



**HAL**  
open science

# Introduction au packaging en électronique de puissance

Cyril Buttay

► **To cite this version:**

Cyril Buttay. Introduction au packaging en électronique de puissance : Cours de 2 h à destination d'élèves niveau master 1/2 (actuellement donné en 5<sup>ème</sup> année de génie électrique à l'INSA de Lyon). École d'ingénieur. France. 2017. cel-01539750

**HAL Id: cel-01539750**

**<https://cel.hal.science/cel-01539750>**

Submitted on 15 Jun 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Introduction au *packaging* en électronique de puissance

Cyril BUTTAY

Laboratoire Ampère, Lyon, France

24 janvier 2017

Introduction

Petit lexique du packaging de puissance

Considérations physiques

- Aspects thermiques

- Aspects thermo-mécaniques

- Aspects électriques

Éléments de technologie

- Substrats

- Interconnexions

- Gestion thermique

Évolutions, Recherche et Développement

## Introduction

Petit lexique du packaging de puissance

Considérations physiques

- Aspects thermiques

- Aspects thermo-mécaniques

- Aspects électriques

Éléments de technologie

- Substrats

- Interconnexions

- Gestion thermique

Évolutions, Recherche et Développement

# Qui suis-je ?

- ▶ Chercheur CNRS au laboratoire Ampère, à l'INSA
  - ▶ Sujet de recherche : électronique de puissance, particulièrement le *packaging* pour la haute température.
- ▶ Ancien étudiant GE (sorti en 2001)
- ▶ thèse INSA (2004)
- ▶ Contacts :
  - ▶ Vous êtes bienvenus !
  - ▶ (04 72 43) 79 63
  - ▶ [cyril.buttay@insa-lyon.fr](mailto:cyril.buttay@insa-lyon.fr)
  - ▶ Bureau : 3<sup>ème</sup> 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* pour la haute température.
- ▶ Ancien étudiant GE (sorti en 2001)
- ▶ thèse INSA (2004)
- ▶ Contacts :
  - ▶ Vous êtes bienvenus !
  - ▶ (04 72 43) 79 63
  - ▶ [cyril.buttay@insa-lyon.fr](mailto:cyril.buttay@insa-lyon.fr)
  - ▶ Bureau : 3<sup>ème</sup> 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* pour la haute température.
- ▶ Ancien étudiant GE (sorti en 2001)
- ▶ thèse INSA (2004)
- ▶ Contacts :
  - ▶ Vous êtes bienvenus !
  - ▶ (04 72 43) 79 83
  - ▶ [cyril.buttay@insa-lyon.fr](mailto:cyril.buttay@insa-lyon.fr)
  - ▶ Bureau : 3<sup>ème</sup> 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* pour la haute température.
- ▶ Ancien étudiant GE (sorti en 2001)
- ▶ thèse INSA (2004)
- ▶ Contacts :
  - ▶ Vous êtes bienvenus !
  - ▶ (04 72 43) 79 63
  - ▶ [cyril.buttay@insa-lyon.fr](mailto:cyril.buttay@insa-lyon.fr)
  - ▶ Bureau : 3<sup>ieme</sup> étage, bât L de Vinci

De *packaging*!  
(Environnement immédiat des composants)

## De *packaging*!

(Environnement immédiat des composants)

Il assure :

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

## 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

Introduction

Petit lexique du packaging de puissance

Considérations physiques

- Aspects thermiques

- Aspects thermo-mécaniques

- Aspects électriques

Éléments de technologie

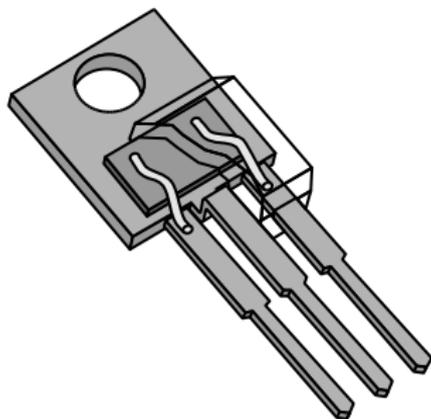
- Substrats

- Interconnexions

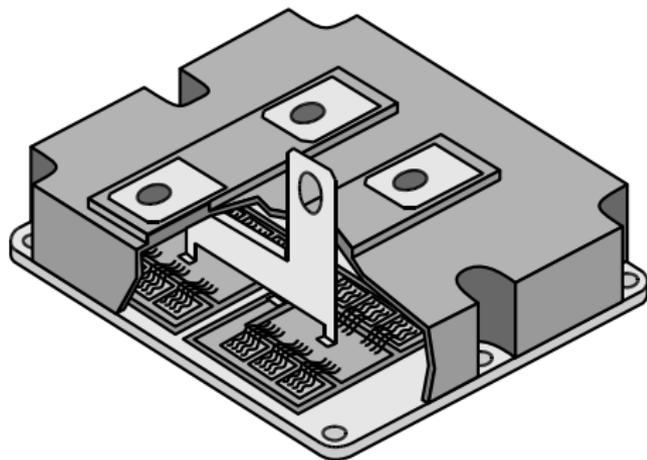
- Gestion thermique

Évolutions, Recherche et Développement

## Deux classes : discrets et modules



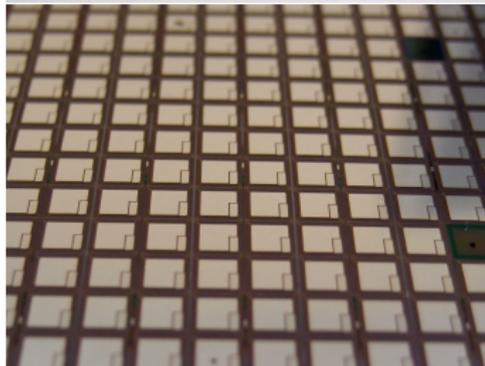
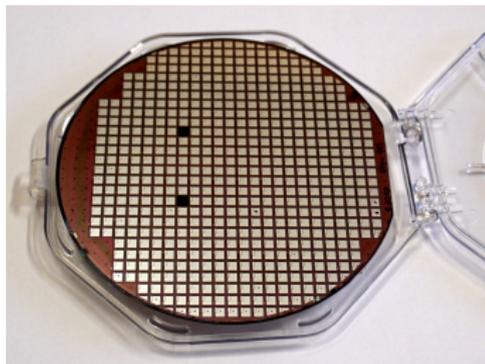
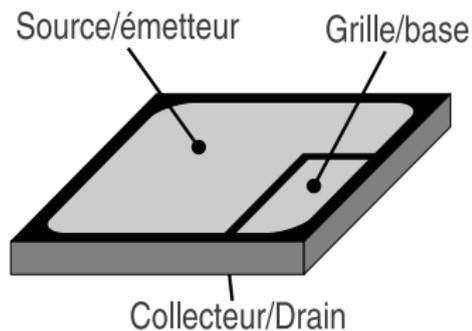
- ▶ Un composant élémentaire (transistor, diode) par boîtier
- ▶ (souvent) Pas d'isolation
- ▶ puissances faibles ou très fortes



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

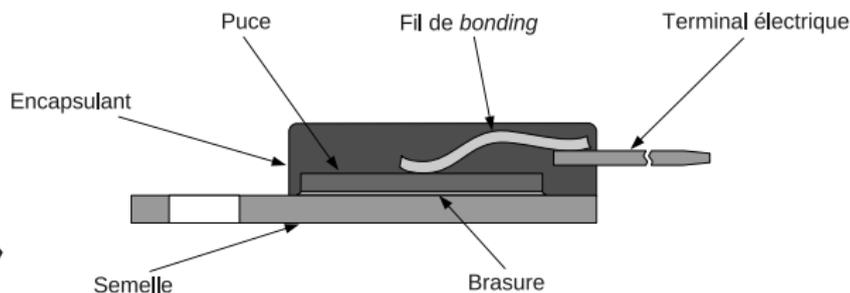
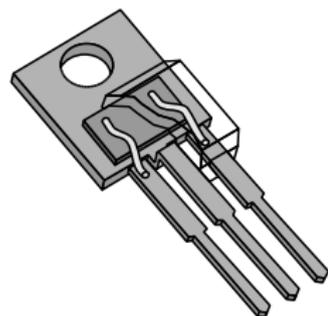
# Puces de puissance

- ▶ Structure verticale, avec un (ou deux) contacts dessus et un dessous
- ▶ épaisseur de 50 à 500  $\mu\text{m}$
- ▶ côté de 1 à 13 mm

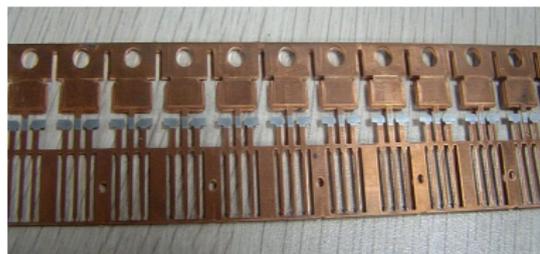


wafer IGBT International Rectifier, puces de 5x5 mm, wafer diamètre 6 pouces

# Structure d'un boîtier discret

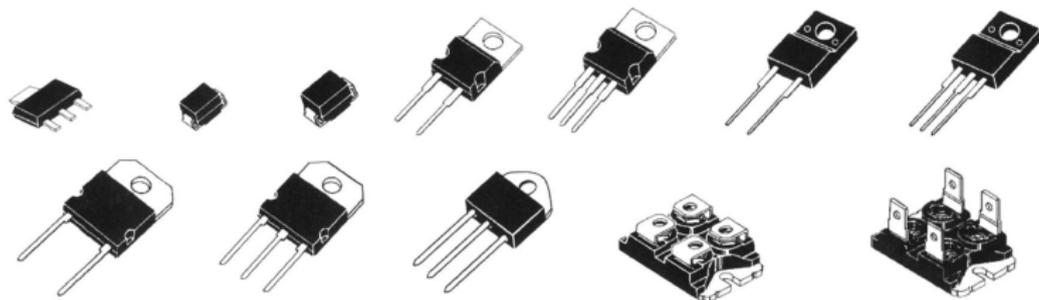


- ▶ technologie bas coût ;
- ▶ grande cadence de production ;
- ▶ matériaux : cuivre, brasure, aluminium, epoxy
- ▶ courant max.  $< 100 \text{ A}$
- ▶ tension max.  $< 1200 \text{ V}$



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

# Quelques boîtiers de composants discrets

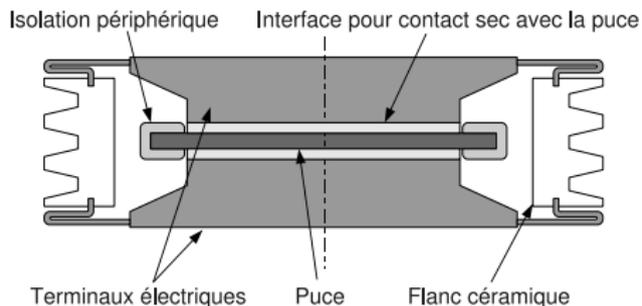


Source : techniques de l'ingénieur, volume E3 960

- ▶ quelques boîtiers de diodes normalisés : DO-001, DO-002, DO-003, DO-004, DO-005, DO-006, DO-007, DO-008, DO-009, DO-010, DO-011, DO-012, DO-013, DO-014, DO-015, DO-016, DO-017, DO-018, DO-019, DO-020, DO-021, DO-022, DO-023, DO-024, DO-025, DO-026, DO-027, DO-028, DO-029, DO-030, DO-031, DO-032, DO-033, DO-034, DO-035, DO-036, DO-037, DO-038, DO-039, DO-040, DO-041, DO-042, DO-043, DO-044, DO-045, DO-202 ...
- ▶ et des transistors : TO-1, TO-2, TO-3, TO-4, TO-5, TO-6, TO-7, TO-8, TO-9, TO-10, TO-11, TO-12, TO-13, TO-14, TO-15, TO-16, TO-17, TO-18, TO-19, TO-20, TO-21, TO-22, TO-23, TO-24, TO-25, TO-26, TO-27, TO-28, TO-29, TO-30, TO-31, TO-32, TO-33, TO-34, TO-35, TO-36, TO-37, TO-38, TO-39, TO-40, TO-41, TO-42, TO-43, TO-44, TO-45, TO-46, TO-47, TO-48, TO-49, TO-50, TO-51, TO-52, TO-53, TO-54, TO-55, TO-56, TO-57, TO-58, TO-60, TO-61, TO-62, TO-63, TO-64, TO-65, TO-66, TO-67, TO-68, TO-69, TO-70, TO-71, TO-72, TO-73, TO-74, TO-75, TO-76, TO-77, TO-78, TO-79, TO-80, TO-81, TO-82, TO-83, TO-84, TO-85, TO-86, TO-87, T88, TO-89, TO-90, TO-91, TO-92, TO-93, TO-94, TO-95, TO-96, TO-97, TO-98, TO-99, TO-100, TO-101, TO-102, TO-103, TO-104, TO-105, TO-106, TO-107, TO-108, TO-109, TO-110, TO-111, TO-112, TO-113, TO-114, TO-115, TO-116, TO-117, TO-118, TO-119, TO-120, TO-121, TO-122, TO-123, TO-124, TO-125, TO-126, TO-127, TO-128, TO-129, TO-130, TO-131, TO-132, TO-220I, TO-201, TO-203, TO-207, TO-208A, TO-210, TO-211, TO-212, TO-214, TO-217, TO-220J, TO-221, TO-222, TO-223, TO-224, TO-225, TO-227, TO-228, TO-229, TO-230, TO-231, TO-232, TO-233, TO-234, TO-235, TO-239, TO-241, TO-242, TO-248, TO-249 ...

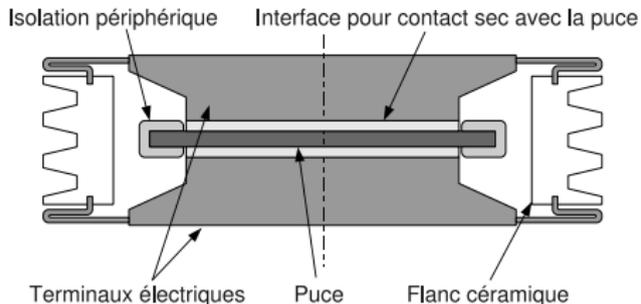
# Les discrets pour la forte puissance

- ▶ Tensions jusqu'à 6.5 kV
- ▶ Courants de plusieurs kA
- ▶ Puces jusqu'à 10 cm diam.
- ▶ conçus pour la mise en série.



# Les discrets pour la forte puissance

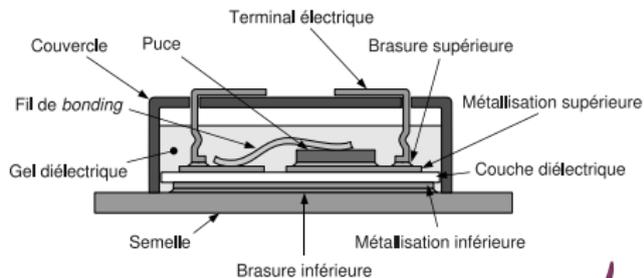
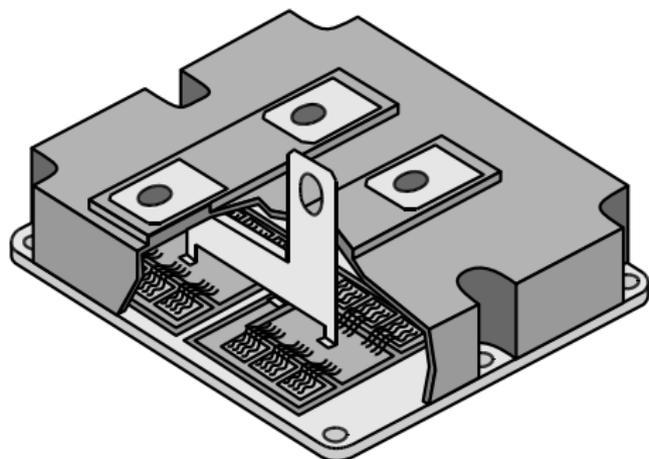
- ▶ Tensions jusqu'à 6.5 kV
- ▶ Courants de plusieurs kA
- ▶ Puces jusqu'à 10 cm diam.
- ▶ conçus pour la mise en série.



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

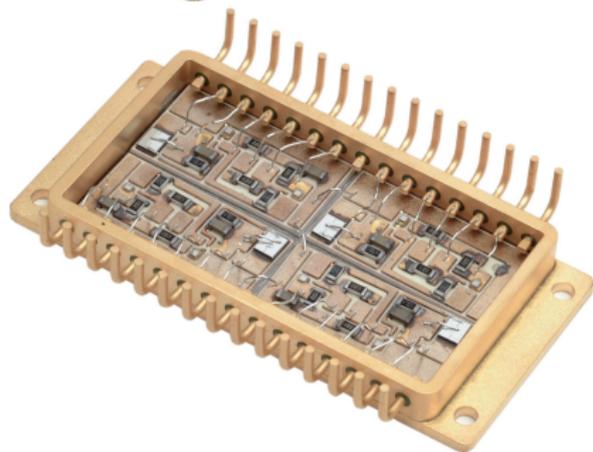
# Modules

- ▶ Plusieurs puces
  - ▶ un composant équivalent (transistor, diode)
  - ▶ un circuit complet (onduleur, redresseur...)
- ▶ Besoin d'isolation électrique
- ▶ Peu standardisé
- ▶ 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...)





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



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

Introduction

Petit lexique du packaging de puissance

**Considérations physiques**

**Aspects thermiques**

**Aspects thermo-mécaniques**

**Aspects électriques**

Éléments de technologie

Substrats

Interconnexions

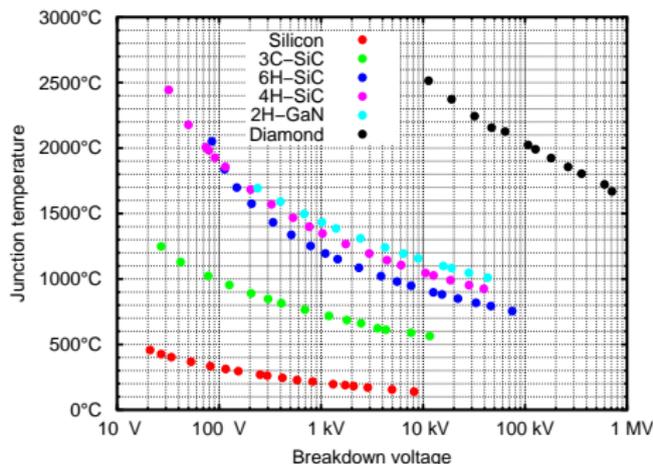
Gestion thermique

Évolutions, Recherche et Développement

# Limites thermiques : composants à semiconducteurs

Quelques limites :

- 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)

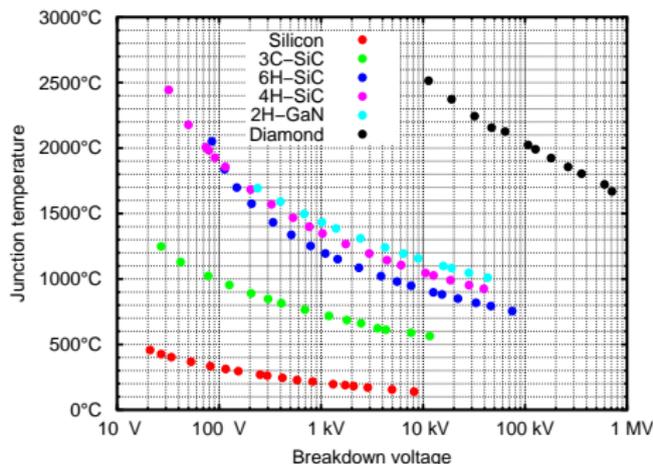


- ▶ De nombreux composants (MOSFETs, diodes) sont moins performants lorsque la température augmente.
- ▶ Les fortes variations de température posent des problèmes de fiabilité.

# Limites thermiques : composants à semiconducteurs

Quelques limites :

- 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)

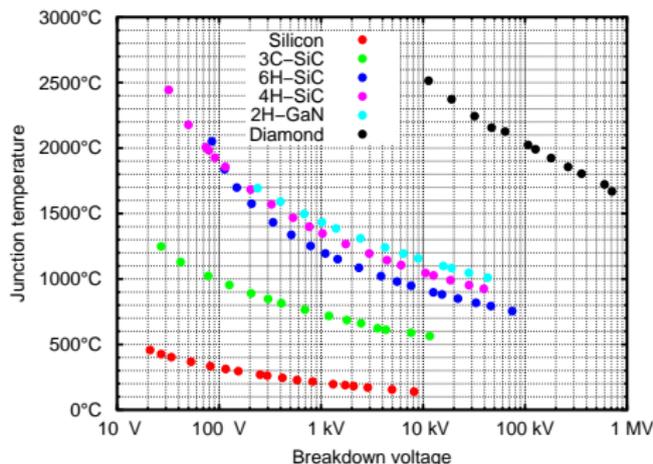


- ▶ De nombreux composants (MOSFETs, diodes) sont moins performants lorsque la température augmente.
- ▶ Les fortes variations de température posent des problèmes de fiabilité.

# Limites thermiques : composants à semiconducteurs

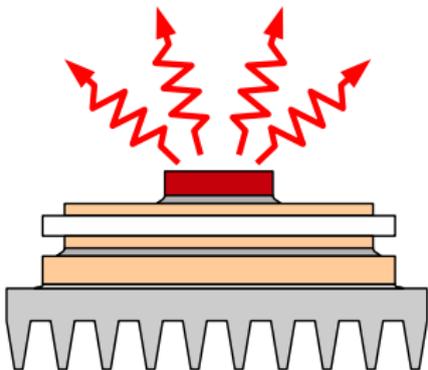
Quelques limites :

- 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,  $P=0,15 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$
- **Négligeable pour les dimensions et températures classiques de l'électronique**

## ► 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. . .)

## ► Rayonnement

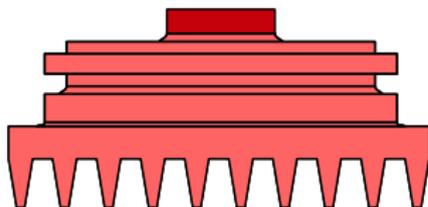
- Loi de Stefan-Boltzmann :  $P = \varepsilon S \sigma T^4$   
avec  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$  et  $\varepsilon < 1$
- à 400 K,  $P = 0,15 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$
- Négligeable pour les dimensions et températures classiques de l'électronique

## ► 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  $\Delta T = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P = 400 \text{ W}$

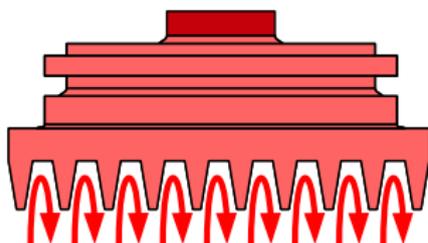
## ► Convection

- Déplacement de matière
- Pas d'expression simple (convection forcée, naturelle, type d'écoulements. . .)



## ► 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,  $P=0,15 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$
- Négligeable pour les dimensions et températures classiques de l'électronique



## ► 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  $\Delta T=1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P=400 \text{ W}$

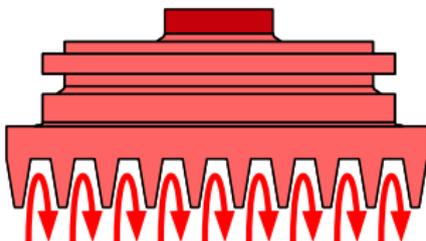
## ► Convection

- 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,  $P=0,15 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$
- Négligeable pour les dimensions et températures classiques de l'électronique



## ► Conduction

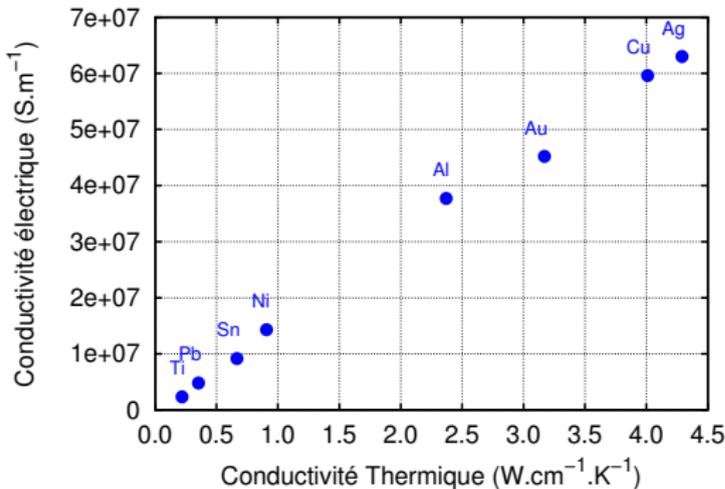
- transfert de chaleur dans la matière
- $P = -\frac{\lambda S}{e} \Delta T$ ,  $\lambda = 20 \dots 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Pour une piste en cuivre avec  $e=100 \mu\text{m}$ ,  $S=1 \text{ cm}^2$  et  $\Delta T=1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P=400 \text{ W}$

## ► 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

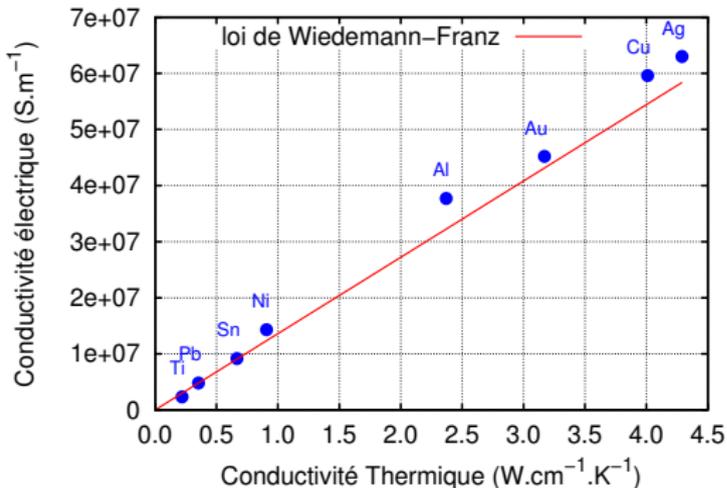
# Relation entre conductivités thermique et électrique



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

- ▶  $\lambda_e$  : porteurs de charges (électrons)  
 $\lambda_e = LT\sigma$
- ▶  $\lambda_p$  : phonons (vibrations réseau atomique)

# Relation entre conductivités thermique et électrique



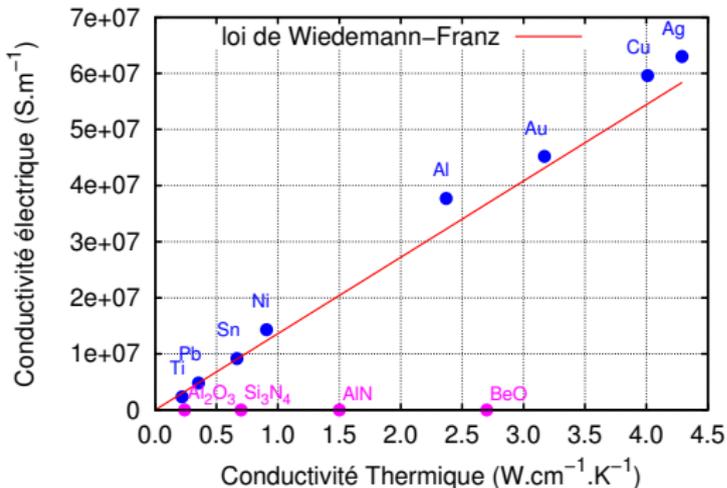
cond. thermique  $\lambda = \lambda_e + \lambda_p$

►  $\lambda_e$  : porteurs de charges (électrons)

$$\lambda_e = LT\sigma$$

►  $\lambda_p$  : phonons (vibrations réseau atomique)

# Relation entre conductivités thermique et électrique



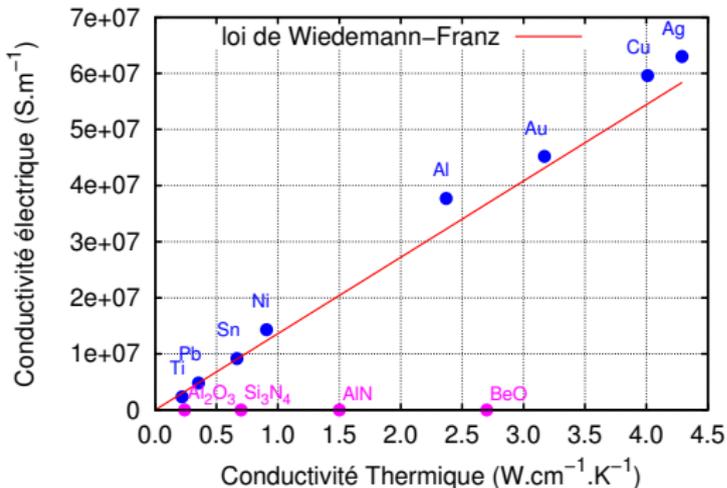
cond. thermique  $\lambda = \lambda_e + \lambda_p$

►  $\lambda_e$  : porteurs de charges (électrons)

$$\lambda_e = LT\sigma$$

►  $\lambda_p$  : phonons (vibrations réseau atomique)

# Relation entre conductivités thermique et électrique



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

►  $\lambda_e$  : porteurs de charges (électrons)

$$\lambda_e = LT\sigma$$

►  $\lambda_p$  : phonons (vibrations réseau atomique)

→ Les matériaux bons conducteurs thermiques/isolants électriques sont rares (diamant, AlN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

# Isolants/conducteurs électrique/thermique

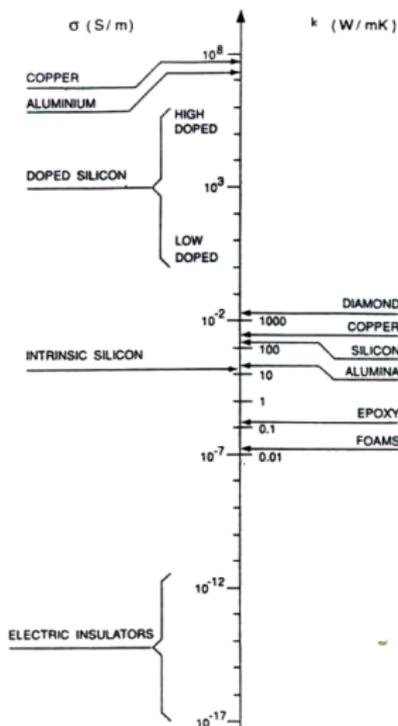
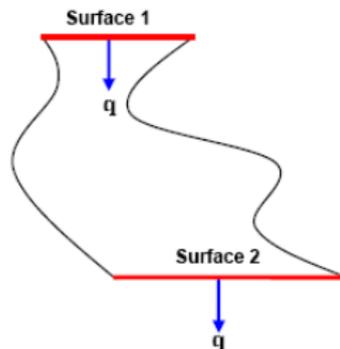


Figure 1: Comparison between electrical and thermal conductivities

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

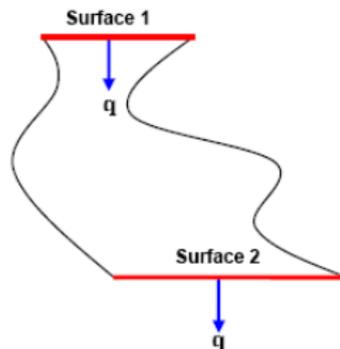


Source : Heat Spreading : not a trivial issue, C. Lansance,  
ECPE Workshop on advanced cooling, 20–21 November, Delft.

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

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

# Représentation circuit thermique



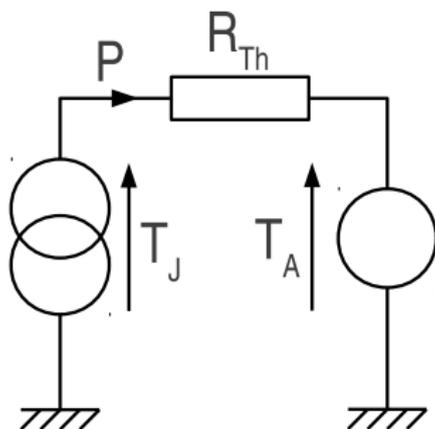
Source : Heat Spreading : not a trivial issue, C. Lansance, ECPE Workshop on advanced cooling, 20-21 November, Delft.

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

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

On peut alors définir une représentation circuit

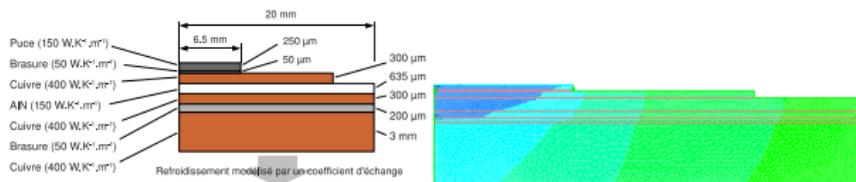
- ▶ Les températures sont des efforts (tensions)
- ▶ Les puissances dissipées des flux (courants)
- ▶  $T_J = T_A + R_{Th} \times P$



# Calcul de la résistance thermique

## ▶ À partir des données “matériau” :

- ▶ si hypothèse 1-D acceptable :  $R_{Th} = \frac{l}{\lambda S}$   
 $\lambda$  conductivité thermique,  $l$  longueur et  $S$  section
- ▶ Si géométrie complexe, plusieurs matériaux : calcul numérique



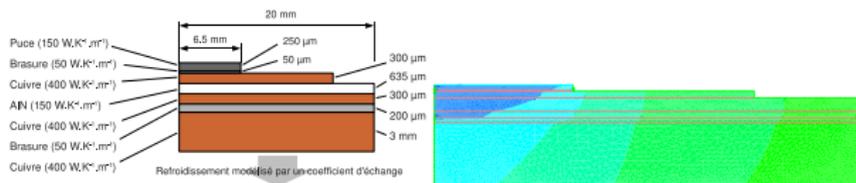
## ▶ À partir des données constructeur :

- ▶ 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) !

# Calcul de la résistance thermique

## ▶ À partir des données “matériau” :

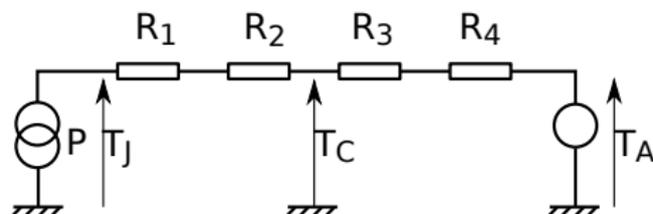
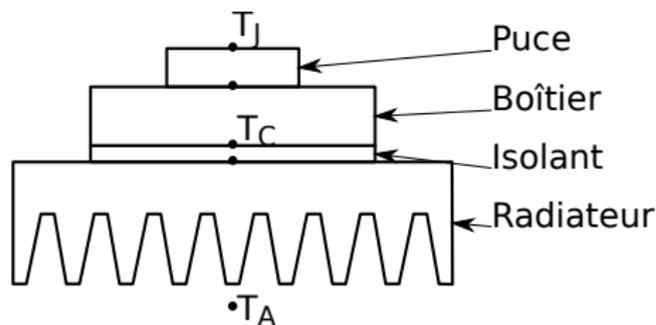
- ▶ si hypothèse 1-D acceptable :  $R_{Th} = \frac{l}{\lambda S}$   
 $\lambda$  conductivité thermique,  $l$  longueur et  $S$  section
- ▶ Si géométrie complexe, plusieurs matériaux : calcul numérique



## ▶ 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



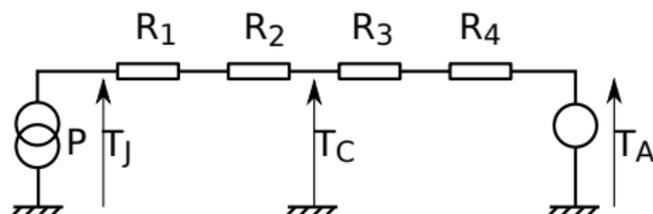
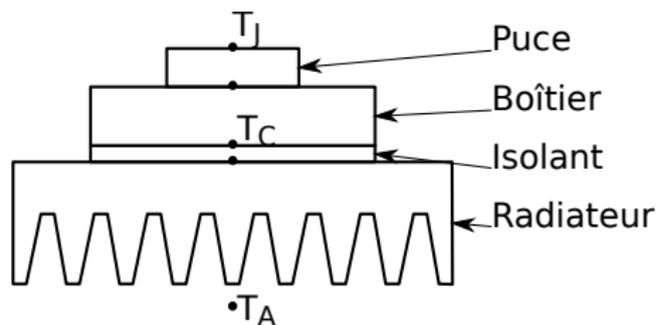
Si on peut considérer que les interfaces sont **isothermes** :

- ▶  $R_{Th_{total}} = \sum R_i$
- ▶ 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  $5^\circ\text{C/W}$ ,  $T_A = 50^\circ\text{C}$
- ▶ isolant  $1^\circ\text{C/W}$
- ▶  $T_J = T_A + R_{Th_{JA}} P = 119^\circ\text{C}$

# 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  $5^\circ\text{C/W}$ ,  $T_A = 50^\circ\text{C}$
- ▶ isolant  $1^\circ\text{C/W}$
- ▶  $T_J = T_A + R_{Th_{JA}} P = 119^\circ\text{C}$

# Équation de la chaleur

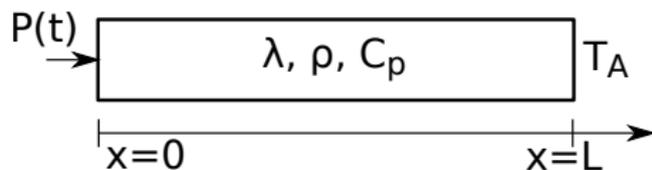
Équation de la chaleur 1-D :

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

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 ( $J/K/kg$ )
- ▶  $\rho$  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 ( $J/K/kg$ )
- ▶  $\rho$  densité ( $kg/m^3$ )



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

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

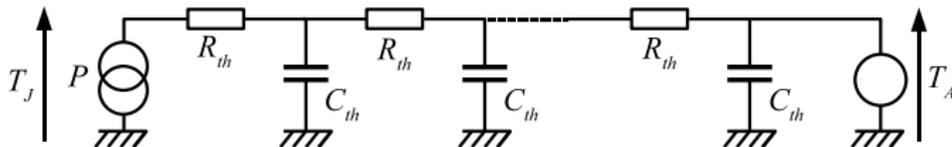
$$C_{Th} \frac{\partial T_i(t)}{\partial t} = \frac{T_{i+1}(t) - T_i(t)}{R_{Th}} - \frac{T_i(t) - T_{i-1}(t)}{R_{Th}}$$



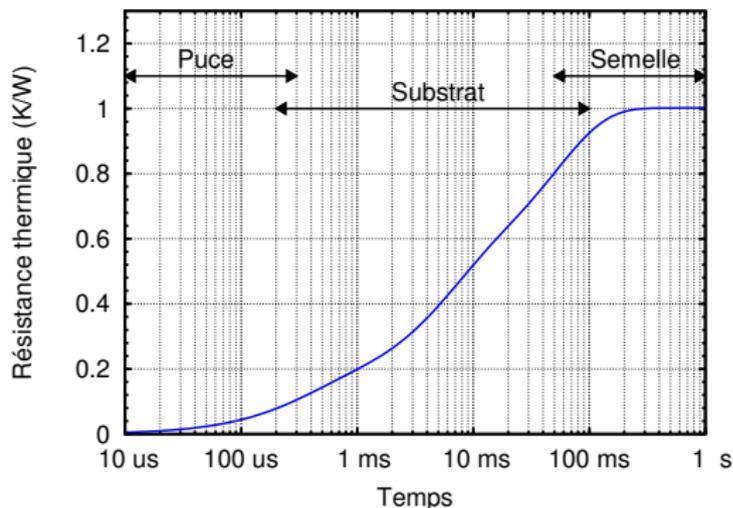
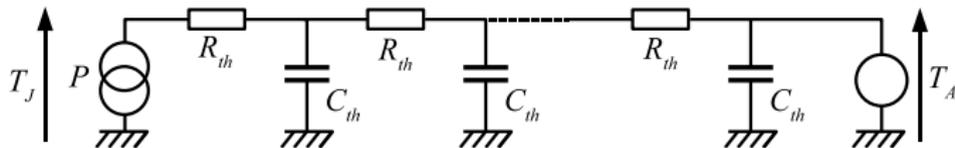
$$hS\rho C_p \frac{\partial T_i(t)}{\partial t} = \lambda S \frac{T_{i+1}(t) - T_i(t)}{h} - \lambda S \frac{T_i(t) - T_{i-1}(t)}{h}$$

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

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



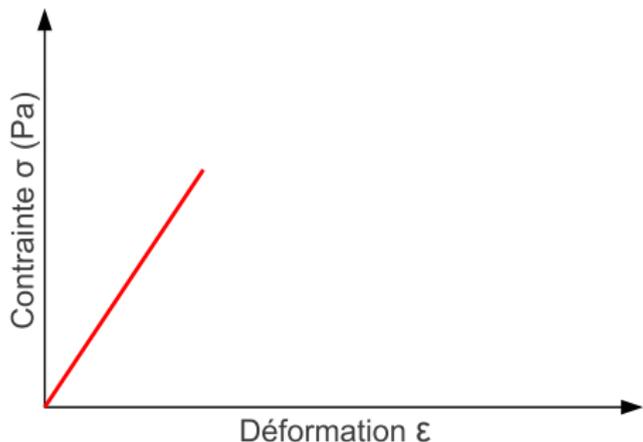
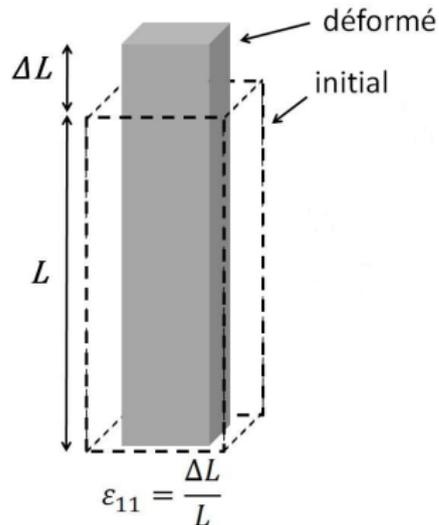
# Impédance thermique



## Extension au régime dynamique :

- ▶ mêmes conditions (conservation du flux, surfaces isothermes)
- ▶ aux courtes échelles de temps, fonctionnement propagatif

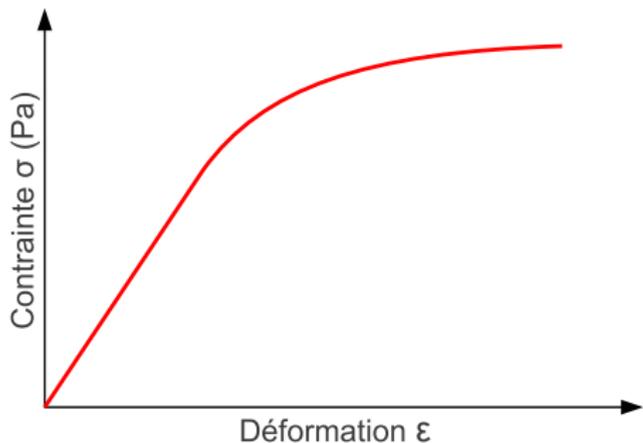
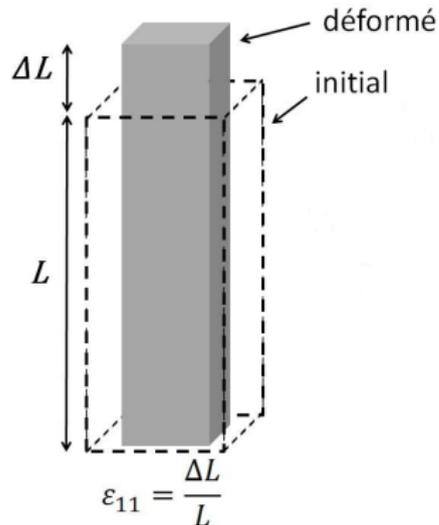
# Un peu de mécanique...



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

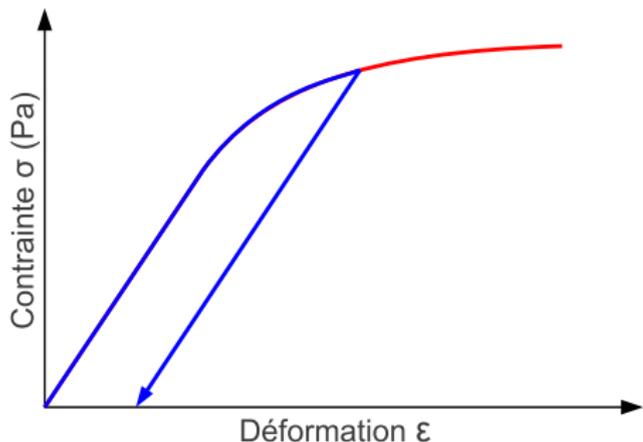
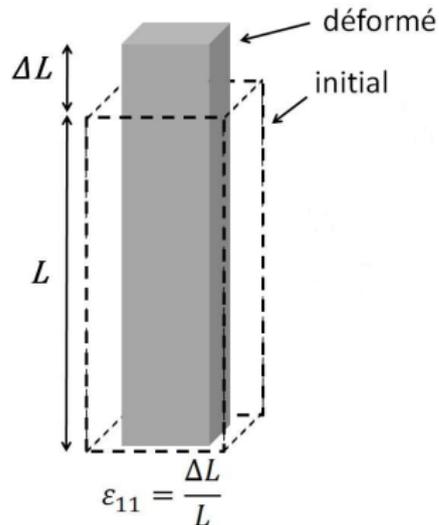
# Un peu de mécanique...



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

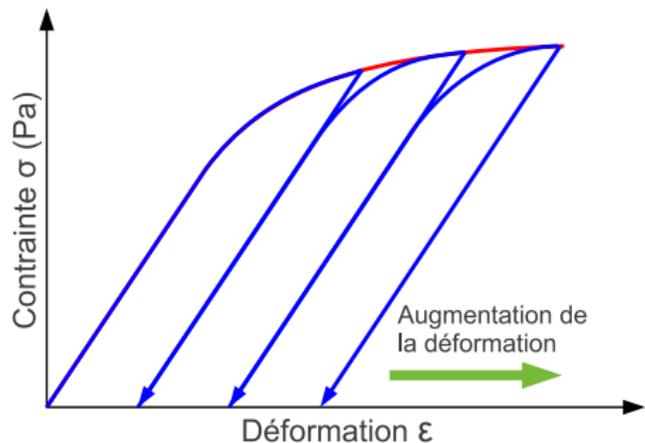
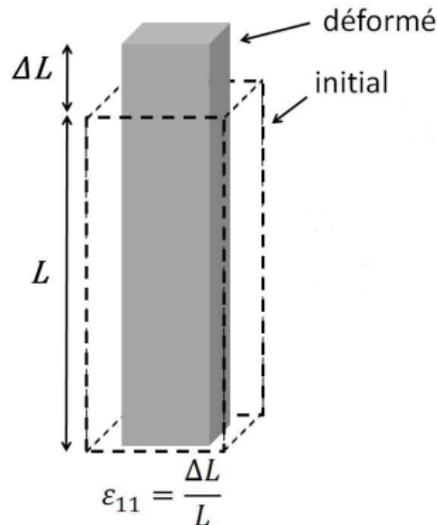
# Un peu de mécanique...



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

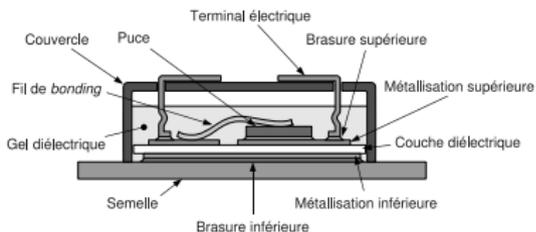
# Un peu de mécanique...



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

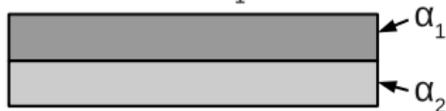
- ▶ Déformation élastique (réversible)
- ▶ Déformation plastique (irréversible)
- ▶ Apparition d'une déformation résiduelle
- ▶ accumulation de la déformation menant à la rupture

# Effet des coefficients de dilatation



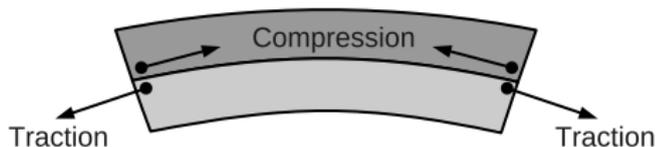
- ▶  $\alpha$  en ppm/K
- ▶  $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- ▶ la température génère des contraintes mécaniques

Température de repos  $T_1$

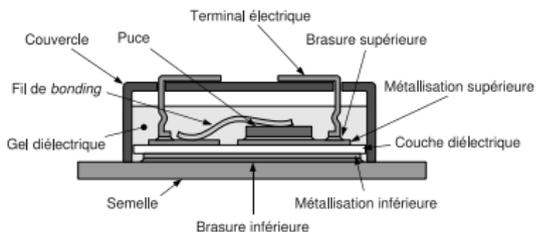


$$\alpha_1 > \alpha_2$$

$T_2 > T_1$

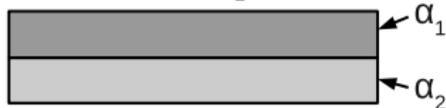


# Effet des coefficients de dilatation

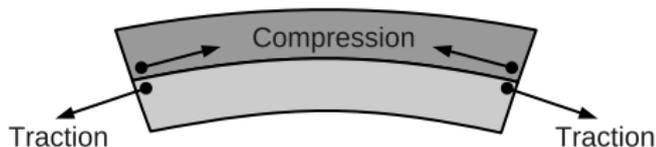


- ▶  $\alpha$  en ppm/K
- ▶  $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- ▶ la température génère des contraintes mécaniques

Température de repos  $T_1$



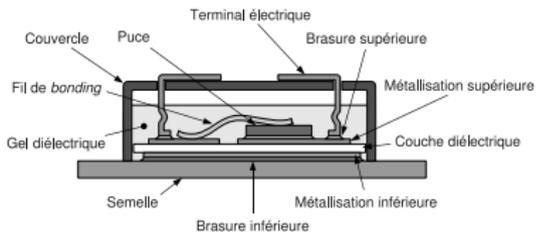
$T_2 > T_1$



Fonctionnement cyclique



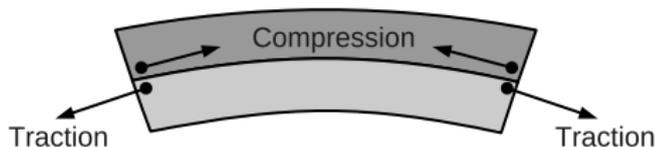
# Effet des coefficients de dilatation



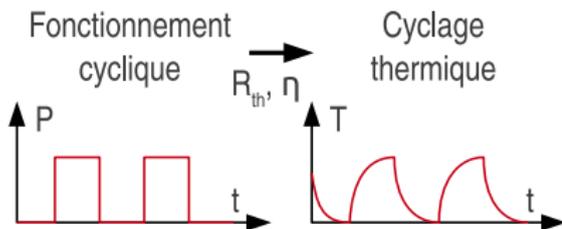
Température de repos  $T_1$



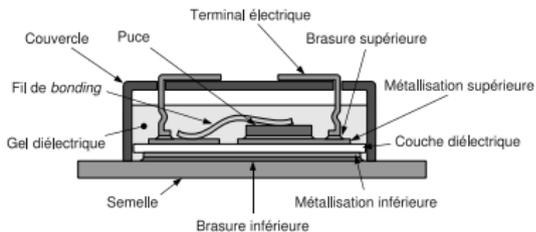
$T_2 > T_1$



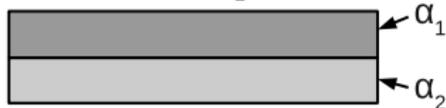
- ▶  $\alpha$  en ppm/K
- ▶  $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- ▶ la température génère des contraintes mécaniques



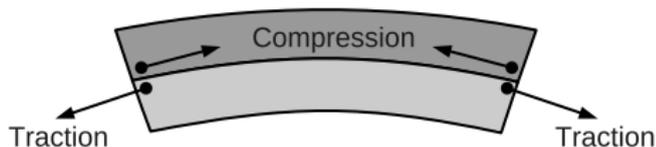
# Effet des coefficients de dilatation



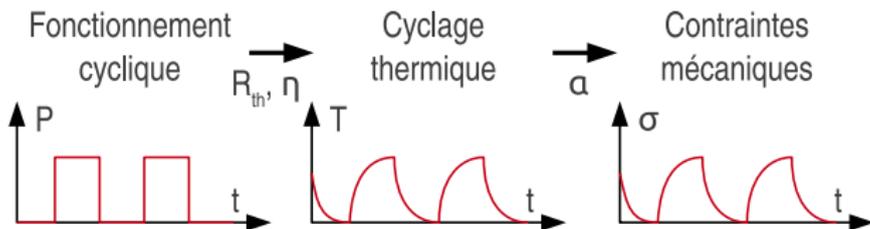
Température de repos  $T_1$



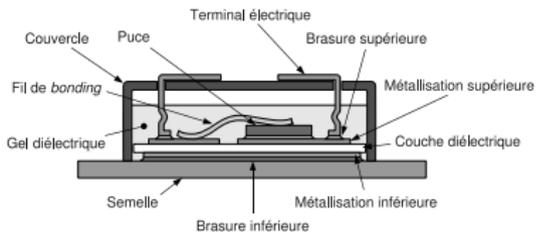
$T_2 > T_1$



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



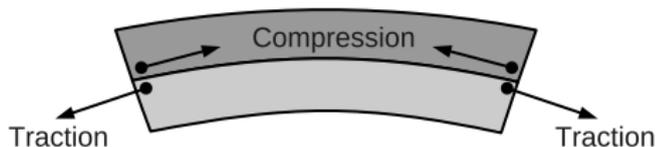
# Effet des coefficients de dilatation



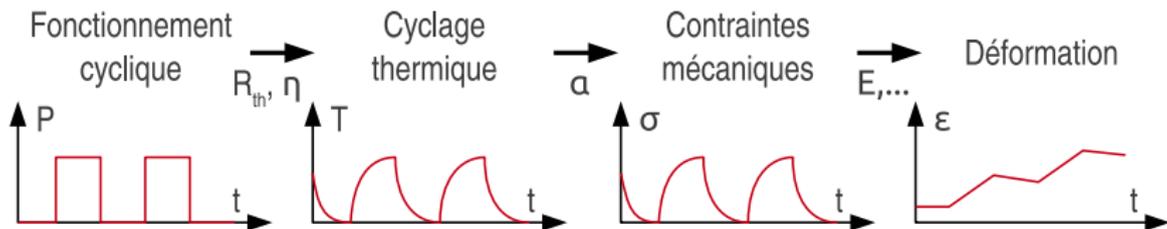
Température de repos  $T_1$



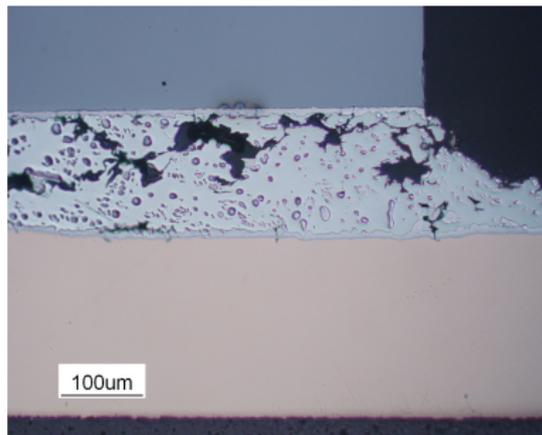
$T_2 > T_1$



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



# Effet des contraintes thermo-mécaniques

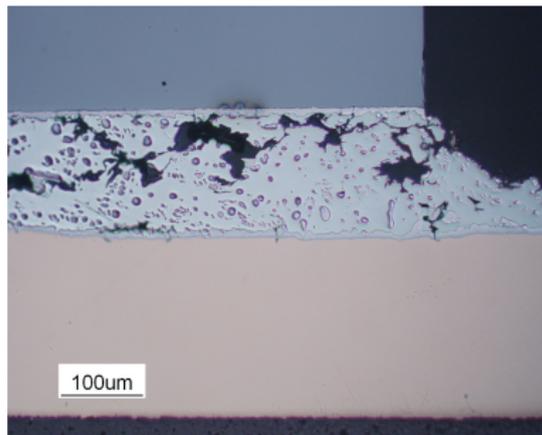


Source : Université de Nottingham

## 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



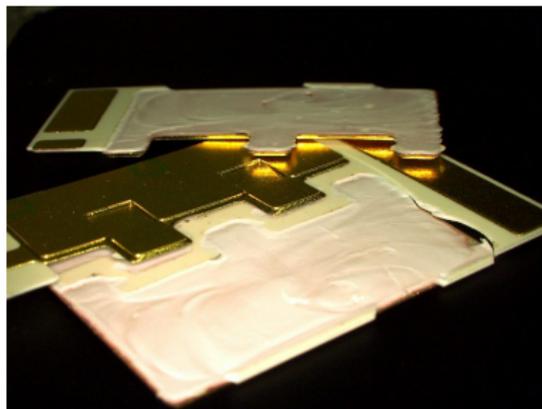
Source : Université de Nottingham

## Brasure puce-substrat

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

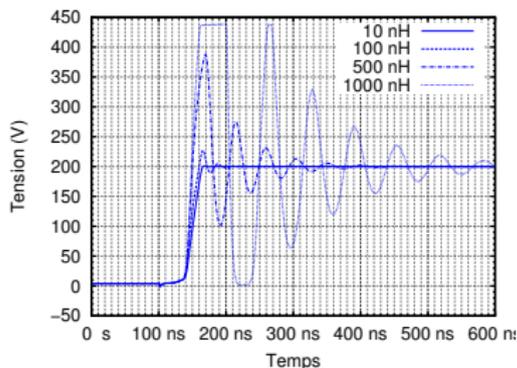
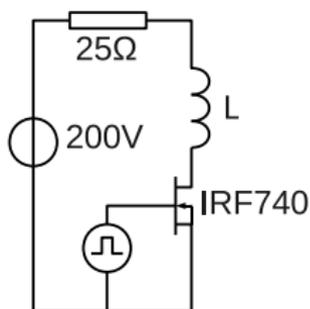
## Substrat céramique métallisé

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



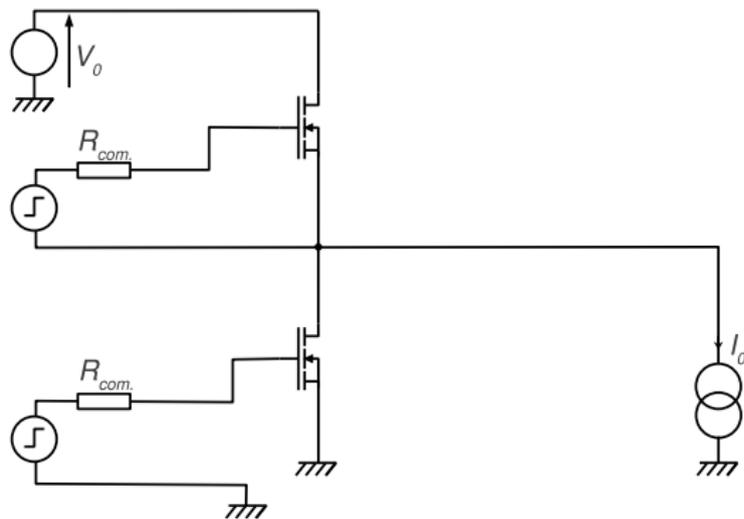
Source : Université de Nottingham

# Inductances parasites



- ▶ Tout conducteur constitue une résistance, une inductance, et l'armature d'un condensateur
- ▶ Suivant les gammes de courant/tension certains éléments sont prépondérants
- ▶ Une modélisation fine peut être nécessaire

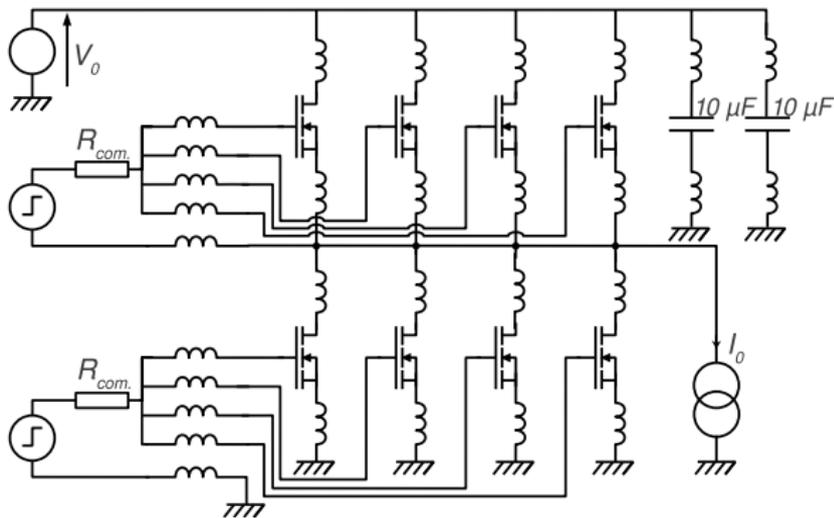
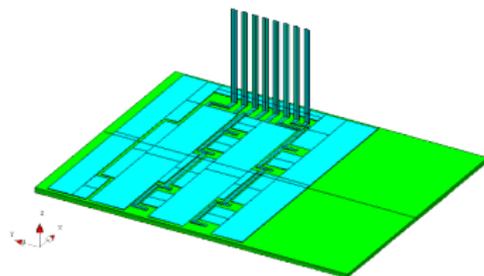
# Mise en parallèle



- ▶ onduleur 14 V ;
- ▶ 4 MOSFET par interrupteur ;
- ▶ modélisation du câblage inductif, résistif et capacitif.

# Mise en parallèle

- ▶ onduleur 14 V ;
- ▶ 4 MOSFET par interrupteur ;
- ▶ modélisation du câblage inductif, résistif et capacitif.

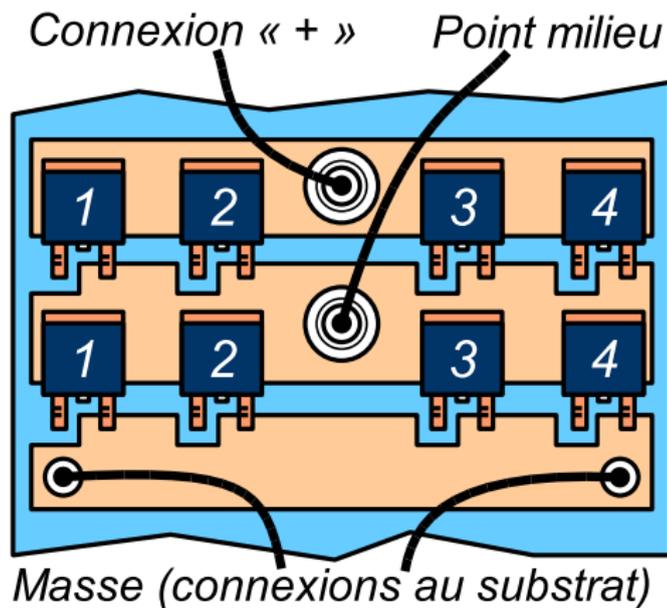


# Mise en parallèle

## Sources de déséquilibre

- ▶ variation de  $R_{DSon}$  entre transistors ;
  - ▶ min  $2\text{ m}\Omega$ ,
  - ▶ max  $3.2\text{ m}\Omega$ ,
- ▶ Résistances d'accès (pistes) différentes.

Jusqu'à 60 % d'écart en  
« pire cas »

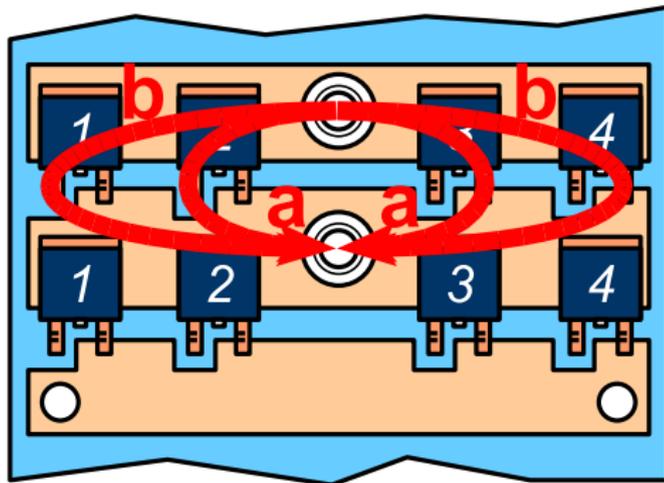


Forte influence des résistances parasites (boîtier + pistes)

## Sources de déséquilibre

- ▶ variation de  $R_{DSon}$  entre transistors ;
  - ▶ min 2 m $\Omega$ ,
  - ▶ max 3.2 m $\Omega$ ,
- ▶ Résistances d'accès (pistes) différentes.

Jusqu'à 60 % d'écart en  
« pire cas »

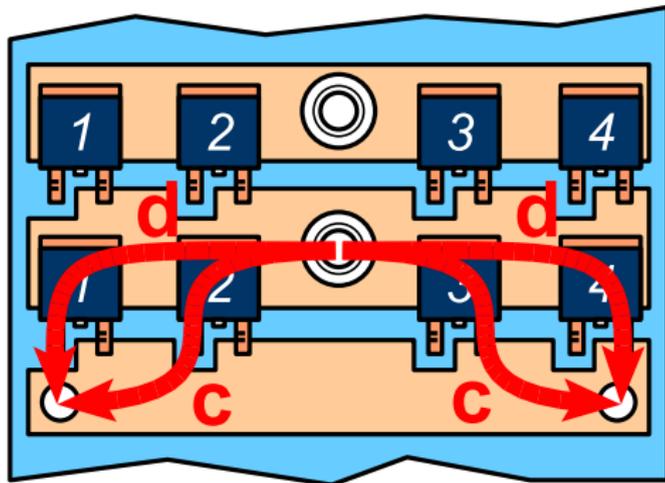


Forte influence des résistances parasites (boîtier + pistes)

## Sources de déséquilibre

- ▶ variation de  $R_{DSon}$  entre transistors ;
  - ▶ min  $2\text{ m}\Omega$ ,
  - ▶ max  $3.2\text{ m}\Omega$ ,
- ▶ Résistances d'accès (pistes) différentes.

Jusqu'à 60 % d'écart en  
« pire cas »



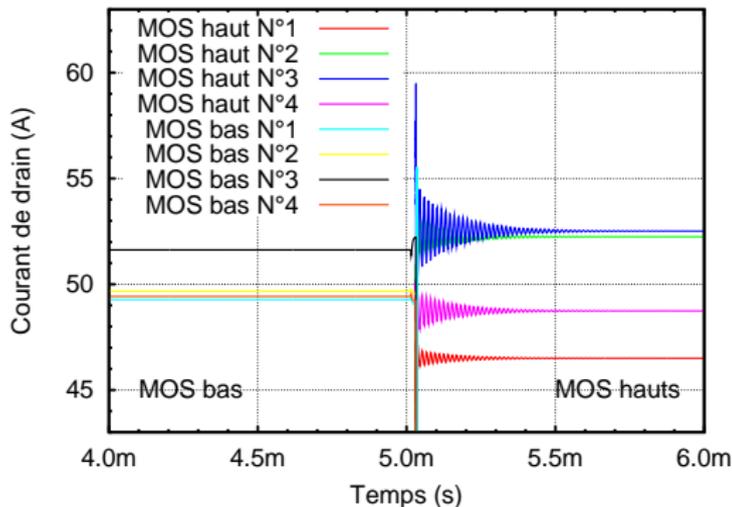
Forte influence des résistances parasites (boîtier + pistes)

# Mise en parallèle

## Sources de déséquilibre

- ▶ variation de  $R_{DS_{on}}$  entre transistors ;
  - ▶ min 2 m $\Omega$ ,
  - ▶ max 3.2 m $\Omega$ ,
- ▶ Résistances d'accès (pistes) différentes.

Jusqu'à 60 % d'écart en  
« pire cas »

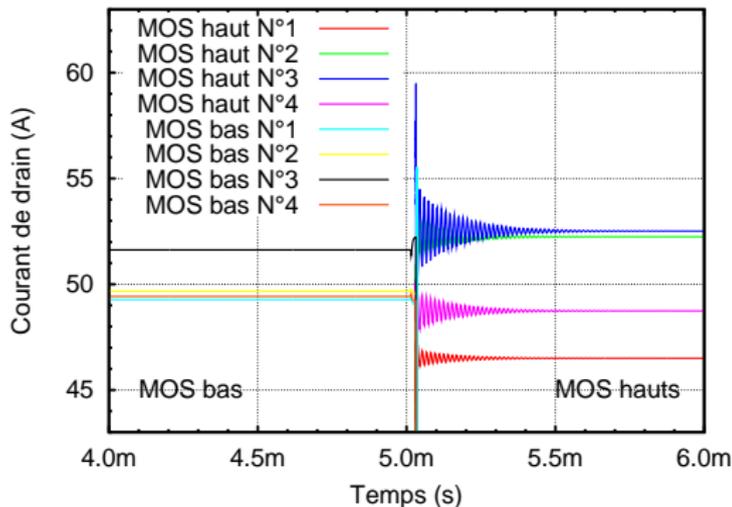


Forte influence des résistances parasites (boîtier + pistes)

## Sources de déséquilibre

- ▶ variation de  $R_{DS_{on}}$  entre transistors ;
  - ▶ min 2 m $\Omega$ ,
  - ▶ max 3.2 m $\Omega$ ,
- ▶ Résistances d'accès (pistes) différentes.

Jusqu'à 60 % d'écart en  
« pire cas »



**Forte influence des résistances parasites (boîtier + pistes)**

Introduction

Petit lexique du packaging de puissance

Considérations physiques

Aspects thermiques

Aspects thermo-mécaniques

Aspects électriques

**Éléments de technologie**

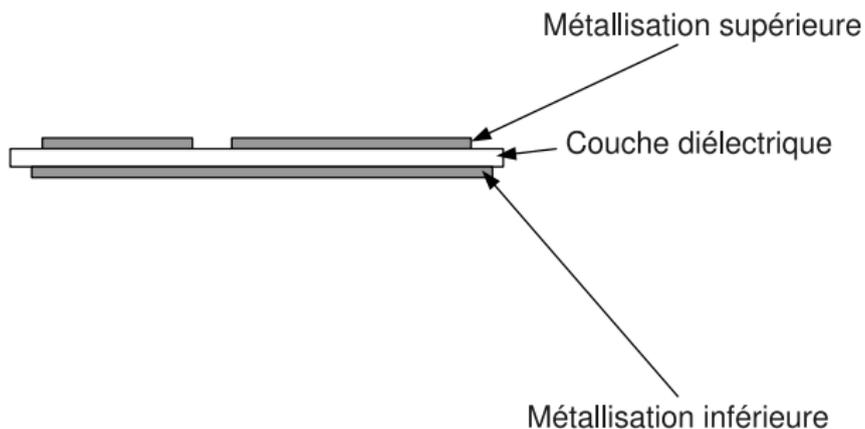
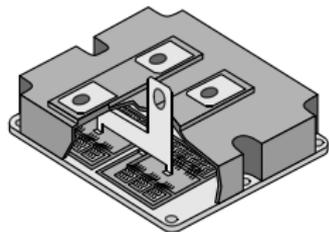
**Substrats**

**Interconnexions**

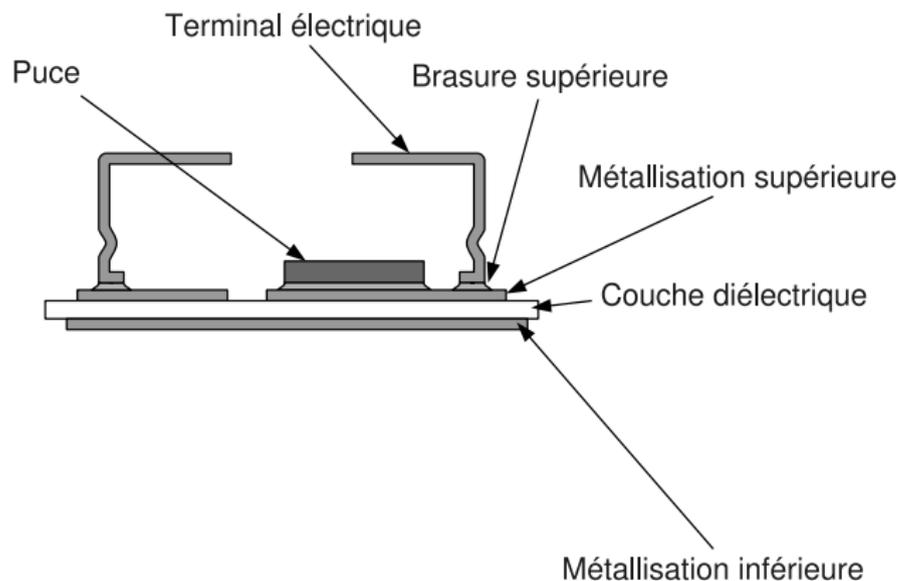
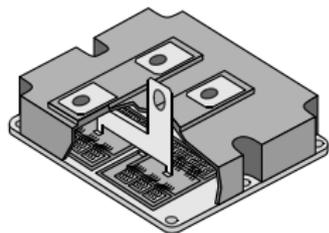
**Gestion thermique**

Évolutions, Recherche et Développement

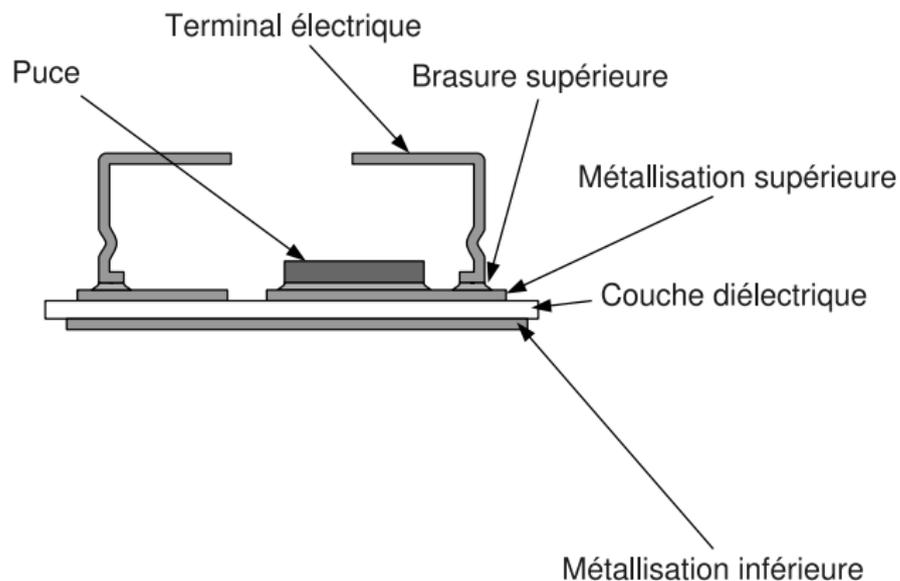
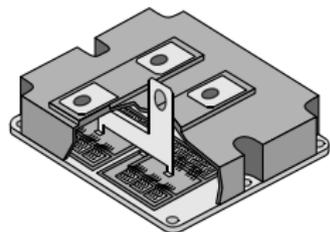
# Coupe d'un module de puissance



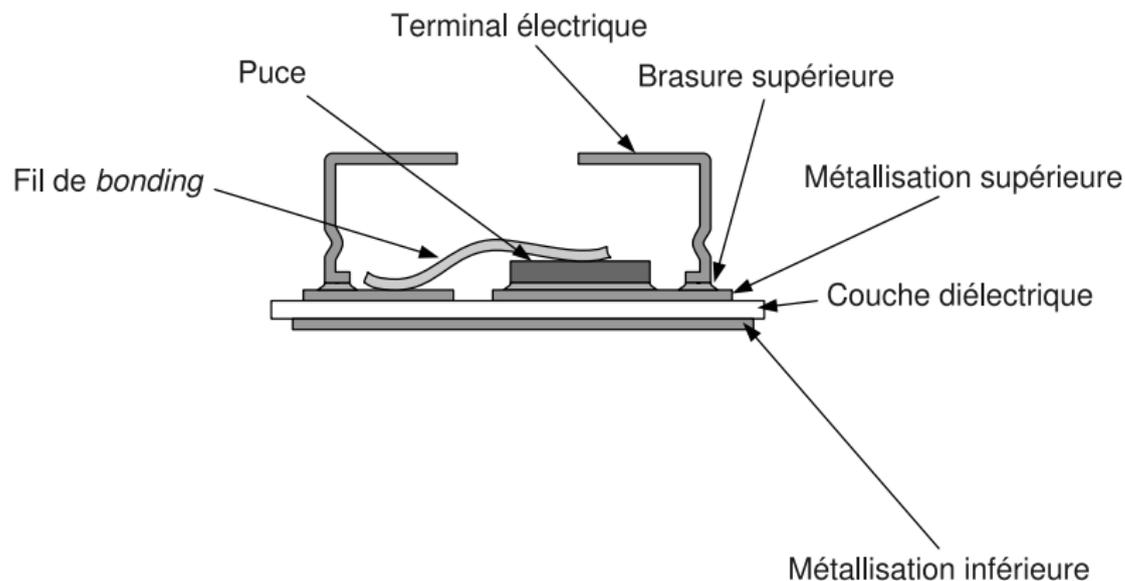
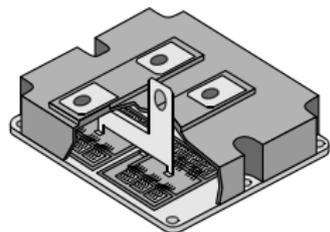
# Coupe d'un module de puissance



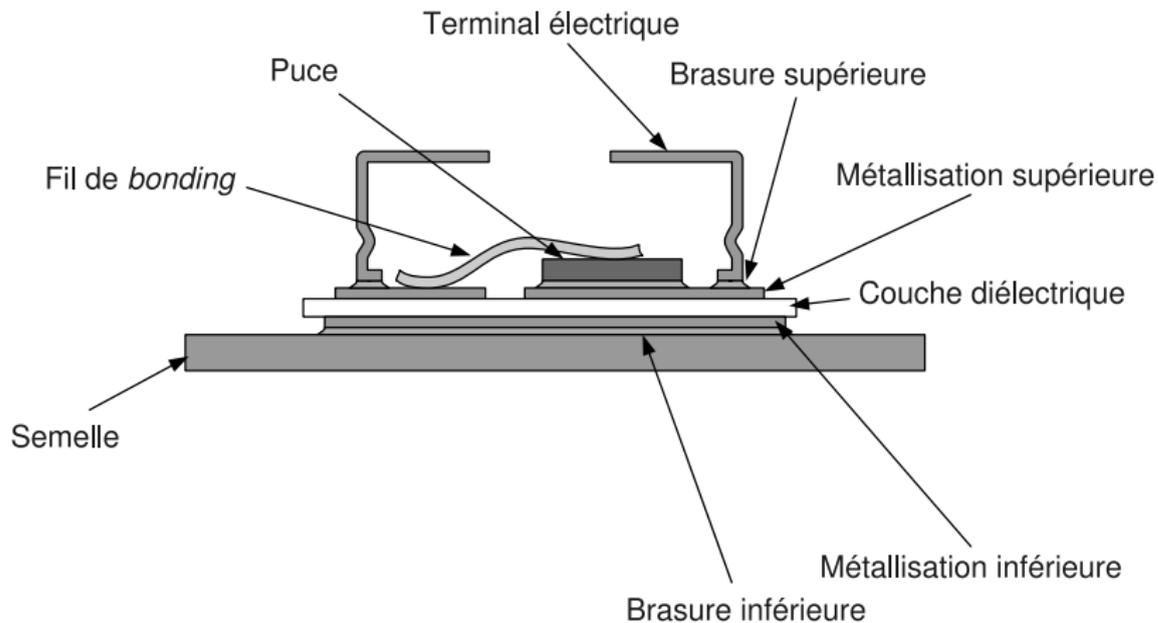
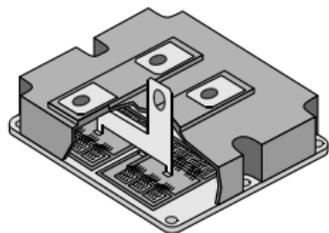
# Coupe d'un module de puissance



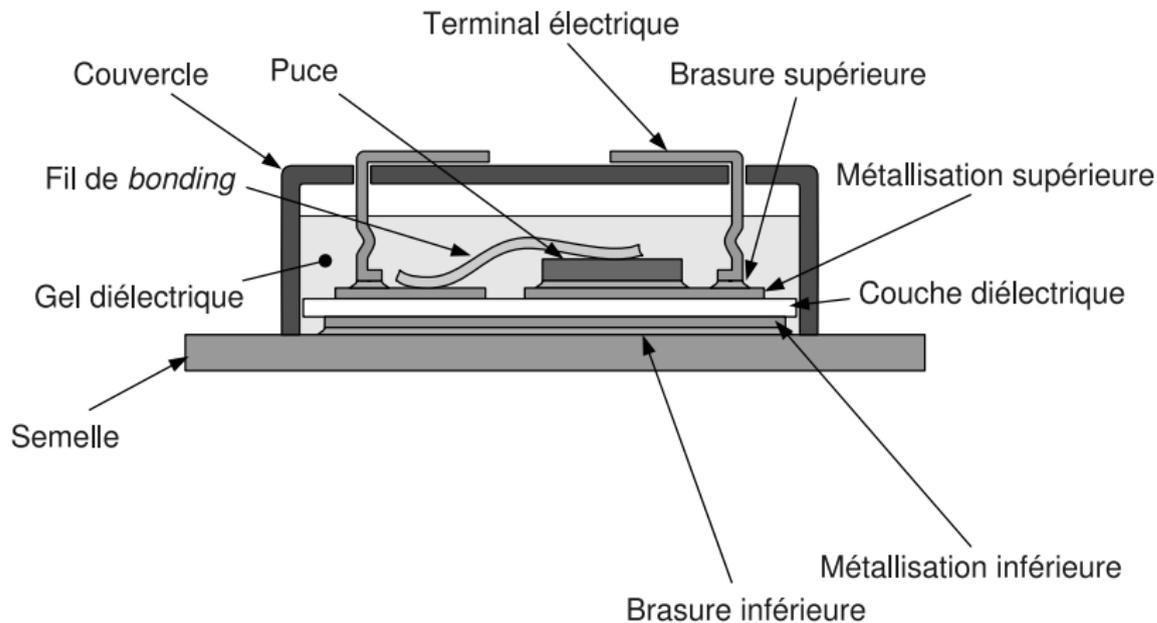
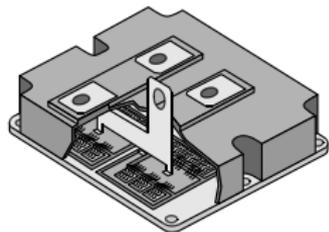
# Coupe d'un module de puissance



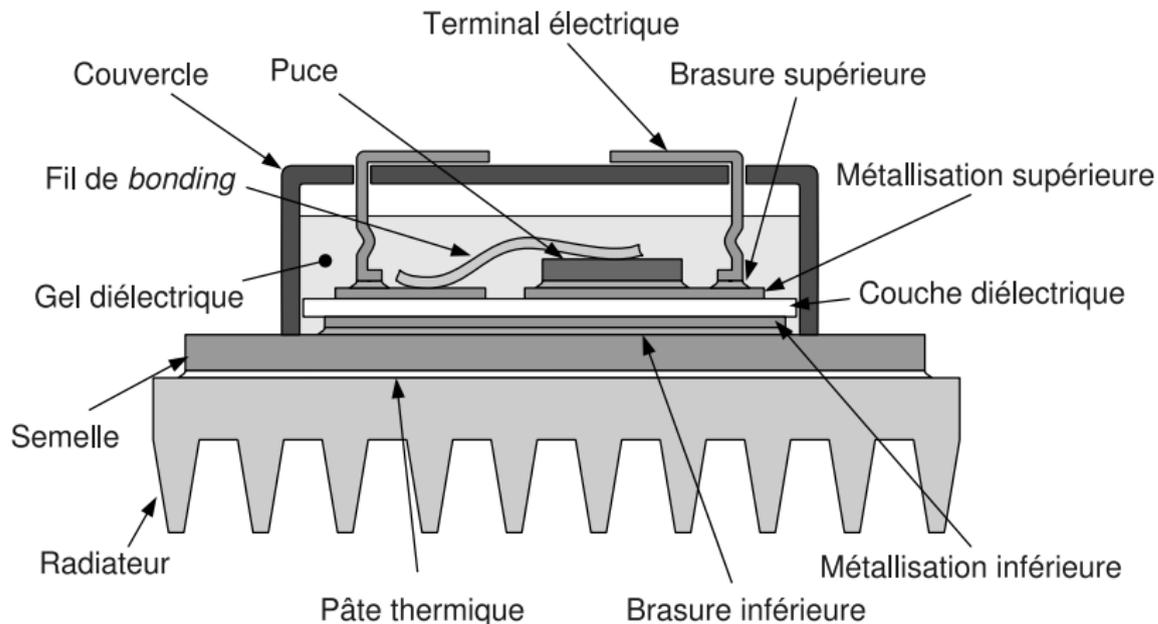
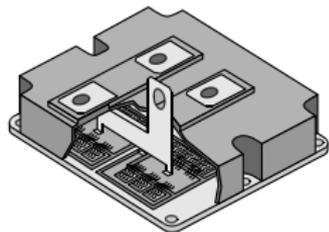
# Coupe d'un module de puissance

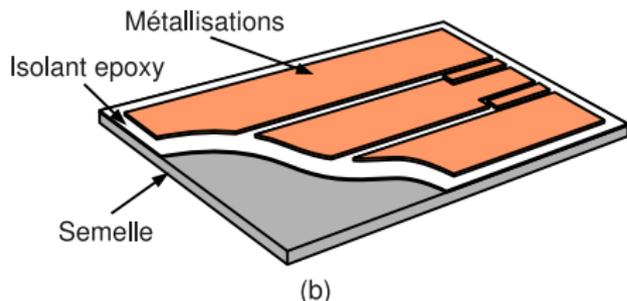
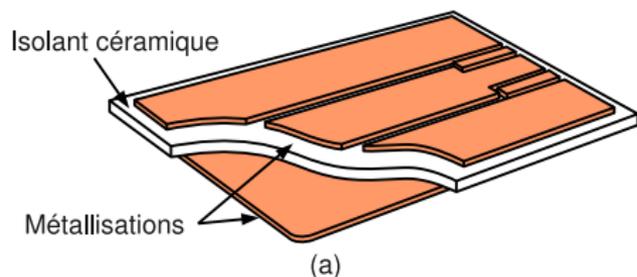


# Coupe d'un module de puissance



# Coupe d'un module de puissance





Plusieurs technologies :

► Les substrats céramiques (DBC, DBA, ...)

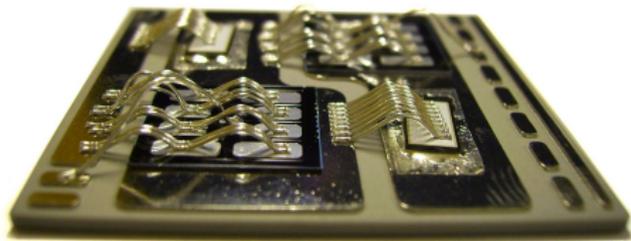
- céramique (0,3 à 1 mm)
- cuivre (0,1 à 0,3 mm)
- Bonnes performances thermiques et électriques
- Cher

► Les Substrats Métalliques Isolés (SMI)

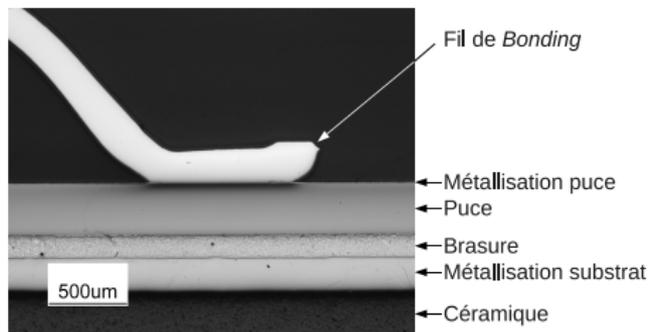
- aluminium (1 à 3 mm)
- isolant (0,1 mm)
- cuivre (0,035 à 0,2 mm)
- Performances moyennes
- Coef. de dilatation plus fort
- Moins cher

# Fils de *bonding*

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

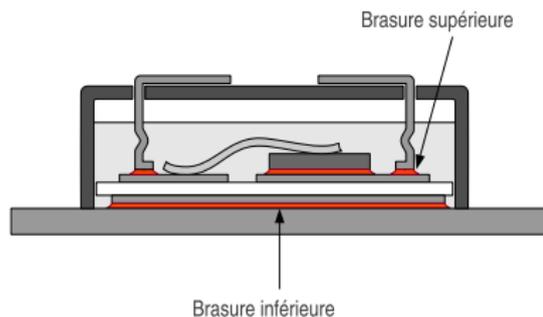


Source : Université Nottingham

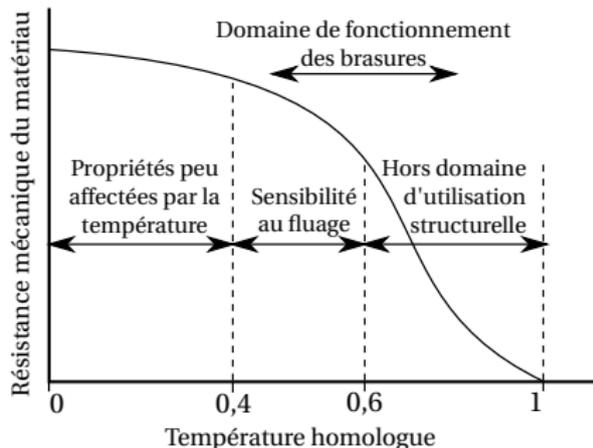


Source : Université Nottingham

- ▶ 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 – limites de fonctionnement



Source: [http://www.am1.ac.uk/courses/topics/0123\\_mpm/](http://www.am1.ac.uk/courses/topics/0123_mpm/)

- ▶ Les propriétés mécaniques diminuent avec la température
- ▶ Plus aucune tenue à la température de fusion ( $T_M$ )

▶ Température homologue :

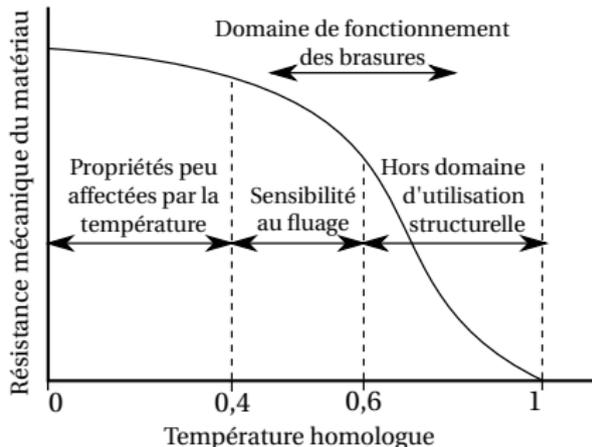
$$T_H = \frac{T_O[K]}{T_M[K]}$$

▶ Limite de fonctionnent fiable des brasures basse

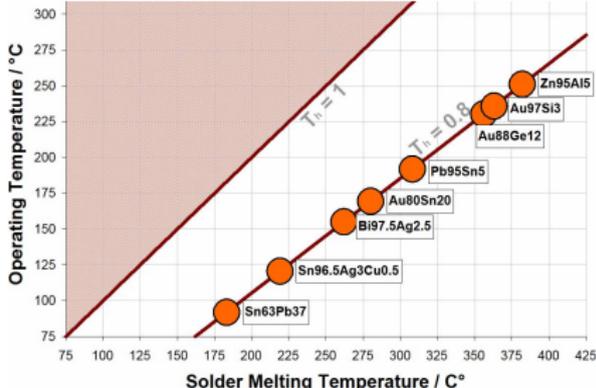
▶ ex :  $T_M=300^\circ\text{C}$  (573 K), pour  $T_H=0.8$  :  $T_O=185^\circ\text{C}$

▶ ex :  $T_M=183^\circ\text{C}$  (fil de brasure standard), pour  $T_H=0.8$  :  $T_O=92^\circ\text{C}$

# Les brasures – limites de fonctionnement



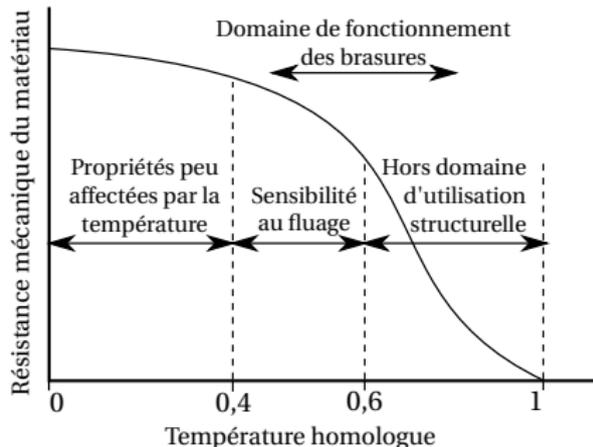
Source : [http://www.am1.ac.uk/courses/topics/0123\\_mpm/](http://www.am1.ac.uk/courses/topics/0123_mpm/)



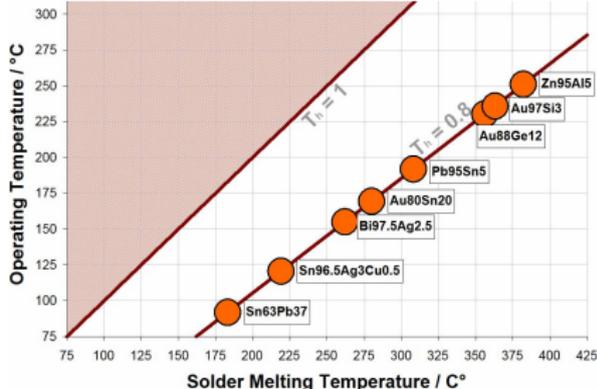
Source : Power Semiconductor Joining through Sintering of Silver Nanoparticles...  
M.Knoerr et al, CIPS 2010

- ▶ Les propriétés mécaniques diminuent avec la température
- ▶ Plus aucune tenue à la température de fusion ( $T_M$ )
- ▶ Température homologue :
 
$$T_H = \frac{T_O[K]}{T_M[K]}$$
- ▶ Limite de fonctionnent fiable des brasures basse
  - ▶ ex :  $T_M=300\text{ °C}$  (573 K), pour  $T_H=0.8$  :  $T_O=185\text{ °C}$
  - ▶ ex :  $T_M=183\text{ °C}$  (fil de brasure standard), pour  $T_H=0.8$  :  $T_O=92\text{ °C}$

# Les brasures – limites de fonctionnement



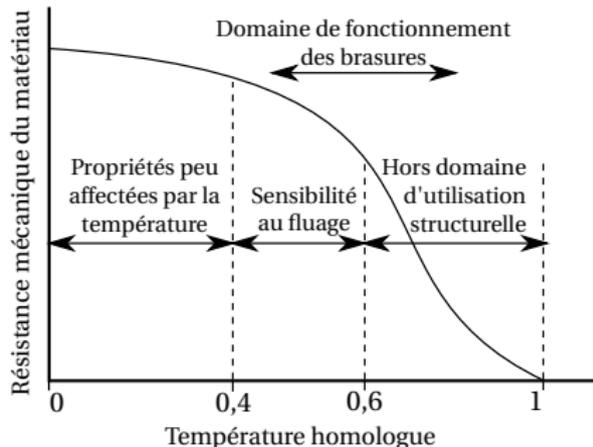
Source : [http://www.am1.ac.uk/courses/topics/0123\\_mpm/](http://www.am1.ac.uk/courses/topics/0123_mpm/)



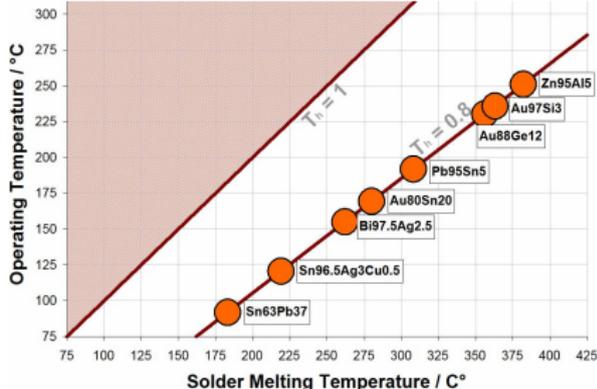
Source : Power Semiconductor Joining through Sintering of Silver Nanoparticles...  
M.Knoerr et al, CIPS 2010

- ▶ Les propriétés mécaniques diminuent avec la température
- ▶ Plus aucune tenue à la température de fusion ( $T_M$ )
- ▶ Température homologue : 
$$T_H = \frac{T_O[K]}{T_M[K]}$$
- ▶ Limite de fonctionnent fiable des brasures basse
- ▶ ex :  $T_M=300\text{ °C}$  (573 K), pour  $T_H=0.8$  :  $T_O=185\text{ °C}$
- ▶ ex :  $T_M=183\text{ °C}$  (fil de brasure standard), pour  $T_H=0.8$  :  $T_O=92\text{ °C}$

# Les brasures – limites de fonctionnement



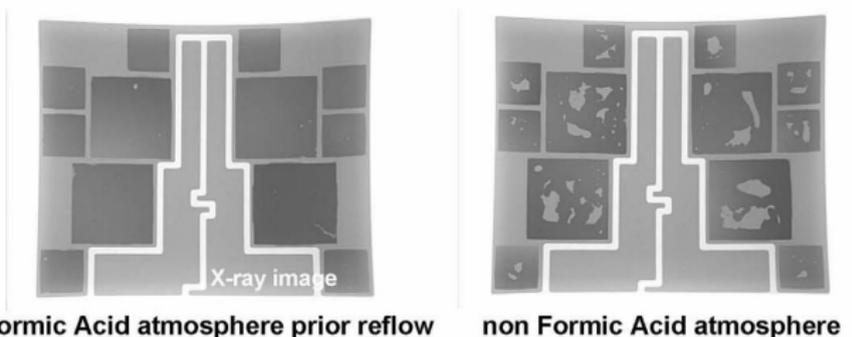
Source : [http://www.am1.ac.uk/courses/topics/0123\\_mpm/](http://www.am1.ac.uk/courses/topics/0123_mpm/)



Source : Power Semiconductor Joining through Sintering of Silver Nanoparticles...  
M.Knoerr et al, CIPS 2010

- ▶ Les propriétés mécaniques diminuent avec la température
- ▶ Plus aucune tenue à la température de fusion ( $T_M$ )
- ▶ Température homologue : 
$$T_H = \frac{T_O[K]}{T_M[K]}$$
- ▶ Limite de fonctionnent fiable des brasures basse
- ▶ ex :  $T_M=300\text{ °C}$  (573 K), pour  $T_H=0.8$  :  $T_O=185\text{ °C}$
- ▶ ex :  $T_M=183\text{ °C}$  (fil de brasure standard), pour  $T_H=0.8$  :  $T_O=92\text{ °C}$

## Formic Acid atmosphere prior reflow versus non

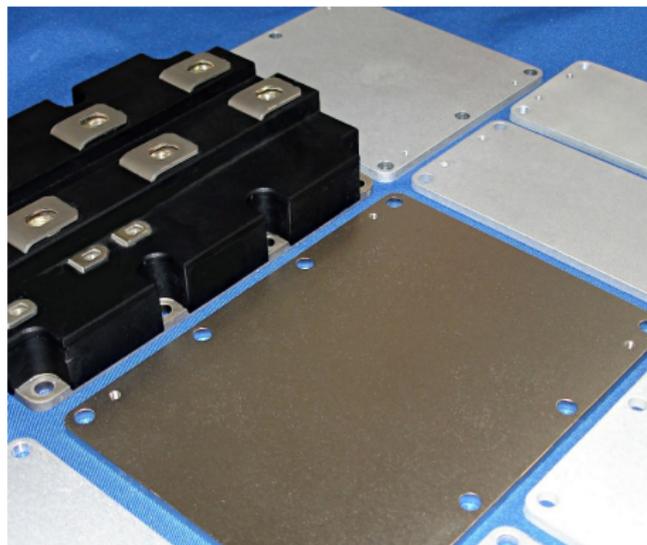


void free solder joints even without vacuum prior and during reflow

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

risque de vides 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. . .)



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

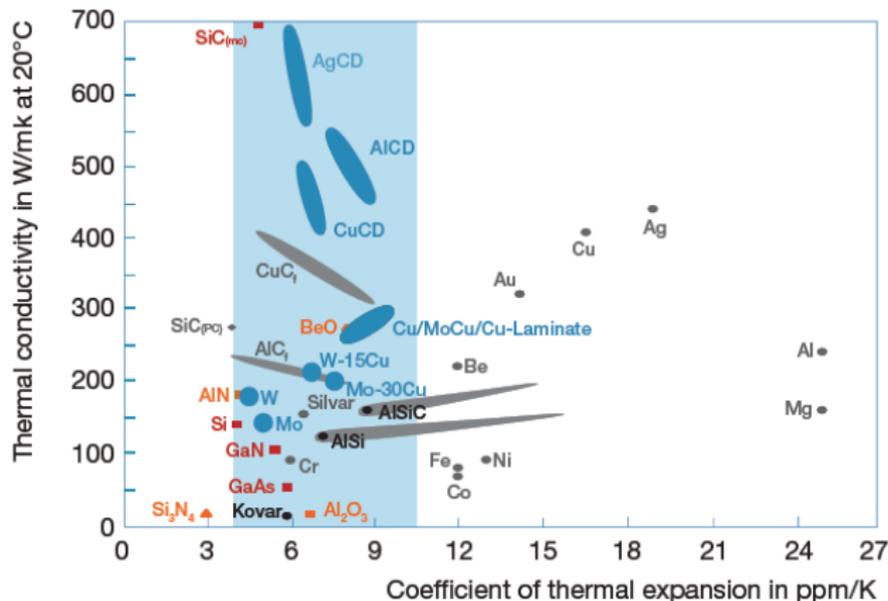
## Rôles :

- ▶ 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

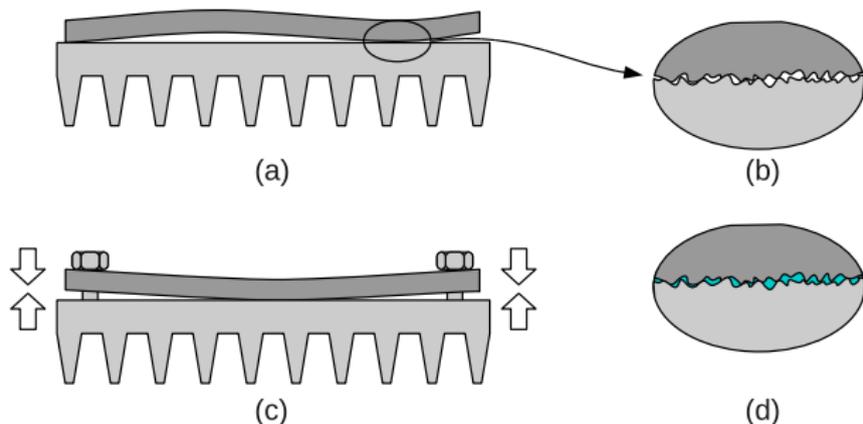
# Semelle – Choix des matériaux



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'AISIc 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



Delft University of Technology

Infineon

Page 9



# Circuit de refroidissement

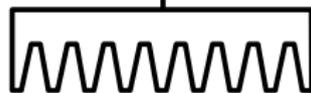
Transfert de chaleur d'une ou plusieurs **sources chaudes vers l'extérieur du système**

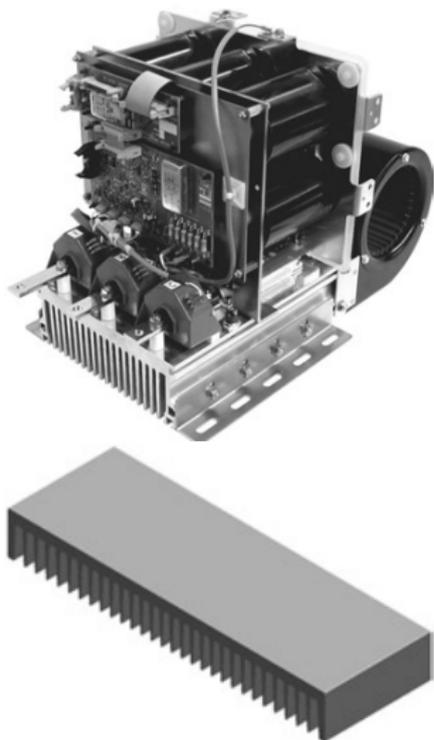
- ▶ extérieur = air ambiant (sauf rares cas)
- ▶ circuit plus ou moins compliqué :
  - ▶ composant attaché à un radiateur
  - ▶ composant/circuit d'eau/radiateur
  - ▶ composant/caloduc/radiateur
  - ▶ composant immergé/radiateur
  - ▶ ...
- ▶ Intérêt des circuits plus complexes :
  - ▶ éloignement source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

Source chaude



Source froide





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**

Source : "Définition d'un dissipateur thermique en milieu industriel", J.-F. Roche, Techniques de l'ingénieur, D3 117

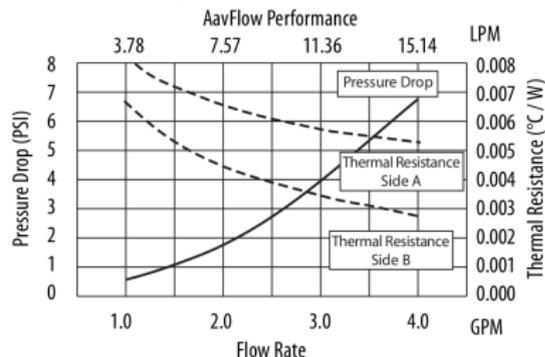
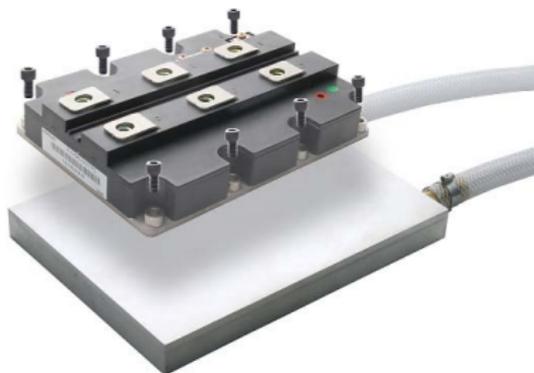
# Efficacité des méthodes de refroidissement

Tableau 5 – Valeurs de  $h$  selon le mode de refroidissement

Mode de refroidissement	Fluide	$h$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )
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

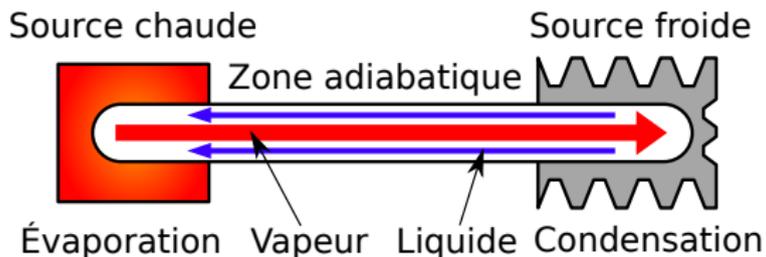
- ▶ Résistance thermique de transfert convectif :  $R_{Th} = \frac{1}{h \times S}$ , avec  $h$  coefficient d'échange et  $S$  surface d'échange
- ▶ Systèmes liquides beaucoup plus efficaces
- ▶ Convection forcée : utilisation de pompes, de ventilateurs. . .
- ▶ pour réduire  $R_{Th}$ , on peut augmenter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

# Refroidissement liquide

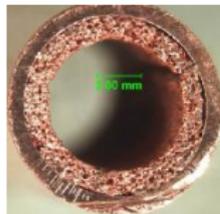


Source : Aavid Thermalloy, AavFlow Liquid Cold Plates

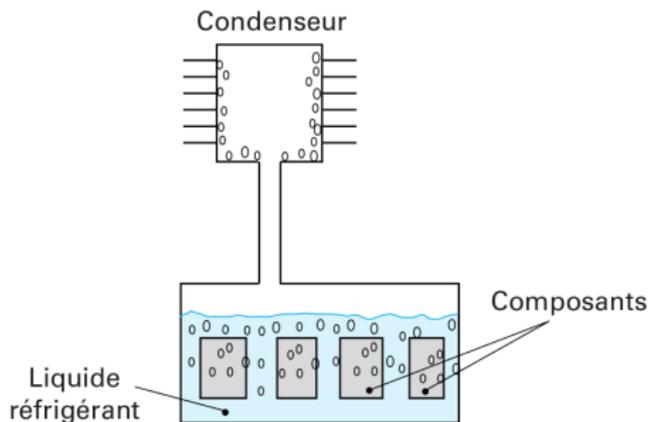
- ▶ Circuit comprenant :
  - ▶ Plaque(s) à eau
  - ▶ Tuyauterie, pompe
  - ▶ Échangeur eau-air
- ▶  $R_{Th}$  de la plaque très faible
- ▶ Avantages :
  - ▶ fort effet d'étalement thermique
  - ▶ faibles dimensions au niveau du module
- ▶ inconvénients :
  - ▶ Système actif (fiabilité, rendement)
  -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



- ▶ 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. . .)

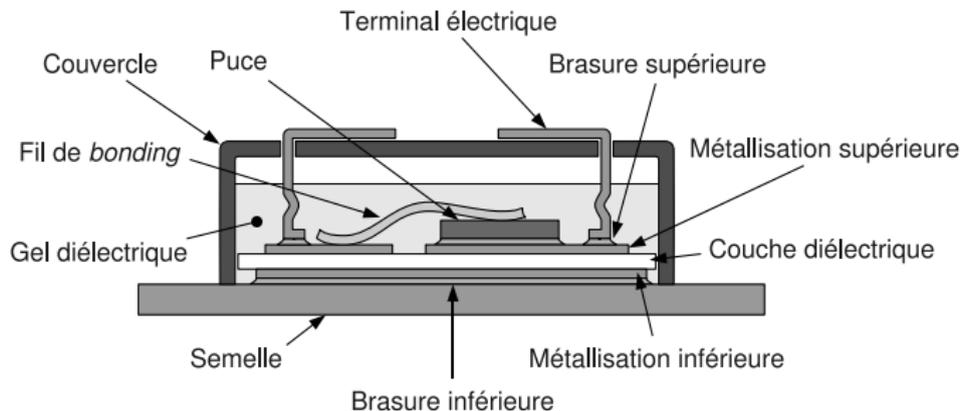


# Refroidissement par immersion



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

# Et le reste ?



## Nombreux autres éléments

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

Introduction

Petit lexique du packaging de puissance

Considérations physiques

- Aspects thermiques

- Aspects thermo-mécaniques

- Aspects électriques

Éléments de technologie

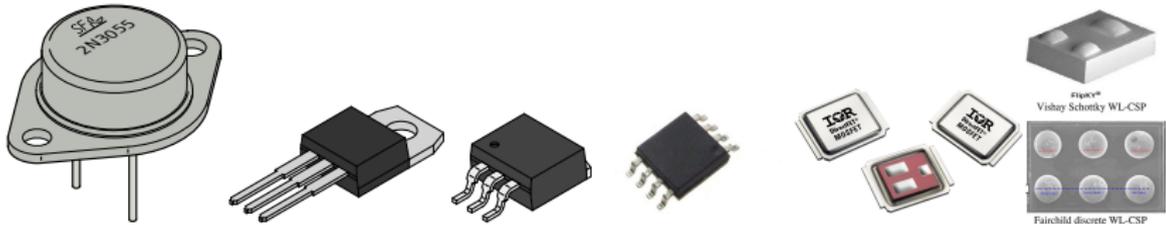
- Substrats

- Interconnexions

- Gestion thermique

Évolutions, Recherche et Développement

# Évolution des composants discrets

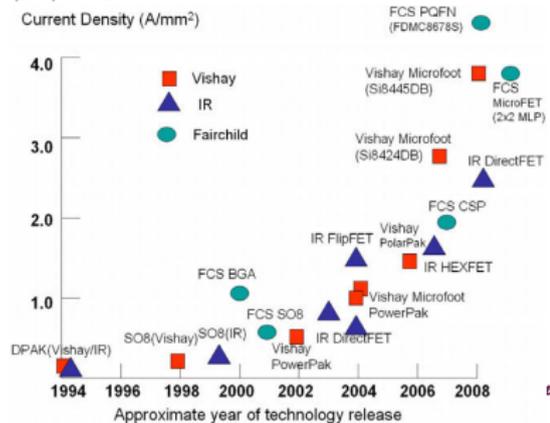


source : wikimedia commons pour tous les boîtiers sauf le Directfet, International Rectifier, et le WL-CSP, voir ci-dessous

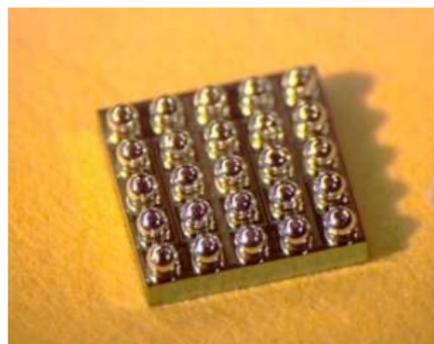
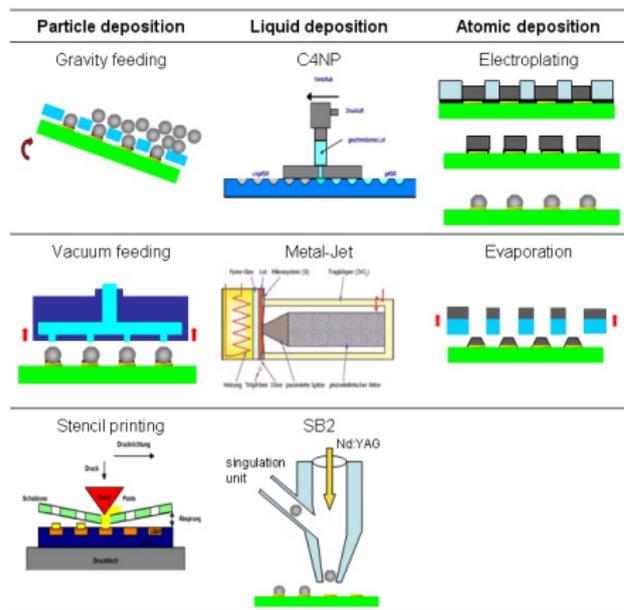
Package type	Volume (mm <sup>3</sup> )	molding compound%	silicon %	leadframe %	interconnect %
DPAK	90	75	4	20	1
SO8 (wire)	28	83	6	10	1
SO8 (clip)	28	70	6	20	2
MOSFET BGA	20	0	40	50	10
WL-CSP	20	0	82	0	18

source : "Trends of power semiconductor wafer level packaging", Yong LIU, Microelectronics Reliability 50 (2010) 514–521

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



# Le Wafer-Level Packaging

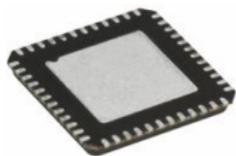


- ▶ Procédé collectif
- ▶ Orienté faible tension/puissance
- ▶ Nombreux procédés de réalisation

Source : Wafer Level Technologies : Solderable Metallizations, Power Bumping and Balling, Wolfgang Reinert, ECPE Workshop Adv. Power Electr. Pack., Paris, 30/09/09

# Après le *flip-chip*, l'enterré

## Interconnect Evolution

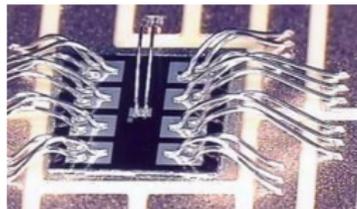


chip & wire

First level chip interconnection technologies inside a package:



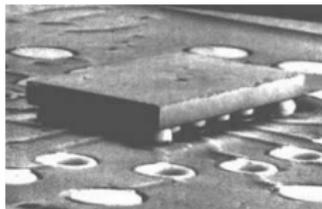
established since  
40 years



flip chip



smallest in 2D



chip embedding



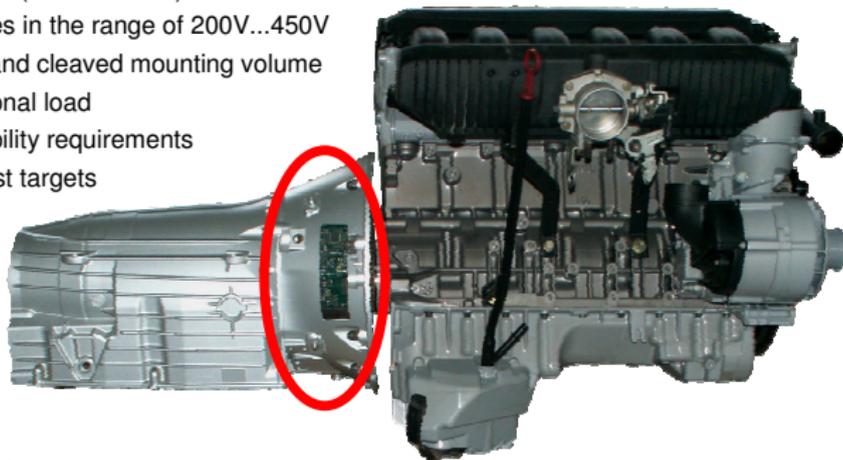
smallest in 3D



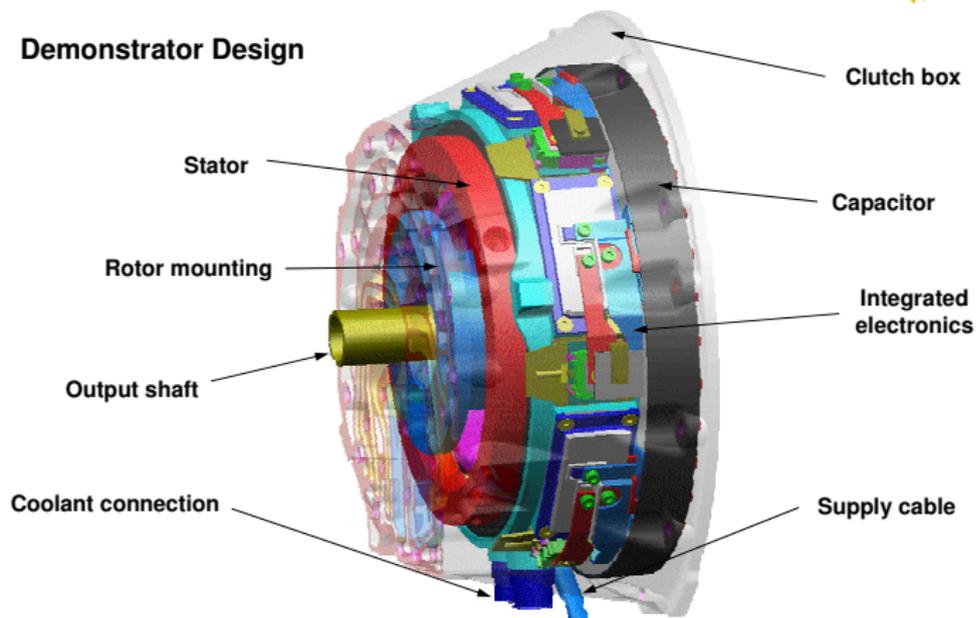
Advanced Power Electronics Packaging Workshop, Paris, France, September 30, 2009  
Lars Böttcher, System Integration & Interconnection Technologies  
lars.boettcher@izm.fraunhofer.de

## 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

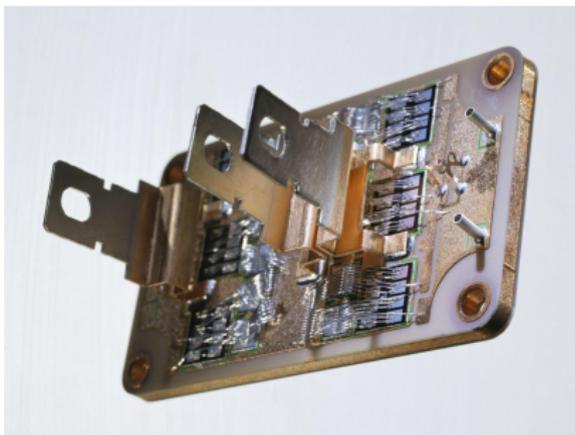


## Demonstrator Design



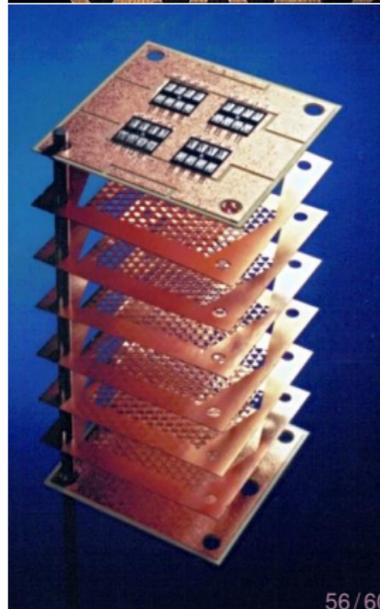
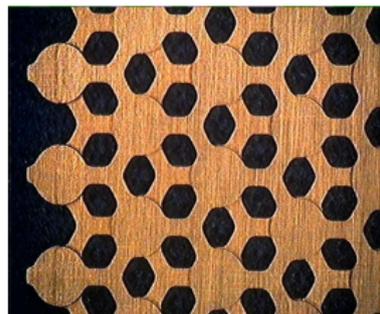
ECPE, 9/2009, Page 8

# Le refroidissement intégré – 1

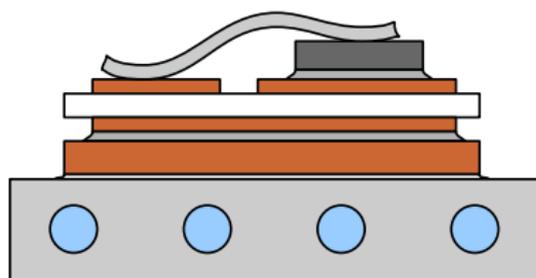


Source : Schulz-Harder, J. Ceramic Substrates and Micro Channel Cooler Curamik Electronics GmbH, 2006

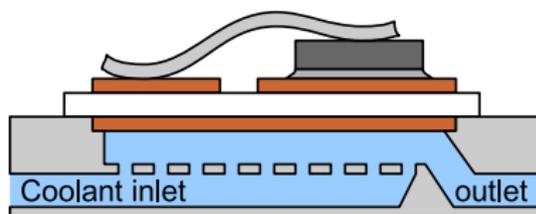
- ▶ fusionner le substrat, la semelle et la plaque à eau
- ▶ Moins d'interfaces thermiques à traverser
- ▶ Avec des puces Si, on peut évacuer jusqu'à 3 kW sur une surface de  $5 \times 5 \text{ cm}^2$



## Le refroidissement intégré – 2



Classical liquid-cooling



Direct cooling

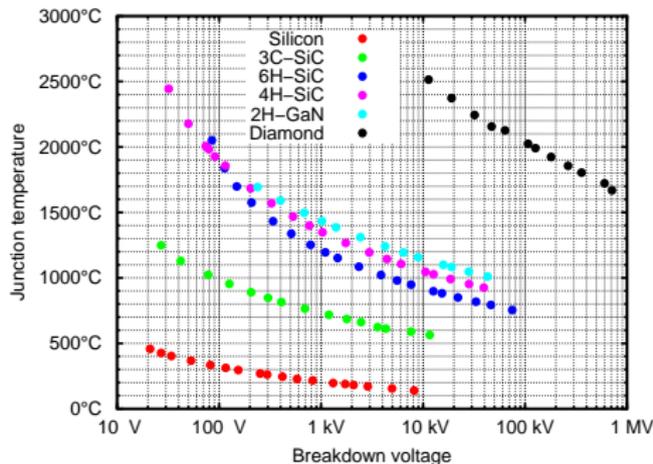
Mettre le fluide de refroidissement en contact direct avec le substrat

- ▶ 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

# Vers les hautes températures

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

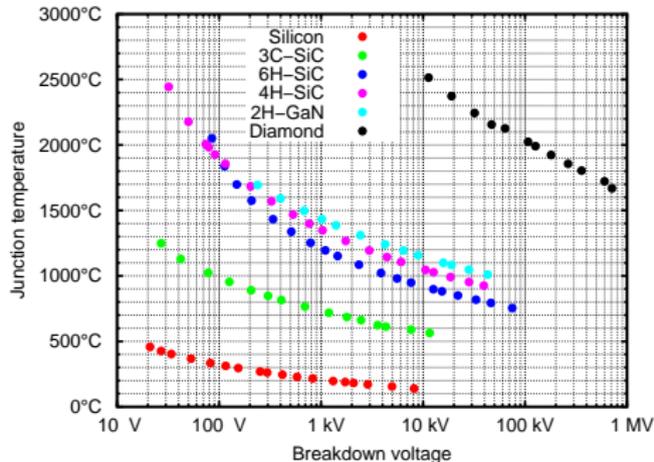
- ▶ Les limites actuelles sont *packaging*
- ▶ Souvent fort cyclage thermique
- ▶ Applications
  - ▶ Aéronautique
  - ▶ Automobile
  - ▶ Forage
  - ▶ ...



# Vers les hautes températures

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

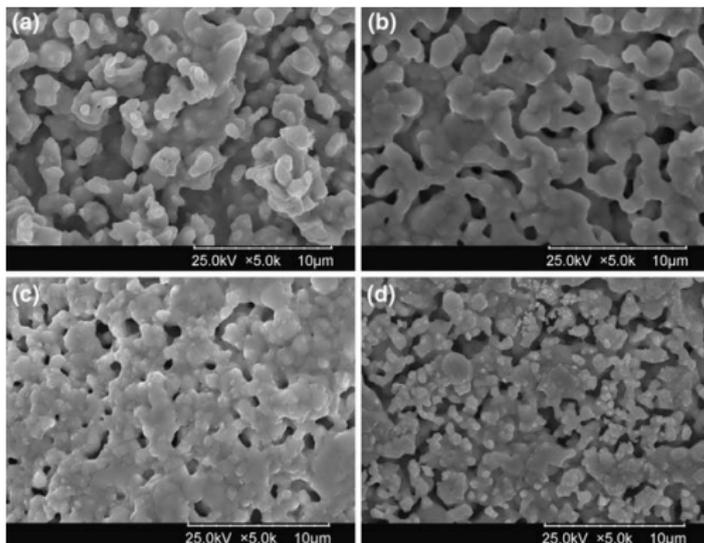
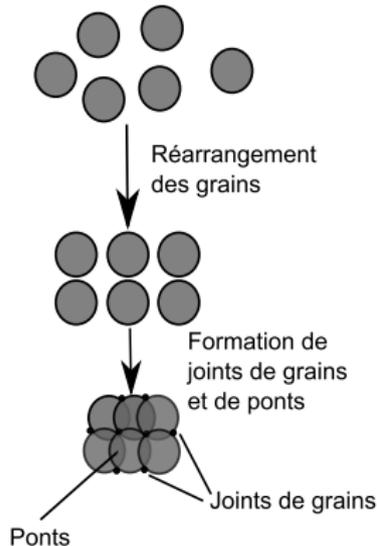
- ▶ Les limites actuelles sont *packaging*
- ▶ Souvent fort cyclage thermique
- ▶ Applications
  - ▶ Aéronautique
  - ▶ Automobile
  - ▶ Forage
  - ▶ ...



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 – 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

- ▶ Le packaging est un (sinon le) point limitant les performances des systèmes d'électronique de puissance
  - ▶ En tenir compte en phase de design
  - ▶ Beaucoup de degrés de liberté pour optimiser votre système
- ▶ C'est un sujet transversal (électricité, mécanique, thermique, matériaux. . .)
  - ▶ Très peu de personnes ont ce type de formation
  - ▶ Ces compétences sont demandées par beaucoup d'industriels (pas uniquement fabricants de modules)
- ▶ C'est un domaine en pleine évolution
  - ▶ une recherche et développement très active
  - ▶ Beaucoup d'acteurs européens

# Conclusion

- ▶ Le packaging est un (sinon le) point limitant les performances des systèmes d'électronique de puissance
  - ▶ En tenir compte en phase de design
  - ▶ Beaucoup de degrés de liberté pour optimiser votre système
- ▶ C'est un sujet transversal (électricité, mécanique, thermique, matériaux. . .)
  - ▶ Très peu de personnes ont ce type de formation
  - ▶ Ces compétences sont demandées par beaucoup d'industriels (pas uniquement fabricants de modules)
- ▶ C'est un domaine en pleine évolution
  - ▶ une recherche et développement très active
  - ▶ Beaucoup d'acteurs européens

- ▶ Le packaging est un (sinon le) point limitant les performances des systèmes d'électronique de puissance
  - ▶ En tenir compte en phase de design
  - ▶ Beaucoup de degrés de liberté pour optimiser votre système
- ▶ C'est un sujet transversal (électricité, mécanique, thermique, matériaux. . .)
  - ▶ Très peu de personnes ont ce type de formation
  - ▶ Ces compétences sont demandées par beaucoup d'industriels (pas uniquement fabricants de modules)
- ▶ C'est un domaine en pleine évolution
  - ▶ une recherche et développement très active
  - ▶ Beaucoup d'acteurs européens