

Annexe A11.2.

Montage et refroidissement des composants de puissance

A11.2.1. Rôle du boîtier du semi-conducteur de puissance

A11.2.1.1. Introduction

Parmi les fonctions primordiales que doit assurer le boîtier d'un semi-conducteur de puissance, citons :

- La protection de la partie active du composant (puce en silicium) contre les agressions mécaniques, chimiques et climatiques de l'environnement ;
- L'échange d'énergie en permettant l'évacuation de la chaleur vers l'extérieur ;
- L'assemblage mécanique qui doit être le plus facile possible pour le montage et raccordement du composant dans un équipement.

A11.2.1.2. Types de boîtiers

Il existe de nombreux types de boîtiers normalisés. Il est commode de les classer en fonction de la puissance contrôlée :

- Dans le cas des faibles et moyennes puissances on rencontre principalement :
 - boîtiers plastiques moulés à raccordement par pattes soudées sur circuit imprimé (Exemple : TO 220) ;
 - boîtiers plastiques moulés à raccordement par vis avec câblage de la puissance par fils ou barres en cuivre (Exemple : TO 240AA) ;
 - boîtiers métalliques à tresse ou à sortie à souder (Exemple : TO 94 ou TO 83).
- Dans le cas des fortes et très fortes puissances on utilise des boîtiers « press-pack » à refroidissement double face qui résistent à des forces d'arrachement de plusieurs kN.

L'image ci-dessous donne ainsi un aperçu de la grande variété de boîtiers qui existe.



A11.2.2. Environnement d'un semi-conducteur de puissance

Les composants utilisés dans les convertisseurs de puissance sont soumis à de nombreuses contraintes électriques et thermiques.

Parmi celles-ci on peut noter en particulier la nécessité de :

- Supporter des tensions pouvant atteindre plusieurs kilovolts ;
- Contrôler des courants de plusieurs centaines d'ampères ;
- Dissiper des puissances parfois supérieures à plusieurs kilowatts ;
- Supporter les commutations rapides des courants de forte intensité qui entraînent des phénomènes électromagnétiques (rayonnements) susceptibles de perturber le bon fonctionnement du composant.

Ces différentes contraintes rencontrées dans les équipements industriels impliquent :

- Une **isolation électrique** des composants constituant un convertisseur de puissance,
- L'emploi de **refroidisseurs** pour faciliter l'échange des calories vers l'extérieur,
- L'emploi de **filtres anti-parasites** et/ou de **blindage** pour se protéger et respecter les normes de pollution en vigueur.

A11.2.3. Isolement électrique

Les différentes structures des convertisseurs de puissance font qu'il existe des différences de potentiel importantes entre les composants de la dite structure. Ceci implique qu'il est indispensable d'assurer un isolement entre les parties actives d'une part et aussi avec la masse, tout en conservant une chaîne thermique continue entre chacune des puces et l'atmosphère extérieure.

On distingue trois types d'isolement électrique :

- **Isolement interne entre la puce et le boîtier :**

Ce type de technologie de composant est illustré par l'exemple de la figure ci-dessous.

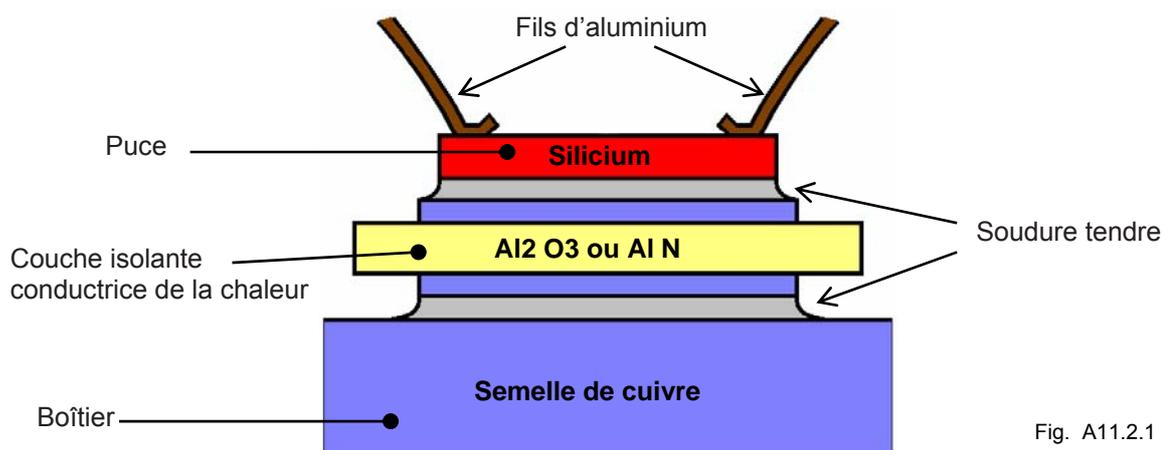


Fig. A11.2.1

C'est une solution performante et économique car elle nécessite peu de pièces pour le montage et le câblage des composants de puissance. En général un seul radiateur de puissance est suffisant.

On rencontre ces boîtiers dans la plupart des convertisseurs de puissance de petites et moyennes puissances utilisant des boîtiers moulés intégrant des thyristors, diodes ou IGBT par exemple.

L'utilisation d'une graisse de contact entre la semelle ou le boîtier et le radiateur du composant est recommandé afin d'améliorer la qualité du contact thermique.

➤ **Isolement entre boîtier et radiateur :**

Cette technologie est illustrée par la figure ci-dessous.

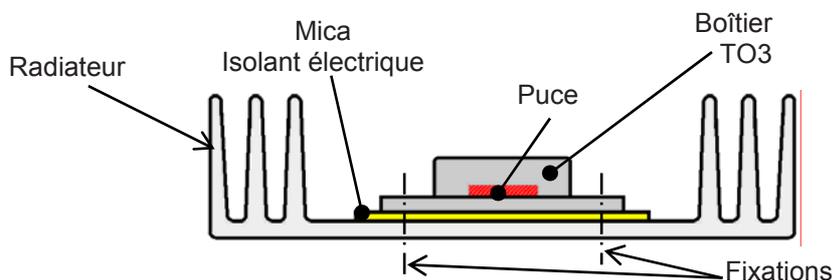


Fig. A11.2.2

Dans ce cas, on intercale entre le boîtier qui est sous tension et le radiateur une feuille isolante (mica) afin de rétablir l'isolation du composant par rapport à la masse de l'équipement.

Cette solution est moins performante que la précédente car elle entraîne :

- une augmentation de la résistance thermique de l'assemblage (limitation en puissance) ;
- la création d'une capacité parasite importante (limitation en fréquence) ;
- un coût d'assemblage plus élevé à cause du nombre de pièces supplémentaires du montage (en plus des écrans isolants, il est nécessaire de prévoir des canons et des rondelles isolantes pour assurer la fixation du composant de puissance sur le radiateur et rétablir l'isolation des vis de fixation).

On rencontre ce type de montage uniquement que dans les convertisseurs de petite puissance.

➤ **Isolement entre radiateur et châssis (masse) de l'équipement**

Ce type de montage nécessite autant de radiateurs que de potentiels différents.

La figure ci-dessous illustre un exemple de réalisation de cette technique.

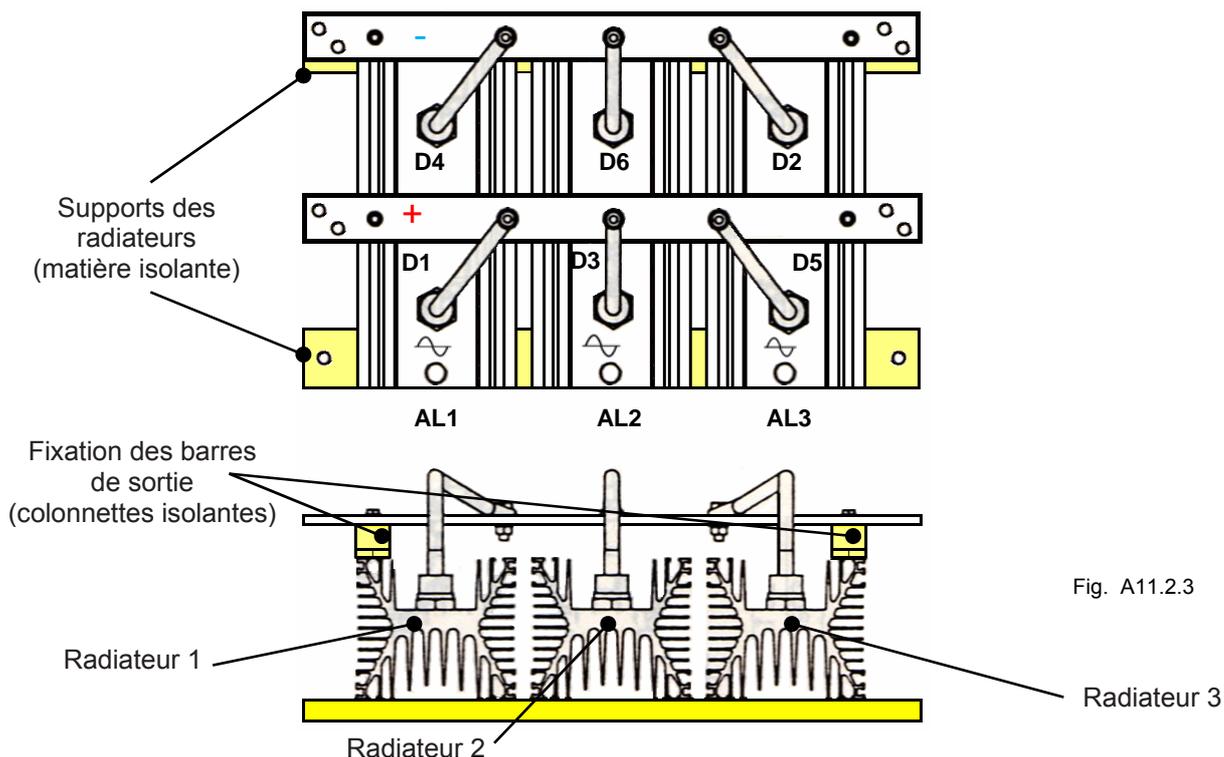


Fig. A11.2.3

Ce montage est un redresseur triphasé du type pont de Graëtz utilisant des diodes à boîtier vis avec raccordement par tresses.

Les diodes D1, D3 et D5 sont à anode au boîtier alors que les diodes D4, D6 et D2 sont à cathode au boîtier. Cette particularité permet de monter 2 diodes sur le même radiateur et ainsi de n'utiliser que 3 radiateurs au lieu de 6, ce qui simplifie notablement le montage et ainsi le coût.

Les tresses de sortie des diodes sont raccordées sur des barres fixées sur les radiateurs par l'intermédiaire de colonnettes isolantes.

L'alimentation du convertisseur s'effectue en raccordant les phases d'entrée directement sur les radiateurs.

A11.2.4. Câblage

Les conducteurs de puissance doivent avoir une section suffisante pour :

- limiter les chutes de tension susceptibles de perturber le bon fonctionnement du variateur,
- et les échauffements par effet Joule.

Par ailleurs, tout câblage introduit des inductances parasites qui génèrent :

- Une dissipation de l'énergie stockée dans ces inductances lors de l'ouverture d'interrupteurs ;
- Des surtensions.

Pour en limiter les effets, il faut réduire au maximum les longueurs de câblage, et faire en sorte que toutes les connexions soient ramenées sur un même plan (la même face du composant de puissance).

Il est ainsi recommandé de réaliser des solutions de câblage compact.

En petite puissance il est fréquent d'utiliser uniquement des circuits imprimés pour assurer les connexions de puissance.

En moyenne puissance on rencontre des associations mixtes circuits imprimés et barres de connexions pour les courants les plus intenses.

La figure A.11.2.4 ci-dessous illustre ce cas de réalisation.

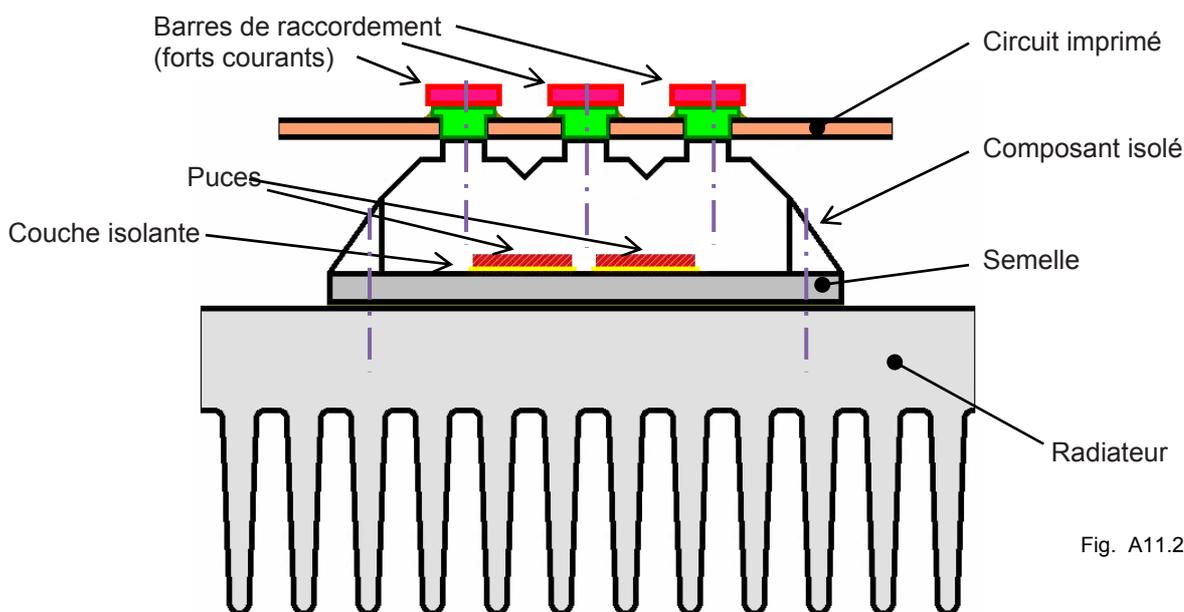


Fig. A11.2.4

En forte puissance on utilise essentiellement des montages avec connexion par barres des composants de puissance. Elles sont complétées parfois par des liaisons souples (tresses ou feuillards de cuivre) afin de réduire les contraintes mécaniques transmises aux composants en particulier lors des assemblages de boîtiers press-packs.

A11.2.5. Dissipation thermique

L'évacuation de la puissance dissipée nécessite de façon générale la circulation d'un fluide caloporteur jouant le rôle d'échangeur thermique : air ou liquide avec, éventuellement, une circulation forcée.

A11.2.5.1. Notion de résistance thermique

La résistance thermique de conduction, aussi appelée résistance thermique conductive, d'un élément exprime sa résistance au passage d'un flux de conduction thermique. Cette résistance s'applique aux solides ainsi qu'aux fluides (liquide ou gaz) immobiles. Dans le système international d'unités, elle est donnée en kelvin par watt (K/W) ou plus fréquemment en pratique en degrés Celsius par watt (°C/W). Cette notion n'est valable qu'en régime stationnaire, le régime transitoire faisant appel à une approche plus complexe.

L'inverse de la résistance thermique est la conductance thermique.

La résistance thermique de conduction s'exprime en fonction du flux de chaleur entre deux surfaces isothermes et les températures de ces deux surfaces isothermes :

$$R_{Th} = \frac{(T_1 - T_2)}{\Phi} \quad \text{avec}$$

- T_1 et T_2 sont les températures des deux isothermes exprimées en K ou °C ;
- Φ est le flux de chaleur entre les deux isothermes, en watt ;
- R_{Th} la résistance thermique de conduction en K/W ou °C/W.

En fonction de la résistance thermique de conduction, le flux de chaleur s'exprime de la sorte :

$$\Phi = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{Th}}$$

Ainsi, pour une même différence de température plus la résistance thermique est forte moins la quantité de chaleur traversant le corps est importante. Un isolant thermique est donc un corps qui possède une résistance thermique de conduction importante.

La résistance thermique est définie par rapport à des surfaces isothermes. La géométrie de ces surfaces dépend de la géométrie de l'objet dans lequel la conduction thermique se produit.

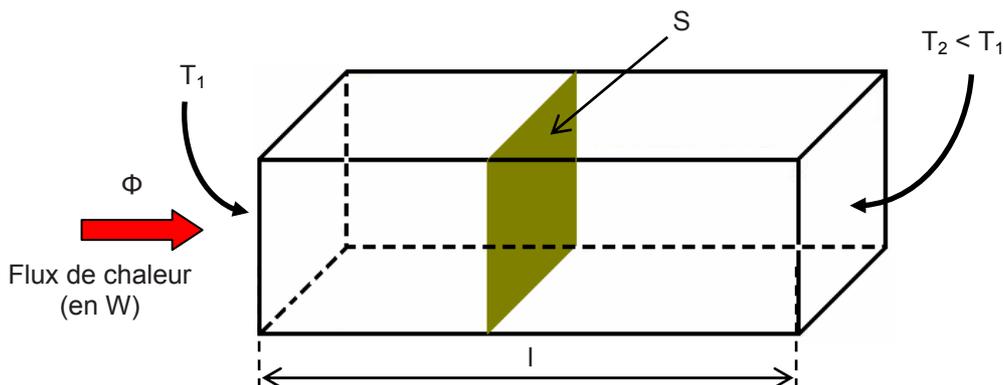


Fig. A11.2.5

Si on considère un corps parallélépipédique tel que celui représenté sur la figure ci-dessus, on obtient :

$$R_{Th} = \frac{l}{\lambda \cdot S} \quad \text{avec:}$$

- l : la longueur du corps exprimée en m ;
- S : la section exprimée en m^2 ;
- λ : la conductivité thermique en $W/m/°C$.

Exemple : aluminium pur à 90 % (utilisé pour les radiateurs), $\lambda = 220 W/m/°C$.

A11.2.5.2. Loi d'Ohm thermique

A11.2.5.2.1. Introduction

La loi d'Ohm thermique permet de calculer, en régime permanent, la température de jonction T_J des éléments semi-conducteurs par la relation :

$$T_J = T_a + P \cdot R_{Thja} \quad \text{avec}$$

- T_a est la température ambiante,
- P la puissance dissipée par l'élément semi-conducteur et
- R_{Thja} la résistance thermique jonction-ambiance.

A11.2.5.2.2. Equivalence électrique

Par analogie avec la définition de la loi d'Ohm électrique, on a coutume de représenter d'une façon similaire les associations de résistances thermiques.

Les schémas suivants en donnent les règles principales d'équivalence.

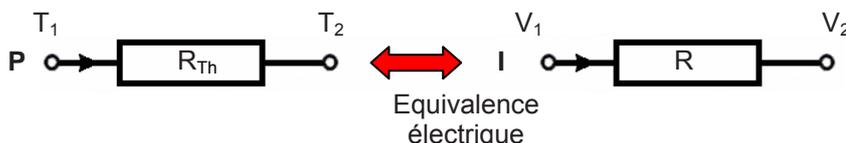


Fig. A11.2.6

Résistance thermique équivalente dans le cas d'une chaîne constituée par n éléments :

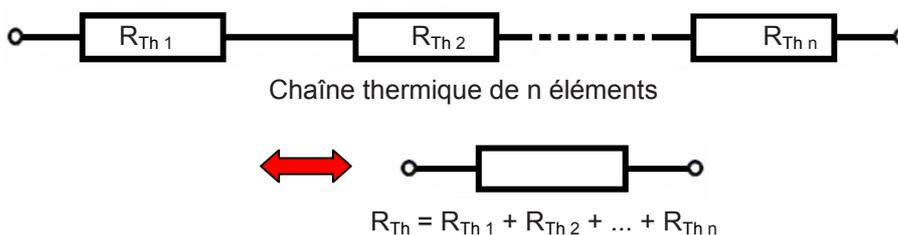


Fig. A11.2.7

A11.2.5.2.3 Définitions des principales résistances thermiques en électronique de puissance

Les éléments semi-conducteurs de puissance sont généralement montés sur des dissipateurs thermiques (ou refroidisseurs ou encore radiateurs) destinés à favoriser l'évacuation de l'énergie produite au niveau des jonctions anode-cathode pour les diodes, les thyristors, les triacs, et les GTO ou collecteur-émetteur pour les transistors bipolaires et les IGBT, ou drain-source pour les MOSFET.

Dans ce cas, la résistance thermique entre la jonction et l'air ambiant est une somme de trois résistances thermiques :

- La résistance thermique jonction-boîtier R_{Thj-b} ;
- La résistance thermique boîtier-dissipateur R_{Thb-r} ;
- La résistance thermique dissipateur-ambiance R_{Thr-a} ;

Résistance thermique jonction-boîtier

Elle est donnée dans les feuilles de caractéristiques techniques des constructeurs de semi-conducteurs. Voici quelques ordres de grandeur de résistances thermiques selon les types de boîtiers courants :

- petits boîtiers cylindriques, plastiques ou métalliques (TO-39 / TO-5, TO-92, TO-18) : compris entre 20 et 175 C/W

- boîtiers intermédiaires plats, plastiques (TO-220, TO-126/SOT-32) : entre 0,6 et 6 C/W ;
- boîtiers moyens de composants de puissance, plastiques ou métalliques (ISOTOP, TO-247, TOP-3, TO-3) : de 0,2 à 2 C/W ;
- boîtiers de composants modulaires de puissance : de 0,01 à 0,5 C/W.

Le transfert thermique entre la jonction et le boîtier se fait essentiellement par conduction.

Résistance thermique boîtier-dissipateur thermique

Elle dépend de la surface de contact entre l'élément et le dissipateur et de la présence ou non d'un isolant électrique. Le transfert thermique entre le boîtier et le dissipateur se fait essentiellement par conduction. Par exemple pour un boîtier TO-3 : sans isolant, à sec : 0,25 C/W ; sans isolant, avec graisse de contact silicone : 0,15 C/W ; avec isolant mica 50 µm et graisse de silicone : 0,35 C/W.

Résistance thermique dissipateur thermique-ambiance

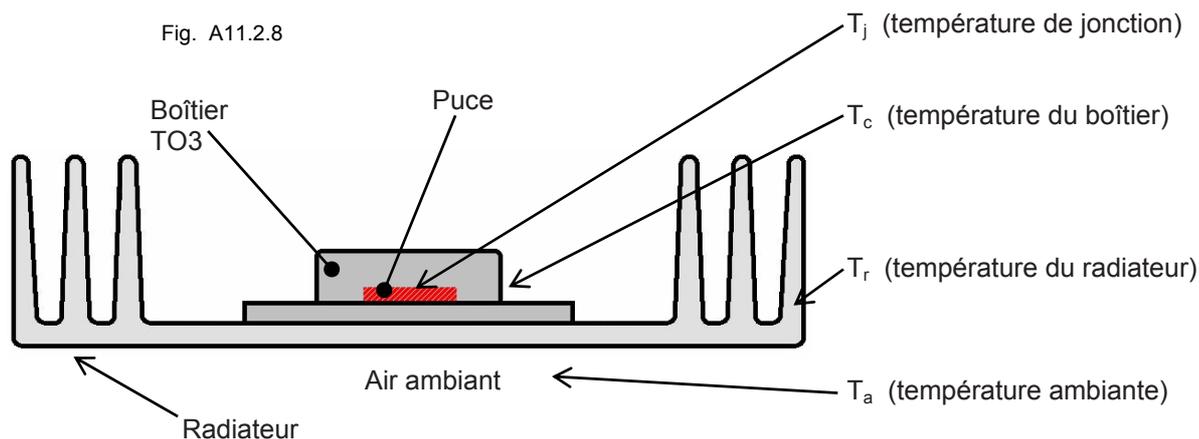
Le transfert thermique entre le dissipateur et l'air ambiant se fait essentiellement par convection : l'air ambiant vient lécher le dissipateur ; l'air chauffé à son contact s'élève, il est remplacé par de l'air plus froid et ainsi de suite. La résistance thermique dépend de la surface du dissipateur, de son type (plat, à ailettes, etc.), de son orientation (les parties verticales dissipent mieux les calories que les parties horizontales), de sa couleur (le noir rayonne plus que le brillant).

Cette résistance thermique peut être notablement diminuée en plaçant les ailettes du refroidisseur dans une gaine formant une cheminée et forçant la circulation d'air à l'aide d'un ventilateur, on crée ainsi une ventilation forcée.

La résistance thermique est fournie par le fabricant du radiateur ou est déterminée par le concepteur du convertisseur de puissance en particulier dans le cas d'une ventilation forcée.

A11.2.5.3. Application au dimensionnement des radiateurs

Reprenons le cas de l'assemblage d'un boîtier métallique type TO3 monté sur un radiateur



De cet assemblage, on peut identifier trois résistances thermiques distinctes :

- $R_{Th\ j-c}$: la résistance thermique jonction-boîtier, elle dépend de la technologie du composant ;
- $R_{Th\ c-r}$: la résistance thermique boîtier-radiateur qui dépend de la qualité du contact boîtier-radiateur, elle est améliorée avec une pâte de contact ;
- $R_{Th\ r-a}$: la résistance thermique radiateur-air ambiant qui dépend de la surface du radiateur et du coefficient de transfert de chaleur en convection.

Schéma équivalent

On obtient le schéma équivalent suivant :

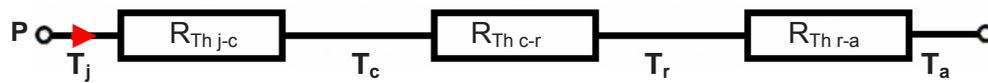


Fig. A11.2.9

$$T_j = T_a + R_{Th\ totale} \cdot P$$

avec :

$$R_{Th\ totale} = R_{Th\ j-c} + R_{Th\ c-r} + R_{Th\ r-a}$$

Condition à respecter

La température de la jonction T_j ne doit pas dépasser une valeur $T_{j\ max}$ spécifiée par le fabricant du composant.

Méthode de calcul

Pour la détermination d'un radiateur permettant de vérifier cette condition nous utiliserons les valeurs numériques suivantes de R_{Th} fournies par le constructeur pour un transistor de puissance en boîtier TO3 :

- $R_{Th\ j-c} = 0,9\ ^\circ C/W$;
- $R_{Th\ c-r}$: dépend du contact boîtier-radiateur
 $R_{Th\ c-r} = 1,3\ ^\circ C/W$ à sec
ou
 $R_{Th\ c-r} = 0,4\ ^\circ C/W$ avec graisse thermique
- $T_{j\ max} = 125\ ^\circ C$;

Application numérique

Soit à déterminer la résistance thermique du radiateur permettant de ne pas dépasser la température maximale de jonction avec les conditions de fonctionnement suivantes du composant de puissance :

- Puissance dissipée = 26 W;
- $T_a = 55\ ^\circ C$;
- radiateur avec graisse.

A partir des relations du schéma équivalent on tire :

$$T_j - T_a = (R_{Th\ j-c} + R_{Th\ c-r} + R_{Th\ r-a}) \cdot P \quad \text{soit}$$

$$R_{Th\ r-a} = \frac{T_j - T_a}{P} - R_{Th\ j-c} - R_{Th\ c-r}$$

$$R_{Th\ r-a} = \frac{125 - 55}{26} - 0,9 - 0,4$$

On obtient ainsi la valeur maximale de la résistance thermique du dissipateur pour respecter les conditions d'usage du composant de puissance :

$$R_{Th\ r-a} = 1,39\ ^\circ C/W$$

Remarque

La résistance thermique $R_{Th\ r-a}$ d'un dissipateur typique avec 8 ailettes de chaque côté du boîtier et une longueur de 10 cm fait entre 1 et 1,75 $^\circ C/W$ selon la puissance dissipée, en convection naturelle. Cette valeur peut descendre à 0,4 $^\circ C/W$ si l'on utilise une ventilation forcée, en fonction de la vitesse de l'air.

A11.2.5.3. Réalisation des radiateurs

Les dissipateurs thermiques sont des dispositifs destinés à favoriser l'évacuation des pertes dissipées par les éléments semi-conducteurs de puissance. Il s'agit de dispositifs généralement munis d'ailettes, qui doivent de préférence être montées verticalement pour faciliter le refroidissement par convection.

Pour transmettre efficacement de la chaleur, un radiateur doit être un bon conducteur thermique, d'où l'utilisation courante de métal (tôles pliées) ou d'alliages d'aluminium (profilés extrudés). Dans ce dernier cas, les dissipateurs peuvent être livrés «au mètre», l'utilisateur en coupant la longueur voulue pour obtenir la résistance thermique souhaitée.

Un bon dissipateur doit également posséder une grande surface de contact entre la source de chaleur et le milieu ambiant, ce qui explique les formes souvent complexes employées afin de maximiser les échanges thermiques.

La planéité et la rugosité de la zone de contact avec le semi-conducteur de puissance doivent être tout particulièrement soignées.

Enfin, ils peuvent être recouverts d'une peinture noire afin d'obtenir un rayonnement maximal en convection naturelle.

Il existe ainsi de nombreux types de dissipateurs thermiques proposés par les constructeurs :

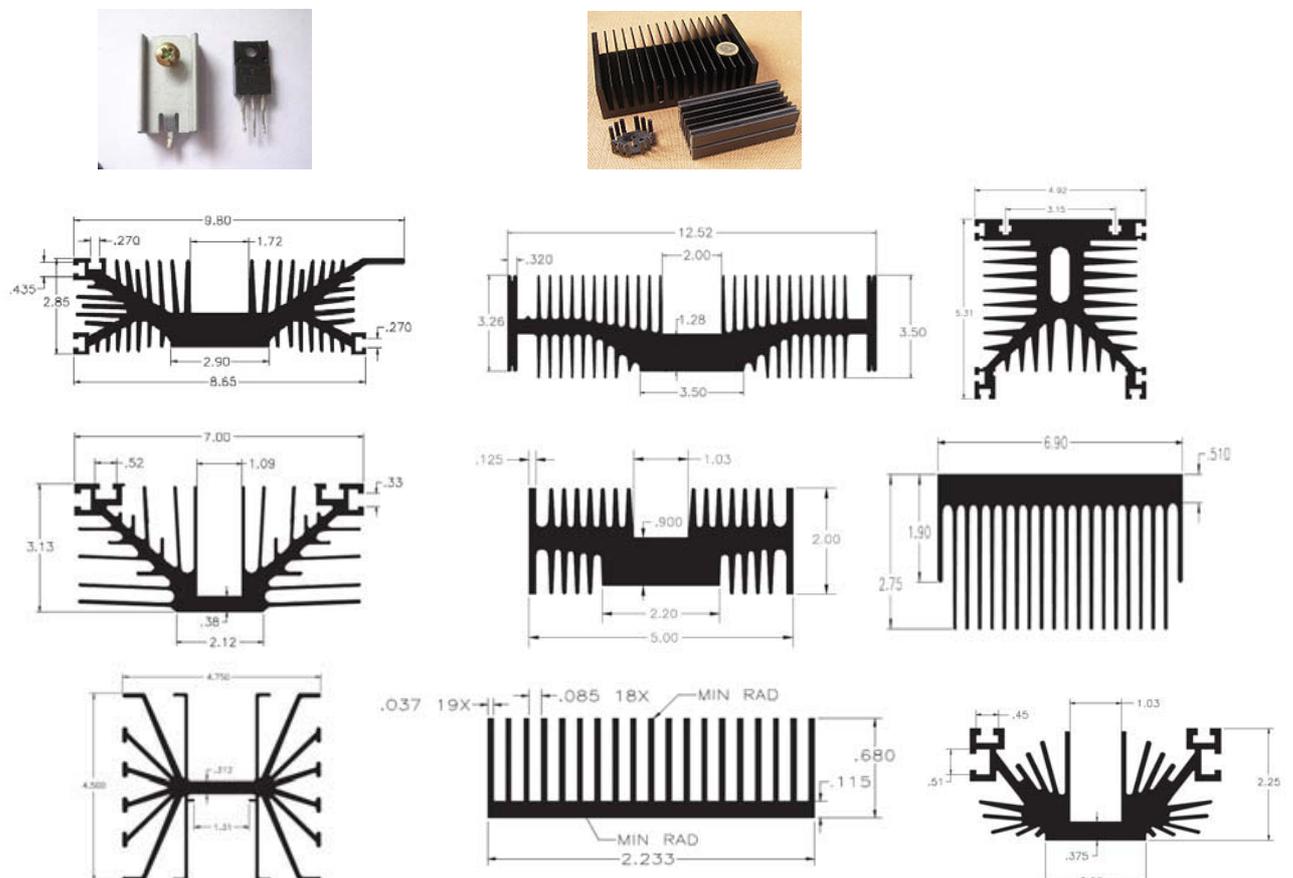
- radiateurs s'adaptant aux boîtiers ronds des transistors de petite et moyenne puissance,
- radiateurs plats avec des ailettes plus ou moins grandes, pour le montage des éléments de puissance (diodes, transistors, thyristors, triacs, etc.).

L'élément de puissance peut être fixé au refroidisseur par colle conductrice de la chaleur, clip, vis, ou pressé.

Pour son dimensionnement il faut se baser sur la loi d'Ohm thermique, laquelle permet d'évaluer l'élévation en température de l'élément en fonction de la puissance dissipée.

On fait usage de convection forcée (ventilateur) pour les convertisseurs de forte puissance.

Exemple de quelques modèles de dissipateurs



A11.2.5.4. Pâte thermique

La pâte thermique est une substance qui augmente la conductivité thermique entre les surfaces d'un ou plusieurs objets. En électronique, l'utilisation de pâte thermique est courante afin d'aider la dissipation thermique d'un composant via un dissipateur thermique.

A11.2.5.4.1. But

Le but principal d'une pâte thermique est d'assurer un contact optimal et d'éviter la présence d'air entre les surfaces d'un composant et de son système de refroidissement (souvent un dissipateur thermique). Ces surfaces possédant de nombreuses microporosités (trous, bosses), de l'air est présent entre le composant et le dissipateur. L'air étant un mauvais conducteur thermique, le transfert thermique s'effectue ainsi moins bien.

L'application de pâte thermique permet de remplir ces imperfections par une substance dont la conductivité thermique est beaucoup plus élevée que celle de l'air. La surface de contact entre le composant et le dissipateur est ainsi plus importante, et donc le transfert thermique va s'effectuer plus efficacement.

La pâte thermique sert également parfois à maintenir le dissipateur sur le composant, certaines pâtes étant très collantes. C'est par exemple le cas de certains dissipateurs destinés à refroidir les circuits intégrés mémoires des cartes graphiques, où seule la pâte thermique (qui prend parfois la forme d'un morceau de Scotch double-face) les fait maintenir en place.

A11.2.5.4.2. Propriétés

Le paramètre le plus important d'une pâte thermique est sa conductivité thermique, exprimée en watt par mètre-kelvin (c'est-à-dire en $W/(m \times K)$, à ne pas confondre avec $W/m^{\circ}K$: watt par millikelvin). Une pâte thermique à base de silicone a une conductivité thermique comprise entre 0,7 et 0,9 $W/(m \times K)$, tandis que celle d'une pâte à base d'argent est comprise entre 2 et 3 $W/(m \times K)$, voire plus. À titre de comparaison, à une température de 20°C, la conductivité thermique du cuivre est de 401 $W/(m \times K)$, celle de l'argent de 429 $W/(m \times K)$, et celle de l'air de 0,0262 $W/(m \times K)$ (à une pression de 1 bar).

D'autres propriétés jouent un rôle important :

- sa viscosité ;
- sa conductivité électrique ;
- son adaptation aux imperfections des surfaces ;
- son adhérence aux surfaces ;
- sa consistance au-dessus des températures exigées ;
- sa tenue dans le temps ;

A11.2.5.4.3. Principaux types



Pâte thermique à base de silicone



Pâte thermique à base de métal (ici de l'argent)