
DISSIPATION THERMIQUE DANS LES COMPOSANTS/SYSTEMES ELECTRONIQUES

**Un enjeu pour la fiabilité des
Composants/Systèmes électroniques
Quelles solutions technologiques?**



Etude financée par Normandie AeroEspace

Réalisation : AREELIS Technologies

LUSAC (Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de
Cherbourg)

Normandie AeroEspace, filière d'excellence en Normandie, regroupe l'ensemble des acteurs industriels et académiques qui travaillent sur les secteurs de l'aéronautique, du spatial, de la défense et de la sécurité. Elle travaille sur quatre axes spécifiques (Business et Performance - Communication - Emploi et Formation - Recherche, Technologie et Innovation).

Dans le cadre de la Recherche, Technologie et Innovation, NAE travaille sur la fiabilité et l'électrification des systèmes. Les enjeux majeurs de cet axe concernent la miniaturisation, l'augmentation de la puissance et des besoins accrus en termes de fiabilité des systèmes et des composants. Le management de la thermique joue un rôle central dans cette problématique. C'est la raison pour laquelle nous avons souhaité réaliser un état des lieux des solutions de dissipation thermique.

Ce document, se veut être un outil afin de vous aider dans la compréhension des phénomènes liés à la dissipation thermique et des solutions pouvant être mises en œuvre. Il vous permettra d'appréhender leur efficacité mais également les éventuels difficultés de mise en œuvre.

Les acteurs qui ont oeuvré dans la réalisation de cette étude bibliographique restent bien entendu à votre disposition pour vous informer et vous renseigner sur vos questions éventuelles.

Vous souhaitant une très bonne lecture, j'espère que ce document vous apportera une vision globale de la dissipation thermique dans les composants/systèmes électroniques.

Samuel CUTULLIC

Responsable RTI de Normandie AeroEspace

Cette étude a été réalisée par Mme Hasna Louahlia (LUSAC) et M. Sébastien Yon (AREELIS Technologies)

Contacts scientifiques : hasna.louahlia@unicaen.fr
sebastien.yon@areelis.fr

Table des matières

Glossaire.....	4
1. Les enjeux de la dissipation thermique.....	5
2. Les éléments électroniques	8
2.1. Les composants électriques	8
2.1.1. Les puces semi-conductrices	9
2.1.2. Condensateur de puissance	10
2.1.3. Diode de puissance.....	10
2.1.4. Contacteur de puissance	10
2.2. Les systèmes électroniques.....	10
2.2.1. Onduleur de puissance.....	10
2.2.2. Piles et accumulateurs.....	11
2.3. Les puissances électriques et thermiques.....	12
2.4. Environnement thermique.....	13
3. Les modes de transfert de chaleur	14
3.1. La conduction	14
3.1.1. Analogique thermique/électrique.....	15
3.2. La convection.....	17
3.3. Le rayonnement	19
4. Systèmes de refroidissement	20
4.1. Les systèmes de refroidissement monophasiques.....	20
4.1.1. Système de refroidissement à l'air	21
4.1.2. Système de refroidissement liquide.....	22
4.1.3. Spray cooling	25
4.1.4. Refroidissement par jets	28
4.2. Systèmes de refroidissement diphasique	29
4.2.1. Refroidissement par changement de phase solide-liquide.....	29
4.2.2. Refroidissement par changement de phase liquide-vapeur	31
4.3. Drain thermique	37
4.4. Refroidissement par effet Peltier	40
5. Synthèse des systèmes de refroidissement	42
Table des Figures	44
Bibliographie	45

Glossaire

Acronyme	Définition	Unités
CPL	Capillary Pumped Loop	
CTE	Coefficient of Thermal Expansion	
GTO	Gate Turn Off Thyristors	
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	
LHP	Loop Heat Pipe	
MOS	Métal-Oxyde-Semiconducteur	
PCM	Phase-Change Material	

Symbole

Cp	Capacité thermique massique	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
I	Intensité électrique	A
L	Longueur caractéristique	m
Q	Energie	J
R	Une résistance thermique ou électrique	K/ Ω
S	Surface de contact solide/fluide	m^2
Sp	Surface perpendiculaire au flux thermique	m^2
T	Température	K
T _a	Température du milieu environnant la surface	K
T _s	Température de la surface	K
V	Potentiel électrique	V
V _f	Vitesse du fluide	$m \cdot s^{-1}$
ϵ	Facteur d'émission de la surface	
λ	Conductivité thermique	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
μ	Viscosité dynamique du fluide	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
ρ	Masse volumique du fluide	$kg \cdot m^{-3}$
Φ	Flux thermique	W
σ	Constante de Stéphan Boltzmann	$W \cdot K^{-4} \cdot m^{-2}$

1. Les enjeux de la dissipation thermique

Dans le domaine des transports, la tendance est à l'introduction croissante de systèmes électriques que ce soit pour des besoins de traction ou pour la commande d'auxiliaires. Cette introduction s'est faite depuis un certain nombre d'années dans le cas du ferroviaire, se développe fortement dans le cas de l'automobile et de l'aéronautique. Ceci s'avère nécessaire dans un contexte de préservation des ressources naturelles et de diminution des émissions de gaz polluants. Dans le domaine aéronautique, la tendance vers un avion plus électrique, déjà amorcée pour le développement de l'Airbus A380 se confirme. L'avion plus électrique permet une meilleure approche de la gestion / rationalisation de l'énergie à bord apportant ainsi :

- Une diminution de la consommation de kérosène.
- Une diminution des coûts et des temps de maintenance.
- Une amélioration des systèmes embarqués.

Par conséquent, la puissance électrique embarquée ainsi que le nombre de convertisseurs de puissance augmentent et l'électronique de puissance se trouve être un des contributeurs majeurs dans l'atteinte de ces objectifs. Cependant cette évolution de l'hydraulique vers du « plus électrique » ne peut se faire aux dépens de la fiabilité des systèmes pour des raisons opérationnelles et économiques. Il est en effet nécessaire que les systèmes électriques offrent un niveau de fiabilité équivalent, voire supérieur aux systèmes actuels.

L'environnement aéronautique est particulièrement contraignant pour les composants/systèmes électroniques (modules IGBT, capacités, ...). Les contraintes sont multiples (température, dépression, vibrations, humidité) combinées et de fortes amplitudes (-55°C - +125°C, +90% HR, ...) ce qui est peu compatible avec l'utilisation de composants électriques. Il est donc important aujourd'hui de pouvoir estimer la fiabilité des composants des électroniques de puissance, en tenant compte de leur environnement, afin de pouvoir garantir la fiabilité des systèmes électriques. Dans le domaine ferroviaire où la technologie IGBT a été introduite depuis une dizaine d'années, la poursuite de l'introduction de nouvelles technologies apportant un gain de compétitivité significatif (compacité, masse, coût) ne pourra se faire que si le constructeur est en mesure de démontrer au client final que les risques techniques ont été maîtrisés (fiabilité, durée de vie ...).

De manière générale, les dispositifs d'électronique de puissance « embarqués », utilisés pour la traction de véhicules se voient confrontés à une demande de réduction de poids, d'encombrement et de coût et tendent par conséquent vers des structures très intégrées. La densification de la puissance qui en résulte s'en trouve significativement augmentée (jusqu'à plusieurs centaines de Watts/cm²). Dans certains ordinateurs, la puissance dissipée par unité de surface de puce est de l'ordre de 500 kW/m², c'est-à-dire tout à fait comparable aux densités de flux rencontrées au nez d'une navette spatiale lorsqu'elle rentre dans l'atmosphère.

Les structures de modules électroniques présentent des avantages certains en terme de densité d'intégration, mais la complexité de leur assemblage crée de nombreuses contraintes en fonctionnement, notamment thermomécaniques. Les composants semi-conducteurs de puissance, tels que les IGBT et leur assemblage subissent généralement un cyclage thermique actif, induit par les variations des régimes de pertes par conduction et commutation dans les puces, elles-mêmes liées aux variations de régimes de fonctionnement des convertisseurs. Le gradient de température ainsi introduit entre la puce et la semelle engendre des contraintes thermomécaniques répétées cycliquement tout au long de la vie du composant. Les coefficients thermomécaniques des différentes couches de l'assemblage, étant très dispersés, ces contraintes produisent alors une fatigue thermique, c'est-à-dire des dégradations physiques irréversibles conduisant à terme à la défaillance du composant

et de la structure dans laquelle il est inséré. Parmi les dégradations créées par les effets thermiques, on peut notamment citer :

- La dégradation des fils de bonding.
- Le délaminage des brasures du module de puissance.
- L'apparition de courants de fuite grille.
- L'impact sur la fiabilité des composants.
- La tenue des alliages etc...

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. L'influence de la température se manifeste sur :

- Les performances électriques : la température peut être une valeur limite au-delà de laquelle le fonctionnement n'est plus garanti, des dérives des paramètres provoquent une diminution des performances pouvant aller plus ou moins brutalement jusqu'à la défaillance.
- Le packaging qui est soumis à des gradients de température très importants. Il existe des températures critiques pour lesquelles se produisent des changements d'état, de structure physique...
- Le fluage et le relâchement des contraintes dans les matériaux sont accélérés par la température et peuvent conduire à des ruptures d'éléments.
- Les cycles thermiques auxquels sont soumis des matériaux reliés entre eux et de coefficient de dilatation différent induisent des forces très importantes qui peuvent conduire à une rupture instantanée ou créer une fatigue qui provoque une rupture à plus ou moins long terme.
- Le taux de défauts des composants suit une loi d'Arrhenius en fonction de la température.

La dissipation thermique est donc primordiale. Par conséquent l'utilisation de systèmes de refroidissement plus performants en terme de dissipation thermique, voire innovant, est crucial. D'autant plus que la mise en œuvre de ces systèmes de refroidissement est rendue complexe en raison de :

- La mise sous contrainte des composants/systèmes électroniques : puissance à dissiper plus importante, surface d'échange réduite et environnement thermique plus sévère.
- La présence d'échange thermique entre les différents éléments du système électronique.
- Une répartition inhomogène des composants source de chaleur.
- Une répartition inhomogène des composants réagissant différemment aux impacts thermiques.

Aujourd'hui il existe de nombreux systèmes de refroidissement basés principalement sur l'effet convectif monophasique qui répondent à la plus part des besoins de dissipation actuels. Mais, ces technologies sont limitées par leur performance thermique, par une dépendance totale à la surface d'échange, aux fluides utilisés, aux matériaux et à la géométrie même du dispositif d'échange. En outre, ces systèmes existants fonctionnent principalement sur un échange thermique global. Ces systèmes ne seront plus adaptés aux problématiques de dissipation thermique futures, comme refroidir avec précision la source thermique principale du composant ou du système. Plusieurs travaux de recherches dans les milieux industriels et universitaires sont donc conduits dans le but de concevoir de nouveaux systèmes de refroidissement, principalement basés sur le principe de changement de phase, couplant compacité, performance et coût économique réduit. Citons les exemples suivants apportant des perspectives pertinentes pour le refroidissement des systèmes électronique de puissance :

- Caloduc.
- Thermosiphon.

- Matériaux à changement de phase.
- Boucle diphasique.
- Spray-Cooling.

Ce rapport a pour objectif de présenter l'ensemble des techniques de refroidissement, matures ou non, susceptibles de garantir la tenue thermique optimale des systèmes électronique de puissance. Une partie de ce rapport est consacrée à la comparaison des avantages/inconvénients, puissance dissipée et coûts dans le but de sélectionner la technique appropriée en fonction du besoin en dissipation thermique.

2. Les éléments électroniques

Il existe trois types d'échelles pour considérer les problématiques de dissipation thermique des éléments électriques : l'échelle du **composant** (puce, diode...), celle du **système** (onduleur, KERS...), et celle des **applications** (automobile, avion, ...).

Afin de donner une idée des domaines d'application de l'électronique de puissance, la figure 1 présente le plan puissance apparente en fonction de la fréquence d'utilisation. Les domaines d'utilisation s'étendent de la dizaine de hertz pour les applications fonctionnant à plusieurs mégawatts, jusqu'à plusieurs centaines de kHz (transistors MOS les plus rapides) à de faible puissance (de l'ordre du watt). L'intervalle de puissance va donc du watt jusqu'à la centaine de mégawatts pour les applications les plus puissantes (par exemple les fours à arc électriques).

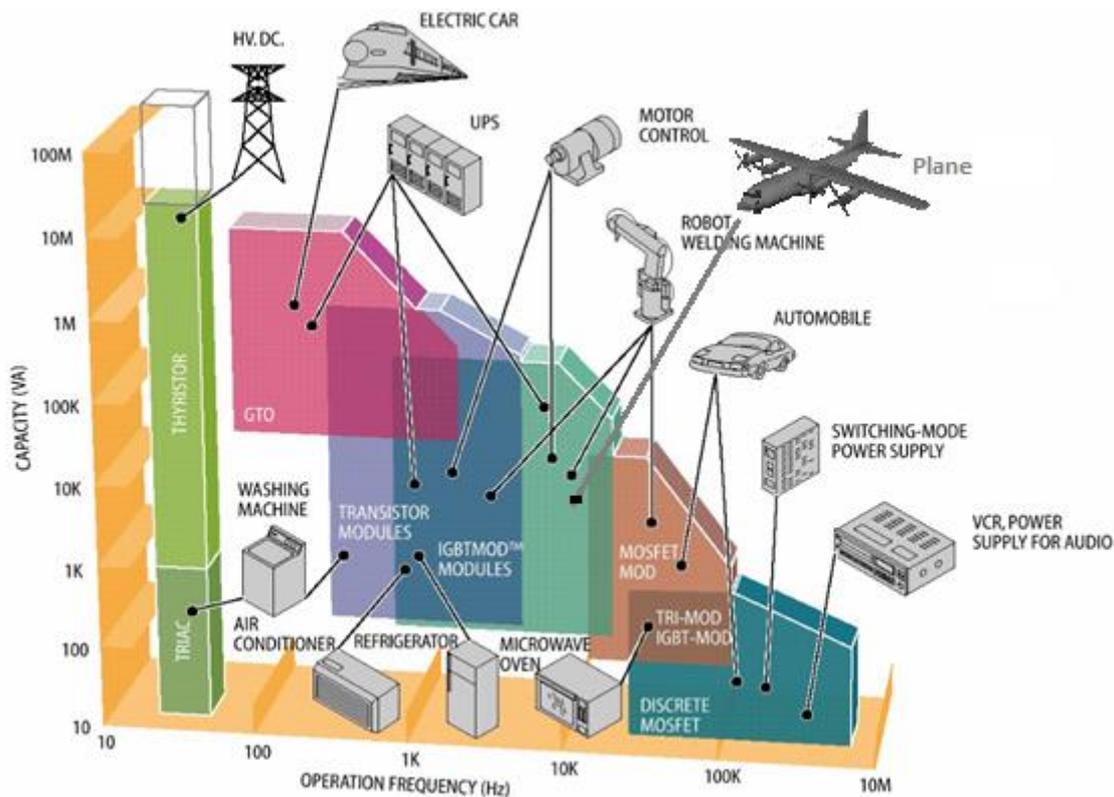


Figure 1. Les différents domaines d'application de l'électronique de puissance

Les puissances thermiques à dissiper dépendent du rendement des éléments électroniques. Selon la taille de l'élément, le rendement varie de 60% à 99%. A titre d'exemple le rendement d'un moteur électrique est d'environ 90% donc pour un moteur de 100 kW, la puissance thermique à dissiper est de 10 kW.

2.1. Les composants électriques

Les composants électriques sont les éléments de base de l'électronique de puissance. D'une taille allant de micromètre au centimètre, leurs puissances thermiques à évacuer sont relativement faibles (de l'ordre d'une dizaine de watts au maximum) rendant un refroidissement par convection naturelle suffisant. Mais leur nombre important au sein d'un système électrique nécessite un refroidissement global, intégrant plusieurs dizaines voire centaines de composants.

Il est à noter que lors du refroidissement d'un composant, la répartition du gradient de température localisé au niveau de la surface du contact entre le composant et le refroidisseur est de l'ordre de 40%

au niveau du composant, 20% au niveau de l'interface et 40% au niveau du refroidisseur(Karim et al., 2000).

Ci-dessous sont mentionnés quelques exemples exhaustifs de composants électriques afin d'en affiner l'origine et l'utilisation dans l'électronique de puissance.

2.1.1. Les puces semi-conductrices

Historiquement, les mises en forme d'énergie électrique étaient réalisées à l'aide de montages complexes à base de machines tournantes (convertisseurs dynamiques). L'essor des semi-conducteurs de puissance au début des années 1960 a permis le rapide développement des convertisseurs statiques d'énergie électrique (par opposition aux convertisseurs dynamiques). Les convertisseurs statiques sont donc désormais utilisés pour mettre en forme l'énergie électrique et permettre ainsi d'adapter les différentes sources d'énergies aux différentes charges. Ces convertisseurs statiques sont constitués d'interrupteurs électroniques à base de semi-conducteurs et d'éléments passifs. Ils permettent le transfert d'énergie tout en garantissant un rendement correct (Diaham, 2007).

Les puces semi-conductrices sont donc des modules de puissance réalisées à partir d'une pastille de silicium, d'une taille allant du millimètre au centimètre carré, et dont l'épaisseur varie de 50 à 500 μm . La puissance thermique à dissiper est localisée au niveau du silicium, et le boîtier séparant la pastille de l'environnement doit permettre d'évacuer une puissance allant jusqu'à une dizaine de watt (Lescot and Ndagijimana, 2000). Un dissipateur thermique (radiateur) est alors utilisé pour évacuer la thermique. Afin de réaliser la jonction thermique entre la puce et le dissipateur, le contact est réalisé par un matériau d'interface thermique (colle, PAD thermique, gel, graphite...). La figure 2 présente les zones approximatives (Puissance/Fréquence) d'utilisation des principaux semi-conducteurs de puissance.

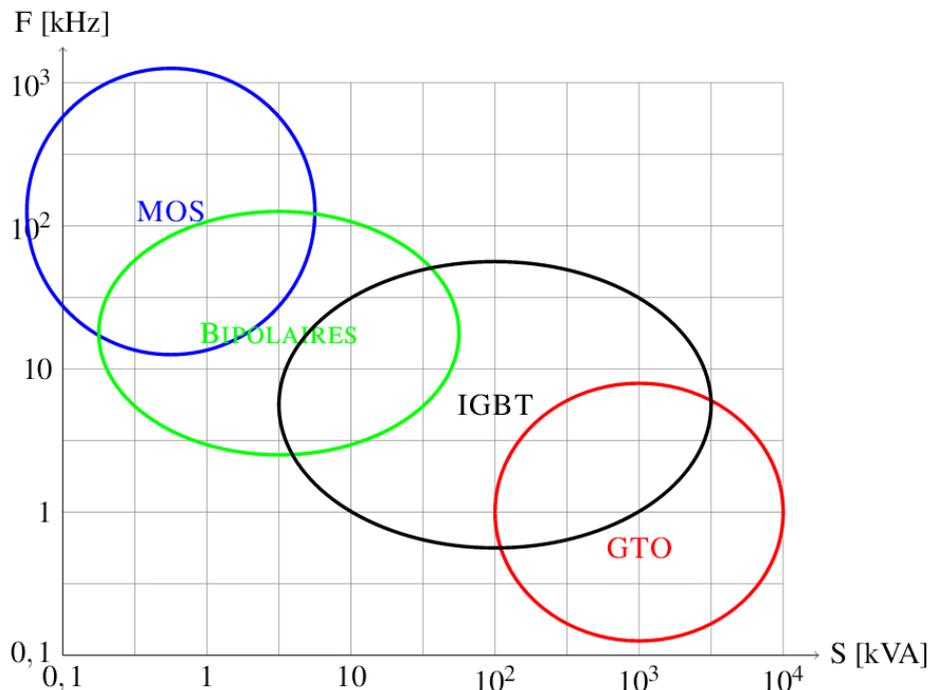


Figure 2. Zones approximatives (Puissance/Fréquence) d'utilisation des principaux semi-conducteurs de puissance

2.1.2. Condensateur de puissance

Les condensateurs de puissance sont des composants consommables. Leurs caractéristiques se dégradent au fil du temps selon les conditions d'exploitation. D'où l'intérêt de mieux en connaître les mécanismes, rapportés à l'aspect critique de l'installation. Nombreux sont les systèmes électriques qui comportent des condensateurs de puissance. C'est le cas par exemple des variateurs de vitesse dans le domaine des entraînements, des onduleurs ou encore, de façon plus évidente, des batteries de condensateurs chargées de maintenir un niveau acceptable de courant réactif. Les performances du condensateur de puissance évoluent et tendent à se dégrader au fil du temps et selon le type d'utilisation de l'équipement. C'est pourquoi il est important de prévoir des actions de maintenance, voire le remplacement de l'équipement, et surtout de prévoir un système de régulation thermique pour maintenir la température du condensateur dans une gamme spécifique (température minimale/maximale) afin d'en allonger la durée de vie.

2.1.3. Diode de puissance

La diode est le composant électronique de base dont le fonctionnement macroscopique est celui d'un interrupteur commandé qui ne laisse passer le courant que dans un seul sens. Les gammes de courant étant de plus en plus importante, les diodes tendent à monter de plus en plus en température dans les applications liées à la puissance. Leur refroidissement devient dans certains cas nécessaires pour en garantir le fonctionnement.

2.1.4. Contacteur de puissance

Le contacteur est un appareil mécanique de connexion ayant une seule position de repos et une seule position de travail. Il est capable d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales du circuit, y compris les conditions de surcharges en service. L'intérêt du contacteur est de pouvoir être commandé à distance. De même que pour les diodes, les sollicitations des contacteurs de plus en plus importantes induisent un refroidissement spécifique.

2.2. Les systèmes électroniques

Lorsque les niveaux de puissance commutée par les composants sont trop importants, ils sont positionnés dans des boîtiers le plus souvent circulaires, ou dans des modules rectangulaires. Dans tous les cas la mise dans un contenant du composant est associée à un refroidisseur permettant d'évacuer l'énergie dissipée par le composant, rapprochant la configuration d'un système électronique. Comme pour la partie précédente, les systèmes d'électroniques de puissance servent d'exemple pour introduire les besoins en refroidissement dédié.

2.2.1. Onduleur de puissance

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques permettant, à partir d'une tension continue d'obtenir des grandeurs électriques alternatives. Ils sont utilisés principalement dans deux catégories d'appareils:

- Les alimentations sans coupures (ex: onduleurs pour l'informatique, ...). La source continue est souvent constituée de batteries. La tension engendrée est souvent d'amplitude et de fréquence fixes.

- Les variateurs de vitesse pour machines à courant alternatif. La source continue est obtenue à partir du redressement du réseau. La tension engendrée est de fréquence variable, ce qui fait varier la vitesse des machines à courant alternatif. Dans ce cas, il convient que l'amplitude de cette tension soit également variable.

2.2.2. Piles et accumulateurs

Les piles et accumulateurs sont des générateurs électriques qui stockent l'énergie sous forme chimique et mettent en jeu une réaction chimique pour produire de l'électricité. La différence fondamentale entre ces 2 types de composants est la réversibilité de cette réaction (Robert and Alzieu, 2004):

- Une pile est dotée d'un capital énergétique (elle est chargée) à sa fabrication. Ce capital est consommé par l'utilisation de la pile. Lorsqu'il est épuisé, cette pile est hors d'usage (elle est déchargée). On ne peut que procéder à son recyclage, afin de récupérer certains de ses constituants.
- Un accumulateur neuf ne peut en général pas produire d'électricité ; il doit d'abord être chargé par l'utilisateur (première génération du capital énergétique, grâce à une source électrique extérieure). L'accumulateur produit ensuite de l'électricité en se déchargeant ; quand la décharge semble maximale, il peut de nouveau être rechargé pour utilisation ultérieure. Un accumulateur fonctionne ainsi par cycles de charge – décharge. Sa durée de vie est liée au nombre de cycles qu'il peut subir, et sa température d'utilisation qui doit se situer entre 20°C et 40°C (durée de vie dégradée en dehors de ces bornes).

En résumé, la réaction chimique au sein d'une pile est irréversible, alors qu'elle est parfaitement réversible au sein d'un accumulateur. La figure 3 présente la puissance de fonctionnement de différentes sources d'énergie en fonction de leur consommation énergétique (énergie spécifique). Les sources électriques présentent une puissance plus importante mais une autonomie plus faible.

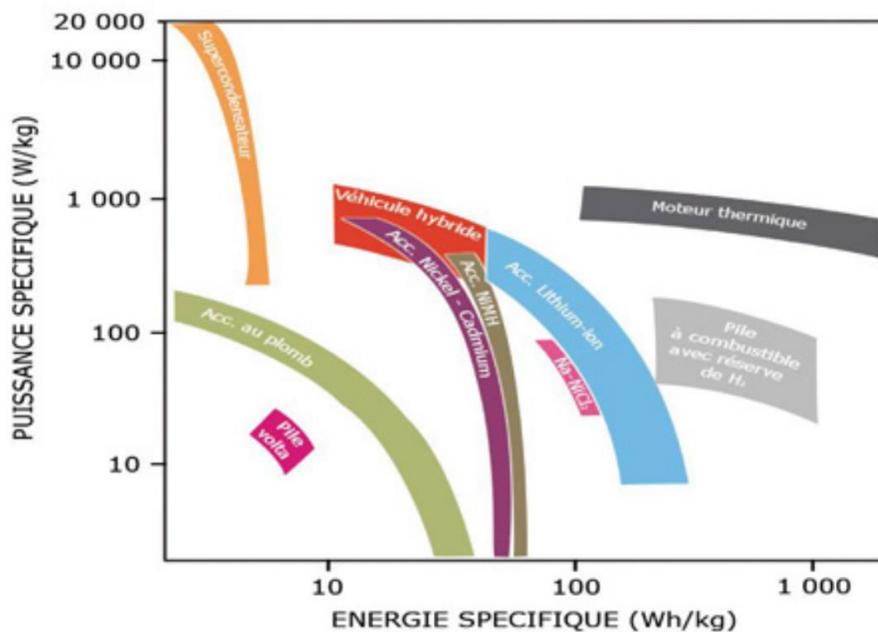


Figure 3. Puissance de fonctionnement de différentes sources énergétiques en fonction de leur autonomie.

2.3. Les puissances électriques et thermiques

Un système de refroidissement dédié à un composant ou élément électronique est fortement dépendant de la surface d'échange et de la puissance à dissiper. La figure 4 présente à titre indicatif la taille des éléments électroniques en fonction de leur puissance. Pour des éléments comme les batteries, toutes les puissances et tailles existent, nécessitant d'adapter le système de refroidissement à la configuration. A l'inverse, les convertisseurs de mesure ont des tailles et puissances relativement similaires, permettant d'utiliser le même type de refroidissement, en l'occurrence de la convection par de l'air soufflé (ventilateur, ...).

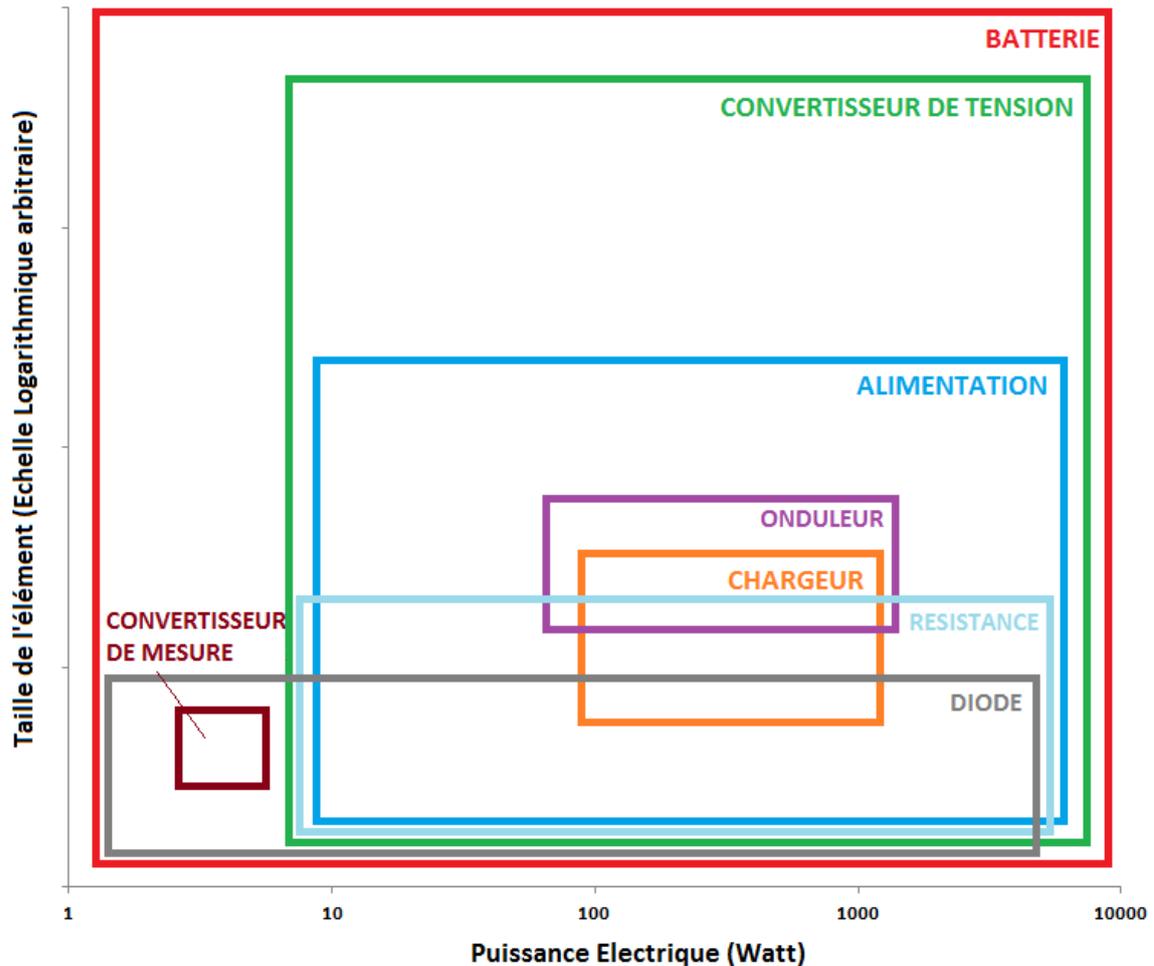


Figure 4. Taille des éléments électroniques en fonction de leur puissance

2.4. Environnement thermique

L'environnement dans lequel est positionné l'élément électronique impact la thermique de celui-ci. Il existe 5 principales sources de perturbation thermique de l'élément (Bouarroudj-Berkani, 2008) :

- **La température**

La température du milieu ambiant est une contrainte importante imposant la température initiale de l'élément (avant son utilisation) et sa température de stockage. Lors de l'utilisation, la température du milieu ambiant peut changer en raison du transfert d'énergie avec les éléments proches par convection.

- **Les constantes de temps**

La durée des cycles d'utilisation de l'élément et de ceux environnants, ainsi que leurs durées d'utilisation sont des données importantes, jouant sur les augmentations et diminutions de température du composant.

- **L'humidité**

L'humidité favorise la corrosion, entraînant des modifications de résistances d'isolement des matériaux composant l'élément et donc la capacité de dissipation thermique. La teneur en eau fait également varier les échanges thermiques au niveau des conductivités thermiques.

- **Le rayonnement solaire**

Les éléments exposés au rayonnement solaire peuvent subir des échauffements provoquant une montée en température de l'élément.

- **La pression atmosphérique**

La pression intervient dans la ventilation servant à évacuer la puissance à dissiper, et permettant le renouvellement de l'air.

3. Les modes de transfert de chaleur

Trois processus physiques permettent le transfert de chaleur d'un corps vers un autre dès lors qu'ils ne sont pas en équilibre thermique (à température différente) : la **conduction**, le **rayonnement** et la **convection**.

3.1. La conduction

La conduction représente le processus de propagation de la chaleur par le contact direct entre les particules d'un corps ou entre des corps ayant des niveaux énergétiques - donc des températures - différents, suite au mouvement de ces particules élémentaires. Le flux thermique conductif qui traverse un composant dépend de sa géométrie, de son épaisseur, du matériau ainsi que de la différence de température au travers le composant. La transmission est provoquée par la différence de température entre deux régions d'un milieu en contact physique. Il n'y a pas de déplacement appréciable des atomes ou molécules (voir figure 5).

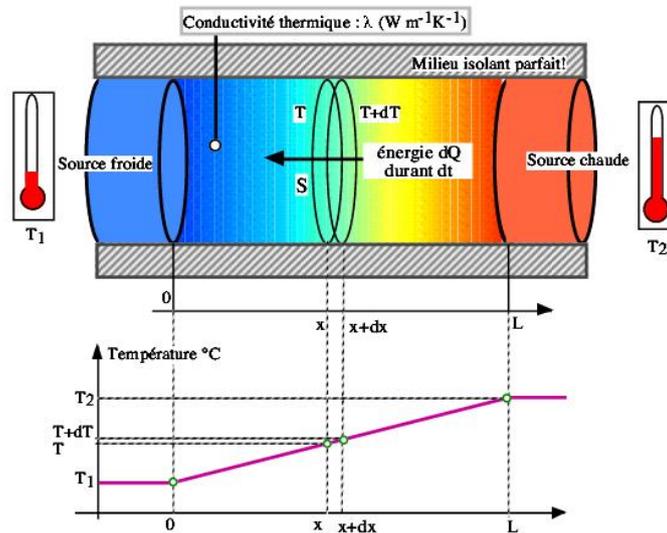


Figure 5. Principe de la conduction thermique (Roux, 2006)

La loi de Fourier a été établie expérimentalement par Joseph Fourier en 1822. Elle exprime la proportionnalité entre le flux de chaleur à travers une surface par unité de temps et l'élévation de la température de part et d'autre de cette surface. L'équation 1 traduit mathématiquement la relation entre le flux de chaleur et la variation de température de la surface :

$$\phi = \frac{dQ}{dt} = \lambda S \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

avec :

- Φ : Flux thermique (W).
- Q : Energie (J).
- λ : Conductivité thermique ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). Les coefficients de conductivité sont des propriétés physiques intrinsèques des matériaux (voir figure 6).
- S : surface perpendiculaire au flux thermique (m^2).
- T : Température (K).

avec :

- V : Un potentiel électrique (V).
- R : Une résistance électrique/thermique.
- I : Intensité électrique (A).
- T : Température (K).
- Φ : flux thermique(W).

Pour chaque type de transfert de chaleur et pour chaque géométrie de système, des modèles scientifiques sont établis afin de déterminer la valeur des résistances thermiques mises en jeu.

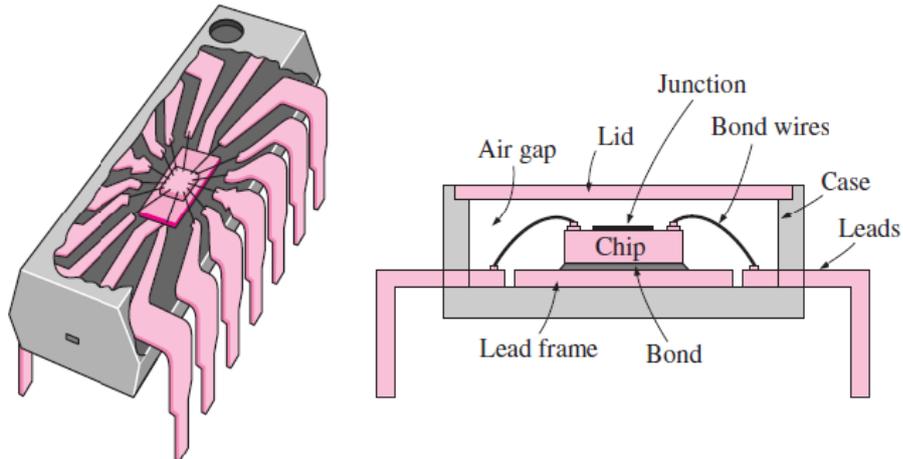


Figure 8. Exemple de système

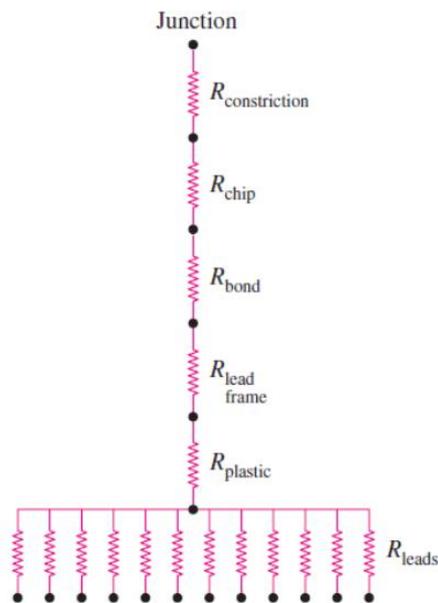


Figure 9. Modèle de résistance thermique pour un système

3.2. La convection

Le phénomène de convection se réfère au transfert thermique qui a lieu dans les fluides liquides ou gaz en mouvement. La convection est le processus de transfert thermique déterminé par le mouvement des particules élémentaires d'un fluide entre des zones ayant des températures différentes. Ce mouvement entraîne un mélange intense des particules fluides, qui échangent de l'énergie (chaleur) et de la quantité de mouvement (impulse) entre elles.

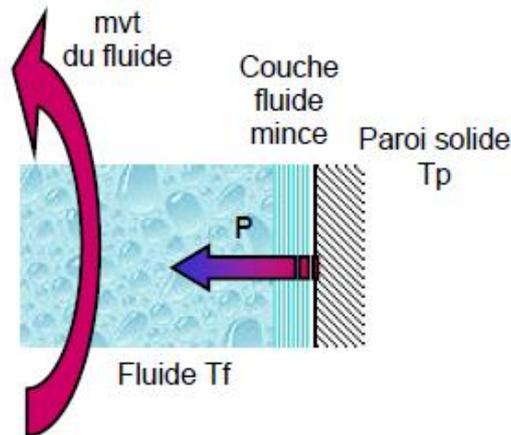


Figure 10. Action du fluide en mouvement dans la convection

Compte tenu des forces qui produisent le mouvement de fluide, on a deux types de convection forcée et naturelle. Dans la convection forcée, le mouvement de fluide est produit par l'action des forces extérieures du processus (par exemple pompe, ventilateur) qui imprime des vitesses de déplacement assez importantes (figure 10). La convection naturelle a comme origine le mouvement produit par les différences de densité entre les particules chaudes et celles qui sont froides existant dans un fluide. La représentation exacte de ce processus de transfert par convection pose des problèmes de mécanique des fluides extrêmement difficiles. Cependant, comme le plus souvent, on ne s'intéresse qu'au flux de chaleur entre le fluide et la paroi solide qui le limite. La figure 11 présente les différentes gammes de densité thermique des différents types de convection.

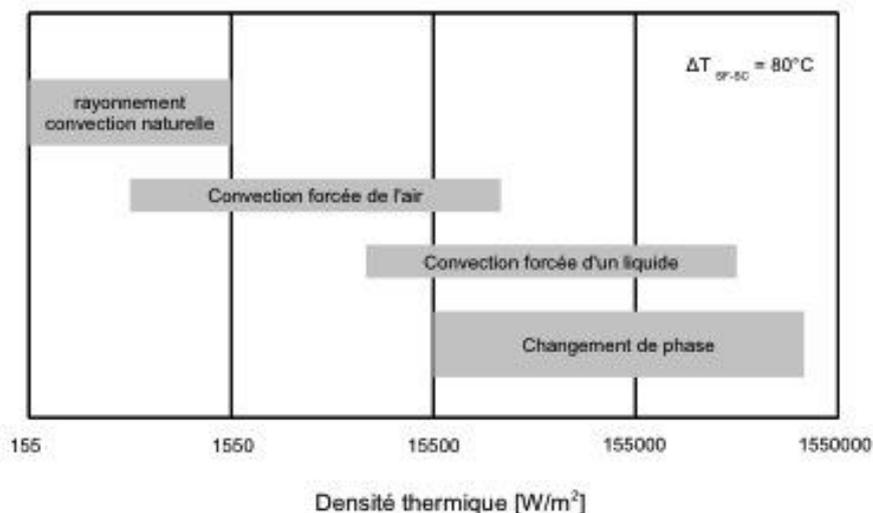


Figure 11. Comparaison des gammes de densité de flux thermique des différents type de convection

La loi de Newton représentée par l'équation 6 introduit la relation entre le flux échangé entre la surface et le fluide et la surface d'échange :

$$\phi = hS(T_p - T_f) \quad (6)$$

Avec

- Φ : Flux thermique (W).
- h : Le coefficient de convection ($W.K^{-1}.m^{-2}$).
- S : La surface de contact solide/fluide(m^2).
- T_p : La température de paroi (K).
- T_f : la température du fluide loin de la surface du solide (K).

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection h est fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide. A partir du théorème de Vaschy-Buckingham, le coefficient de convection h peut s'exprimer en fonction de 3 unités fondamentales (nombres adimensionnels) :

Le nombre de Nusselt Nu caractérisant ange thermique entre le fluide et la paroi

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} \quad (7)$$

Avec

- h : Le coefficient de convection ($W.K^{-1}.m^{-2}$).
- L : Une longueur caractéristique (m).
- λ : La conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$).

Le nombre de Reynolds Re caractérisant le régime de l'écoulement, $Re < 2000$ pour les écoulements laminaire et $Re > 3000$ pour les écoulements turbulents.

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (8)$$

Avec

- ρ : La masse volumique du fluide ($kg.m^{-3}$).
- V : La vitesse du fluide en ($m.s^{-1}$).
- L : Une longueur caractéristique (m).
- μ : La viscosité dynamique du fluide ($kg.m^{-1}.s^{-1}$).

Le nombre de Prandtl Pr caractérisant les propriétés thermiques du fluide.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (9)$$

Avec

- μ : La viscosité dynamique du fluide ($kg.m^{-1}.s^{-1}$).
- λ : La conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$).
- C_p : la capacité thermique massique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$).

Par exemple pour fluide circulant à l'intérieur d'un tube, la détermination du coefficient de convection h est donnée par la relation entre les 3 nombres adimensionnés Nu , Re et Pr via la formule de Colburn (équation 10) :

$$Nu = 0.023Re^{0.8} Pr^{0.33} \quad (10)$$

3.3. Le rayonnement

Lorsqu'une surface chaude est entourée par des surfaces froides comme les parois de la structure, il existe un refroidissement par radiation. Ce refroidissement par radiation dépend de l'émissivité du matériau qui compose la surface chaude. L'émissivité d'un matériau (souvent écrite ϵ) est un nombre sans dimension. Elle rend compte de la capacité d'un matériau à émettre de l'énergie par rayonnement. Plus cette émissivité est proche de 1, plus le matériau radiera de chaleur. La figure 12 présente l'émissivité de matériaux métalliques et non métalliques et l'équation 11 montre la relation en le flux thermique et la température de la paroi :

$$\phi = \epsilon \sigma S (T_s^4 - T_a^4) \tag{11}$$

Avec

- Φ : Flux thermique (W).
- σ : Constante de Stéphan Boltzmann $5.67.10^{-8}$ (W K⁻⁴ m⁻²).
- ϵ : Facteur d'émission de la surface.
- S : La surface de contact solide/fluide(m²).
- T_s : Température de la surface (K).
- T_a : Température du milieu environnant la surface (K).

<i>Emissivity</i>		<i>Emissivity</i>	
Material	Emissivity (ε)	Material	Emissivity (ε)
Aluminum alloy-oxidized	0.40	Asbestos Board	0.96
Aluminum-highly polished	0.04-0.06	Asphalt, tar, pitch	0.90-0.98
Aluminum-oxidized	0.11-0.31	Brick-red and rough	0.93
Aluminum-Anodized sheet	0.55	Brick-fireclay	0.75
Brass-Oxidized	0.60	Carbon-filament	0.53
Brass-polished	0.03	Carbon-lampblack	0.96
Chromium-polished	0.10-0.38	Cement	0.54
Copper-polished	0.02-0.05	Ceramic	0.90-0.94
Copper-heated at 600 C	0.57	Concrete	0.92-0.97
Gold-pure, highly polished	0.02	Frost crystals	0.98
Iron-polished	0.21	Glass	0.80-0.95
Iron-oxidized	0.94	Human skin	0.98
rusted iron plate	0.65	Ice	0.96-0.98
Iron-rough steel plate	0.94-0.97	Marble-polished light gray	0.90
Lead-gray and oxidized	0.28	Paints, lacquers, varnishes Black	0.90-0.95
Mercury	0.09-0.12	Paints, lacquers, varnishes aluminum paints	0.55
Nickel-polished	0.12	Paints, lacquers, varnishes flat black lacquer	0.96-0.98
Nickel-oxidized	0.37-0.85	Paints, lacquers, varnishes white lacquer	0.95
Platinum-pure polished plate	0.05-0.10	Paper	0.94
Platinum-wire	0.06-0.16	Plastic	0.84-0.94
Silver-pure and polished	0.02-0.03	Porcelain-glazed	0.92
Stainless steel-polished	0.16	Propellant-Liquid rocket engine	0.90
Stainless steel-oxidized	0.74-0.87	P.V.C.	0.91-0.93
Tin-bright	0.07-0.08	Quartz-opaque	0.75
Tungsten-filament	0.32-0.39	Rubber	0.95-0.97
Zinc-polished commercial pure	0.05	Sand	0.90
Zinc-galvanized sheet	0.23	Snow	0.96-1.00
		Soil	0.92-0.95
		Tape-Masking	0.92-0.95
		Wallpaper	0.85-0.90
		Water	0.95-0.96
		Wood-planed oak	0.82-0.89

Figure 12. Emissivité ϵ de quelques matériaux(Yunus and Cengel, 1998)

La quantité de chaleur dégagée par radiation dépend toutefois aussi de la fraction de surface froide exposée à la surface chaude. Dans un système électronique, un composant sera en général entouré d'autres composants chauds, et le transfert radiatif de chaleur sera négligeable si l'architecture du système n'est pas optimisée pour avoir une exposition maximale de surface froide des circuits électroniques.

4. Systèmes de refroidissement

Il existe différentes technologies de systèmes de refroidissement qu'il est possible de classer en deux grandes catégories :

- **Les 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.
- **Les 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. La figure 13 présente une classification des systèmes de refroidissement passifs suivant les deux modes de transfert de chaleur.

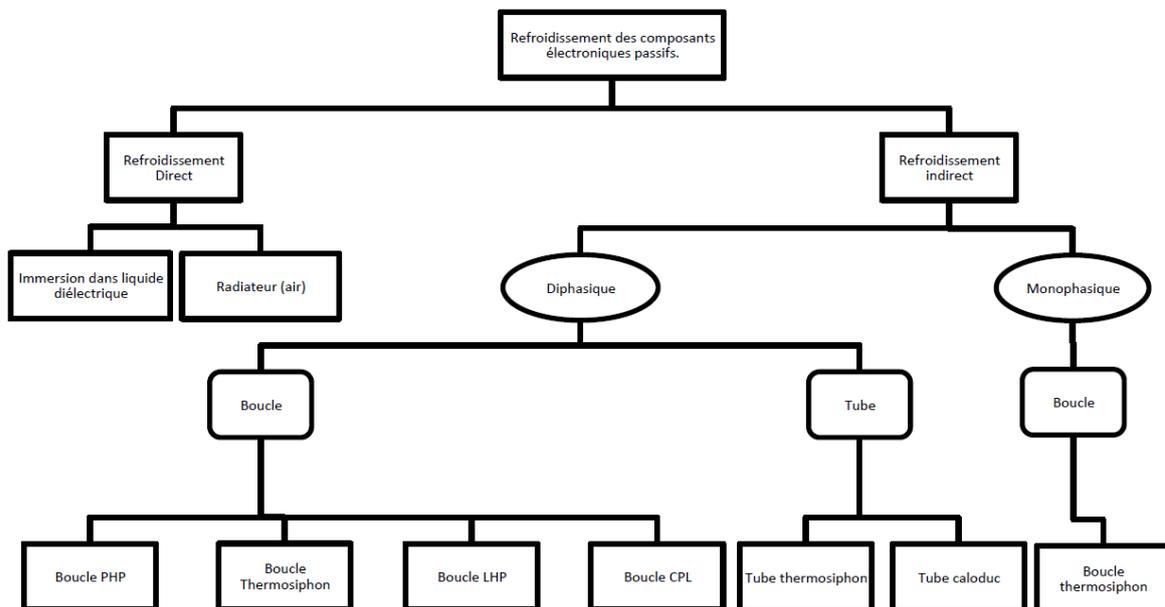


Figure 13. Classification des systèmes de refroidissement passif(LUSAC)

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 présents.

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.

4.1. Les systèmes de refroidissement monophasiques.

Les échangeurs monophasiques intègrent une structure dans laquelle le passage du fluide de refroidissement est réalisé sans changement d'état. La puissance à dissiper est évacuée vers l'extérieur par la conduction, la convection et le transport capacitif. Le fluide se « charge » de la puissance dissipée par l'élément électronique, élevant la température du fluide. Il existe deux types de système de refroidissement fluide : les systèmes de refroidissement monophasique gazeux (dans la plus part des cas l'air) et les refroidissements liquides(Oseen-Senda, 2006).

4.1.1. Système de refroidissement à l'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.

Les échanges entre l'élément électronique qui est la source thermique, et l'environnement qui est le dissipateur, sont convectifs et radiatifs.

4.1.1.1. Convection naturelle dans l'air :

L'élément électronique est placé dans l'air ambiant au repos, la différence de température entre le milieu ambiant et l'élément électronique permet un échange dont le coefficient d'échange h est compris entre 5 et 25 $W.m^{-2}.K^{-1}$. Pour utiliser la convection de puissance pour de plus hauts niveaux de puissance à évacuer, les systèmes de refroidissement à air ont besoin d'ailettes ou de nid d'abeille, conférant au refroidisseur une surface d'échange plus importante entre l'élément à refroidir et le milieu ambiant (voir exemple figure 14). L'utilisation de ces systèmes permet d'augmenter le coefficient d'échange h jusqu'à un rapport 20 (de 25 $W.m^{-2}.K^{-1}$ à 500 $W.m^{-2}.K^{-1}$) dans le cas d'une convection naturelle (3000 $W.m^{-2}.K^{-1}$ dans le cas d'une convection forcée) (Phelan et al., 2002). Dans le cas de convection à l'air utilisant un accroissement de la surface d'échange, il faut ainsi déterminer le point de fonctionnement thermique du refroidisseur pour bénéficier d'un refroidissement optimum (exemple : détermination l'espacement des ailettes).

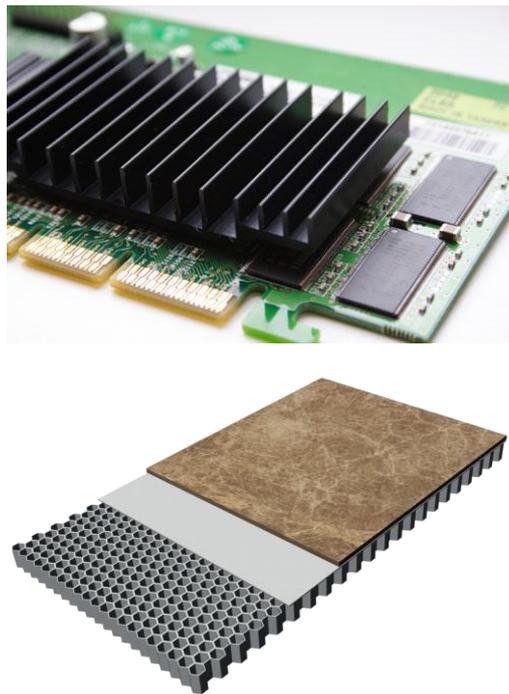


Figure 14. Exemple d'ailette de refroidissement et de nid d'abeille pour augmenter la surface d'échange convectif (ELECTROLUBE)

4.1.1.2. Convection forcée dans l'air :

Le soufflage d'air forcé grâce à des ventilateurs est la méthode la plus utilisée en refroidissement de composants électroniques de par sa simplicité de mise en œuvre, de son coût et de sa fiabilité. L'air est mis en mouvement par le biais de générateur d'écoulement (ventilateur) comme le montre l'exemple de la figure 15. Le coefficient d'échange h est de l'ordre de 10 à 500 $W.m^{-2}.K^{-1}$.

Le refroidissement par ventilateur piézoélectrique est une autre technique de refroidissement basée sur le soufflage d'air. Le principe de fonctionnement réside en une lame en céramique alimentée en courant électrique, se mettant à osciller à de très hautes fréquences. Un mouvement d'air est créé pouvant augmenter le coefficient d'échange convectif jusqu'à 100% comparé à un échange convectif par ventilateur « classique ».

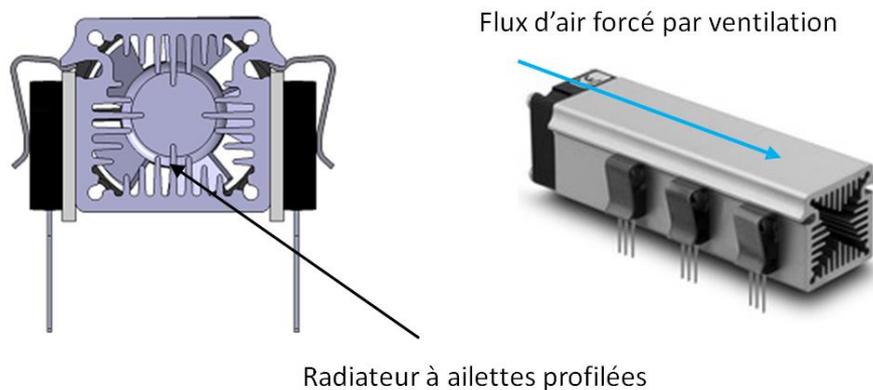


Figure 15. *Système de refroidissement forcé par air Radiateur (Fisher Elektronik) et ventilateur (SEPA)*

Ces dernières années avec l'augmentation de la densité thermique des composants, les radiateurs ont atteint des dimensions impactant l'encombrement. La limite de la densité thermique des composants est probablement atteinte avec ce type de refroidissement, d'où la nécessité du passage à un refroidissement plus efficace en changeant de liquide caloporteur, notamment. L'exemple classique est le refroidissement liquide grâce à des radiateurs à eau, par analogie avec le refroidissement à air avec radiateurs à air. Le transfert thermique par la chaleur sensible est de l'ordre de 3000 fois supérieure pour l'eau comparée à l'air (Faraji and Qarnia, 2007).

4.1.2. Système de refroidissement liquide

Le refroidissement liquide monophasique indirect est implémenté dans les composants électroniques sous la forme d'une plaque à eau dans laquelle circule un liquide caloporteur ou de canalisation fluide accolées aux parois à refroidir. Un système composé principalement d'une pompe et d'un échangeur permet d'évacuer la chaleur contenue dans le liquide caloporteur vers l'extérieur du serveur.

Des variantes du refroidissement liquide par plaque froide existent. La différence réside dans le diamètre hydraulique des canaux constituant la plaque. La performance thermique de la plaque froide est inversement proportionnelle à la taille des canaux mais le bilan des pertes de charge hydraulique est, quant à lui, proportionnel.

Pour des diamètres de canaux compris entre 10 et 800 μm , la plaque froide est dite à **micro-canaux** (figure 16) et pour des diamètres de 1 à 10 mm, elle est dite à **mini-canaux** (figure 17). Au-delà de 10 mm, ces systèmes sont usuellement appelés **plaque froide** (figure 18) (Meysenc, 1998) (Baviere, 2005).

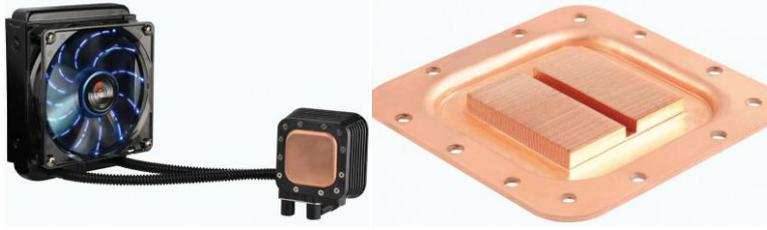


Figure 16. Refroidissement liquide à micro-canaux (EnermaxLiqmax 120S)



Figure 17. Refroidissement liquide à mini-canaux (CeramCool® LiquidCoolin)

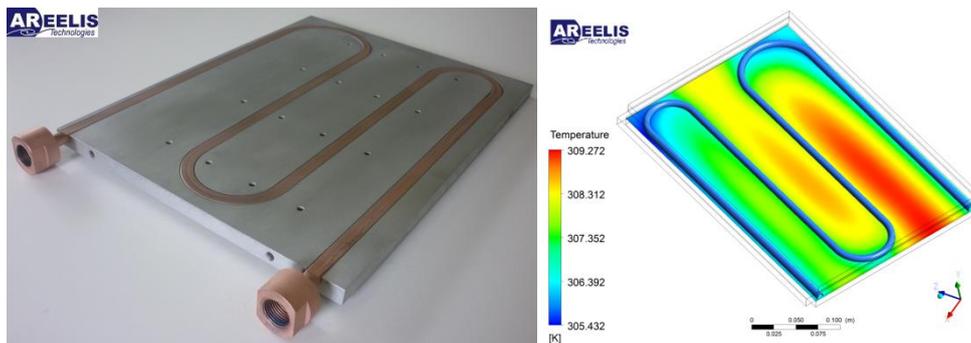


Figure 18. Refroidissement liquide à plaque froide (AREELIS Technologies)

Le choix d'un fluide de refroidissement doit être en relation avec :

- les performances hydrauliques (pertes de charge, viscosité...) et thermiques (conductivité thermique...) puisque une réduction du transfert thermique et du coefficient visqueux peuvent réduire les performances du système de refroidissement.
- Les conditions de stockages du fluide.
- Le coût.
- Les contraintes de pollution.
- La sécurité.

Le fluide caloporteur le plus couramment utilisé est de l'eau glycolée en raison de sa conductivité thermique élevée, de sa grande capacité calorifique et de sa disponibilité. Le coefficient d'échange h de l'eau en convection forcée est de l'ordre de 3000 à 10000 $W.m^{-2}.K^{-1}$. La figure 19 présente la variation du coefficient d'échange de chaleur en fonction du fluide caloporteur et du mode de refroidissement.

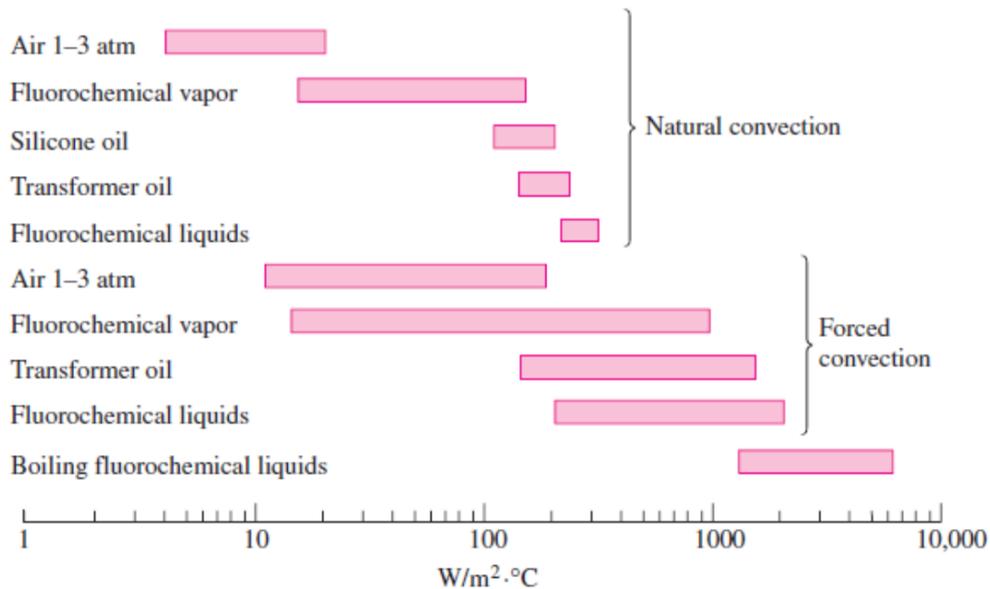


Figure 19. Variation du coefficient d'échange de chaleur en fonction du fluide caloporteur et du mode de refroidissement.

Pour un échangeur parcouru par un fluide, la résistance est due à la convection thermique et aux transferts de flux au fluide, dépendant des paramètres physiques suivants caractérisant le fluide :

- La masse volumique.
- La viscosité dynamique.
- La conductivité thermique.
- La chaleur spécifique massique.

Ces paramètres physiques sont souvent utilisés à la température moyenne du fluide de refroidissement. Cependant il varie en fonction de la température, du vieillissement et l'encrassement du liquide.

Plusieurs études (Mogensen, 1983)(Mativet and Meunier, 1997)ont mise en évidence que les propriétés de ce fluide caloporteur varient selon la période d'utilisation des composants électroniques. Pour le dimensionnement du système de refroidissement, il est ainsi impératif de prendre en compte la dégradation du fluide caloporteur et de prendre une marge de dimensionnement pour tolérer ces dérives de performances.

Pour des environnements où l'utilisation de liquides caloporteurs classiques (eau, le mélange eau-éthylène-glycol,...) n'est plus possible à cause des écarts de température haute/basse (dans l'espace par exemple), l'utilisation de métaux liquides est obligatoire. En raison de leurs excellentes propriétés physiques, les systèmes de refroidisseur pour électronique utilisant des métaux liquides (les alliages à base de gallium ont une conductivité thermique de $30 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, soit 40 fois plus que l'eau).

En plus de leur forte conductivité thermique, les métaux liquides sont de bons conducteurs électriques, permettant ainsi l'utilisation de pompes électromagnétiques ou magnétodynamiques. Ce type de pompe repose sur l'utilisation couplée d'un champ magnétique et d'un courant électrique créant une force de Laplace entraînant le fluide à travers le circuit. Des flux thermiques de l'ordre de $200 W \cdot cm^{-2}$ peuvent être évacués à un débit de 0.3 l/min et la perte d'énergie hydraulique dans ce cas est de 15 kPa (Zuo and North, 2000).

Des inconvénients à l'utilisation d'un liquide dans un système de refroidissement doivent être considérés : fuites du liquide, corrosion, poids supplémentaire et enfin condensation. Lors d'un

refroidissement actif par un liquide, une boucle fermée est utilisée dans laquelle le fluide de refroidissement doit-être refroidi. Dans ce système, on retrouve outre l'équipement électrique à refroidir une pompe, un régulateur de débit, un réservoir de stockage et enfin un échangeur thermique.

4.1.3. 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 (figure 20). 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.

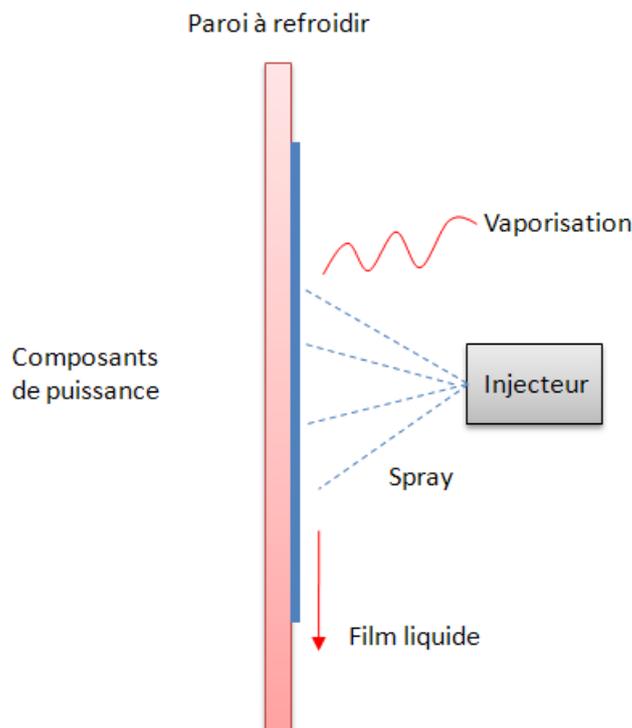


Figure 20. Principe du spray cooling

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 (Estes and Mudawar, 1995). La figure 21 montre les différents organes d'un système spray cooling : condenseur, compresseur, plaque et zone de pulvérisation.

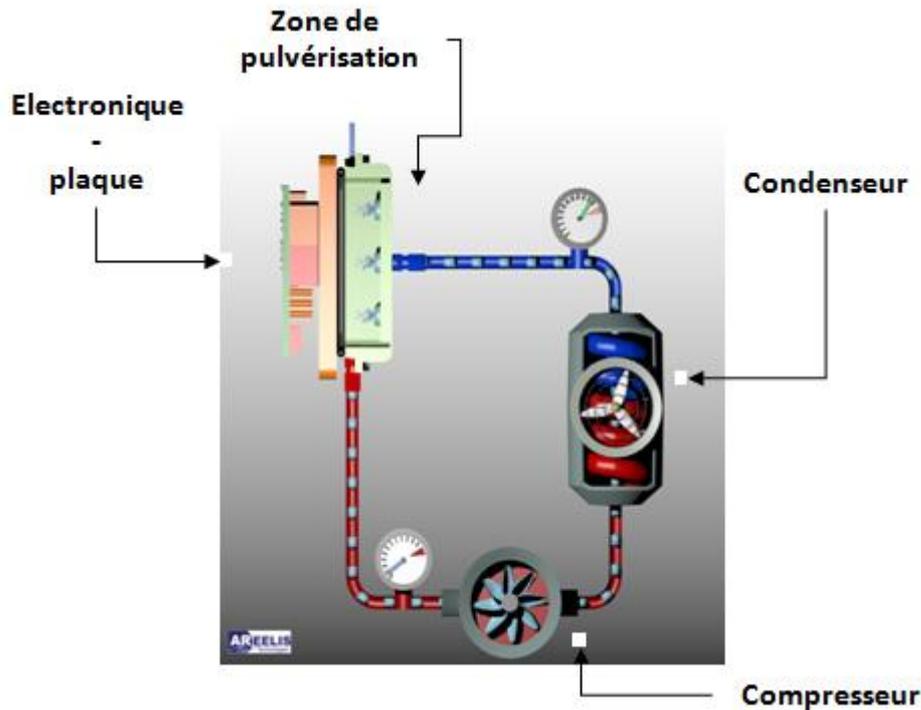


Figure 21. Description des différents organes du spray cooling

Lorsqu'un élément dissipatif est plongé dans un liquide, plusieurs régimes de transfert de chaleur peuvent se produire, suivant la puissance dissipée. La courbe de la figure appelée courbe de Nukiyama (figure 22), représente, avec des échelles logarithmiques, la relation entre le flux de chaleur et la variation de température entre la température de la surface chaude et la température d'ébullition du liquide.

- Pour de faibles flux, la température de la surface de l'élément est relativement basse et le transfert de chaleur se fait par convection naturelle du liquide ; la courbe est pratiquement linéaire (portion A-B).
- Lorsque la puissance dissipée augmente, la température de la surface tend à dépasser la température d'ébullition et, lorsque la différence entre ces températures atteint quelques degrés, des bulles commencent à se former, puis se détachent lorsqu'elles atteignent une certaine dimension. Le nombre et le volume des bulles augmentent corrélativement au flux de chaleur, la température de la surface n'augmentant que très peu. Ces bulles peuvent se résorber et disparaître, ou non, avant d'atteindre la surface libre, suivant la température du liquide. C'est le régime d'ébullition nucléée (portion B-C).
- Si la puissance augmente encore, le volume occupé par les bulles à proximité de la surface chaude devient tel qu'une proportion de plus en plus grande de la surface n'est plus mouillée.

Le coefficient d'échange diminue, pour devenir quasi nul (point D). Au-delà de ce régime, un film continu de vapeur est formé sur la surface, et il faut un écart de température très important pour évacuer le même flux de chaleur (point F), le transfert devant se faire par conduction dans la vapeur et par rayonnement. Ce régime est généralement destructif pour les matériels; il importe donc de ne jamais dépasser le flux critique, représenté par le point D de la courbe. La portion de courbe DEF correspond à un régime instable et ne présente pas d'intérêt pratique.

Lorsque la vapeur rencontre une paroi dont la température est inférieure à la température d'ébullition, elle lui cède de la chaleur et se condense. Le processus de condensation comprend lui-même deux modes distincts :

- la condensation en gouttes, dans laquelle les gouttes de liquide, aussitôt formées, se détachent de la paroi, de sorte que celle-ci présente en permanence des zones sèches où la vapeur est en contact direct avec elle ; le coefficient de transfert est alors optimal .
- la condensation en film, dans laquelle le liquide ruisselle le long de la paroi, formant un film liquide continu entre celle-ci et la vapeur ; l'échange de chaleur entre vapeur et paroi doit se faire par conduction au travers de ce film.

Bien que le deuxième mode présente une efficacité plus faible que le premier, c'est celui qui se produit le plus fréquemment. Remarquons, cependant, que le coefficient d'échange h correspondant reste encore tout à fait satisfaisant, pour autant que rien ne s'oppose au ruissellement du liquide. L'épaisseur du film est alors suffisamment faible et, la conductivité thermique du liquide étant largement supérieure à celle de la vapeur, les conséquences sont sans commune mesure avec celles de la formation d'un film de vapeur lors de l'évaporation. Il suffit d'en tenir compte dans le dimensionnement des surfaces de condensation.

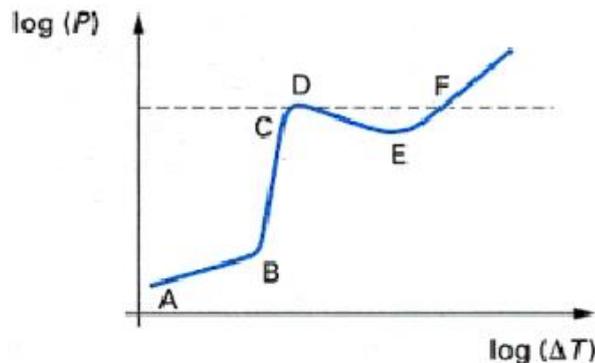


Figure 22. Courbe de transfert de chaleur par ébullition ou courbe de Nukiyama

AREELIS Technologies travaille sur le développement du spray cooling, notamment par la réalisation d'un démonstrateur permettant de rendre compte de l'efficacité de cette technique pour refroidir l'électronique de puissance. La figure 23 présente des exemples de modules spray cooling pour le refroidissement de composants électroniques.

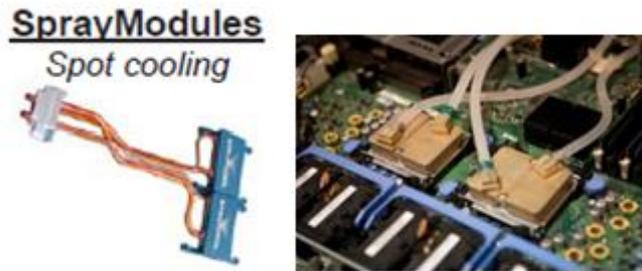


Figure 23. Exemples de modules spray cooling (SPRAYCOOLL)

Les avantages techniques :

D'un point de vue global et technique, le spray cooling présente de nombreux avantages en particulier pour une application dans le domaine de l'électronique de puissance:

- Evacuation d'un flux de chaleur important: au moins 50% plus efficace qu'un système classique.
- Bon recouvrement spatial de la zone à refroidir.
- Permet un refroidissement à la demande et localisé.
- Utilisation de peu de liquide (par rapport aux systèmes à circulation de liquide ou par impaction simple de jet) impliquant une maintenance réduite.

Les inconvénients :

La technologie spray cooling est encore aujourd'hui peu utilisée compte tenu de sa complexité apparente qui représentait un frein en comparaison des technologies classiques de type convection forcée ou autres. Toutefois, l'accroissement des puissances des systèmes électroniques nécessaires pour développer l'électrification massive des moyens de transport et autres et l'obligation, pour une garantie de fiabilité et de robustesse des composants, de dissiper le flux thermique produit, nous oblige à tendre vers l'utilisation de cette technique de refroidissement. Les principaux désavantages sont:

- Complexité des injecteurs. Les injecteurs sont de plus très sensibles aux tolérances industrielles et à la qualité de réalisation. Deux injecteurs de même caractéristiques peuvent avoir des jets relativement différents et ces caractéristiques peuvent évoluer dans le temps.
- Nécessité d'équipements pour le traitement et la condensation du liquide. Ces équipements augmentent généralement le poids des systèmes de refroidissement par spray cooling.
- Nécessité d'une pressurisation du liquide avant injection.
- Difficulté de réglage du système d'injection (distance composant/injecteur, propriétés dynamiques et granulométrique du spray).

4.1.4. 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. Dans le domaine de l'électronique, l'augmentation perpétuelle de

la puissance dissipée par les composants modernes, ainsi que le souci permanent de compacité ont conduit au besoin de trouver des solutions efficaces au problème de l'extraction de chaleur en milieu confiné. Cette fonction est souvent assurée par des échangeurs compacts dont les parois sont refroidies par des jets impactants. Dans le cas des super-calculateurs, un jet de fluide diélectrique peut être utilisé en projection directe sur les éléments semi-conducteurs.

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 24). Sur des éléments semi-conducteurs, et fluide diélectrique peut être utilisé en projection directe (Thibault, 2009).

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.

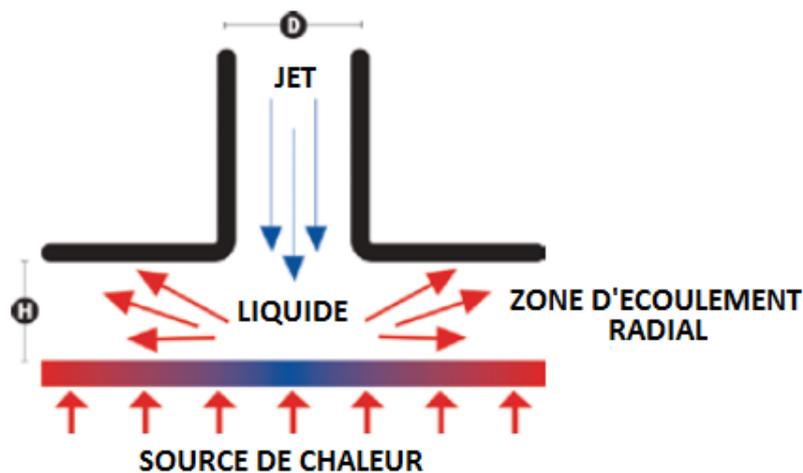


Figure 24. Refroidissement par jets

4.2. Systèmes de refroidissement diphasique

4.2.1. Refroidissement par changement de phase solide-liquide

Un matériau à changement de phase (PCM) est une substance avec une grande chaleur de fusion et qui, en se liquéfiant ou se solidifiant à une certaine température, est capable de stocker ou de relâcher de grandes quantités d'énergies. La chaleur est absorbée lorsque le matériau change de l'état solide à liquide, et elle est relâchée lorsque celui-ci passe de l'état liquide à l'état solide. La grande chaleur latente des PCM est efficace pour absorber la chaleur et ralentir l'augmentation de température des puces électroniques. Son intégration dans un système de refroidissement sera donc idéale pour des appareils qui fonctionnent périodiquement. Lorsque la chaleur latente du PCM est épuisée, la chaleur est toujours générée et la température augmente jusqu'à un régime permanent. La chaleur dégagée par la puce électronique est conduite par le PCM à la bordure extérieure du dissipateur de chaleur et est évacuée par convection naturelle de l'air. Cette convection naturelle étant peu efficace, des

techniques de dissipation supplémentaires doivent être déployées pour assurer le fonctionnement de l'équipement électronique. Un PCM utilisé pour gérer thermiquement un système requiert plusieurs spécificités :

- La température de changement de phase doit se situer dans l'échelle voulue.
- Une grande chaleur latente.
- Bonne conductivité thermique.
- Une faible expansion de volume
- Non Inflammable, non explosif, chimiquement stable, non corrosif, et non toxique.
- Faible coût.

Beaucoup de substances chimiques peuvent être utilisées comme PCM, c'est pourquoi la seule condition difficile à obtenir est la bonne conductivité thermique. C'est le principal défaut des PCM qui constitue un obstacle à l'intégration de PCM dans les systèmes de refroidissements. Différents moyens pour améliorer la conductivité thermique ont été testés :

- Ajouter des additifs présentant une bonne conductivité thermique comme de la poudre d'aluminium, des nano matériaux ou des puces de fibre de carbone.
- Former des composites en intégrant les PCM dans des métaux poreux ou dans des matrices de graphite expansé.
- Ajouter des ailettes ou des sphères de métal. Des expérimentations ont été effectuées, et la méthode qui consiste à intégrer un PCM dans une matrice de graphite expansé est démontrée comme étant le choix idéal. La figure 25 Utilisation de PCM avec du graphite pour refroidir des batteries présente un exemple d'utilisation de PCM avec des feuilles de graphite pour refroidir des batteries au Lithium.

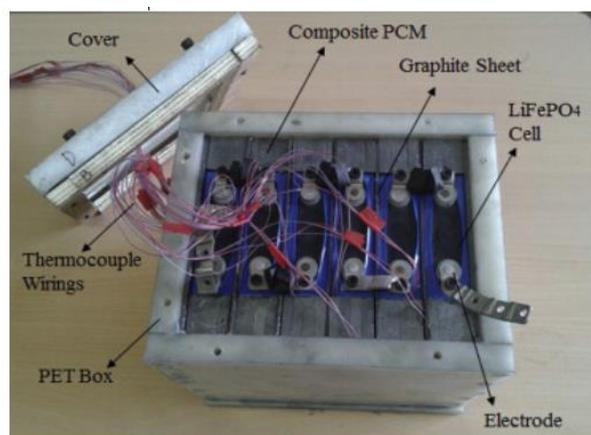


Figure 25. Utilisation de PCM avec du graphite pour refroidir des batteries (3)

Il est possible de classer les PCM en 3 catégories :

- **Les composés minéraux**(ou inorganiques) : eau, acide sulfurique, trioxyde de soufre, acide phosphorique, gallium, ...
- **Les composés organiques** : Acide formique, acide acétique, Phénol, Acide dodécanoïque, hydroxyde de sodium, ...

- **Les composés eutectiques** : mélange de sels possédant une température de fusion constante pour une valeur particulière de concentration. Ils peuvent être inorganiques et/ou organiques.

4.2.2. Refroidissement par changement de phase liquide-vapeur

Ce mode de refroidissement par changement de phase liquide-vapeur est considéré comme l'un des moyens les plus efficaces et les plus adaptables pour refroidir les systèmes énergétiques. En effet la quantité de chaleur dissipée dépend du débit massique du fluide caloporteur et de sa chaleur de vaporisation. L'avantage majeur de ce mode de refroidissement réside dans le fait que le fluide circule sans aucune pompe mécanique. Les inconvénients tels que l'encombrement, le bruit, la consommation énergétique des systèmes actifs sont inexistantes.

On peut distinguer quatre classes de refroidissement qui diffèrent de par leur configuration :

- Refroidissement par immersion dans un fluide diélectrique.
- Refroidissement par caloducs.
- Refroidissement par thermosiphon.
- Refroidissement par boucle diphasique à deux lignes.

4.2.2.1. Refroidissement par immersion dans un fluide diélectrique

Ce système est utilisé depuis 1948 afin de refroidir les équipements de puissance dans les radars mais à partir des années 70, motivés par l'augmentation des puissances des systèmes énergétiques, des chercheurs ont engagés des travaux sur ce mode de refroidissement. Les composants à refroidir sont placés dans une enceinte étanche partiellement remplie avec le liquide diélectrique.

L'évacuation de la chaleur s'effectue à l'interface surface-liquide où se produit l'échange de chaleur via l'ébullition du liquide caloporteur. La vapeur produite est condensée dans un échangeur de chaleur refroidi par l'air en convection naturelle ou par un liquide en convection forcée. Cet échangeur, aussi appelé condensateur peut être externe ou interne comme présenté sur la Figure 26.

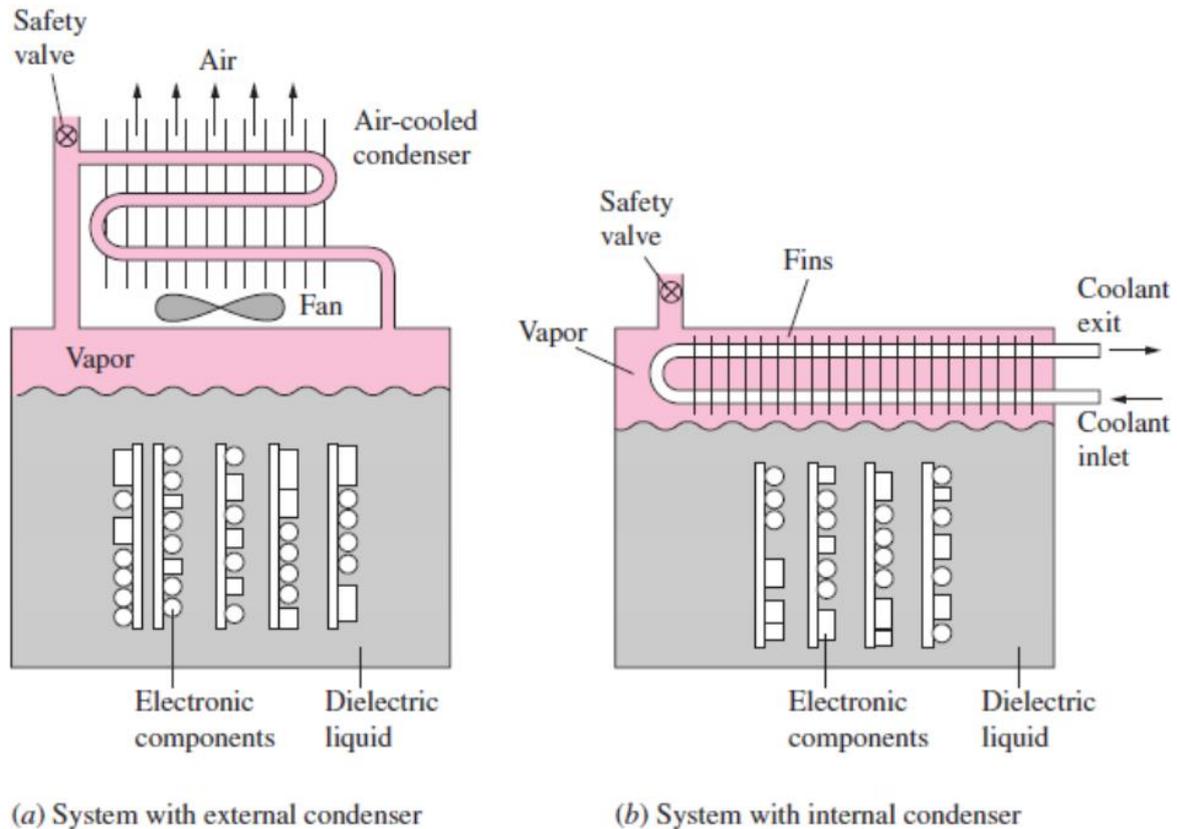


Figure 26. Systèmes de refroidissement par fluide diélectrique avec condensateur externe (a) interne (b)

Un inconvénient à ce système réside dans l'apparition de gaz non condensable comme de l'air. Une présence de 0.5% d'air dans l'enceinte peut donner lieu à une diminution de l'efficacité du refroidissement jusqu'à un facteur 5. Une grande attention doit donc être portée sur la dégazéification totale du fluide diélectrique, et à l'absence totale de tout gaz non condensable pendant le remplissage.

On peut noter qu'il existe aussi des systèmes dans lesquels le fluide diélectrique occupe totalement l'enceinte. Au contact des circuits, le fluide diélectrique s'évapore sous forme de bulles qui se dissolvent en remontant, et la chaleur est évacuée via le condenseur par un échange de chaleur fluide/fluide.

Ce système est toutefois limité par la quantité de chaleur maximale que peut évacuer le condenseur : la quantité de chaleur dissipée par une interface fluide/fluide est inférieure à celle dissipée lors d'une condensation.

4.3.3.2. Refroidissement par caloducs

Le caloduc est un système de refroidissement diphasique fermé dont le fonctionnement est basé sur une circulation en boucle fermée du fluide caloporteur. Les caloducs sont caractérisés par :

- Une conductivité thermique très élevée.
- Un fonctionnement quasi isotherme.
- Un contrôle de la température.

Ils fonctionnent sans aucune pièce en mouvement ce qui réduit le bruit et nécessite peu de maintenance. Les forces générant la circulation du fluide caloporteur peuvent être aussi : capillaires, électrostatique, magnétiques ou osmotiques. Les caloducs sont simples à concevoir et peuvent être

réalisés dans une gamme de géométrie très diversifiée. Toutes ces caractéristiques représentent les raisons pour lesquelles les caloducs sont utilisés dans des champs d'application très larges, qui visent des objectifs différents à savoir :

- Dissiper des puissances thermiques élevées avec un faible écart de températures.
- Évacuer une puissance thermique variable à une température constante.
- Uniformiser la température du système.
- Adapter la densité de flux thermique entre une source chaude et une source froide de surface très différente.

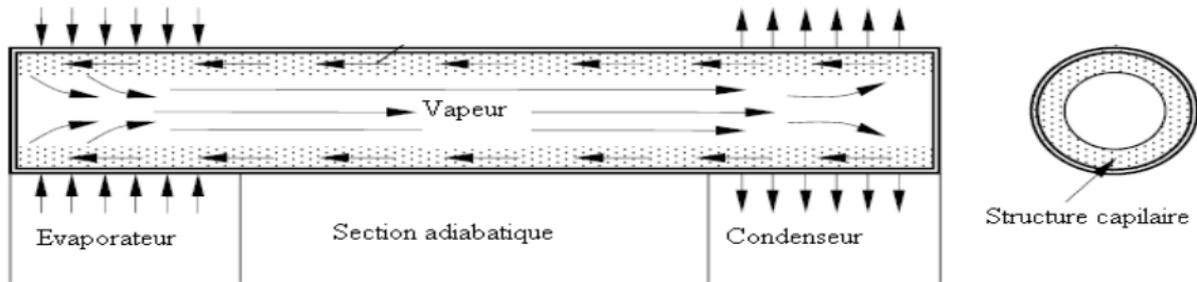


Figure 27. Schéma de principe d'un caloduc

La figure 27 montre un schéma de principe d'un caloduc. La structure capillaire possède une conductivité thermique plus élevée que celle du fluide caloporteur, le fluide est vaporisé au niveau de l'évaporateur, ce qui crée un mouvement de la vapeur le long de la section adiabatique, puis celle-ci cède sa chaleur dans le condenseur en se condensant. La quantité de chaleur de condensation est transférée à travers les parois du caloduc vers un récepteur de chaleur externe. Ce processus de condensation sature de fluide la structure capillaire. Cette structure capillaire peut être de cuivre fritté par exemple. Les diamètres des pores sont de l'ordre de quelques microns. La pression capillaire est inversement proportionnelle au rayon de courbure de l'interface liquide-vapeur. La différence de saturation provoque donc une différence de pression dans la structure capillaire entre le condenseur et l'évaporateur et le fluide s'écoule dans la structure capillaire grâce à cette pression.

L'efficacité énergétique et la durée de vie des caloducs ont mené à des applications variées comme l'industrie spatiale afin de transférer la chaleur à l'intérieur des satellites vers l'espace. Sur terre, les caloducs subissent la gravité : le positionnement de ceux-ci revêt donc une importance particulière afin de favoriser l'écoulement de la phase liquide. En effet les forces capillaires sont en général faibles et ne dépendent pas des dimensions des caloducs. En revanche les forces gravitationnelles sont volumiques et donc dépendantes de la hauteur du liquide. Les caloducs sont ainsi en général positionnés de telle sorte que la gravité favorise l'écoulement du liquide du condenseur vers l'évaporateur.

4.3.3.3. Refroidissement par thermosiphon

La différence majeure entre un caloduc et un thermosiphon réside dans le fait qu'un tube thermosiphon fonctionne sans mèche poreuse. Le retour du condensat vers l'évaporateur s'effectue uniquement via les forces gravitationnelles. C'est un système simple et peu coûteux qui permet de transférer la chaleur du système vers l'extérieur. Le mouvement de la vapeur depuis l'évaporateur vers le condenseur s'effectue sous l'effet des forces de flottabilité causé par la variation de densité du fluide caloporteur. La figure 28 présente un schéma de principe d'un thermosiphon en tube fermé.

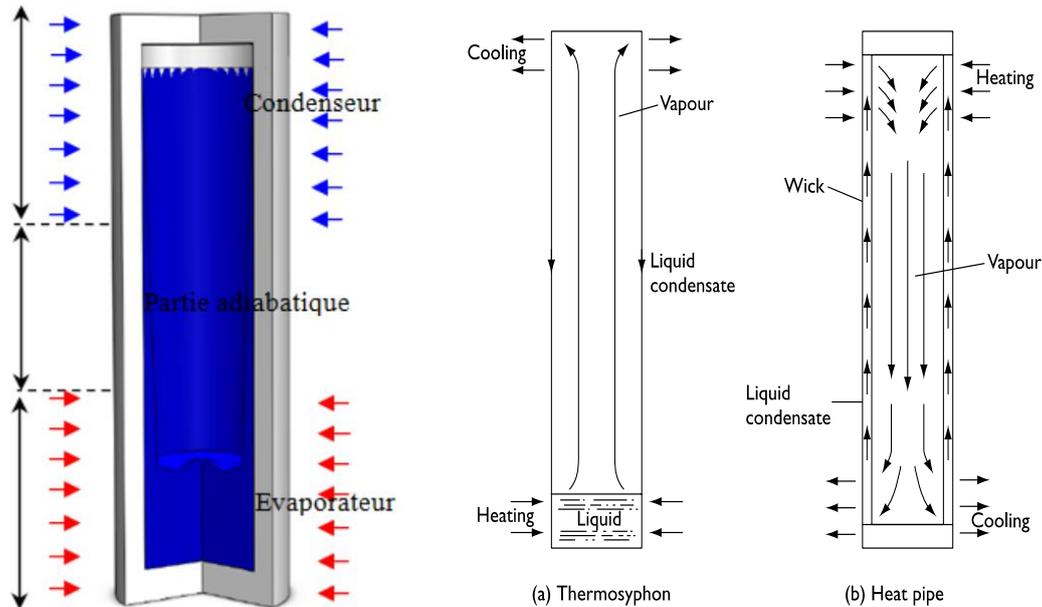


Figure 28. Schéma de principe d'un thermosiphon en tube fermé

Trois zones séparées peuvent être distinguées : la **zone de l'évaporateur** dans laquelle le fluide caloporteur est évaporé, la **partie adiabatique** dans laquelle circule le fluide, et le **condenseur** qui permet le transfert de chaleur dissipé du système vers le milieu extérieur. Les tubes thermosiphon sont généralement fermés. Ils utilisent le processus de transfert de chaleur par ébullition et condensation du fluide caloporteur. Ils contiennent une quantité de fluide caloporteur bien définie qui joue un rôle prédominant dans le transport de l'énergie thermique d'un bout à l'autre. La première application pratique d'un thermosiphon a été conduite par Schmidt dans le but de refroidir les pales de rotor d'une turbine à gaz c'est pourquoi le thermosiphon a été jugé apte pour diverses autres applications.

Le refroidissement par thermosiphon peut être effectué sous forme de boucle, ce qui permet le transfert d'une quantité d'énergie du système à refroidir vers le condenseur. La circulation du fluide caloporteur s'effectue d'une manière naturelle dans des conduites reliant un évaporateur et un condenseur. En effet, le fluide caloporteur est évaporé dans l'évaporateur et est ensuite transféré vers un condenseur via une ligne vapeur. Dans celui-ci, le fluide caloporteur cède sa chaleur au milieu ambiant et retourne à l'état liquide vers l'évaporateur via une ligne liquide. Cela crée une différence de température et donc un gradient de densité le long de la boucle. Le champ de force gravitationnelle dans la ligne liquide active les forces de flottabilité dans la ligne vapeur. En outre, un thermosiphon utilise la différence de la pression de saturation entre les deux sources pour provoquer l'écoulement du fluide caloporteur dans la boucle. La configuration géométrique d'une boucle thermosiphon doit être faite de telle sorte que le condensat peut refluer vers le bas de l'évaporateur sous l'effet des forces de gravité. En état d'équilibre, la force de flottabilité est équilibrée par les pertes de pression le long du tuyau. L'avantage principal d'une boucle thermosiphon est le transport de chaleur d'une source à une autre.

Ces boucles thermosiphon sont utilisées dans plusieurs applications, et des recherches ont été effectuées sur la modélisation et sur les tests des boucles thermosiphon. En particulier les chercheurs se sont concentrés sur l'étude de l'identification des zones de transition des régimes d'écoulement, sur la mesure du transfert de chaleur et de la chute de pression par frottement et sur les instabilités hydrodynamiques.

4.3.3.4. Refroidissement par boucle diphasique CPL et LHP

Ces boucles diphasiques fonctionnent passivement grâce aux forces capillaires produites dans une structure poreuse comme dans un caloduc. Elles fonctionnent sur le principe de séparation des deux phases dans leur évolution d'une extrémité à l'autre de la boucle. Ceci permet de supprimer les interactions liquide-vapeur dans les zones adiabatiques, et de gérer de façon indépendante les pertes de chaleur dans chaque phase lors du dimensionnement. Seule la partie évaporateur est munie d'un milieu capillaire afin de permettre un saut maximal de pression. Ce milieu capillaire doit compenser les chutes de pression générées par la circulation du fluide dans les différents éléments de la boucle. Le choix de la structure poreuse est prépondérant afin de garantir le fonctionnement du système. Les boucles diphasiques sont devenues des équipements importants pour le contrôle thermique qui exige un ajustement précis de la source de chaleur. Deux systèmes sont distingués : les CPL (Stenger, 1966) et les LHP (Gerasimov, 1975). Ces dispositifs possèdent des configurations différentes suivant la position du réservoir dans le circuit. La figure 29 présente les deux différents systèmes LHP et CPL.

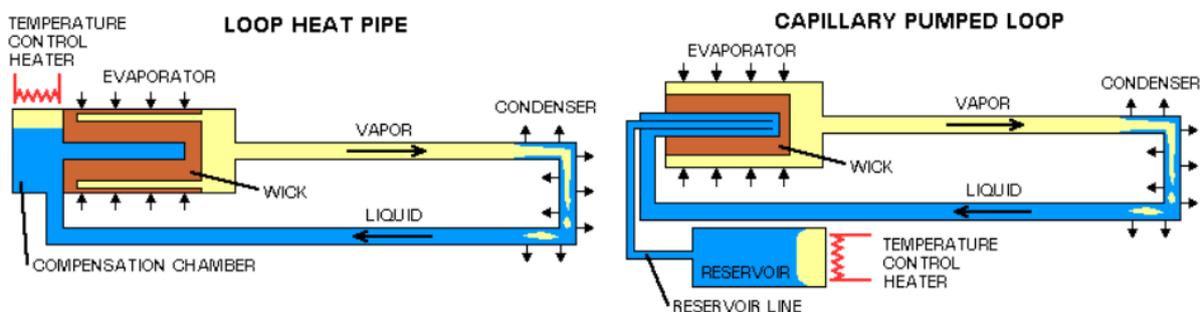


Figure 29. Boucles diphasiques CPL et LHP

Dans la boucle CPL, le réservoir et l'évaporateur sont séparés par une conduite de liquide. La boucle LHP est caractérisée par un fort couplage thermo hydraulique entre le réservoir et l'évaporateur qui contribue à stabiliser la boucle : le réservoir et l'évaporateur sont connectés en un seul composant. Ils sont séparés par deux milieux poreux : un milieu poreux primaire fait de pores fins afin de développer une pression capillaire suffisante et faire circuler le fluide dans la boucle, et un milieu poreux secondaire composé de plus larges pores dans le but de contrôler le flux de fluide caloporteur entre le réservoir et l'évaporateur.

La configuration d'écoulement dans des conduites séparées conduit à des performances maximales supérieures aux caloducs. Toutefois, le fonctionnement des boucles diphasiques peut être très instable et parfois très difficile à faible puissance. L'avantage des boucles diphasiques est la séparation des deux phases qui réduit les pertes de charge dans l'écoulement liquide et d'éviter les problèmes liés à l'écoulement en contre-courant des phases liquide et vapeur.

Le réservoir dans les boucles CPL et LHP joue le rôle de régulateur. Il fixe la pression du système et donc la température d'évaporation du fluide caloporteur. Il sert de vase d'expansion dans la boucle notamment lors des phases de démarrage de la boucle ou de variation de puissance. Il permet aussi d'assurer une réserve de liquide pour compenser la présence de micro fuite dans le circuit.

Les CPL subissent plus de problèmes lors du démarrage du refroidissement, alors que les LHP démarrent d'une manière plus simple et robuste. De plus les composants basiques sont les mêmes. Il n'y a pas de liaison capillaire entre le réservoir, aussi appelé chambre de compensation et l'évaporateur. Cette différence mène au fait qu'il n'y a pas de procédure de démarrage dans un LHP, contrairement à un CPL qui requiert un pré-conditionnement. En effet, le réservoir d'un CPL doit être chauffé avant le démarrage afin d'assurer la présence de liquide dans le milieu poreux de l'évaporateur.

La condition de démarrage d'un LHP réside quant à elle dans l'existence d'un gradient de température entre la chambre de compensation et l'évaporateur. Dans les deux systèmes, la circulation peut être stoppée en chauffant simplement la chambre de compensation légèrement. Au-dessus de la température d'évaporation. Cela aura pour action d'égaliser la pression des deux côtés de la pompe capillaire et ainsi arrêter le flux. De plus il est possible de fixer la température de l'évaporateur (et donc du système à refroidir) en contrôlant les propriétés thermostatiques de la chambre de compensation.

La puissance requise pour maintenir constante la température de la chambre de compensation est inférieure à 10W pour un LHP basé sur l'ammoniac comme fluide caloporteur. Cela rend très attractif l'utilisation de LHP pour refroidir des systèmes qui requièrent un contrôle thermique dans plusieurs scénarios de dissipation thermique comme un ordinateur personnel. Les technologies CPL et LHP gagnent actuellement l'acceptation dans la communauté aérospatiale. Un des avantages réside dans leur grande capacité de transférer la chaleur à des distances importantes et indépendamment de l'orientation de la boucle par rapport à la pesanteur. La figure 30 présente deux exemples boucles diphasiques flexibles permettant de dissiper des puissances thermiques de 90W. Quelques exemples de boucles diphasiques passives sont présentées figure 31.

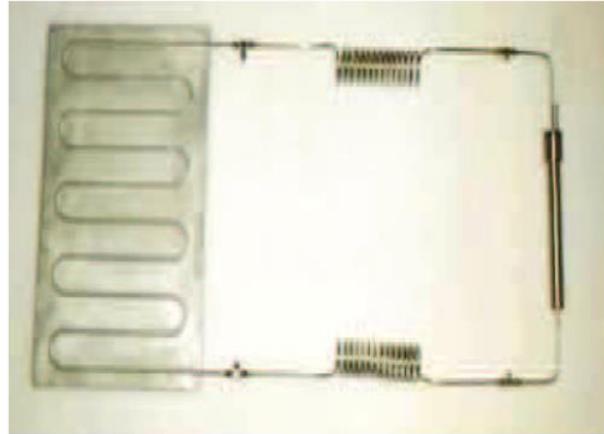
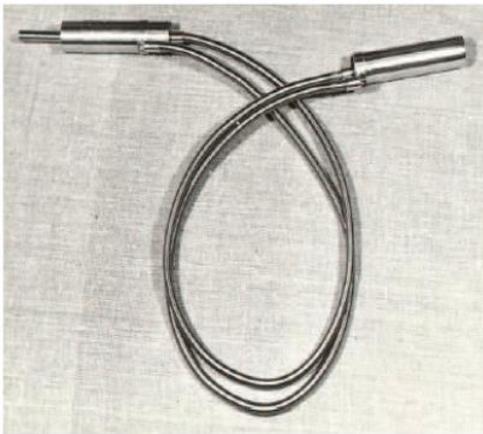


Figure 30. Exemples boucles diphasiques flexibles permettant de dissiper des puissances thermiques de 90W

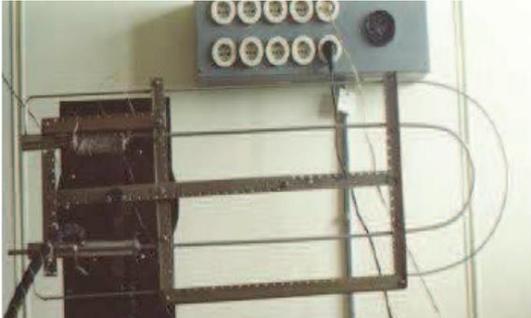
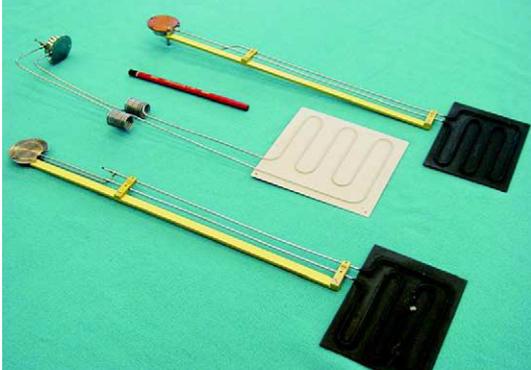
Géométrie de la boucle	Caractéristiques de la boucle
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Longueur effective : 450mm ▪ Diamètre d'évaporateur : 20mm. ▪ Diamètre ligne vapeur : 6/4mm. ▪ Diamètre ligne liquide : 4/3mm. ▪ Densité de flux max : 130W/cm². <p align="right">Bazzo et Riehl, (2003)</p>
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Longueur effective : 2000mm. ▪ Diamètre d'évaporateur : 24mm. ▪ Diamètre ligne vapeur : 6mm. ▪ Diamètre ligne liquide : 4mm. ▪ Capacité maximale : 900W. <p align="right">Delil et al. (2003)</p>
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Longueur effective 500mm. ▪ Fluide : Ammoniaque. ▪ Capacité maximale : 120–160 W. <p align="right">Maydanik et al. (2004)</p>

Figure 31. Exemples de boucles LHP/CPL

4.3. Drain thermique

L'évacuation de la chaleur par conduction thermique est préférée lorsque, pour des problèmes de poids, d'encombrement et de coûts, l'utilisation de la convection thermique n'est pas possible. La conduction thermique est retenue pour des composants mécatronique de faible puissance thermique induite (inférieure à 10W), pour des circuits imprimés ou des boîtiers de systèmes électriques (Veillere, 2009).

Un drain thermique est composé (figure 32) :

- D'une structure métallique (cuivre, étain, acier...) permettant de conduire et de dissiper la thermique.
- De pâte thermique (Sil-Pad, Gap-Pad...) permettant de réaliser le contact entre l'élément à refroidir et la structure métallique.
- D'ailettes de ventilation.

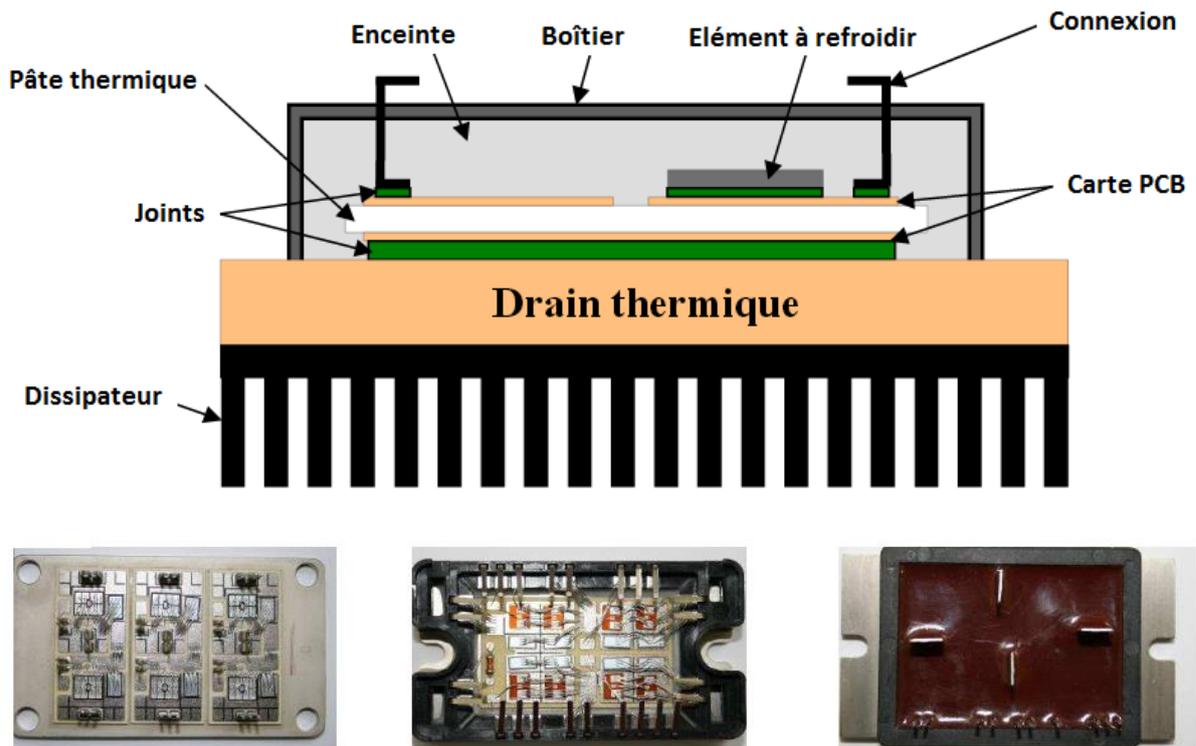


Figure 32. Principe et exemples de drains thermiques externes

Le transfert thermique des pâtes thermiques dépend de ses caractéristiques :

- Conductivité thermique (dépend du matériau).
- Epaisseur (inversement proportionnelle à la conductivité thermique).
- Taux de compression (permet d'éviter les lames d'air et d'assurer le contact).

Les drains thermiques doivent posséder une bonne conductivité thermique afin d'évacuer rapidement la chaleur mais aussi avoir un coefficient de dilatation thermique (CTE : Coefficient of Thermal Expansion) proche de celui du substrat céramique, afin de diminuer les contraintes thermomécaniques entre les différents composants. Ils doivent donc posséder une densité la plus faible possible.

La première génération de drains thermiques a été réalisée à partir de matériaux monolithique : l'aluminium ou le cuivre. Mais ces deux matériaux possèdent un CTE très élevé ce qui génère, en fonctionnement, des contraintes mécaniques qui détériorent la fiabilité des assemblages (figure 33). Afin d'améliorer encore les propriétés, une deuxième génération de drains a été élaborée utilisant cette fois des composites, et notamment l'aluminium renforcé par des particules de carbure de silicium (Al/SiC) mais aussi des alliages tels que l'Invar ou le Kovar. Ces deux alliages sont intéressants de par leur faible coefficient de dilatation mais possèdent une conductivité thermique beaucoup trop faible (Bellin, 2006).

Matériaux	Drains thermiques de 1 ^{ère} génération				Drains thermiques de 2 ^{ème} génération		
	Matériaux monolytiques		Alliages de cuivre				
	Al	Cu	Cu-W (10-20% Cu)	Cu-Mo (15-20% Mo)	Invar (64%Fe,36%Ni)	Kovar (54%Fe,29%Ni,17%Co)	Al/SiC
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	218	400	180 - 200	160 - 170	13	17	180
CTE (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	23	17	6,5 – 8,3	7,0 – 8,0	1,7 - 2,0	5,0	8,7
Densité	2,7	8,9	15,7 – 17,0	10,0	8,0	8,4	3,0

Figure 33. Propriétés thermiques des drains thermiques de 1^{ère} et 2^{ème} génération.

De nos jours, les drains thermiques commercialisés sont soit en cuivre pur soit en Al-SiC, mais ces deux matériaux ont atteint leurs limites. C’est pourquoi une troisième génération de drains thermiques est en cours de développement. La figure 34 montre la comparaison des drains thermiques de 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} génération.

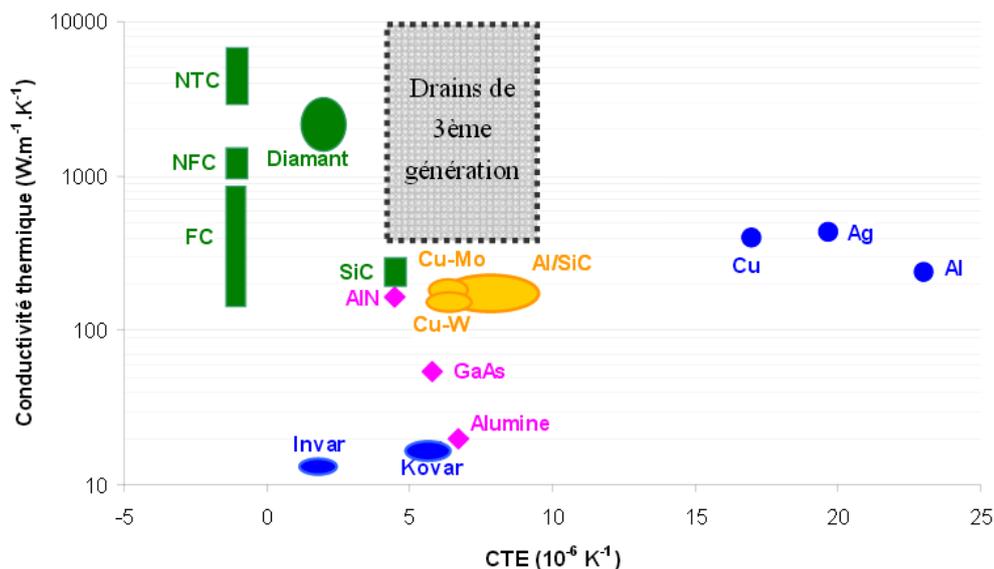


Figure 34. Comparaison des drains thermiques de 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} génération.

Le drain thermique idéal serait un matériau possédant à la fois une très bonne conductivité thermique (supérieure au cuivre), un CTE proche de celui du substrat céramique et une densité inférieure à celle de l’aluminium ($d < 2$). Afin d’obtenir des propriétés proches du matériau idéal, la troisième génération de drains thermiques combine des matrices métalliques telles que l’aluminium ou le cuivre, avec des renforts à haute conductivité thermique comme des fibres de carbone (FC), des nanofibres de carbone (NFC), des nanotubes de carbone (NTC), des particules de SiC ou, encore, des particules de diamant (Nathsarma et al., 2010).

4.4. Refroidissement par effet Peltier

Une possibilité de produire de la réfrigération sans faire intervenir des mécanismes et des écoulements de fluides frigorigènes est d'utiliser un refroidisseur qui s'appuie sur les effets thermoélectriques. En considérant un circuit fermé formé de deux fils conducteurs, fait de matériaux différents, en contact à chaque extrémité. En chauffant une des jonctions, un courant électrique se met à circuler dans le circuit. Ces effets thermoélectriques qui résultent du couplage entre le phénomène de conduction thermique et celui de conduction électrique sont connus sous le nom d'effet Seebeck. Si une différence de potentiel électrique est appliquée le circuit, un effet de réfrigération en résulte. La jonction froide se refroidit, et la jonction chaude se réchauffe. C'est l'effet Peltier sur lequel est basée la réfrigération thermoélectrique (figure 35).

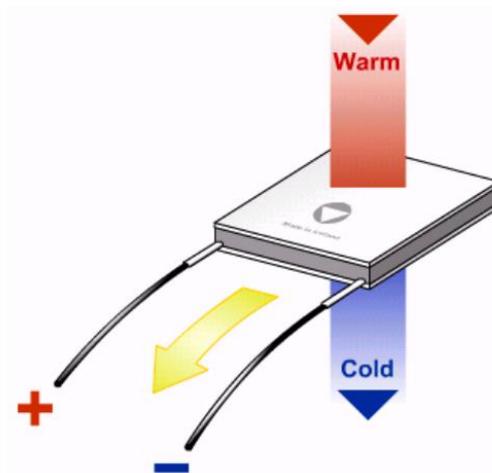


Figure 35. Effet Peltier

Les dispositifs qui l'utilisent ont aussi l'avantage d'être simples, robustes, silencieux et fiables. Malheureusement l'efficacité est assez limitée. En effet, bien que la puissance de réfrigération due à l'effet Peltier soit proportionnelle au courant, la puissance de réfrigération d'un thermo-élément est limitée par l'effet Joule proportionnel au carré de l'intensité électrique. Pour cette raison, à partir d'une certaine valeur, une augmentation de l'intensité entraînera une augmentation et non une diminution de la température de l'extrémité froide.

Dans la pratique, pour améliorer les performances de puissance, de rendement et d'écart de température, les thermo-éléments sont multi-étagés, chaque étage comprenant un nombre décroissant de jonctions Peltier montées en parallèle, d'où une forme en pyramide, les étages inférieurs devant pomper la chaleur dissipée à l'extrémité chaude des étages supérieurs (figure 36).

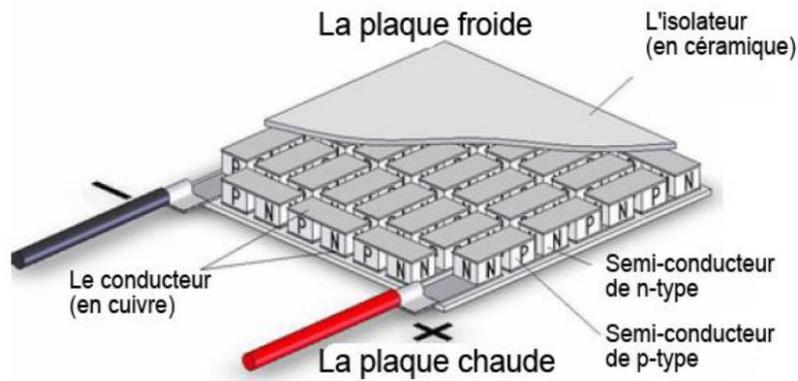


Figure 36. Application de plusieurs thermo-éléments en semi-conducteurs à un seul étage.

Suivant le nombre de jonctions Peltier montées en parallèle, un étage peut fournir de quelques dixièmes à quelques dizaines de watts, avec un écart de température allant, en pratique, jusqu'à quelques dizaines de degrés par étage.

A titre d'exemple, la figure 37 présente les caractéristiques techniques du module Peltier TEC1-12706.

Tension nominale	15 V	
I max.	6.4 A	
Puissance de refroidissement (max.)	65 W	
Différence de température (max.)	60 °C	
Larg.	40 mm	
Hauteur	3.8 mm	
Longueur	40 mm	

Figure 37. Caractéristiques techniques du module Peltier TEC1-12706

5. Synthèse des systèmes de refroidissement

Le tableau ci-dessous résume les différentes techniques de refroidissement développées dans cette étude, en mettant en avant leurs avantages, inconvénients et gammes de flux thermiques pouvant être dissipée. Ces systèmes sont classés par ordre croissant de flux thermique pouvant être dissipés.

Remarque : Les valeurs de dissipation dépendent de la configuration, et les valeurs fournies ne sont qu'indicatives.

Système	Avantages	Inconvénients	Flux thermique maximal dissipée (W.cm ⁻²)
Drain thermique	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simplicité d'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Utilisable pour de faible puissance 	0.01 à 0.1
Convection naturelle (air)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Très simple à mettre en œuvre 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nécessite une adaptation de l'architecture ▪ Utilisable pour de petites puissances uniquement 	0.01 à 0.1
Effet Peltier	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pas d'éléments mécaniques ▪ Silencieux 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Très énergivore 	5 à 50
Convection forcée (air)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simple à mettre en œuvre ▪ Contrôlable de l'extérieur 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Introduction de poussières ▪ Nécessite un ventilateur 	0.1 à 70
Immersion fluide diélectrique	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Efficace grâce au contact direct ▪ Pas de pièce 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nécessite une enceinte imperméable ▪ Limité par la quantité maximale que peut évacuer le condenseur ▪ Nécessite un choix judicieux de fluide 	20
Boucle diphasique CPL	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adaptable à de nombreuses architectures ▪ Silencieux, sans pièces mécaniques ▪ Contrôlable de l'extérieur ▪ Simulation plus simple ▪ Système passif 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Peut poser des soucis lors du démarrage 	20 à 30
Boucle diphasique LHP		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nécessite un paramétrage précis afin d'éviter un mélange des phases dans la chambre de compensation 	
Caloduc	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pas de pièce en mouvement ▪ Simple et robuste ▪ Système passif 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La forme peut poser un problème dans l'intégration 	5 à 250
Tube Thermosiphon		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dépendant de la position par rapport au champ gravitationnel 	
Convection forcée (fluide)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simple ▪ Plus efficace que l'air ▪ Contrôlable de l'extérieur 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Système actif 	10 à 350
Jets	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Applicable sur de grande surface 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nécessite un lourd équipement (pompe, régulateur de débit, réservoir de stockage) ▪ Consommation d'énergie 	100 à 350
Spay Cooling	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bon recouvrement spatial de la zone à refroidir. ▪ Permet un refroidissement à la demande et localisé. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Complexité réglage des injecteurs ▪ Pressurisation du liquide avant injection ▪ Système actif 	500

Figure 38. Résumé des caractéristiques des systèmes de refroidissement

La figure 39 ci-dessous présente le coût économique (mise en œuvre, financier, ...) de chaque système de refroidissement en fonction de la densité de puissance à évacuer. Pour résumer ce graphique, il est à noter que, plus le système de refroidissement permet de dissiper une large gamme de flux thermique, plus, ce système est impactant pour le coût financier. Ce graphique met en avant l'importance de connaître la puissance thermique à évacuer d'un élément pour y associer le système de refroidissement adapté.

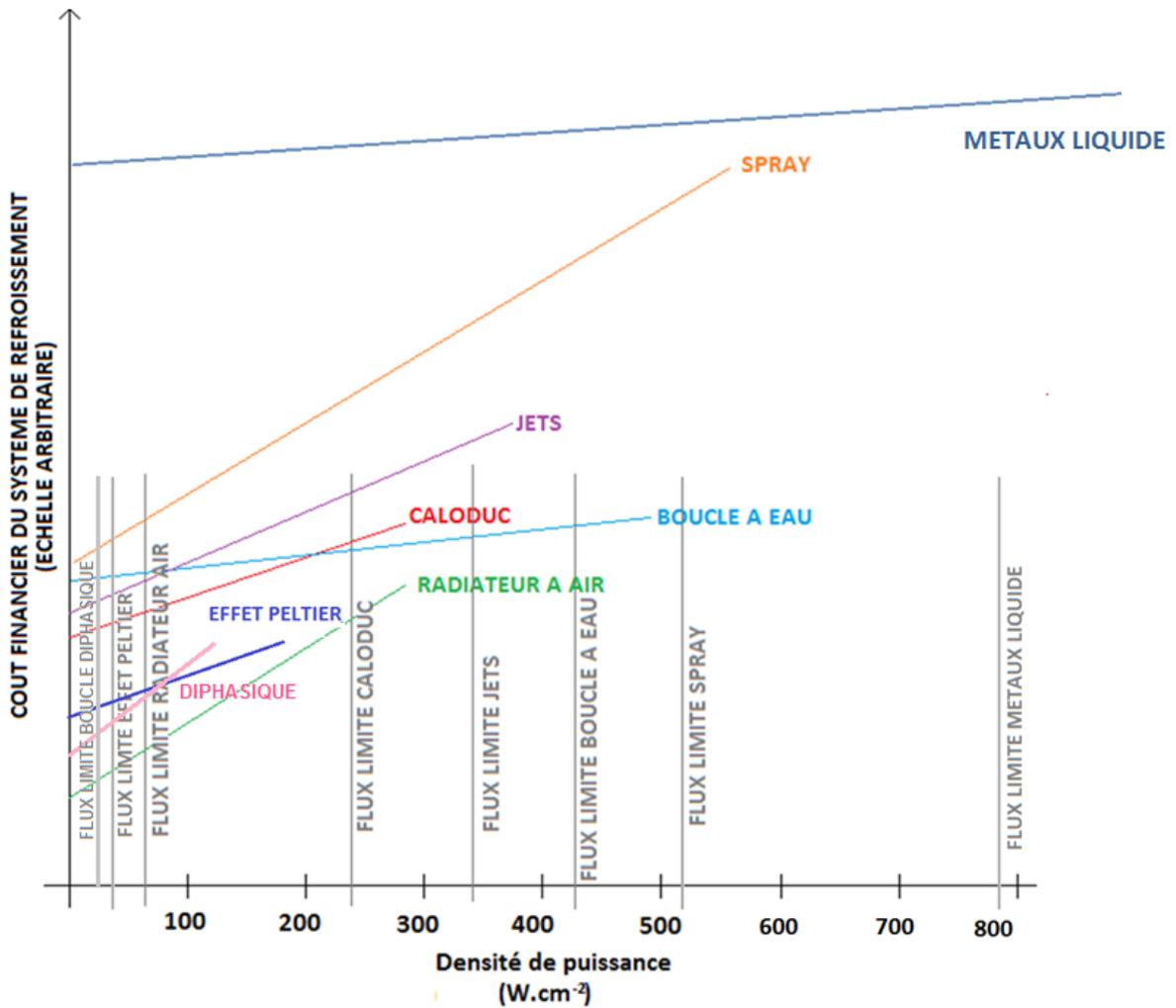


Figure 39. Coût financier de chaque système de refroidissement en fonction de la densité de puissance à évacuer

Table des Figures

Figure 1. Les différents domaines d'application de l'électronique de puissance..... 8

Figure 2. Zones approximatives (Puissance/Fréquence) d'utilisation 9

Figure 3. Puissance de fonctionnement de différentes sources énergétiques..... 11

Figure 4. Taille des éléments électroniques en fonction de leur puissance 12

Figure 5. Principe de la conduction thermique(Roux, 2006)..... 14

Figure 6. Conductivité thermique de différents matériaux(Cohard, 2002) 15

Figure 7. Analogies entre la loi de Fourier et la loi d'Ohm(Cohard, 2002) 15

Figure 8. Exemple de système..... 16

Figure 9. Modèle de résistance thermique pour un système..... 16

Figure 10. Action du fluide en mouvement dans la convection 17

Figure 11. Comparaison des gammes de densité de flux thermique des différents 17

Figure 12. Emissivité ϵ de quelques matériaux(Yunus and Cengel, 1998)..... 19

Figure 13. Classification des systèmes de refroidissement passif(LUSAC)..... 20

Figure 14. Exemple d'ailette de refroidissement et de nid d'abeille..... 21

Figure 15. Système de refroidissement forcé par air 22

Figure 16. Refroidissement liquide à micro-canaux (EnermaxLiqmax 120S)..... 23

Figure 17. Refroidissement liquide à mini-canaux (CeramCool® LiquidCoolin) 23

Figure 18. Refroidissement liquide à plaque froide (AREELIS Technologies) 23

Figure 19. Variation du coefficient d'échange de chaleur en fonction 24

Figure 20. Principe du spray cooling 25

Figure 21. Description des différents organes du spray cooling 26

Figure 22. Courbe de transfert de chaleur par ébullition ou courbe de Nukiyama 27

Figure 23. Exemples de modules spray cooling (SPRAYCOOLL) 28

Figure 24. Refroidissement par jets 29

Figure 25. Utilisation de PCM avec du graphite pour refroidir des batteries (3)..... 30

Figure 26. Systèmes de refroidissement par fluide diélectrique avec..... 32

Figure 27. Schéma de principe d'un caloduc 33

Figure 28. Schéma de principe d'un thermosiphon en tube fermé..... 34

Figure 29. Boucles diphasiques CPL et LHP..... 35

Figure 30. Exemples boucles diphasiques flexibles permettant 36

Figure 31. Exemples de boucles LHP/CPL 37

Figure 32. Principe et exemples de drains thermiques externes 38

Figure 33. Propriétés thermiques des drains thermiques de 1^{ère} et 2^{ème} génération..... 39

Figure 34. Comparaison des drains thermiques de 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} génération..... 39

Figure 35. Effet Peltier 40

Figure 36. Application de plusieurs thermo-éléments en semi-conducteurs à un seul étage. 41

Figure 37. Caractéristiques techniques du module Peltier TEC1-12706 41

Figure 38. Résumé des caractéristiques des systèmes de refroidissement 42

Figure 39. Coût financier de chaque système de refroidissement 43

Bibliographie

Baviere, R. Etude de l'Hydrodynamique et des Transferts de Chaleur dans des Microcanaux. phdthesis. Université Joseph-Fourier - Grenoble I (2005).

Bellin, B. Contributions a l'étude des bobinages supraconducteurs : le projet dga du smes hts impulsional. PhdThesis. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG(2006).

Bouarroudj-Berkani, M. Etude de la fatigue thermo-mécanique de modules électroniques de puissance en ambiance de températures élevées pour des applications de traction de véhicules électriques et hybrides. PhdThesis. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan(2008).

Cohard. Transfert Thermique(2002).

Diaham, S. Etude du comportement sous haute température de matériaux polyimides en vue de la passivation de composants de puissance à semi-conducteurs grand cap. Phd. Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier (2007).

Estes, K.A., and Mudawar, I. Correlation of sauter mean diameter and critical heat flux for spray cooling of small surfaces. *Int. J. Heat Mass Transf.* 38, 2985–2996 (1995).

Faraji, M., and Qarnia, H. El Optimisation d'un système de stockage d'énergie par chaleur latente de fusion : application au refroidissement d'une composante électronique. In JITH 2007, J.-J. BEZIAN, ed. (Albi, France: ENSTIMAC), p. 5p(2007).

Karim, O., Gillot, C., Schaeffer, C., Gimet, E., and Derou, S. Heat sink exchanger dimensioning for Hybrid inverter. pp. 159–163(2000).

Lescot, J., and Ndagijimana, F. Modélisation et caractérisation de composants passifs intégrés sur silicium pour applications radiofréquences(2000).

Mativet, A., and Meunier, F. Etude expérimentale d'un procédé de chauffage et de refroidissement par changement de phase du fluide caloporteur (1997)

Meysenc, L. Etude des micro-échangeurs intégrés pour le refroidissement des semi-conducteurs de puissance. PhdThesis. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG (1998).

Miao, J., Wang, J., and Ma, T. Analysis of evaporation heat transfer of thin liquid film in a capillary of equilateral triangular cross-section. *J. Therm. Sci.* 10, 348–356(2001).

Mogensen, P. Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages. Doc. - Swed. Counc. Build. Res. 652–657(1983).

Nathsarma, K.C., Nayak, B.B., Pradhan, S., and Brahmabhatt, P. Refinement of niobium Nb₂O₅ through solvent extraction followed by carbo-thermic reduction(2010).

Oseen-Senda, K. Etude de l'ébullition du pentane en monocanal en vue de son utilisation pour le refroidissement des piles à combustible PEMFC. PhdThesis. Université Henri Poincaré - Nancy I (2006).

Phelan, P.E., Chiriach, V.A., and Lee, T.-Y.T. Current and future miniature refrigeration cooling technologies for high power microelectronics. *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.* 25, 356–365(2002).

Robert, J., and Alzieu, J. Accumulateur : Considérations théoriques. Tech. Ing. Génie Électr. D5(2004).

Roux, P. Cours Thermique(2006).

Stenger, F. Experimental Feasibility Study of Water-Filled Capillary-Pumped Heat Transfer Loops. NASA TM X-1310(1966).

Thibault, D. Etude du refroidissement par impact de jets à travers une paroi mince et avec un écoulement cisailant amont : application aux aubes de turbines. phdthesis. ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers (2009).

Veillere, A. Drains thermiques adaptatifs : Cuivre allié / Fibre de Carbone. phdthesis. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I (2009).

Yunus, and Cengel. Heat Transfer : A practical approach. N. Y. McGraw Hill(1998).

Zuo, Z.J., and North, M.T. Miniature high heat flux heat pipes for cooling electronics. Proc SEE 573–579(2000).