/CEA Technology Symposium, Calgary (Alberta)*, 1998, pp. 11-12
- [30] **K. S. KASSI**, Étude de l'impact du vieillissement des huiles minérales et alternatives sur le refroidissement des transformateurs de puissance : Approches numériques et expérimentales, Chicoutimi, canada: thèse de doctorat, 2019.
- [31] <http://joho.monsite.orange.fr/> LUBRIFICATION : LES HUILES P1
- [32] **SEO YOUNG et AL.** Forced Convection Heat Transfer From Two Heated Blocks in Pulsating Channel Flow. *International Journal Heat and Mass Transfer* 1998; 41, 625-634.
- [33] **S.S. HSIEH, D.Y. HUANG.** Numerical Computation of Laminar Separated Forced Convection on Surfaced-Mounted Ribs 1987.
- [34] **Y.L. Tsay and J.C. Cheng**, Analysis of Convective Heat Transfer Characteristics for a Channel Containing Short Multi-Boards Mounted with Heat Generating Blocks, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007.
- [35] **C .Benseghir**, étude de la convection naturelle dans une cavité ayant une paroi ailetée, mémoire magister, université de Batna (2008).
- [36] **G. de Vahl Davis**, Natural convection of air in a square cavity, a bench mark solution. *Int. J. Numer. Methods Fluids*, vol. 3, pp. 249-264 (1983)
- [37] Conférence internationale sur l'énergie verte et l'ingénierie environnementale (GEEE-2017). *Journal internationale de la recherche scientifique et des technologies d'ingénierie IJSET Vol.5 pp1-4*
- [38] Refroidissement par convection naturelle des composants électroniques montés sur une paroi verticale *Sciences & Technologie B – N°33*, (Juin 2011), pp 41 – 52 [39] Refroidissement par convection mixte des composants électroniques montés dans un canal horizontal, Laboratoire d'Energétique Appliquée et de Pollution, Département de Génie Mécanique, Université Mentouri-Constantine, Route de Ain El. Bey, Constantine 25000, Algérie PP 1-6.
- [39] **Wang, Q. et Jaluria, Y. (2004)**. Three dimensional conjugate Heat Transfer in a horizontal channel with discrete heating, *ASME Journal of Heat Transfer*, vol 126: pp. 642 -647.
- [40] **Bhowmik, H., Tso, C., Tou, K., Tan, F. (2005)**. Convection heat transfer from discrete heat sources in a liquid cooled rectangular channel, *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, pp. 2532-2542.

- [41] **T. Furukawa, W-J Yang. (2003)** Thermal fluid flow in parallel boards with heat generating blocs, *International Journal of Heat and Mass Transfer* vol 46 pp 5005-5015.
- [42] **Boutina, L, Bessaïh, R. (2011)** Numerical simulation of mixed convection air-cooling of electronic components mounted in an inclined channel, *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, pp. 2052 – 2062.
- [43] **Kim, S. H, Anand, N.K. (2000):** Use of slots to enhance forced convective cooling between channels with surface-mounted heat sources *Numerical Heat Transfer, Part A*, vol. 38, pp. 1-21.
- [44] **I. Ishihara *, T. Fukui, R. Matsumoto,** Natural convection in a vertical rectangular enclosure with symmetrically localized heating and cooling zones, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.23, pp. 366–372 (2002).
- [45] **Help Fluent (6.3.26).**
- [46] **M. Hasnaoui, E. Bilgen, P. Vasseur,** Natural convection heat transfer in rectangular cavities partially heated from below, *J. Thermophys. Heat Transfer*, Vol. 6, pp. 255-264 (1992).
- [47] **B. Baudouy,** étude thermo-hydraulique d'un thermosiphon en hélium diphasique et en configuration horizontale, Laboratoire de Cryogénie et Station d'Essai, Stage réalisé du 05/07/2010 au 19/12/2010, CEA Saclay.
- [48] **N. Belghoul,** Modélisation et simulation de la convection due à un champ de force externe dans des cavités : Convection Naturelle, MHD et Marangoni, mémoire de master.
- [49] Faghri, A, 2016, [Heat Pipe Science and Technology](#), Second edition, Global Digital Press.
- [50] [^] ["Thermal conductivity of common metals, metallic elements and Alloys"](#). www.engineeringtoolbox.com. Retrieved October 15, 2020.
- [51] [^] Praful, S; Prajwal Rao, V; Vijeth, V; Bhagavath, Skanda V; Seetharamu, K N; Narasimha Rao, R (2020). ["On the operating temperature of heat pipes"](#). *Journal of Physics: Conference Series*. **1473** (1): 012025. [Bibcode:2020JPhCS1473a2025P](#). [doi:10.1088/1742-6596/1473/1/012025](#). [ISSN 1742-6588](#).
- [52] [^] ["Improving materials that convert heat to electricity and vice-versa"](#). *Ecnmag.com*. May 6, 2013. Archived from [the original](#) on July 28, 2013. Retrieved 2013-05-07.
- [53] [^] Jump up to:^{a b} [Popular Science – Google Books](#). June 1974. Retrieved 2013-05-07.
- [54] [^] Jim Danneskiold, [Los Alamos-developed heat pipes ease space flight](#). Los Alamos News Release, April 26, 2000.
- [55] [^] [Life Tests Archived](#) 2014-11-03 at the [Wayback Machine](#)
- [56] [^] ["Incompatible Heat Pipe Fluid/Envelope Pairs"](#). www.I-act.com. Archived from [the original](#) on 2018-07-08. Retrieved 2014-11-03.
- [57] [^] ["Heat Pipe Materials, Working Fluids, and Compatibility"](#). www.I-act.com.

[58] [^] ["Compatible Heat Pipe Fluids and Materials - Heat Pipe Technology"](#). [www.I-act.com](#). Archived from [the original](#) on 2019-03-28. Retrieved 2014-11-03.

[59] [^] ["Heat Pipes - Different Kinds of Heat Pipes"](#). [www.I-act.com](#).

[60] [^] [Advanced Cooling Technologies Inc. \(29 November 2013\). "Vapor Chamber Animation" – via YouTube.](#)

[61] [^] ["Vapor Chambers"](#). [www.I-act.com](#).

[62] [^] ["High Heat Flux, High Power, Low Resistance, Low CTE Two-Phase Thermal Ground Planes for Direct Die Attach Applications"](#). [www.I-act.com](#).

[63] [^] ["Legion 7i falsely advertised: not all models have vapor chambers"](#). [Spearblade](#). 2020-08-28. Retrieved 2020-10-20.

[64] [^] ["Modeling and Design Optimization of Ultra-Thin Vapor Chambers for High Heat Flux Applications, R. Ranjan et al., Purdue University Cooling Technologies Research Center Publications, Paper 186, 2012"](#). [purdue.edu](#).

[65] [^] ["George M. Grover, 81, Inventor Of Popular Heat Transfer Device"](#), November 3, 1996, New York Times.

[66] [^] [refroidissement diphasique de pointe \[archive\]](#), sur [mersen.com](#), consulté le 14 février 2016.

(en) K. A. R. Ismail et M. M. Abogderah, « Performance of a Heat Pipe Solar Collector », *Journal of Solar Energy Engineering*, ASME International, vol. 120, n° 1, 1998, p. 51 ([ISSN 0199-6231](#), [DOI 10.1115/1.2888047](#), [lire en ligne \[archive\]](#)).

(en) C. E Heuer, « The Application of Heat Pipes on the Trans-Alaska Pipeline », dans *Special Report 79-26*, United States Army Corps of Engineers, septembre 1979 ([lire en ligne \[archive\]](#) [PDF])