De la physique d'endommagement des composants de puissance à la sûreté de fonctionnement des convertisseurs statiques

CM2.1

Technologie des composants actifs et leur assemblage

Packaging

Cyril BUTTAY

Depuis 80 ans, nos connaissances bâtissent de nouveaux mondes

Saint-Pierre d'Oléron
Du 17 au 21 Juin 2019

Sommaire

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

Sommaire

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

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

Sommaire

Introduction

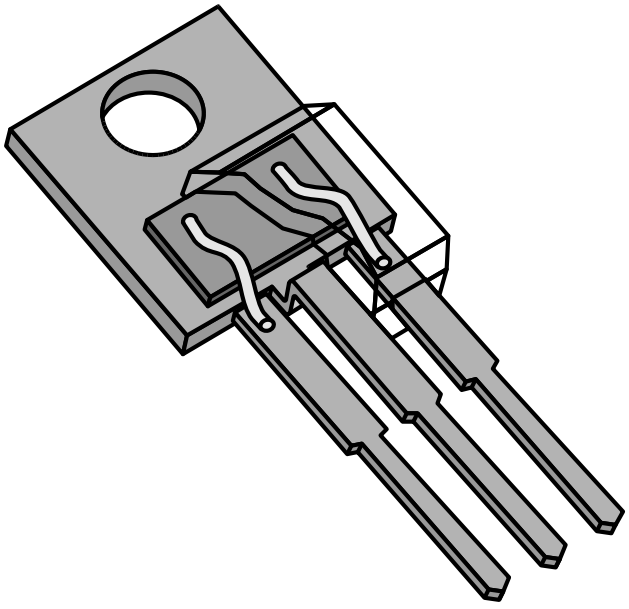
Petit lexique du packaging de puissance

Considérations physiques
- Aspects thermiques
- Aspects thermo-mécaniques
- Aspects électriques

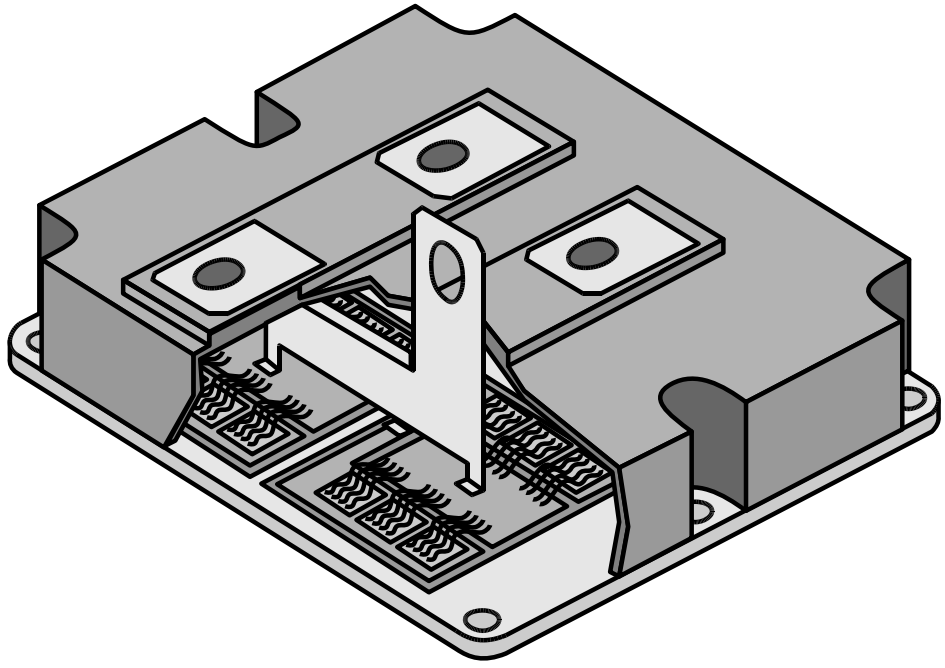
Éléments de technologie
- Substrats
- Interconnexions
- Gestion thermique

Évolutions, Recherche et Développement

Deux classes : discrets et modules



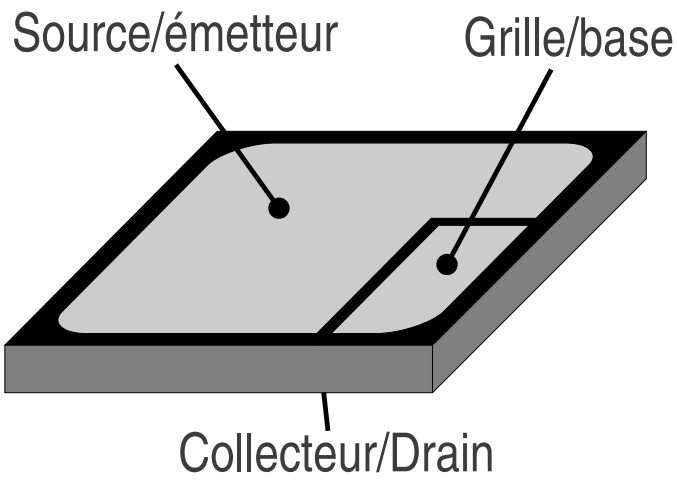
- Un composant élémentaire (transistor, diode) par boîtier
- (souvent) Pas d'isolation
- puissances faibles ou très fortes

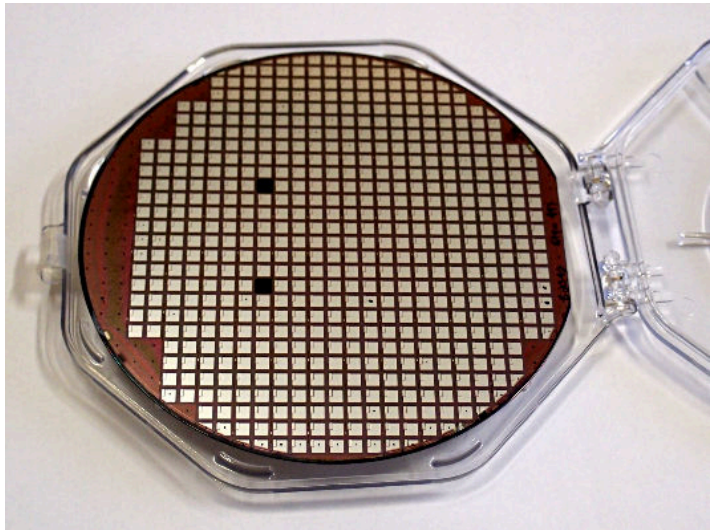


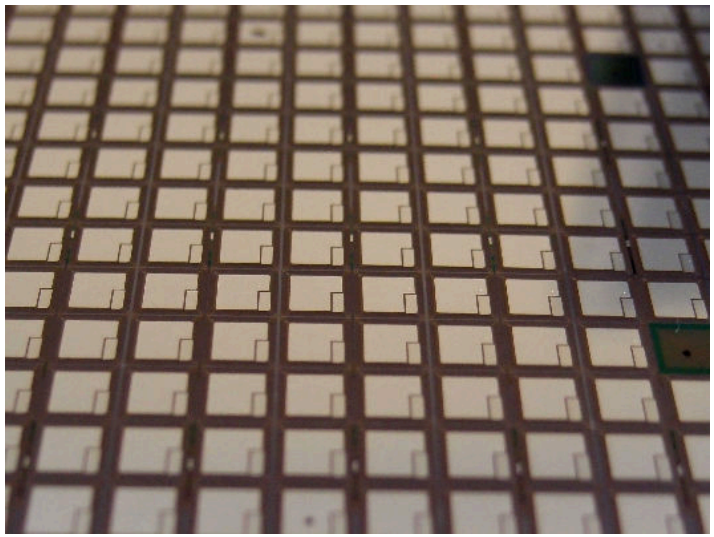
- Plusieurs puces par boîtier
- Forme un circuit ou un seul composant élémentaire
- Assure l'isolation électrique
- Puissances moyennes à fortes

Puces de puissance

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

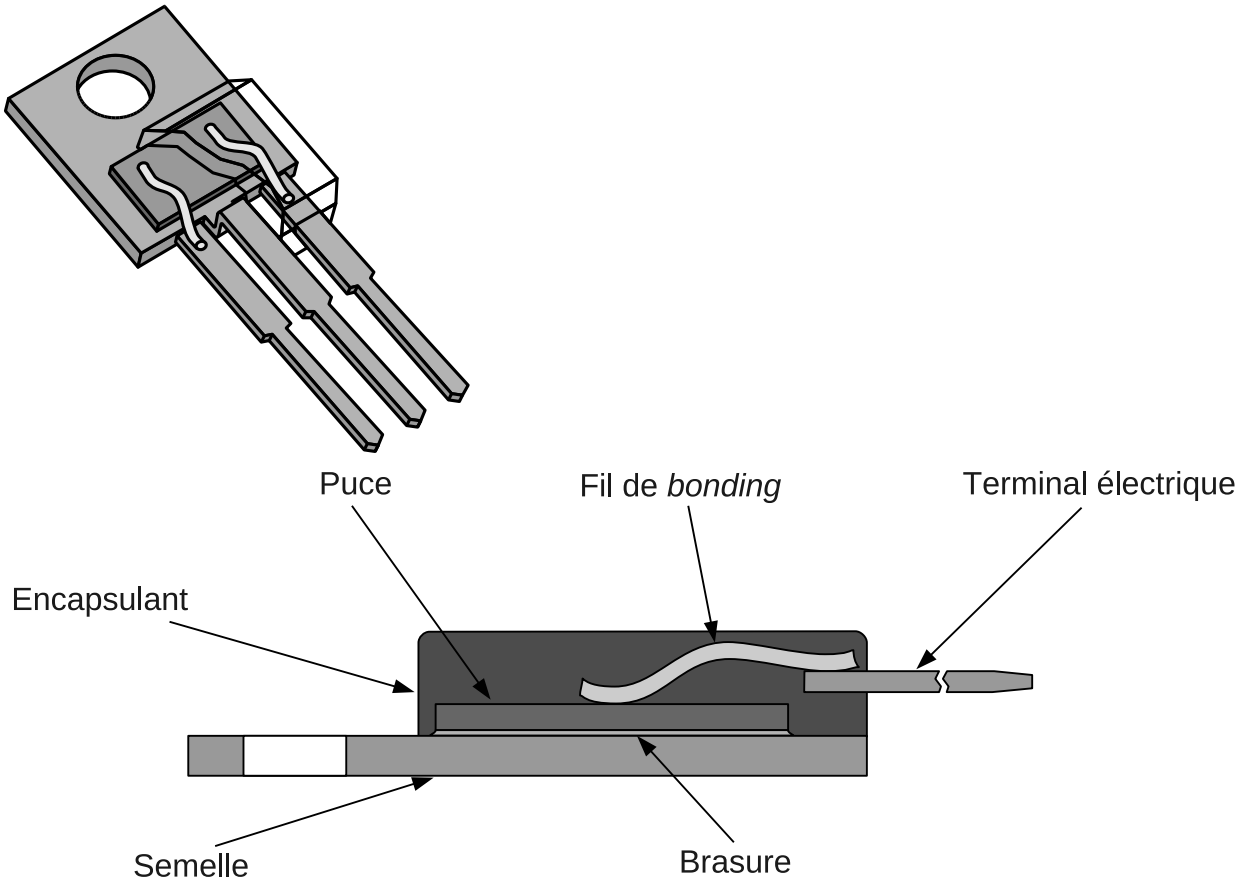




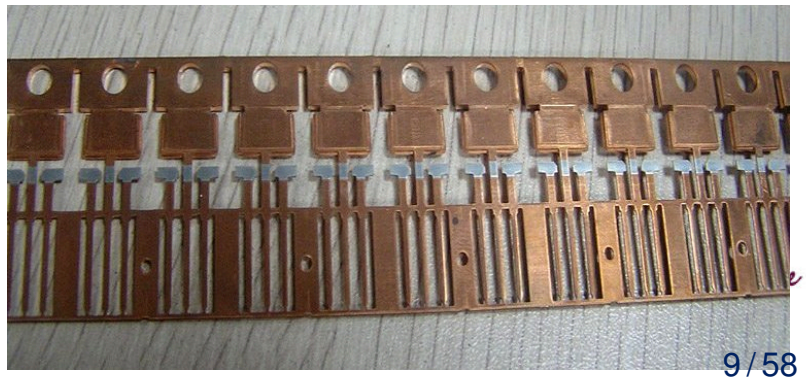


wafer IGBT International Rectifier, puces de 5x5 mm, wafer diamètre 6 pouces

Structure d'un boîtier discret

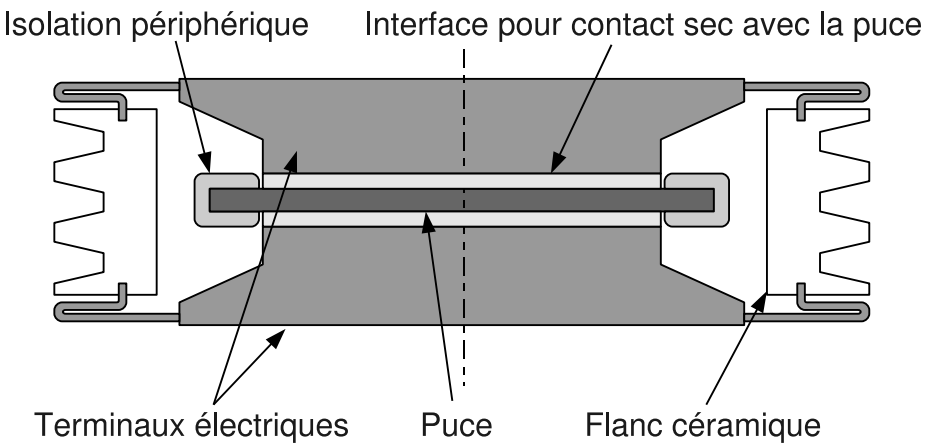


- technologie bas coût ;
- grande cadence de production ;
- matériaux : cuivre, brasure, aluminium, epoxy
- courant max. < 100 A



Source : http://www.cooknart.com

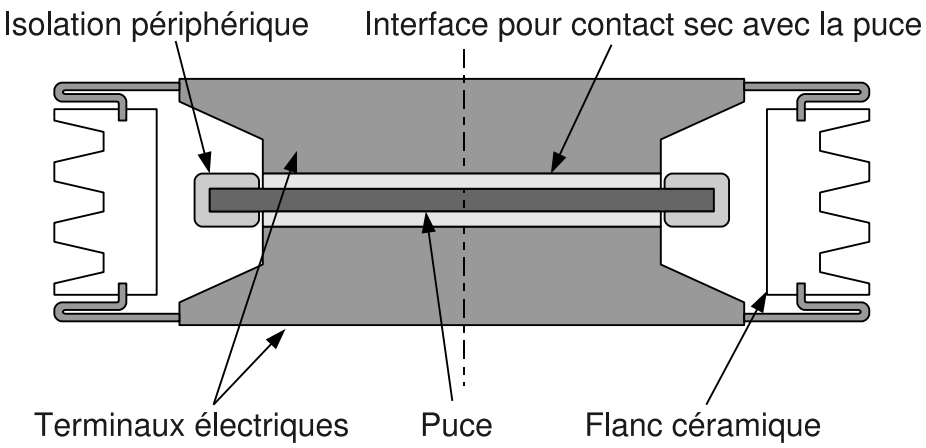
Les discrets pour la forte puissance



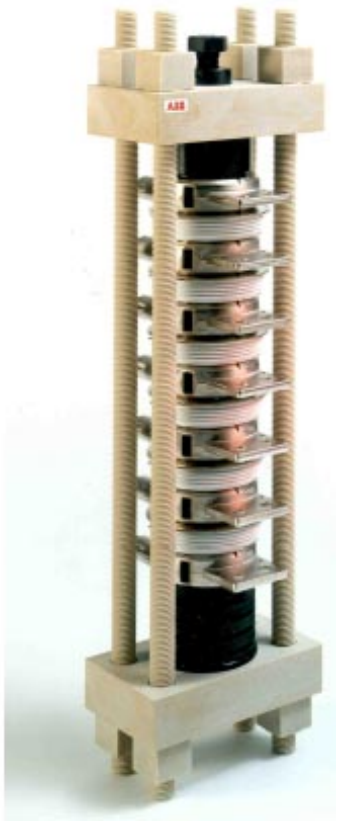
- Tensions jusqu'à 6.5 kV
- Courants de plusieurs kA
- Puces jusqu'à 10 cm diam.
- conçus pour la mise en série.

Source : `http://www.sensorprod.com`

Les discrets pour la forte puissance



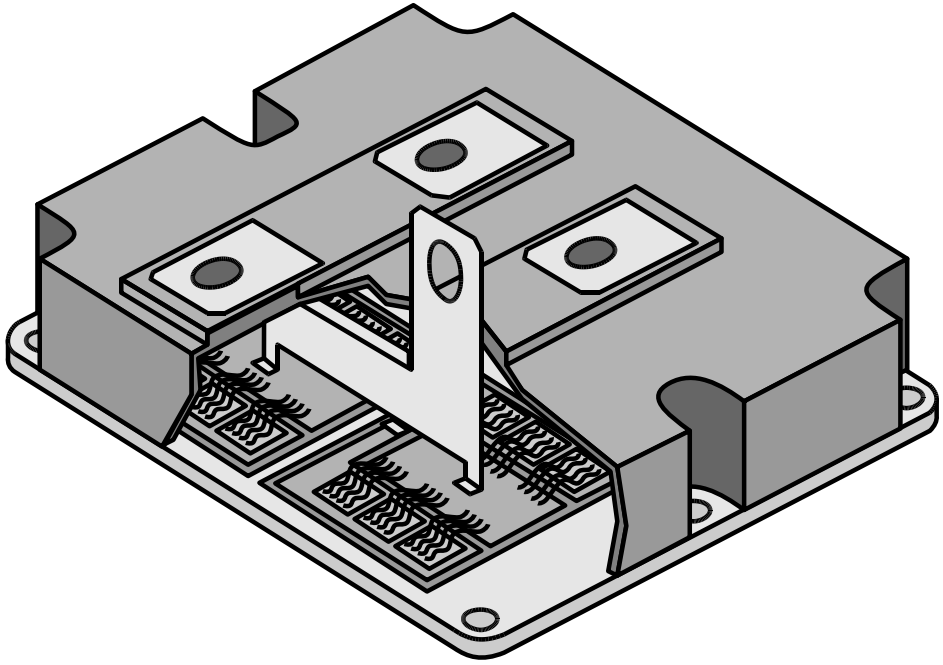
- Tensions jusqu'à 6.5 kV
- Courants de plusieurs kA
- Puces jusqu'à 10 cm diam.
- conçus pour la mise en série.

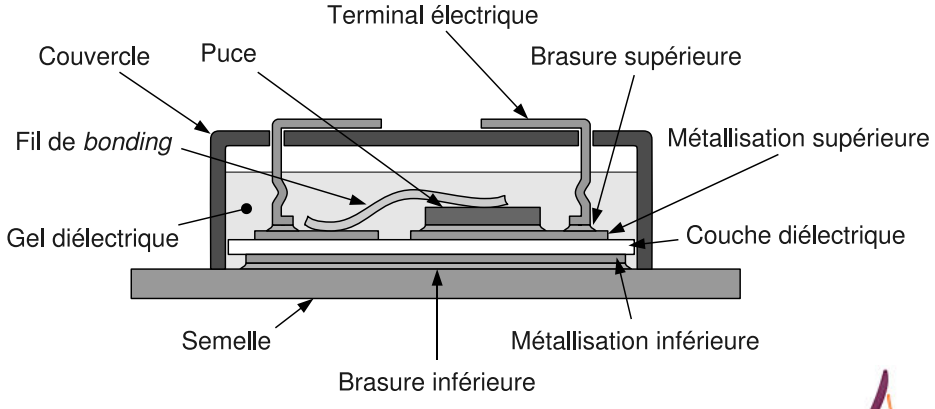


Source : http://www.sensorprod.com

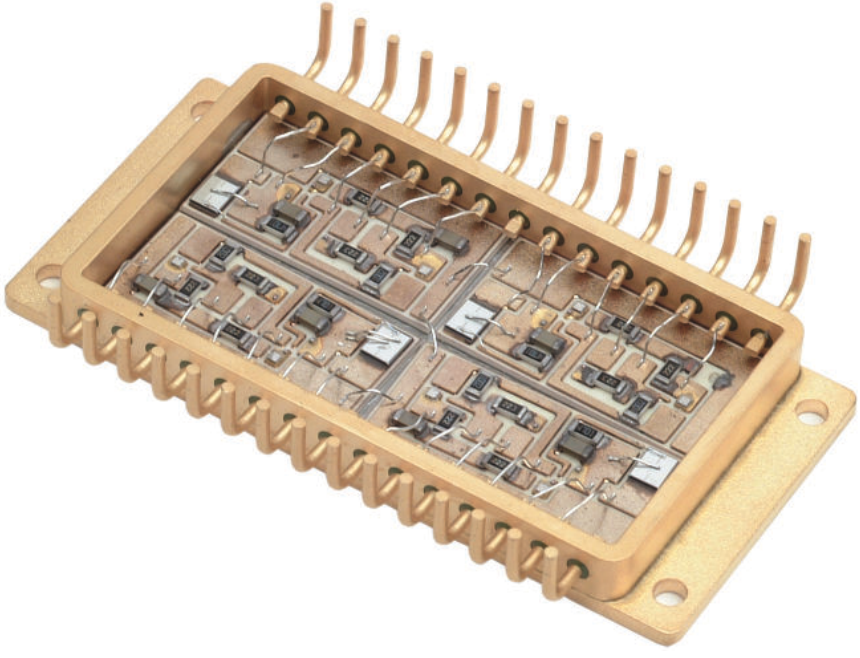
Modules

- 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 qques 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)

Sommaire

Introduction

Petit lexique du packaging de puissance

Considérations physiques
- Aspects thermiques
- Aspects thermo-mécaniques
- Aspects électriques

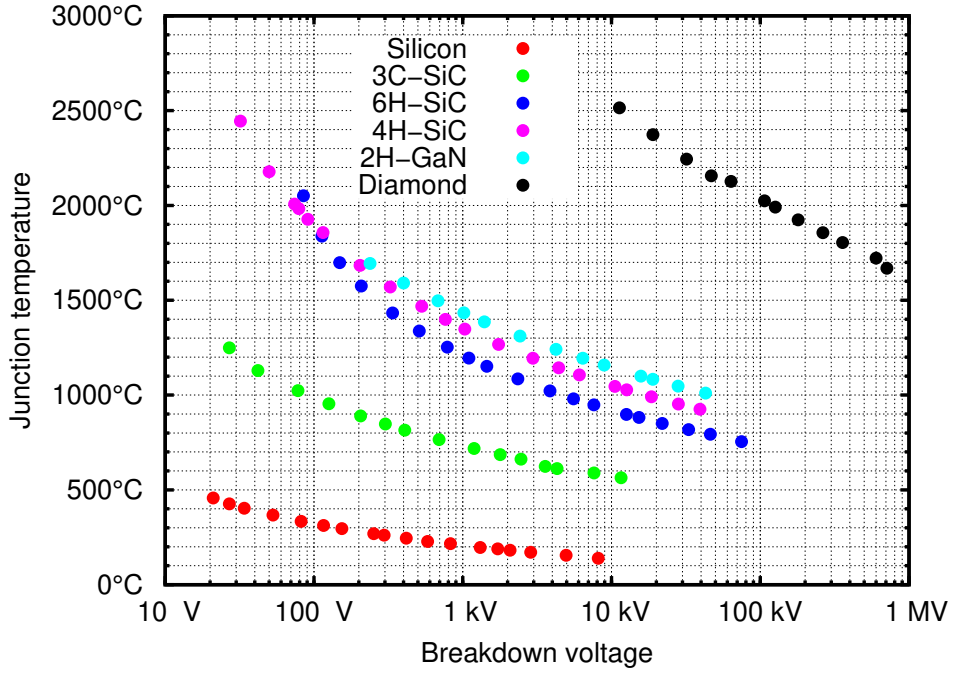
Éléments de technologie
- Substrats
- Interconnexions
- Gestion thermique

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)

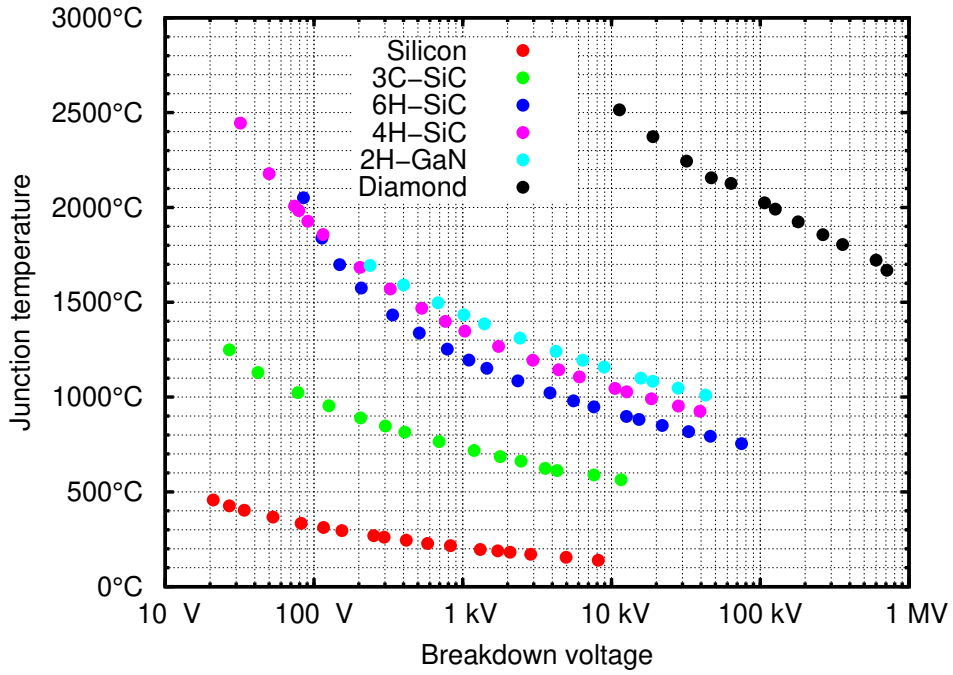


- De nombreux composants (MOSFETs, diodes) sont moins performants lorsque la température augmente.
- Les fortes variations de température posent des problèmes de fiabilité.

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)

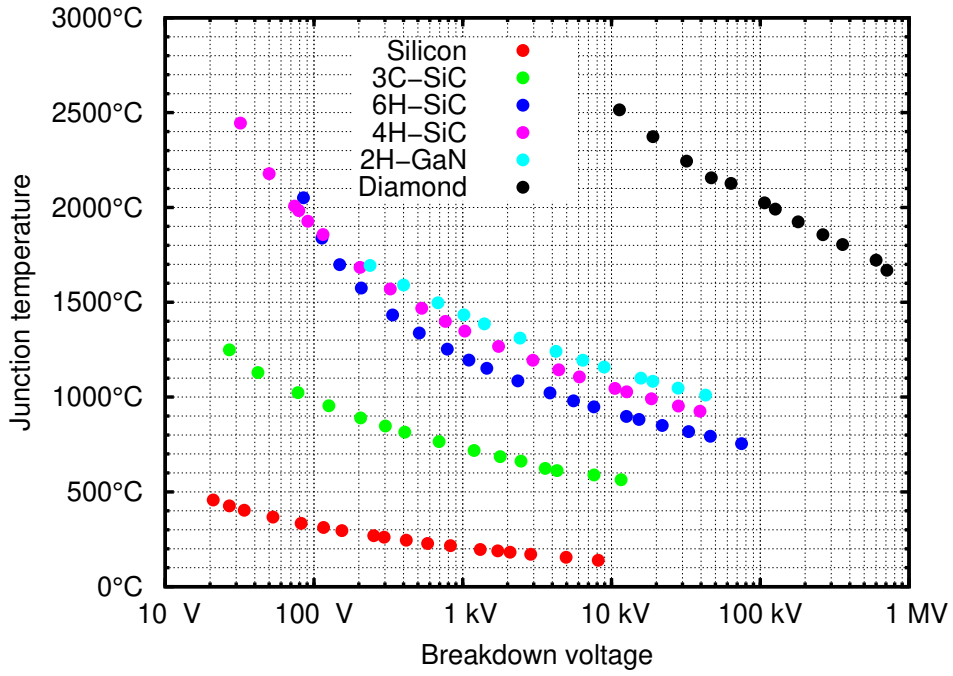


- De nombreux composants (MOSFETs, diodes) sont moins performants lorsque la température augmente.
- Les fortes variations de température posent des problèmes de fiabilité.

Limites thermiques : composants à semiconducteurs

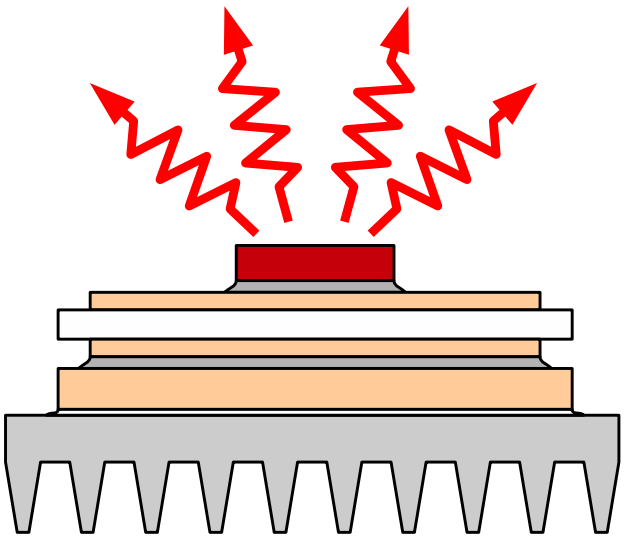
Quelques limites :

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)



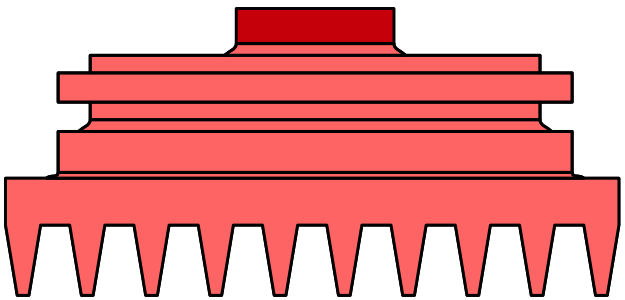
- De nombreux composants (MOSFETs, diodes) sont moins performants lorsque la température augmente.
- Les fortes variations de température posent des problèmes de fiabilité.

Mécanismes de transport de la chaleur



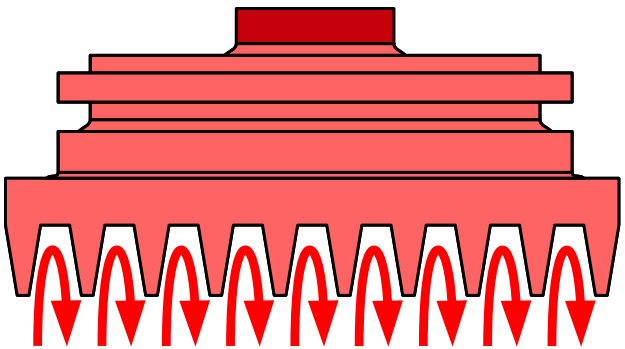
- Rayonnement
  - Loi de Stefan-Boltzmann : $P = \varepsilon S \sigma T^4$ avec $\sigma = 5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ et $\varepsilon < 1$
  - à 400 K, P=0,15 W.cm^{-2}
  - Négligeable pour les dimensions et températures classiques de l'électronique
- Conduction
  - transfert de chaleur dans la matière
  - $P = -\frac{\lambda S}{e} \Delta T$, $\lambda = 20 \ldots 400 W.m^{-1}.K^{-1}$
  - Pour une piste en cuivre avec e=100 μm, S=1 cm^2 et ΔT=1 °C, P=400 W
- Convection
  - Déplacement de matière
  - Pas d'expression simple (convection forcée, naturelle, type d'écoulements...)

Mécanismes de transport de la chaleur



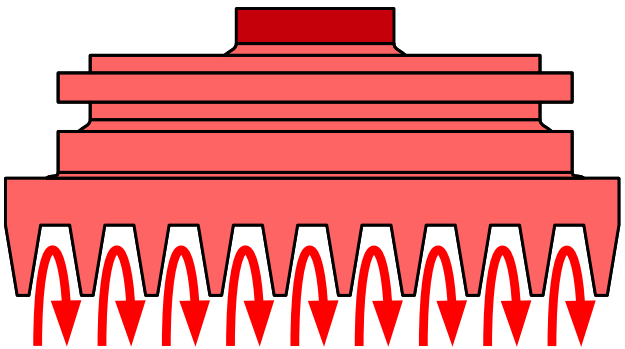
- Rayonnement
  - Loi de Stefan-Boltzmann : $P = \varepsilon S \sigma T^4$ avec $\sigma = 5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ et $\varepsilon < 1$
  - à 400 K, P=0,15 W.cm^{-2}
  - Négligeable pour les dimensions et températures classiques de l'électronique
- Conduction
  - transfert de chaleur dans la matière
  - $P = -\frac{\lambda S}{e} \Delta T$, $\lambda = 20 \ldots 400 W.m^{-1}.K^{-1}$
  - Pour une piste en cuivre avec e=100 μm, S=1 cm^2 et ΔT=1 ℃, P=400 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 $\sigma = 5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ et $\varepsilon < 1$
  - à 400 K, P=0,15 W.cm^{-2}
  - Négligeable pour les dimensions et températures classiques de l'électronique
- Conduction
  - transfert de chaleur dans la matière
  - $P = -\frac{\lambda S}{e} \Delta T$, $\lambda = 20 \ldots 400 W.m^{-1}.K^{-1}$
  - Pour une piste en cuivre avec e=100 μm, S=1 cm^2 et ΔT=1 °C, P=400 W
- Convection
  - Déplacement de matière
  - Pas d'expression simple (convection forcée, naturelle, type d'écoulements...)

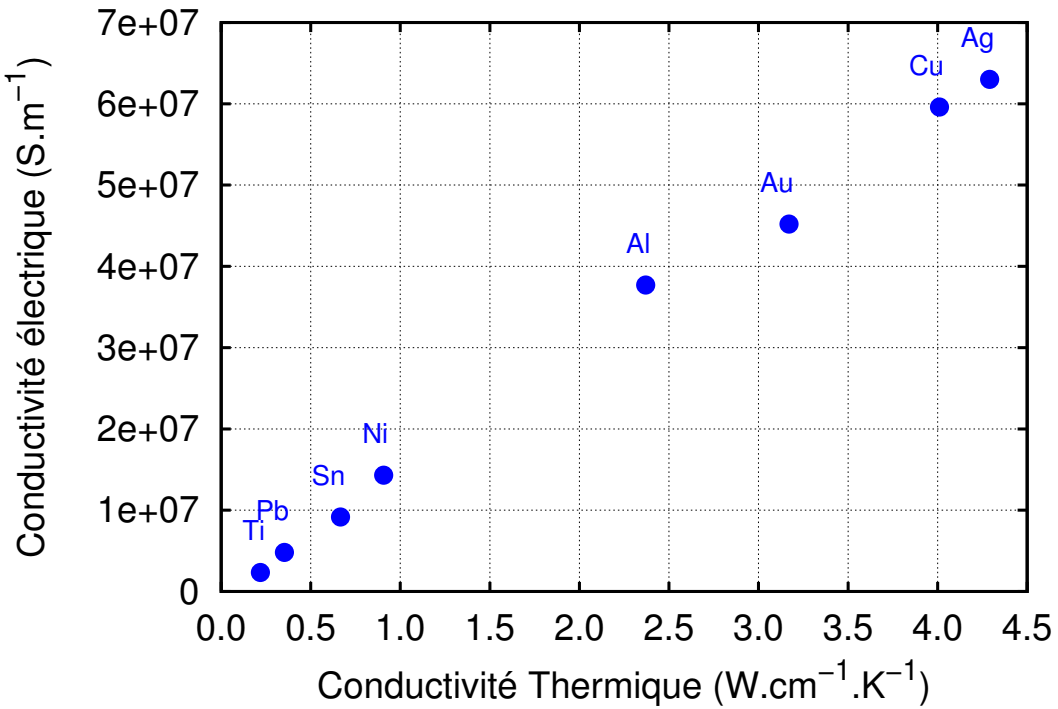
Mécanismes de transport de la chaleur



- Rayonnement
  - Loi de Stefan-Boltzmann : $P = \varepsilon S \sigma T^4$ avec $\sigma = 5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ et $\varepsilon < 1$
  - à 400 K, P=0,15 W.cm^{-2}
  - Négligeable pour les dimensions et températures classiques de l'électronique
- Conduction
  - transfert de chaleur dans la matière
  - $P = -\frac{\lambda S}{e} \Delta T$, $\lambda = 20 \ldots 400 W.m^{-1}.K^{-1}$
  - Pour une piste en cuivre avec e=100 μm, S=1 cm^2 et ΔT=1 °C, P=400 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

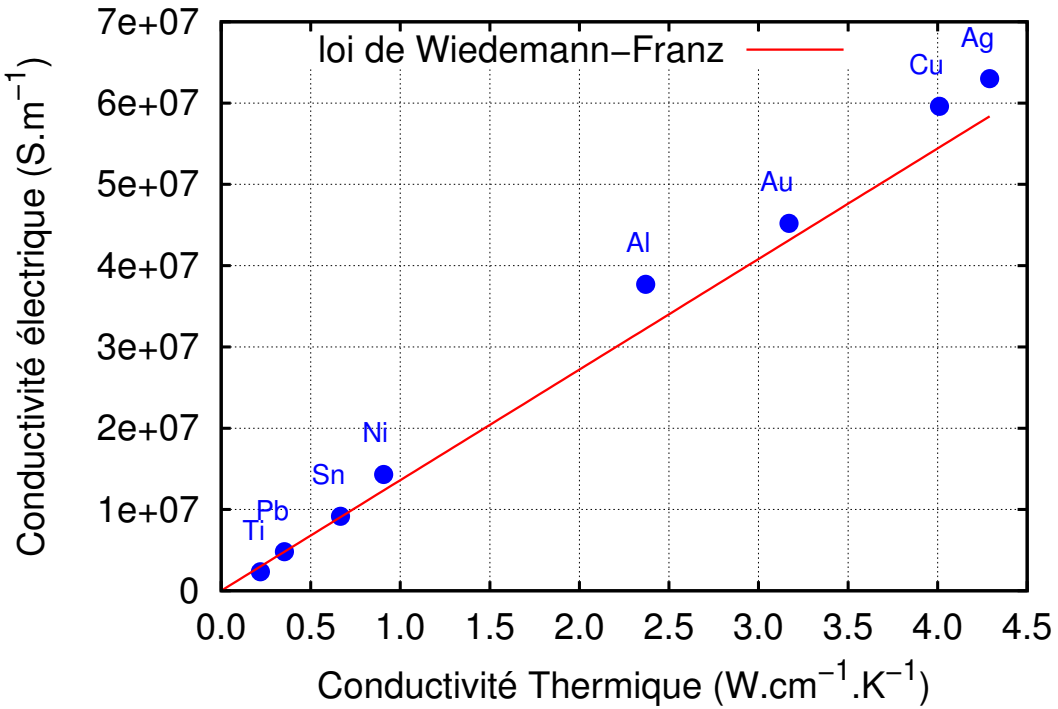
Relation entre conductivités thermique et électrique



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

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

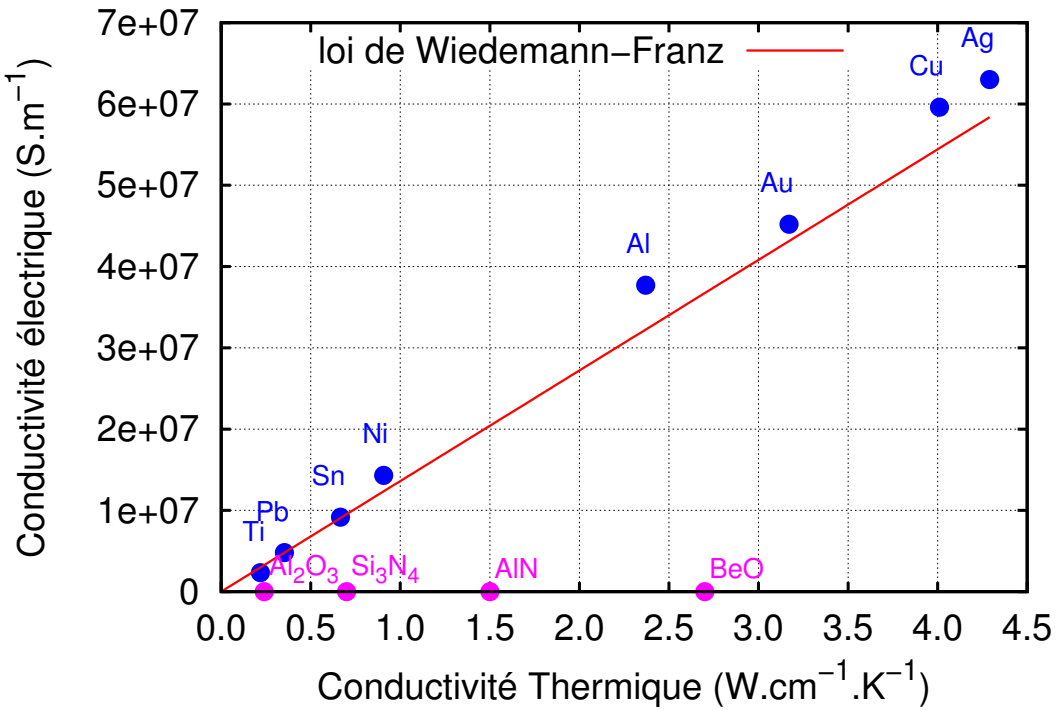
Relation entre conductivités thermique et électrique



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

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

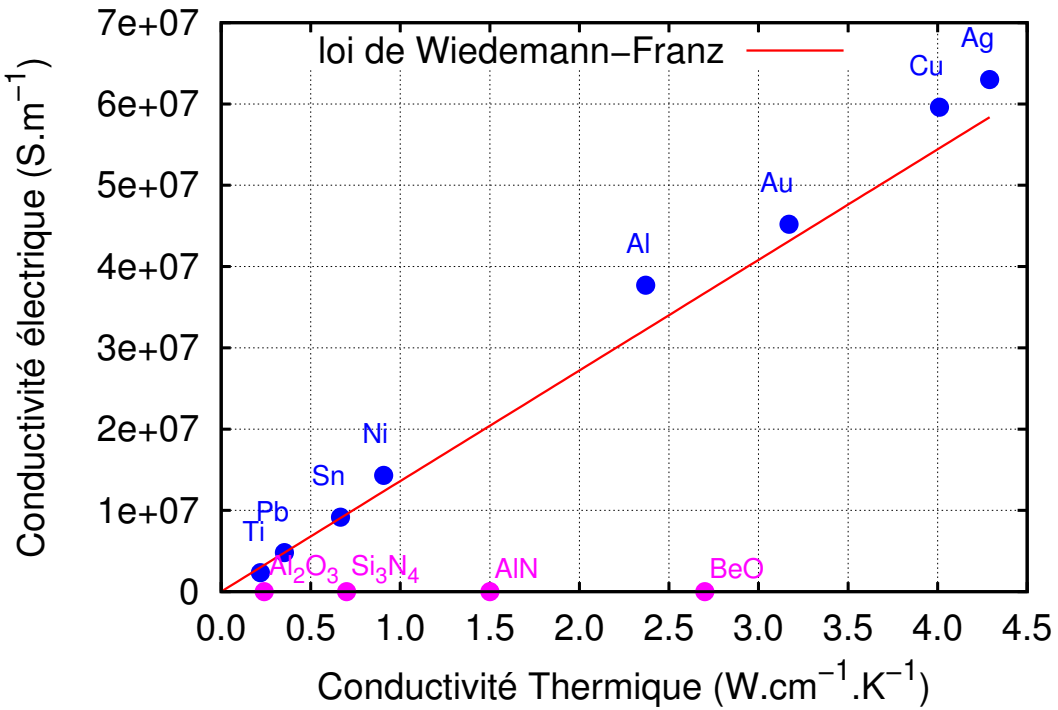
Relation entre conductivités thermique et électrique



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

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

Relation entre conductivités thermique et électrique



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

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

➜Les matériaux bons conducteurs thermiques/isolants électriques sont rares (diamant, AlN, Si_3N_4, Al_2O_3)

Isolants/conducteurs électrique/thermique

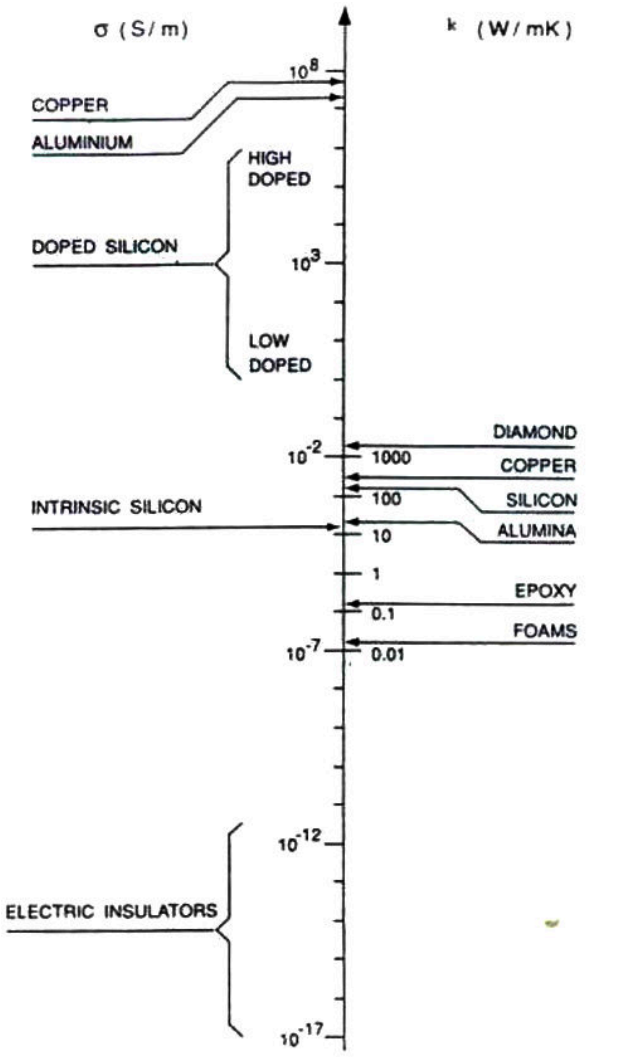
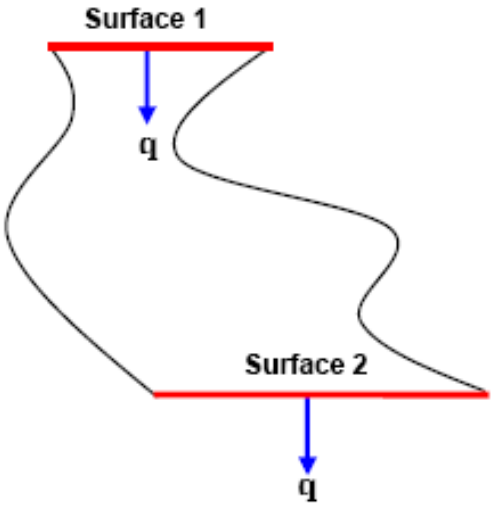


Figure 1: Comparison between electrical and thermal conductivities

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

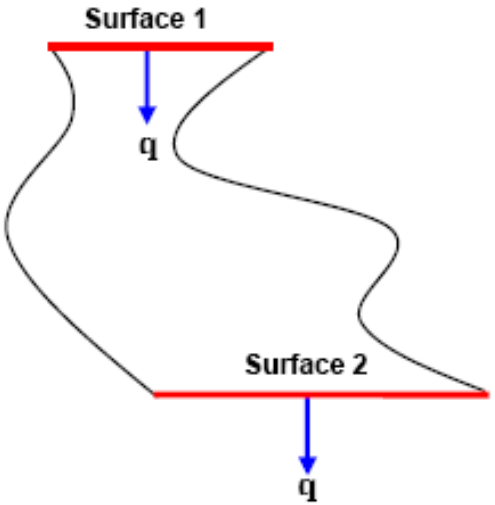


Source : Heat Spreading : not a trivial issue, C. Lansance, ECPE Workshop on advanced cooling, 20–21 November, Delft.

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



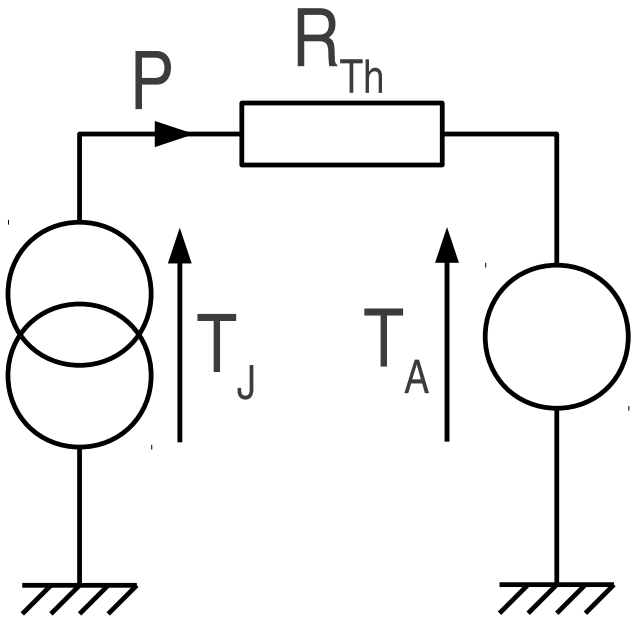
Source : Heat Spreading : not a trivial issue, C. Lansance, ECPE Workshop on advanced cooling, 20–21 November, Delft.

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)
- $T_J = T_A + R_{Th} \times P$



Équation de la chaleur

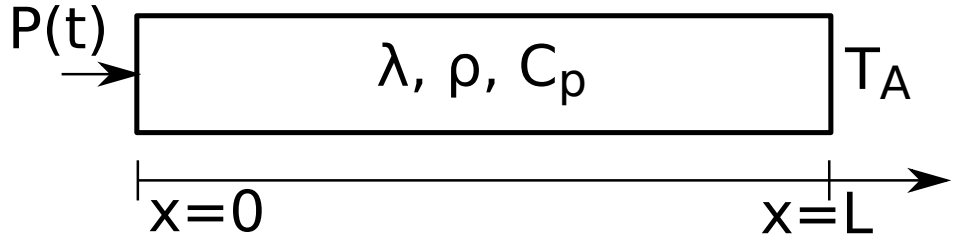
Équation de la chaleur 1-D :

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

Conditions aux limites :

$$S \cdot \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = -P(t)$$

$$T(t, x = L) = T_a$$

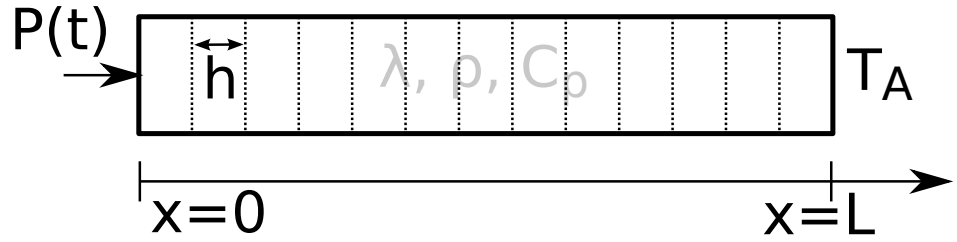


- S section du barreau (m^2)
- C_p chaleur spécifique (J/K/kg)
- ρ densité (kg/m^3)

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 :

$$S \cdot \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = -P(t)$$

$$T(t, x = L) = T_a$$

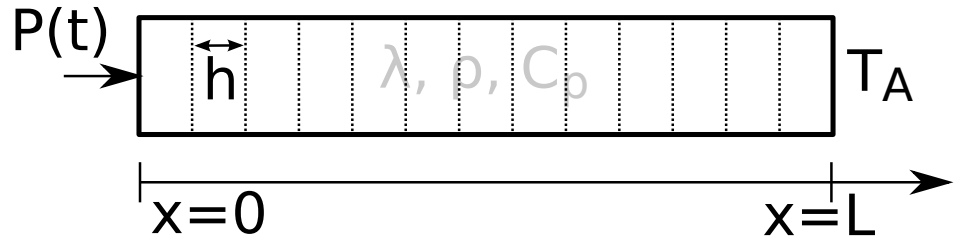
- S section du barreau (m^2)
- C_p chaleur spécifique (J/K/kg)
- ρ densité (kg/m^3)

Discrétisation de l'équation :

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

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

Équation de la chaleur – suite

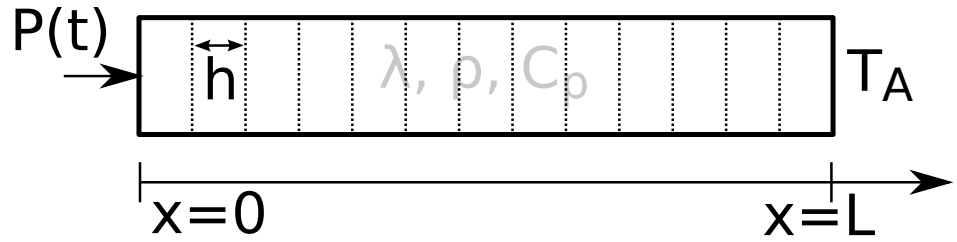


$$hS\rho C_p \frac{\partial T_i(t)}{\partial t} = \lambda S \frac{T_{i+1}(t) - T_i(t)}{h} - \lambda S \frac{T_i(t) - T_{i-1}(t)}{h}$$

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

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

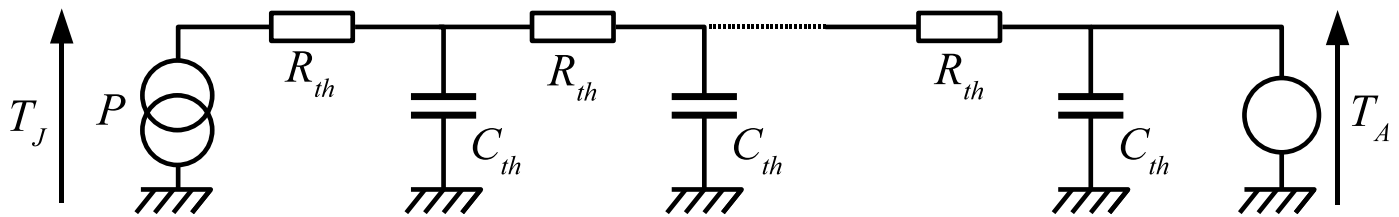
Équation de la chaleur – suite



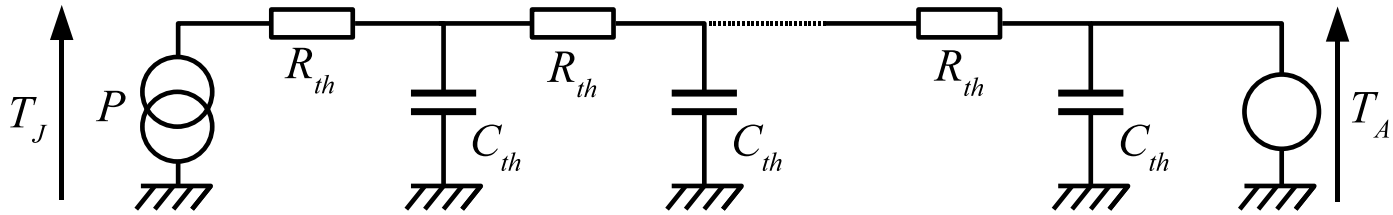
$$hS\rho C_p \frac{\partial T_i(t)}{\partial t} = \lambda S \frac{T_{i+1}(t) - T_i(t)}{h} - \lambda S \frac{T_i(t) - T_{i-1}(t)}{h}$$

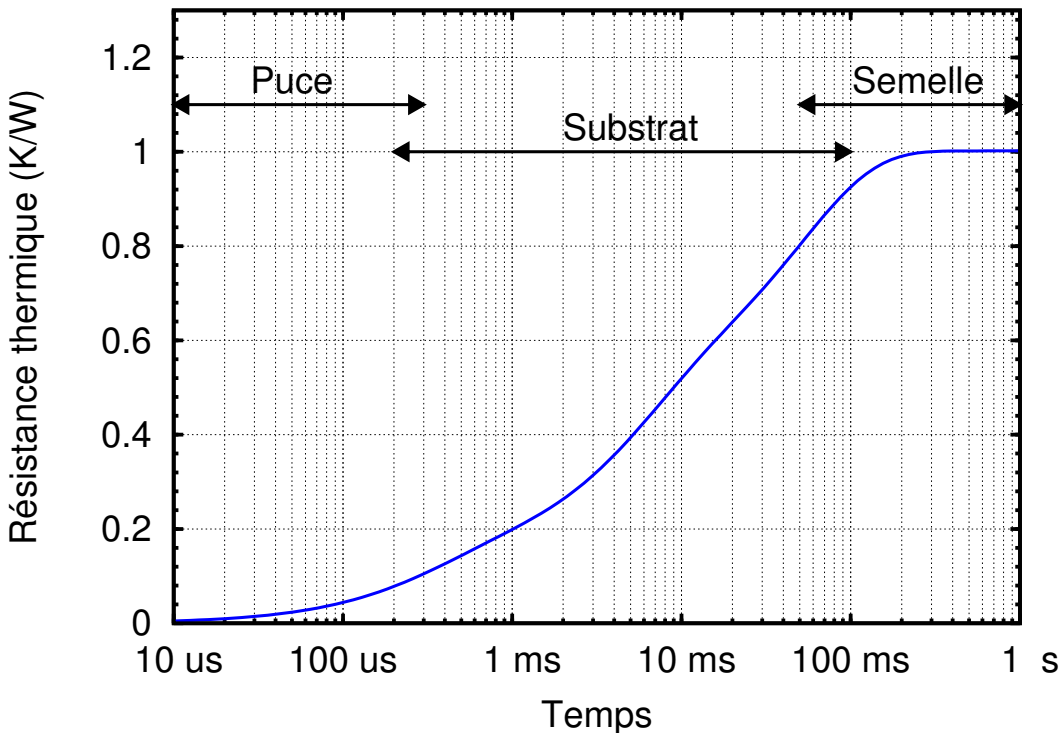
On pose $hS\rho C_p = C_{Th}$ et $\frac{h}{\lambda S} = R_{Th}$ d'où :

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



Impédance thermique

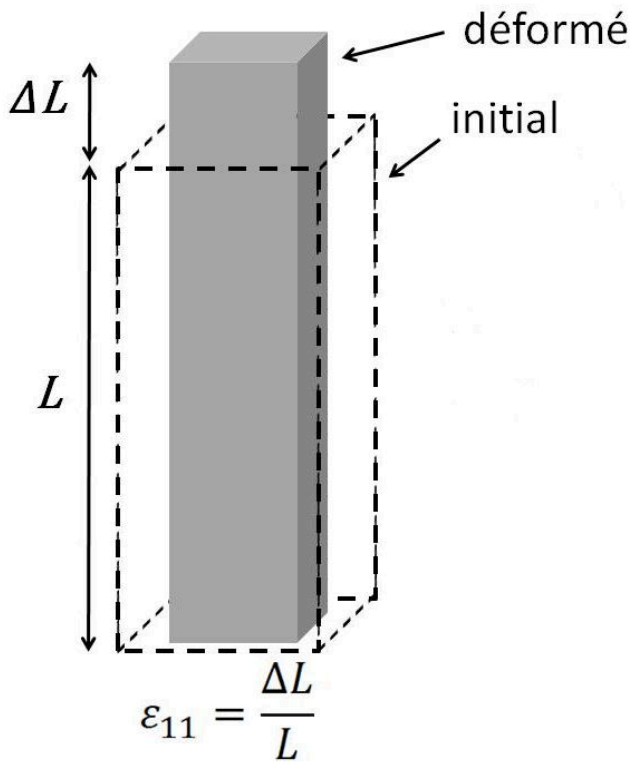


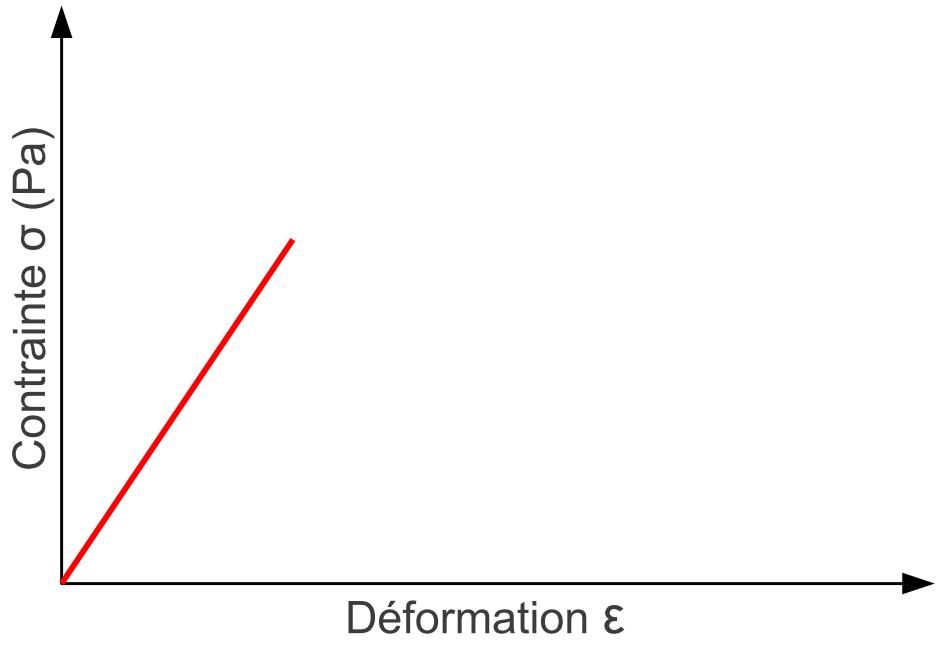


Extension au régime dynamique :

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

Un peu de mécanique…

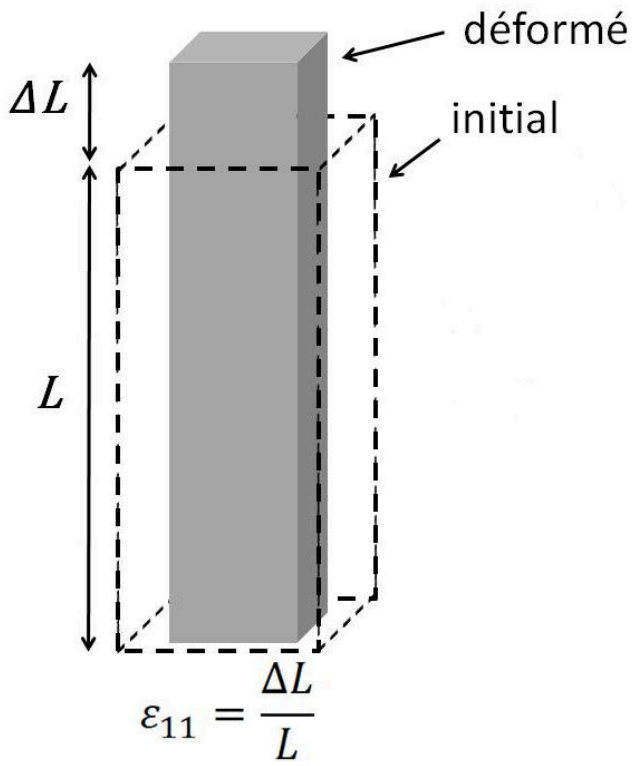


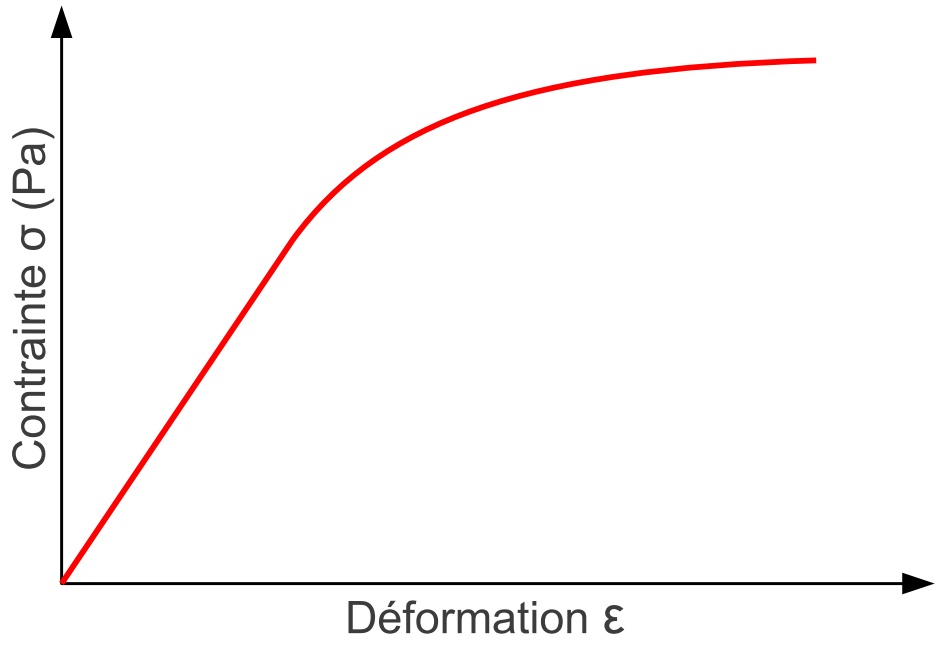


Source : thèse L. Pietranico, `http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00543040/fr/`

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

Un peu de mécanique…

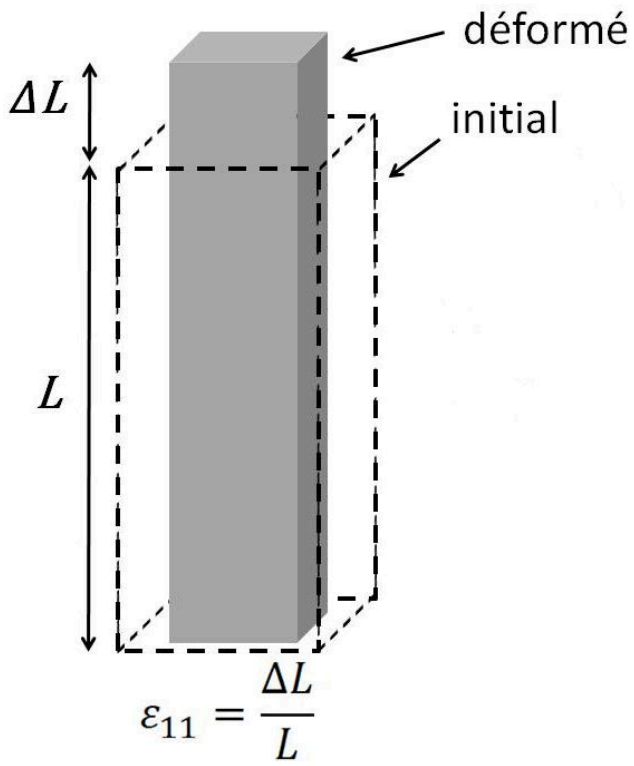


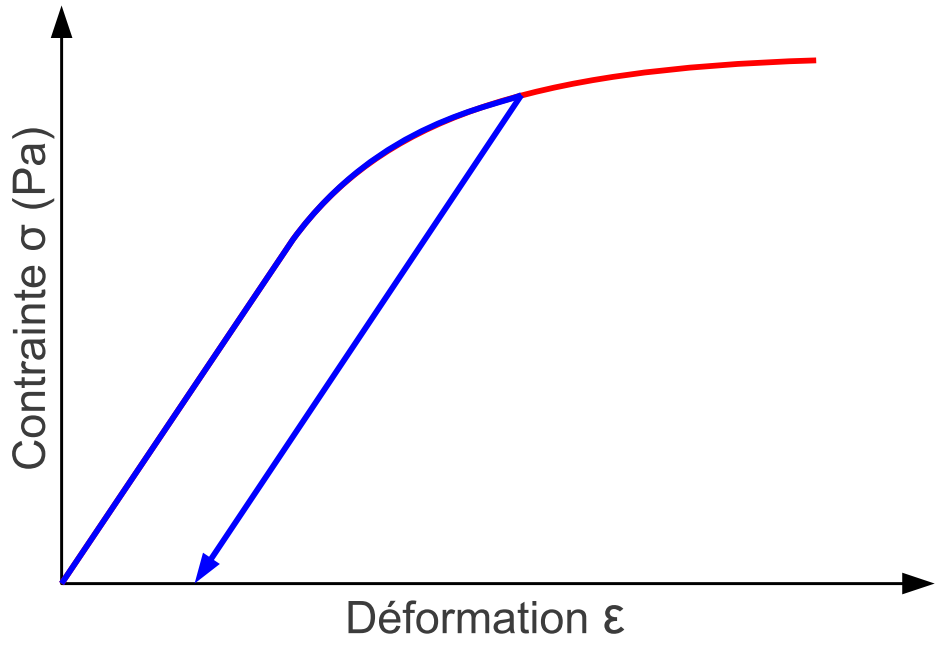


Source : thèse L. Pietranico, `http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00543040/fr/`

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

Un peu de mécanique…

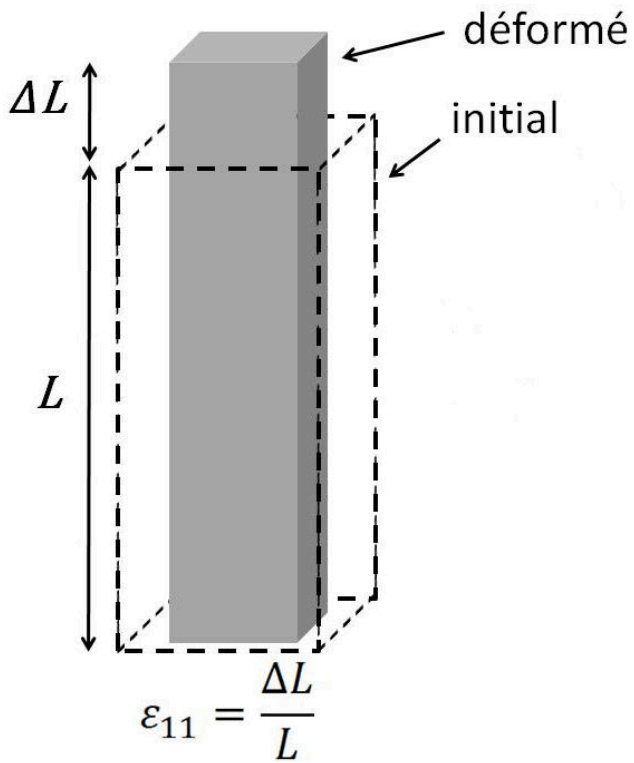


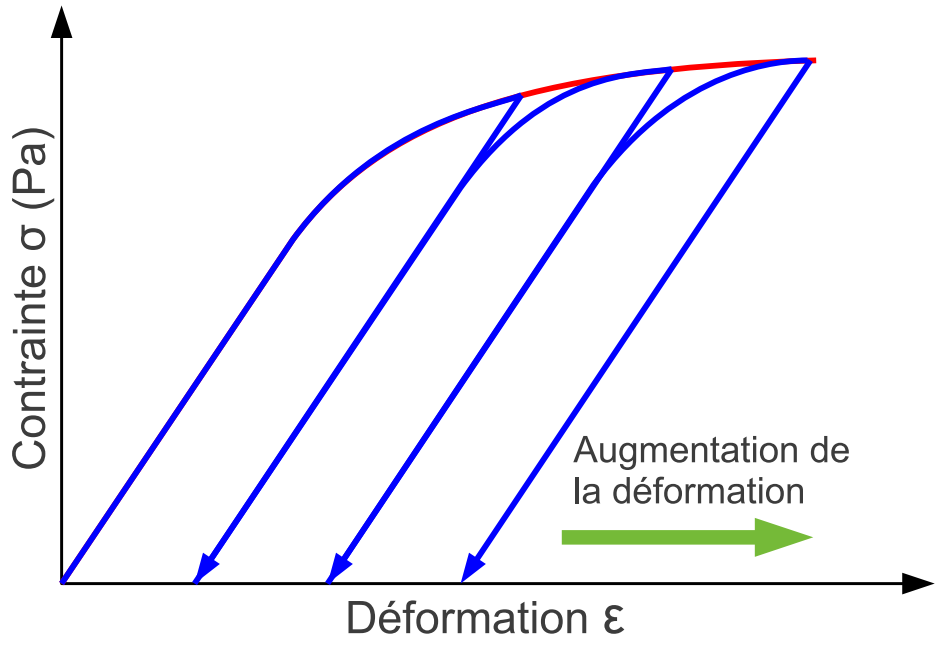


Source : thèse L. Pietranico, `http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00543040/fr/`

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

Un peu de mécanique…

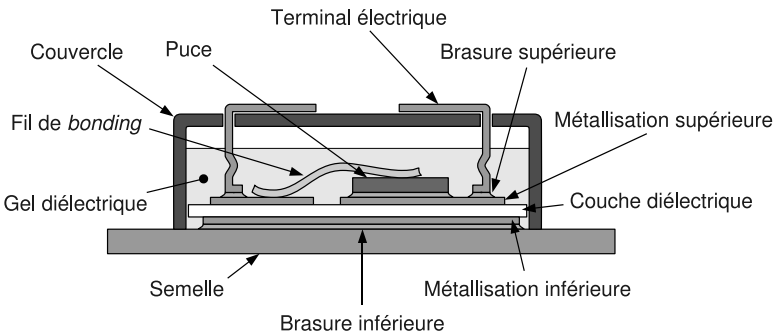




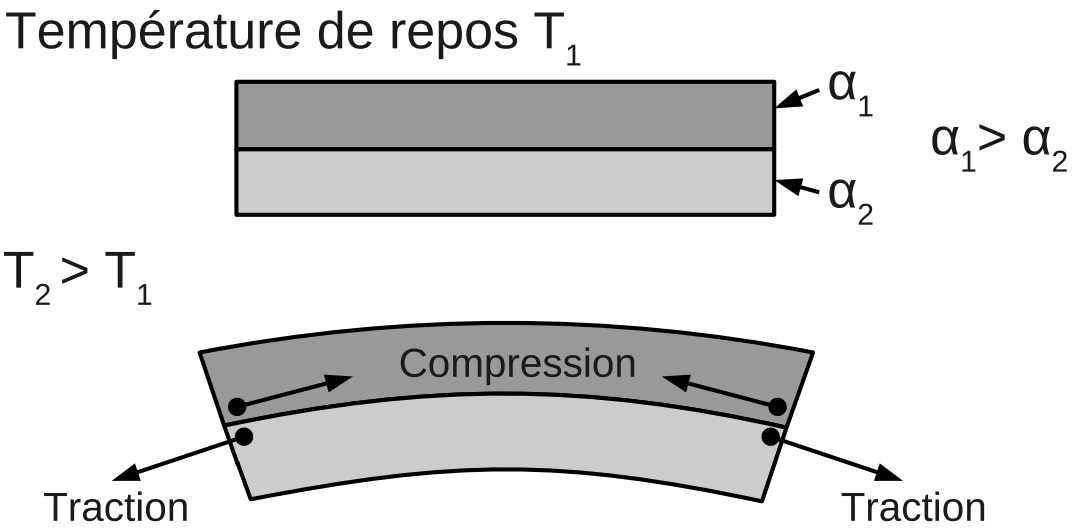
Source : thèse L. Pietranico, `http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00543040/fr/`

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

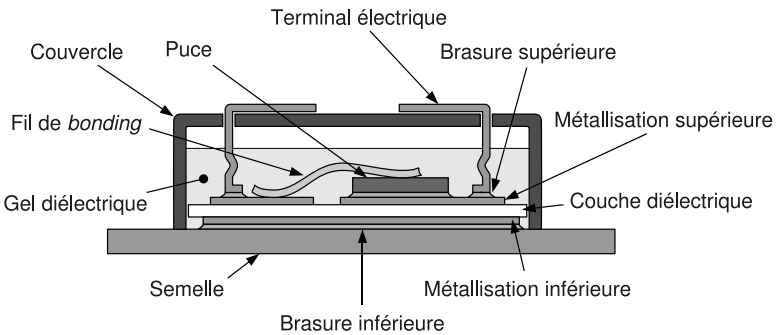
Effet des coefficients de dilatation



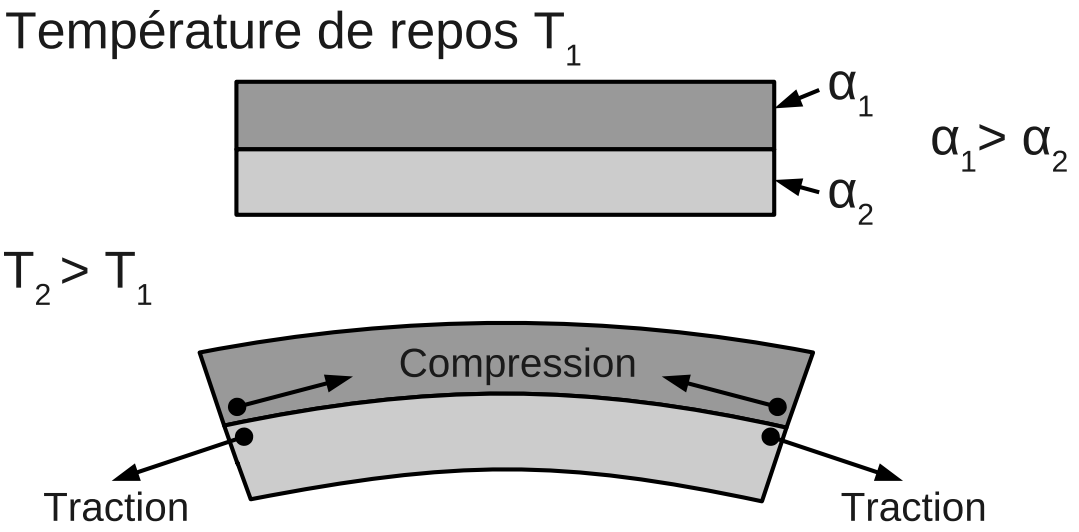
- α en ppm/K
- $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- la température génère des contraintes mécaniques

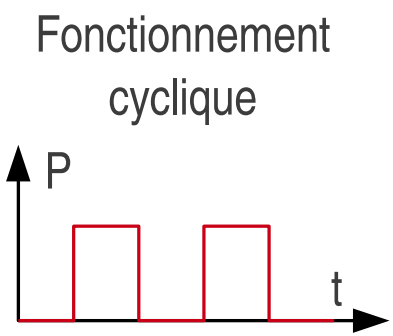


Effet des coefficients de dilatation

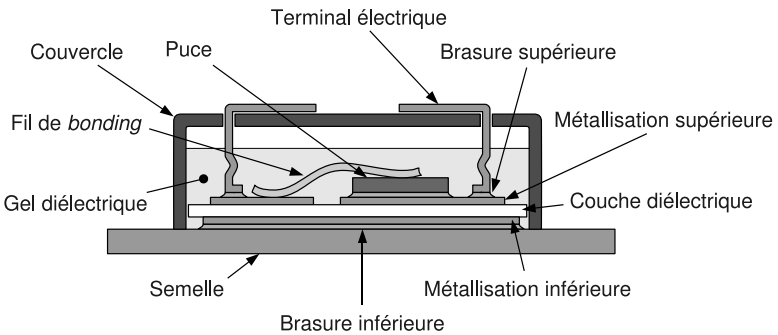


- α en ppm/K
- $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- la température génère des contraintes mécaniques

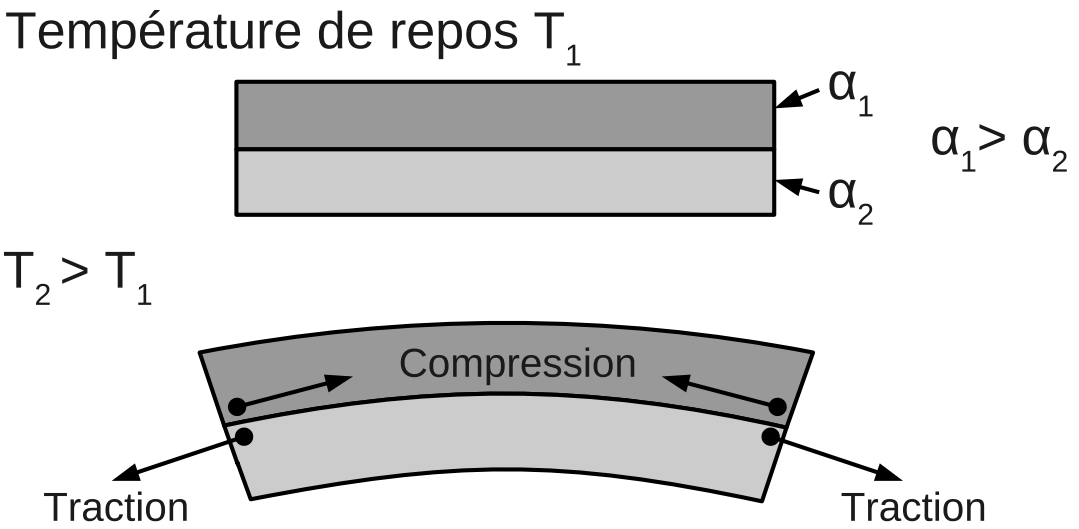


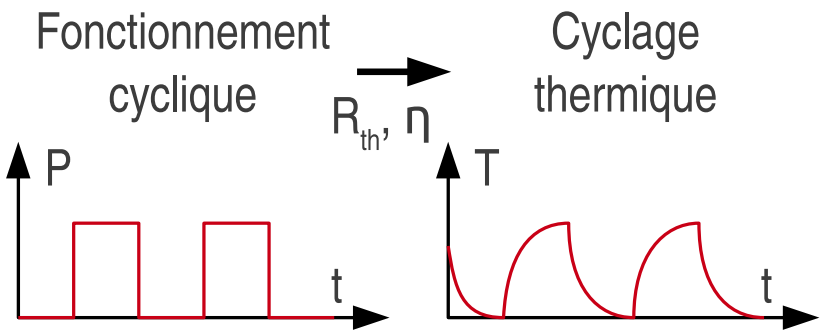


Effet des coefficients de dilatation

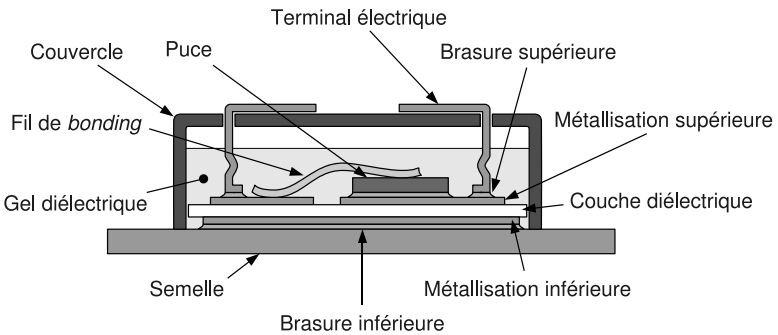


- α en ppm/K
- $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- la température génère des contraintes mécaniques

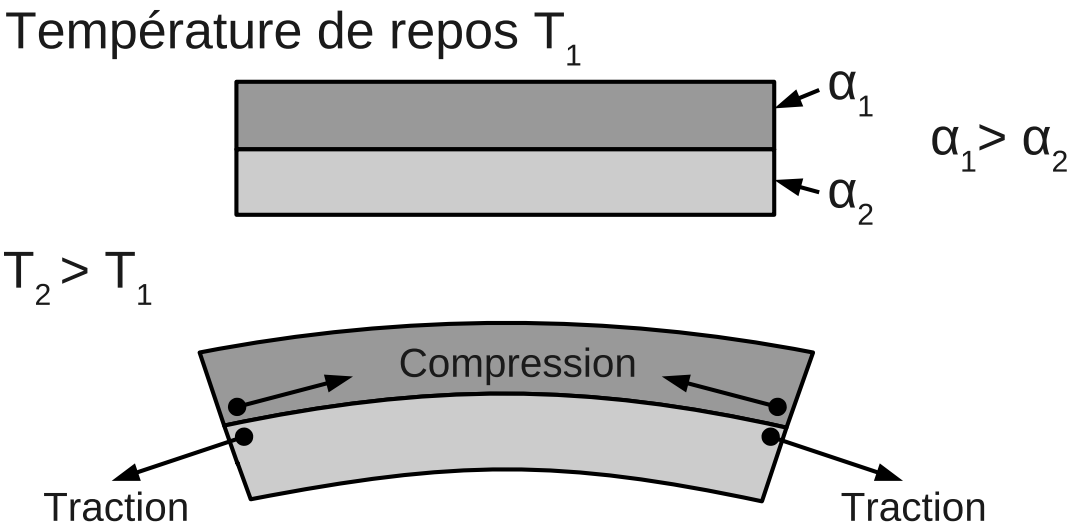


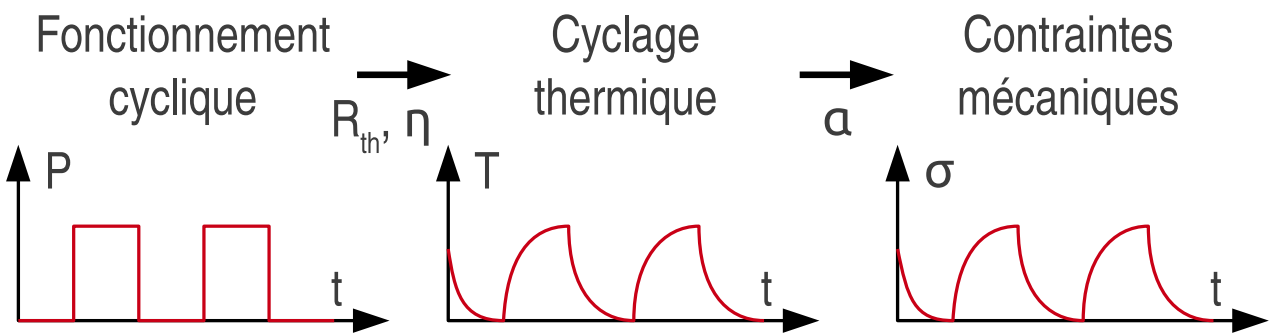


Effet des coefficients de dilatation

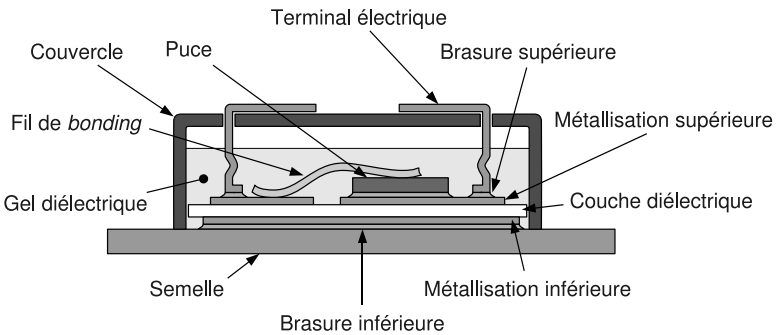


- α en ppm/K
- $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- la température génère des contraintes mécaniques

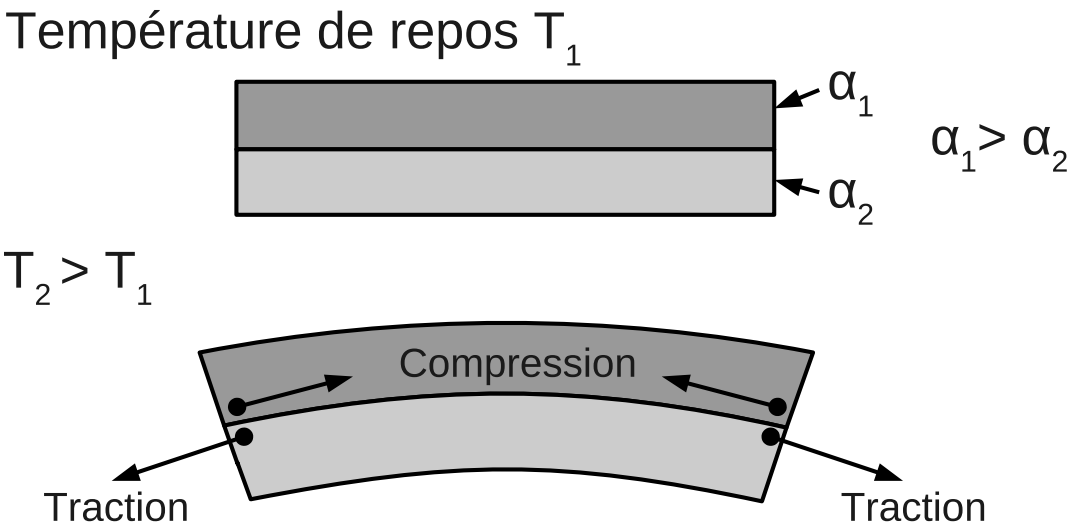


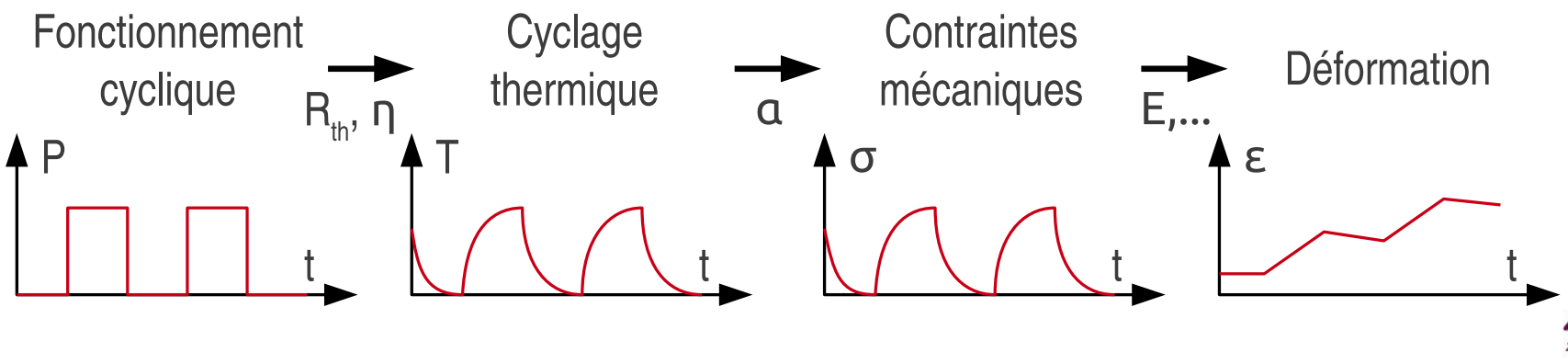


Effet des coefficients de dilatation

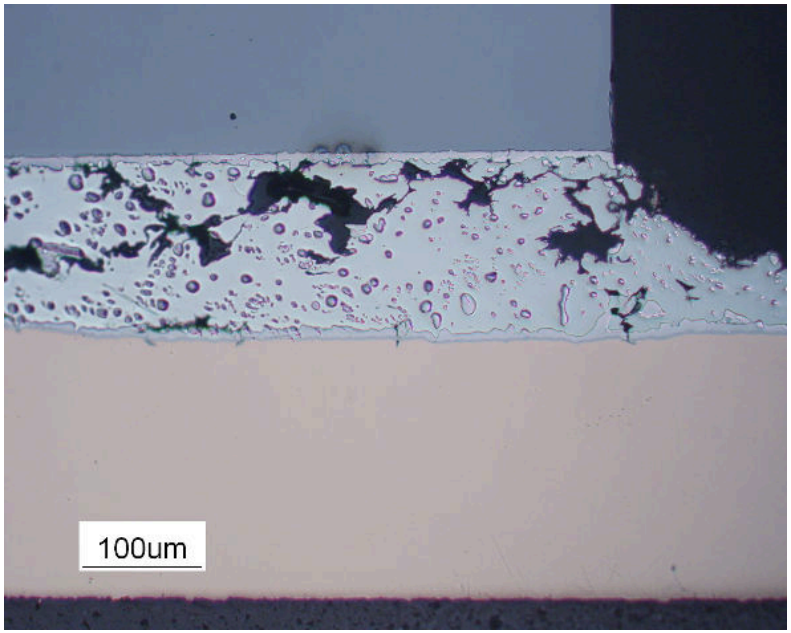


- α en ppm/K
- $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- la température génère des contraintes mécaniques





Effet des contraintes thermo-mécaniques

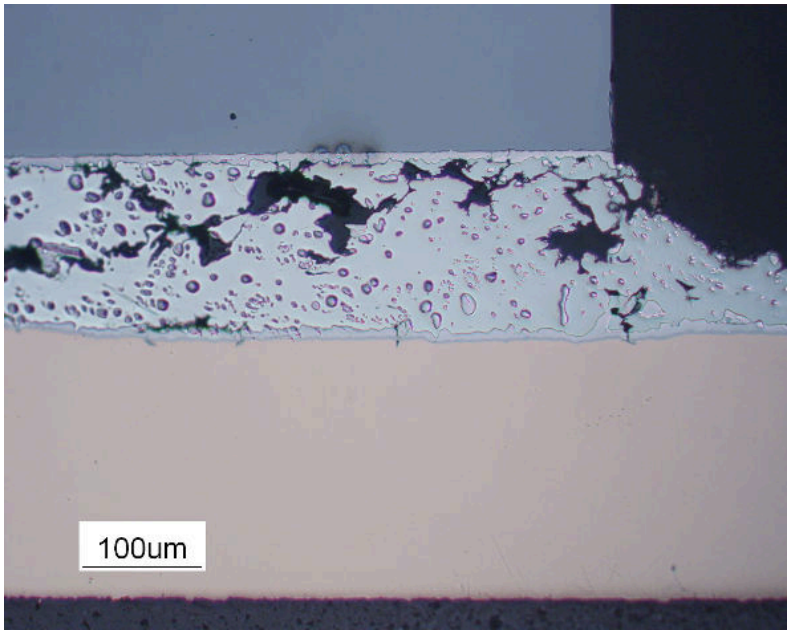


Source : Université de Nottingham

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



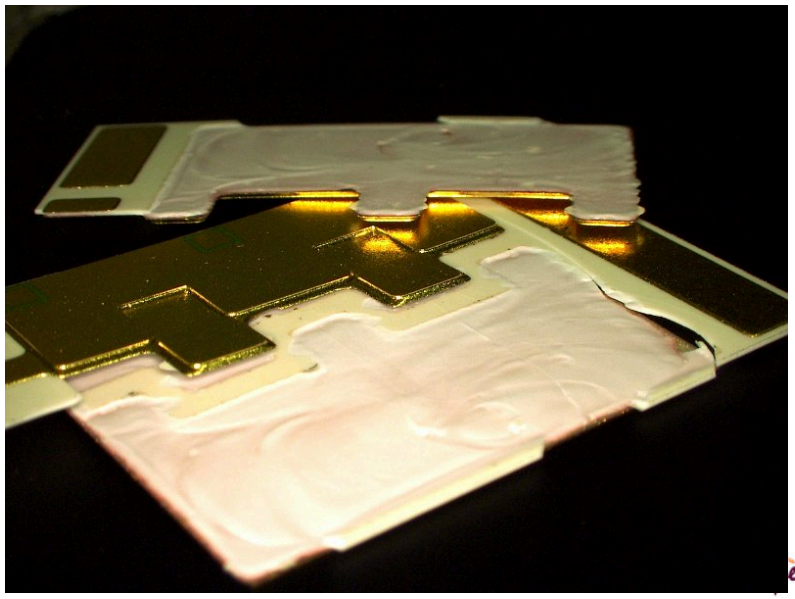
Source : Université de Nottingham

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

Aspects électriques

- 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 (PEEC, EF)
- Faute de temps, nous n'irons pas plus loin ici !

Sommaire

Introduction

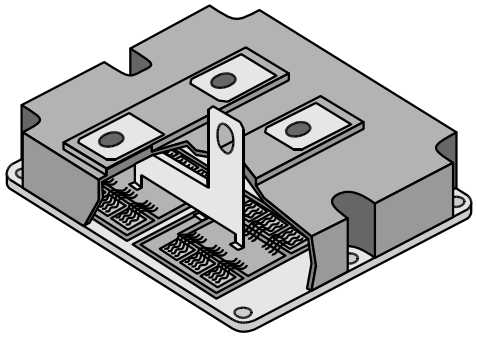
Petit lexique du packaging de puissance

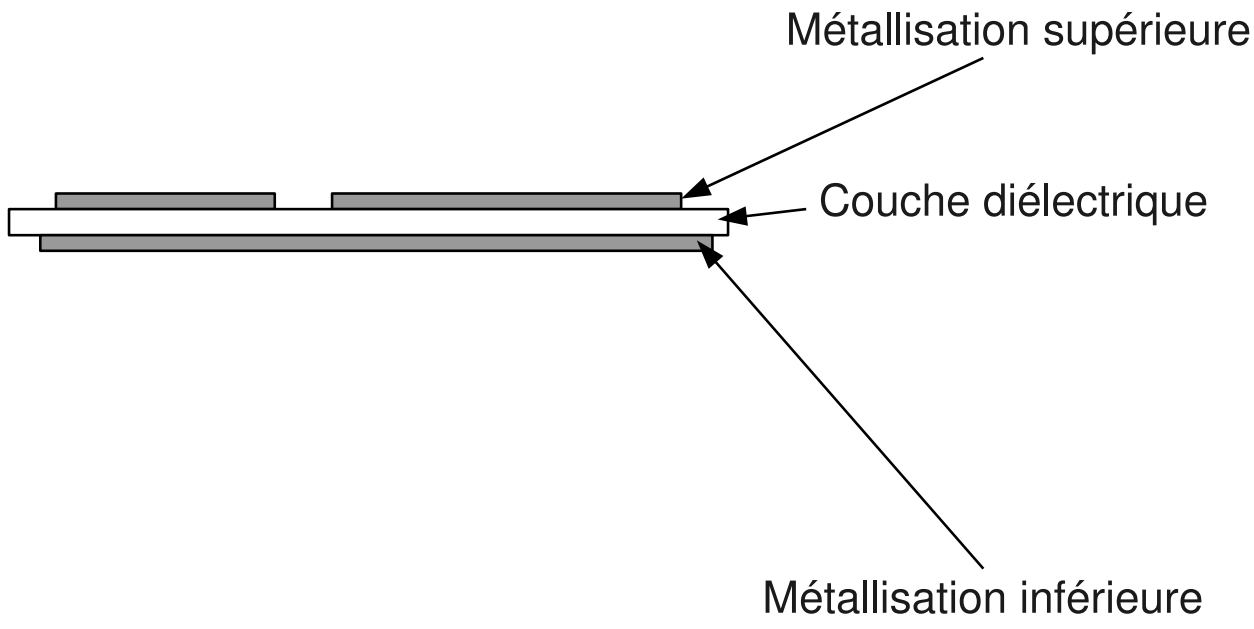
Considérations physiques
- Aspects thermiques
- Aspects thermo-mécaniques
- Aspects électriques

Éléments de technologie
- Substrats
- Interconnexions
- Gestion thermique

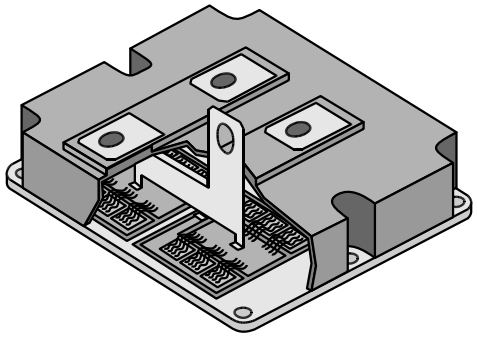
Évolutions, Recherche et Développement

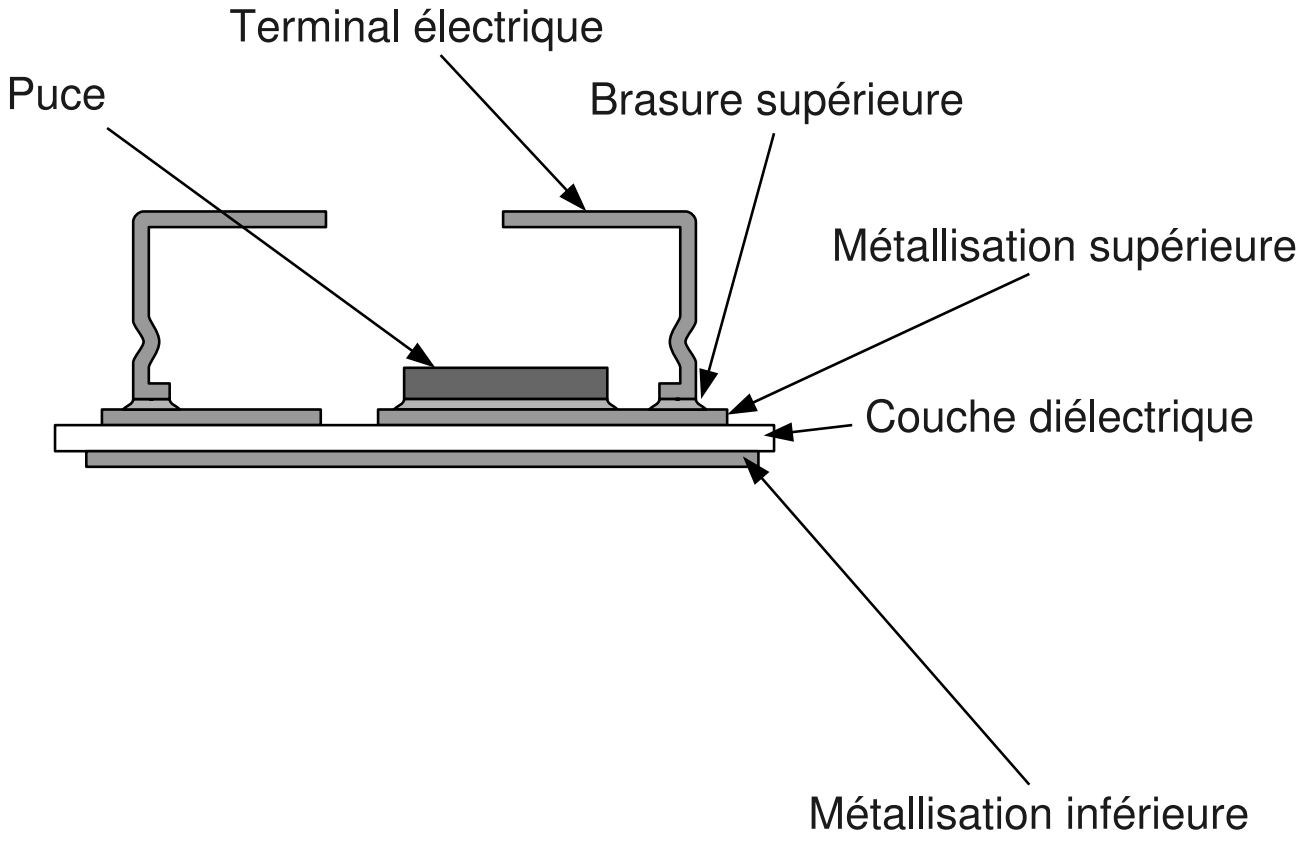
Coupe d'un module de puissance



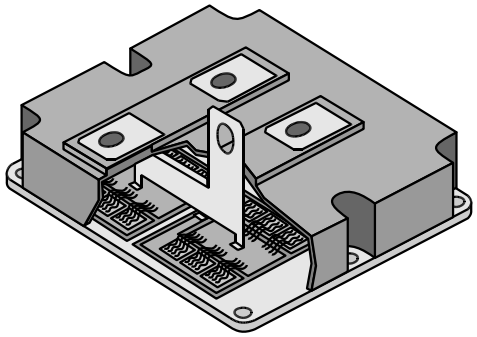


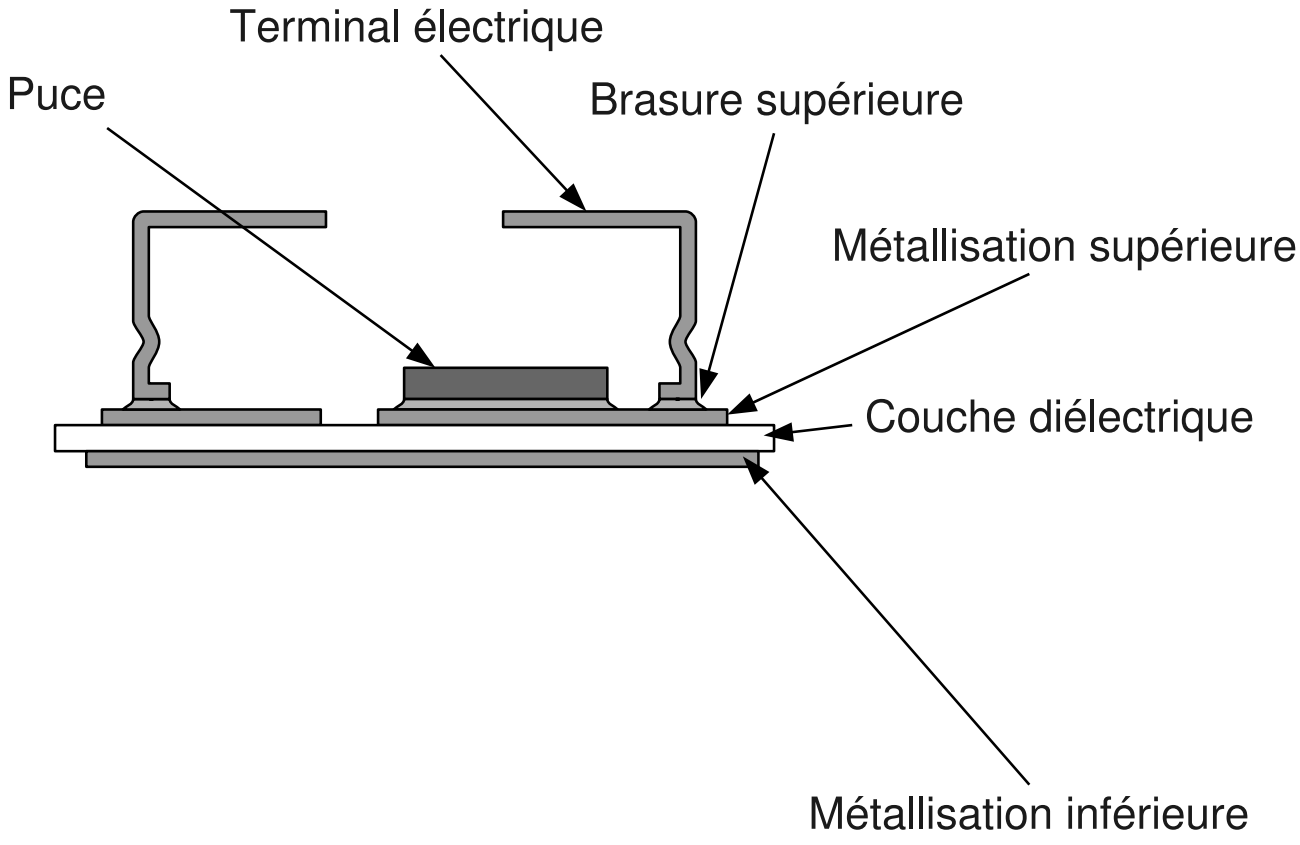
Coupe d'un module de puissance



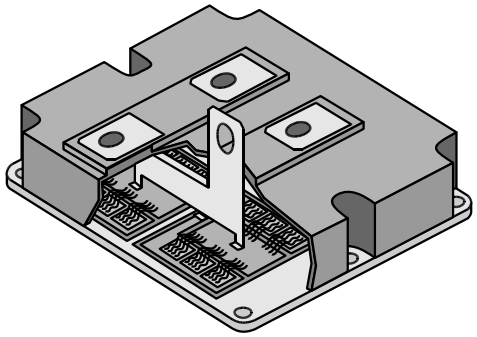


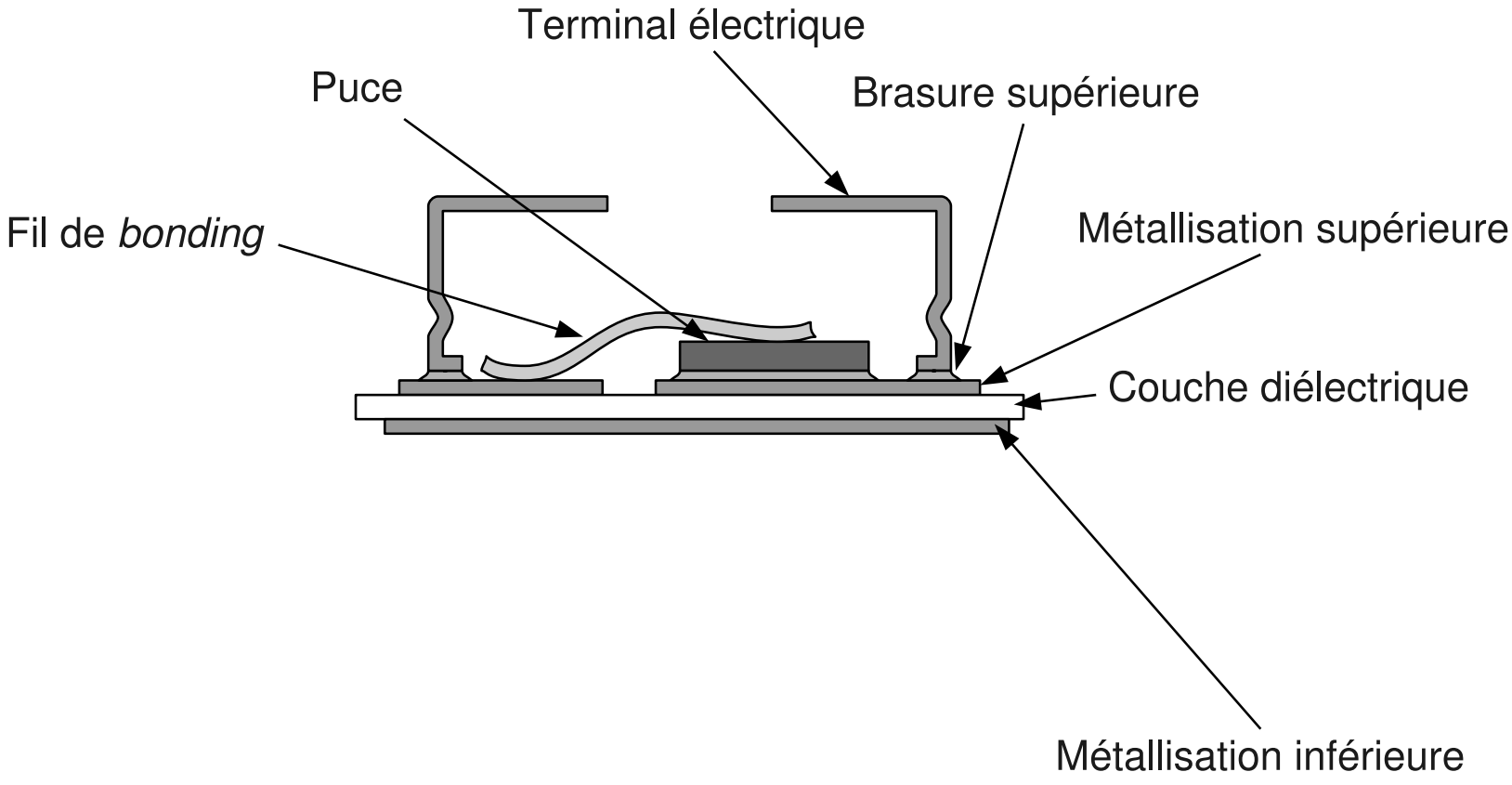
Coupe d'un module de puissance



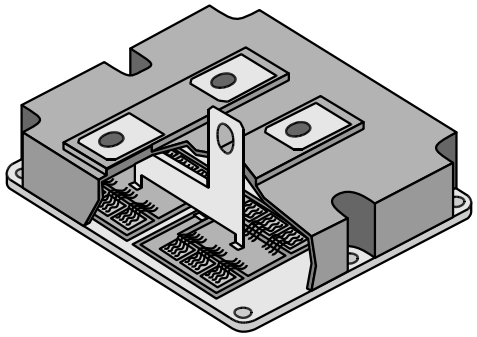


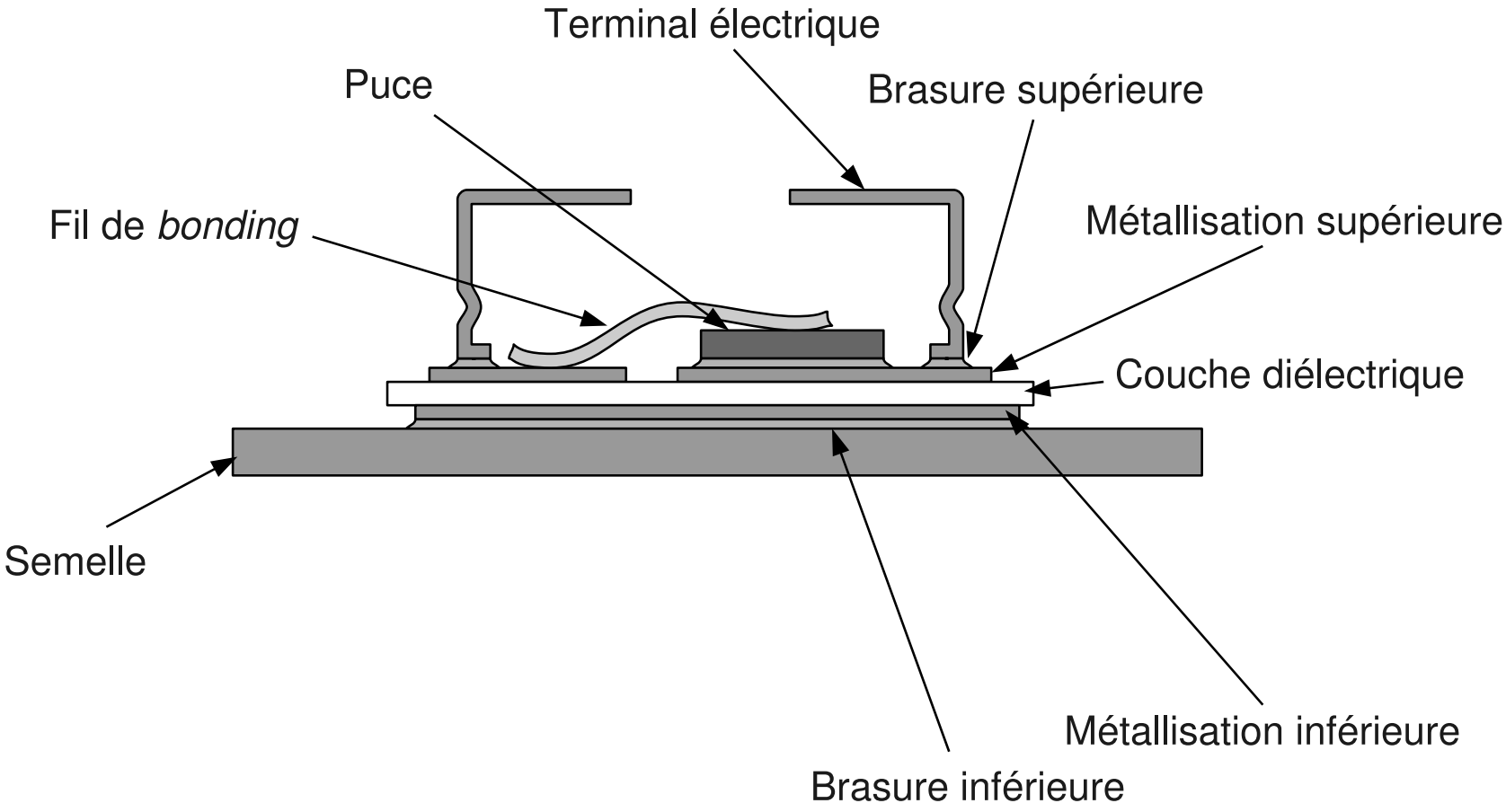
Coupe d'un module de puissance



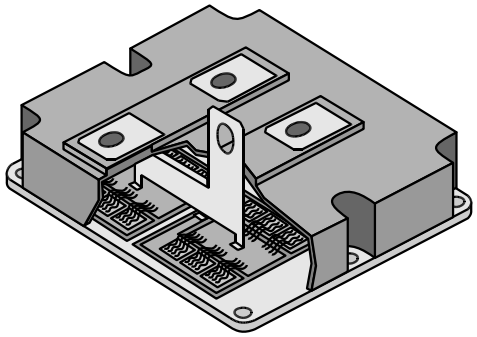


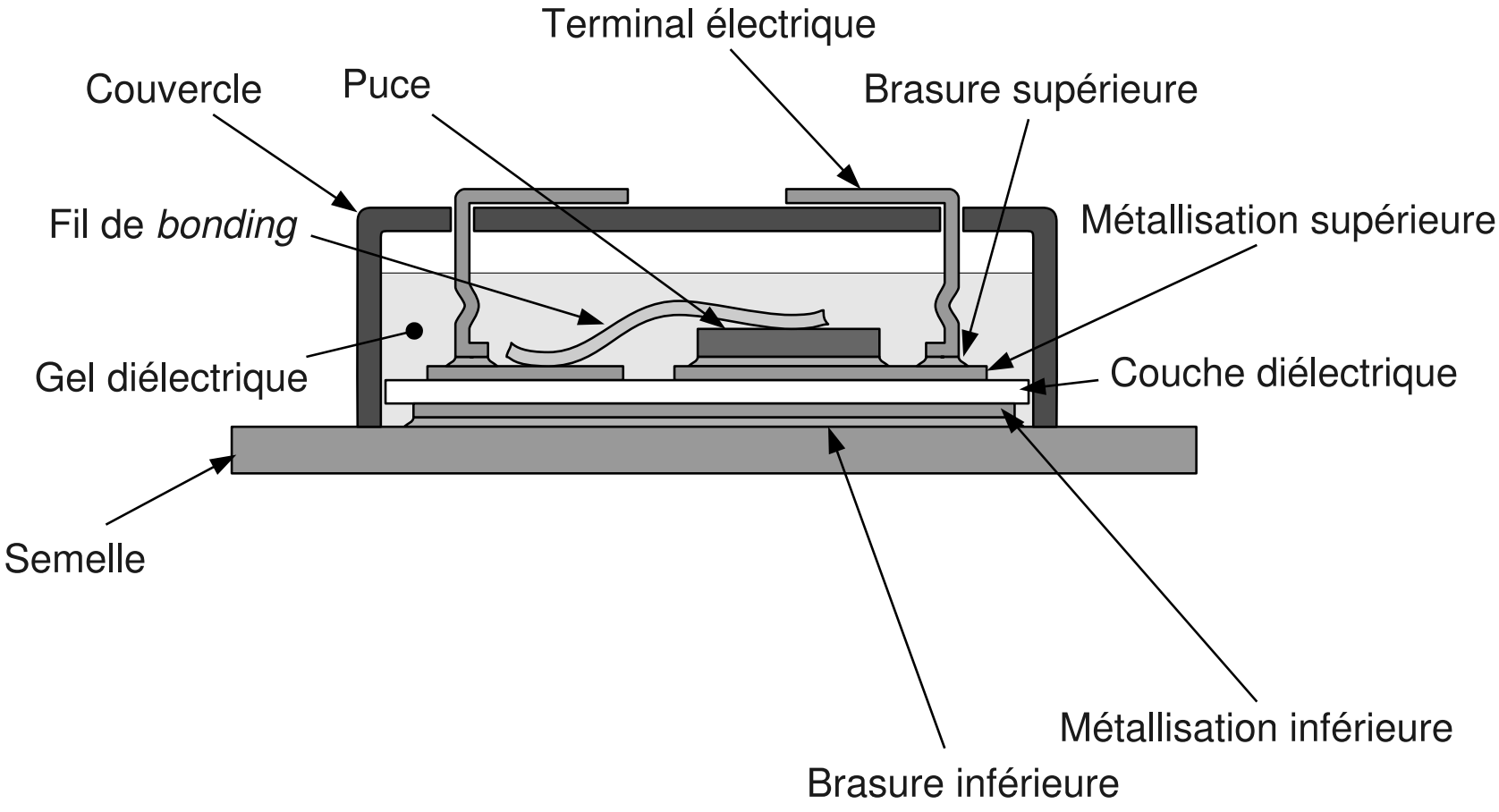
Coupe d'un module de puissance



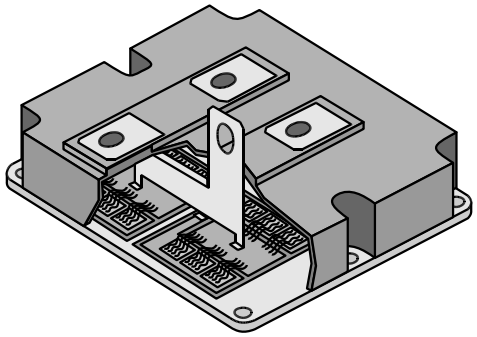


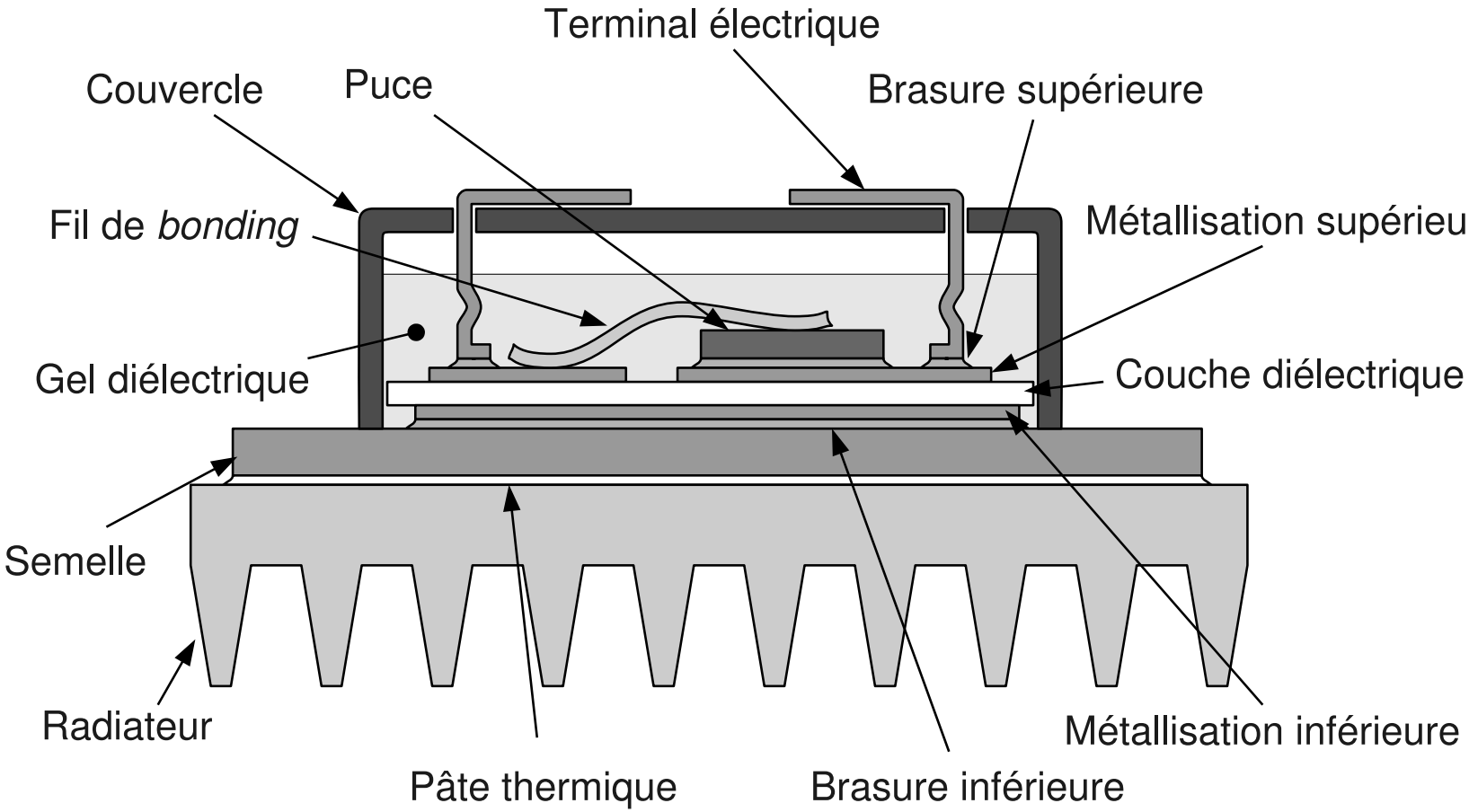
Coupe d'un module de puissance



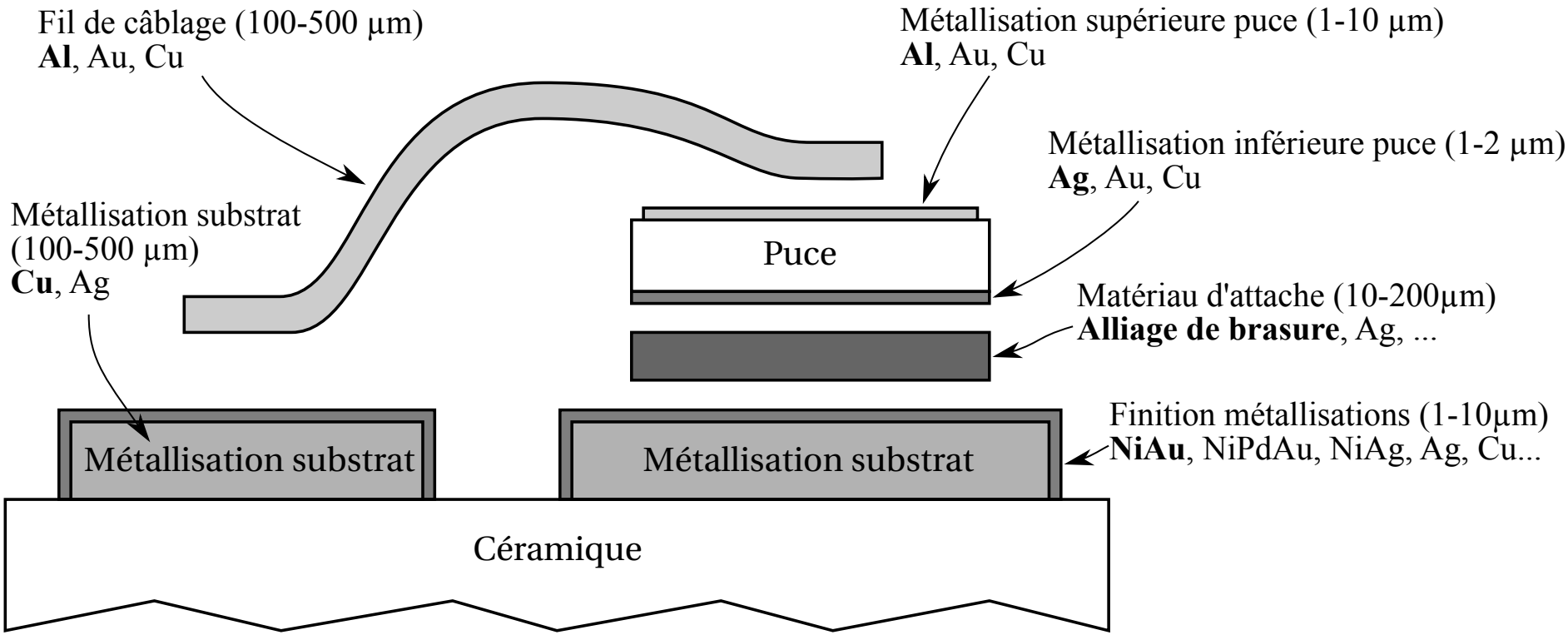


Coupe d'un module de puissance





Finitions métalliques du packaging

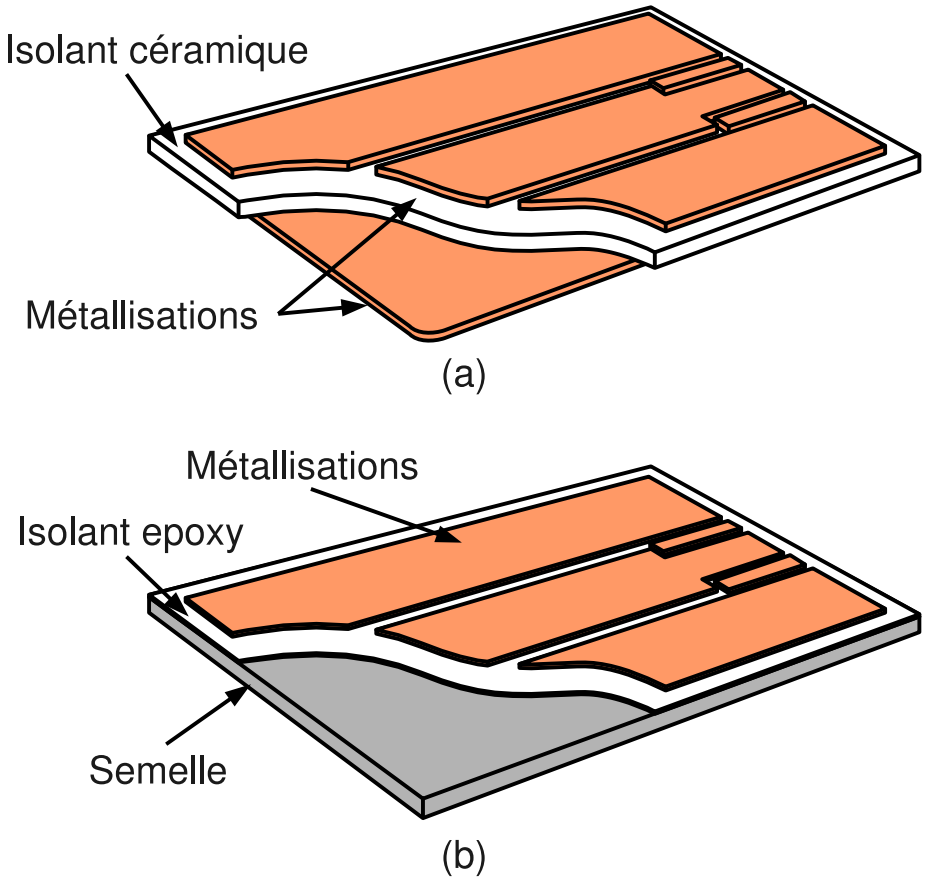


En gras : les finitions et métaux les plus courants

Ces finitions visent à :

- protéger de l'oxydation, la diffusion d'espèces chimiques ;
- la compatibilité avec les procédés d'interconnexion.

Substrats isolés

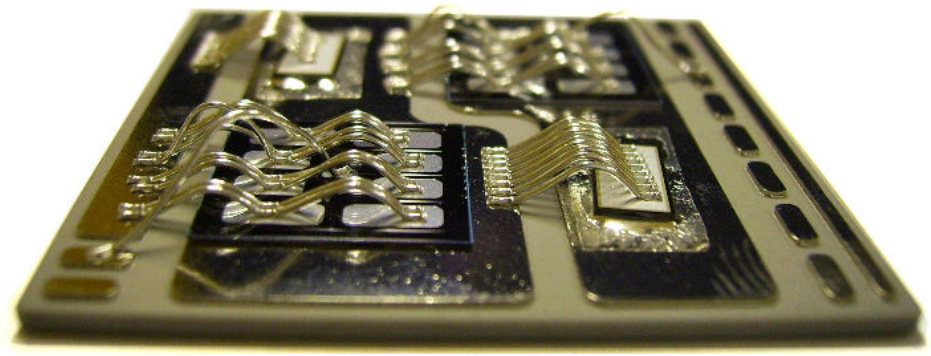


Plusieurs technologies :

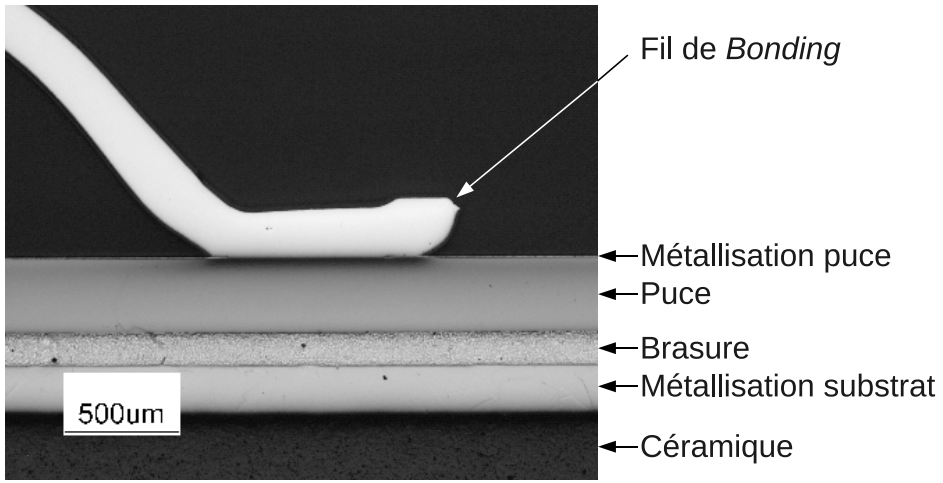
- Les substrats céramiques (DBC, DBA, ...)
  - céramique (0,3 à 1 mm)
  - cuivre (0,1 à 0,3 mm)
  - Bonnes performances thermiques et électriques
  - Cher
- Les Substrats Métalliques Isolés (SMI)
  - aluminium (1 à 3 mm)
  - isolant (0,1 mm)
  - cuivre (0,035 à 0,2 mm)
  - Performances moyennes
  - Coef. 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. . .



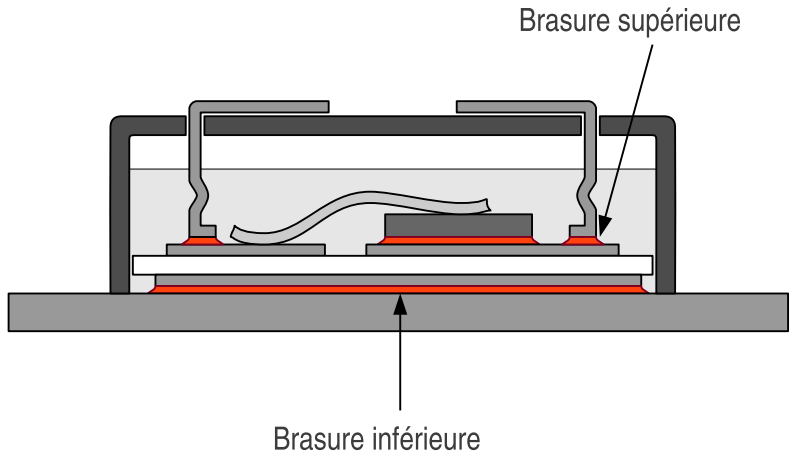
Source : Université Nottingham



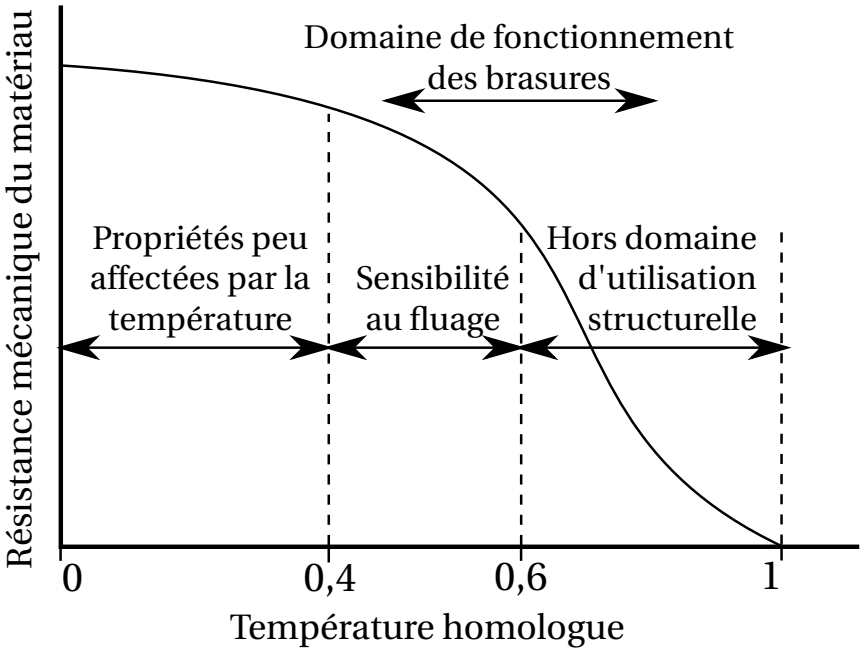
Source : Université Nottingham

Les brasures

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



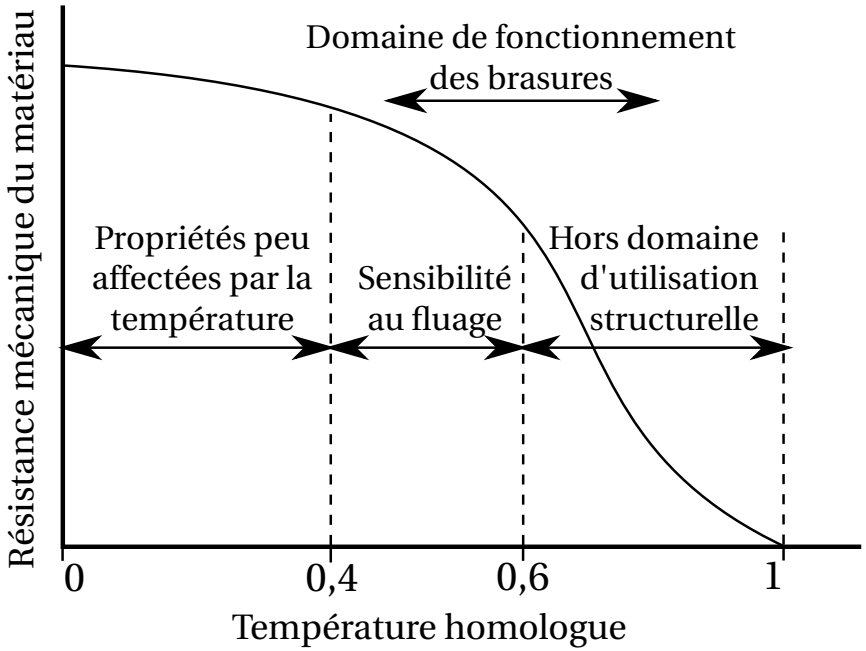
Les brasures – limites de fonctionnement



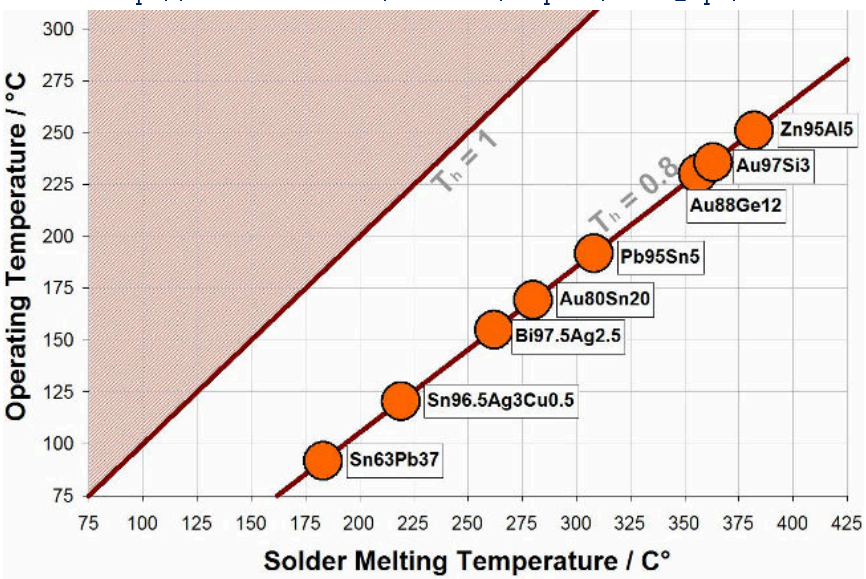
Source : http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0123_mpm/

- 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 °C (573 K), pour T_H=0.8 : T_O=185 °C
- ex : T_M=183 °C (fil de brasure standard), pour T_H=0.8 : T_O=92 °C

Les brasures – limites de fonctionnement



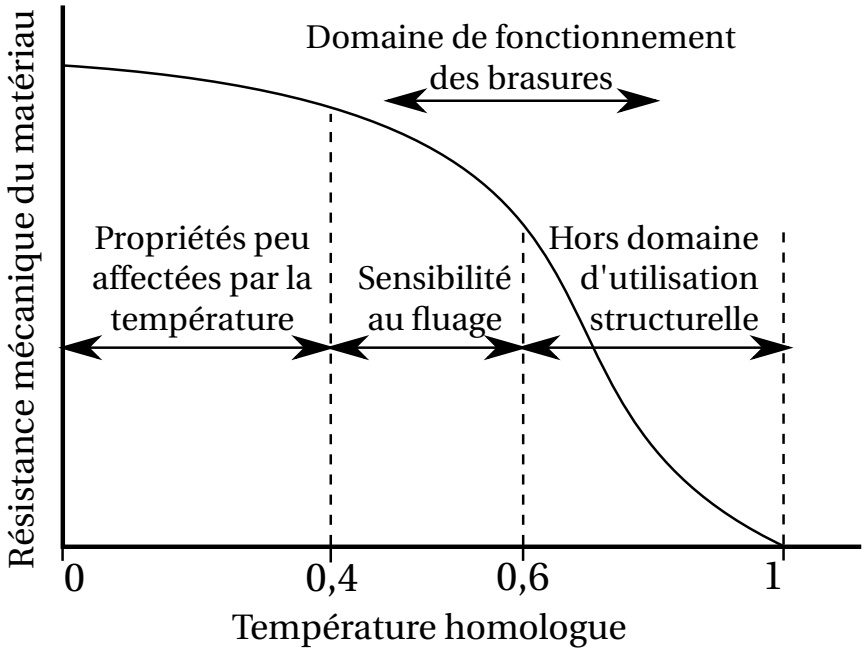
Source : http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0123_mpm/



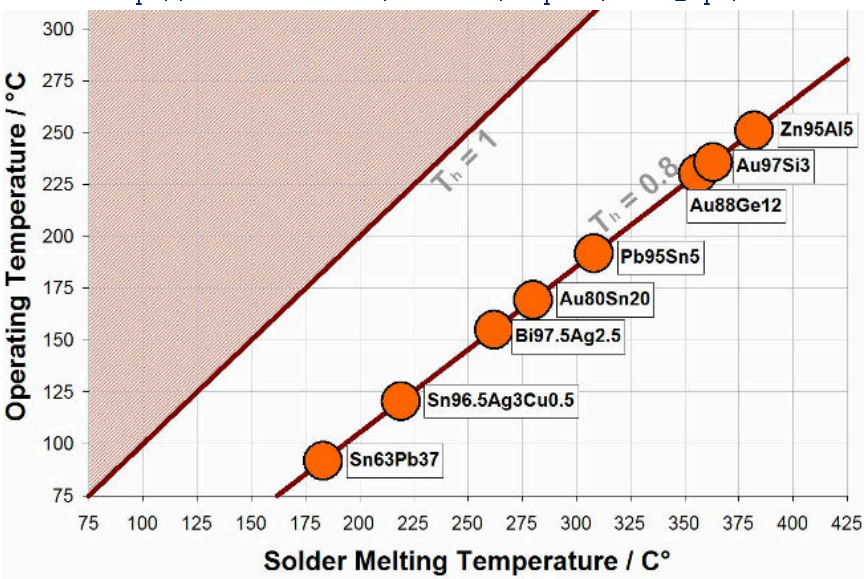
Source : Power Semiconductor Joining through Sintering of Silver Nanoparticles...
M.Knoerr et al, CIPS 2010

- 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 °C (573 K), pour T_H=0.8 : T_O=185 °C
- ex : T_M=183 °C (fil de brasure standard), pour T_H=0.8 : T_O=92 °C

Les brasures – limites de fonctionnement



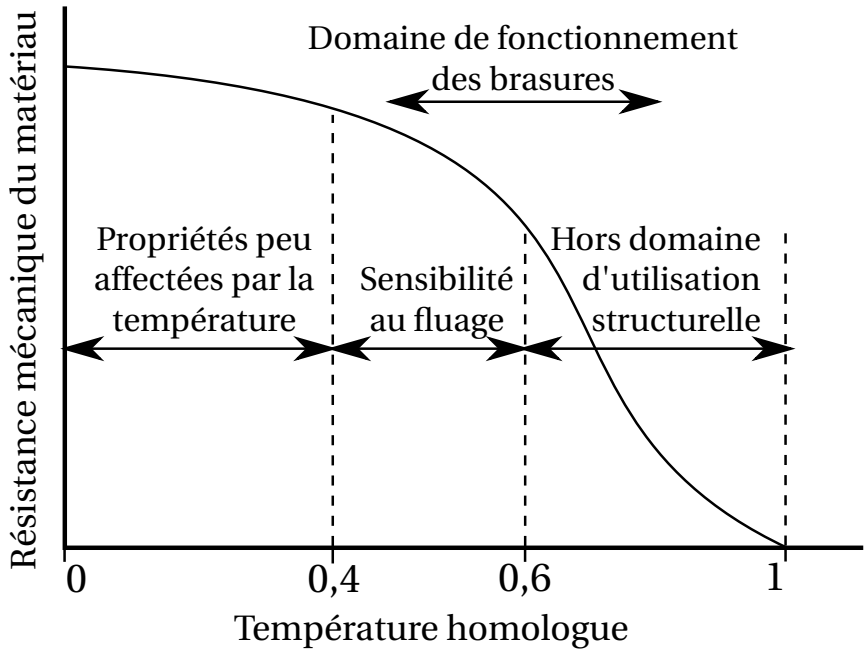
Source : http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0123_mpm/



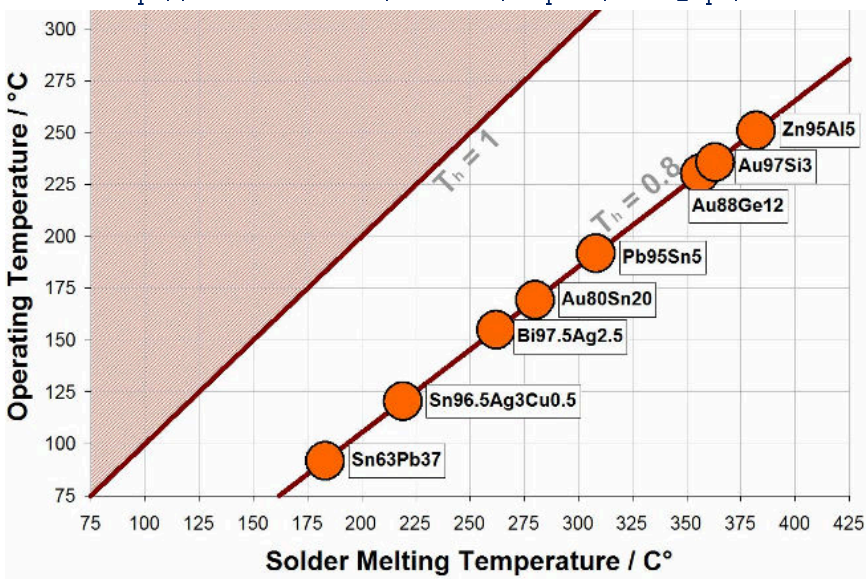
Source : Power Semiconductor Joining through Sintering of Silver Nanoparticles...
M.Knoerr et al, CIPS 2010

- 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 °C (573 K), pour T_H=0.8 : T_O=185 °C
- ex : T_M=183 °C (fil de brasure standard), pour T_H=0.8 : T_O=92 °C

Les brasures – limites de fonctionnement



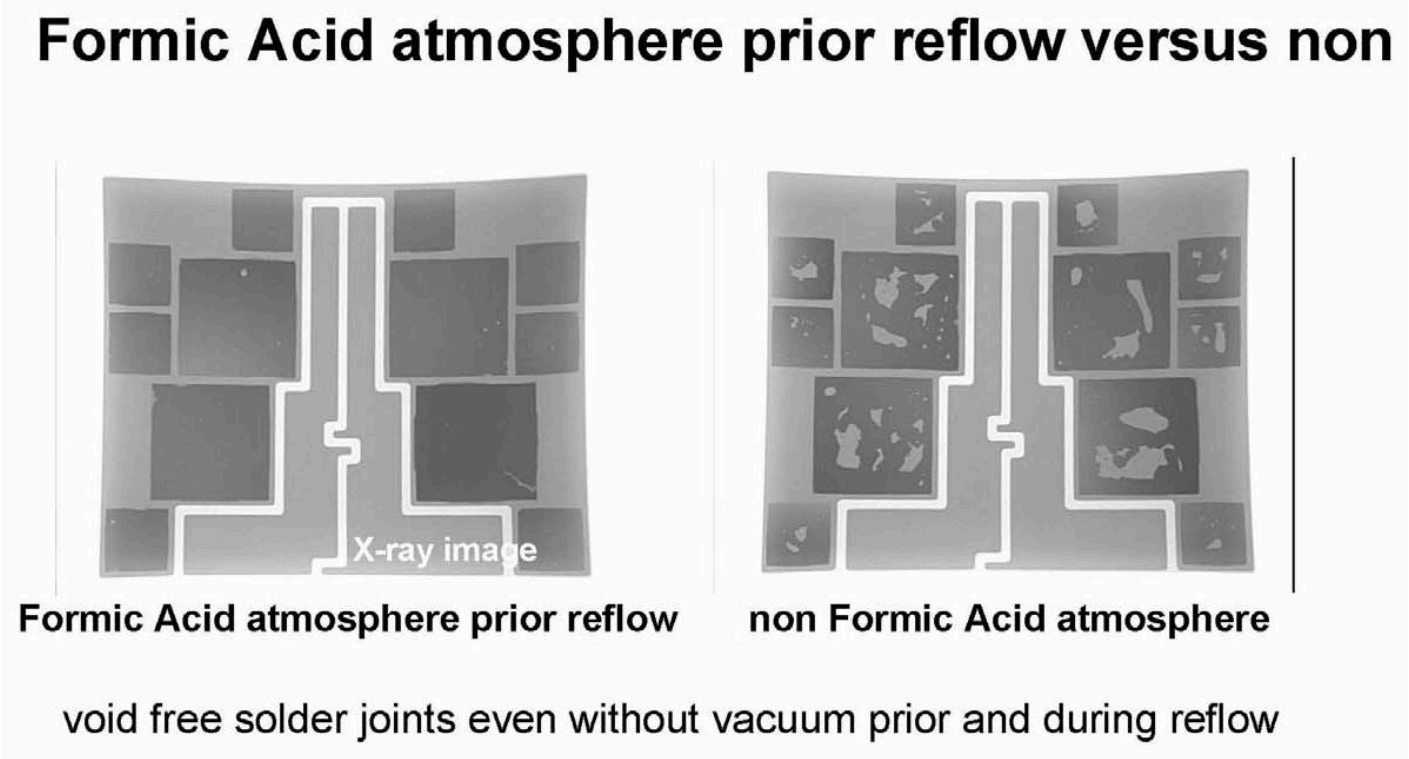
Source : http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0123_mpm/



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 °C (573 K), pour T_H=0.8 : T_O=185 °C
- ex : T_M=183 °C (fil de brasure standard), pour T_H=0.8 : T_O=92 °C

Les brasures – problème des vides



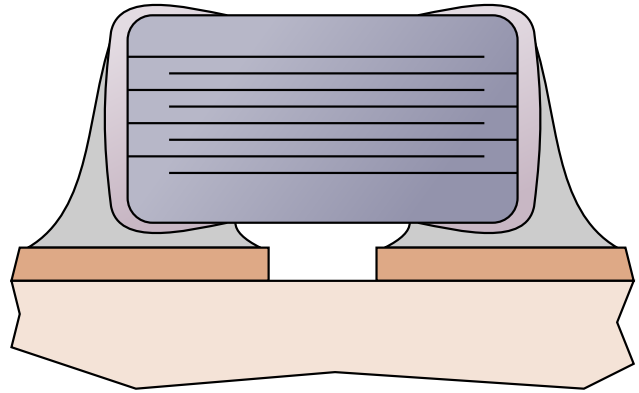
Source : Reflow Soldering Technology for large die area Power Electronics, Matthias Hutter, Microcar, Leipzig, 21 juin 2005

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. . .)

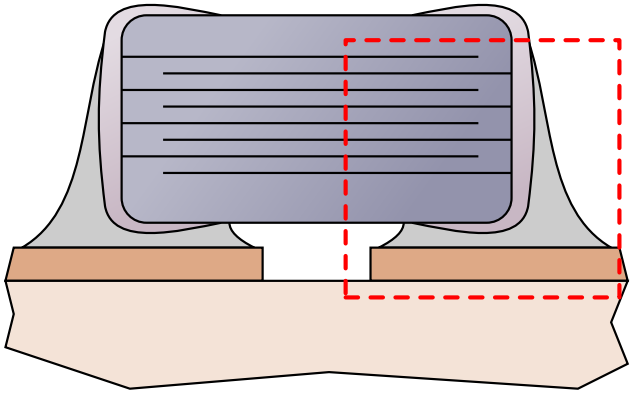
Vieillissement de brasures [1] (Ampère/IMS) – 1

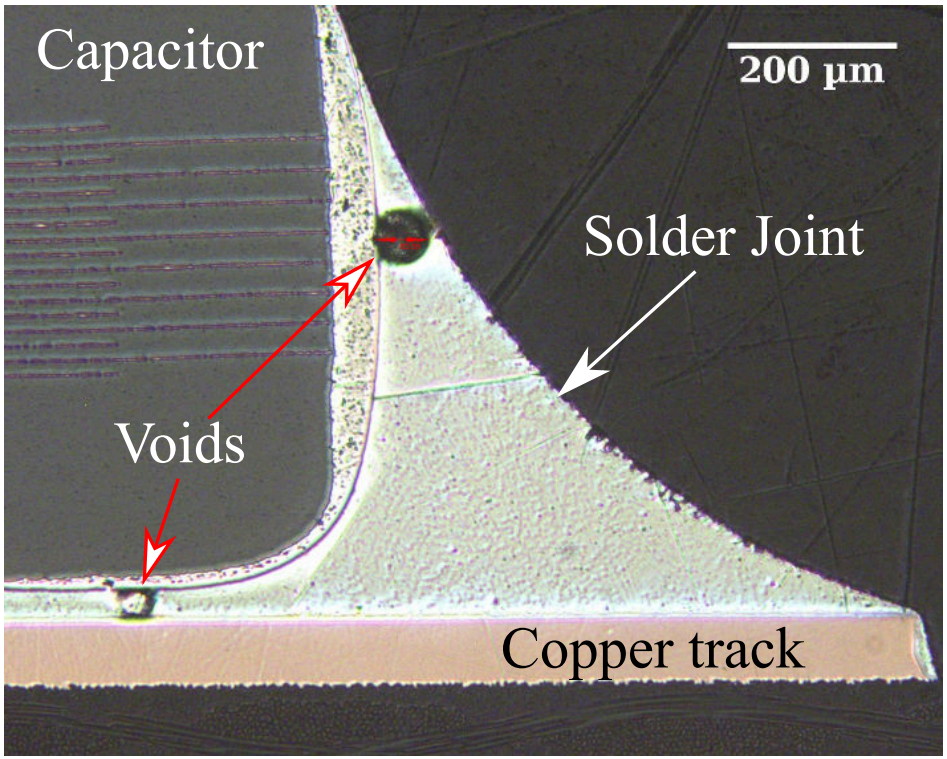
- Vacuoles dans le joint dès le début
- Après cyclage (750 cycles) :
  - Plus de vacuoles
  - Amorce de fissuration
  - Rugosification de surface



Vieillissement de brasures [1] (Ampère/IMS) – 1

- Vacuoles dans le joint dès le début
- Après cyclage (750 cycles) :
  - Plus de vacuoles
  - Amorce de fissuration
  - Rugosification de surface

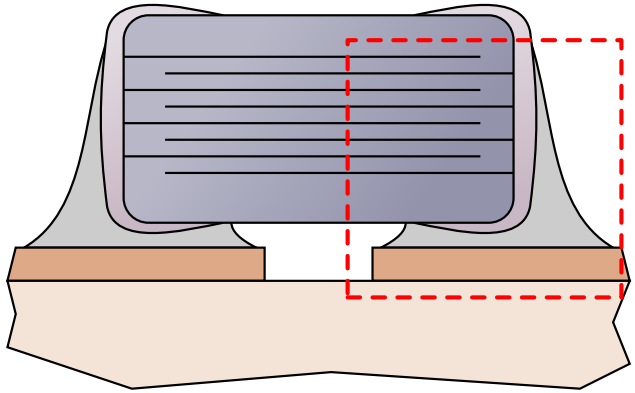


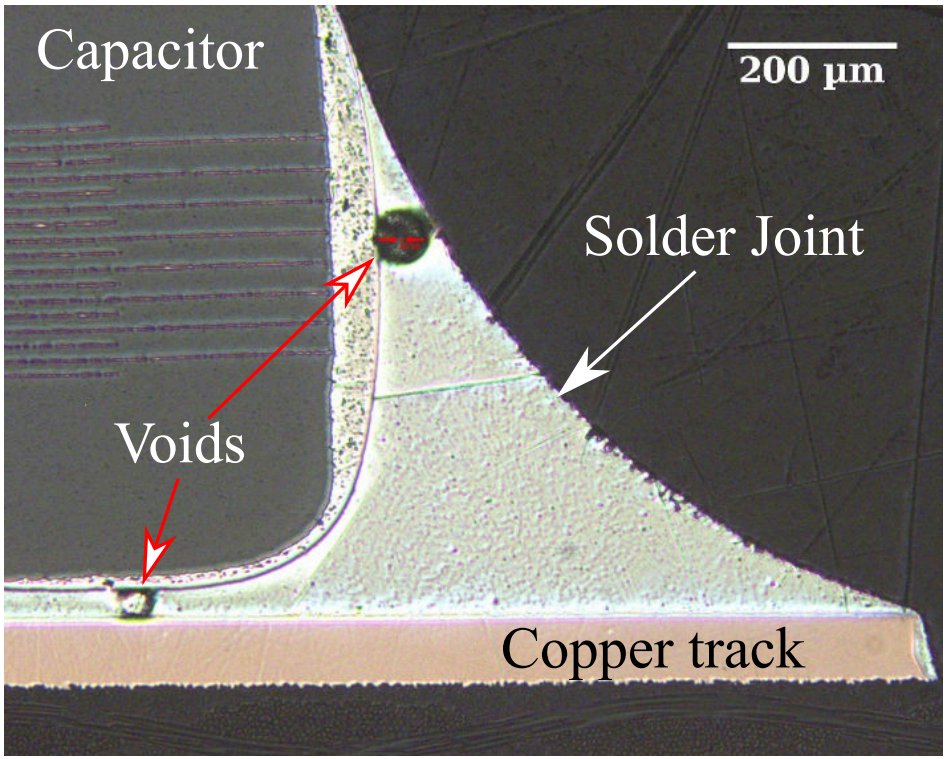


t=0

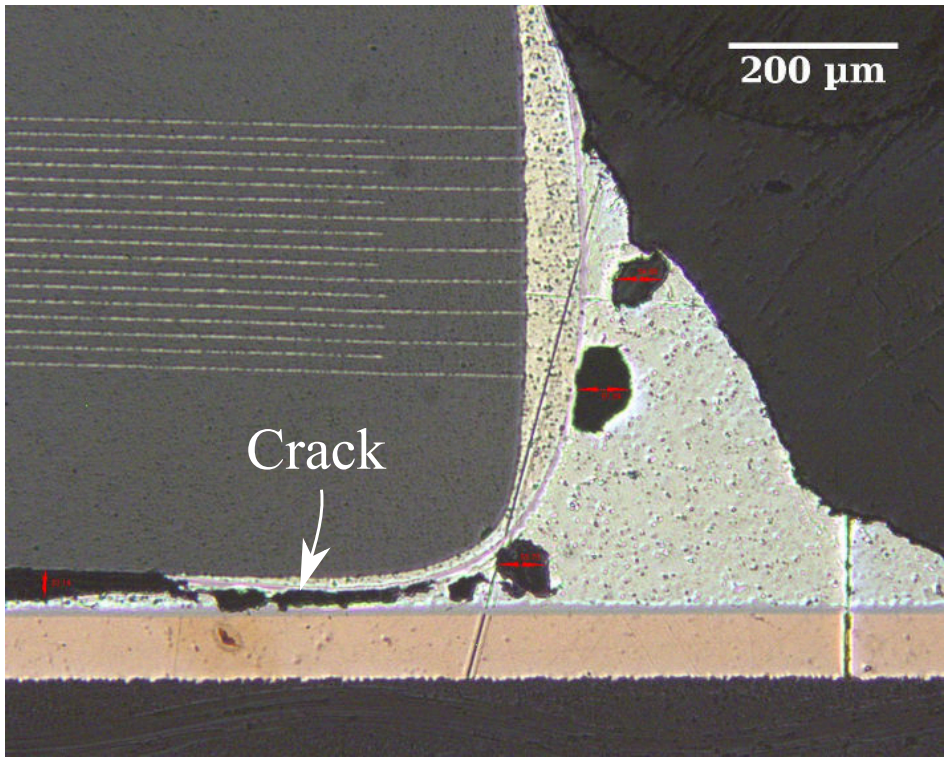
Vieillissement de brasures [1] (Ampère/IMS) – 1

- Vacuoles dans le joint dès le début
- Après cyclage (750 cycles) :
  - Plus de vacuoles
  - Amorce de fissuration
  - Rugosification de surface



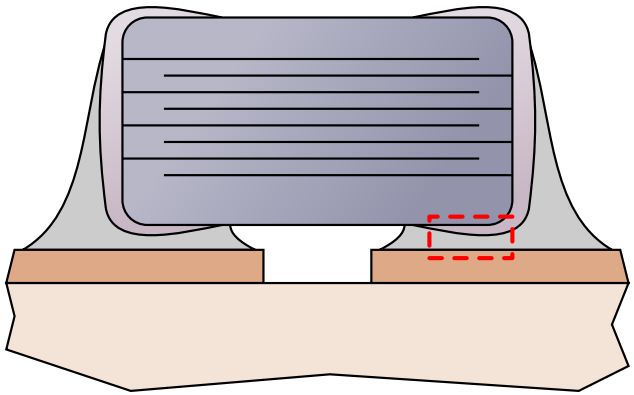


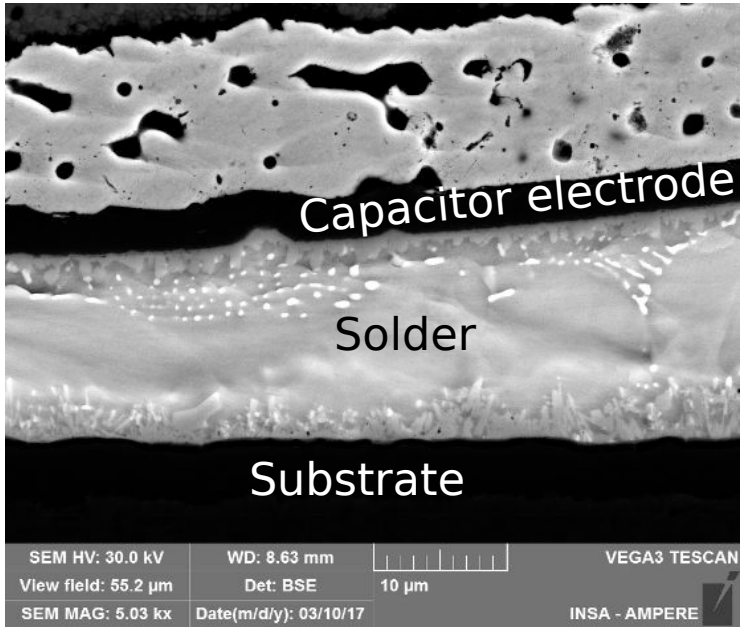
t=0



750 cycles (-55/+175°C)

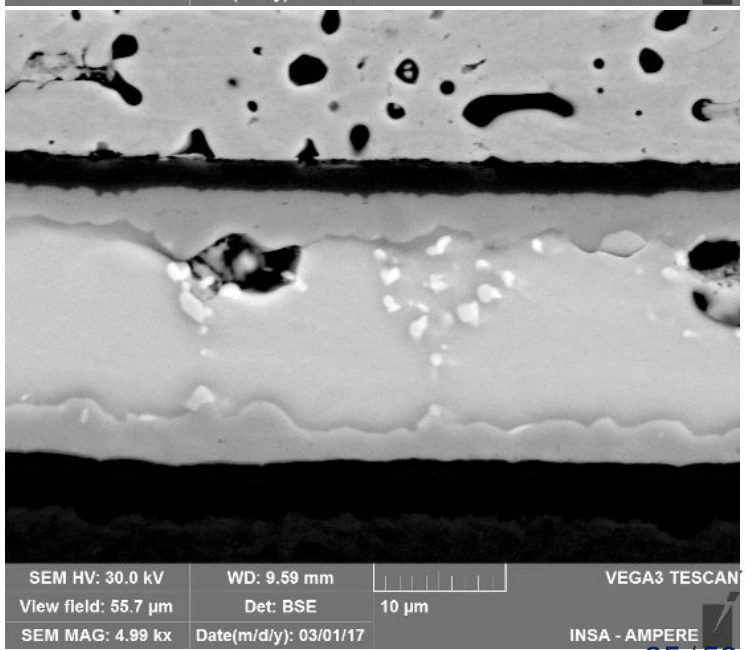
Vieillissement de brasures [1] (Ampère/IMS) – 2





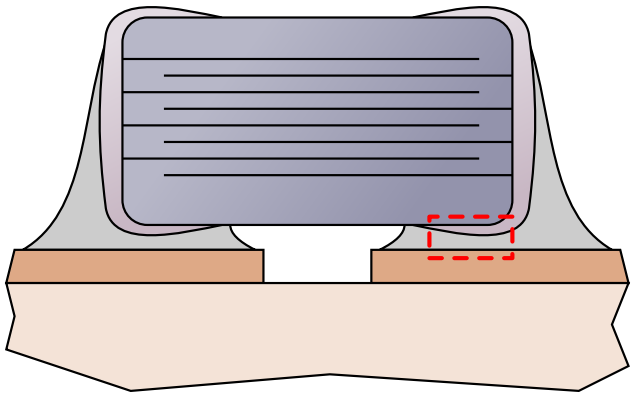
Stockage 175 °C, 310 h

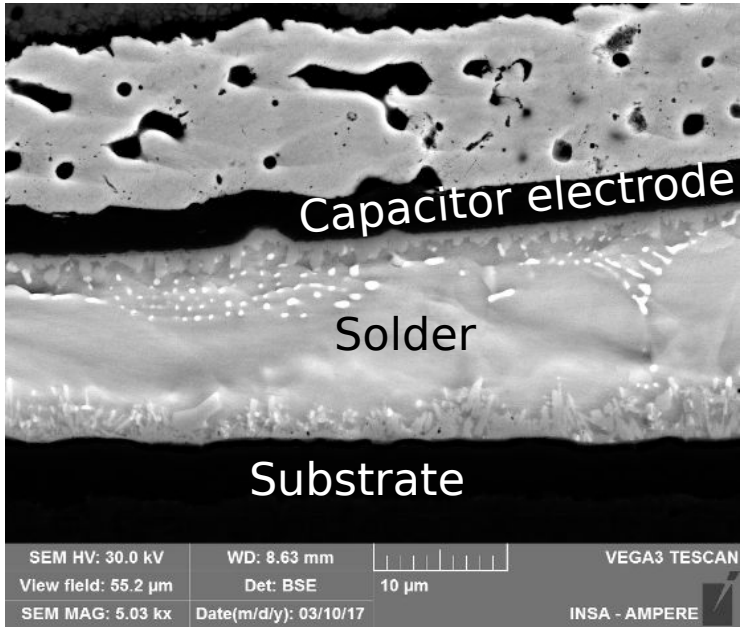
- Les IMC interfaciaux sont continus
- Pas de fissuration

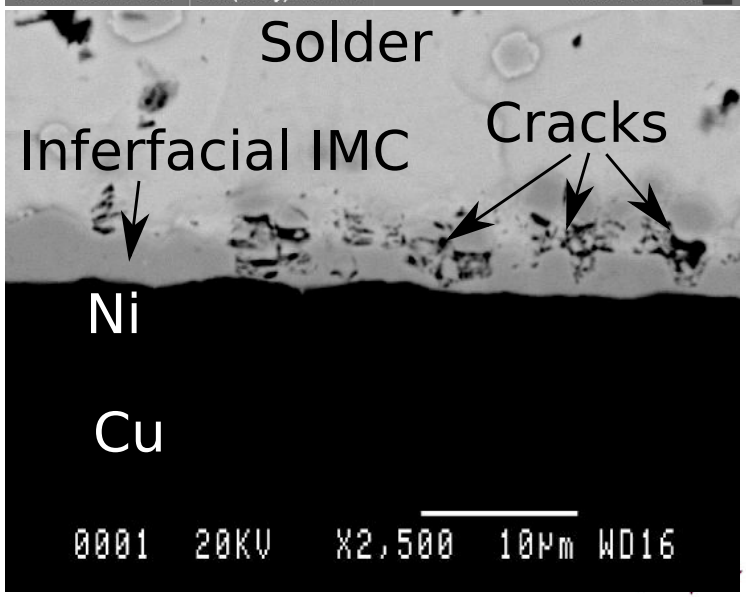


Haut droit : stockage, bas droit : stockage.

Vieillissement de brasures [1] (Ampère/IMS) – 2







Stockage 175 °C, 310 h

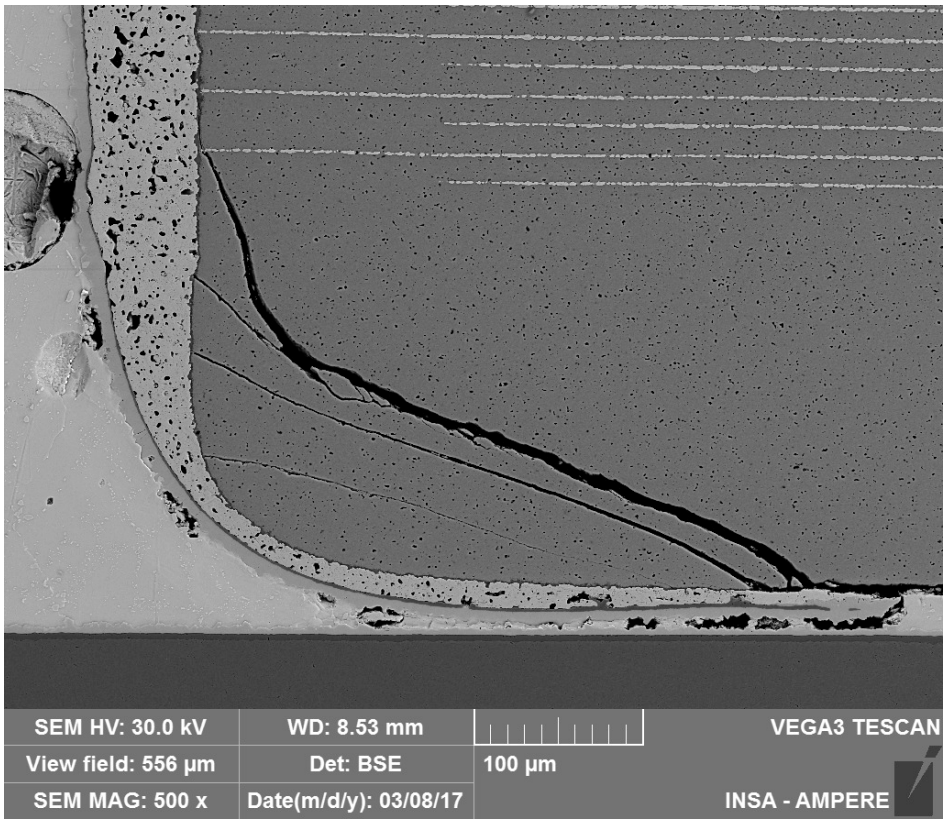
- Les IMC interfaciaux sont continus
- Pas de fissuration

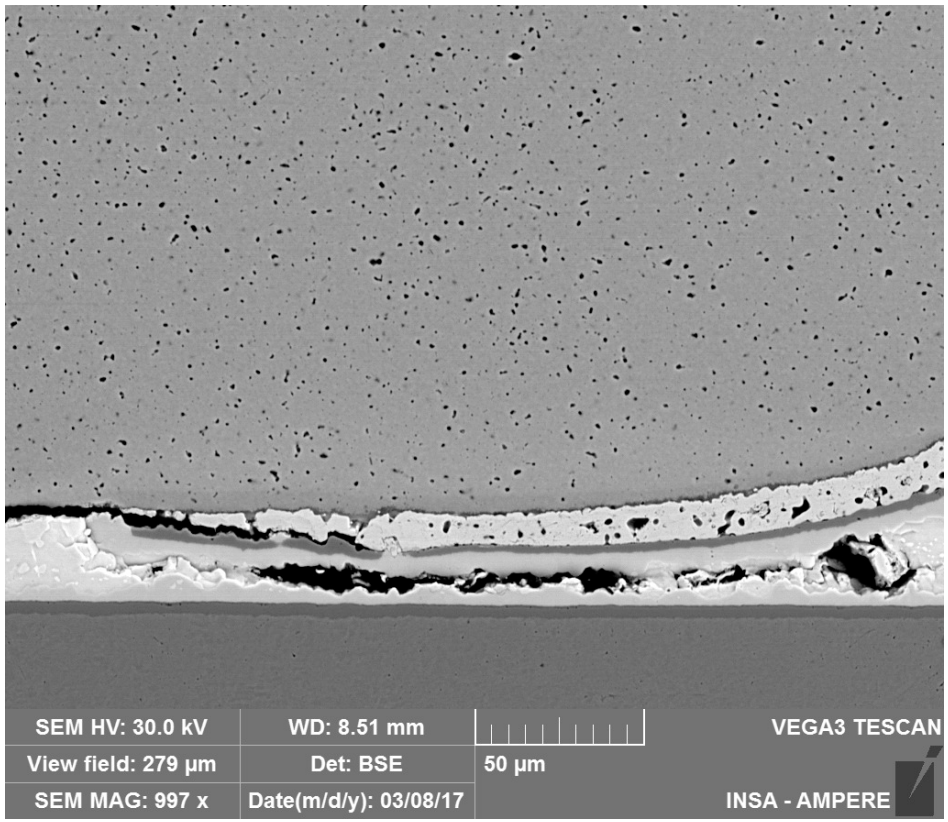
Cyclage -55/+175°C, 1500 cycles

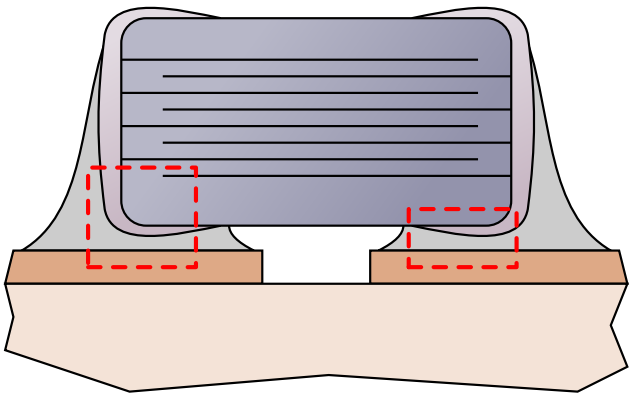
- Les IMC interfaciaux sont continus
- Fissures entre les IMC et la brasure

Haut droit : stockage, bas droit : cyclage.

Vieillissement de brasures [1] (Ampère/IMS) – 3



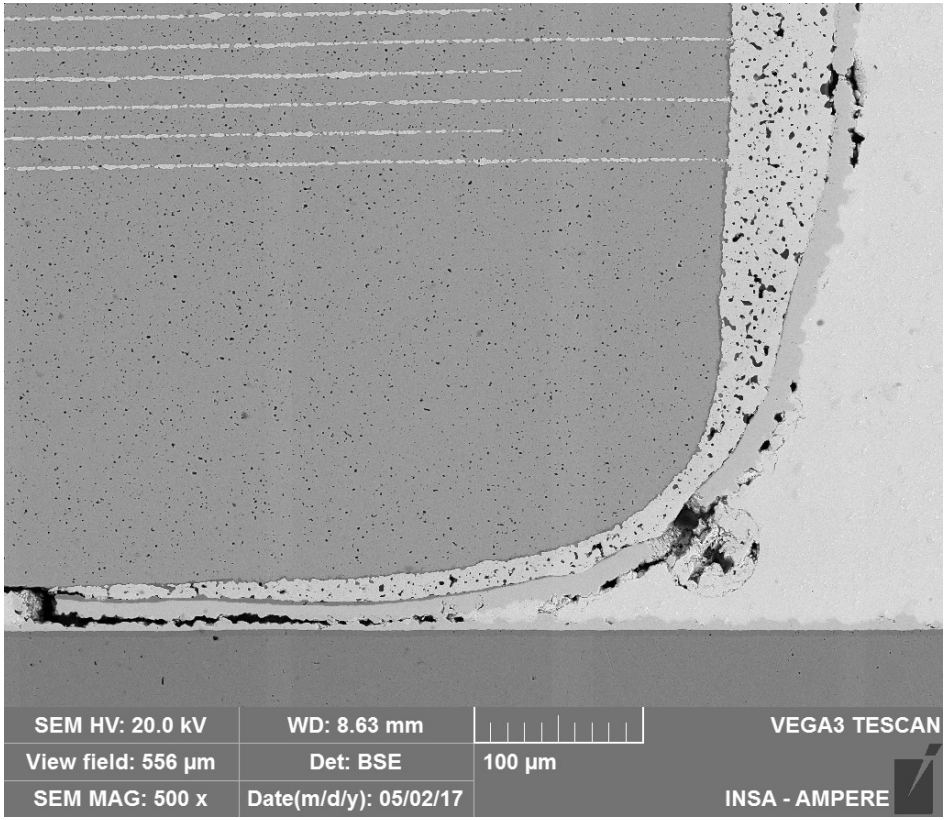


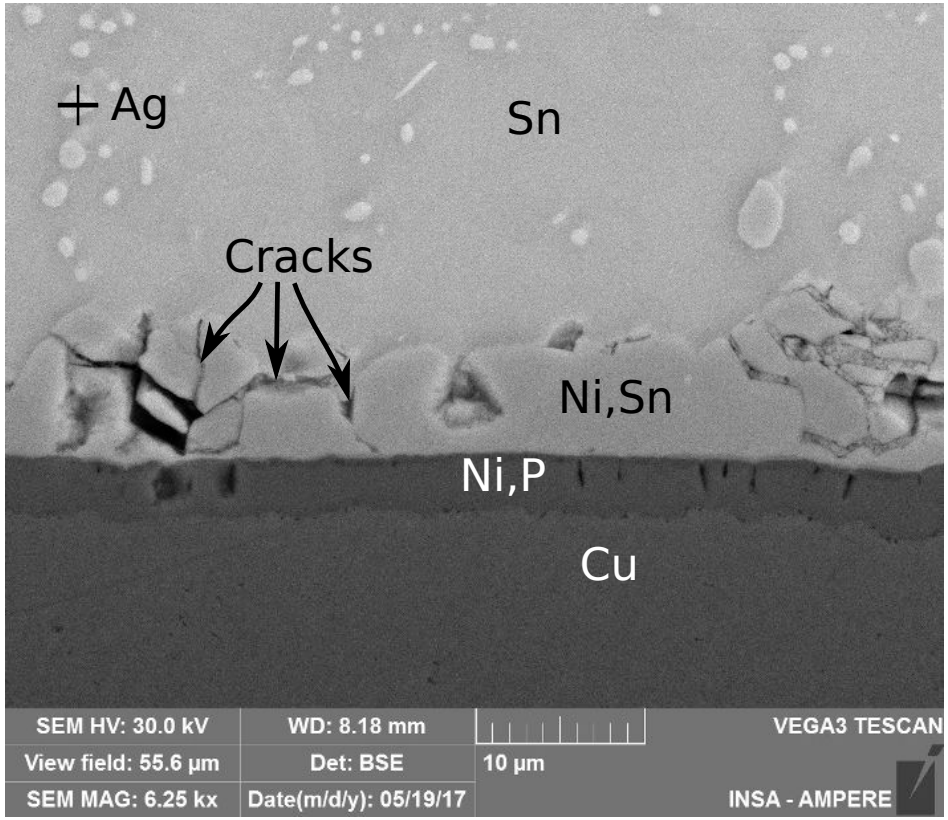


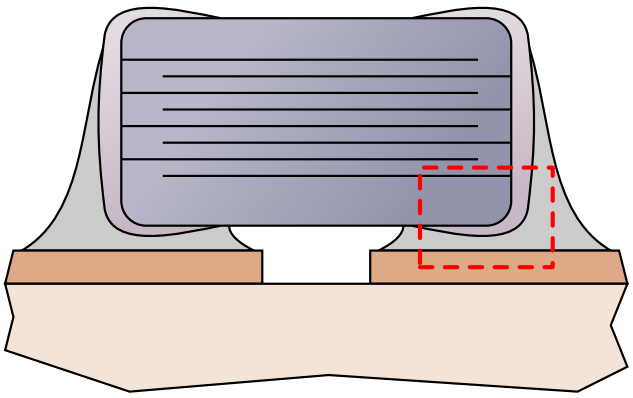
stockage 175 °C, 1000 h

- Les IMC interfaciaux s'épaississent
- Ils prennent tout l'espace sous le condensateur
- Des fissures apparaissent

Vieillissement de brasures [1] (Ampère/IMS) – 4



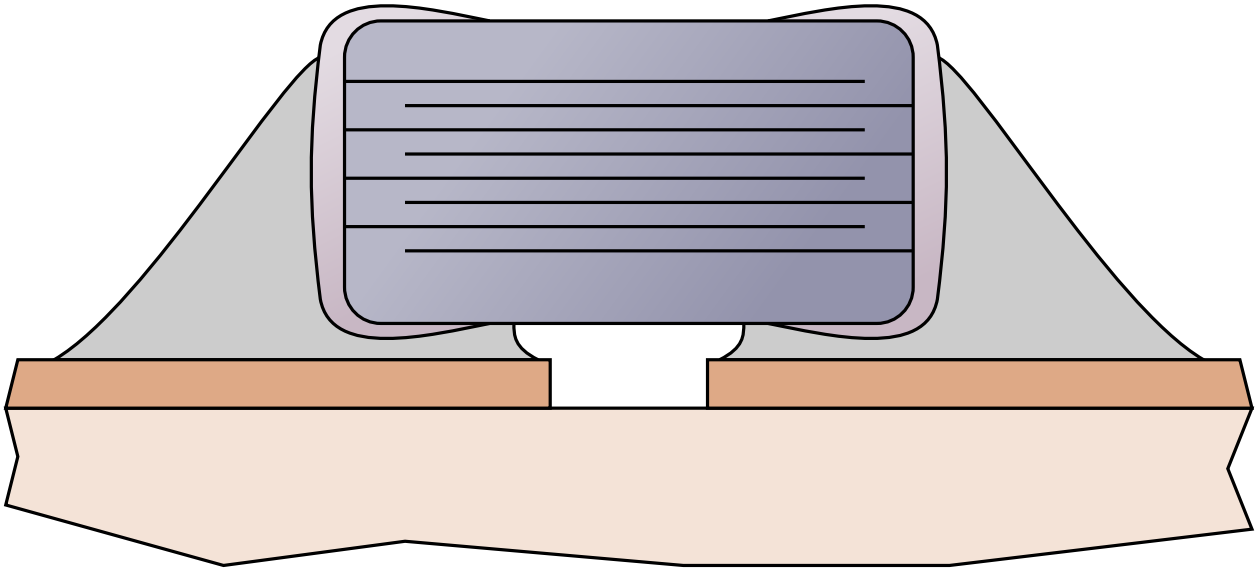




Stockage 175 °C, 2562 h

- Les IMC croissent là où c'est possible
- Les fissures continuent à se propager
- Elles se produisent aussi dans les IMC

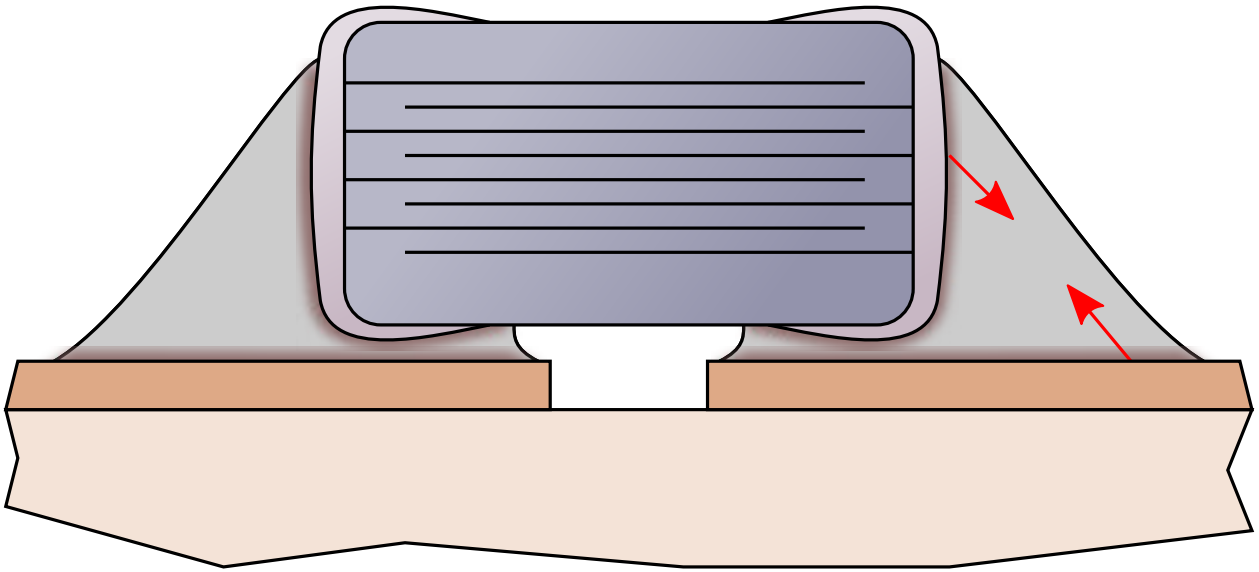
Vieillissement de brasures [1] (Ampère/IMS) –

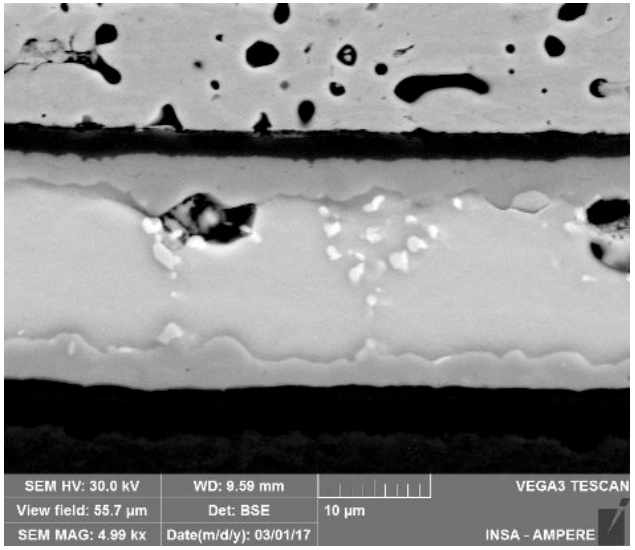


Mécanismes du vieillissement isotherme :

- Les IMC interfaciaux croissent
  - IMC plus denses que la brasure → le joint se contracte
  - Augmentation des contraintes résiduelles dans le joint
- Au cours de la croissance des IMC
  - Des fissures se propagent à l'interface IMC/brasure
  - Peuvent également se propager dans le condensateur
- **Test caricatural**
  - la brasure SAC305 fond à 217°C, le test est réalisé à 175°C
  - Le cyclage profond accélère la dégradation

Vieillissement de brasures [1] (Ampère/IMS) –

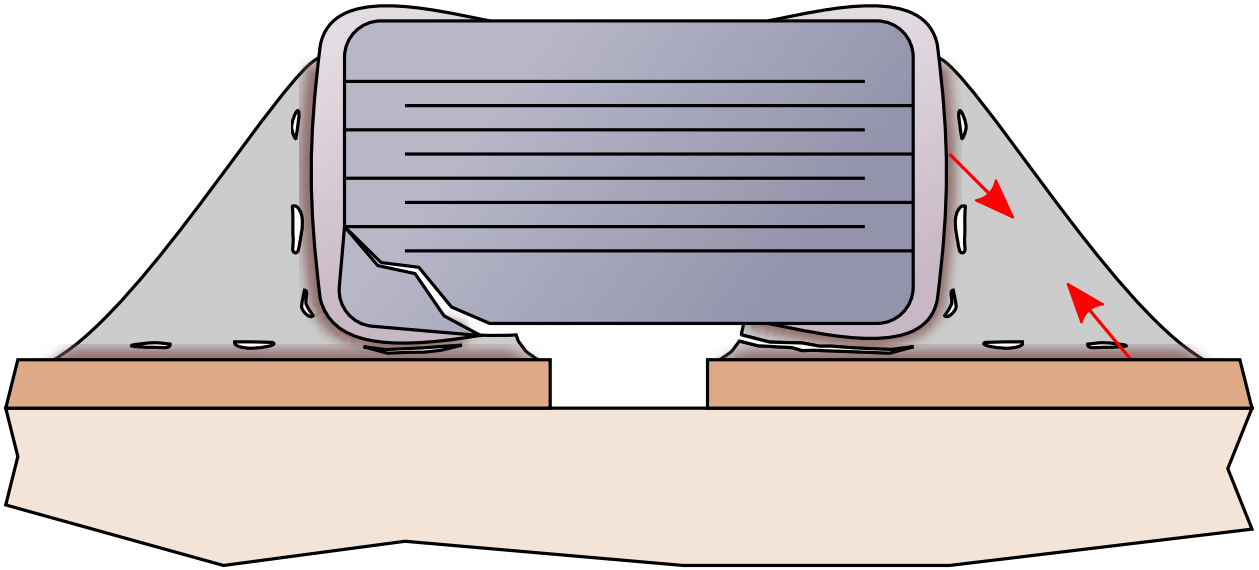


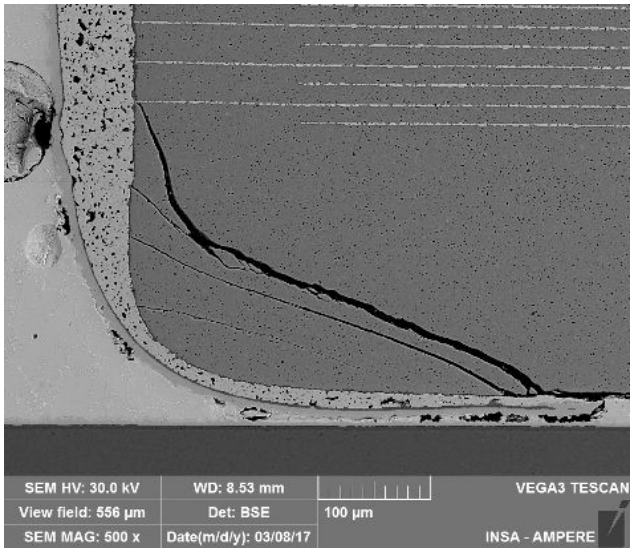


Mécanismes du vieillissement isotherme :

- Les IMC interfaciaux croissent
  - IMC plus denses que la brasure ➜ le joint se contracte
  - Augmentation des contraintes résiduelles dans le joint
- Au cours de la croissance des IMC
  - Des fissures se propagent à l'interface IMC/brasure
  - Peuvent également se propager dans le condensateur
- **Test caricatural**
  - la brasure SAC305 fond à 217°C, le test est réalisé à 175°C
  - La cyclage profond accélère la dégradation

Vieillissement de brasures [1] (Ampère/IMS) –

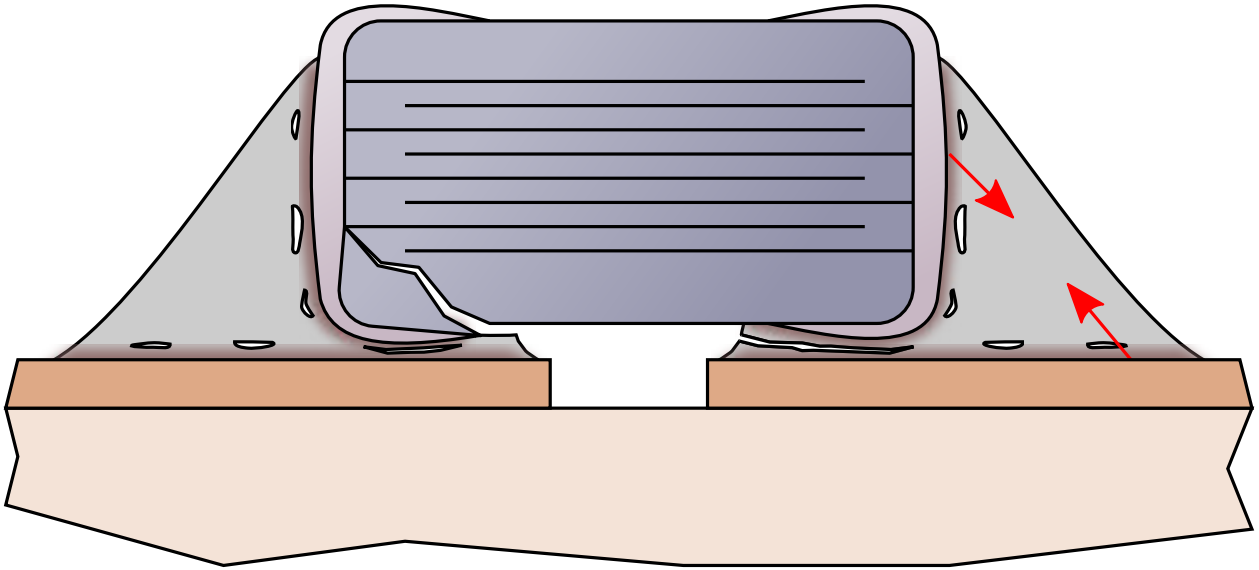




Mécanismes du vieillissement isotherme :

- Les IMC interfaciaux croissent
  - IMC plus denses que la brasure ➜ le joint se contracte
  - Augmentation des contraintes résiduelles dans le joint
- Au cours de la croissance des IMC
  - Des fissures se propagent à l'interface IMC/brasure
  - Peuvent également se propager dans le condensateur
- **Test caricatural**
  - la brasure SAC305 fond à 217 °C, le test est réalisé à 175 °C
  - Le cyclage profond accélère la dégradation

Vieillissement de brasures [1] (Ampère/IMS) –



Mécanismes du vieillissement isotherme :

- Les IMC interfaciaux croissent
  - IMC plus denses que la brasure ➜ le joint se contracte
  - Augmentation des contraintes résiduelles dans le joint
- Au cours de la croissance des IMC
  - Des fissures se propagent à l'interface IMC/brasure
  - Peuvent également se propager dans le condensateur
- **Test caricatural**
  - la brasure SAC305 fond à 217°C, le test est réalisé à 175°C
  - Le cyclage profond accélère la dégradation.

Les méthodes alternatives à la brasure

Objectif : décorréler $T_{process}$ and $T_{fonctionnement}$.

- Brasure : $T_{process} > T_{fusion} > T_{fonctionnement}$ par définition.
- Frittage :
  - phénomène de diffusion (habituellement à l'état solide) ;
  - $T_{process} < T_{fusion}$.
- Soudure en phase liquide transitoire (TLPB, SLID) :
  - fusion d'un matériau de liaison ;
  - diffusion du liquide dans un matériau solide ;
  - formation d'un nouveau composé à haut point de fusion ;
  - $T_{process} < T_{fusion}$ pour le composé final.

Les méthodes alternatives à la brasure

Objectif : décorréler $T_{process}$ and $T_{fonctionnement}$.

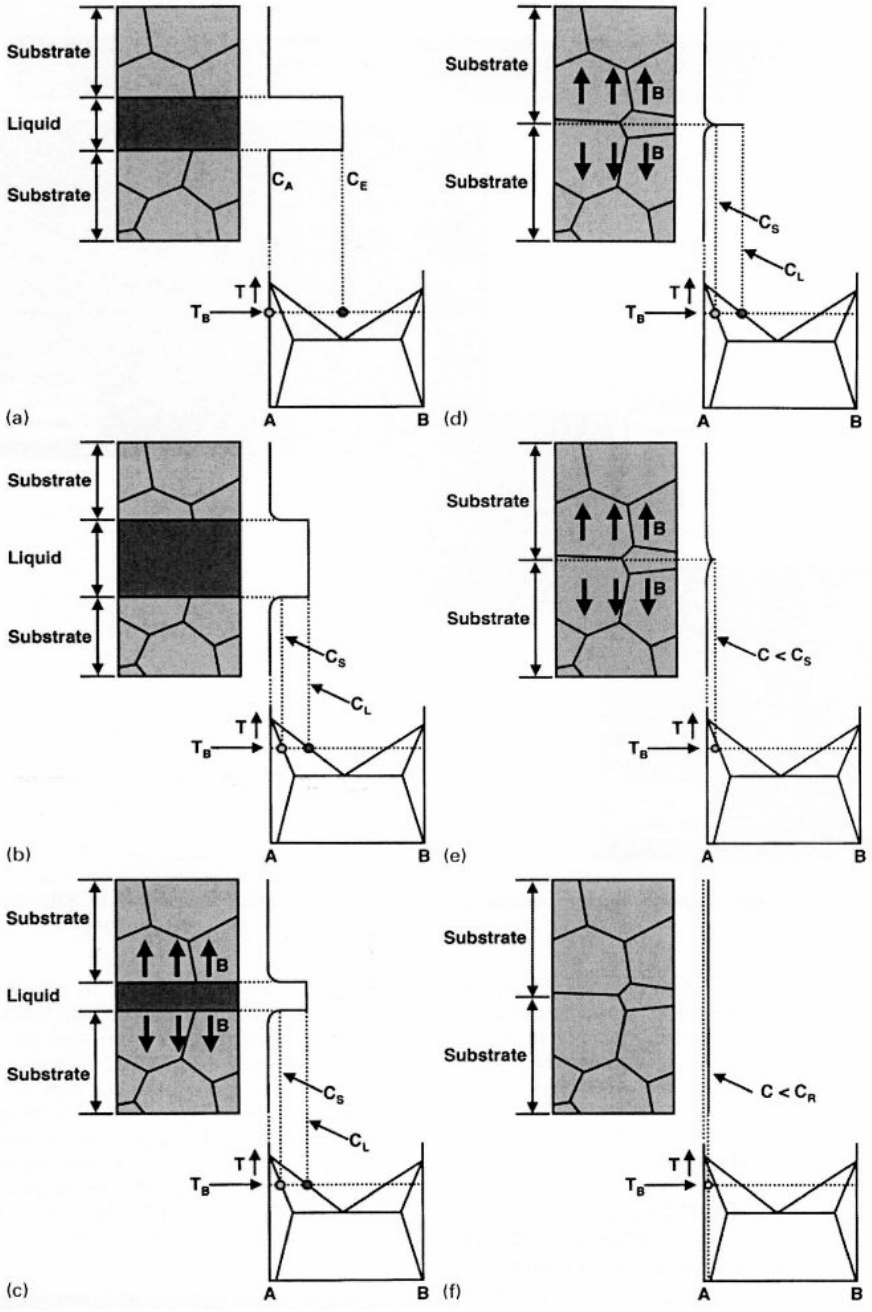
- Brasure : $T_{process} > T_{fusion} > T_{fonctionnement}$ par définition.
- Frittage :
  - phénomène de diffusion (habituellement à l'état solide) ;
  - $T_{process} < T_{fusion}$.
- Soudure en phase liquide transitoire (TLPB, SLID) :
  - fusion d'un matériau de liaison ;
  - diffusion du liquide dans un matériau solide ;
  - formation d'un nouveau composé à haut point de fusion ;
  - $T_{process} < T_{fusion}$ pour le composé final.

Les méthodes alternatives à la brasure

Objectif : décorréler $T_{process}$ and $T_{fonctionnement}$.

- Brasure : $T_{process} > T_{fusion} > T_{fonctionnement}$ par définition.
- Frittage :
  - phénomène de diffusion (habituellement à l'état solide) ;
  - $T_{process} < T_{fusion}$.
- Soudure en phase liquide transitoire (TLPB, SLID) :
  - fusion d'un matériau de liaison ;
  - diffusion du liquide dans un matériau solide ;
  - formation d'un nouveau composé à haut point de fusion ;
  - $T_{process} < T_{fusion}$ pour le composé final.

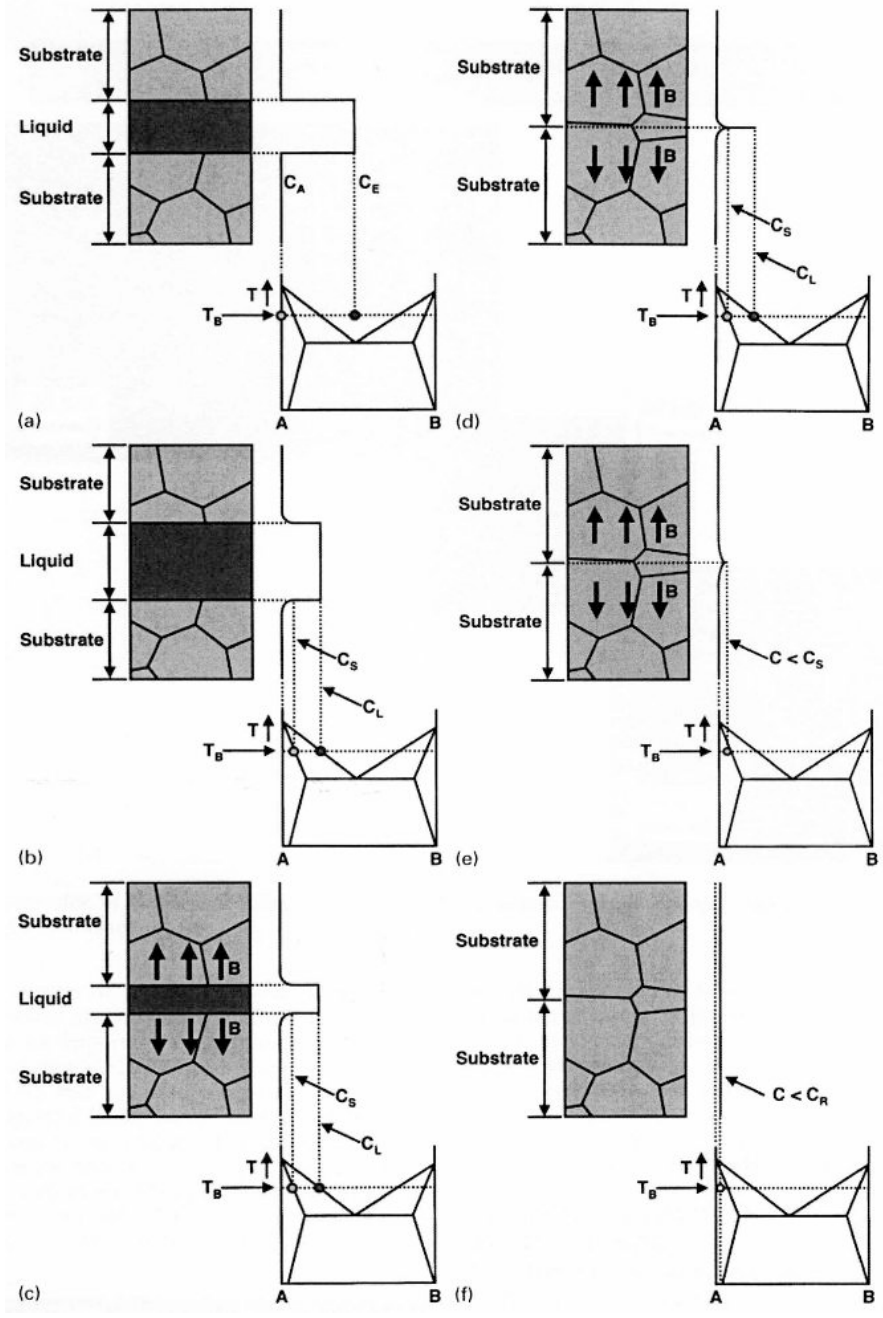
Soudure en phase liquide transitoire



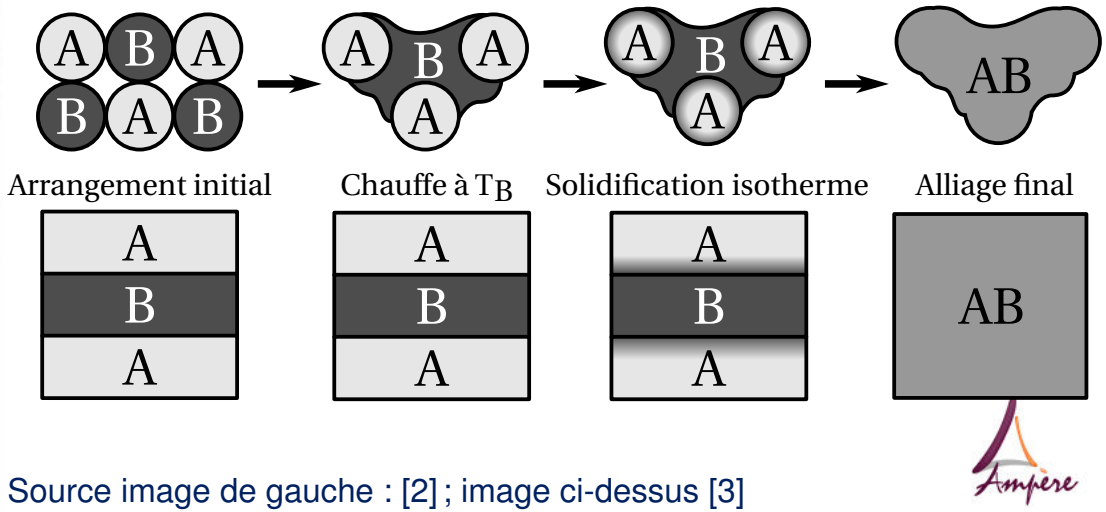
- Matériau fusible : Sn, In
- Matériau substrat : Cu, Ag, Au
- Épaisseurs :
  - Substrat : dizaines de microns
  - Couche fusible : microns
- Alternative : utilisation de poudres
- Mise au point complexe (IMC)

Source image de gauche : [2] ; image ci-dessus [3]

Soudure en phase liquide transitoire

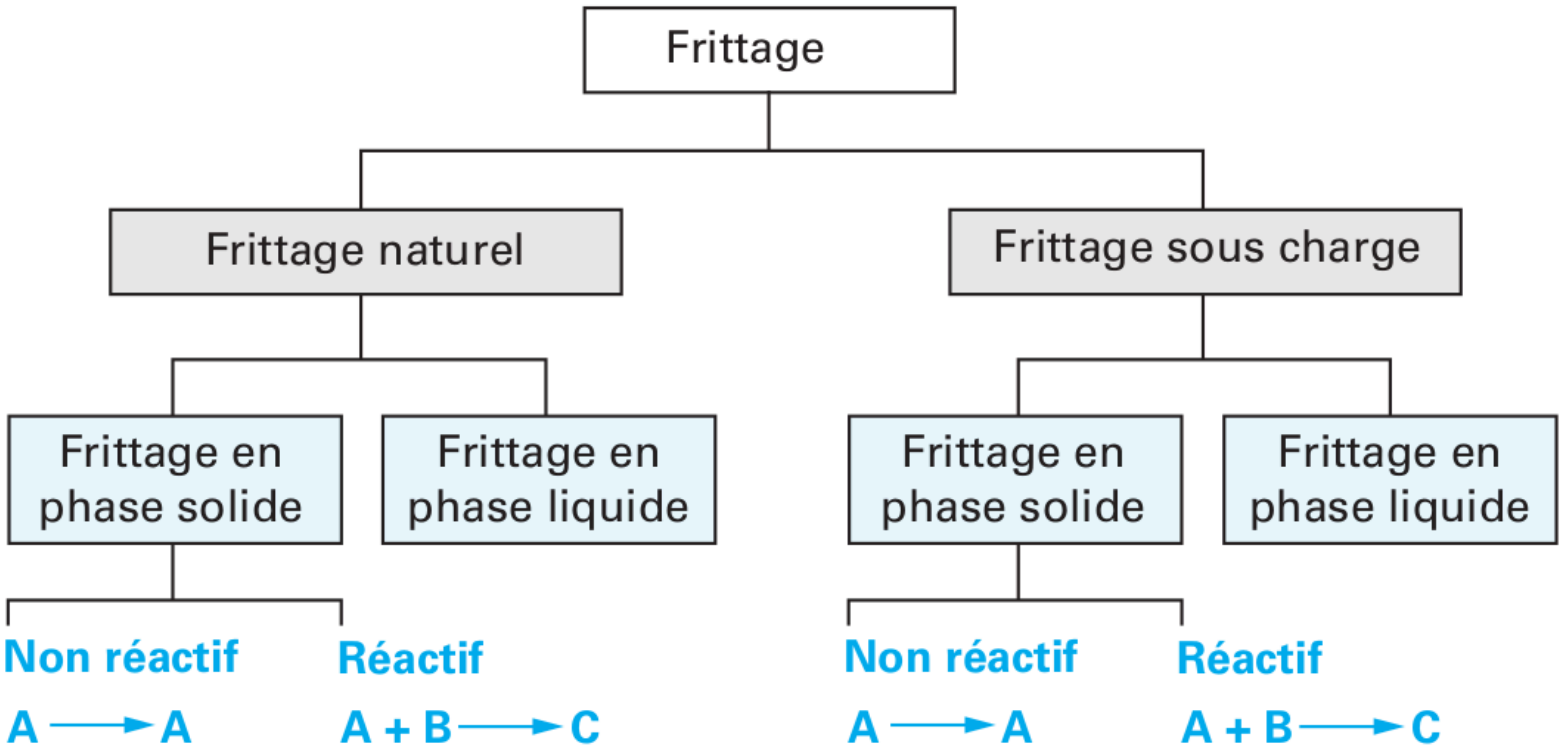


- Matériau fusible : Sn, In
- Matériau substrat : Cu, Ag, Au
- Épaisseurs :
  - Substrat : dizaines de microns
  - Couche fusible : microns
- Alternative : utilisation de poudres
- Mise au point complexe (IMC)



Source image de gauche : [2] ; image ci-dessus [3]

Le frittage, une alternative à la brasure

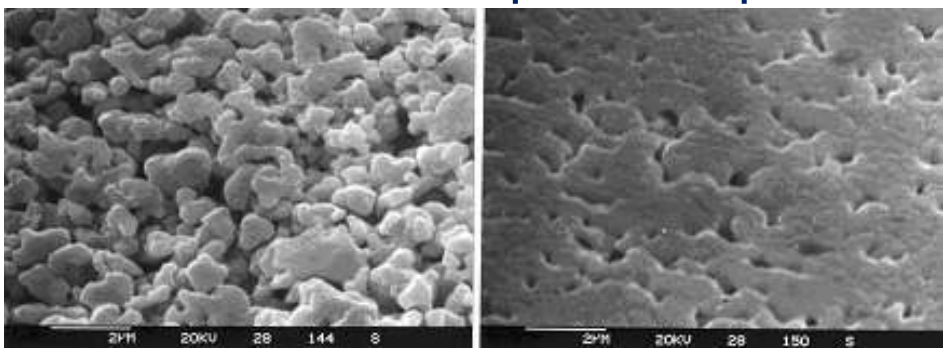


Source : Article Frittage techniques de l'ingénieur [4]

Dans tous les cas, il s'agit de former un **solide** par création de **ponts entre des particules sans atteindre la température de fusion** du constituant principal.

Attache de puce par frittage d'argent

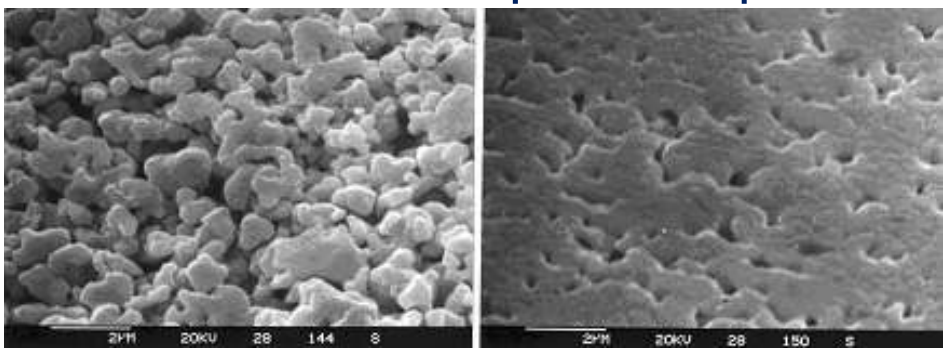
Densification sans phase liquide



Göbl, C. et al "Low temperature sinter technology Die attachment for automotive power electronic applications" proc of APE, 2006

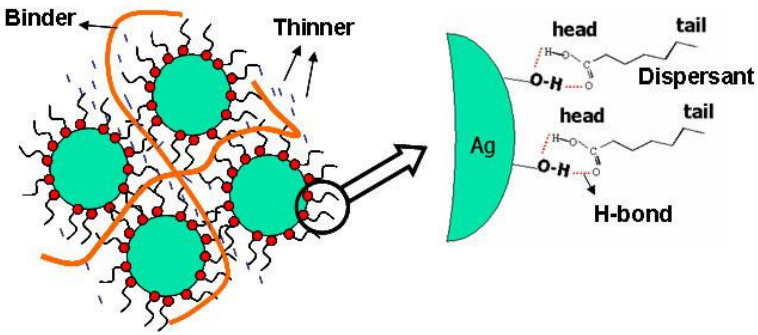
Attache de puce par frittage d'argent

Densification sans phase liquide



Göbl, C. et al "Low temperature sinter technology Die attachment for automotive power electronic applications" proc of APE, 2006

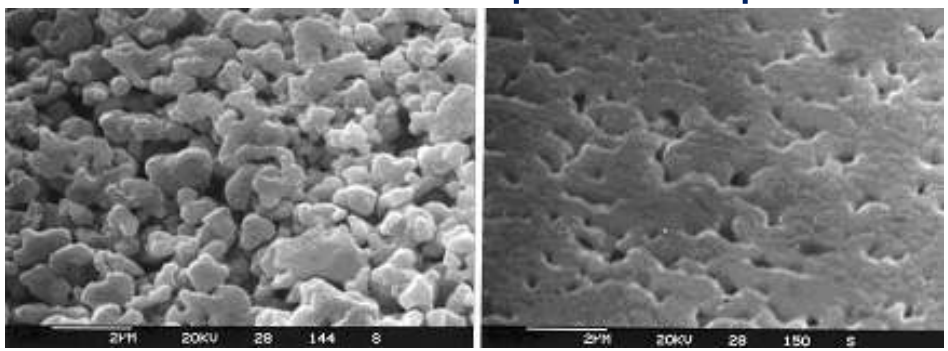
On rajoute de quoi faire une pâte



Bai, G. "Low-Temperature Sintering of Nanoscale Silver Paste for Semiconductor Device Interconnection" Thèse Virginia Tech., 2005

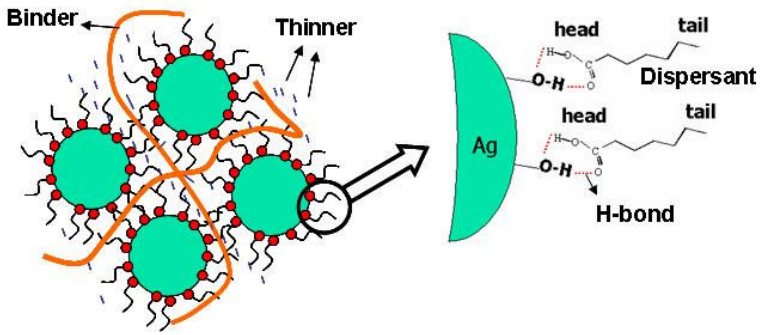
Attache de puce par frittage d'argent

Densification sans phase liquide



Göbl, C. et al "Low temperature sinter technology Die attachment for automotive power electronic applications" proc of APE, 2006

On rajoute de quoi faire une pâte



Bai, G. "Low-Temperature Sintering of Nanoscale Silver Paste for Semiconductor Device Interconnection" Thèse Virginia Tech., 2005

Les paramètres principaux du procédé

- La température
- Le temps
- La pression

Mais aussi :

- Les conditions de séchage
- Les rampes de montée en température
- L'atmosphère de frittage
- La taille de puce
- …

Pourquoi fritter de l'argent ?

- Excellentes conductivités (argent massif)
  - Thermique : 429 W/m.K
  - Électrique : 63.10^6 S/m
- Peu toxique (pour l'homme)
- Pas de pénurie prévue
- Très bonne résistance à l'oxydation, utilisation courante en électronique
- (Relativement) Bon marché :
  - 0,45€ le gramme au 5/6/18
  - soit moins de 3 cts/puce de 1 cm^2

Pourquoi fritter de l'argent ?

- Excellentes conductivités (argent massif)
  - Thermique : 429 W/m.K
  - Électrique : 63.10^6 S/m
- Peu toxique (pour l'homme)
- Pas de pénurie prévue
- Très bonne résistance à l'oxydation, utilisation courante en électronique
- (Relativement) Bon marché :
  - 0,45€ le gramme au 5/6/18
  - soit moins de 3 cts/puce de 1 cm^2

Pourquoi fritter de l'argent ?

- Excellentes conductivités (argent massif)
  - Thermique : 429 W/m.K
  - Électrique : 63.10^6 S/m
- Peu toxique (pour l'homme)
- Pas de pénurie prévue
- Très bonne résistance à l'oxydation, utilisation courante en électronique
- (Relativement) Bon marché :
  - 0,45€ le gramme au 5/6/18
  - soit moins de 3 cts/puce de 1 cm^2

Pourquoi fritter de l'argent ?

- Excellentes conductivités (argent massif)
  - Thermique : 429 W/m.K
  - Électrique : 63.10^6 S/m
- Peu toxique (pour l'homme)
- Pas de pénurie prévue
- Très bonne résistance à l'oxydation, utilisation courante en électronique
- (Relativement) Bon marché :
  - 0,45€ le gramme au 5/6/18
  - soit moins de 3 cts/puce de 1 cm^2

Pourquoi fritter de l'argent ?

- Excellentes conductivités (argent massif)
  - Thermique : 429 W/m.K
  - Électrique : 63.10^6 S/m
- Peu toxique (pour l'homme)
- Pas de pénurie prévue
- Très bonne résistance à l'oxydation, utilisation courante en électronique
- (Relativement) Bon marché :
  - 0,45€ le gramme au 5/6/18
  - soit moins de 3 cts/puce de 1 cm^2.

Les pâtes/film d'argent

Source : Bai, G. [5]

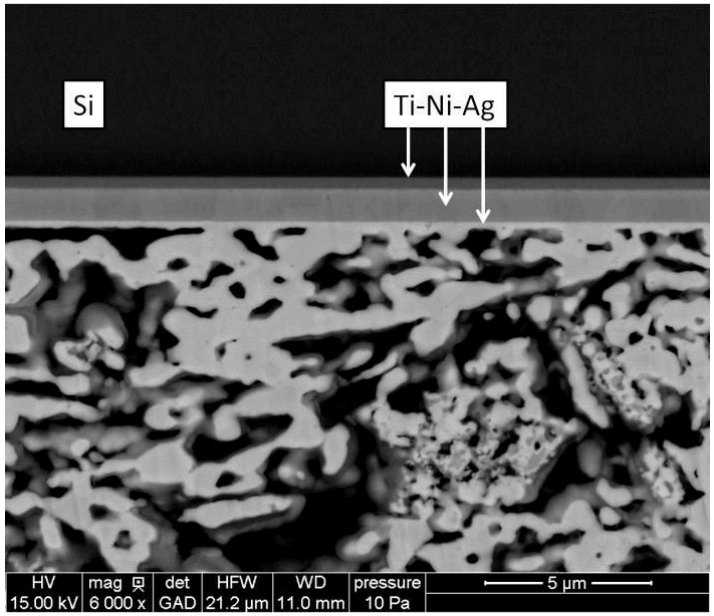
Deux grandes classes de matériaux :

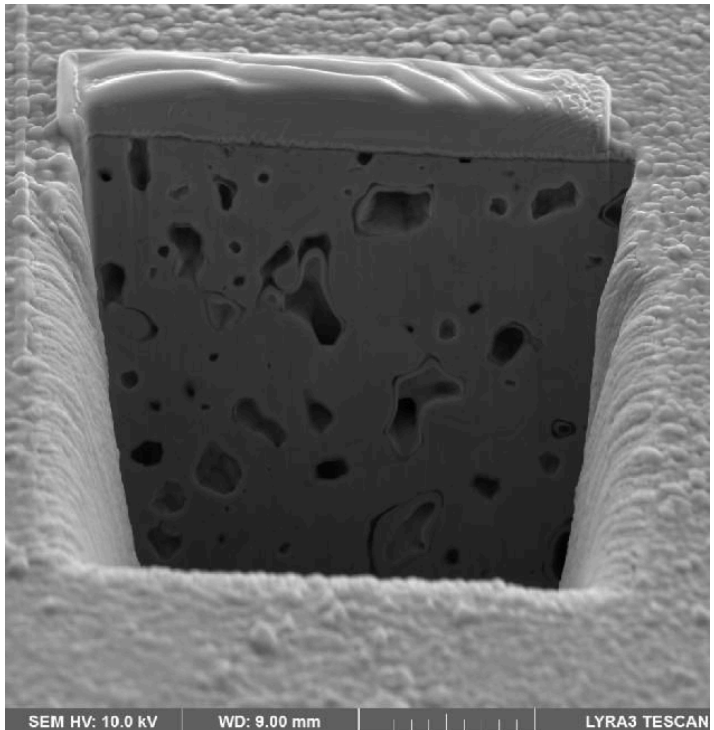
- Nanoparticules :
  - Frittage basse ou sans pression
  - Toxicité potentielle
  - plus cher
- Microparticules
  - frittage forte pression (40 MPa), parfois sans pression possible
  - peu cher, non toxique

Mais il y a aussi des hybrides :

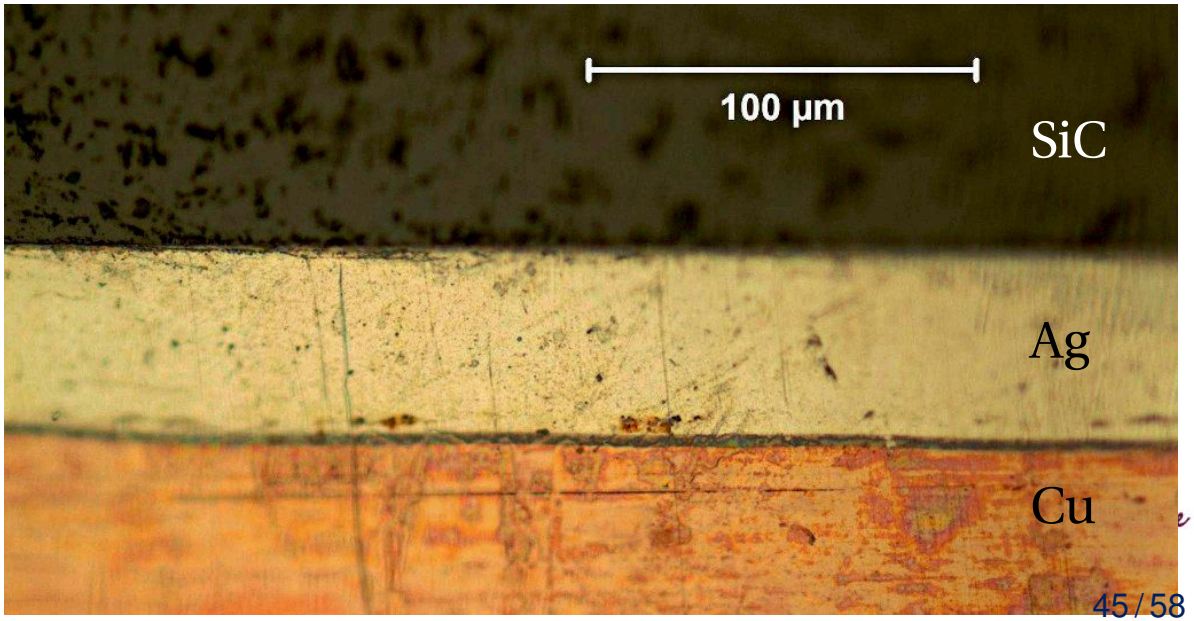
- additifs qui libèrent des nanoparticules pour favoriser le frittage
- Ajout de résine pour combler les vacuoles, fritter sans pression et permettre l'adhésion sur silicium

Attaches frittées [6, 7, 8]

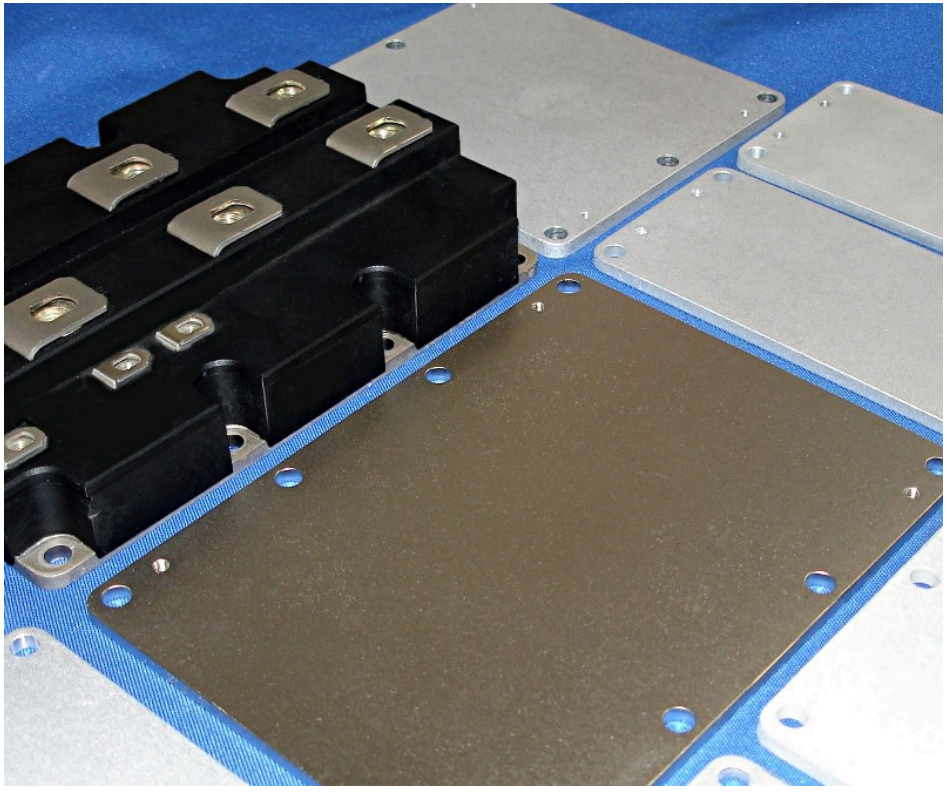




- Procédé robuste (sous air)
- Robuste en cyclage et vieillissement
  - La haute température poursuit le frittage
  - Pas d'intermétalliques
  - Finition idéale : Ag
- Joints plus ou moins poreux
  - Attention à la mesure de porosité



Semelle



Source : http://www.alsic.com

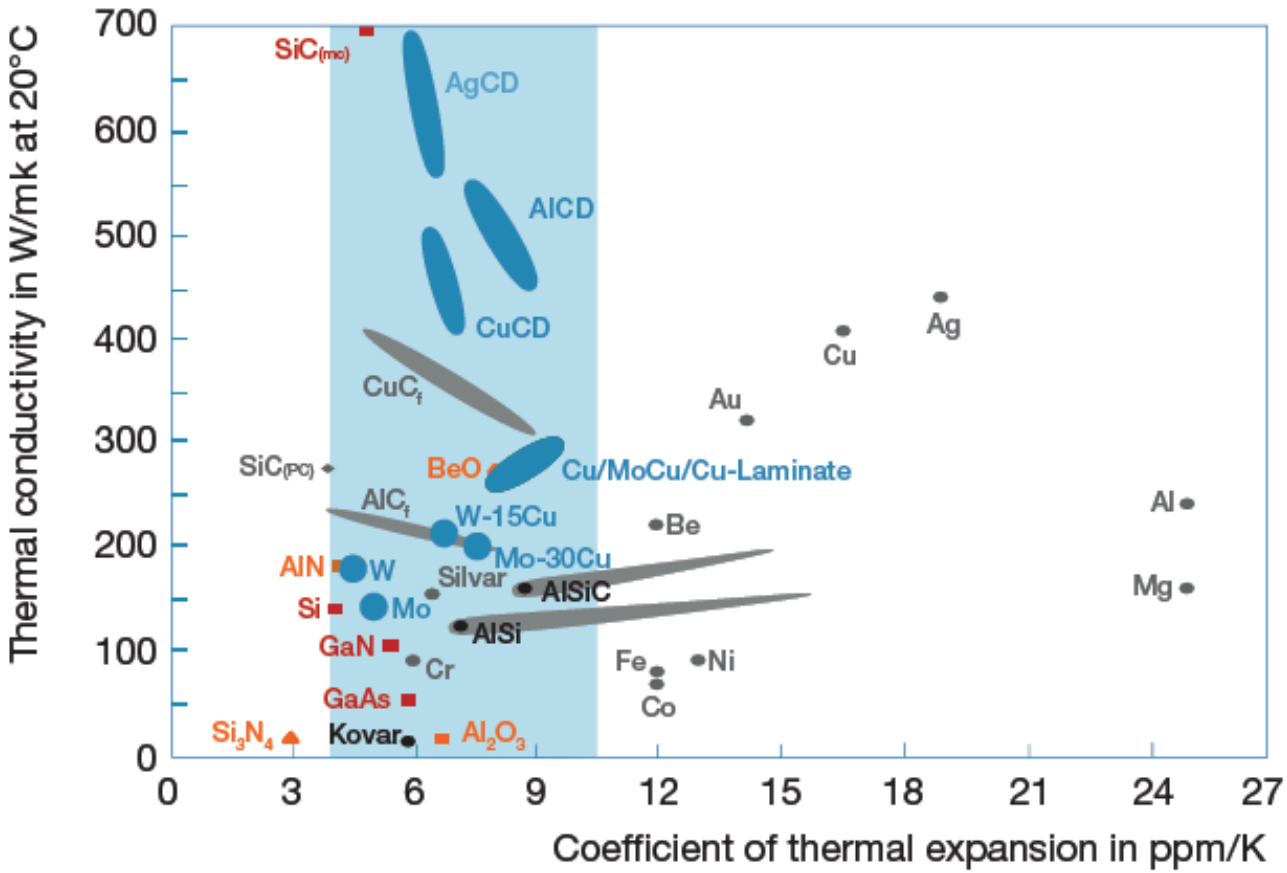
Rôles :

- 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

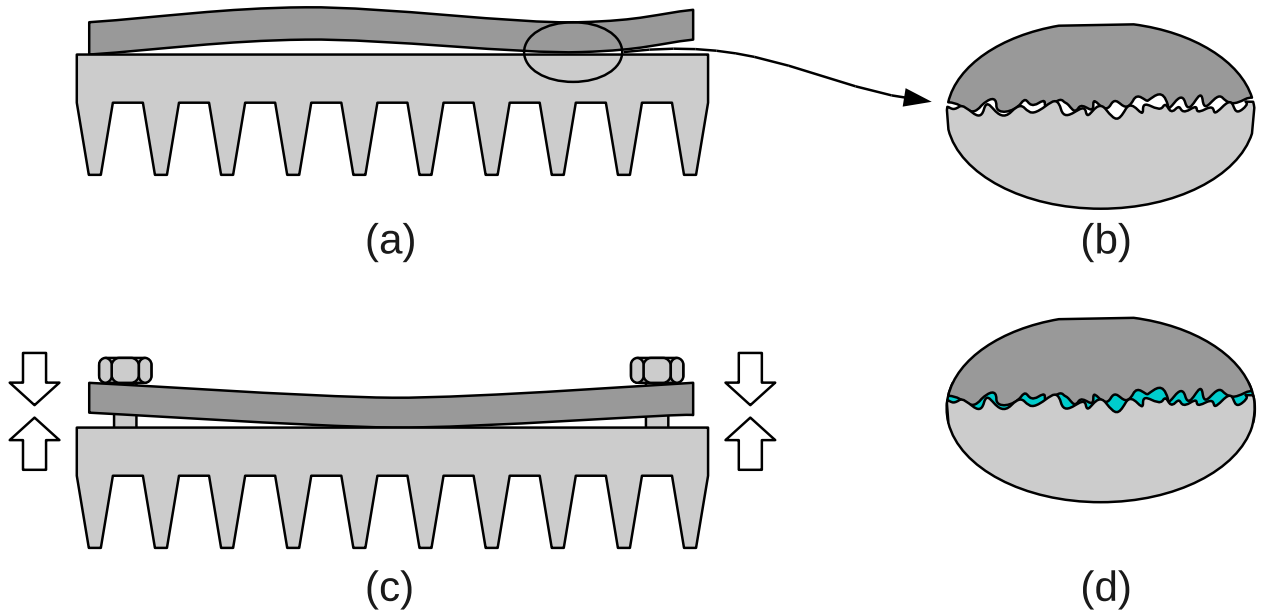
Semelle – Choix des matériaux



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

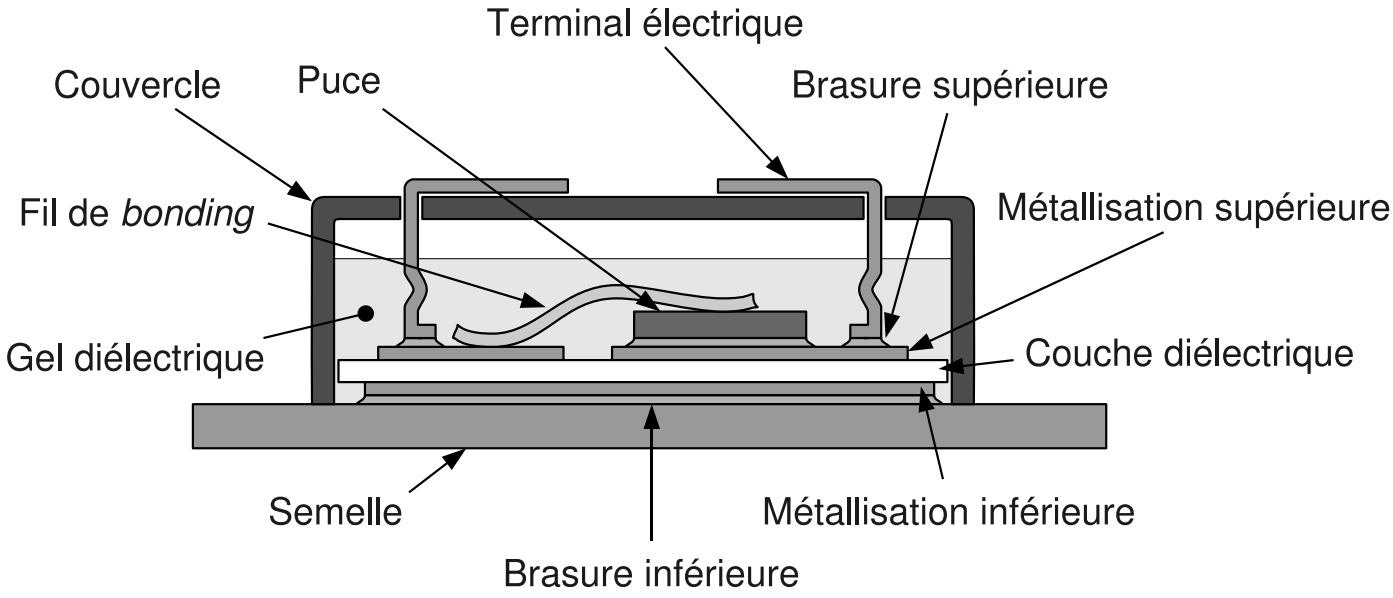


La "pâte thermique"

- 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)

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)

Sommaire

Introduction

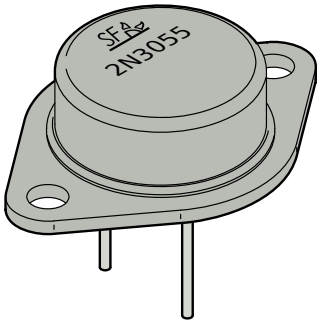
Petit lexique du packaging de puissance

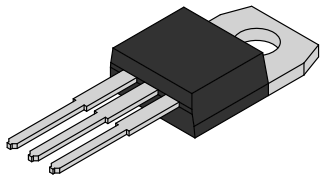
Considérations physiques
- Aspects thermiques
- Aspects thermo-mécaniques
- Aspects électriques

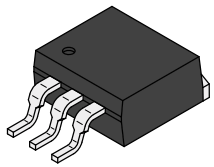
Éléments de technologie
- Substrats
- Interconnexions
- Gestion thermique

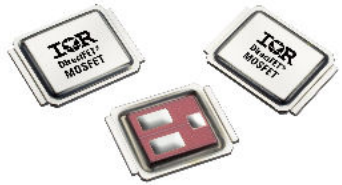
Évolutions, Recherche et Développement

Évolution des composants discrets







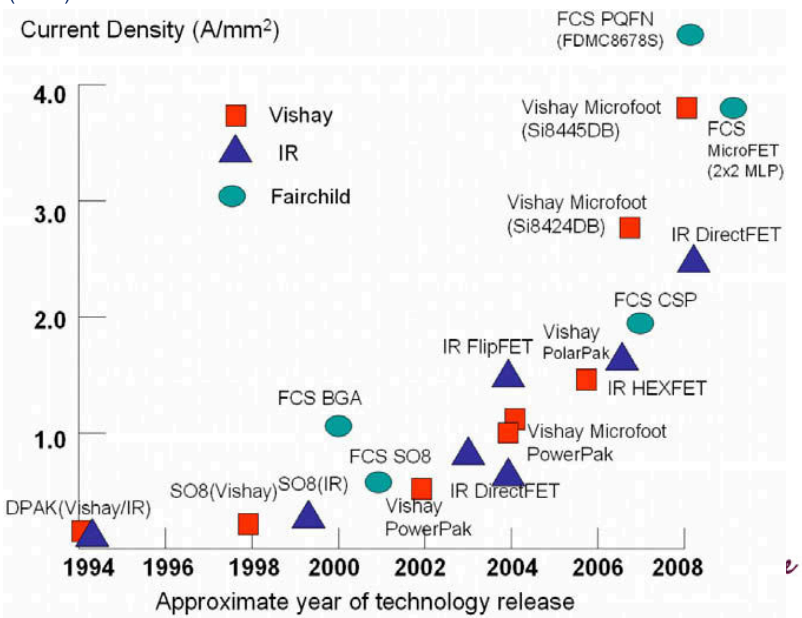


source : wikimedia commons pour tous les boîtiers sauf le Directfet, International Rectifier, et le WL-CSP, voir ci-dessous

Package type	Volume (mm^3)	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

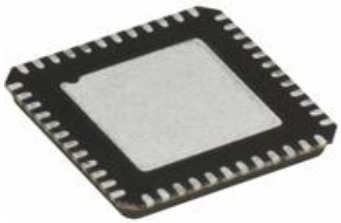
source : “Trends of power semiconductor wafer level packaging”, Yong LIU, Microelectronics Reliability 50 (2010) 514–521

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



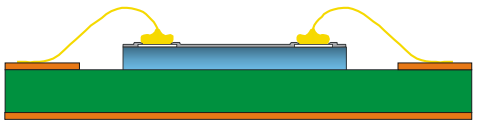
Après le *flip-chip*, l'enterré

Interconnect Evolution

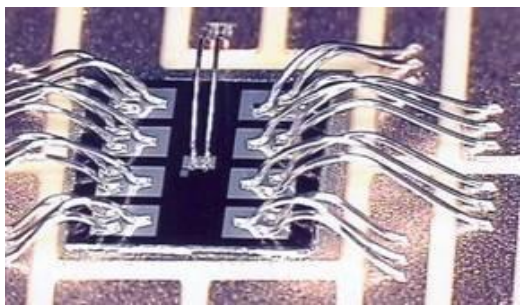


First level chip interconnection technologies inside a package:

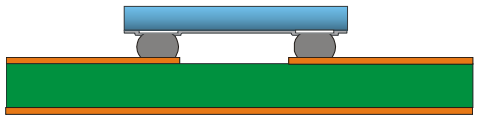
chip & wire



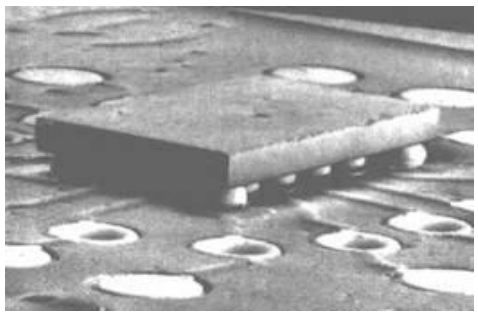
established since 40 years



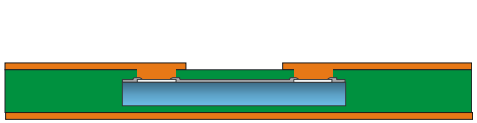
flip chip



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

Fraunhofer IZM

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

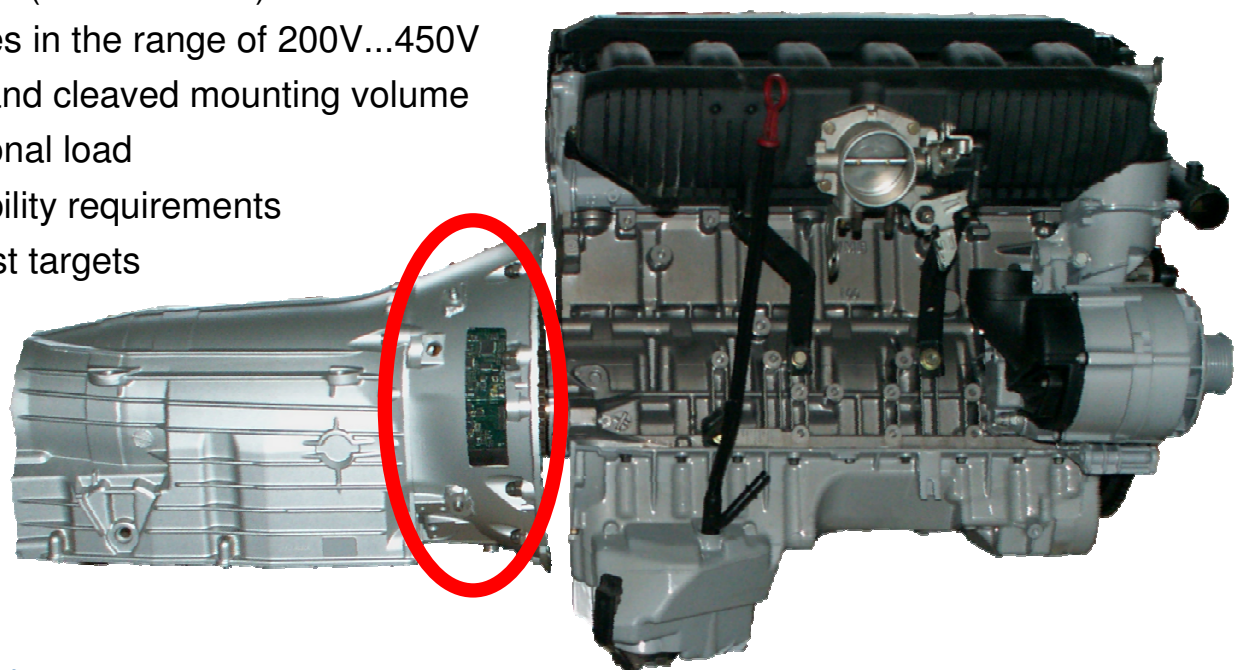
L'intégration mécatronique – exemple automobile

Fraunhofer IISB

ECPE

Requirements for power electronics used in the automotive power train:

- Coolant temperature up to 115℃
- Ambient temperature in the engine compartment up to 140℃
- 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



ECPE, 9/2009, Page 6

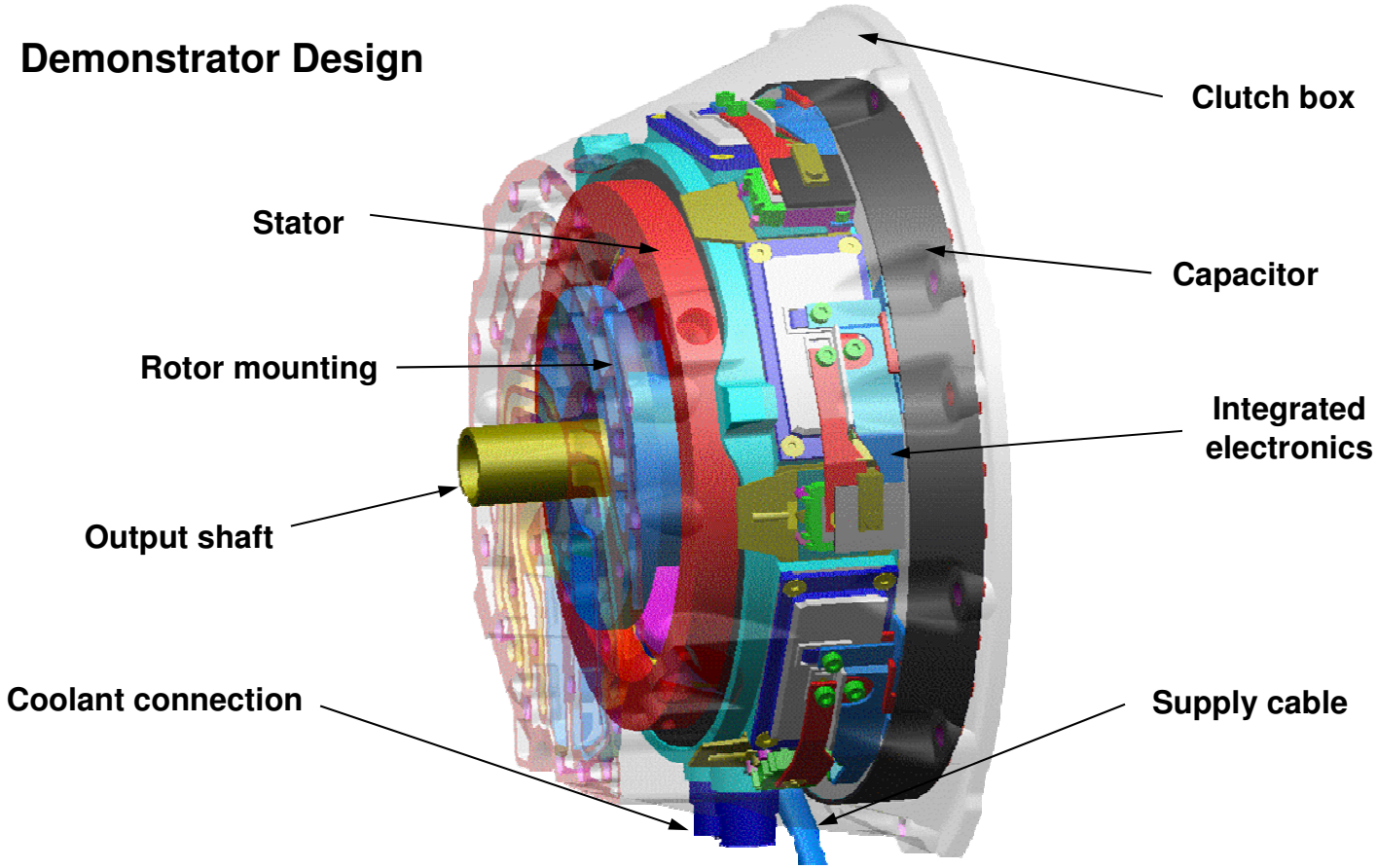
Source : Mechatronic System Integration of the Hybrid Powertrain, Thomas Harder ECPE Workshop Adv. Power Electr. Pack., Paris, 30/09/09

L'intégration mécatronique – exemple automobile 2

Fraunhofer IISB

ECPE

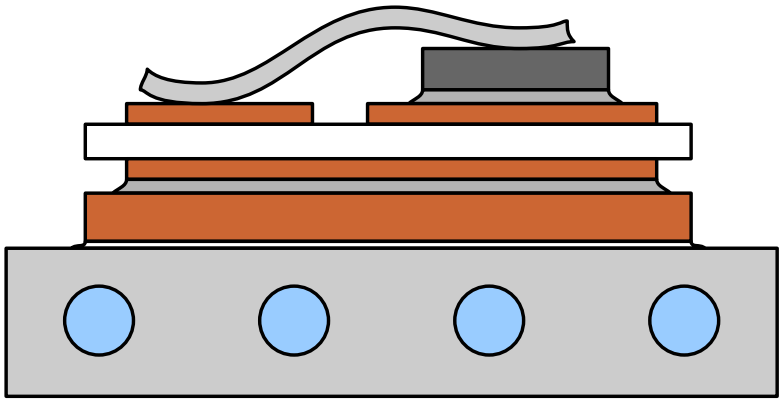
Demonstrator Design



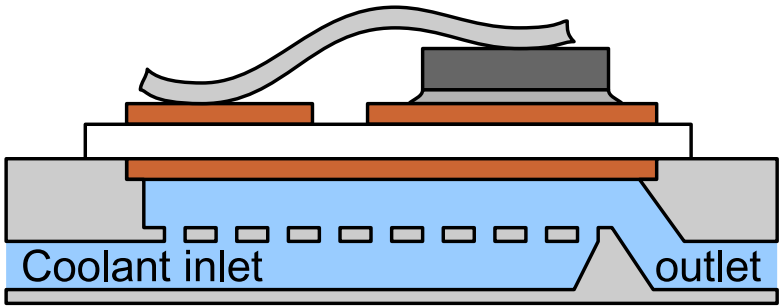
ECPE, 9/2009, Page 8

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

Le refroidissement intégré



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

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

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

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

References I

W. Sabbah, P. Bondue, O. Avino-Salvado, C. Buttay, H. Frémont, A. Guédon-Gracia, and H. Morel, "High temperature ageing of microelectronics assemblies with SAC solder joints," *Microelectronics Reliability*, 2017. [Online]. Available : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01564755

W. Gale and D. Butts, "Transient liquid phase bonding," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 9, no. 4, pp. 283–300, 2004. [Online]. Available : http://www.ingentaconnect.com/content/maney/stwj/2004/00000009/00000004/art00001

H. Greve and F. P. McCluskey, "LT-TLPS Die Attach for High Temperature Electronic Packaging," in *Proceedings of the High Temperature Electronics Network (HiTEN)*. Oxford, UK : IMAPS, Jul. 2013, pp. 246–253.

D. Bernache-Assollant and J.-P. Bonnet, *Frittage : aspects physico-chimiques - Partie 1 : frittage en phase solide*. Techniques de l'ingénieur, 2005, vol. AF 6 620, ch. Physique Chimie, p. 10. [Online]. Available : http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/sciences-fondamentales-th8/fondamentaux-en-chimie-42106210/frittage-aspects-physico-chimiques-af6620/

G. Bai, "Low-Temperature Sintering of Nanoscale Silver Paste for Semiconductor Device Interconnection," Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, Oct. 2005. [Online]. Available : http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-10312005-163634/unrestricted/Dissertation-GBai05.pdf

A. Masson, W. Sabbah, R. Riva, C. Buttay, S. Azzopardi, H. Morel, D. Planson, and R. Meuret, "Die attach using silver sintering. Practical implementation and analysis," *European Journal of Electrical Engineering*, vol. 16, no. 3-4, pp. 293–305, 2013. [Online]. Available : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00874465

J. Billore, S. Hascoët, R. Robutel, C. Buttay, and J. Li, "Sintered-Silver Bonding of High-Temperature Piezoelectric Ceramic Sensors," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, pp. 1–7, 2016. [Online]. Available : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01419042

References II

S. Hascoët, “Mise en œuvre de nouveaux matériaux d’assemblage dans les modules multipuces de puissance (MCM),” Ph.D. dissertation, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Villeurbanne, Nov. 2013.