

Packaging en électronique de puissance

INSA Génie Électrique



Cyril BUTTAY

Laboratoire Ampère, Lyon, France

Pour commencer...

Sommaire



- 1 Pour commencer...
- 2 Petit lexique du packaging de puissance
- 3 Considérations physiques
- 4 Technologie de *packaging*
- 5 Gestion thermique des composants
- 6 Évolutions, Recherche et Développement

Sommaire



- 1 Pour commencer...
- 2 Petit lexique du packaging de puissance
- 3 Considérations physiques
- 4 Technologie de *packaging*
- 5 Gestion thermique des composants
- 6 Évolutions, Recherche et Développement

Qui suis-je ?



- Chercheur CNRS au laboratoire Ampère, à l'INSA
 - Sujet de recherche : électronique de puissance, particulièrement le *packaging* des composants
- Contacts :
 - Vous êtes bienvenus !
 - (04 72 43) 79 63
 - cyril.buffay@insa-lyon.fr
 - Bureau : 3^{ème} étage, bât L de Vinci

Qui suis-je ?



- Chercheur CNRS au laboratoire Ampère, à l'INSA
 - Sujet de recherche : électronique de puissance, particulièrement le *packaging* des composants
- Contacts :
 - Vous êtes bienvenus !
 - (04 72 43) 79 63
 - cyril.buttay@insa-lyon.fr
 - Bureau : 3^{ieme} étage, bât L de Vinci

De quoi va t-on parler ?



De packaging
(Environnement immédiat des composants)

De quoi va t-on parler ?



De *packaging*

(Environnement immédiat des composants)

Il assure :

- Connexions électriques
- Isolation électrique
- Évacuation de la chaleur
- Protection contre l'extérieur

De quoi va t-on parler ?



De *packaging*

(Environnement immédiat des composants)

Il assure :

- Connexions électriques
- Isolation électrique
- Évacuation de la chaleur
- Protection contre l'extérieur

Mais on va se limiter :

- À l'électronique de puissance
- Aux composants actifs (puces)
- À une initiation au sujet. . .

Objectifs de cette présentation



Voir les domaines physiques concernés par le packaging

- électricité
- thermique
- mécanique...

Vous donner des éléments de technologie

- Comprendre l'existant, pour pouvoir faire des choix

Discuter un peu des développements futurs

- Évolutions de l'industrie
- Axes de recherche

Tendances de l'électronique de puissance



Nouvelles applications

Énergies renouvelables



Source : wikipedia

- Adaptation de sources au réseau
 - \neq tensions
 - DC vers AC ou variation de fréquence
- Optimisation de la source
 - Point de fonctionnement optimal

Automobile

Aéronautique

Tendances de l'électronique de puissance



Nouvelles applications

Énergies renouvelables

Automobile

- Véhicules hybrides/électriques
- Haut rendement
- Bas coût



Source : Citroën

Aéronautique

Tendances de l'électronique de puissance



Nouvelles applications

Énergies renouvelables

Automobile

Aéronautique



Source : Airbus

- Augmentation de la puissance embarquée (1 MW)
- Haute fiabilité
- environnement sévère

Tendances de l'électronique de puissance

Élargissement des domaines d'application

mW-W



Téléphone portable Source : [wikipedia](#)

W-kW



Alim. de portable Source : [wikipedia](#)

kW-MW



Variateur de vitesse Source : [wikipedia](#)

MW-GW



Station du réseau HVDC néo-zélandais (350 kV) Source : [wikipedia](#)

- Mêmes principes à toutes les échelles
- Multiplication des convertisseurs
- Apport de nouvelles fonctionnalités au système
 - vitesse variable
 - véhicule hybride

Tendances de l'électronique de puissance



Compacité

- Augmentation des densités de puissance
- Augmentation de tension / courant / fréquence

Amélioration des performances

Tendances de l'électronique de puissance



Compacité

- Augmentation des densités de puissance
- Augmentation de tension / courant / fréquence

Rendement

- Réduction des pertes, donc du refroidissement
- Augmentation d'autonomie. . .

Amélioration des performances

Tendances de l'électronique de puissance



Amélioration des performances

Compacité

- Augmentation des densités de puissance
- Augmentation de tension / courant / fréquence

Rendement

- Réduction des pertes, donc du refroidissement
- Augmentation d'autonomie. . .

Fiabilité

- Résistance au cyclage thermique
- Très longue durée de vie (30 ans)

Tendances de l'électronique de puissance



Amélioration des performances

Compacité

- Augmentation des densités de puissance
- Augmentation de tension / courant / fréquence

Rendement

- Réduction des pertes, donc du refroidissement
- Augmentation d'autonomie. . .

Fiabilité

- Résistance au cyclage thermique
- Très longue durée de vie (30 ans)

Et pour l'avenir

- Recyclabilité, réutilisation

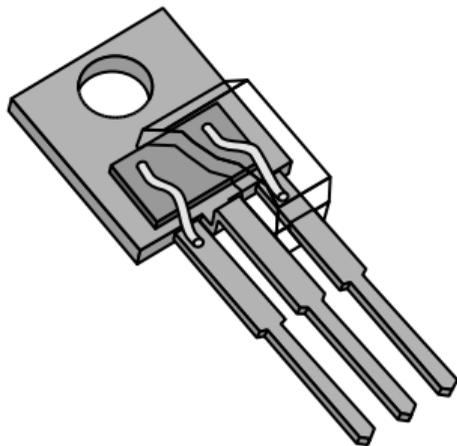
Petit lexique du packaging de puissance

Sommaire

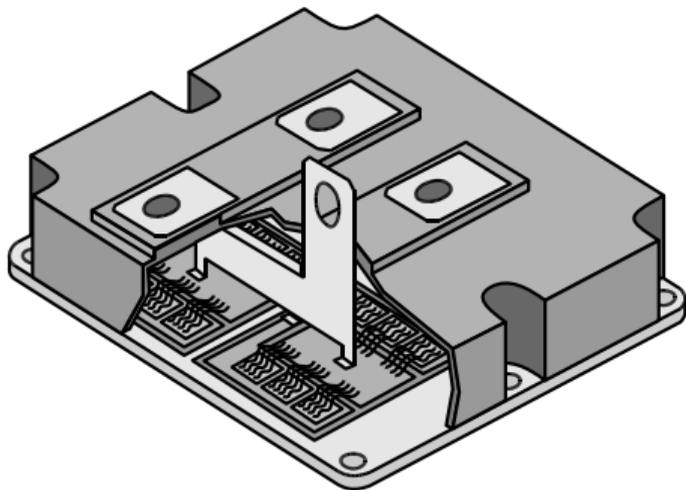


- 1 Pour commencer...
- 2 Petit lexique du packaging de puissance
- 3 Considérations physiques
- 4 Technologie de *packaging*
- 5 Gestion thermique des composants
- 6 Évolutions, Recherche et Développement

Deux classes : discrets et modules



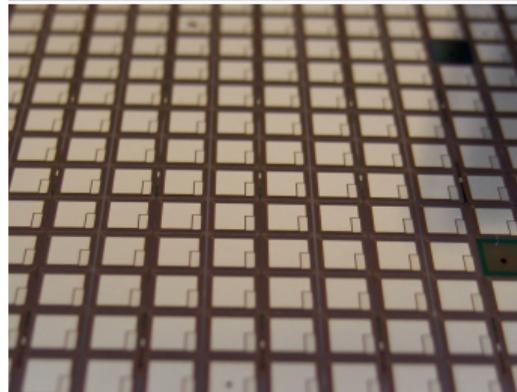
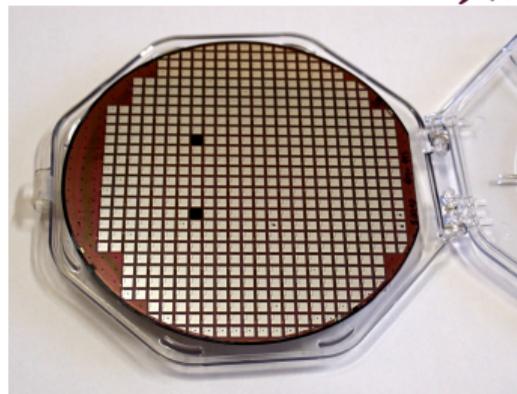
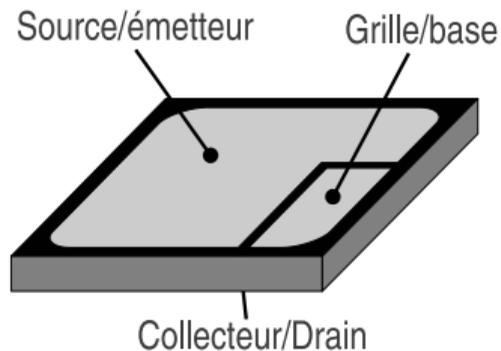
- Un composant élémentaire (transistor, diode) par boîtier
- (souvent) Pas d'isolation
- puissances faibles ou très fortes



- Plusieurs puces par boîtier
- Forme un circuit ou un seul composant élémentaire
- Assure l'isolation électrique
- Puissances moyennes à fortes

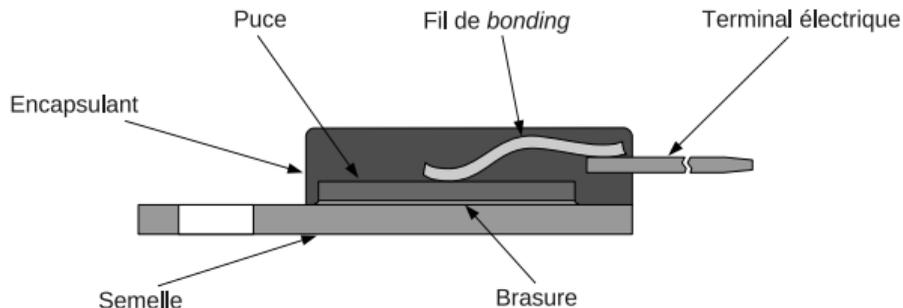
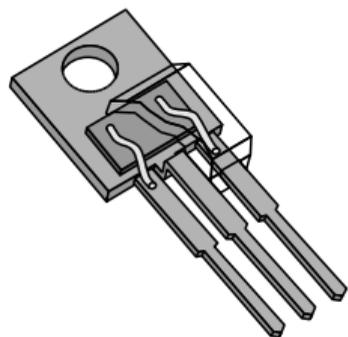
Puces de puissance

- Structure verticale, avec un (ou deux) contacts dessus et un dessous
- épaisseur de 50 à 500 μm
- côté de 1 à 13 mm

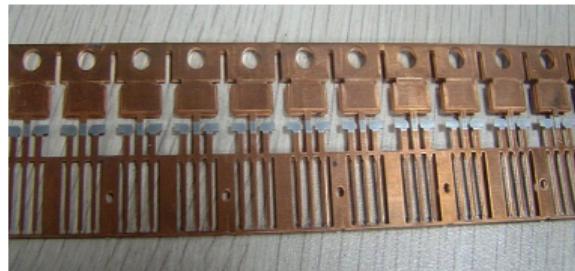


wafer IGBT International Rectifier, puces de 5x5 mm, wafer diamètre 6 pouces

Structure d'un boîtier discret

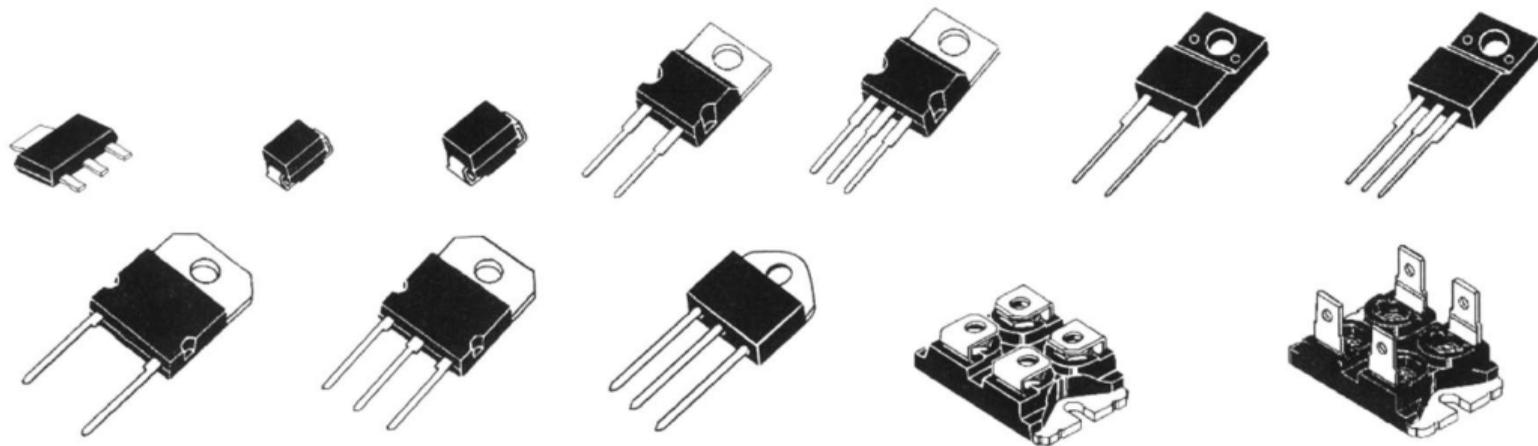


- Technologie bas coût ;
- Grande cadence de production ;
- Matériaux : cuivre, brasure, aluminium, epoxy
- Courant max. $< 100\text{ A}$
- Tension max. $< 1200\text{ V}$



Source : <http://www.seekpart.com>

Quelques boîtiers de composants discrets

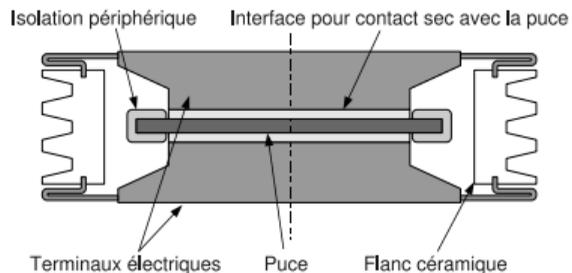


Source : techniques de l'ingénieur, volume E3 960

Les discrets pour la forte puissance



- Tensions jusqu'à 6.5 kV
- Courants de plusieurs kA
- Puces jusqu'à $\Phi = 15$ cm

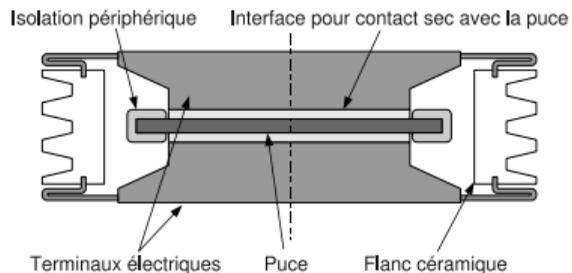


- conçus pour la mise en série.

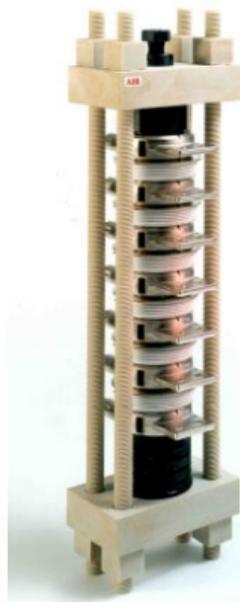
Les discrets pour la forte puissance



- Tensions jusqu'à 6.5 kV
- Courants de plusieurs kA
- Puces jusqu'à $\Phi = 15$ cm
- conçus pour la mise en série.

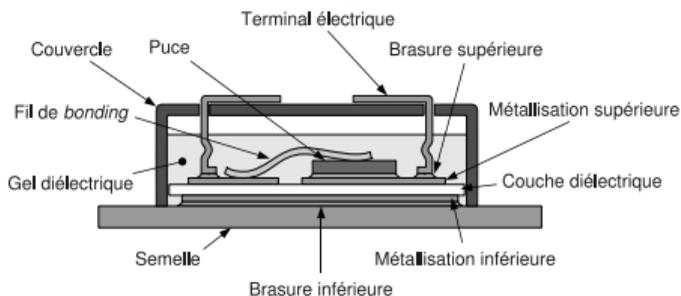
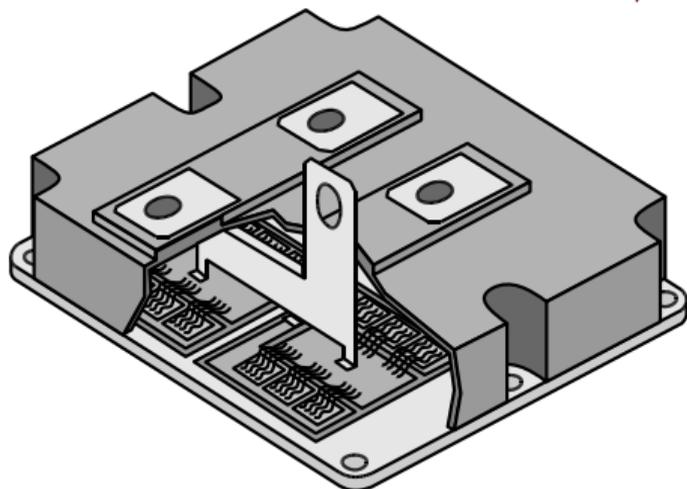


Source : <http://www.sensorprod.com>

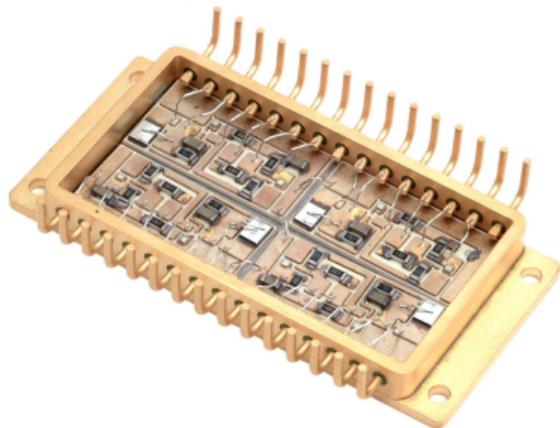


Modules

- Plusieurs puces
 - un composant équivalent (transistor, diode)
 - un circuit complet (onduleur, redresseur...)
- Besoin d'isolation électrique
- Courant max < 3600 A
- Tension max < 6500 V
- Dimensions de qqes cm de côté à 20x15x5 cm
- Plusieurs constructeurs européens (ABB, Infineon, Microsemi, Dynex, Semikron...)



Modules



- Plusieurs types de boîtiers
 - Plastique
 - Hermétique
- Ajout de fonctions
 - capteurs (courant, température)
 - circuits de commande
 - ...

Sources images : Dynex (en haut) et Semelab (en bas)

Considérations physiques

Sommaire



- 1 Pour commencer...
- 2 Petit lexique du packaging de puissance
- 3 Considérations physiques
- 4 Technologie de *packaging*
- 5 Gestion thermique des composants
- 6 Évolutions, Recherche et Développement

Limites thermiques



Quelques limites des composants :

1414°C fusion du silicium

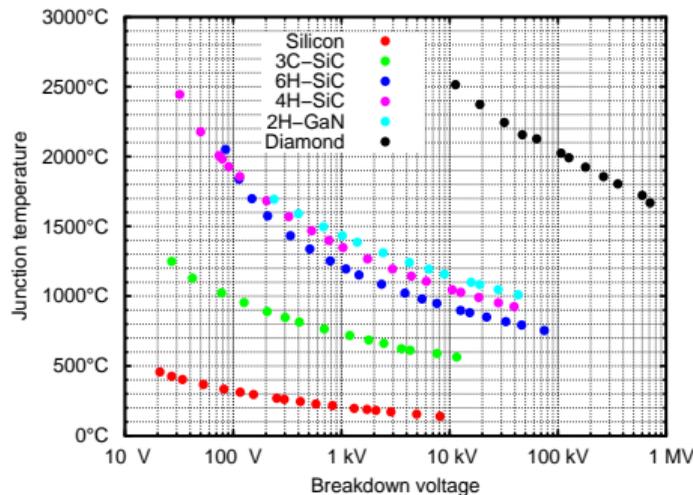
660°C fusion de l'aluminium

≈ 300°C fusion de la brasure de puce

183°C fusion de 63Sn37Pb

>200°C limite de tenue en tension (1 kV)

- De nombreux composants (MOSFETs, diodes) sont moins performants lorsque la température augmente.
- Les fortes variations de température posent des problèmes de fiabilité.



Limites thermiques



Quelques limites des composants :

1414°C fusion du silicium

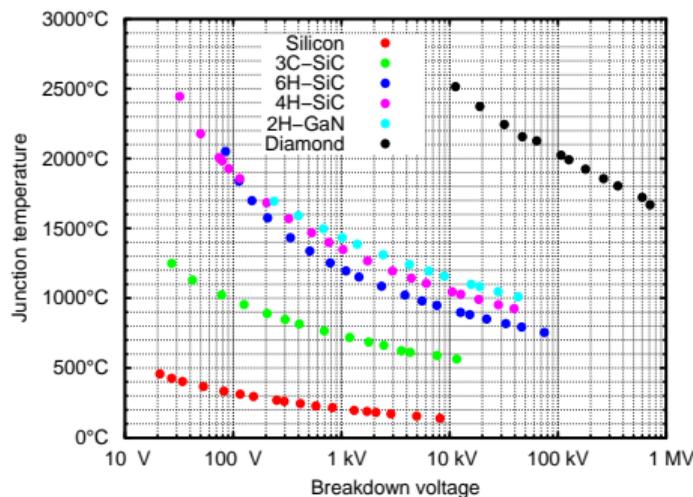
660°C fusion de l'aluminium

≈ 300°C fusion de la brasure de puce

183°C fusion de 63Sn37Pb

>200°C limite de tenue en tension (1 kV)

- De nombreux composants (MOSFETs, diodes) sont moins performants lorsque la température augmente.
- Les fortes variations de température posent des problèmes de fiabilité.



Limites thermiques



Quelques limites des composants :

1414°C fusion du silicium

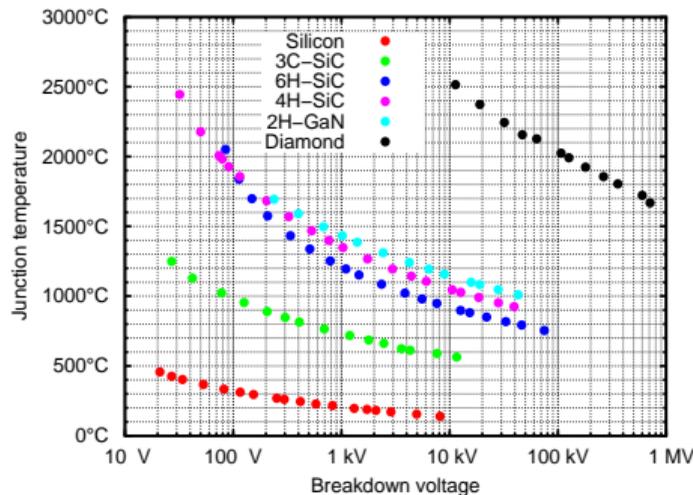
660°C fusion de l'aluminium

≈ 300°C fusion de la brasure de puce

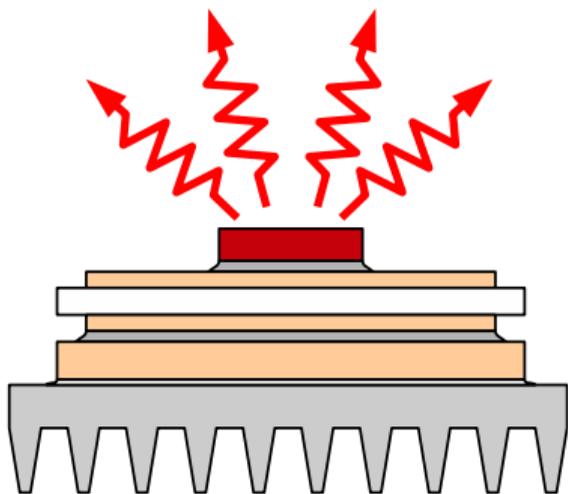
183°C fusion de 63Sn37Pb

>200°C limite de tenue en tension (1 kV)

- De nombreux composants (MOSFETs, diodes) sont moins performants lorsque la température augmente.
- Les fortes variations de température posent des problèmes de fiabilité.



Mécanismes de transport de la chaleur

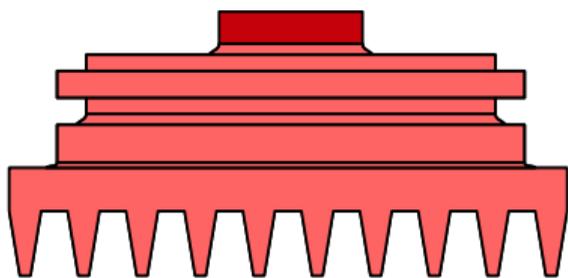


- Rayonnement
 - Loi de Stefan-Boltzmann : $P = \varepsilon S \sigma T^4$ avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ et $\varepsilon < 1$
 - à 400 K, $P = 0,15 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$
 - Souvent négligeable pour l'électronique de puissance
- Conduction
 - transfert de chaleur dans la matière
 - $P = -\frac{\lambda S}{e} \Delta T$, $\lambda = 20 \dots 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 - Pour une piste en cuivre avec $e = 100 \mu\text{m}$, $S = 1 \text{ cm}^2$ et $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 400 \text{ W}$
- Convection
 - Déplacement de matière
 - Pas d'expression simple (convection forcée, naturelle, type d'écoulements...)

Mécanismes de transport de la chaleur

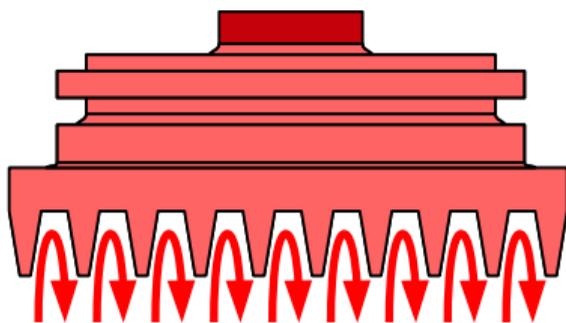


- Rayonnement
 - Loi de Stefan-Boltzmann : $P = \varepsilon S \sigma T^4$ avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ et $\varepsilon < 1$
 - à 400 K, $P = 0,15 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$
 - Souvent négligeable pour l'électronique de puissance
- Conduction
 - transfert de chaleur dans la matière
 - $P = -\frac{\lambda S}{e} \Delta T$, $\lambda = 20 \dots 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 - Pour une piste en cuivre avec $e = 100 \mu\text{m}$, $S = 1 \text{ cm}^2$ et $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 400 \text{ W}$
- Convection
 - Déplacement de matière
 - Pas d'expression simple (convection forcée, naturelle, type d'écoulements...)



Mécanismes de transport de la chaleur

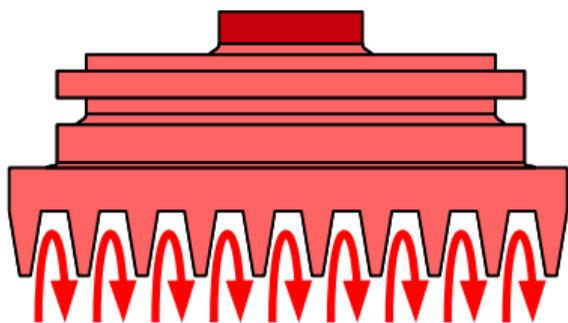
- Rayonnement
 - Loi de Stefan-Boltzmann : $P = \epsilon S \sigma T^4$ avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ et $\epsilon < 1$
 - à 400 K, $P = 0,15 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$
 - Souvent négligeable pour l'électronique de puissance
- Conduction
 - transfert de chaleur dans la matière
 - $P = -\frac{\lambda S}{e} \Delta T$, $\lambda = 20 \dots 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 - Pour une piste en cuivre avec $e = 100 \mu\text{m}$, $S = 1 \text{ cm}^2$ et $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 400 \text{ W}$
- Convection
 - Déplacement de matière
 - Pas d'expression simple (convection forcée, naturelle, type d'écoulements. . .)



Mécanismes de transport de la chaleur

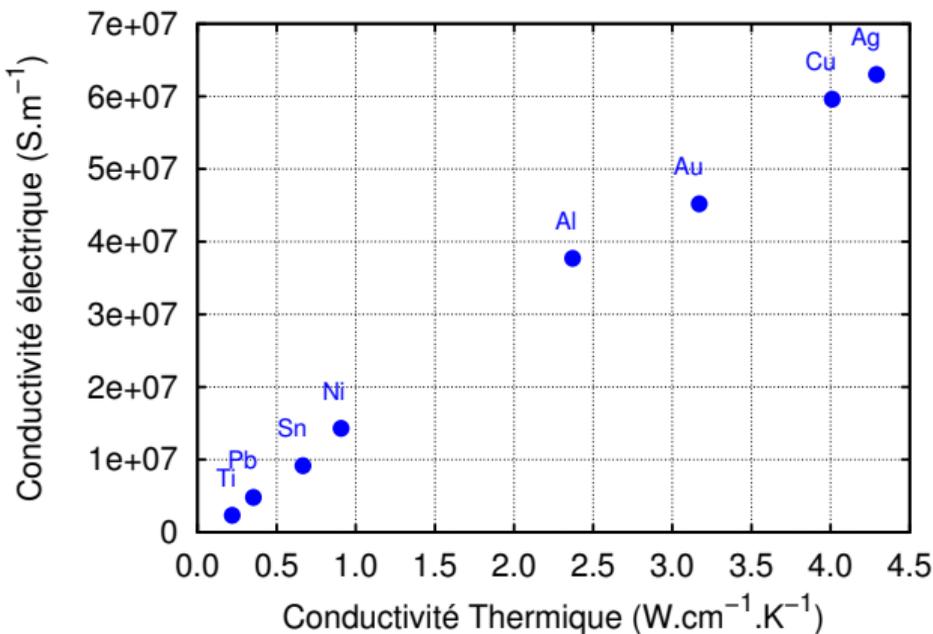


- Rayonnement
 - Loi de Stefan-Boltzmann : $P = \epsilon S \sigma T^4$ avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ et $\epsilon < 1$
 - à 400 K, $P=0,15 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$
 - Souvent négligeable pour l'électronique de puissance
- Conduction
 - transfert de chaleur dans la matière
 - $P = -\frac{\lambda S}{e} \Delta T$, $\lambda = 20 \dots 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 - Pour une piste en cuivre avec $e=100 \mu\text{m}$, $S=1 \text{ cm}^2$ et $\Delta T=1 \text{ }^\circ\text{C}$, $P=400 \text{ W}$
- Convection
 - Déplacement de matière
 - Pas d'expression simple (convection forcée, naturelle, type d'écoulements. . .)



La gestion thermique en électronique repose sur deux mécanismes : conduction et convection

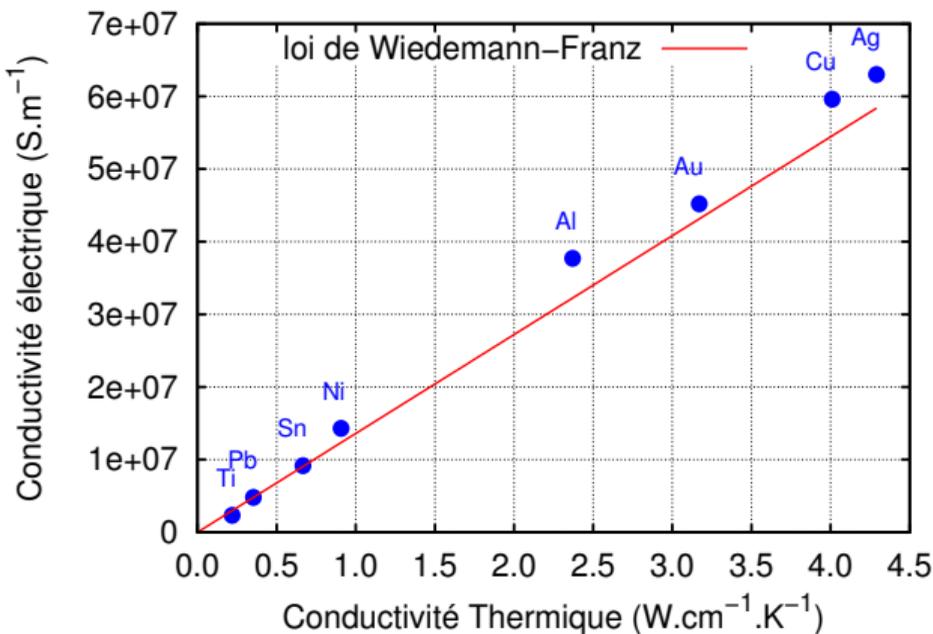
Relation entre conductivités thermique et électrique



cond. thermique $\lambda = \lambda_e + \lambda_p$

- λ_e : porteurs de charges (électrons)
 $\lambda_e = LT\sigma$ (Wiedemann-Franz)
- λ_p : phonons
(vibrations du réseau atomique)

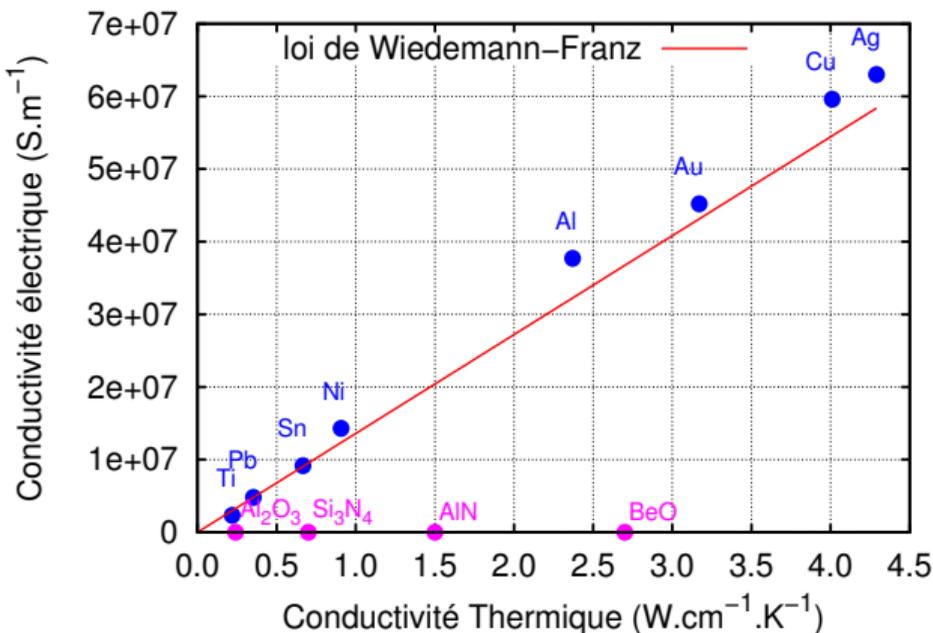
Relation entre conductivités thermique et électrique



cond. thermique $\lambda = \lambda_e + \lambda_p$

- λ_e : porteurs de charges (électrons)
 $\lambda_e = LT\sigma$ (Wiedemann-Franz)
- λ_p : phonons
(vibrations du réseau atomique)

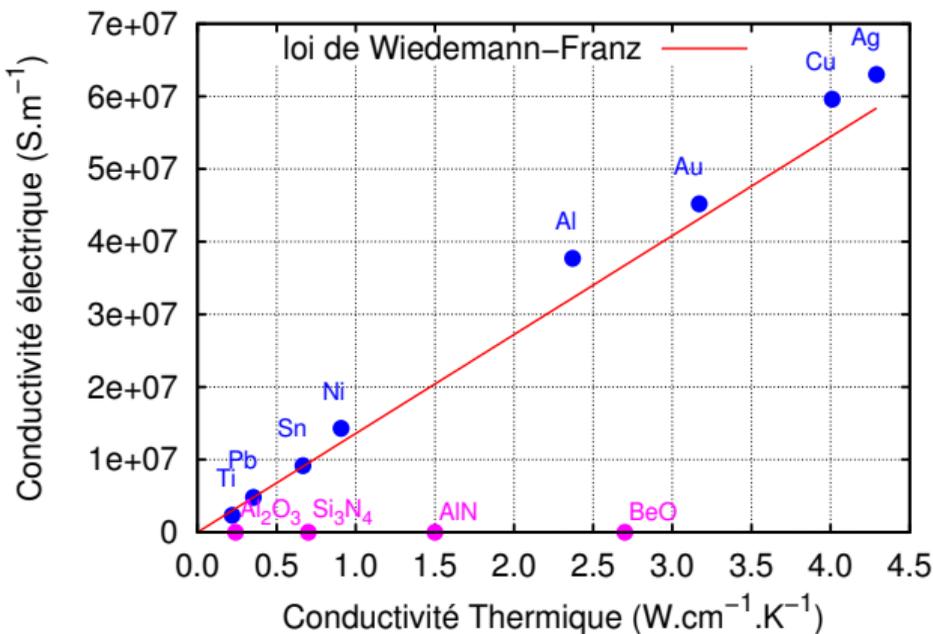
Relation entre conductivités thermique et électrique



cond. thermique $\lambda = \lambda_e + \lambda_p$

- λ_e : porteurs de charges (électrons)
 $\lambda_e = LT\sigma$ (Wiedemann-Franz)
- λ_p : phonons
(vibrations du réseau atomique)

Relation entre conductivités thermique et électrique



cond. thermique $\lambda = \lambda_e + \lambda_p$

- λ_e : porteurs de charges (électrons)
 $\lambda_e = LT\sigma$ (Wiedemann-Franz)
- λ_p : phonons
(vibrations du réseau atomique)

→ Les matériaux bons conducteurs thermiques/isolants électriques sont rares (diamant, AlN, Si₃N₄, Al₂O₃)

Isolants/conducteurs électrique/thermique

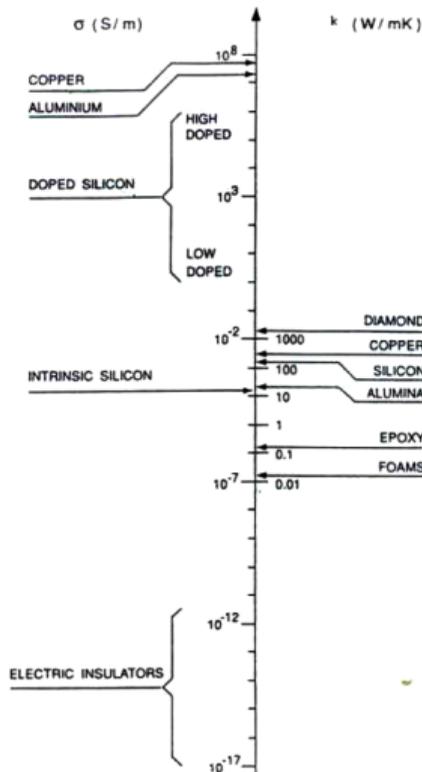
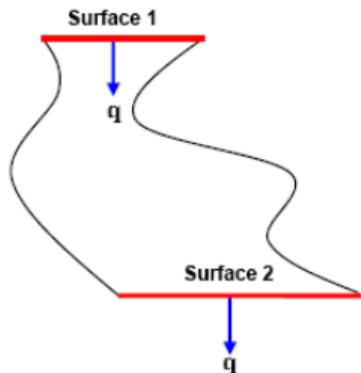


Figure 1: Comparison between electrical and thermal conductivities

Source : Heat Spreading : not a trivial issue, C. Lansance, ECPE Workshop on advanced cooling, 20–21 November, Delft.

- la conductivité électrique peut varier de plus de 20 décades
 - le courant passe dans les conducteurs et pas à côté !
 - La représentation circuit est bien adaptée
- Pour la conductivité thermique, c'est 4 à 5 décades
 - Approximation circuit utilisable avec précautions

Représentation circuit thermique

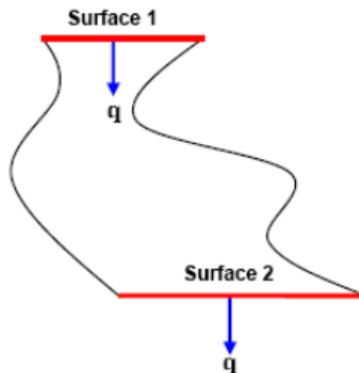


On peut définir une R_{Th} entre 1 et 2 si :

- Les surfaces 1 et 2 sont isothermes
- Un flux thermique identique traverse les deux surfaces (conservation)

Source : Heat Spreading : not a trivial issue, C. Lansance, ECPE Workshop on advanced cooling, 20–21 November, Delft.

Représentation circuit thermique



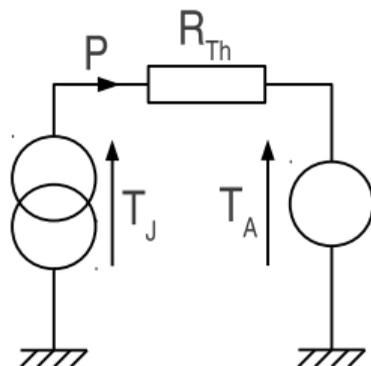
On peut définir une R_{Th} entre 1 et 2 si :

- Les surfaces 1 et 2 sont isothermes
- Un flux thermique identique traverse les deux surfaces (conservation)

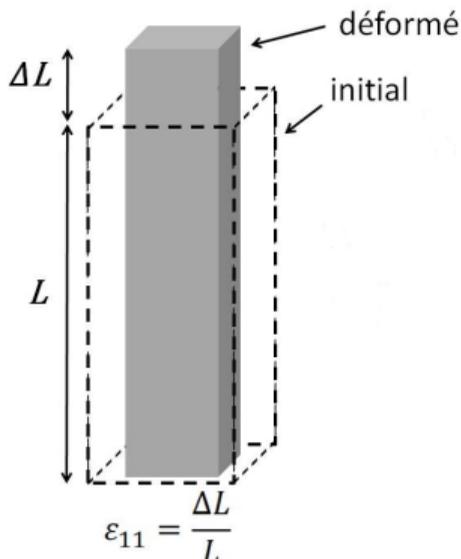
Source : Heat Spreading : not a trivial issue, C. Lansance, ECPE Workshop on advanced cooling, 20–21 November, Delft.

On peut alors définir une représentation circuit

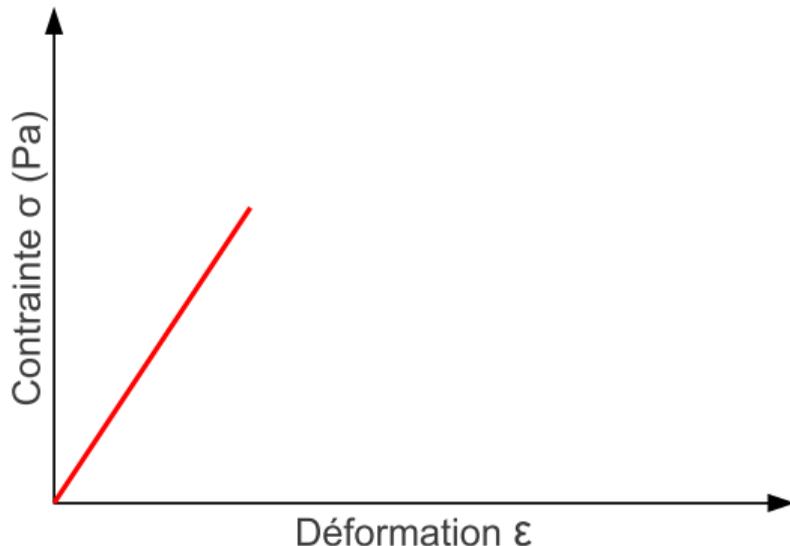
- Les températures sont des efforts (tensions)
- Les puissances dissipées des flux (courants)
- $T_J = T_A + R_{Th} \times P$



Un peu de mécanique...

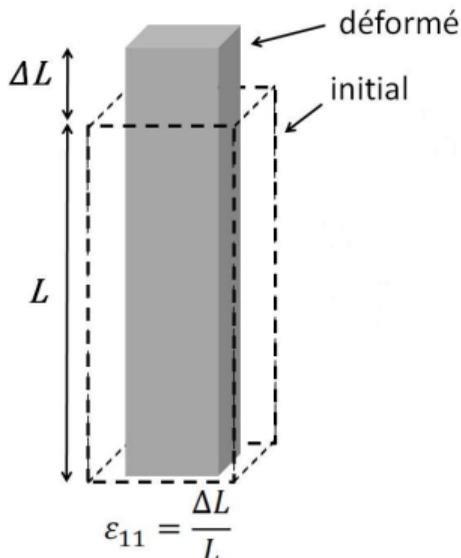


Source : thèse L. Pietranico,
<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00543040/fr/>

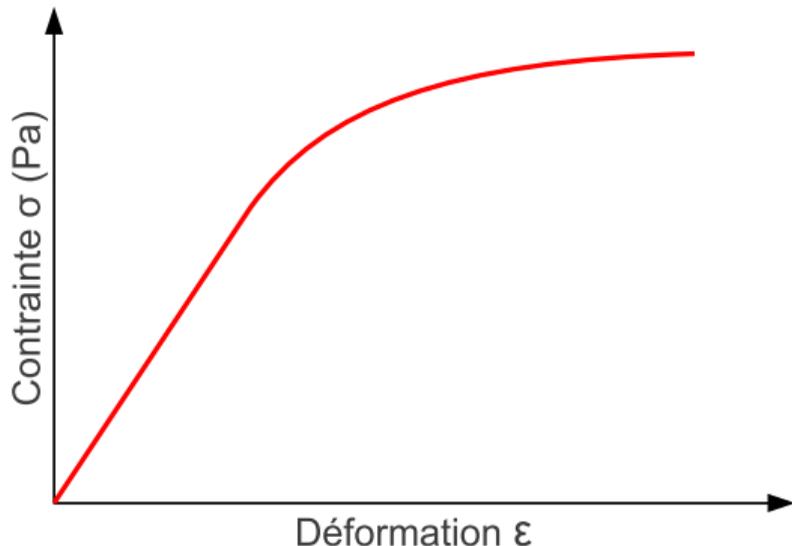


- Déformation élastique (réversible)
- Déformation plastique (irréversible)
- Apparition d'une déformation résiduelle
- Accumulation de la déformation menant à la rupture

Un peu de mécanique...

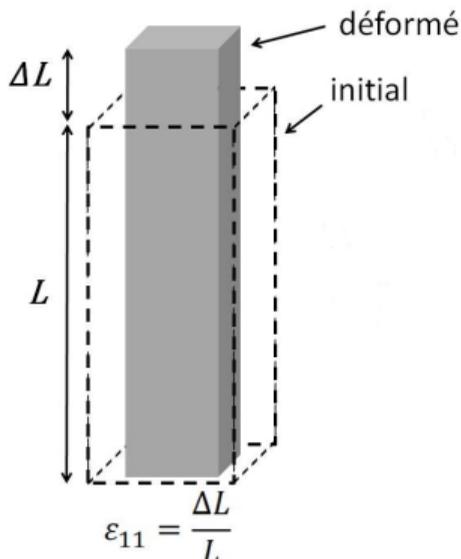


Source : thèse L. Pietranico,
<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00543040/fr/>

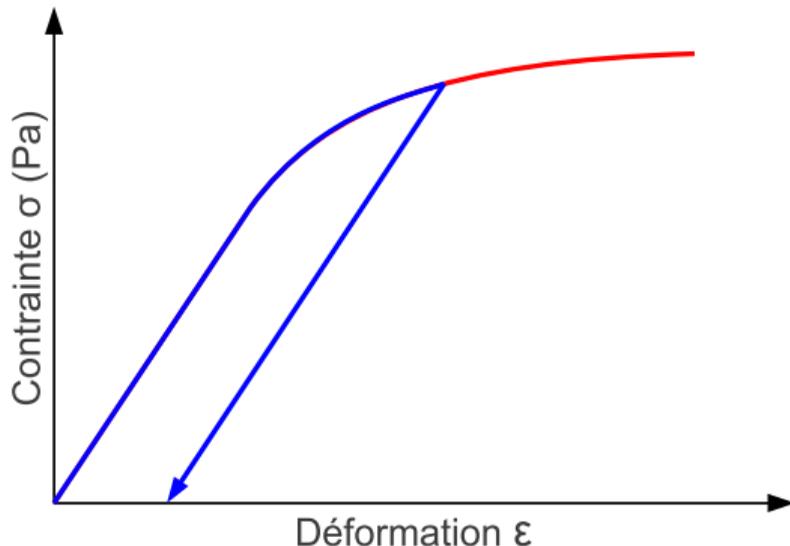


- Déformation élastique (réversible)
- Déformation plastique (irréversible)
- Apparition d'une déformation résiduelle
- Accumulation de la déformation menant à la rupture

Un peu de mécanique...

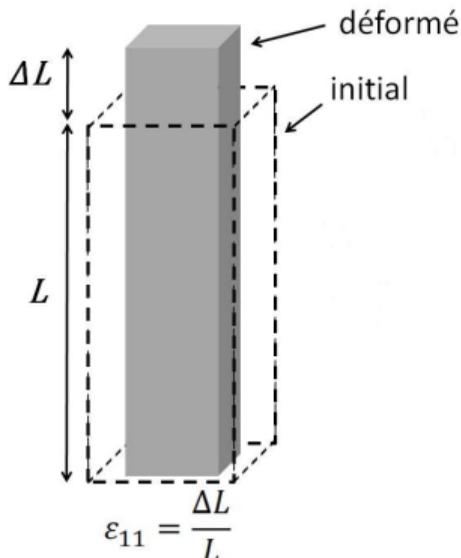


Source : thèse L. Pietranico,
<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00543040/fr/>

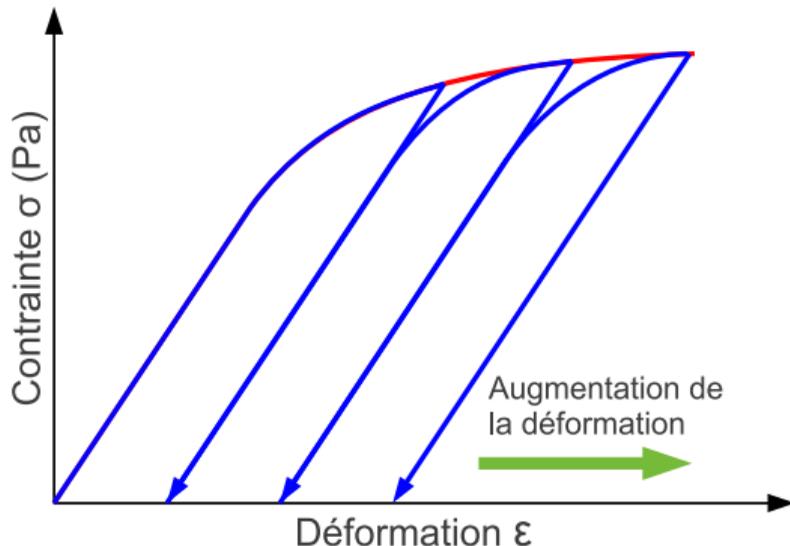


- Déformation élastique (réversible)
- Déformation plastique (irréversible)
- Apparition d'une déformation résiduelle
- Accumulation de la déformation menant à la rupture

Un peu de mécanique...

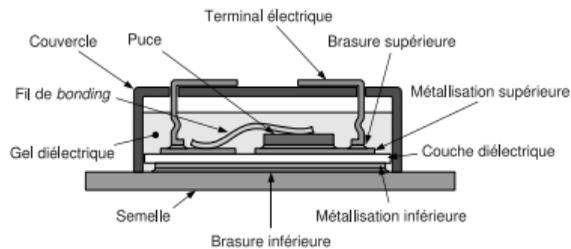


Source : thèse L. Pietranico,
<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00543040/fr/>



- Déformation élastique (réversible)
- Déformation plastique (irréversible)
- Apparition d'une déformation résiduelle
- Accumulation de la déformation menant à la rupture

Effet des coefficients de dilatation

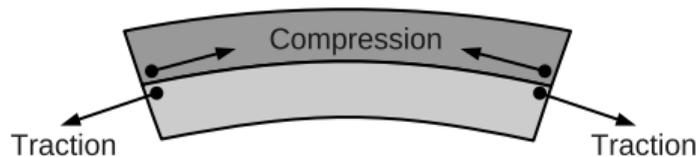


- α en ppm/K
- $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- la température génère des contraintes mécaniques

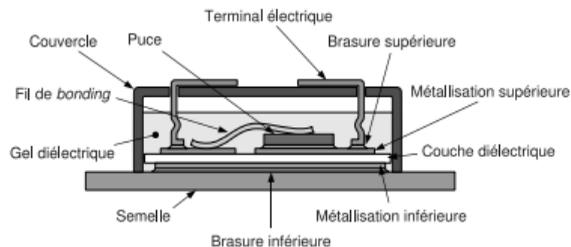
Température de repos T_1



$T_2 > T_1$

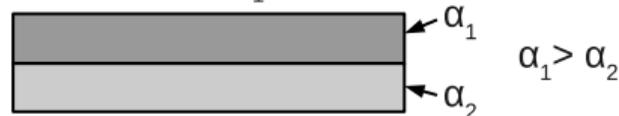


Effet des coefficients de dilatation

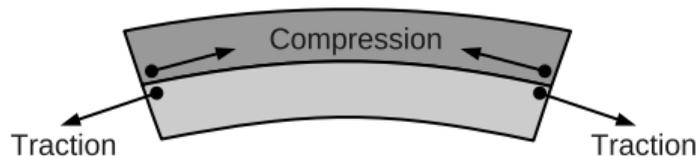


- α en ppm/K
- $3 \cdot 10^{-6} < \alpha < 20 \cdot 10^{-6} K^{-1}$
- la température génère des contraintes mécaniques

Température de repos T_1



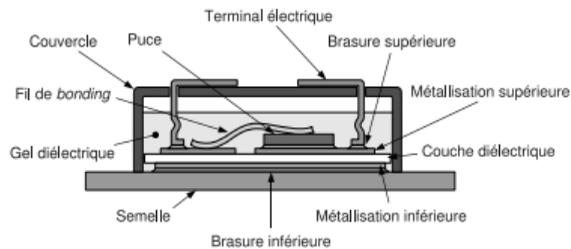
$T_2 > T_1$



Fonctionnement cyclique



Effet des coefficients de dilatation

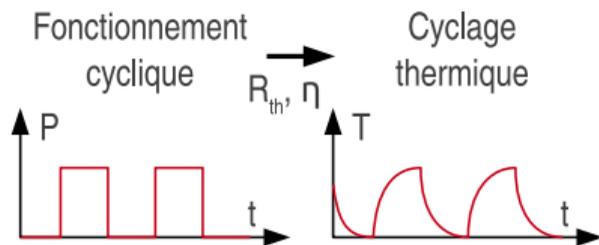
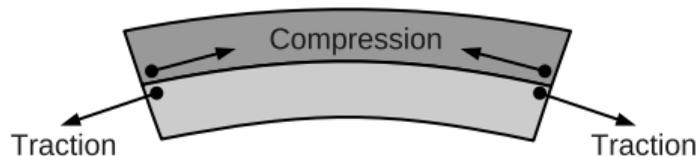


- α en ppm/K
- $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- la température génère des contraintes mécaniques

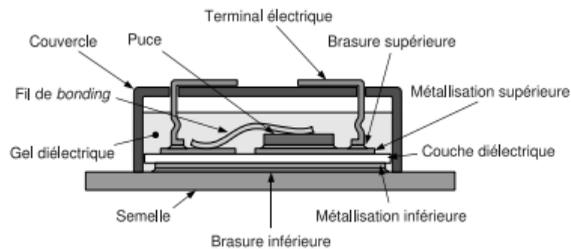
Température de repos T_1



$T_2 > T_1$



Effet des coefficients de dilatation

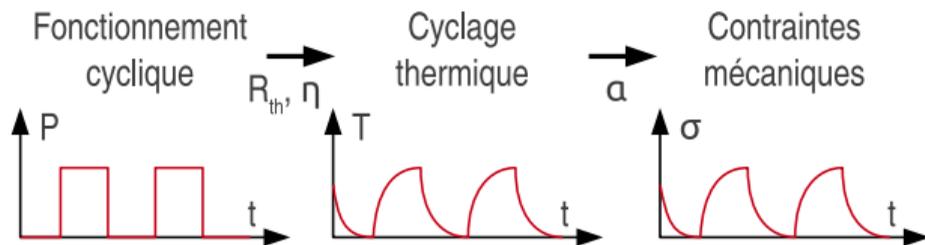
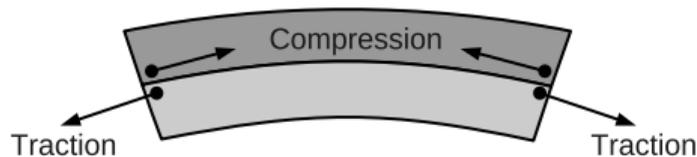


- α en ppm/K
- $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- la température génère des contraintes mécaniques

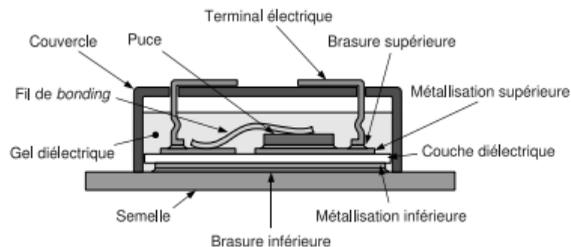
Température de repos T_1



$T_2 > T_1$



Effet des coefficients de dilatation

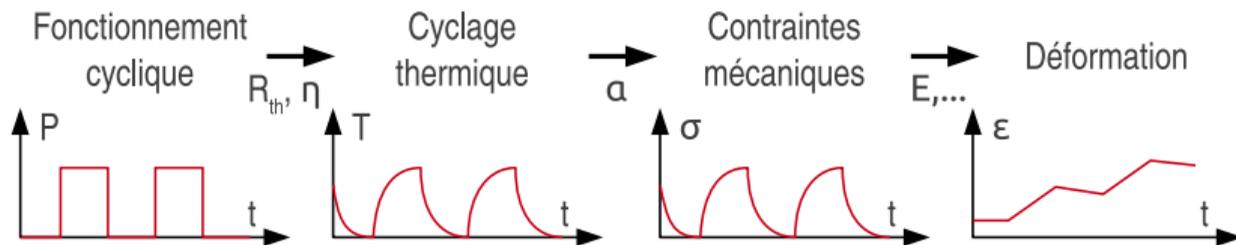
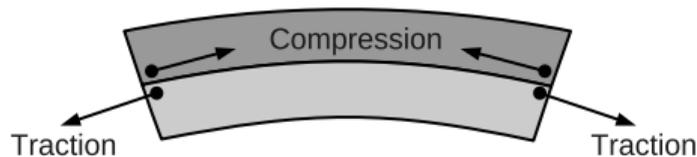


- α en ppm/K
- $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- la température génère des contraintes mécaniques

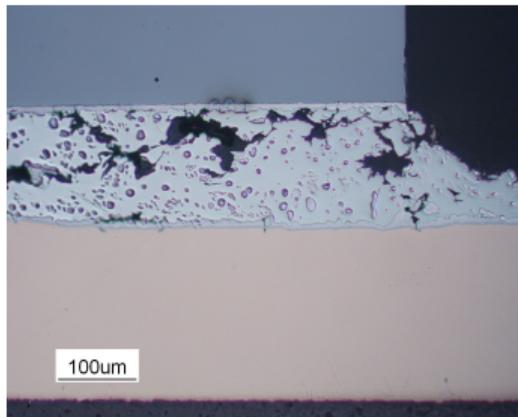
Température de repos T_1



$T_2 > T_1$



Effet des contraintes thermo-mécaniques

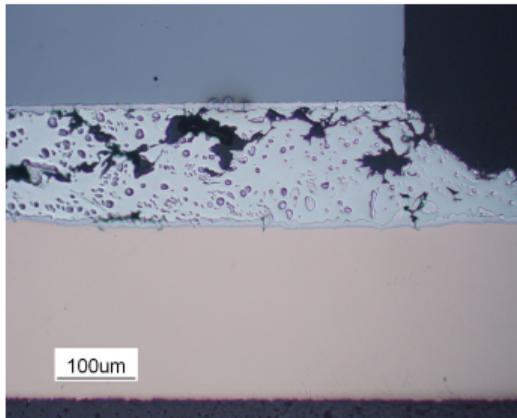


Source : Université de Nottingham

Brasure puce-substrat

- Puce en silicium (3 ppm/K)
- Conducteur en cuivre (17 ppm/K)
- Brasure tendre concentrant la fatigue

Effet des contraintes thermo-mécaniques



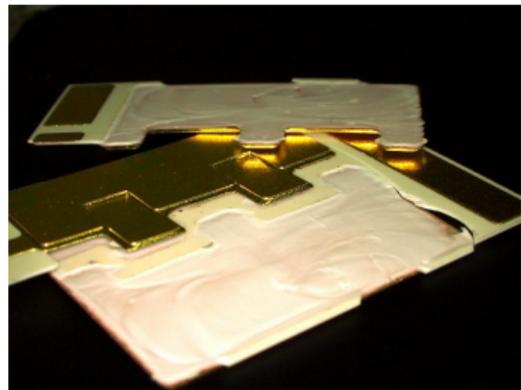
Source : Université de Nottingham

Brasure puce-substrat

- Puce en silicium (3 ppm/K)
- Conducteur en cuivre (17 ppm/K)
- Brasure tendre concentrant la fatigue

Substrat céramique métallisé

- Conducteur en cuivre (17 ppm/K)
- Substrat céramique (6 ppm/K)
- Fissuration « conchoïdale » de la céramique



Source : Université de Nottingham

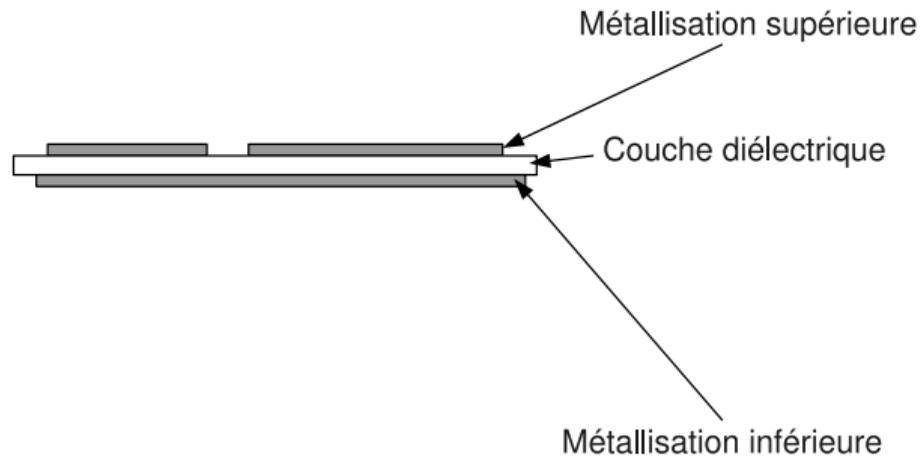
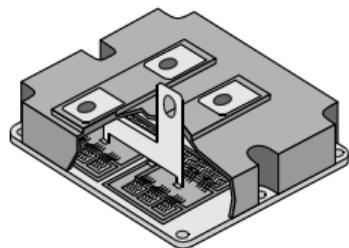
Technologie de *packaging*

Sommaire

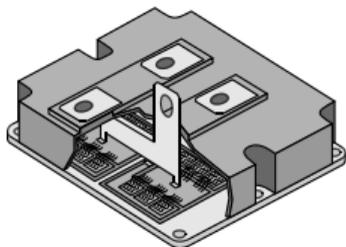
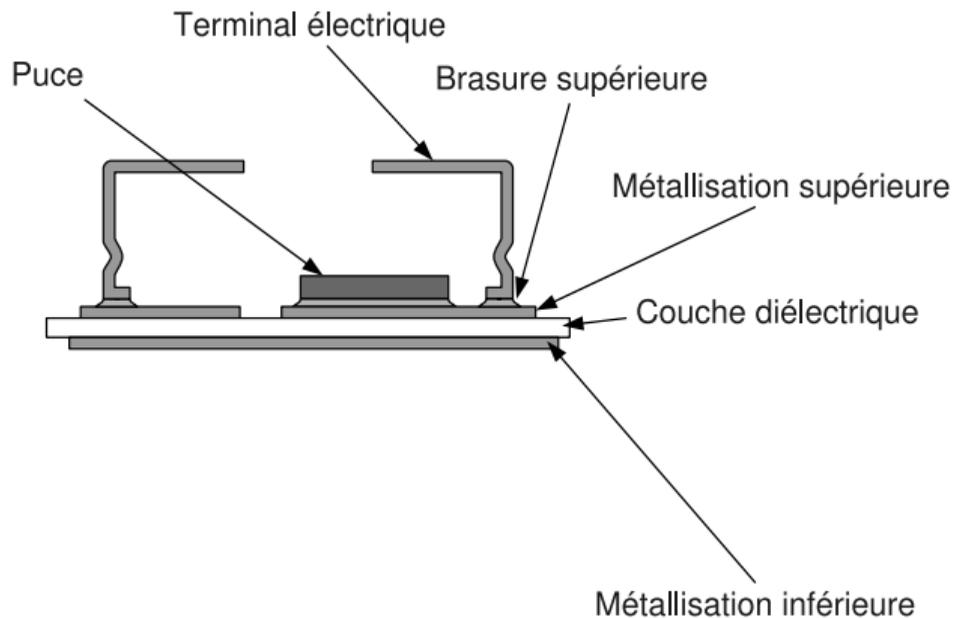


- 1 Pour commencer...
- 2 Petit lexique du packaging de puissance
- 3 Considérations physiques
- 4 Technologie de *packaging*
- 5 Gestion thermique des composants
- 6 Évolutions, Recherche et Développement

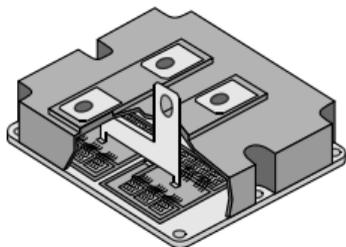
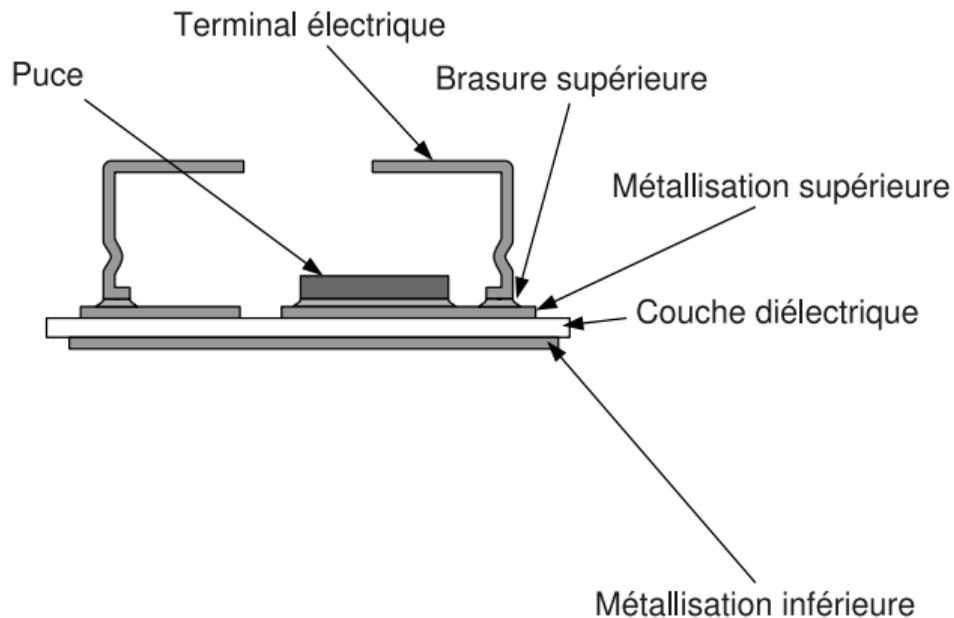
Coupe d'un module de puissance



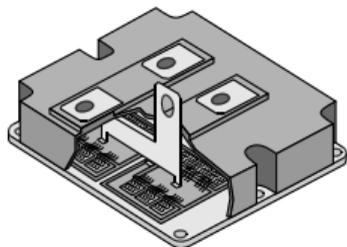
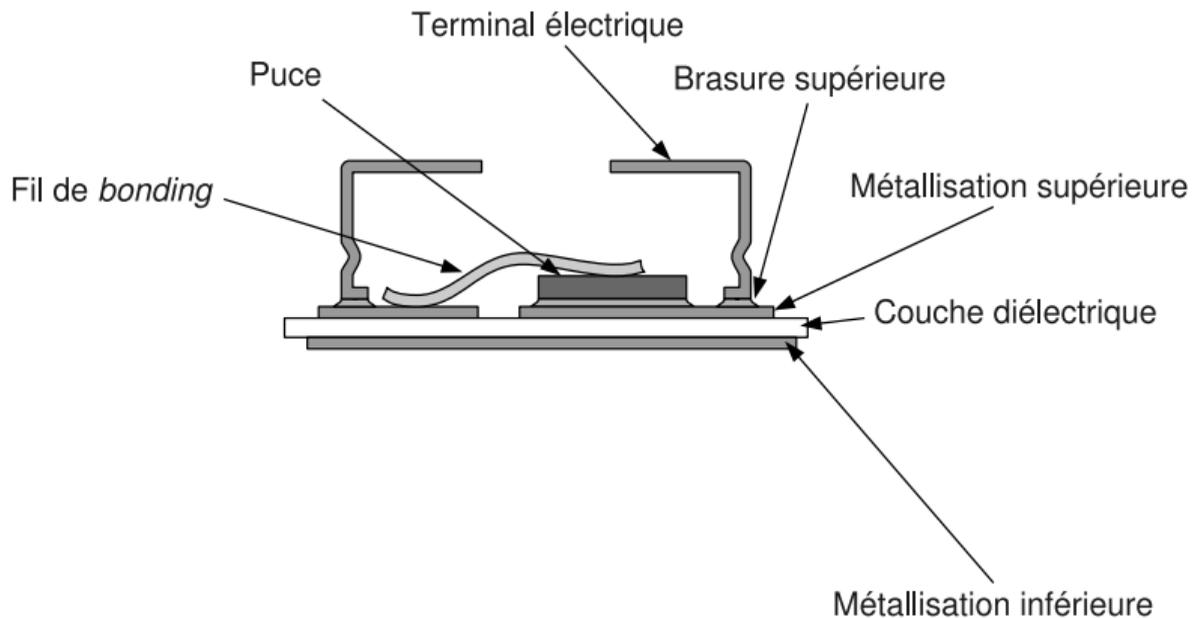
Coupe d'un module de puissance



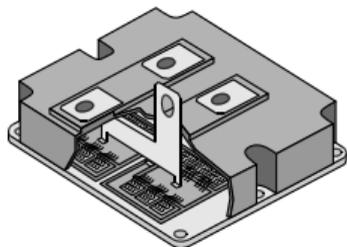
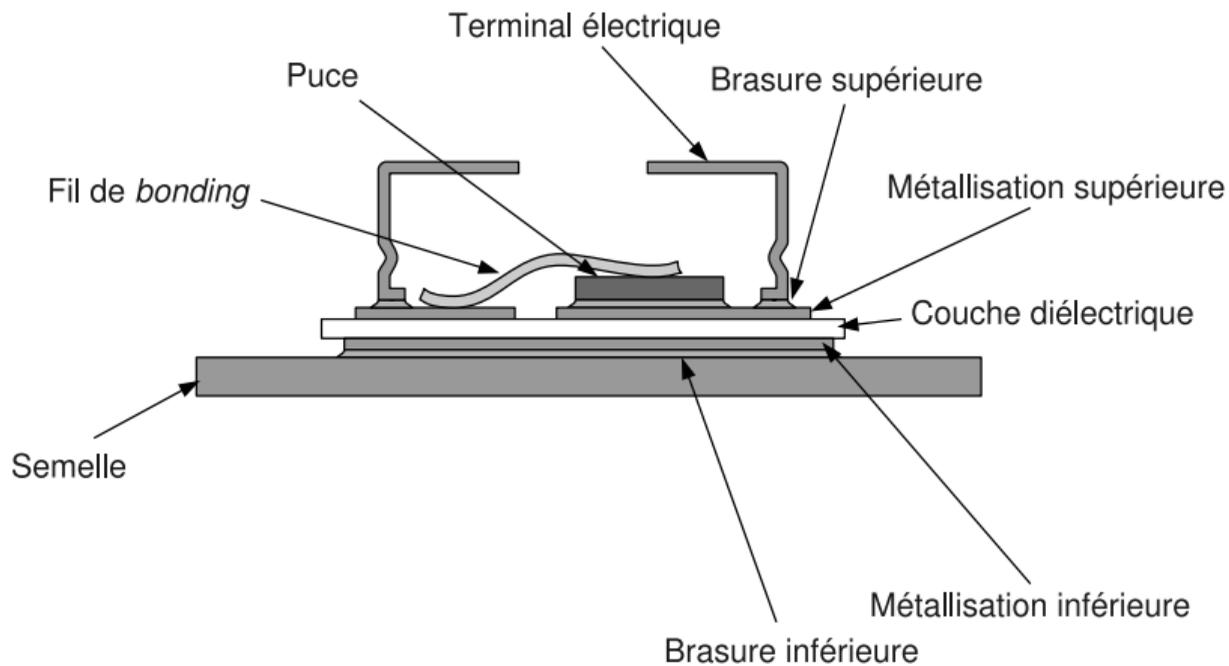
Coupe d'un module de puissance



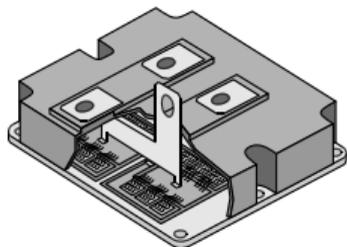
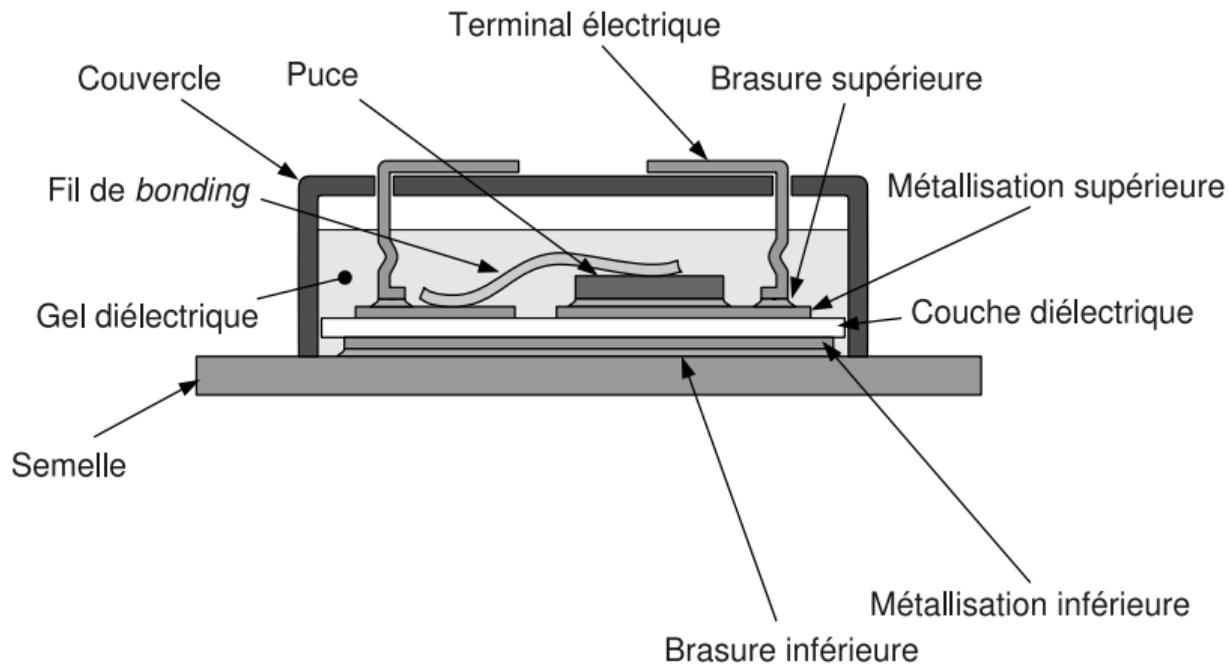
Coupe d'un module de puissance



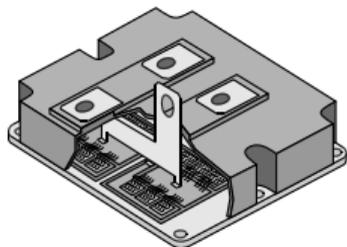
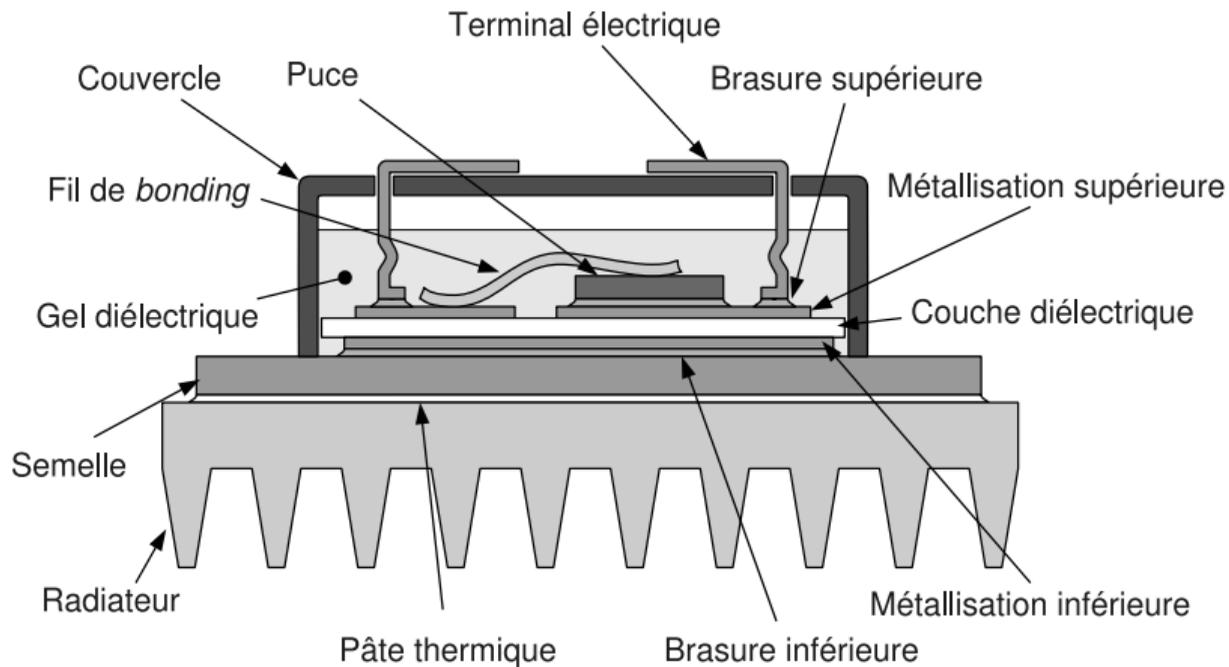
Coupe d'un module de puissance



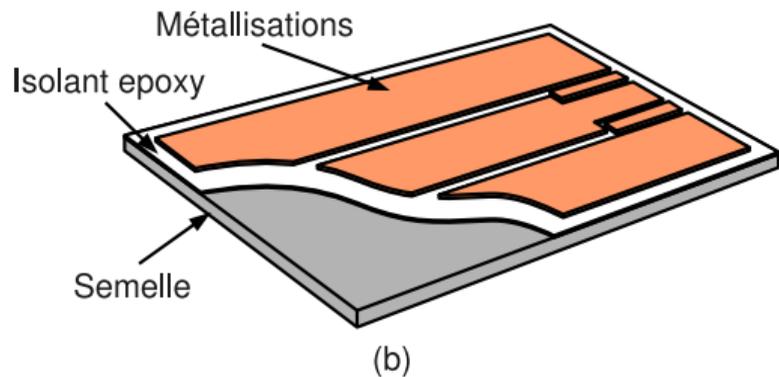
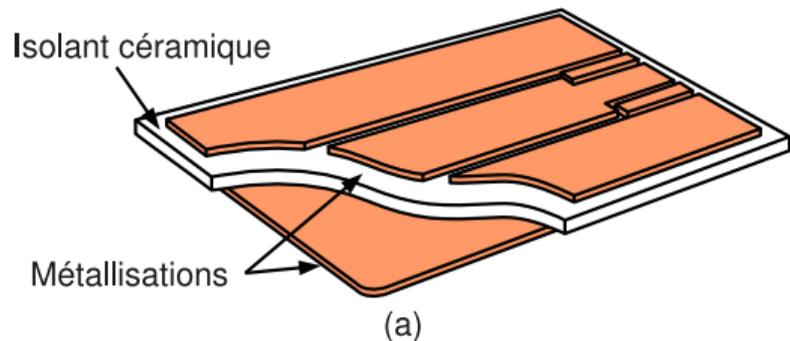
Coupe d'un module de puissance



Coupe d'un module de puissance



Substrats isolés

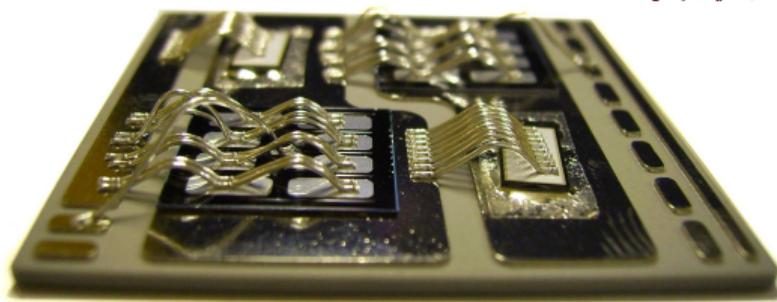


Plusieurs technologies :

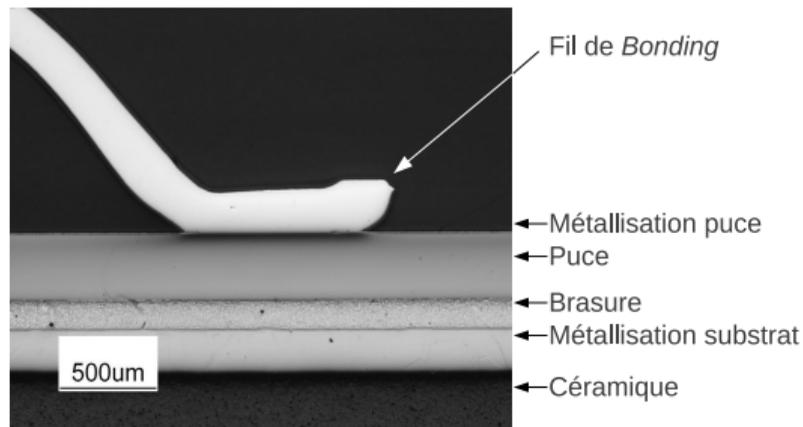
- Les substrats céramiques (DBC, DBA, ...)
 - Céramique (0,3 à 1 mm)
 - Cuivre (0,1 à 0,3 mm)
 - Bonnes performances thermiques et électriques
 - Cher
- Les Substrats Métalliques Isolés (SMI)
 - Aluminium (1 à 3 mm)
 - Isolant organique (0,1 mm)
 - Cuivre (0,035 à 0,2 mm)
 - Performances moyennes
 - Coef. de dilatation plus fort
 - Moins cher

Fils de *bonding*

- Fils épais (100 à 400 μm), en aluminium
- Mise en parallèle pour réduire la résistance
- Soudure ultrasonique (faible échauffement)
- Évolutions vers les fils de cuivre, les rubans. . .



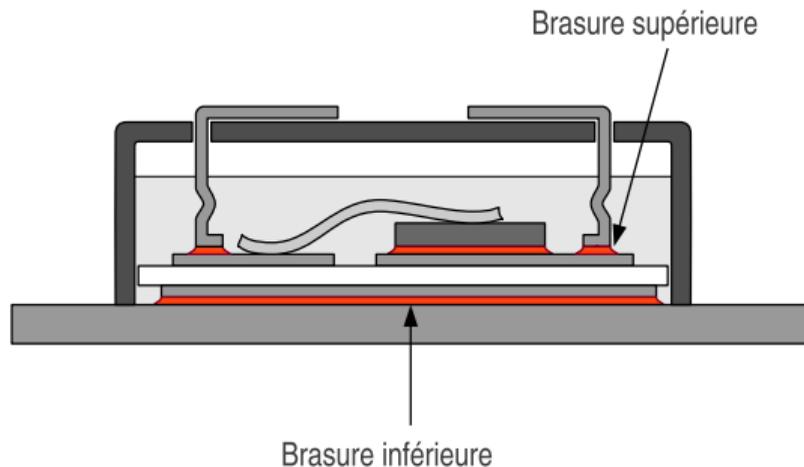
Source : Université Nottingham



Source : Université Nottingham

Les brasures

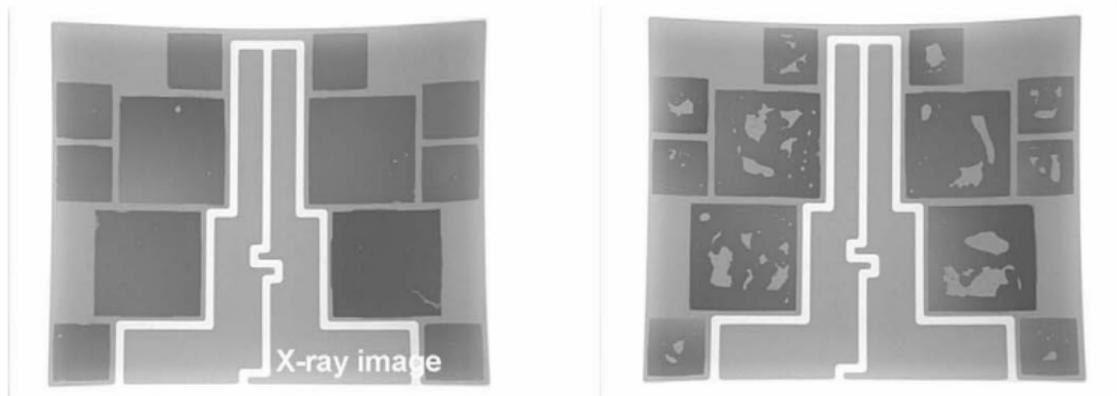
- Brasures réalisées au four
- Utilisation de pâte à braser, de *preforms*
- Nombreux alliages disponibles
- Tendance au “sans plomb” (RoHS)
- Habituellement deux étapes de brasure :
 - Puces et connecteurs sur substrat
 - Substrat sur semelle



Les brasures – problème des vides



Formic Acid atmosphere prior reflow versus non



Formic Acid atmosphere prior reflow

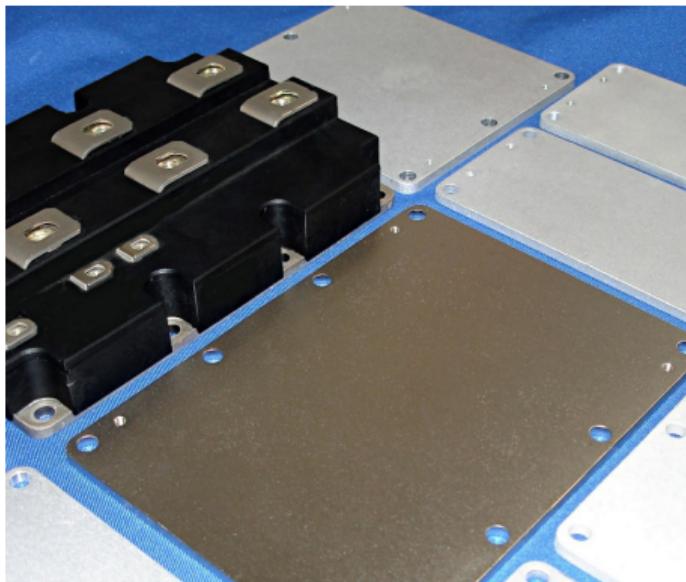
non Formic Acid atmosphere

Source : Reflow Soldering Technology for large die area Power Electronics, Matthias Hutter, Microcar, Leipzig, 21 juin 2005

Risque de vacuoles sur les brasures de grande surface :

- Augmentation de la résistance thermique, apparition de points chauds
- Peut être réduit par utilisation d'atmosphères spécifiques durant le process (vide, gaz actifs...)

Semelle



Source : <http://www.alsic.com>

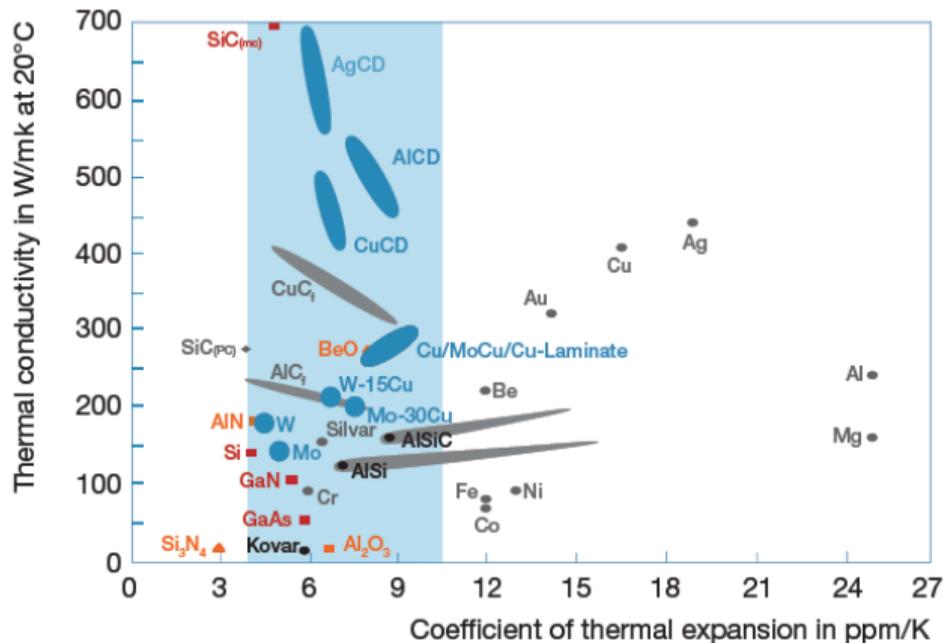
Rôles :

- Support mécanique
 - Boulonnage sur radiateur
 - Brasure des substrats
- Gestion thermique
 - faible résistance substrat-radiateur
 - étalement de la chaleur

Critères :

- Poids
- Conductivité thermique
- Coût
- Coefficient de dilatation

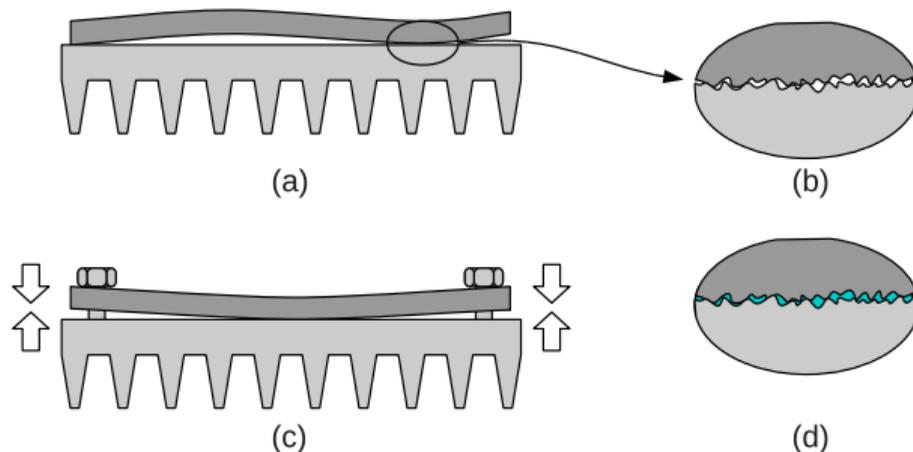
Semelle – Choix des matériaux



Source : Packaging Materials, J. Popović-Gerber, ECPE tutorial on power electronics packaging, Lyon, 31/05/2011

- Les matériaux composites permettent de fixer le coefficient de dilatation
- L'AlSiC est couramment utilisé dans les transports

Matériaux d'interface thermique



La “pâte thermique”

- Interface semelle/radiateur
- Comble les vides
- Mauvais conducteur thermique ! (1 W/m.K contre 400 pour le cuivre !)

D'autres technologies existent pour les Thermal Interface Materials (TIM)

Matériaux d'interface thermique



Fig. 3: Cleaning of the screen print template



Fig. 4: Alignment of the module



Fig. 5: Blade squeezing

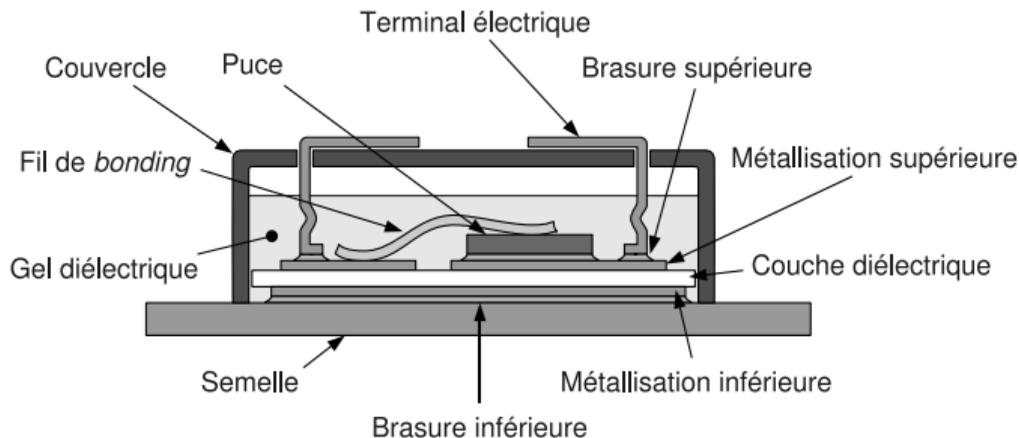


Fig. 6: Print image after blade squeezing

Exemple : contrôle de l'épaisseur de pâte thermique

Source : Thermal Interface Materials, J. Popović-Gerber, ECPE tutorial on power electronics packaging, Lyon, 31/05/2011

Et le reste ?



Nombreux autres éléments non discutés ici !

- Les matériaux d'encapsulation (gels, résines)
- Les boîtiers (plastiques, hermétiques, . . .)
- Les terminaux (brasés, pressés, intégrés. . .)
- L'environnement plus éloigné (second level packaging)

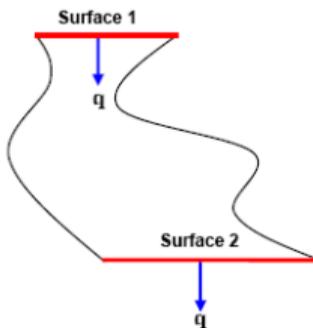
Gestion thermique des composants

Sommaire



- 1 Pour commencer...
- 2 Petit lexique du packaging de puissance
- 3 Considérations physiques
- 4 Technologie de *packaging*
- 5 Gestion thermique des composants
- 6 Évolutions, Recherche et Développement

Résistance thermique

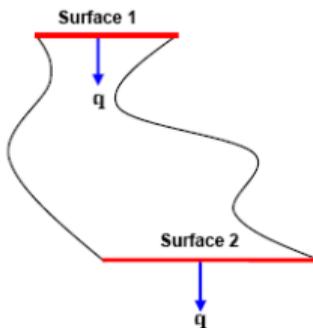


Source : Heat Spreading : not a trivial issue, C. Lansance, ECPE Workshop on advanced cooling, 20-21 November, Delft.

On peut définir une R_{Th} entre 1 et 2 si :

- Les surfaces 1 et 2 sont isothermes
- Le flux thermique traversant les deux surfaces est constant

Résistance thermique



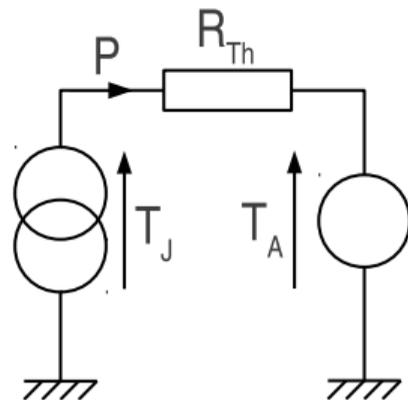
Source : Heat Spreading : not a trivial issue, C. Lansance, ECPE Workshop on advanced cooling, 20-21 November, Delft.

On peut définir une R_{Th} entre 1 et 2 si :

- Les surfaces 1 et 2 sont isothermes
- Le flux thermique traversant les deux surfaces est constant

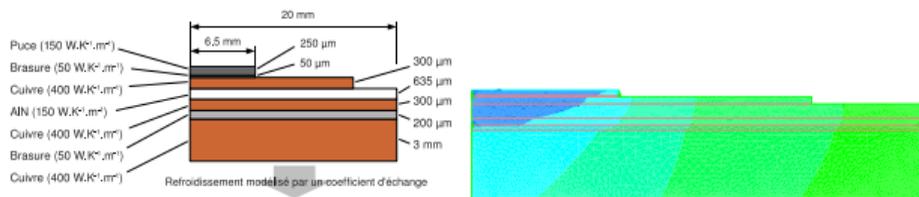
On peut alors définir une représentation circuit

- Les températures sont des efforts (tensions)
- Les puissances dissipées des flux (courants)
- $T_J = T_A + R_{Th} \times P$



Calcul de la résistance thermique

- À partir des données “**matériau**” :
 - Si hypothèse 1-D acceptable : $R_{Th} = \frac{l}{\lambda S}$
 λ conductivité thermique, l longueur et S section
 - Si géométrie complexe, plusieurs matériaux : calcul numérique

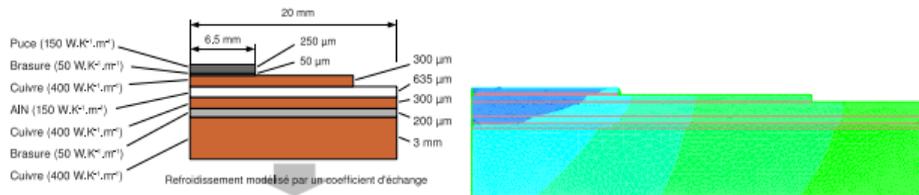


- À partir des **données constructeur** :
 - Prendre les différentes valeurs de R_{Th} et les additionner
 - R_{ThJC} : résistance thermique “**junction-to-case**” (composant)
 - R_{ThCA} : résistance thermique “**case-to-ambient**” (radiateur)
 - R_{ThJA} : résistance thermique “**junction-to-ambient**” (totale)
 - Attention au domaine d'application de la modélisation circuit (cf diapo précédente) !

Calcul de la résistance thermique

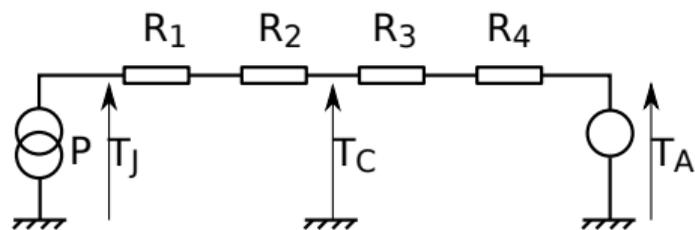
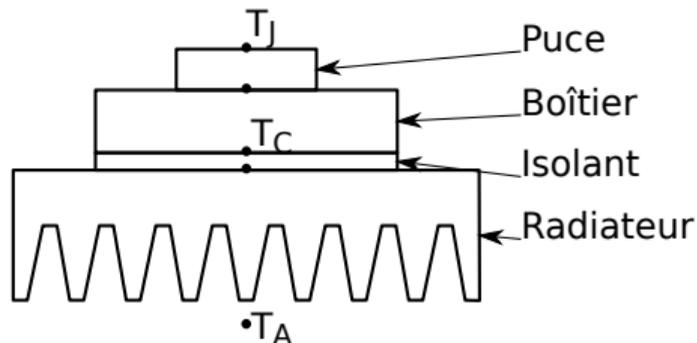


- À partir des données “**matériau**” :
 - Si hypothèse 1-D acceptable : $R_{Th} = \frac{l}{\lambda S}$
 λ conductivité thermique, l longueur et S section
 - Si géométrie complexe, plusieurs matériaux : calcul numérique



- À partir des **données constructeur** :
 - Prendre les différentes valeurs de R_{Th} et les additionner
 - $R_{Th_{JC}}$: résistance thermique “**junction-to-case**” (composant)
 - $R_{Th_{CA}}$: résistance thermique “**case-to-ambient**” (radiateur)
 - $R_{Th_{JA}}$: résistance thermique “**junction-to-ambient**” (totale)
 - Attention au domaine d'application de la modélisation circuit (cf diapo précédente) !

Résistance thermique des empilements



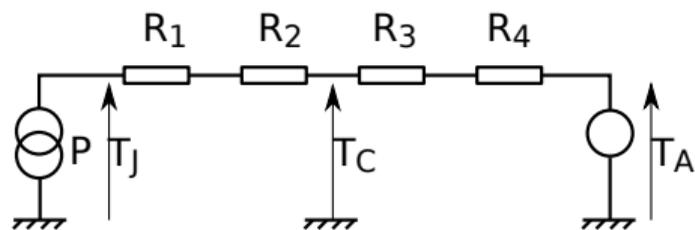
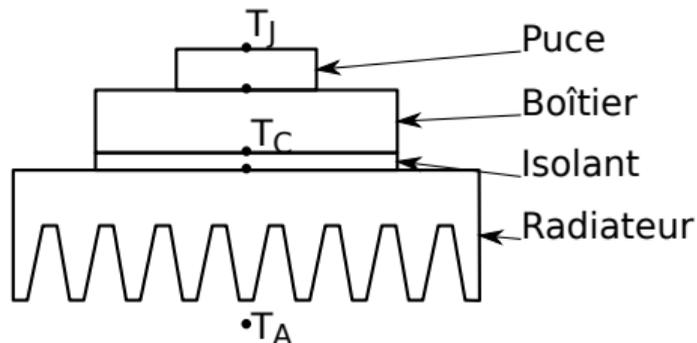
Si on peut considérer que les interfaces sont **isothermes** :

- $R_{Th_{total}} = \sum R_i$
- Attention, R_4 inclut la R_{Th} du radiateur et la convection d'air
- $R_{Th_{JC}} = R_1 + R_2$
- $R_{Th_{JA}} = R_{Th_{JC}} + R_3 + R_4$

Application numérique

- diode IDP30E120 :
 $R_{Th_{JC}} = 0,9^\circ\text{C/W}$, 10W dissipés
- radiateur 5°C/W , $T_A = 50^\circ\text{C}$
- isolant 1°C/W
- $T_J = T_A + R_{Th_{JA}} P = 119^\circ\text{C}$

Résistance thermique des empilements



Si on peut considérer que les interfaces sont **isothermes** :

- $R_{Th_{total}} = \sum R_i$
- Attention, R_4 inclut la R_{Th} du radiateur et la convection d'air
- $R_{Th_{JC}} = R_1 + R_2$
- $R_{Th_{JA}} = R_{Th_{JC}} + R_3 + R_4$

Application numérique

- diode IDP30E120 :
 $R_{Th_{JC}} = 0,9^\circ\text{C/W}$, 10W dissipés
- radiateur 5°C/W , $T_A = 50^\circ\text{C}$
- isolant 1°C/W
- $T_J = T_A + R_{Th_{JA}} P = 119^\circ\text{C}$

Équation de la chaleur

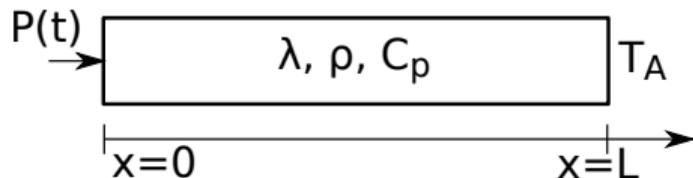


Équation de la chaleur 1-D :

$$\rho C_p \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}$$

Conditions aux limites :

$$S \cdot \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -P(t); T(t, x = L) = T_a$$



- S section du barreau (m^2)
- C_p chaleur spécifique (J/K/kg)
- ρ densité (kg/m^3)

Équation de la chaleur



Équation de la chaleur 1-D :

$$\rho C_p \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}$$

Conditions aux limites :

$$S \cdot \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = -P(t); T(t, x = L) = T_a$$

Discrétisation de l'équation :

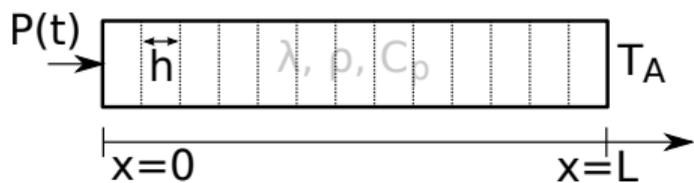
$$\rho C_p \frac{\partial T_i(t)}{\partial t} = \lambda \frac{T_{i+1}(t) + T_{i-1}(t) - 2T_i(t)}{h^2}$$

$$h S \rho C_p \frac{\partial T_i(t)}{\partial t} = \lambda S \frac{T_{i+1}(t) - T_i(t)}{h} - \lambda S \frac{T_i(t) - T_{i-1}(t)}{h}$$



- S section du barreau (m^2)
- C_p chaleur spécifique ($J/K/kg$)
- ρ densité (kg/m^3)

Équation de la chaleur – suite

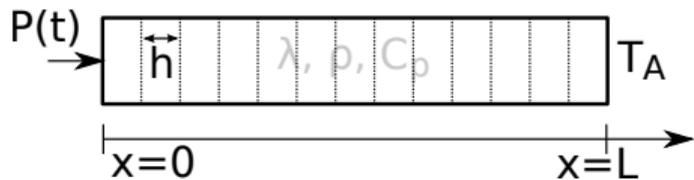


$$hS\rho C_p \frac{\partial T_i(t)}{\partial t} = \lambda S \frac{T_{i+1}(t) - T_i(t)}{h} - \lambda S \frac{T_i(t) - T_{i-1}(t)}{h}$$

On pose $hS\rho C_p = C_{Th}$ et $\frac{h}{\lambda S} = R_{Th}$ d'où :

$$C_{Th} \frac{\partial T_i(t)}{\partial t} = \frac{T_{i+1}(t) - T_i(t)}{R_{Th}} - \frac{T_i(t) - T_{i-1}(t)}{R_{Th}}$$

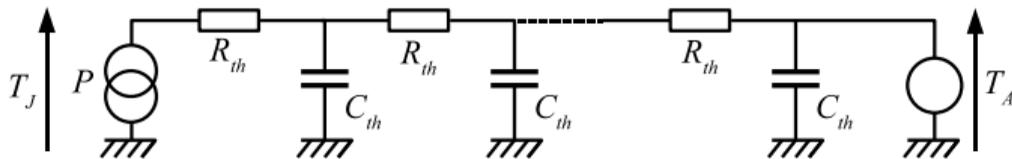
Équation de la chaleur – suite



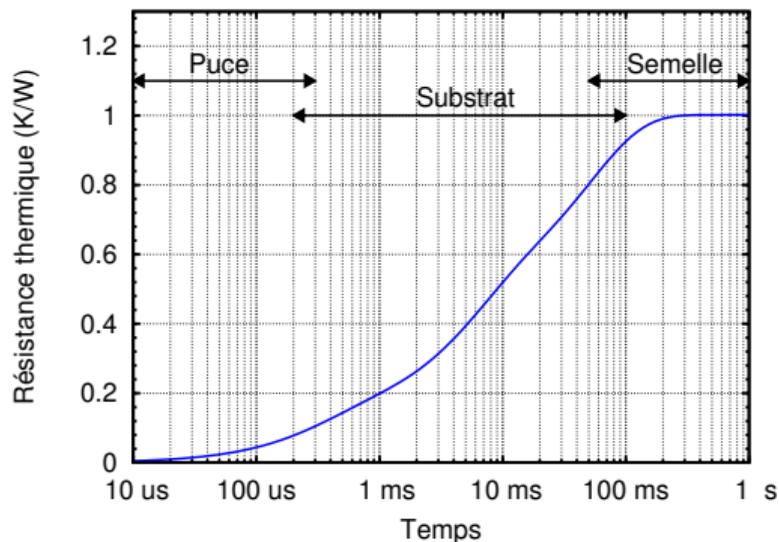
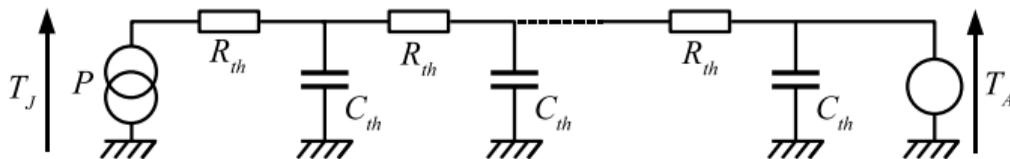
$$hS\rho C_p \frac{\partial T_i(t)}{\partial t} = \lambda S \frac{T_{i+1}(t) - T_i(t)}{h} - \lambda S \frac{T_i(t) - T_{i-1}(t)}{h}$$

On pose $hS\rho C_p = C_{Th}$ et $\frac{h}{\lambda S} = R_{Th}$ d'où :

$$C_{Th} \frac{\partial T_i(t)}{\partial t} = \frac{T_{i+1}(t) - T_i(t)}{R_{Th}} - \frac{T_i(t) - T_{i-1}(t)}{R_{Th}}$$



Impédance thermique



Extension de la résistance thermique au régime dynamique :

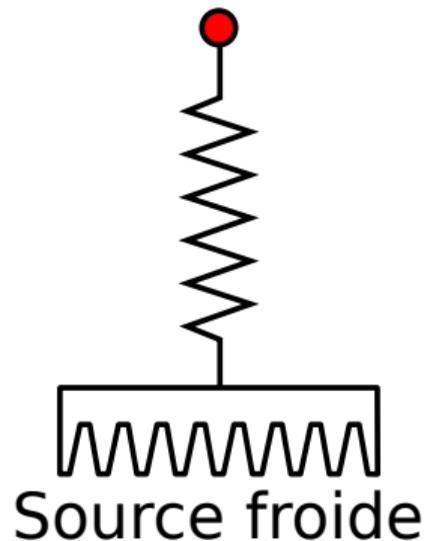
- Mêmes conditions (conservation du flux, surfaces isothermes)
- Aux courtes échelles de temps, fonctionnement propagatif
- En régime permanent, on retrouve la résistance thermique

Circuit de refroidissement

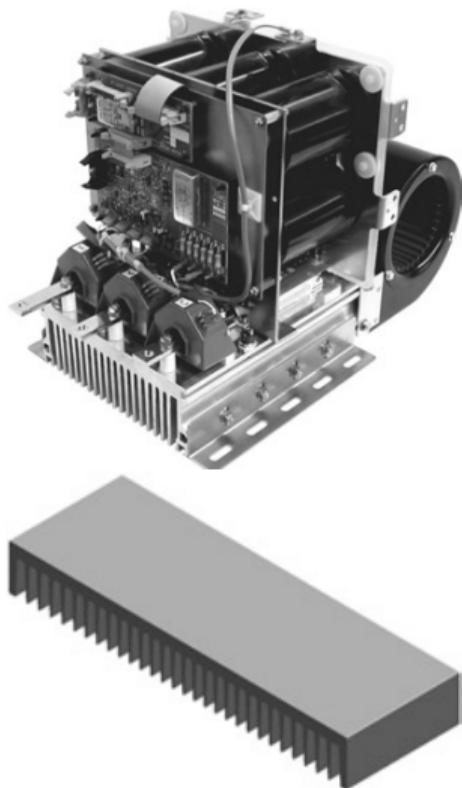
Transfert de chaleur d'une ou plusieurs **sources chaudes vers l'extérieur du système**

- extérieur = air ambiant (sauf rares cas)
- circuit plus ou moins compliqué :
 - composant attaché à un radiateur
 - composant/circuit d'eau/radiateur
 - composant/caloduc/radiateur
 - composant immergé/radiateur
 - ...
- Intérêt des circuits plus complexes :
 - éloignement source chaude/source froide
 - diminution des densités de puissance

Source chaude



Radiateur



Objectif : augmenter la **surface d'échange** avec le milieu ambiant

- bon conducteur thermique : cuivre ou aluminium (plus courant)
- souvent anodisé noir pour améliorer l'émissivité (transfert radiatif)
- tôle emboutie (très faibles puissances), ou profilé extrudé
- peut-être associé à un ventilateur pour améliorer le **coefficient d'échange**

Efficacité des méthodes de refroidissement

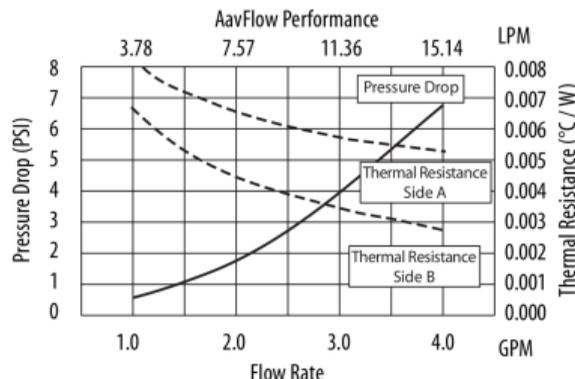
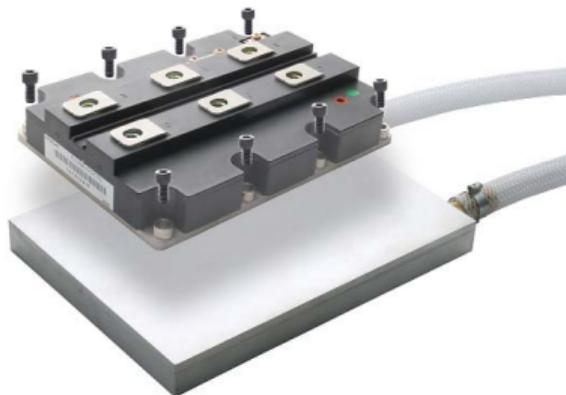


Tableau 5 – Valeurs de h selon le mode de refroidissement

Mode de refroidissement	Fluide	h (W · m ⁻² · K ⁻¹)
Convection naturelle	Gaz	5 à 30
	Eau	100 à 1 000
Convection forcée	Gaz	10 à 300
	Eau	300 à 12 000
Changement de phase	Ébullition	3 000 à 60 000
	Condensation	5 000 à 110 000

- Résistance thermique de transfert convectif : $R_{Th} = \frac{1}{h \times S}$, avec h coefficient d'échange et S surface d'échange
- Systèmes liquides beaucoup plus efficaces
- Convection forcée : utilisation de pompes, de ventilateurs. . .
- pour réduire R_{Th} , on peut augmenter S (ailettes, doigts, etc)

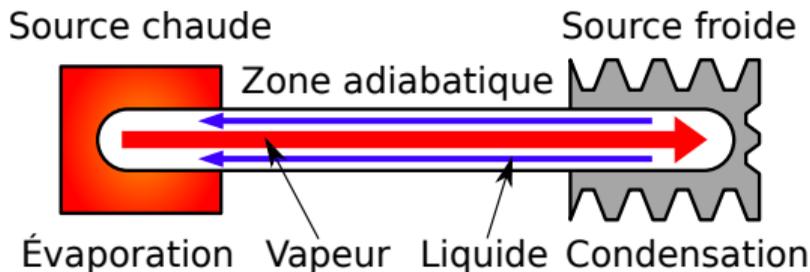
Refroidissement liquide



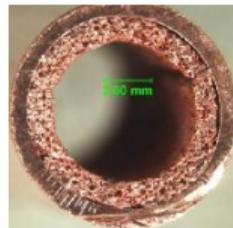
Source : Aavid Thermalloy, [AavFlow Liquid Cold Plates](#)

- Circuit comprenant :
 - Plaque(s) à eau
 - Tuyauterie, pompe
 - Échangeur eau-air
- R_{Th} de la plaque très faible
- Avantages :
 - fort effet d'étalement thermique
 - faibles dimensions au niveau du module
- inconvénients :
 - Système actif (fiabilité, rendement)
 - Pas plus compact globalement

Caloducs

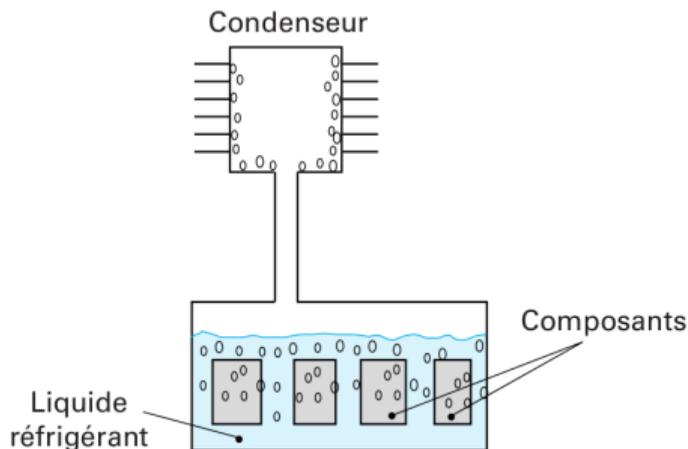


- Transport convectif + changement de phase
- Système passif et étanche
- Déplacement du liquide : capillarité
- relativement indépendant de la longueur
- Attention aux non-linéarités (assèchement, température max. . .)



Source : photographies Diemunsch, séminaire ECPE "Cooling and PCB", Delft, 2008

Refroidissement par immersion



- Courant pour les transformateurs (réseaux d'énergie électrique)
- Plus rare en électronique de puissance :
 - Problèmes d'utilisation de fluides à fort effet de serre/nocifs pour la couche d'ozone
 - Soucis de maintenance des cartes
 - Avantage : système passif, environnement clos

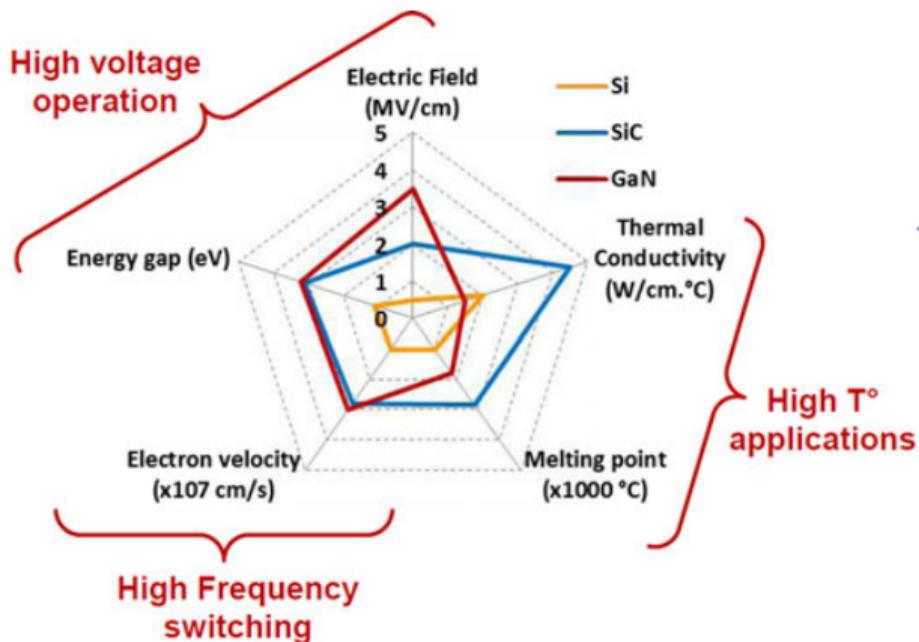
Évolutions, Recherche et Développement

Sommaire



- 1 Pour commencer...
- 2 Petit lexique du packaging de puissance
- 3 Considérations physiques
- 4 Technologie de *packaging*
- 5 Gestion thermique des composants
- 6 Évolutions, Recherche et Développement

Nouveaux semiconducteurs



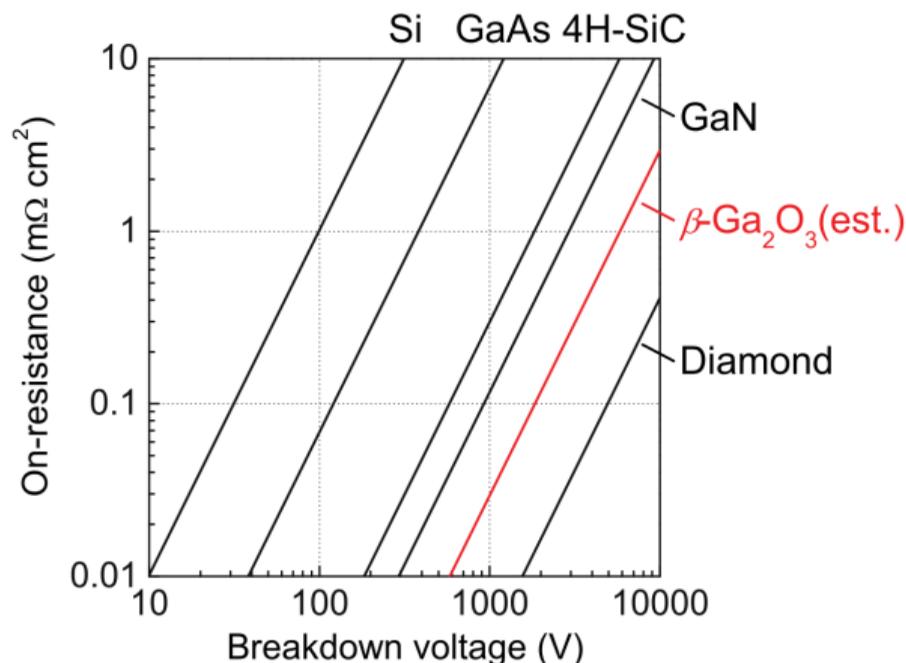
- Carbure de Silicium (SiC)
 - Introduit dans les années 2000
 - Diodes
 - Transistors MOSFET
- Nitrure de Gallium (GaN)
 - Introduit dans les années 2010
 - Transistor HeMT (proche du MOSFET)

Millán, J. et al. « A Survey of Wide Bandgap Power Semiconductor Devices » IEEE transactions on Power Electronics, 2014, 29, 2155-2163

Composants haute tension



- MOSFETs jusqu'à 10 kV démontrés en SiC
- Composants bipolaires SiC : objectif > 20 kV
- Composants très basse résistance en GaN (7 m Ω , 650 V)
- Actuellement GaN limité à < 1000 V (composants latéraux)
- Ga₂O₃ et diamant au stade labo



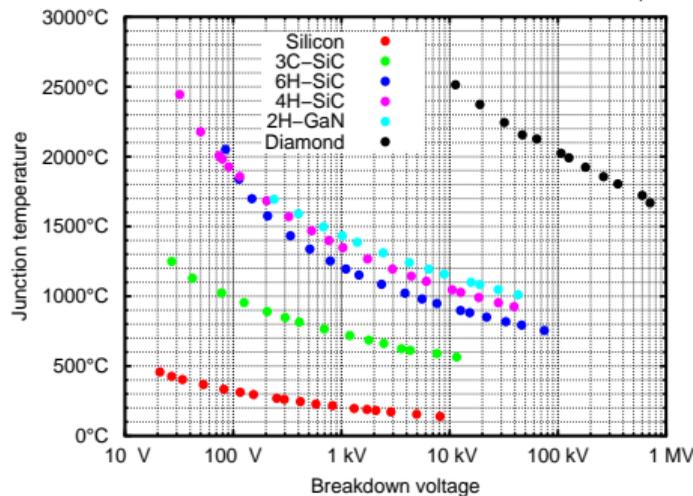
Higashiwaki, M., et al. « Yamakoshi, S. Recent progress in Ga₂O₃ power devices » Semiconductor Science and Technology, IOP Publishing, 2016, 31, 034001

Vers les hautes températures



Les semiconducteurs “grand gap” fonctionnent à plus haute temp.

- Les limites actuelles sont *packaging*
- Souvent fort cyclage thermique
- Applications
 - Aéronautique
 - Automobile
 - Forage
 - ...



Vers les hautes températures

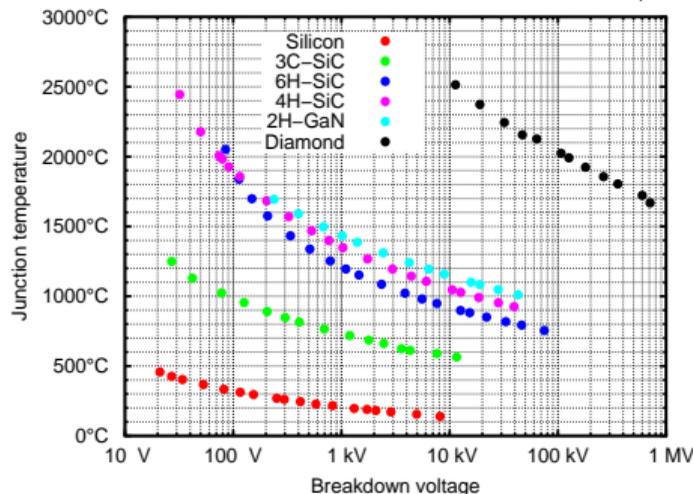


Les semiconducteurs “grand gap” fonctionnent à plus haute temp.

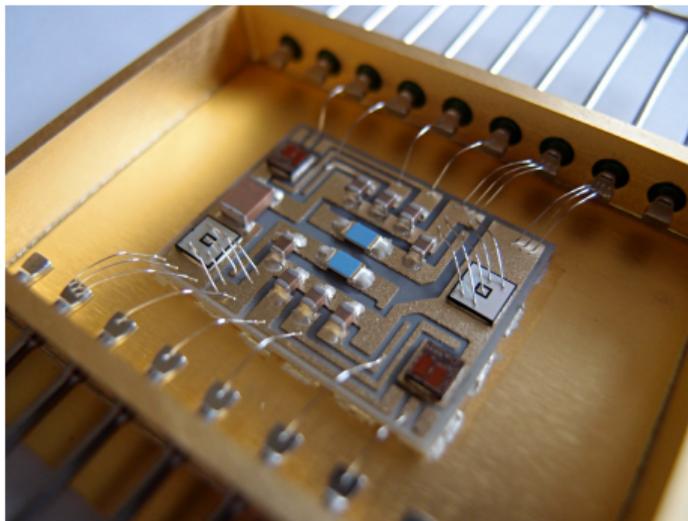
- Les limites actuelles sont *packaging*
- Souvent fort cyclage thermique
- Applications
 - Aéronautique
 - Automobile
 - Forage
 - ...

Problèmes liés au packaging :

- Fusion des brasures
- Limite des matériaux polymères (gels, passivants, boîtier plastique)
- Amplification des problèmes mécaniques dûs au cyclage

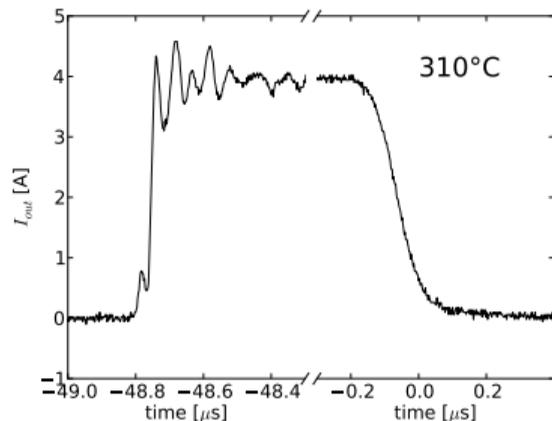
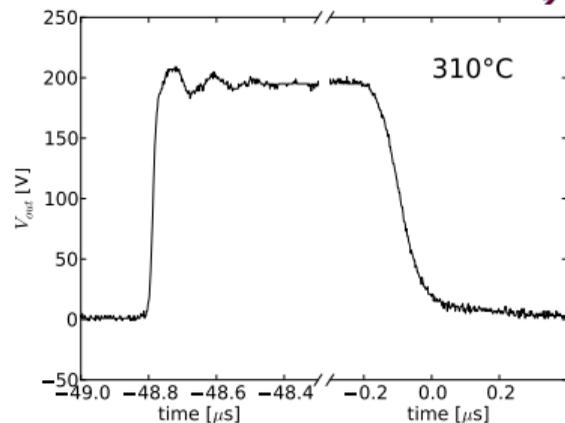


Vers les hautes températures – 2

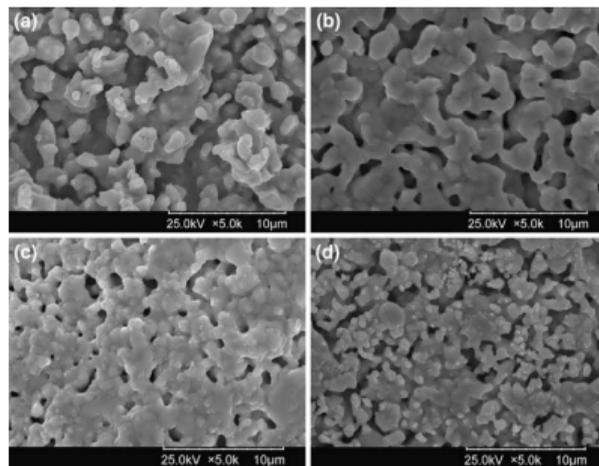
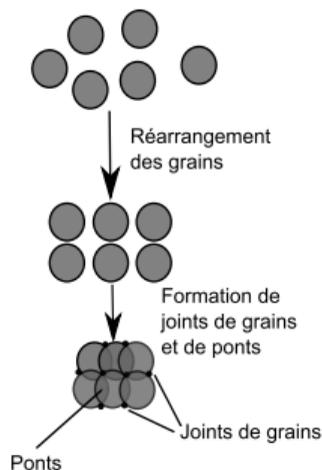


Module réalisé au lab. Ampère :

- puces *driver* intégrées
- 2 JFETs en carbure de silicium
- composants passifs haute température
- report par frittage d'argent



Vers les hautes températures – exemple des brasures

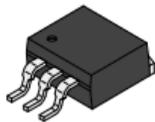
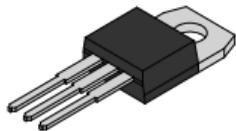


Source : Tao Wang et al., «Low-Temperature Sintering with Nano-Silver Paste in Die-Attached Interconnection», journal of electronic materials, tome 36, no 10, p. 1333–1340, 2007

Une solution : le frittage d'argent

- Pas de phase liquide durant le process ($T_F = 961\text{ °C}$, $T_{process} = 250 - 300\text{ °C}$)
- Uniquement de l'argent (non toxique, très bon conducteur)
- Procédé (un peu) plus complexe que la brasure

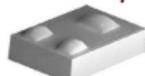
Évolution des composants discrets



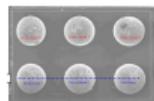
source : wikimedia commons pour tous les boîtiers sauf le Directfet, International Rectifier, et le WL-CSP, voir ci-dessous

Package type	Vol.(mm ³)	encapsulant %	silicium %	interconnexions %
DPAK	90	75	4	21
SO8 (wire)	28	6	11	
SO8 (clip)	28	70	6	22
MOSFET BGA	20	0	40	60
WL-CSP	20	0	82	18

- Disparition graduelle du packaging de premier niveau (FLP)
- Les étapes de fabrication se font directement sur le wafer, avant découpe.



FILKIP™
Vishay Schottky WL-CSP

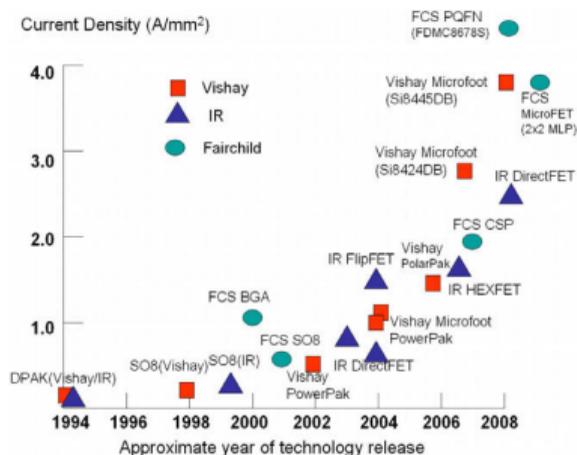


Fairchild discrete WL-CSP

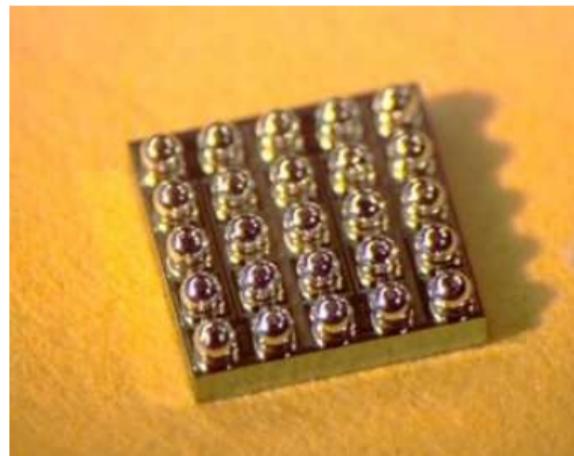
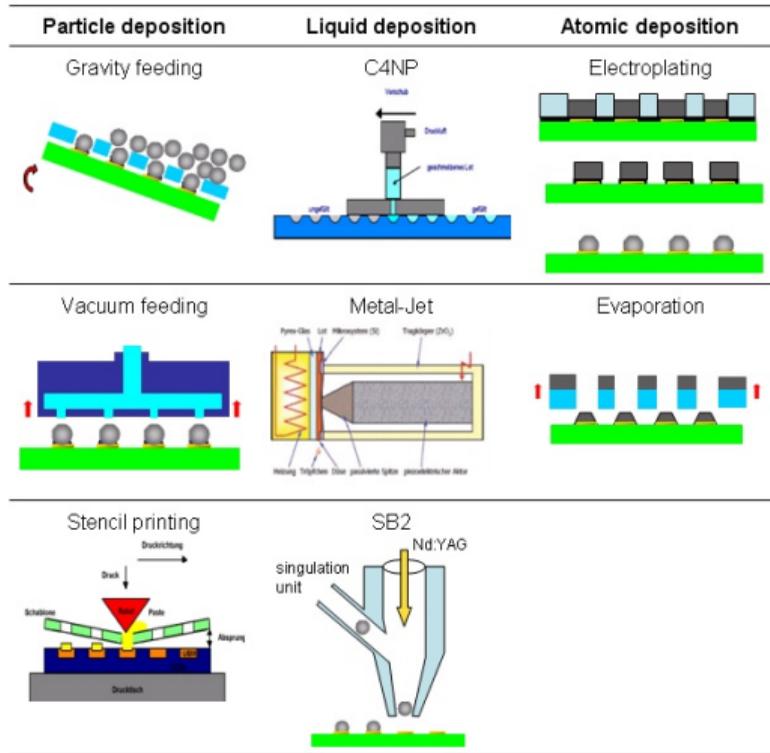


source : "Trends of power semiconductor wafer level packaging", Yong LIU,

Microelectronics Reliability 50 (2010) 514–521



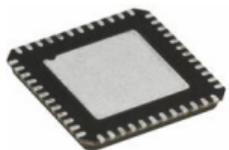
Le Wafer-Level Packaging



- Procédé collectif
- Orienté faible tension/puissance
- Nombreux procédés de réalisation

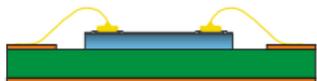
Après le *flip-chip*, l'enterré

Interconnect Evolution



First level chip interconnection technologies inside a package:

chip & wire



flip chip



chip embedding



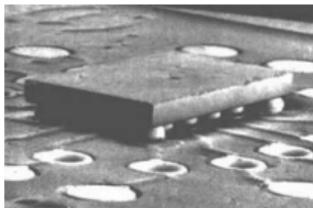
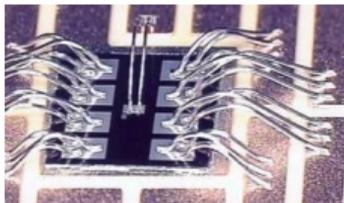
established since
40 years



smallest in 2D



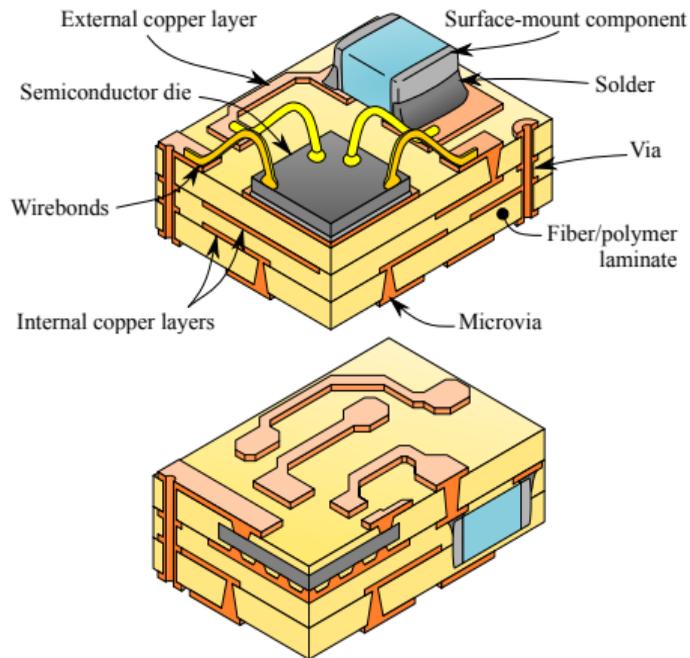
smallest in 3D



Source : Power Electronic Packages with Embedded Chips, Lars Böttcher, ECPE Workshop Adv. Power Electr. Pack., Paris, 30/09/09

Pourquoi Enfouir les composants ?

- Meilleure gestion thermique :
 - Points chauds plus proches du radiateur
 - Refroidissement double face
- Meilleures performances :
 - Interconnexions plus courtes
 - Inductances plus faibles
- Réduction de taille
 - Utilisation du volume du substrat
- Gestion des interconnexions complexes
 - Procédé collectif



Exemple de projet mené au laboratoire Ampère



Correcteur de facteur de puissance, Réalisé avec Mitsubishi Electric

Procédé de fabrication :



Exemple de projet mené au laboratoire Ampère



Correcteur de facteur de puissance, Réalisé avec Mitsubishi Electric

Procédé de fabrication :



Exemple de projet mené au laboratoire Ampère



Correcteur de facteur de puissance, Réalisé avec Mitsubishi Electric

Procédé de fabrication :



Exemple de projet mené au laboratoire Ampère



Correcteur de facteur de puissance, Réalisé avec Mitsubishi Electric

Procédé de fabrication :



Exemple de projet mené au laboratoire Ampère



Correcteur de facteur de puissance, Réalisé avec Mitsubishi Electric

Procédé de fabrication :

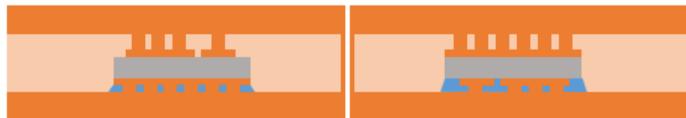


Exemple de projet mené au laboratoire Ampère



Correcteur de facteur de puissance, Réalisé avec Mitsubishi Electric

Procédé de fabrication :



Exemple de projet mené au laboratoire Ampère



Correcteur de facteur de puissance, Réalisé avec Mitsubishi Electric

Procédé de fabrication :



Exemple de projet mené au laboratoire Ampère



Correcteur de facteur de puissance, Réalisé avec Mitsubishi Electric

Procédé de fabrication :



Exemple de projet mené au laboratoire Ampère



Correcteur de facteur de puissance, Réalisé avec Mitsubishi Electric

Procédé de fabrication :

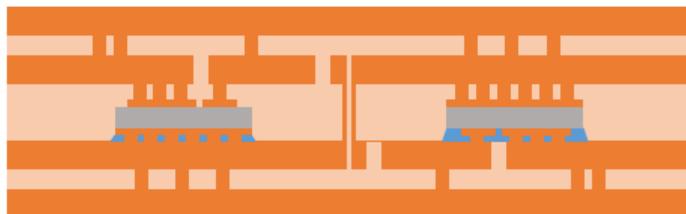


Exemple de projet mené au laboratoire Ampère



Correcteur de facteur de puissance, Réalisé avec Mitsubishi Electric

Procédé de fabrication :

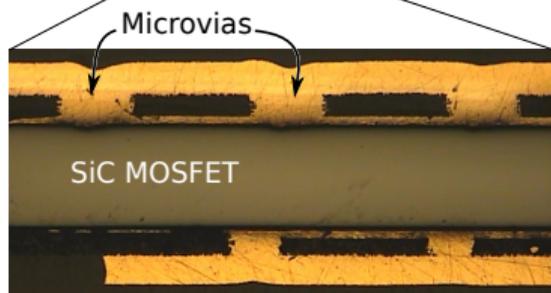
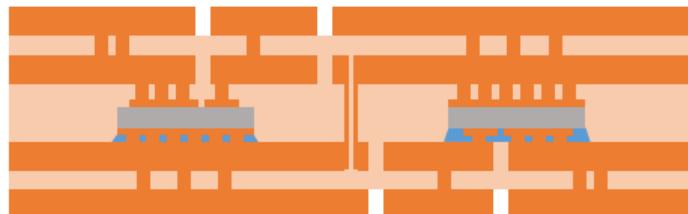


Exemple de projet mené au laboratoire Ampère



Correcteur de facteur de puissance, Réalisé avec Mitsubishi Electric

Procédé de fabrication :

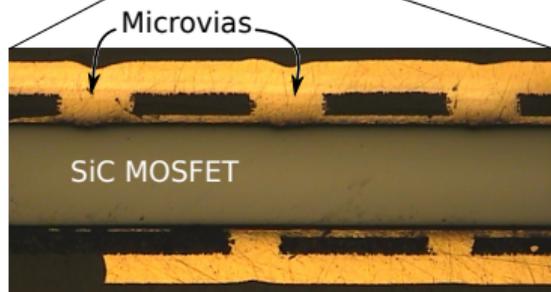
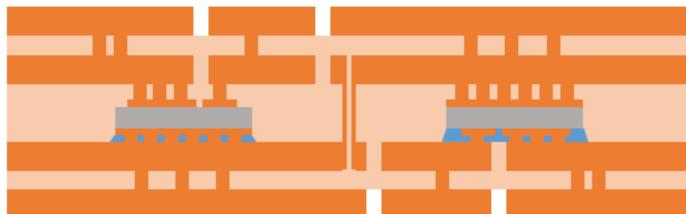


Exemple de projet mené au laboratoire Ampère

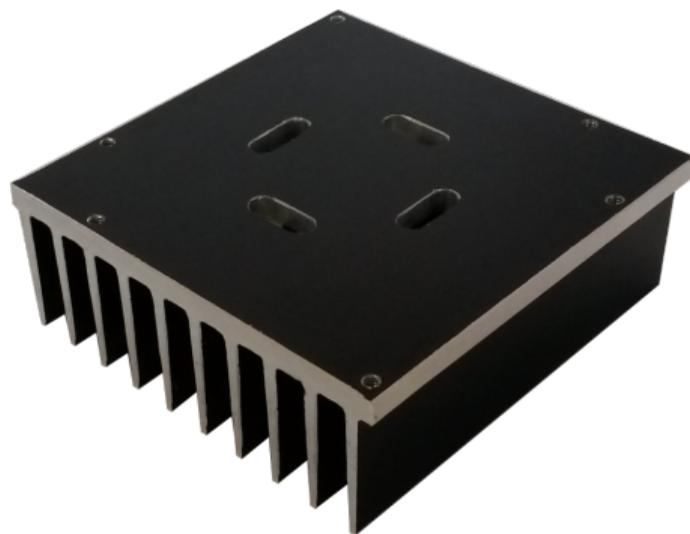


Correcteur de facteur de puissance, Réalisé avec Mitsubishi Electric

Procédé de fabrication :



Empilement de plusieurs PCBs :

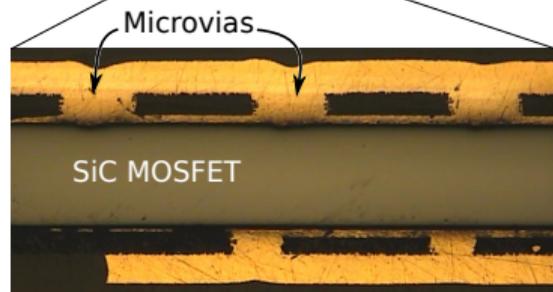
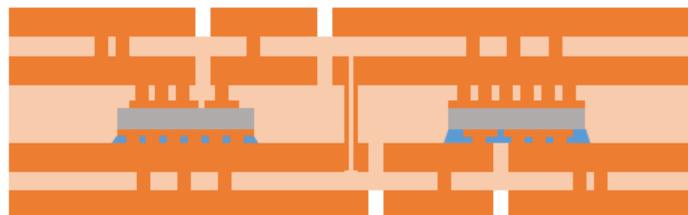


Exemple de projet mené au laboratoire Ampère

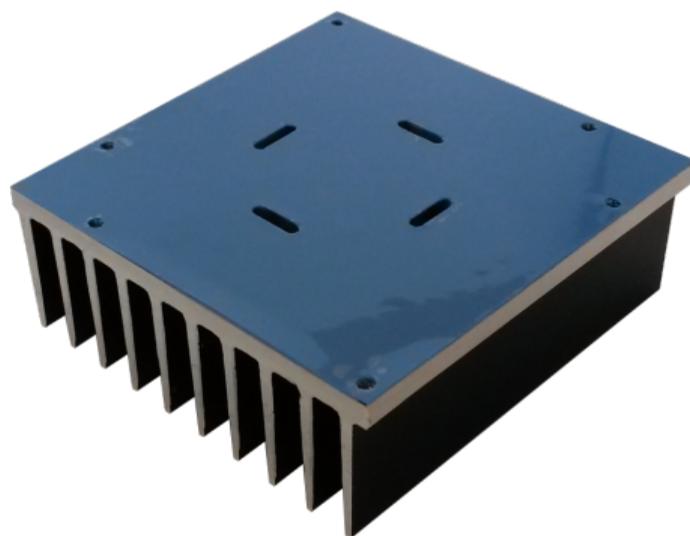


Correcteur de facteur de puissance, Réalisé avec Mitsubishi Electric

Procédé de fabrication :



Empilement de plusieurs PCBs :

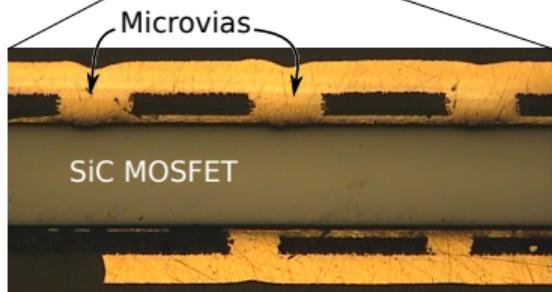
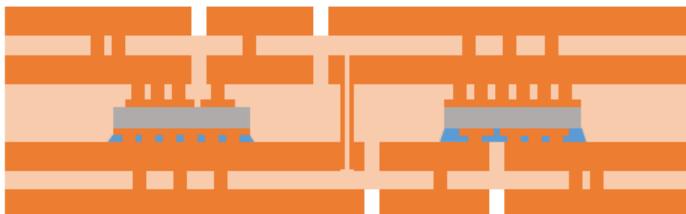


Exemple de projet mené au laboratoire Ampère

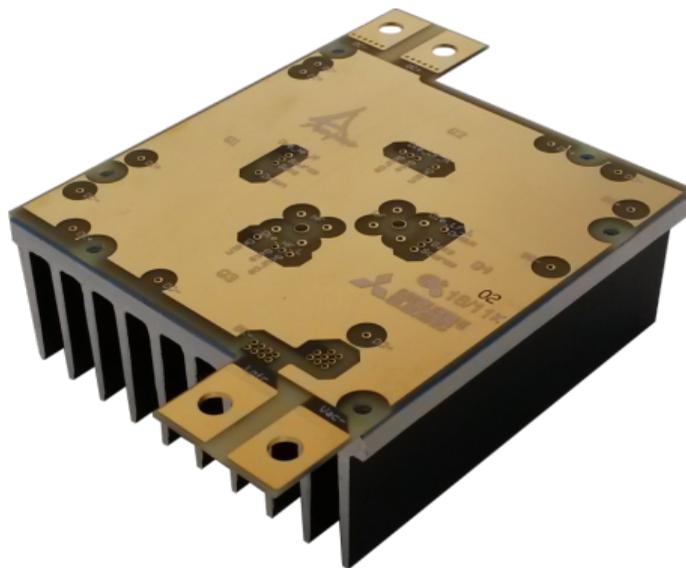


Correcteur de facteur de puissance, Réalisé avec Mitsubishi Electric

Procédé de fabrication :



Empilement de plusieurs PCBs :

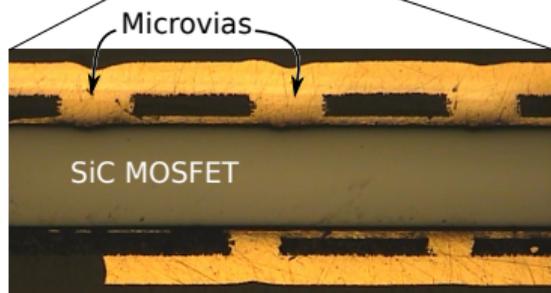
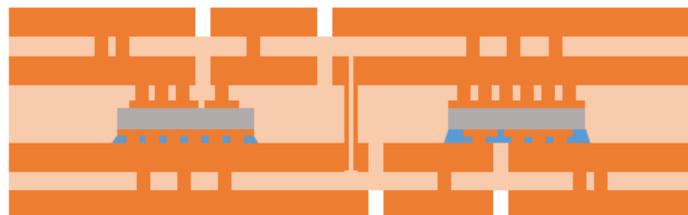


Exemple de projet mené au laboratoire Ampère

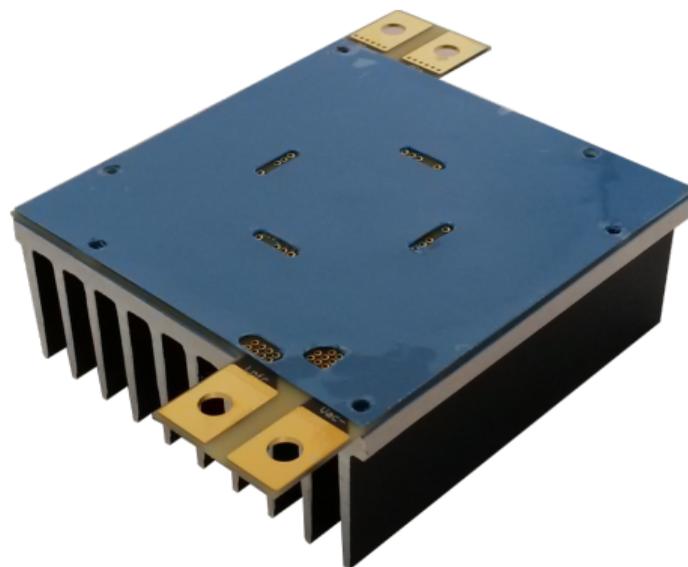


Correcteur de facteur de puissance, Réalisé avec Mitsubishi Electric

Procédé de fabrication :



Empilement de plusieurs PCBs :

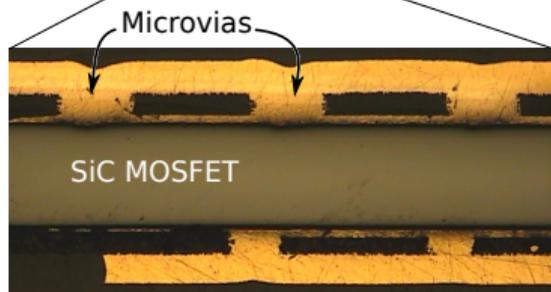
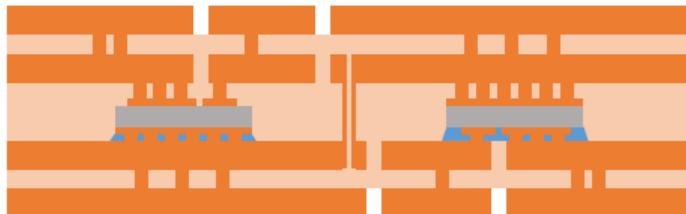


Exemple de projet mené au laboratoire Ampère

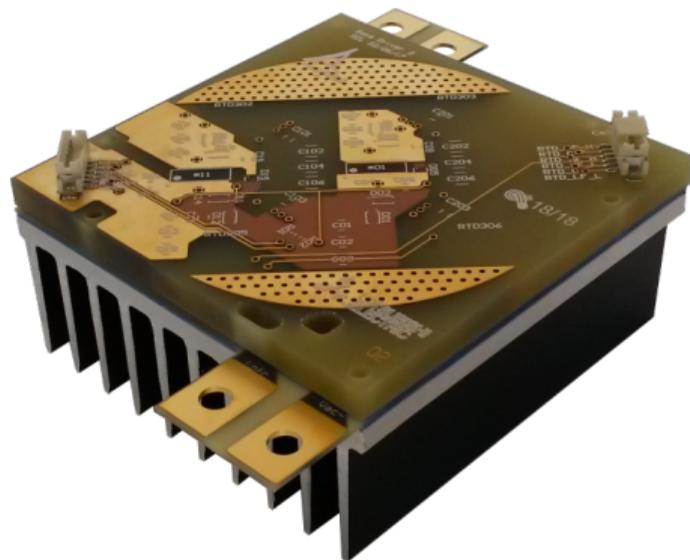


Correcteur de facteur de puissance, Réalisé avec Mitsubishi Electric

Procédé de fabrication :



Empilement de plusieurs PCBs :

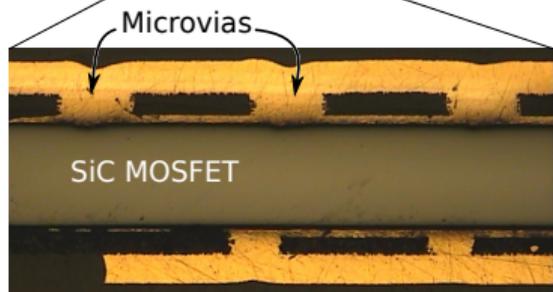
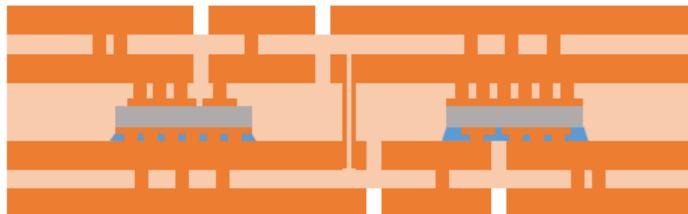


Exemple de projet mené au laboratoire Ampère

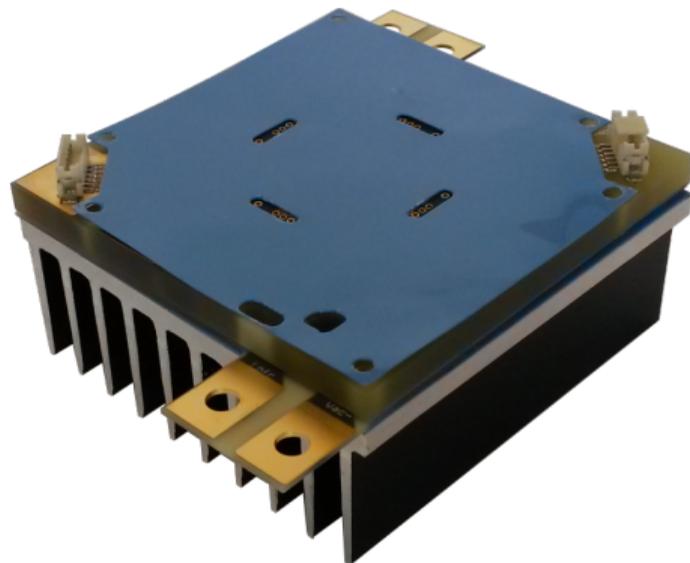


Correcteur de facteur de puissance, Réalisé avec Mitsubishi Electric

Procédé de fabrication :



Empilement de plusieurs PCBs :

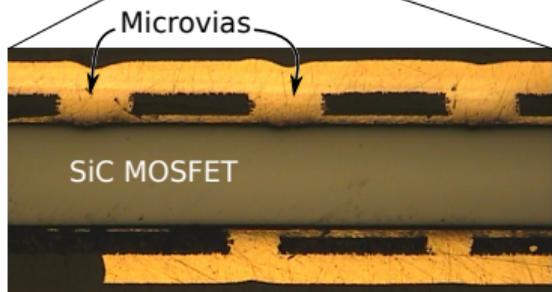
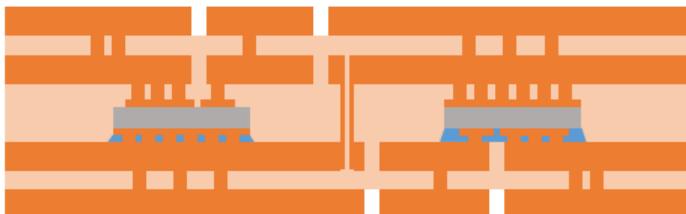


Exemple de projet mené au laboratoire Ampère

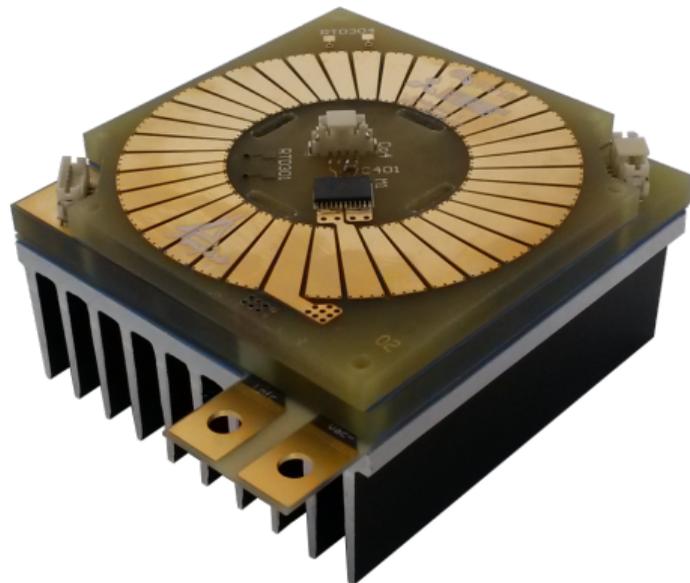


Correcteur de facteur de puissance, Réalisé avec Mitsubishi Electric

Procédé de fabrication :

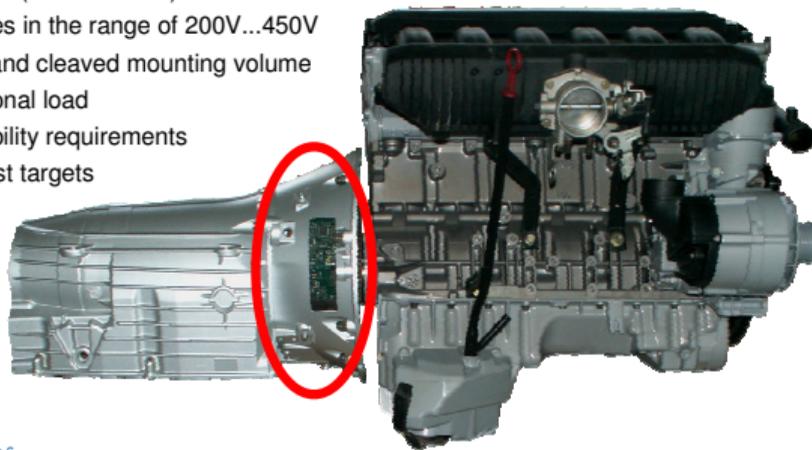


Empilement de plusieurs PCBs :



Requirements for power electronics used in the automotive power train:

- Coolant temperature up to 115°C
- Ambient temperature in the engine compartment up to 140°C
- High currents (several 100A)
- High voltages in the range of 200V...450V
- Very small and cleaved mounting volume
- High vibrational load
- Tough reliability requirements
- Very low cost targets

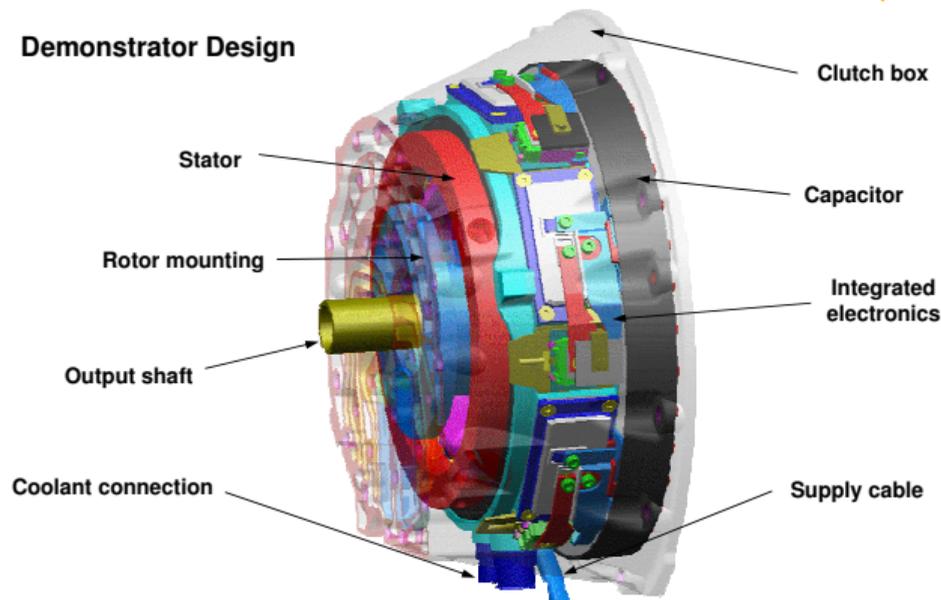


Source : Mechatronic System Integration of the Hybrid Powertrain, Thomas Harder ECPE Workshop Adv. Power Electr. Pack., Paris, 30/09/09

L'intégration mécatronique – exemple automobile

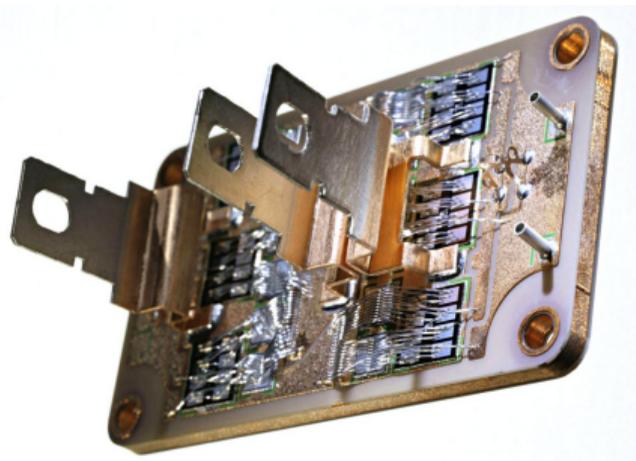


Demonstrator Design

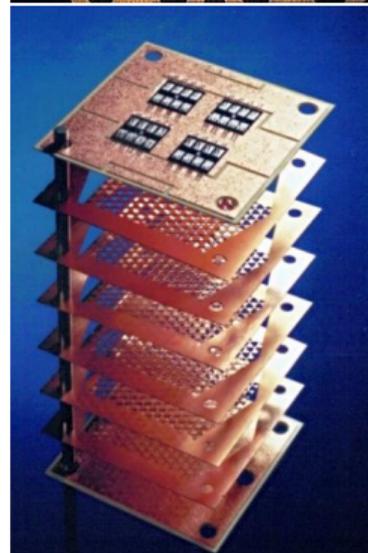
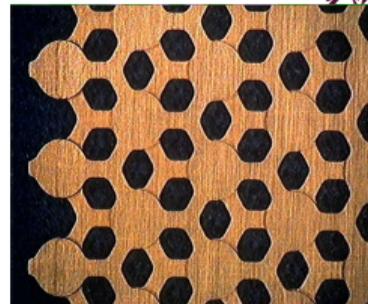


Source : Mechatronic System Integration of the Hybrid Powertrain, Thomas Harder, ECPE Workshop Adv. Power Electr. Pack., Paris, 30/09/09

Le refroidissement intégré – 1

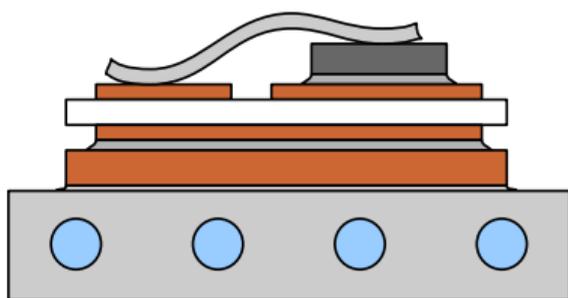


Source : Schulz-Harder, J. Ceramic Substrates and Micro Channel Cooler Curamik Electronics GmbH, 2006

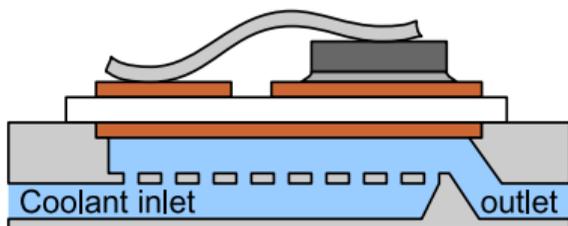


- fusionner le substrat, la semelle et la plaque à eau
- Moins d'interfaces thermiques à traverser
- Avec des puces Si, on peut évacuer jusqu'à 3 kW sur une surface de $5 \times 5 \text{ cm}^2$

Le refroidissement intégré – 2



Classical liquid-cooling



Direct cooling

Mettre le fluide de refroidissement en contact direct avec le substrat

- Suppression de couches :
 - plaque à eau
 - pâte thermique
 - semelle
 - brasure
- Pas de contraintes mécaniques (interface liquide-solide)
- La plaque à eau peut être en plastique

pour aller plus loin



- “Dispositifs de l’électronique de puissance”, J. Arnould et P. Merle, 1992, Hermès, Paris (2 tomes). Clair et bien écrit, mais plus tout à fait à jour (en français).
- “Power Electronics Converters, Applications and Design”, N. Mohan, T. Underland et W. Robbins, John Willey and Sons, USA. Probablement le livre d’électronique de puissance le plus utilisé en cours dans le monde anglo-saxon (en anglais).
- “Power Semiconductor Devices”, B. J. Baliga, PWS publishing company, 1995. Livre très complet (et un peu ardu) sur les composants actifs de puissance.