

Électronique haute température – Contraintes sur la puce et le packaging

Cyril Buttay

▶ **To cite this version:**

Cyril Buttay. Électronique haute température – Contraintes sur la puce et le packaging. Doctorat. France. 2018. cel-02291510

HAL Id: cel-02291510
https://cel.hal.science/cel-02291510

Submitted on 18 Sep 2019

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.

Électronique haute température

Contraintes sur la puce et le packaging

Cyril BUTTAY

Laboratoire Ampère, Lyon, France

21/6/18

Sommaire

Introduction

Composants

Packaging et Procédés

Conclusions

Sommaire

Introduction

Composants
- semiconducteurs de puissance
- Circuits de commande
- Passifs

Packaging et Procédés
- Généralités Packaging
- Attache de composants
- Circuits imprimés

Conclusions

Avant de commencer

- Cette présentation se base principalement sur mes travaux de recherche (et ceux de collègues), elle n'a pas la prétention d'être exhaustive
- Les papiers correspondants sont indiqués en fin de présentation, avec les liens
- Pour toute question, approfondissement, vous pouvez me contacter par email `cyril.buttay@insa-lyon.fr`

Pourquoi la haute température ? (>200 °C)



- Mettre des actionneurs électriques près des freins, réacteurs
- Cyclage thermique profond (-55/+225 °C)
- Service long (jusqu'à 30 ans)

Pourquoi la haute température ? (>200 °C)





- Mettre des actionneurs électriques près des freins, réacteurs
- Cyclage thermique profond (-55/+225 °C)
- Service long (jusqu'à 30 ans)
- Utiliser un seul circuit de refroidissement pour motorisation thermique et électrique
- Température liquide de refroidissement : 120 °C

Pourquoi la haute température ? (>200 °C)







- Mettre des actionneurs électriques près des freins, réacteurs
- Cyclage thermique profond (-55/+225 °C)
- Service long (jusqu'à 30 ans)
- Utiliser un seul circuit de refroidissement pour motorisation thermique et électrique
- Température liquide de refroidissement : 120 °C
- Mission NASA sur Venus : jusqu'à 480 °C
- Mission vers Jupiter : 100 bars, 400 °C

Pourquoi la haute température ? (>200 °C)



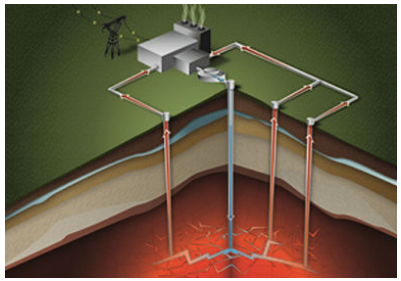
- Mettre des actionneurs électriques près des freins, réacteurs
- Cyclage thermique profond (-55/+225 °C)
- Service long (jusqu'à 30 ans)



- Utiliser un seul circuit de refroidissement pour motorisation thermique et électrique
- Température liquide de refroidissement : 120 °C

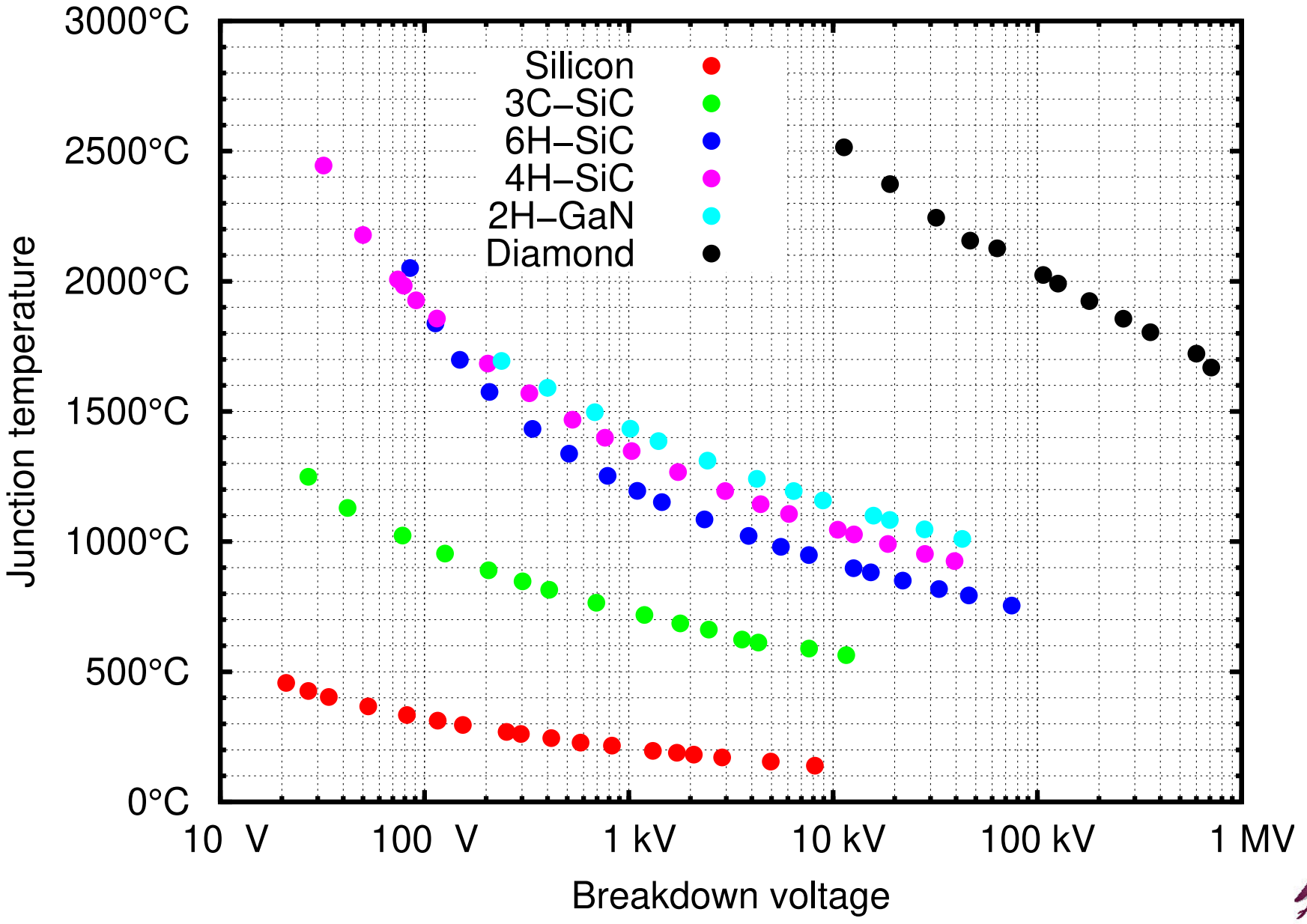


- Mission NASA sur Venus : jusqu'à 480 °C
- Mission vers Jupiter : 100 bars, 400 °C



- Forage gaz, pétrole ou géothermie
- Faible cyclage thermique, temp. ambiante élevée (200 à > 300 °C)

Les matériaux grands gaps pour la haute température [1]



Sommaire

Introduction

Composants
- semiconducteurs de puissance
- Circuits de commande
- Passifs

Packaging et Procédés
- Généralités Packaging
- Attache de composants
- Circuits imprimés

Conclusions

Sommaire

Introduction

Composants
- semiconducteurs de puissance
- Circuits de commande
- Passifs

Packaging et Procédés
- Généralités Packaging
- Attache de composants
- Circuits imprimés

Conclusions

Qu'est-ce qui limite la température de fonctionnement ?

Exemple : diode SiC schottky ou MPS :

	matériau	temp. max	cause
Semiconducteur	SiC	2730 °C	sublimation
Metal schottky	Ti	1668 °C	fusion
Métallization sup.	Al	660 °C	fusion
passivation second.	polyimide	500-620 °C	décomposition
recuit contact [2]	Ti/Ni	350-500 °C	Réaction état solide

- certaines limites sont liées au composant (métal schottky) et peuvent être dépassées [3]
- D'autres seront listées plus loin (packaging)

Qu'est-ce qui limite la température de fonctionnement ?

Exemple : diode SiC schottky ou MPS :

	matériau	temp. max	cause
Semiconducteur	SiC	2730 °C	sublimation
Metal schottky	Ti	1668 °C	fusion
Métallization sup.	Al	660 °C	fusion
passivation second.	polyimide	500-620 °C	décomposition
recuit contact [2]	Ti/Ni	350-500 °C	Réaction état solide

- certaines limites sont liées au composant (métal schottky) et peuvent être dépassées [3]
- D'autres seront listées plus loin (packaging)

Qu'est-ce qui limite la température de fonctionnement ?

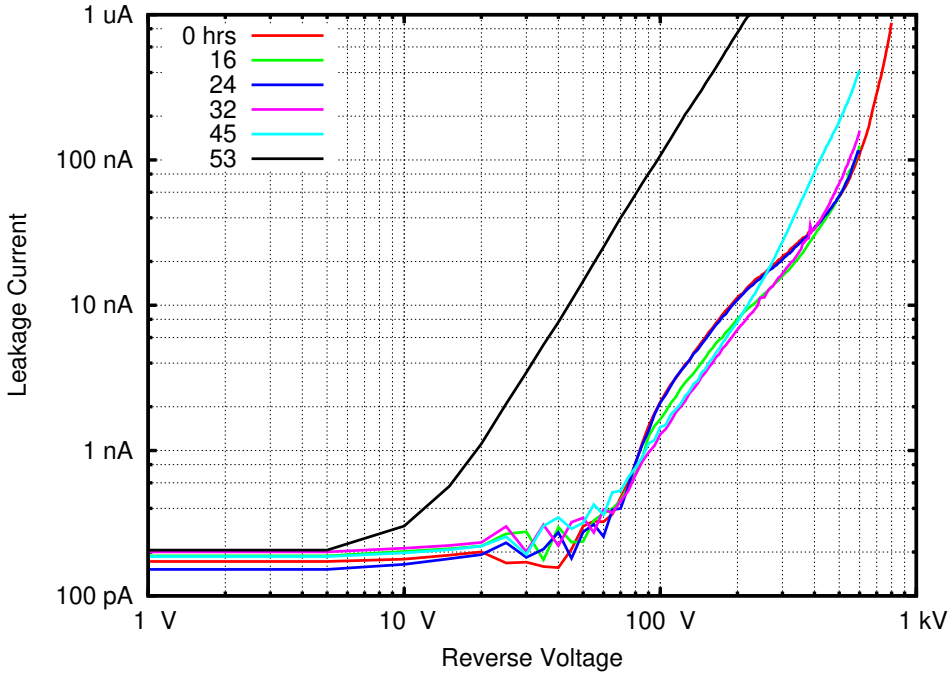
Exemple : diode SiC schottky ou MPS :

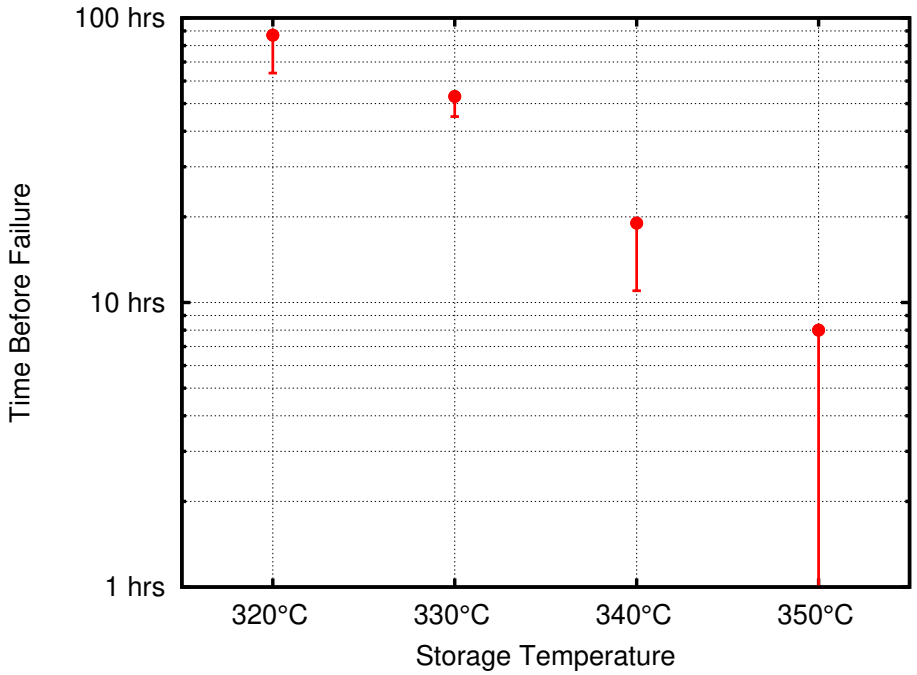
	matériau	temp. max	cause
Semiconducteur	SiC	2730 °C	sublimation
Metal schottky	Ti	1668 °C	fusion
Métallization sup.	Al	660 °C	fusion
passivation second.	polyimide	500-620 °C	décomposition
recuit contact [2]	Ti/Ni	350-500 °C	Réaction état solide

- certaines limites sont liées au composant (métal schottky) et peuvent être dépassées [3]
- D'autres seront listées plus loin (packaging)

Vieillissement haute température de diodes SiC [4]

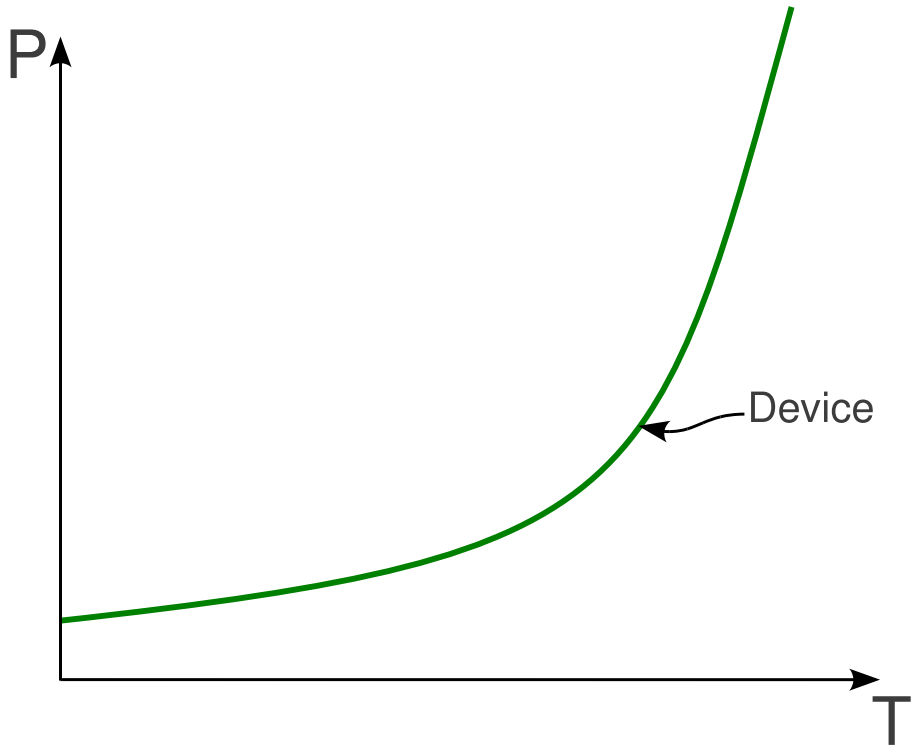
test @ 330 °C :





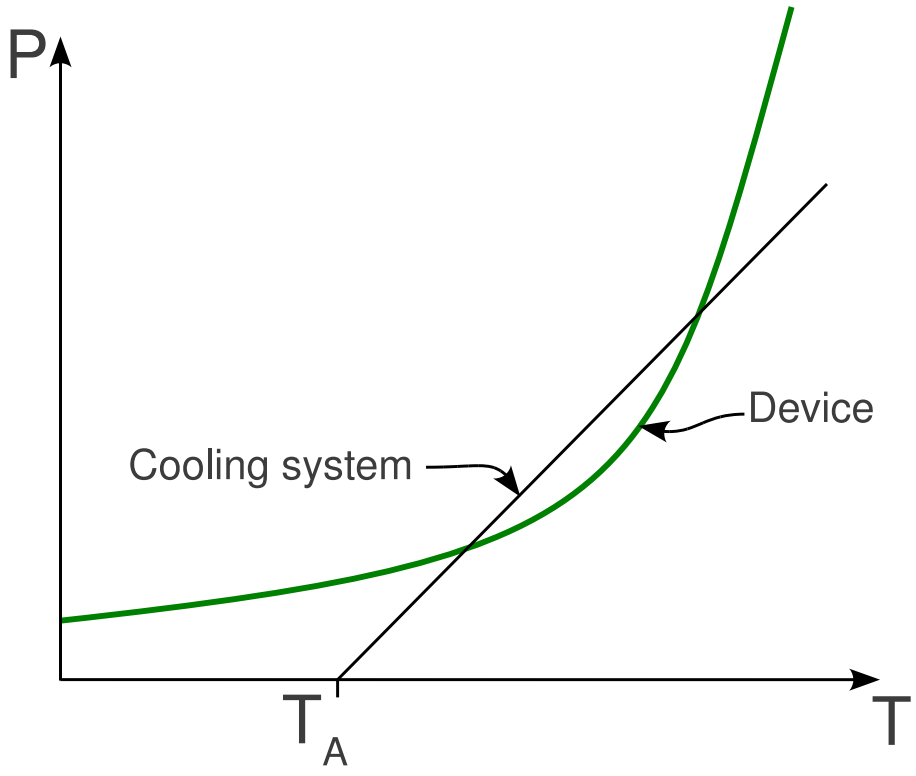
- recuit du contact schottky ➜ augmentation du courant de fuite
- Ces diodes fonctionnent à 300 °C, pour quelques heures. . .

Mécanisme d'emballement thermique



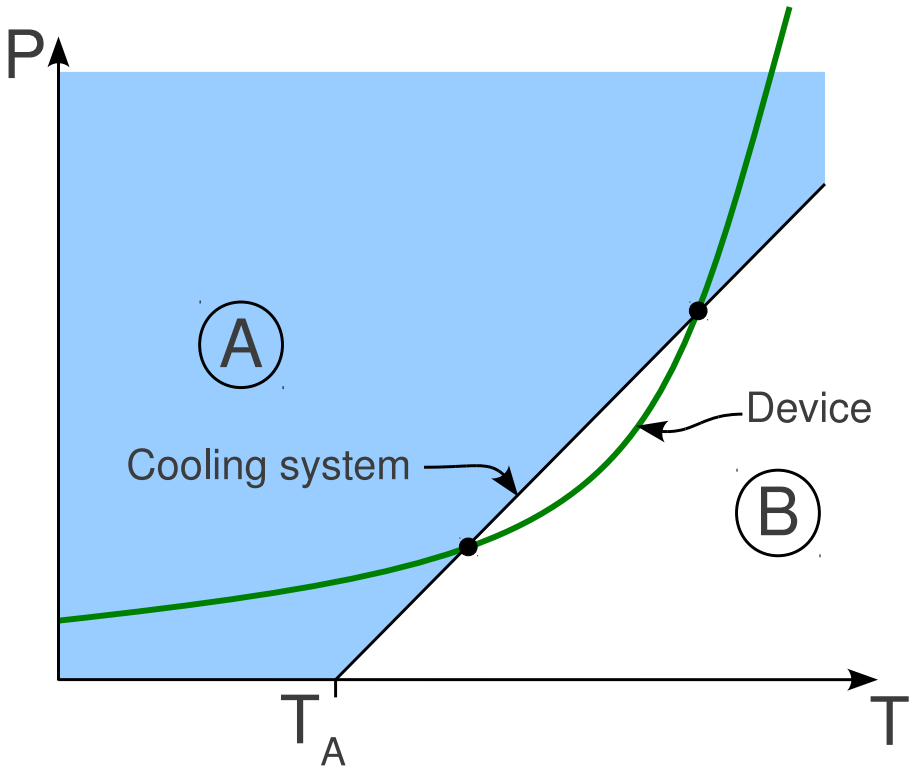
- Un composant arbitraire ;
- son système de refroidissement ;
- en région A, le composant dissipe plus que le radiateur peut extraire ;
- en region B, le composant dissipe moins ;
- deux points d'équilibre, un stable, un instable ;
- au-delà du point instable : emballement.

Mécanisme d'emballement thermique



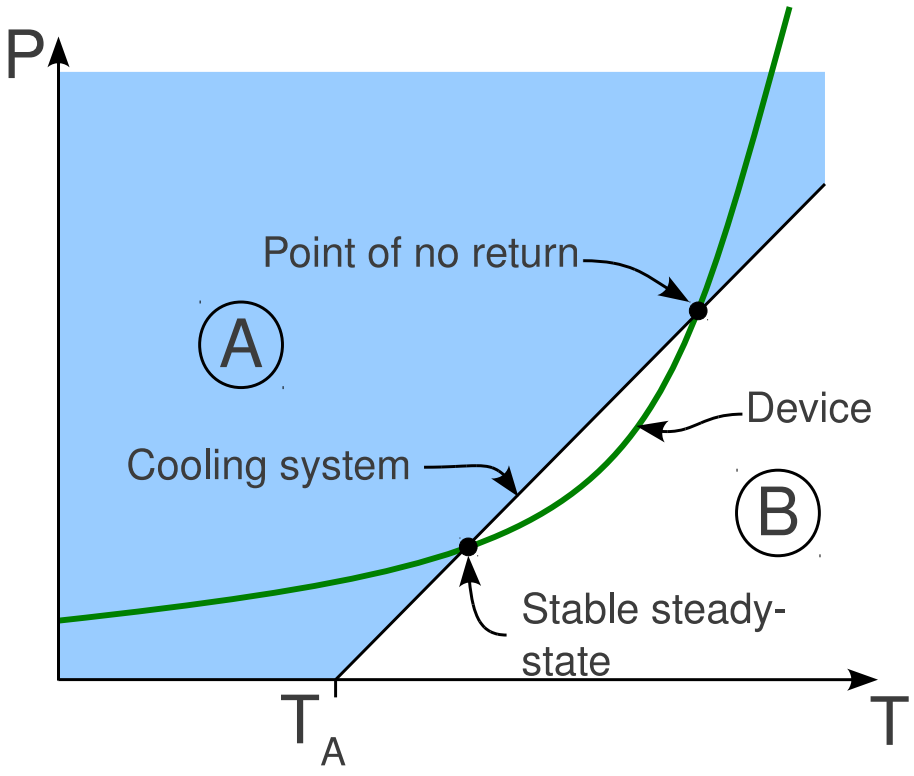
- Un composant arbitraire ;
- son système de refroidissement ;
- en région A, le composant dissipe plus que le radiateur peut extraire ;
- en region B, le composant dissipe moins ;
- deux points d'équilibre, un stable, un instable ;
- au-delà du point instable : emballement.

Mécanisme d'emballement thermique



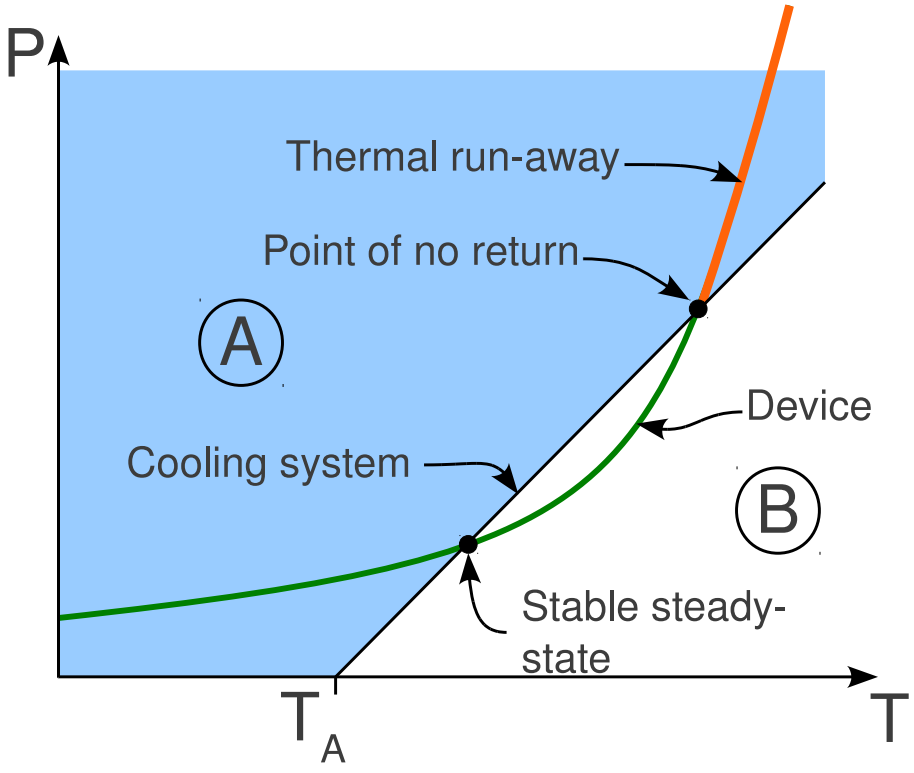
- Un composant arbitraire ;
- son système de refroidissement ;
- en région A, le composant dissipe plus que le radiateur peut extraire ;
- en region B, le composant dissipe moins ;
- deux points d'équilibre, un stable, un instable ;
- au-delà du point instable : emballement.

Mécanisme d'emballement thermique



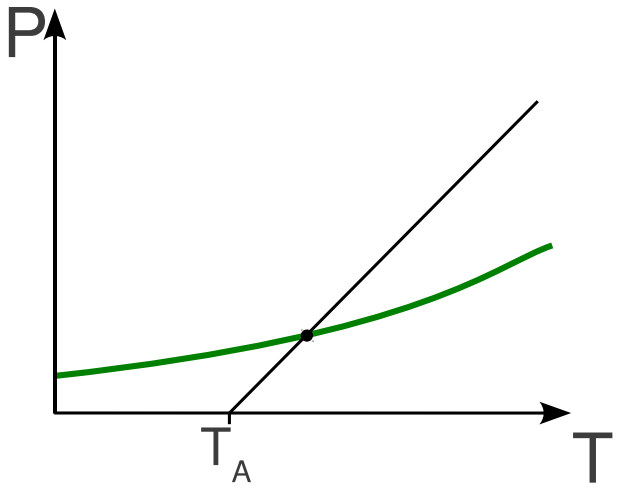
- Un composant arbitraire ;
- son système de refroidissement ;
- en région A, le composant dissipe plus que le radiateur peut extraire ;
- en region B, le composant dissipe moins ;
- deux points d'équilibre, un stable, un instable ;
- au-delà du point instable : emballement.

Mécanisme d'emballement thermique



- Un composant arbitraire ;
- son système de refroidissement ;
- en région A, le composant dissipe plus que le radiateur peut extraire ;
- en region B, le composant dissipe moins ;
- deux points d'équilibre, un stable, un instable ;
- au-delà du point instable : emballement.

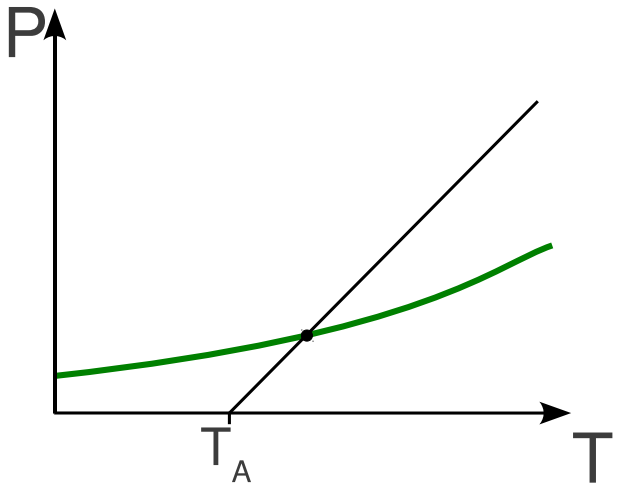
Mécanisme d'emballement thermique – 2



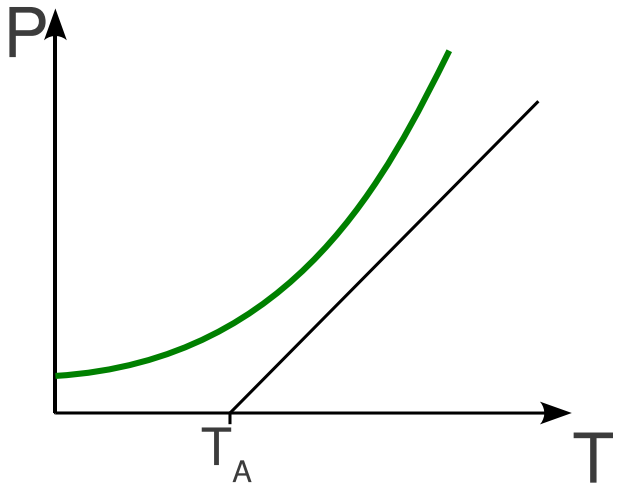
Toujours stable

- D'autres cas existent, comme un composant avec un coefficient de température négatif

Mécanisme d'emballement thermique – 2



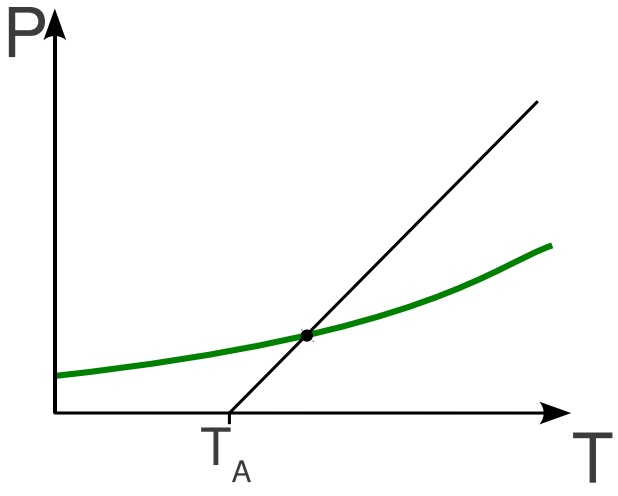
Toujours stable



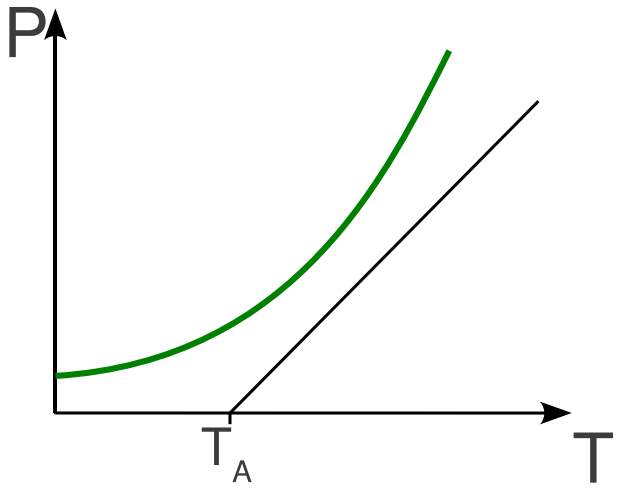
Toujours instable

- D'autres cas existent, comme un composant avec un coefficient de température négatif

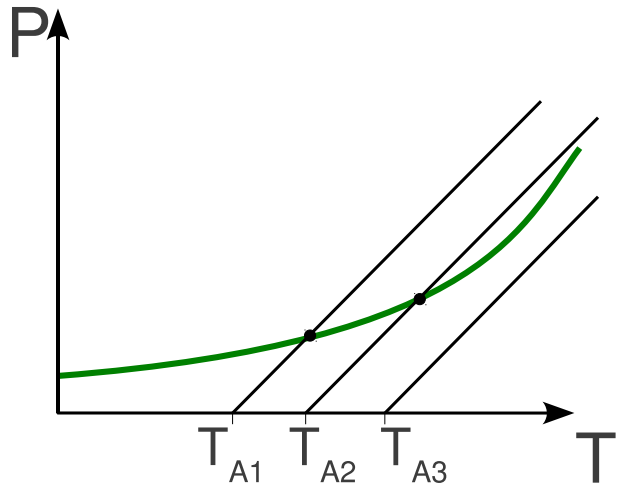
Mécanisme d'emballement thermique – 2



Toujours stable



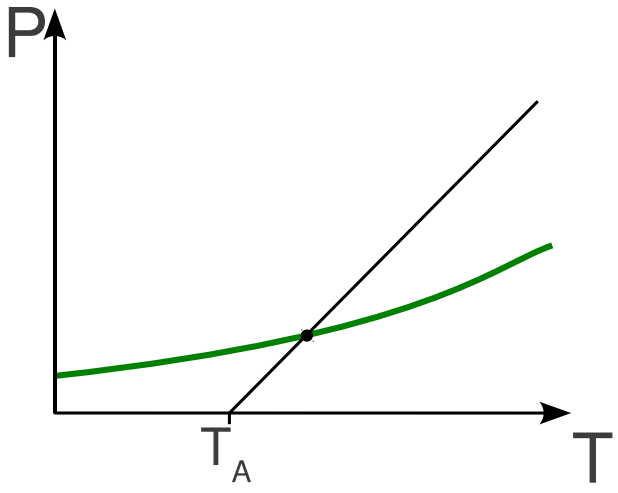
Toujours instable



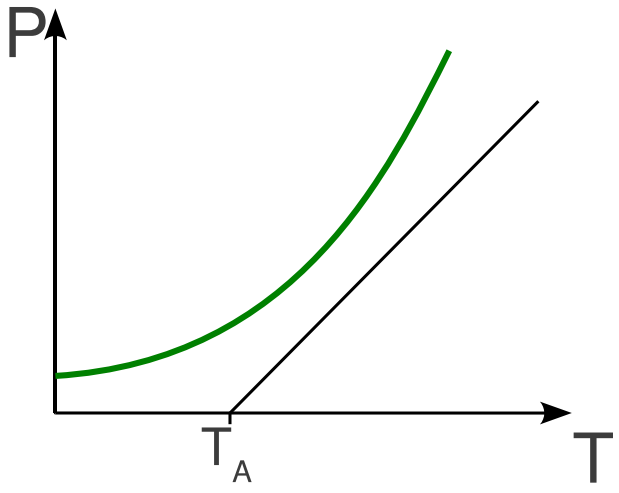
Stable devenant instable quand T_A augmente

- D'autres cas existent, comme un composant avec un coefficient de température négatif

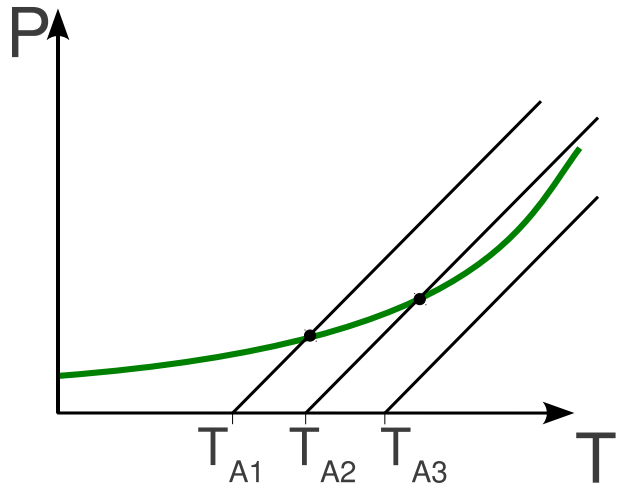
Mécanisme d'emballement thermique – 2



Toujours stable



Toujours instable

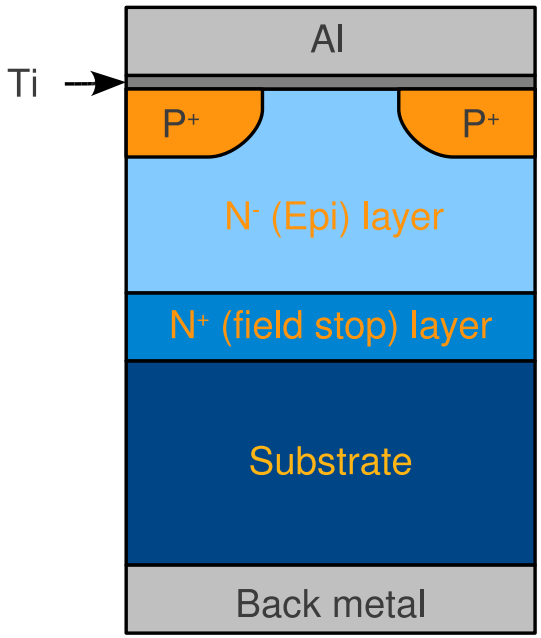


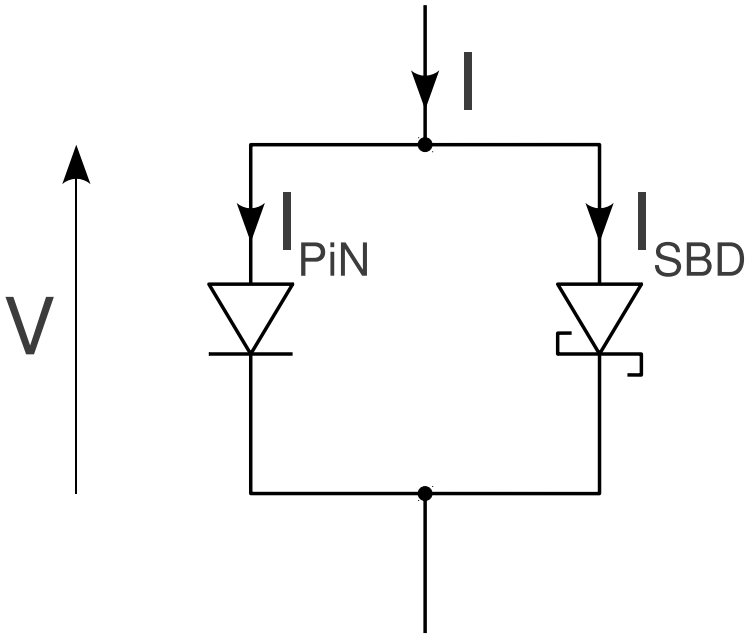
Stable devenant instable quand T_A augmente

- D'autres cas existent, comme un composant avec un coefficient de température négatif

Emballement thermique : exemple de la diode [5]

Diode SiC Merged PiN-Schottky (MPS) de SiCED, puce 2,7x2,7 mm^2, 1200 V, 15 A



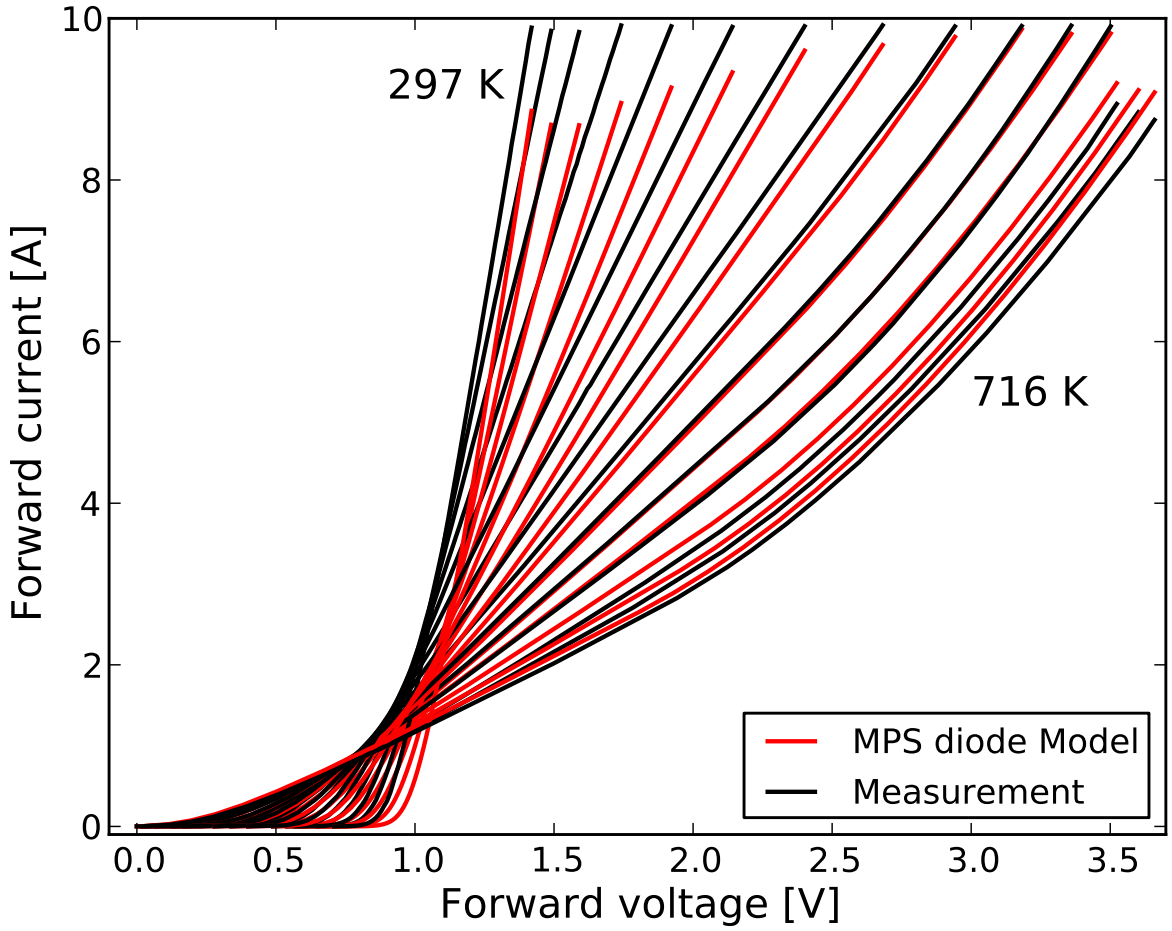


Modèle électrique en conduction : deux diodes en parallèle :

- une Schottky pure (SBD)
- une bipolaire pure (PiN)

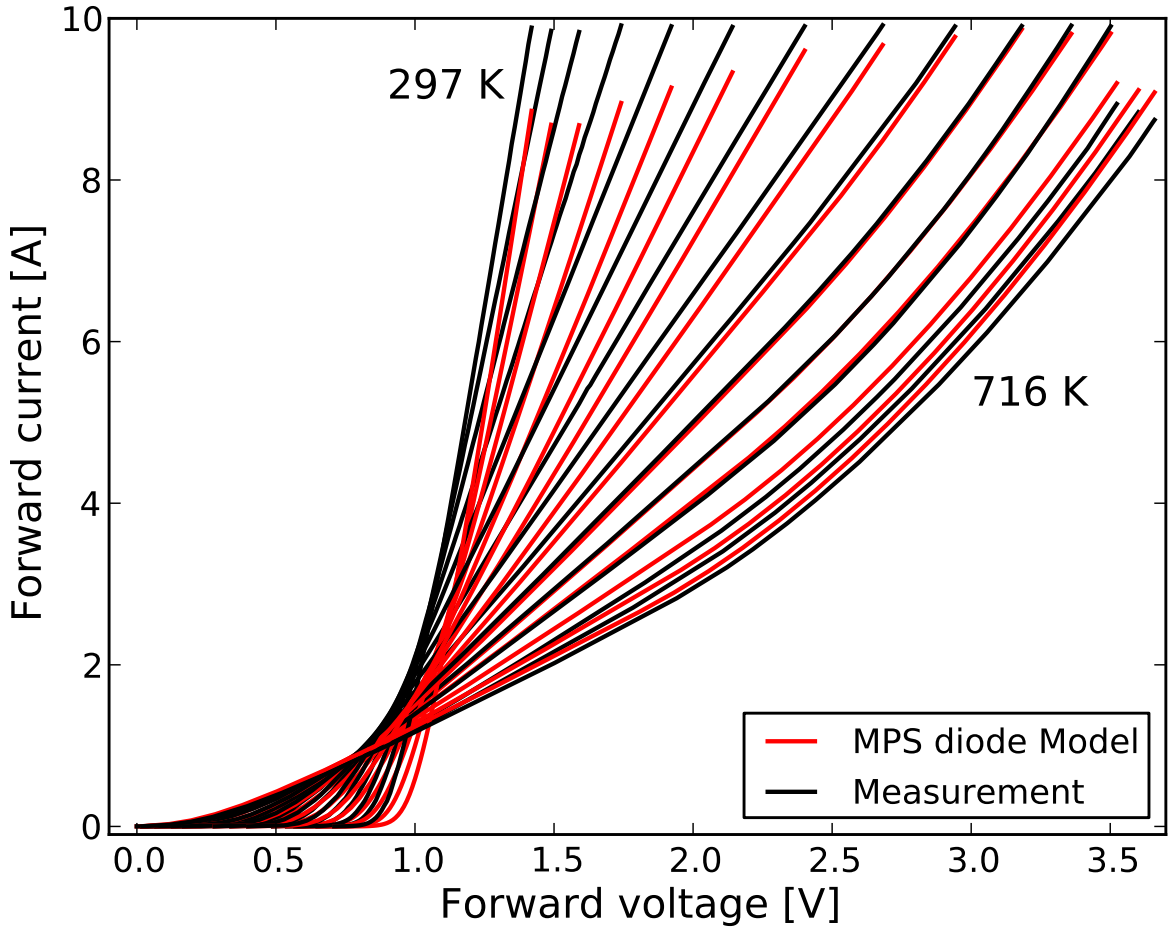
Emballement thermique : exemple de la diode – 2

- un modèle analytique $I = f(V_F, T)$ empirique
- parties PiN et Schottky modélisées séparémment



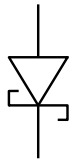
Emballement thermique : exemple de la diode – 2

- un modèle analytique $I = f(V_F, T)$ empirique
- parties PiN et Schottky modélisées séparémment

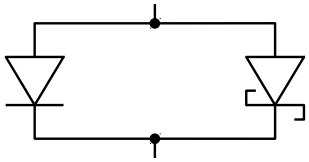


Jouons maintenant avec notre modèle

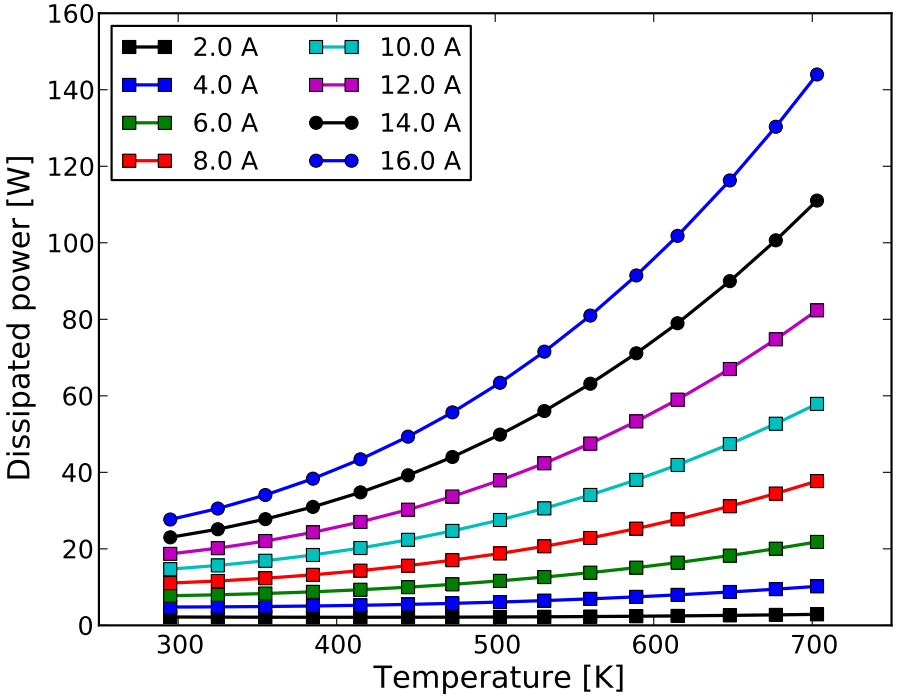
Emballement thermique : exemple de la diode – 3

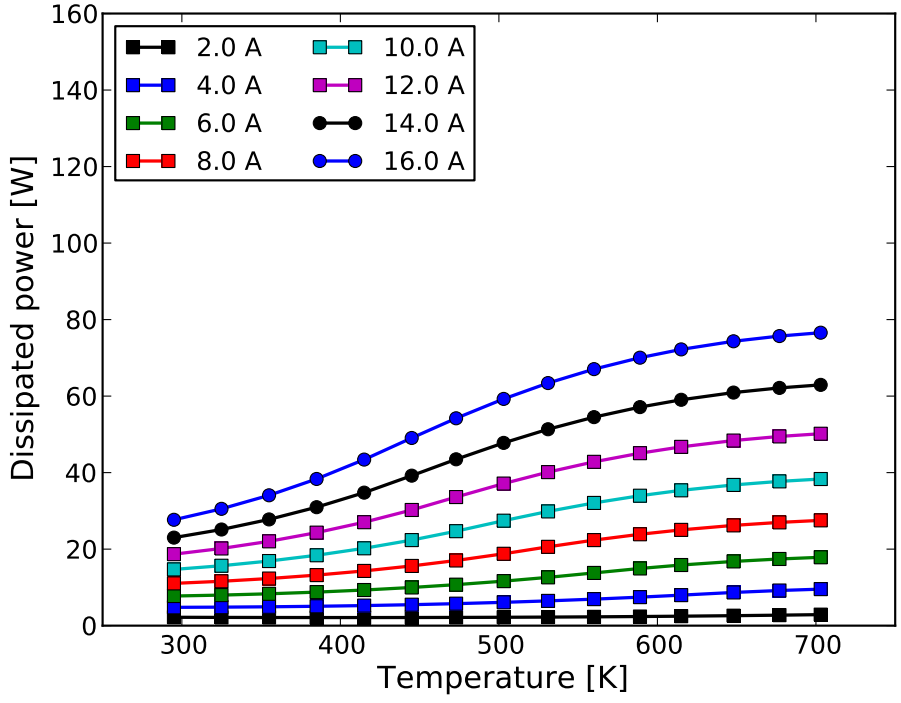


Schottky pure



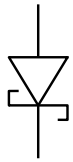
MPS



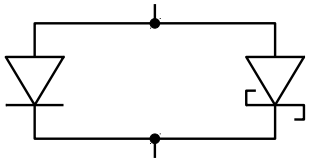


- Comportement identique à basse température, se couche à hte temp pour la MPS
- MPS plus stable, notamment en surcharge.

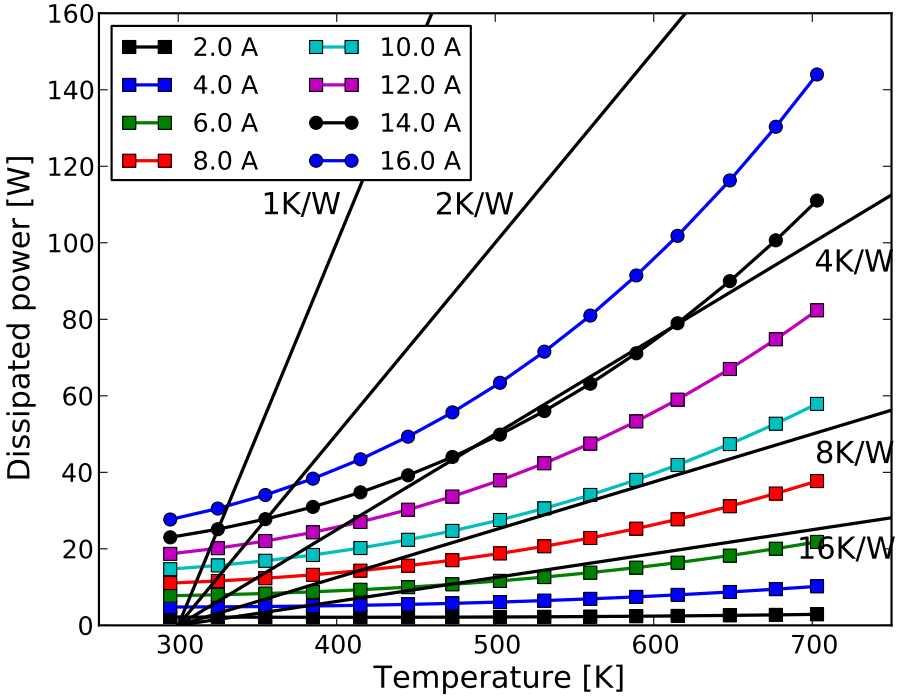
Emballement thermique : exemple de la diode – 3

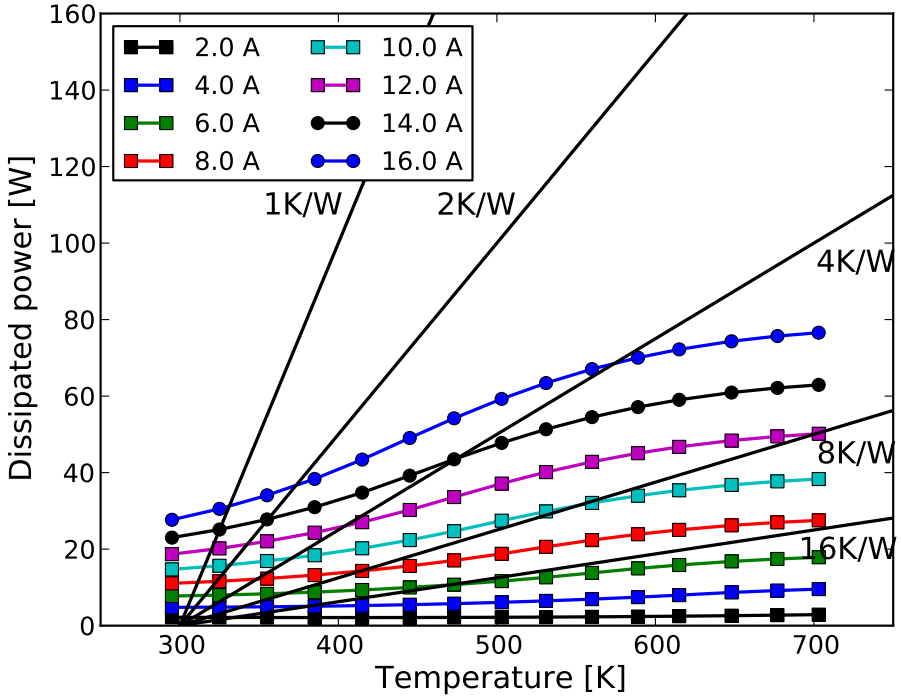


Schottky pure



MPS

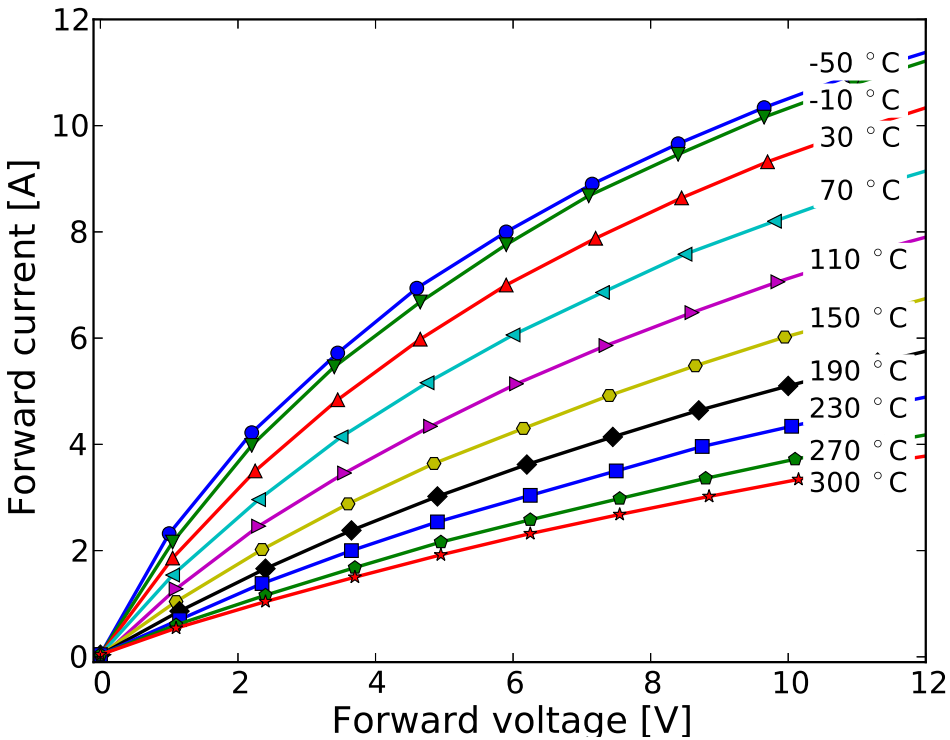




- Comportement identique à basse température, se couche à hte temp pour la MPS
- MPS plus stable, notamment en surcharge.

Emballement thermique : Exemple du JFET [6]

Caractéristique statique de JFET SiC 490 mΩ

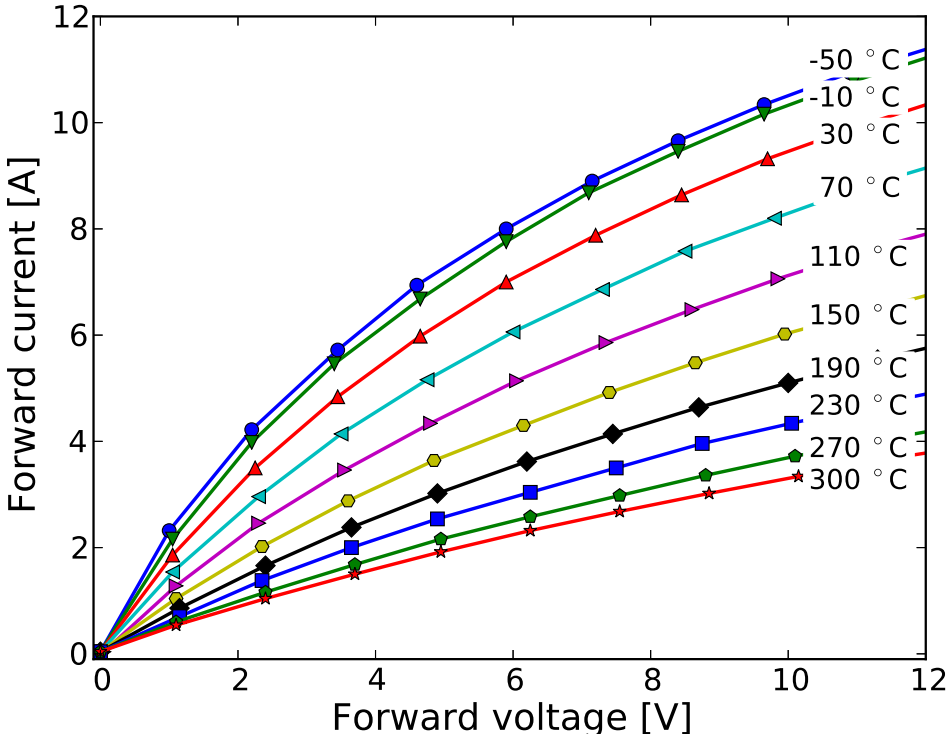


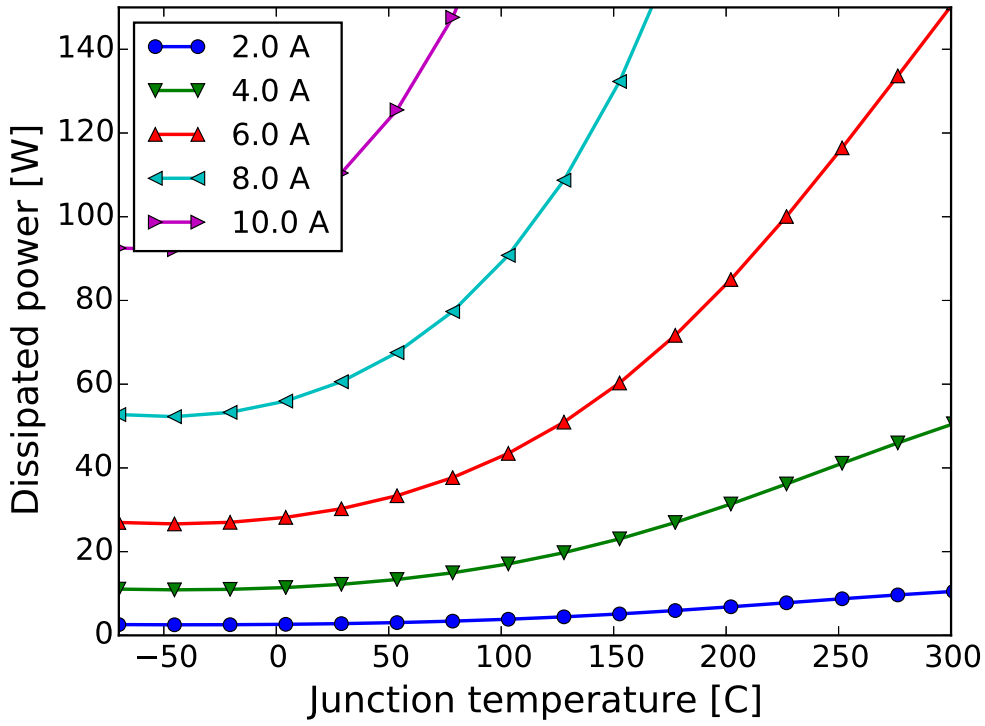
$V_{GS} = 0\ V$, i.e. composant passant

- La résistance à l'état passant augmente fortement avec T_J ;
- les pertes en conduction sont donc très sensibles à T_J.

Emballement thermique : Exemple du JFET [6]

Caractéristique statique de JFET SiC 490 mΩ

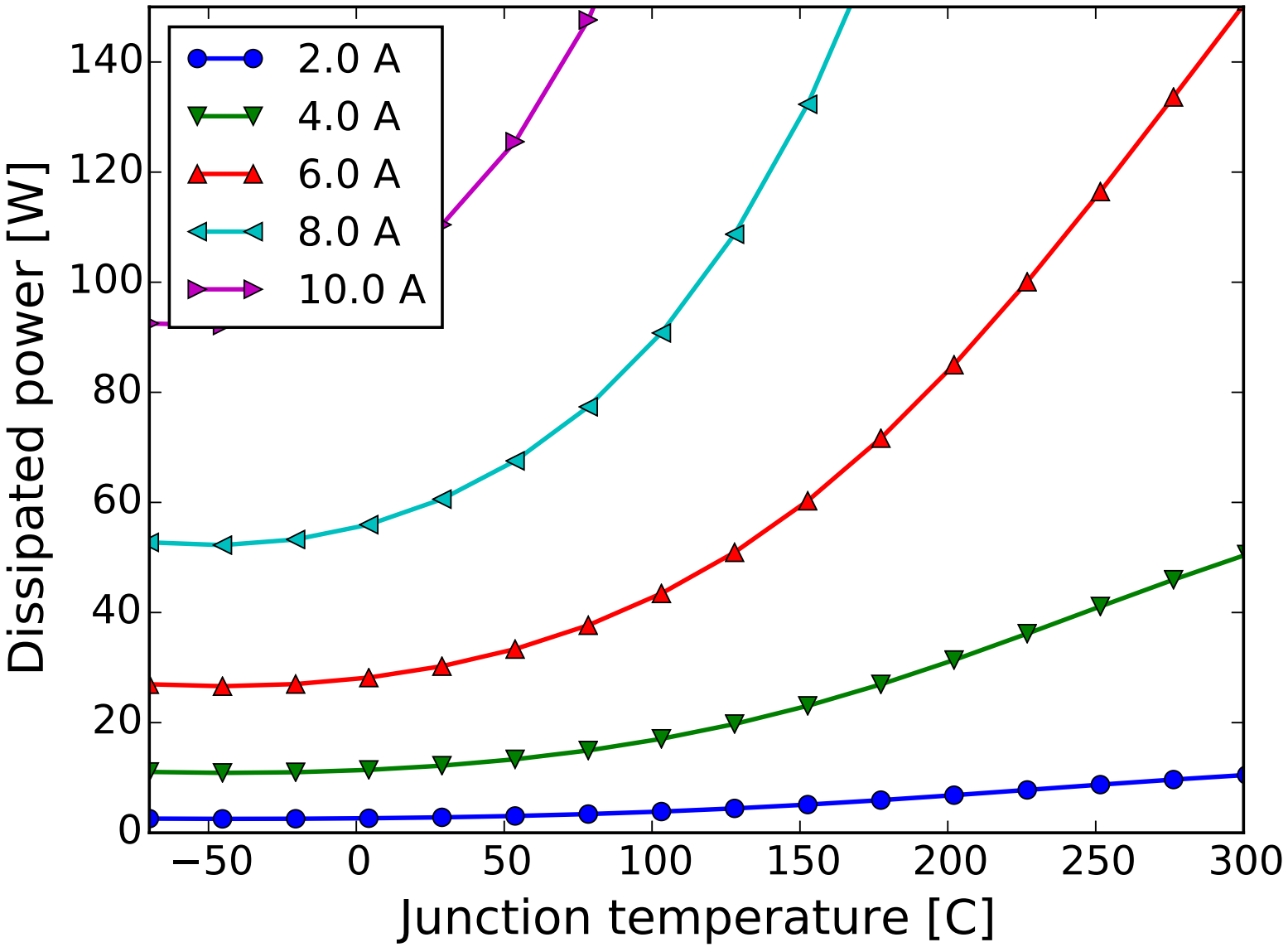




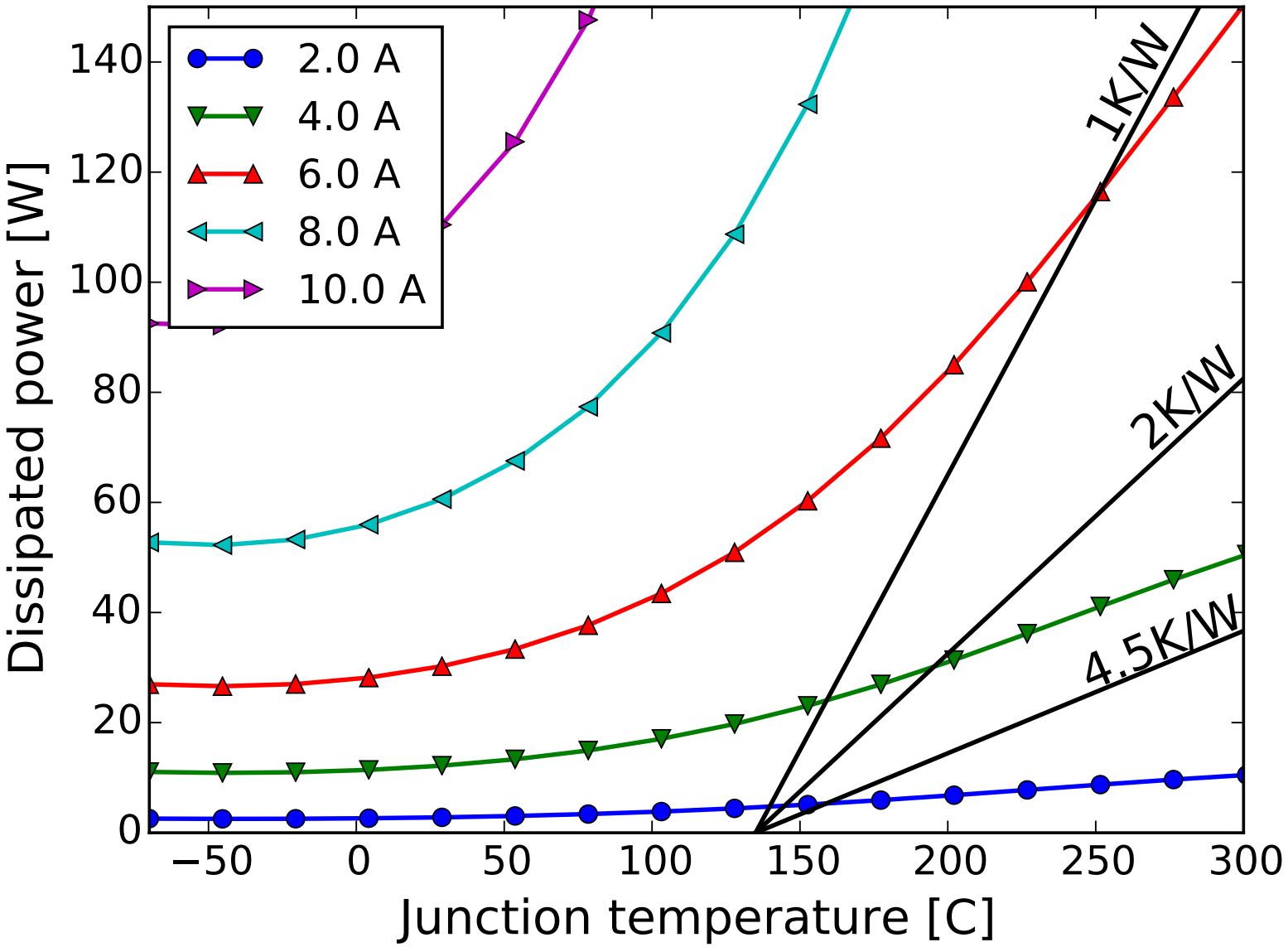
$V_{GS} = 0\ V$, i.e. composant passant

- La résistance à l'état passant augmente fortement avec T_J ;
- les pertes en conduction sont donc très sensibles à T_J.

Emballement thermique : Exemple du JFET – 2

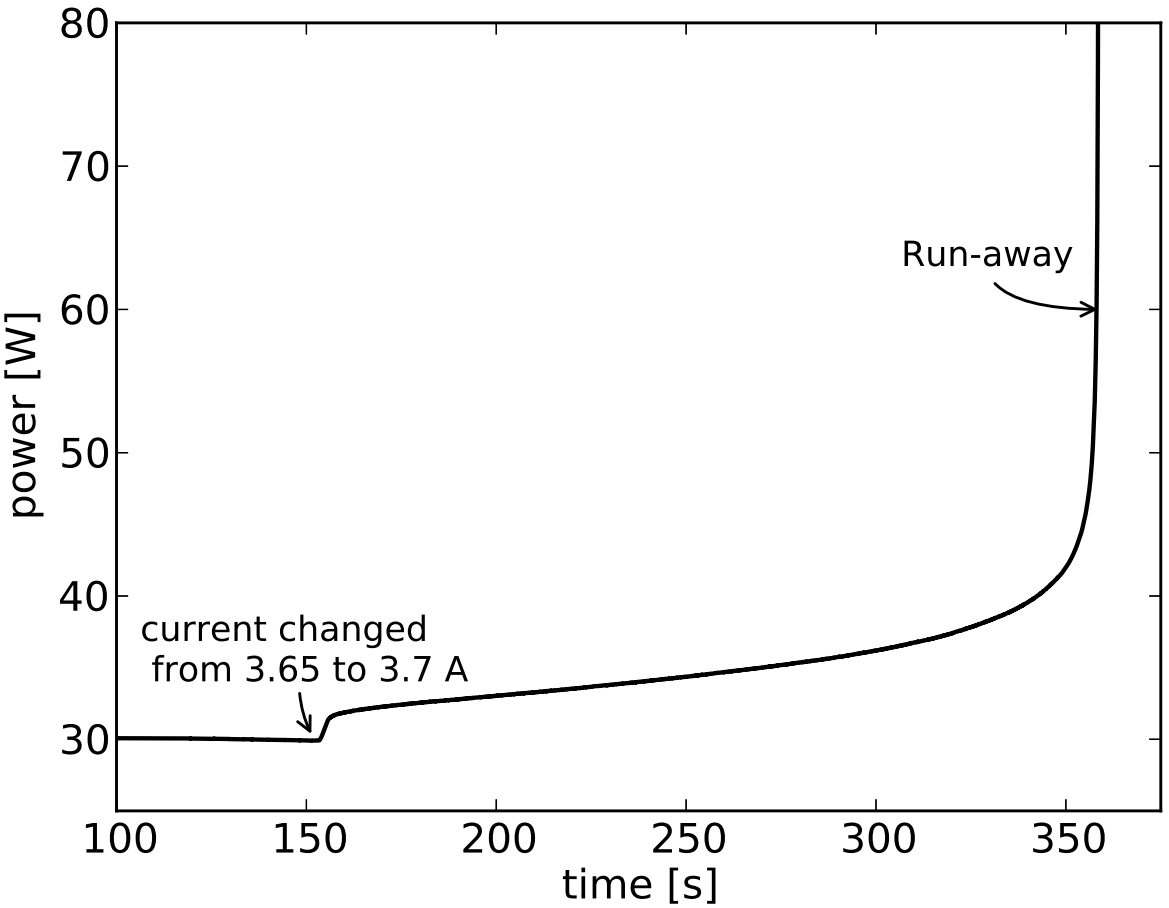


Emballement thermique : Exemple du JFET – 2



Emballement thermique : Exemple du JFET – 3

Buttay et al. “Thermal Stability of Silicon Carbide Power JFETs”, IEEE Trans on Electron Devices, 2014



SiC JFET :

- 490 mΩ, 1200 V
- $R_{Th_{JA}} = 4.5\ K/W$
- 135 °C ambiant
- On ne considère que les pertes en conduction

Composant haute temp. $\neq$ besoin en refroidissement limités !

Un xFET SiC a besoin d’un radiateur à faible R_{Th} !

Conclusions sur les semiconducteurs et la haute température

Deux limites liées aux composants (hors packaging) :

- vieillissement de certains éléments (ex. certains contacts Schottky)
  - peut se produire en quelques heures au-delà de 300 °C ;
- emballement thermique
  - un composant unipolaire (Si, SiC, GaN) devient instable si ses pertes ne sont pas évacuées, même à basse température.
- certains composants supportent des températures plus élevées (contact Schottky W [3]) ;
- les composants bipolaires ou mixtes voient sont moins sujets à l'emballement thermique.

Conclusions sur les semiconducteurs et la haute température

Deux limites liées aux composants (hors packaging) :

- vieillissement de certains éléments (ex. certains contacts Schottky)
  - peut se produire en quelques heures au-delà de 300 °C ;
- emballement thermique
  - un composant unipolaire (Si, SiC, GaN) devient instable si ses pertes ne sont pas évacuées, même à basse température.

- certains composants supportent des températures plus élevées (contact Schottky W [3]) ;
- les composants bipolaires ou mixtes voient sont moins sujets à l'emballement thermique.

Conclusions sur les semiconducteurs et la haute température

Deux limites liées aux composants (hors packaging) :

- vieillissement de certains éléments (ex. certains contacts Schottky)
  - peut se produire en quelques heures au-delà de 300 °C ;
- emballement thermique
  - un composant unipolaire (Si, SiC, GaN) devient instable si ses pertes ne sont pas évacuées, même à basse température.

Mais la situation n'est pas désespérée :

- certains composants supportent des températures plus élevées (contact Schottky W [3]) ;
- les composants bipolaires ou mixtes voient sont moins sujets à l'emballement thermique.

Conclusions sur les semiconducteurs et la haute température

Deux limites liées aux composants (hors packaging) :

- vieillissement de certains éléments (ex. certains contacts Schottky)
  - peut se produire en quelques heures au-delà de 300 °C ;
- emballement thermique
  - un composant unipolaire (Si, SiC, GaN) devient instable si ses pertes ne sont pas évacuées, même à basse température.

Mais la situation n'est pas désespérée :

- certains composants supportent des températures plus élevées (contact Schottky W [3]) ;
- les composants bipolaires ou mixtes voient sont moins sujets à l'emballement thermique.

Conclusions sur les semiconducteurs et la haute température

Deux limites liées aux composants (hors packaging) :

- vieillissement de certains éléments (ex. certains contacts Schottky)
  - peut se produire en quelques heures au-delà de 300 °C ;
- emballement thermique
  - un composant unipolaire (Si, SiC, GaN) devient instable si ses pertes ne sont pas évacuées, même à basse température.

Mais la situation n'est pas désespérée :

- certains composants supportent des températures plus élevées (contact Schottky W [3]) ;
- les composants bipolaires ou mixtes voient sont moins sujets à l'emballement thermique.

Conclusions sur les semiconducteurs et la haute température

Deux limites liées aux composants (hors packaging) :

- vieillissement de certains éléments (ex. certains contacts Schottky)
  - peut se produire en quelques heures au-delà de 300 °C ;
- emballement thermique
  - un composant unipolaire (Si, SiC, GaN) devient instable si ses pertes ne sont pas évacuées, même à basse température.

Mais la situation n'est pas désespérée :

- certains composants supportent des températures plus élevées (contact Schottky W [3]) ;
- les composants bipolaires ou mixtes voient sont moins sujets à l'emballement thermique.

Quelle que soit la température ambiante,
il faut évacuer la puissance dissipée !

Sommaire

Introduction

Composants

- semiconducteurs de puissance
- Circuits de commande
- Passifs

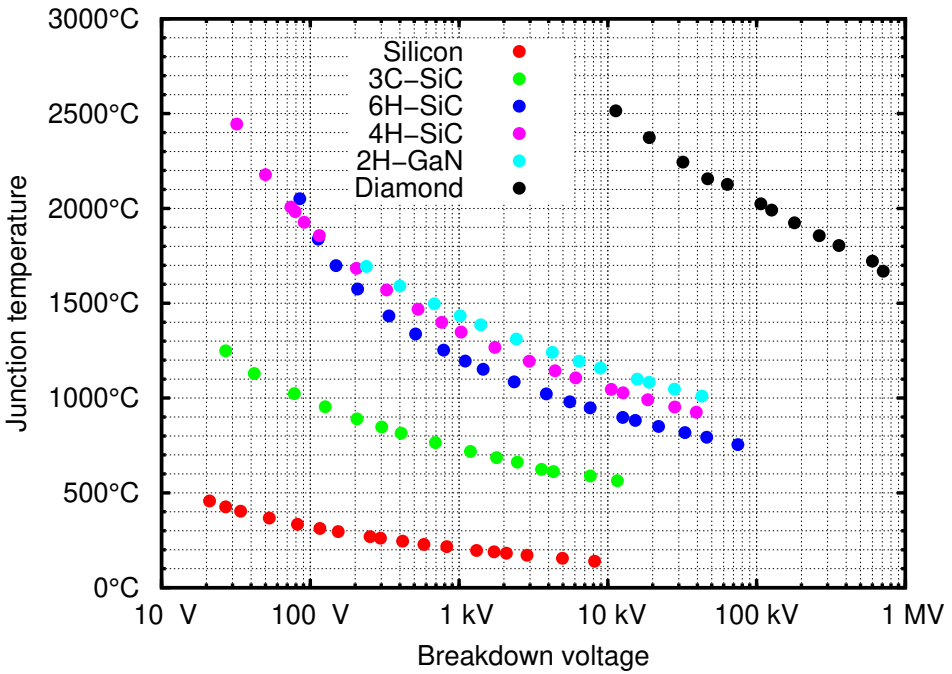
Packaging et Procédés

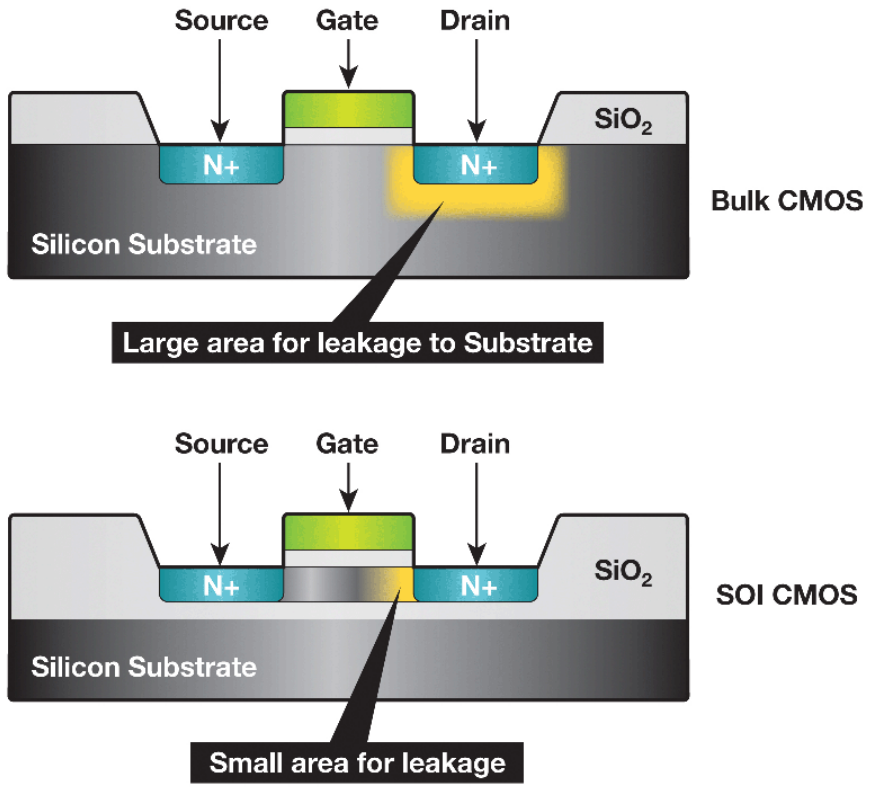
- Généralités Packaging
- Attache de composants
- Circuits imprimés

Conclusions

Technologie pour les circuits intégrés haute temp. [7]

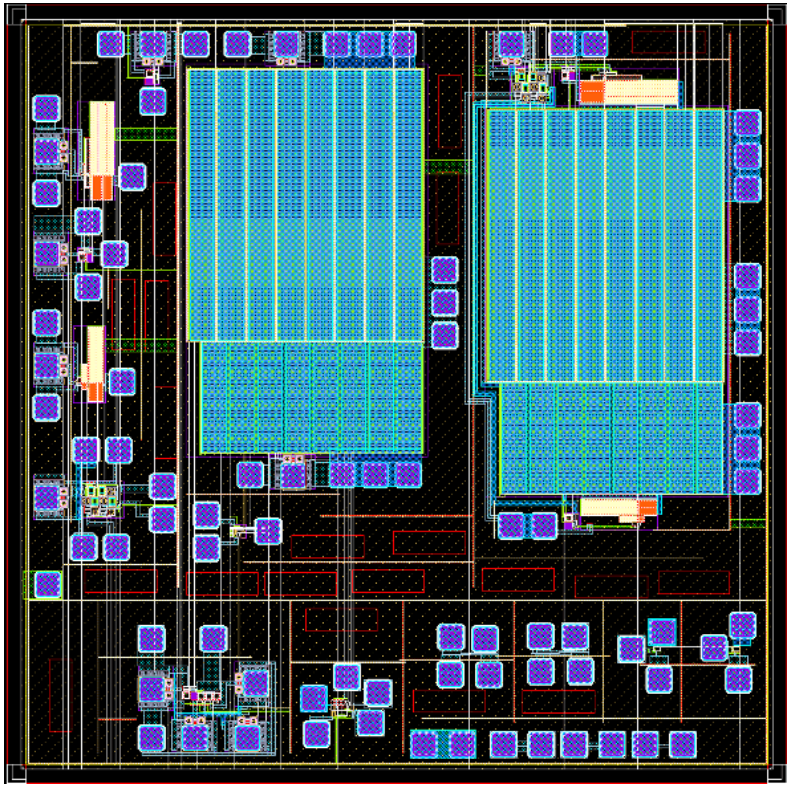
- Le silicium est acceptable en basse tension (<100 V)
- Le SOI (Silicon on Insulator) peut être utilisé en haute température (faibles fuites).





Honeywell (“Extreme Design: Developing integrated circuits for -55 degC to +250°C”, nov 2008)

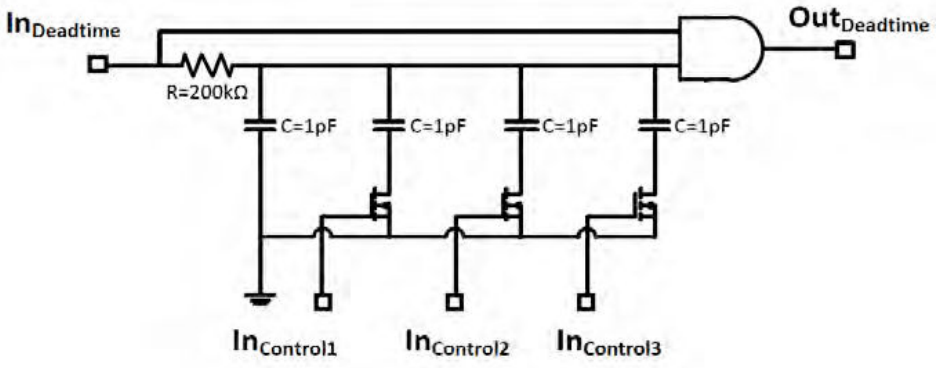
Exemple de circuit de commande haute température



- Commande de JFET SiCED :
  - On : 0 V
  - Off : $\approx$ -24 V, 1 mA continu et $\approx$ 1 A pic
- Technologie : Smartis-1 (ATMEL) :
  - 0.8 μm Bipolar-CMOS
  - Partially-depleted SOI
  - 3 couches métalliques AlSiCu

Exemple de conception pour une large plage de temp.

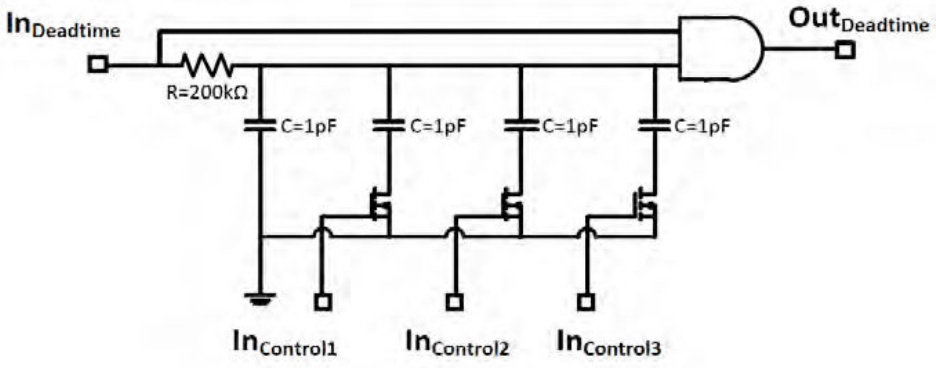
Génération de temps morts

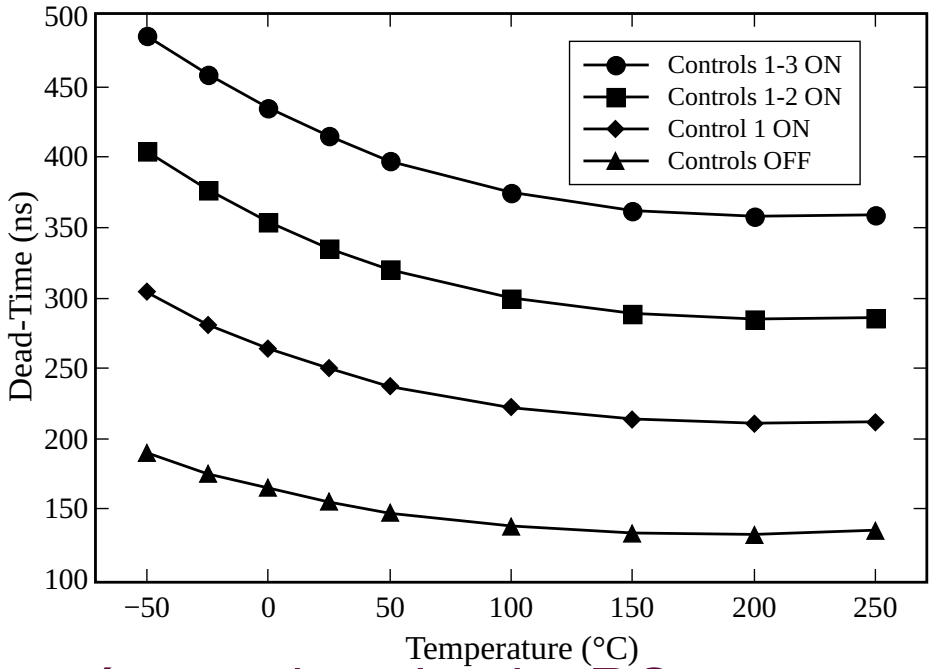


- La génération de délais est basée sur des circuits RC
- Utilisation de résistances à coefficient de température négatif pour compenser l'augmentation de résistance des interconnexions

Exemple de conception pour une large plage de temp.

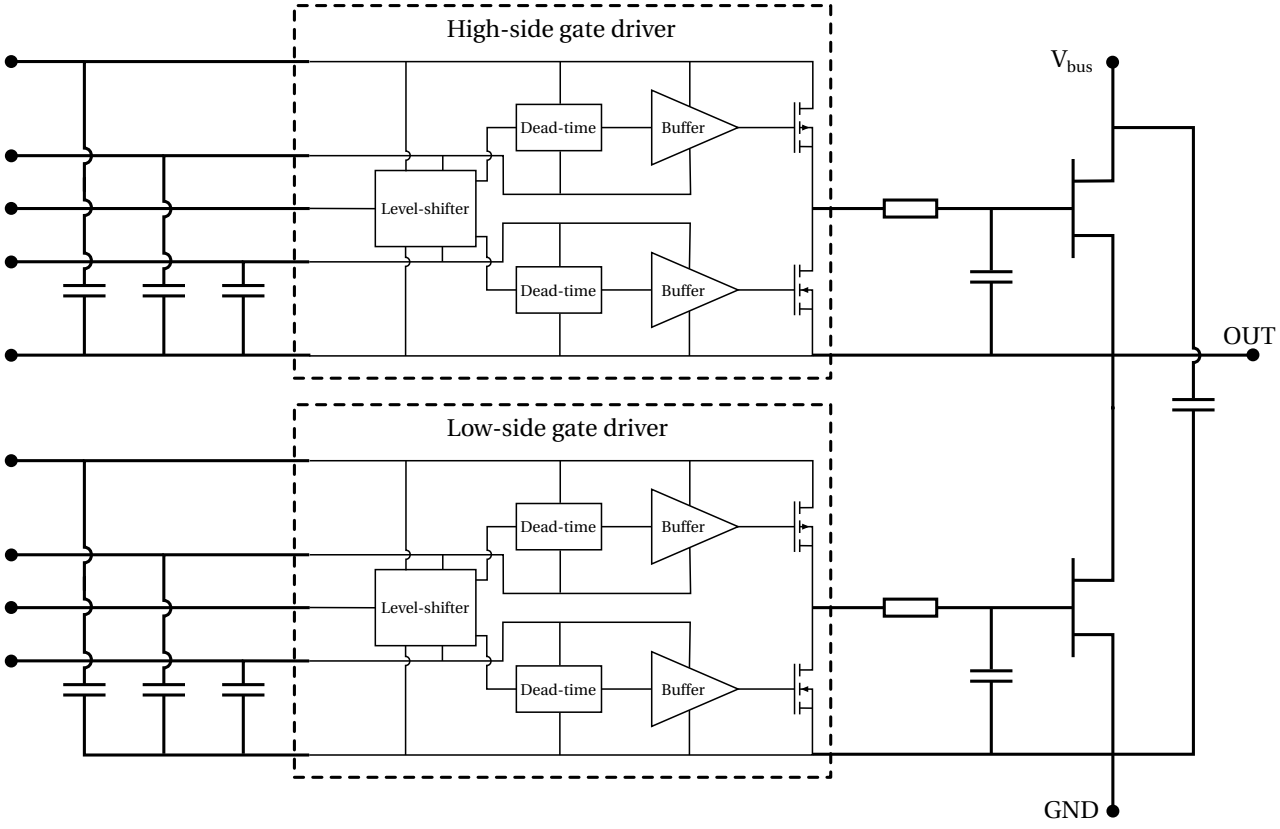
Génération de temps morts



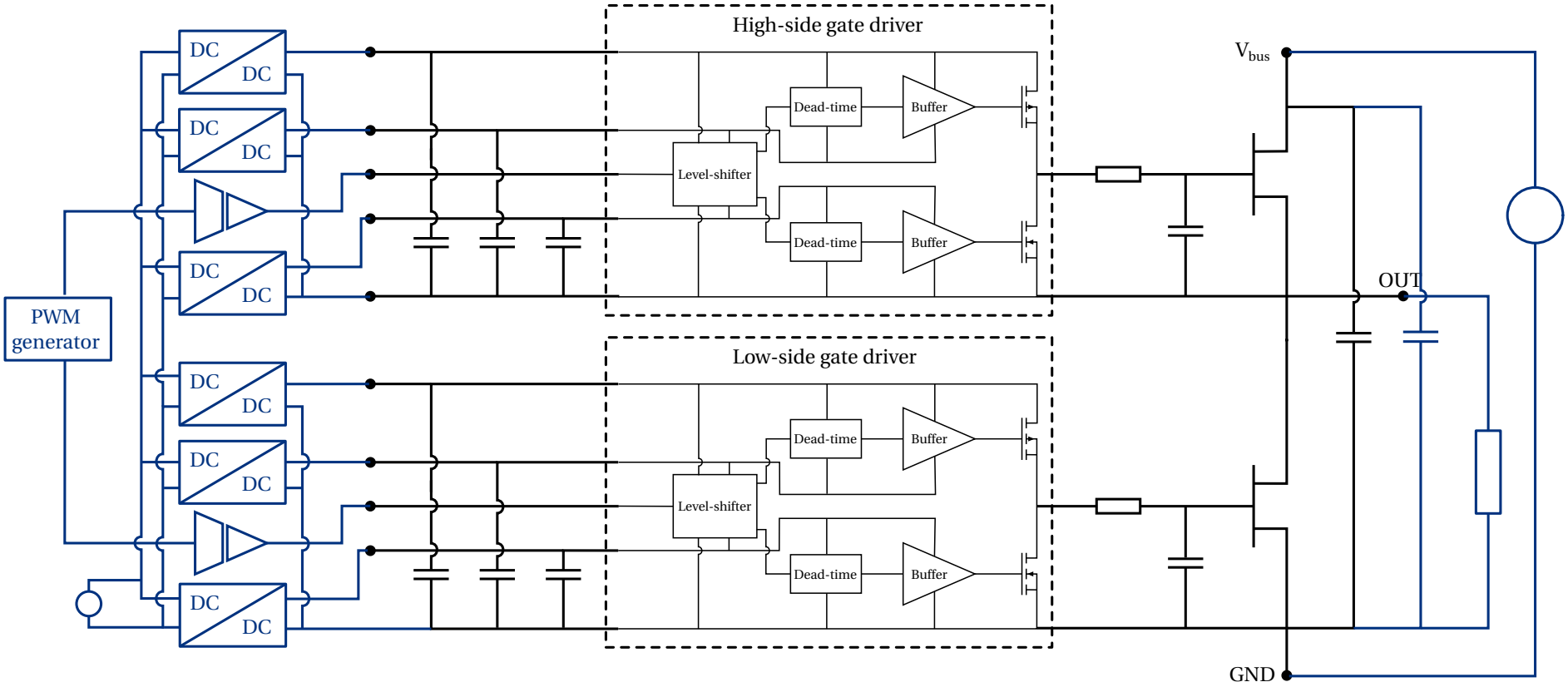


- La génération de délais est basée sur des circuits RC
- Utilisation de résistances à coefficient de température négatif pour compenser l'augmentation de résistance des interconnexions

Démonstrateur de convertisseur haute temp. [8]



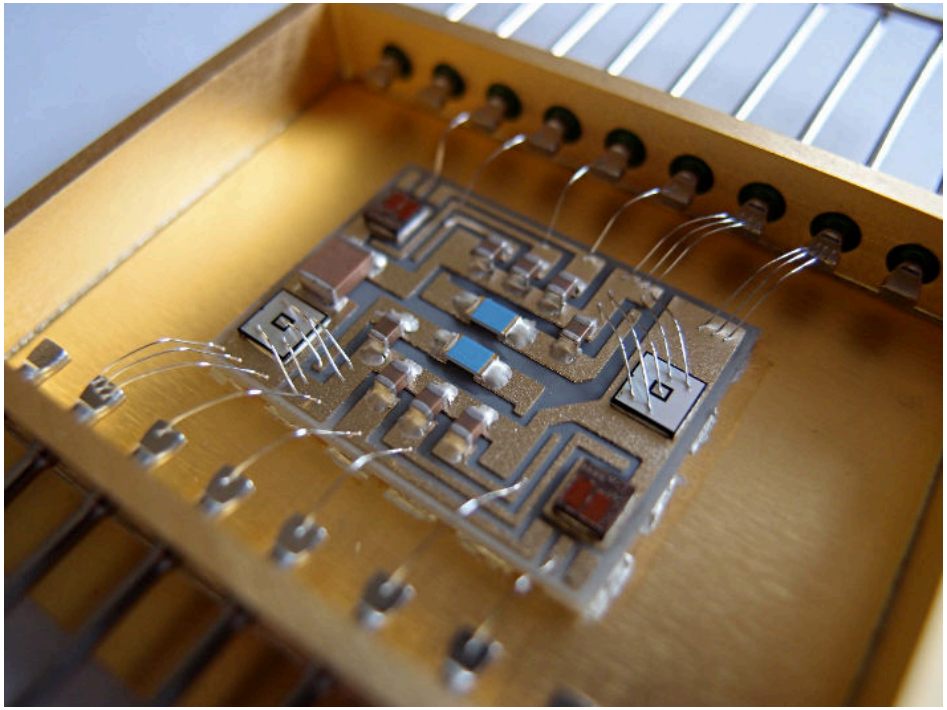
Démonstrateur de convertisseur haute temp. [8]

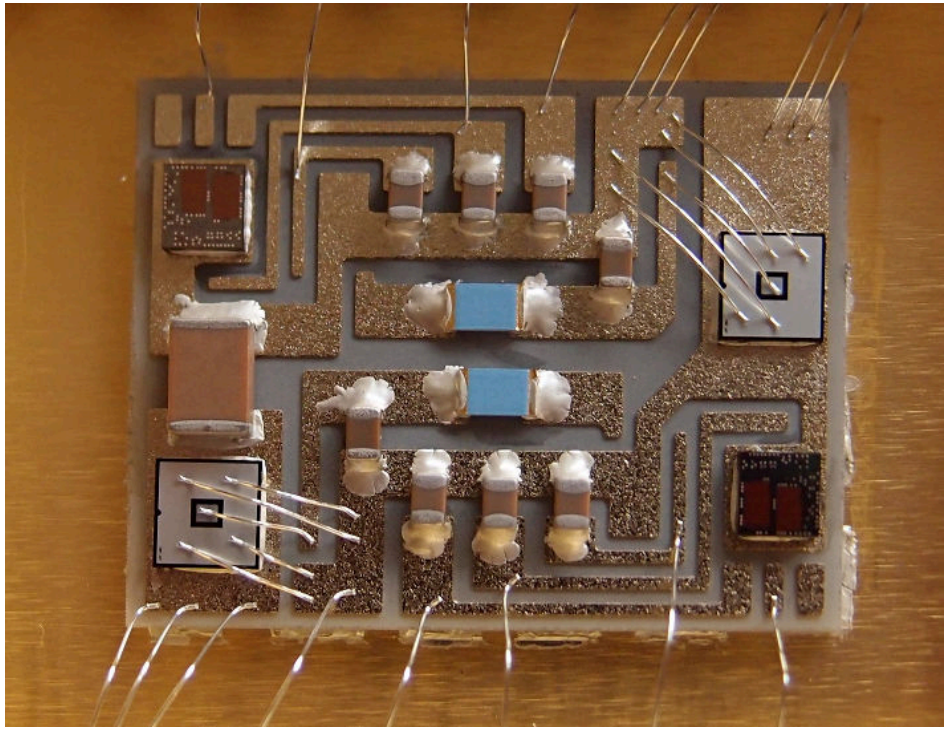


Encore à basse température :

- Fonction d'isolation (signal et puissance)
- Génération des signaux de commande
- Capacité de découplage principale (1 μF)

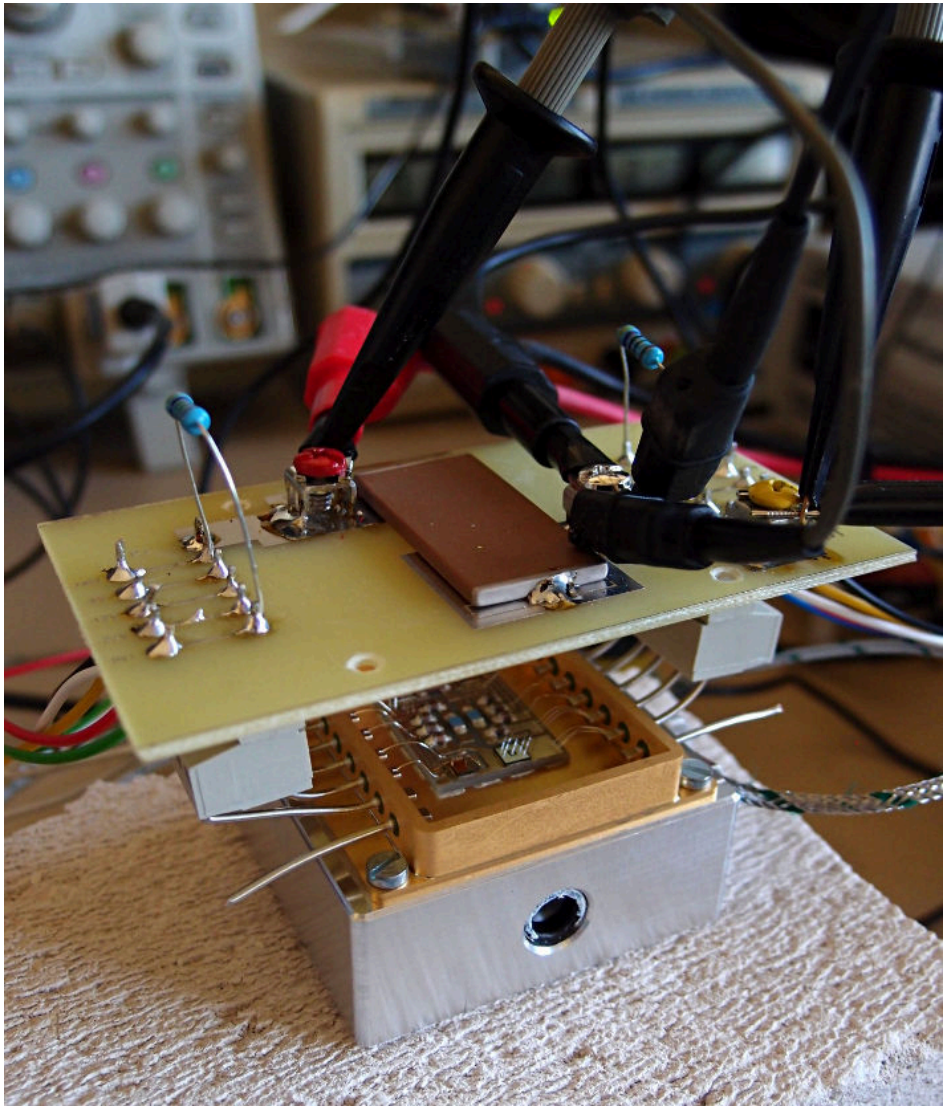
Démonstrateur de convertisseur haute temp. – 2





- Boîtier métallique, semelle CuMo / cadre NiFe
- Substrat céramique (AlN) $\approx 20 \times 30\ mm^2$
- Passifs haute temp. (Vishay, Presidio)
- Wirebonds Al wedge, Au ball pour les circuits driver
- Report de tous les composants : frittage argent.

Démonstrateur de convertisseur haute temp. – 3



Pas d'encapsulation

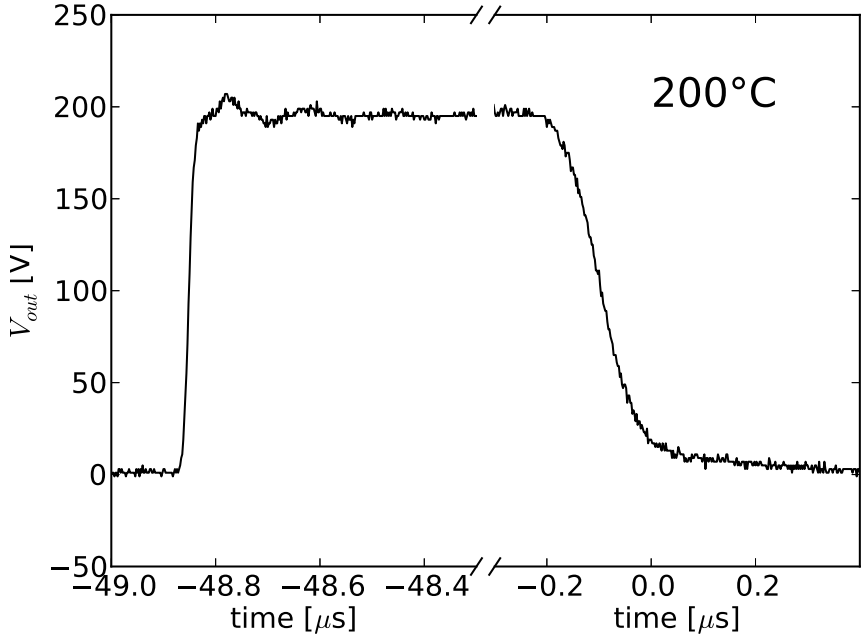
➜ V_{DC} limité à 200 V

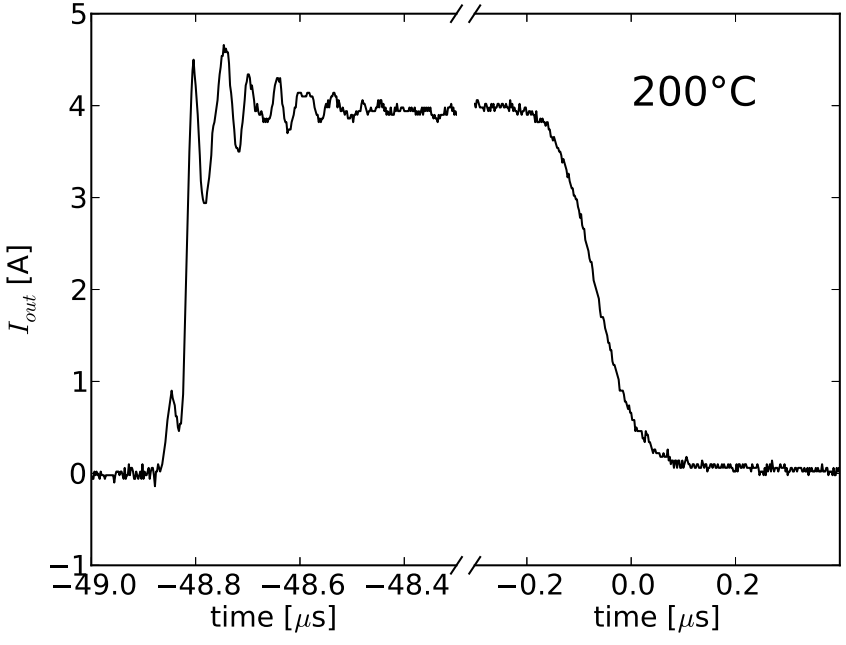
Démonstrateur attaché à un bloc chauffant

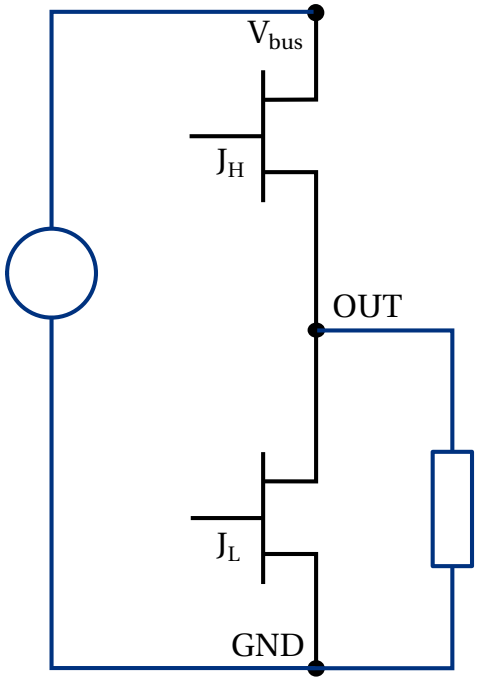
➜ test de l'ambiante à 315 °C

Opération continue sur une résistance

Démonstrateur de convertisseur haute temp. – 4

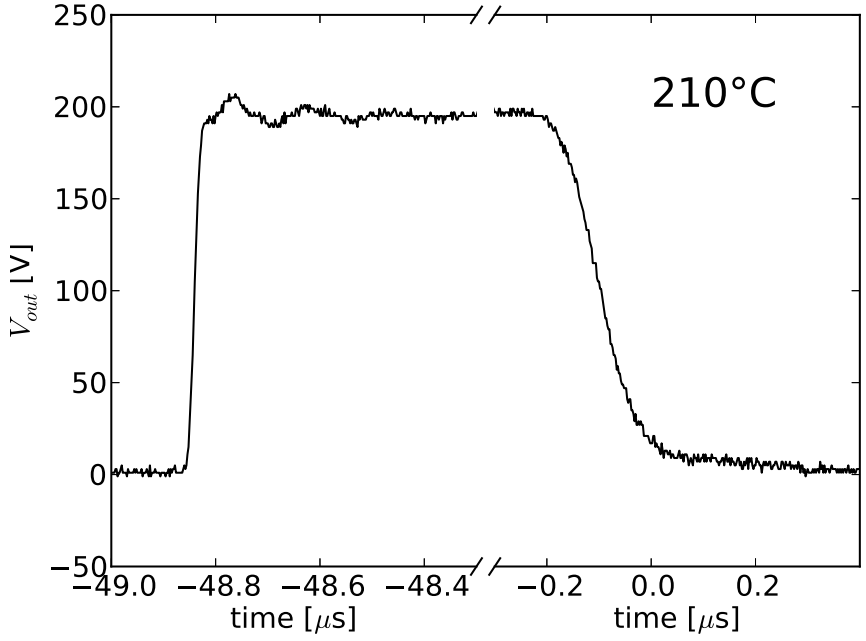


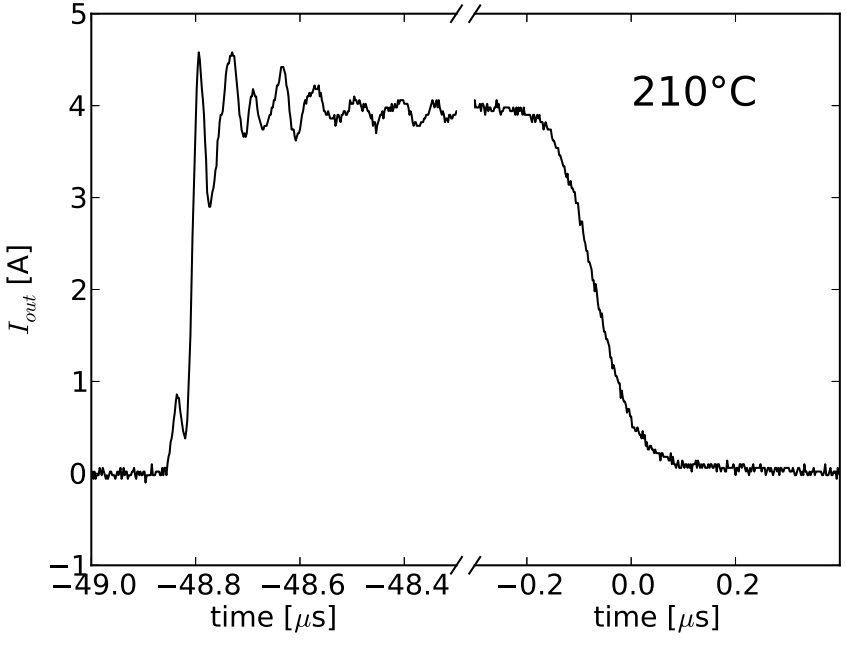


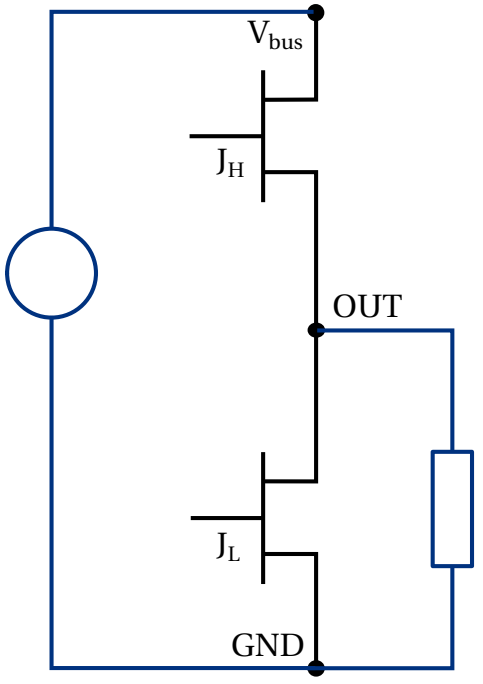


- $V_{DC} = 200\ V$ (no encapsulation)
- $R_{load} = 50\ \Omega$
- $F_{switch} = 10\ kHz$
- $t_{dead-time} = 1.2\ \mu s$

Démonstrateur de convertisseur haute temp. – 4

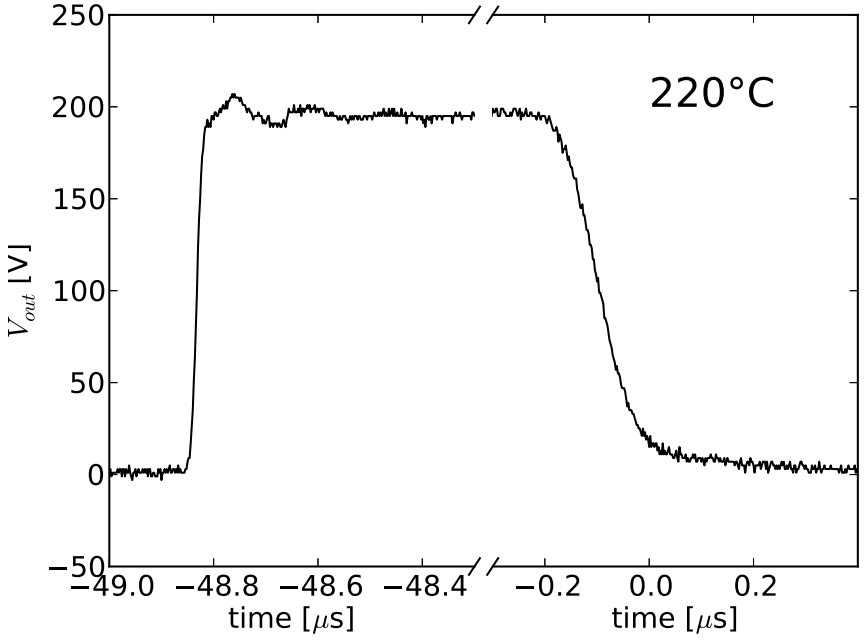


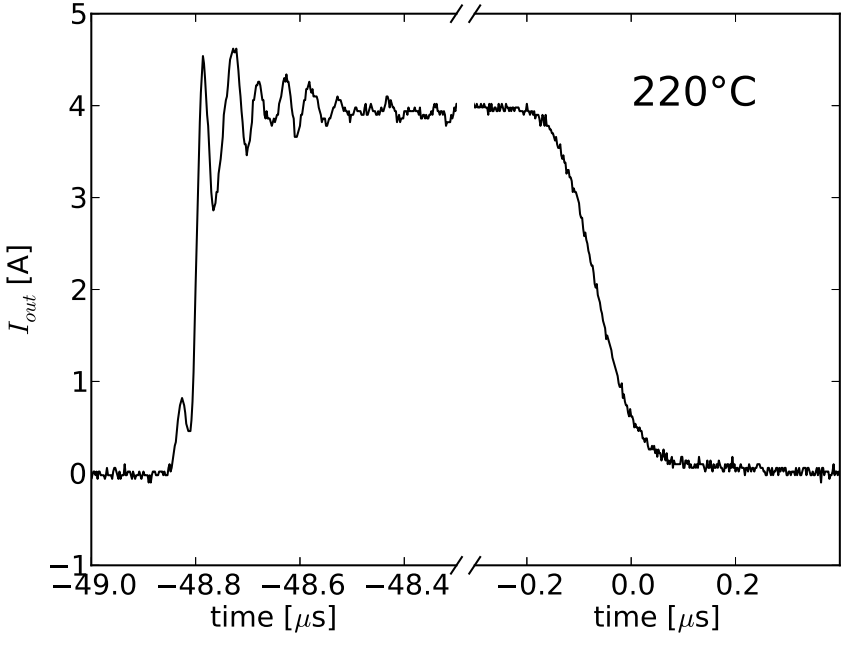


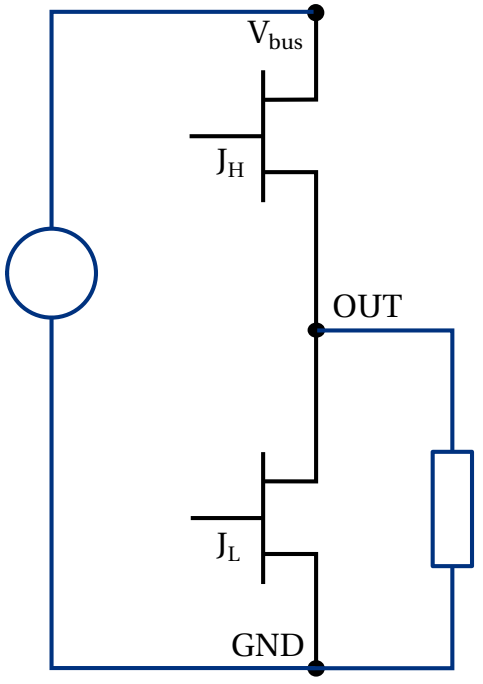


- $V_{DC} = 200\ V$ (no encapsulation)
- $R_{load} = 50\ \Omega$
- $F_{switch} = 10\ kHz$
- $t_{dead-time} = 1.2\ \mu s$

Démonstrateur de convertisseur haute temp. – 4

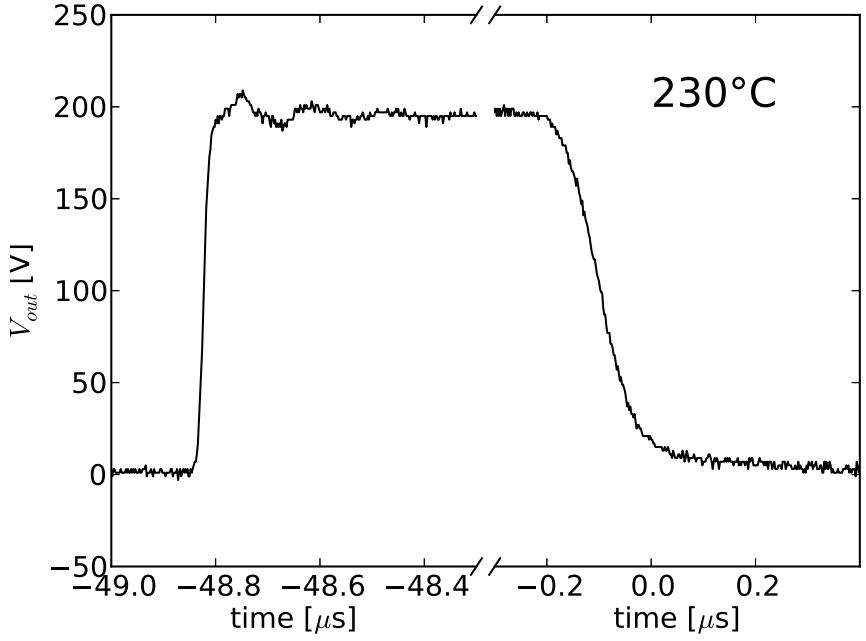


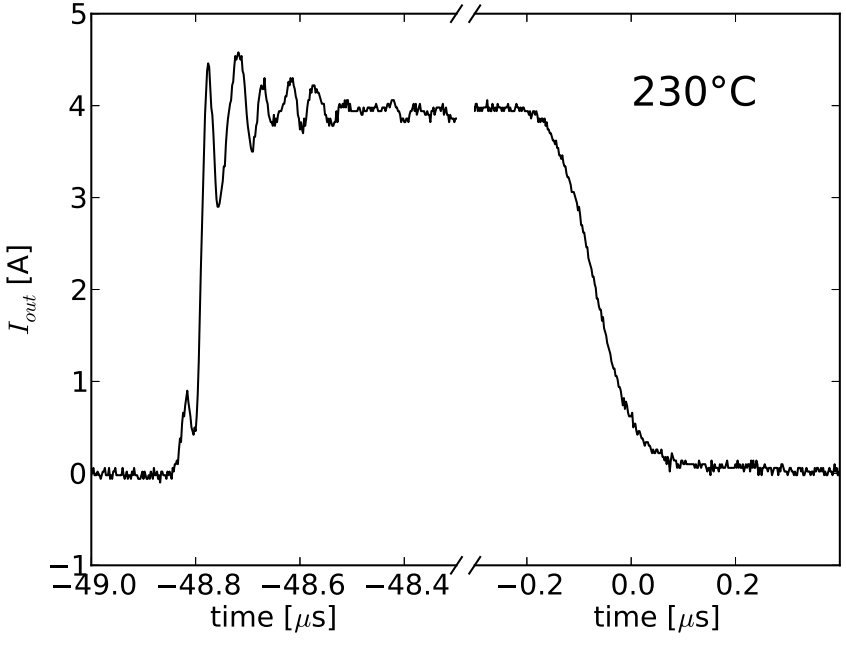


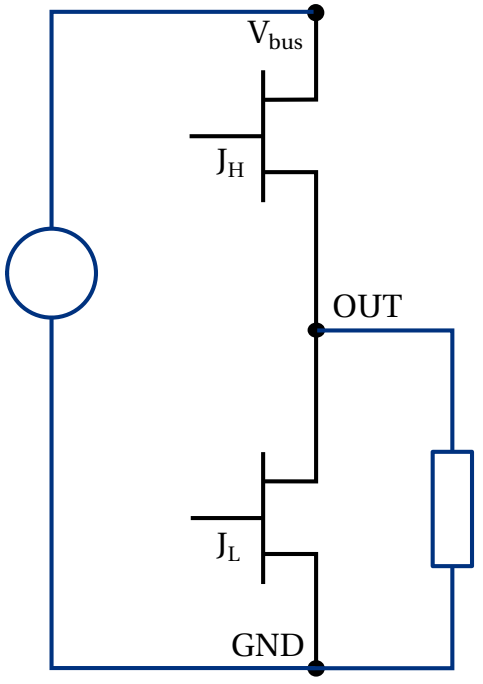


- $V_{DC} = 200\ V$ (no encapsulation)
- $R_{load} = 50\ \Omega$
- $F_{switch} = 10\ kHz$
- $t_{dead-time} = 1.2\ \mu s$

Démonstrateur de convertisseur haute temp. – 4

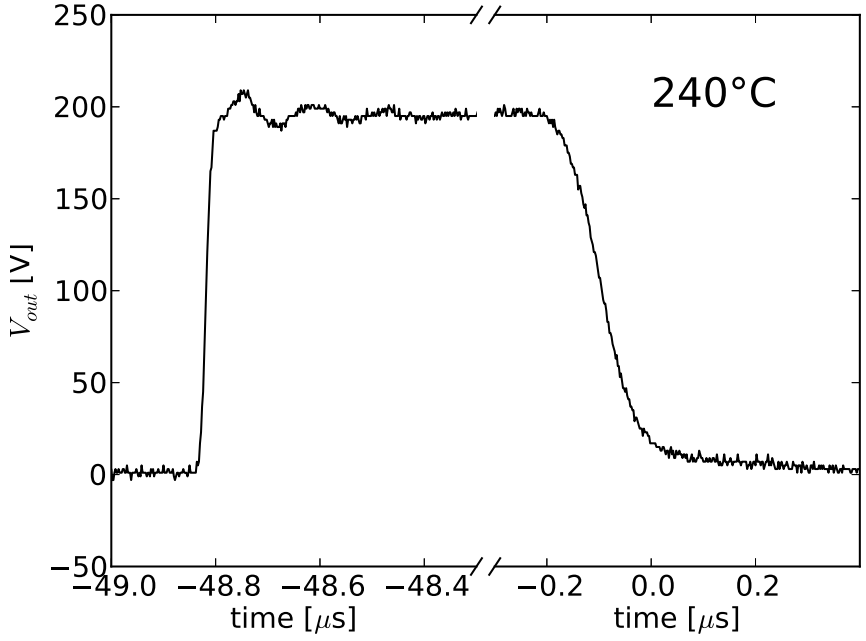


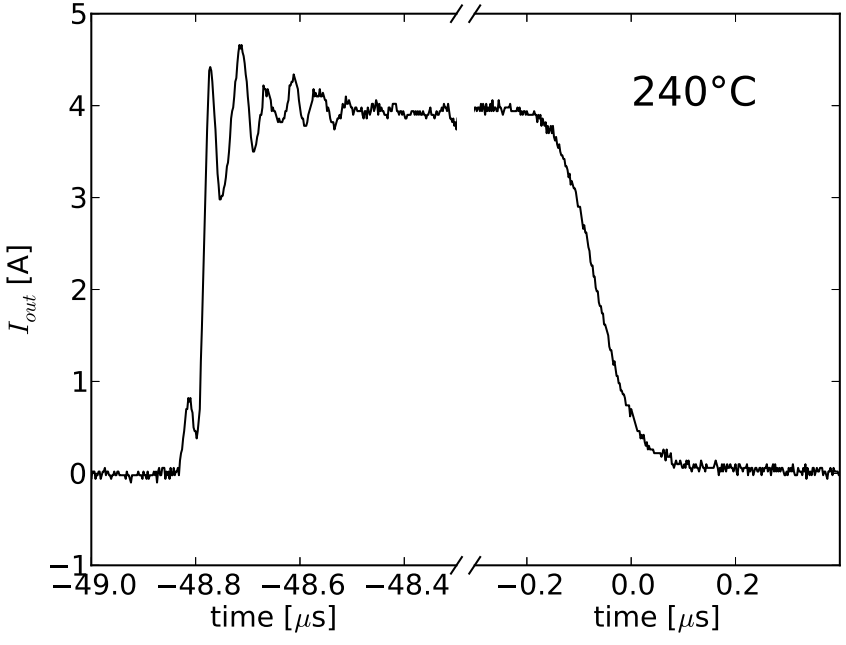


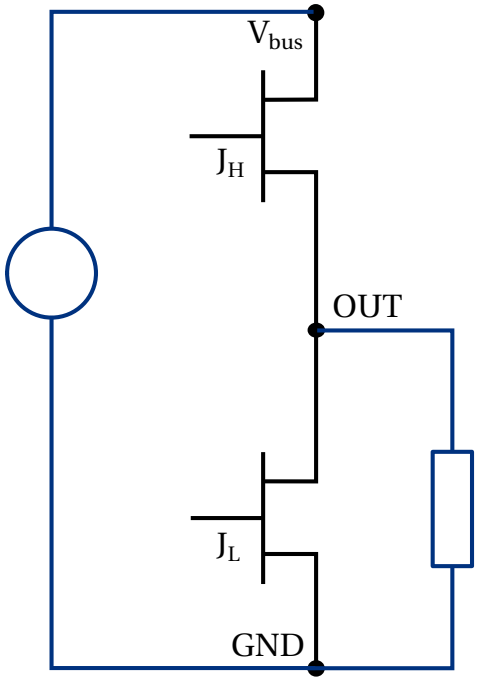


- $V_{DC} = 200\ V$ (no encapsulation)
- $R_{load} = 50\ \Omega$
- $F_{switch} = 10\ kHz$
- $t_{dead-time} = 1.2\ \mu s$

Démonstrateur de convertisseur haute temp. – 4

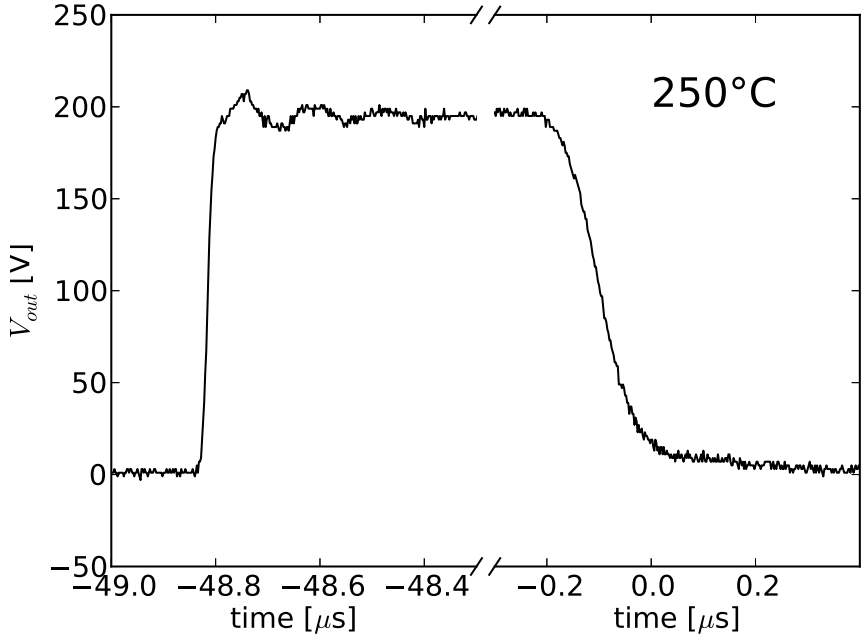


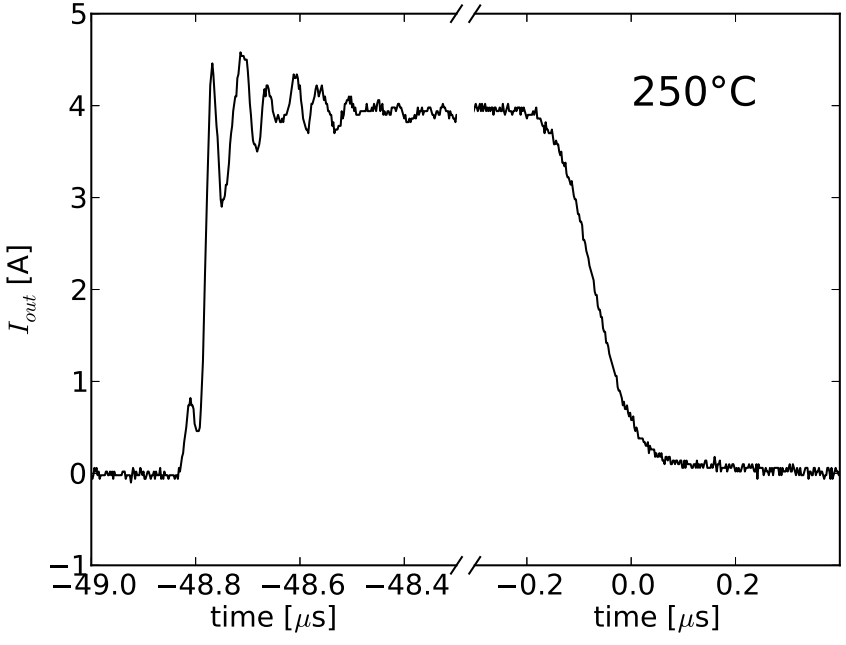


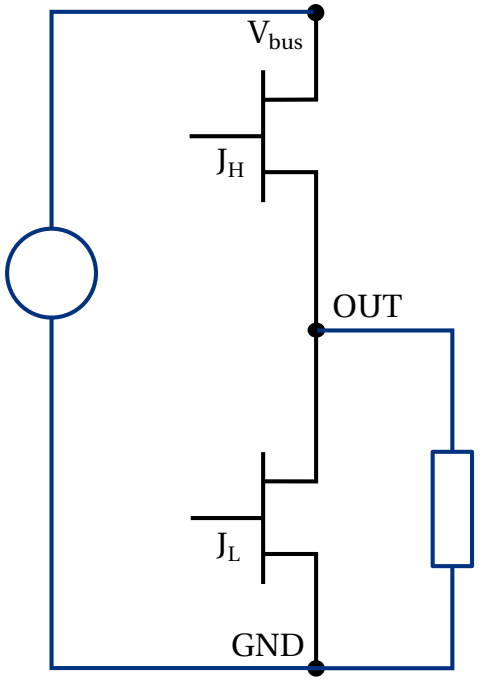


- $V_{DC} = 200\ V$ (no encapsulation)
- $R_{load} = 50\ \Omega$
- $F_{switch} = 10\ kHz$
- $t_{dead-time} = 1.2\ \mu s$

Démonstrateur de convertisseur haute temp. – 4

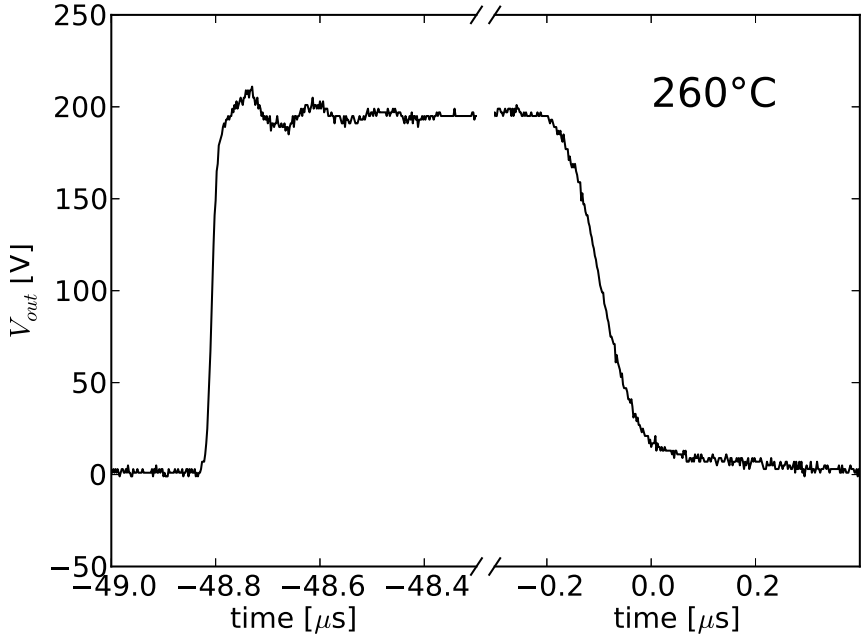


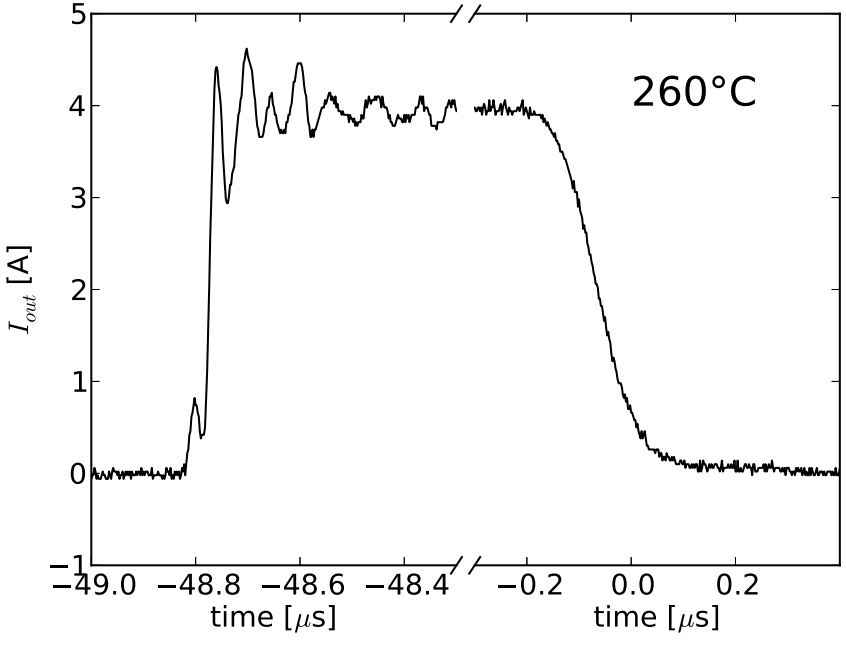


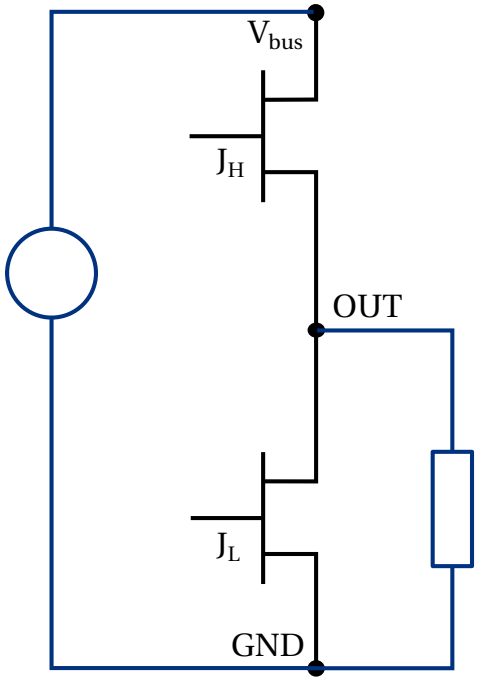


- $V_{DC} = 200\ V$ (no encapsulation)
- $R_{load} = 50\ \Omega$
- $F_{switch} = 10\ kHz$
- $t_{dead-time} = 1.2\ \mu s$

Démonstrateur de convertisseur haute temp. – 4

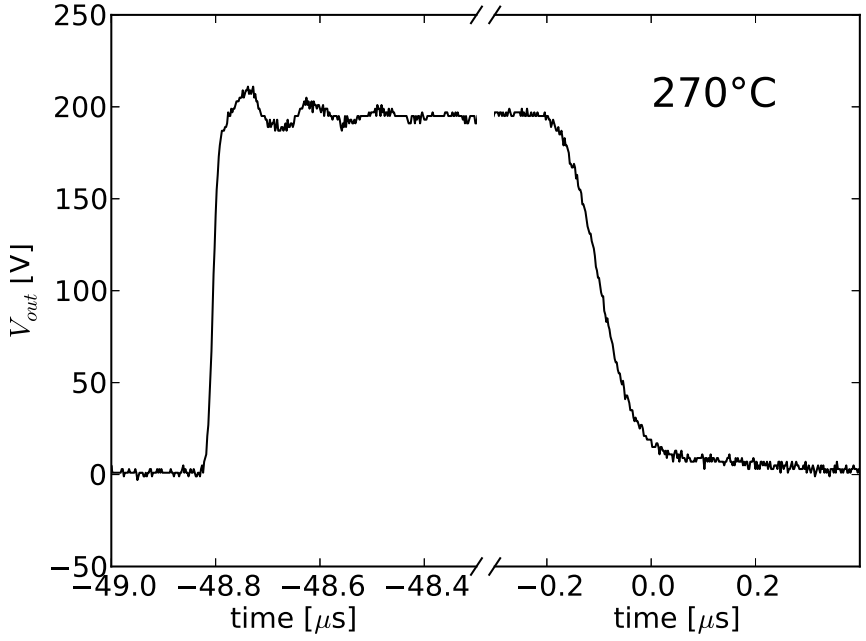


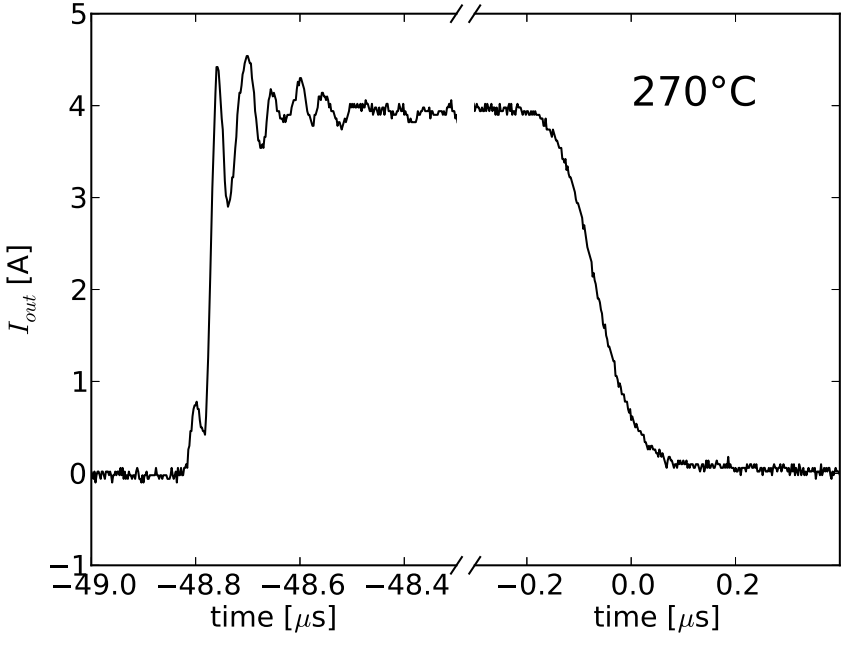


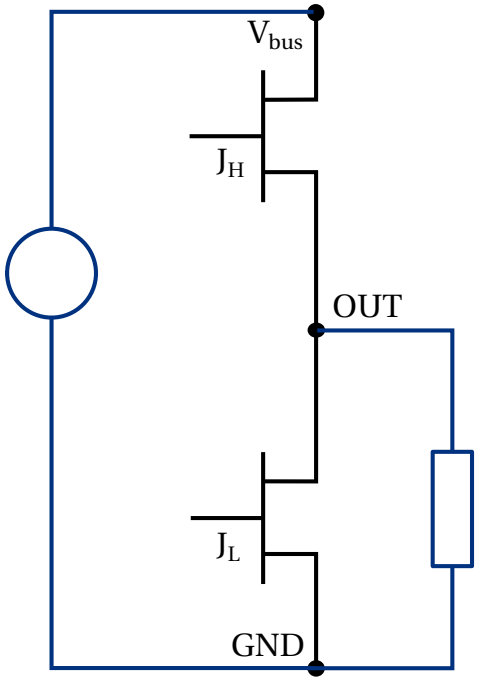


- $V_{DC} = 200\ V$ (no encapsulation)
- $R_{load} = 50\ \Omega$
- $F_{switch} = 10\ kHz$
- $t_{dead-time} = 1.2\ \mu s$

Démonstrateur de convertisseur haute temp. – 4

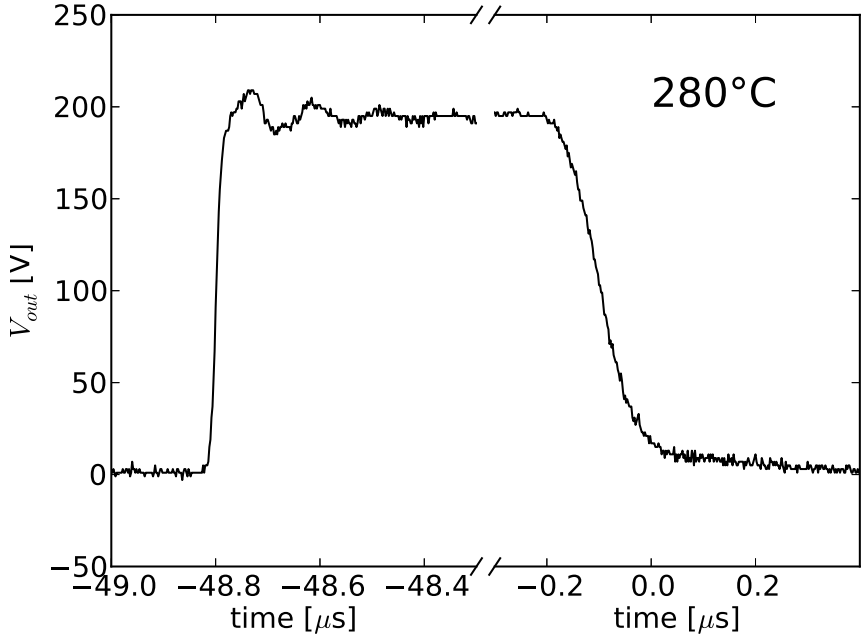


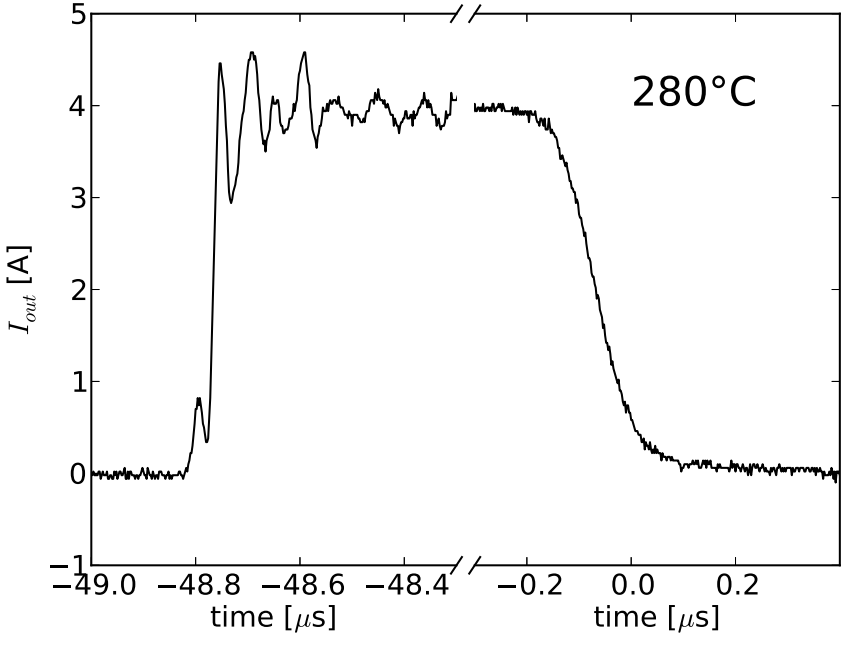


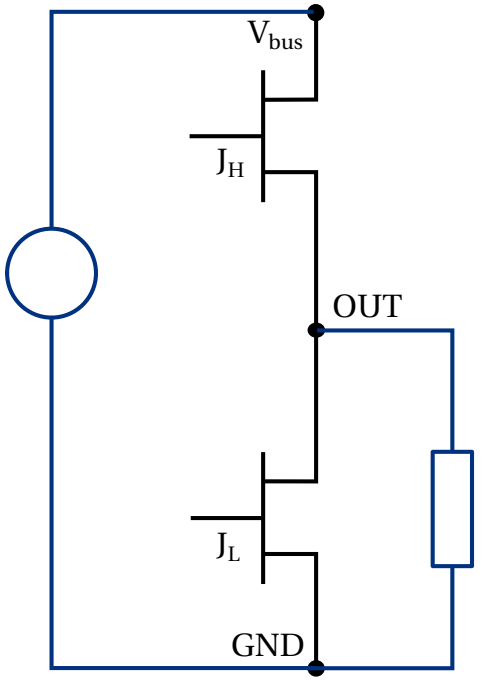


- $V_{DC} = 200\ V$ (no encapsulation)
- $R_{load} = 50\ \Omega$
- $F_{switch} = 10\ kHz$
- $t_{dead-time} = 1.2\ \mu s$

Démonstrateur de convertisseur haute temp. – 4

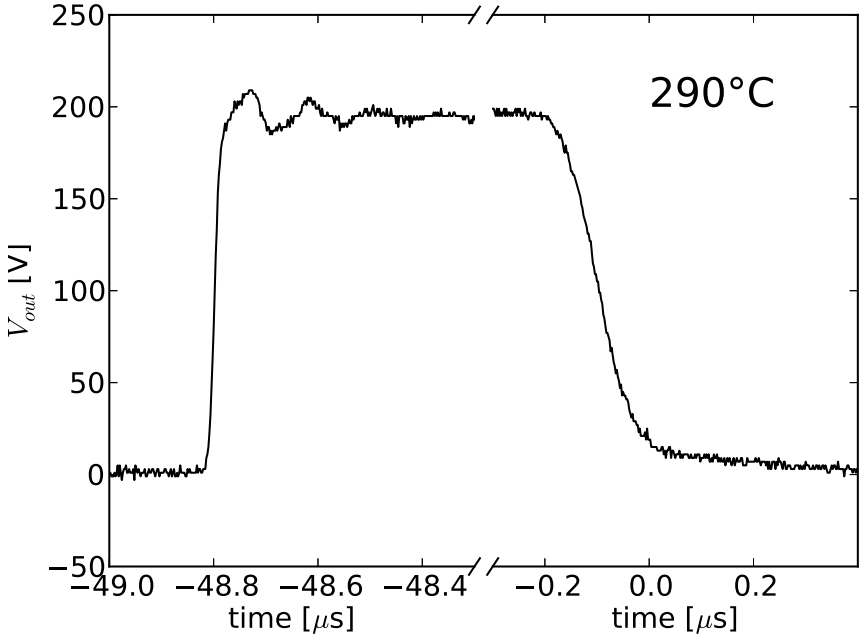


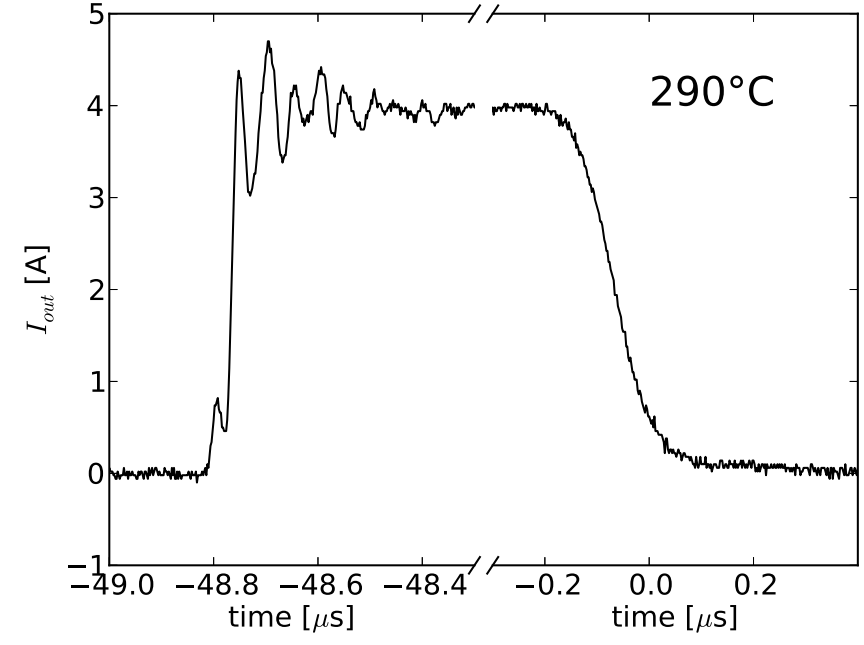


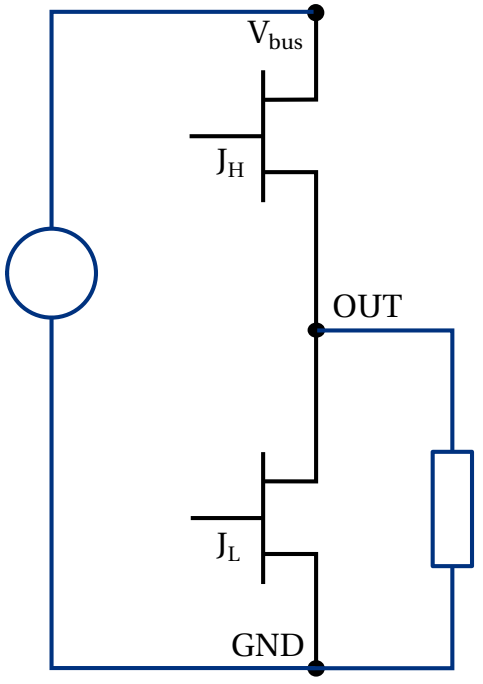


- $V_{DC} = 200\ V$ (no encapsulation)
- $R_{load} = 50\ \Omega$
- $F_{switch} = 10\ kHz$
- $t_{dead-time} = 1.2\ \mu s$

Démonstrateur de convertisseur haute temp. – 4

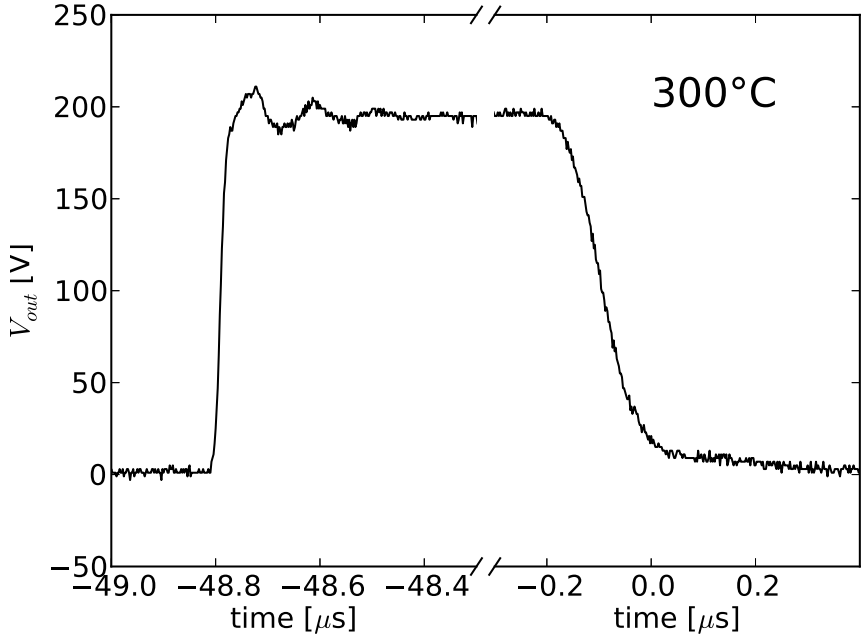


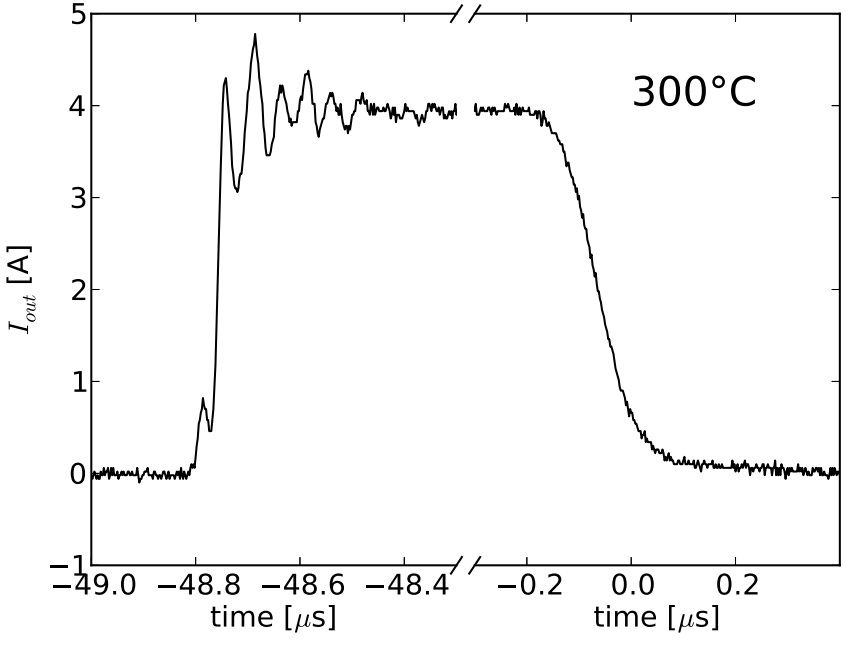


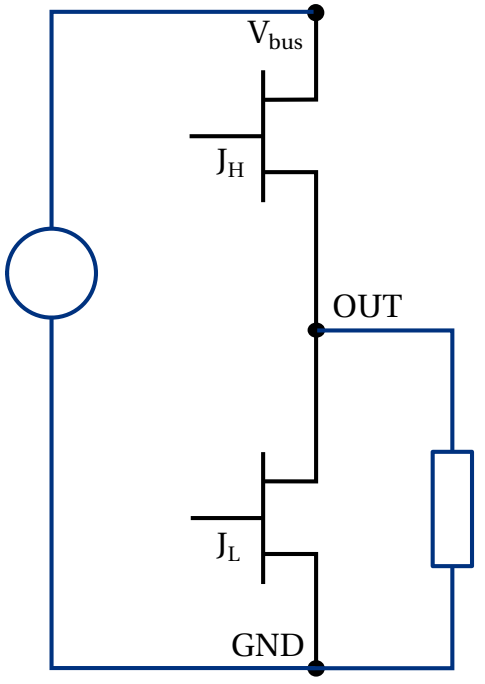


- $V_{DC} = 200\ V$ (no encapsulation)
- $R_{load} = 50\ \Omega$
- $F_{switch} = 10\ kHz$
- $t_{dead-time} = 1.2\ \mu s$

Démonstrateur de convertisseur haute temp. – 4

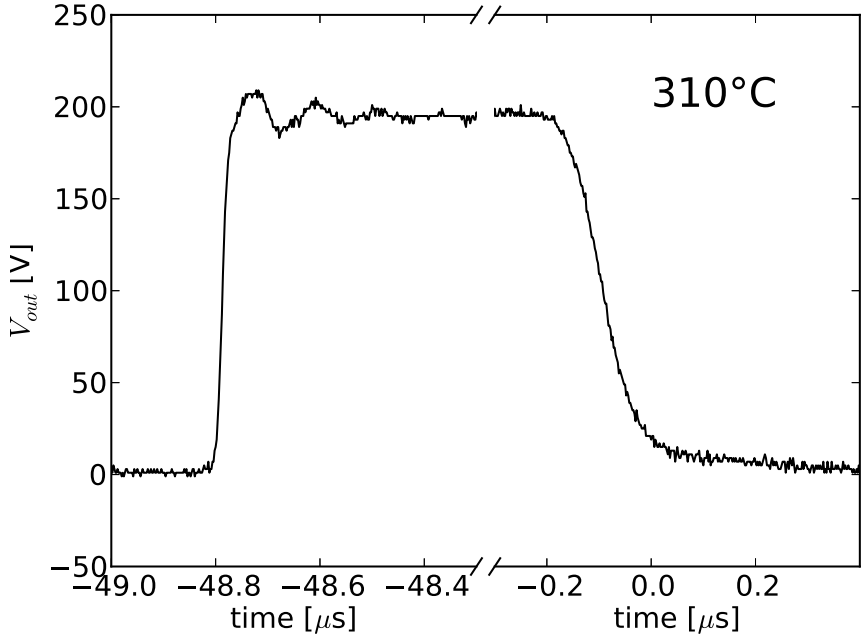


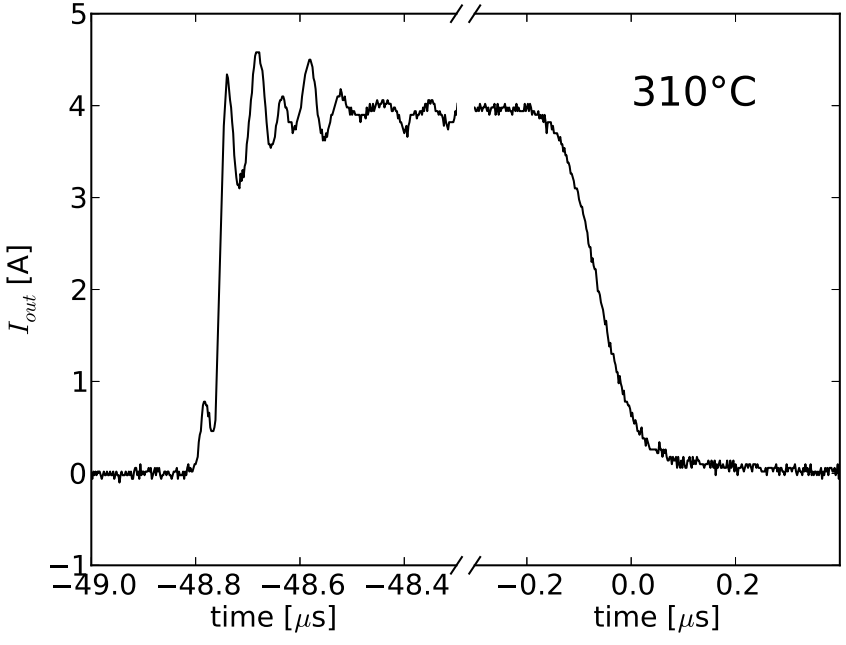


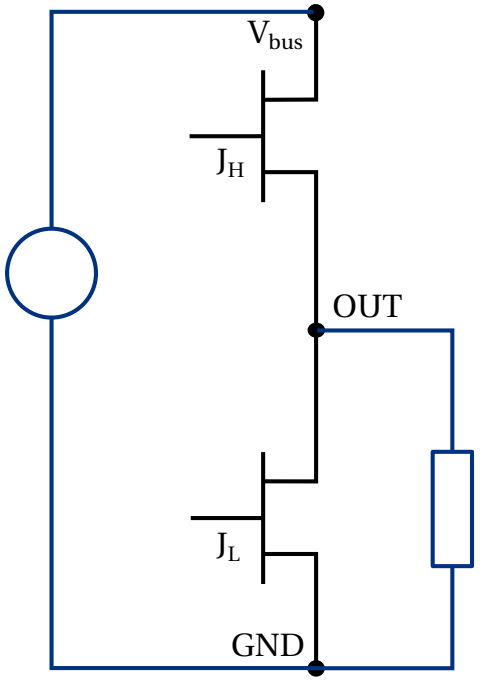


- $V_{DC} = 200\ V$ (no encapsulation)
- $R_{load} = 50\ \Omega$
- $F_{switch} = 10\ kHz$
- $t_{dead-time} = 1.2\ \mu s$

Démonstrateur de convertisseur haute temp. – 4

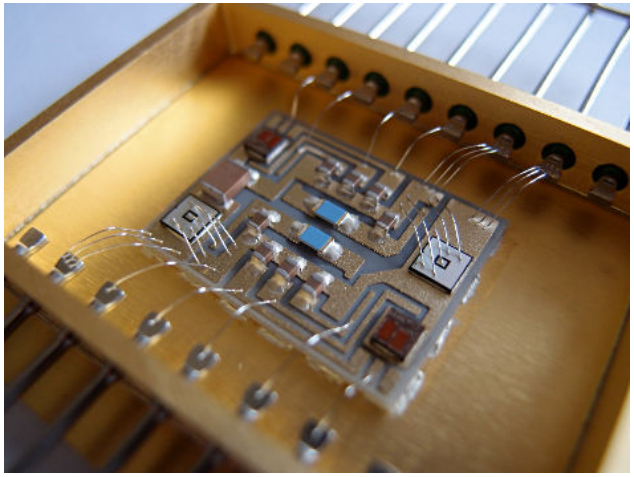






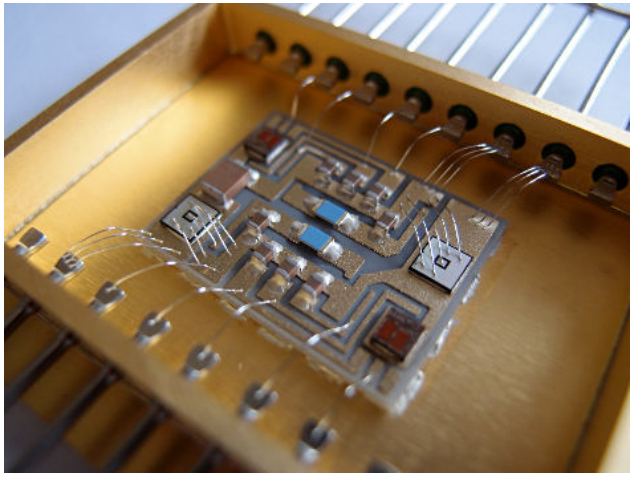
- $V_{DC} = 200\ V$ (no encapsulation)
- $R_{load} = 50\ \Omega$
- $F_{switch} = 10\ kHz$
- $t_{dead-time} = 1.2\ \mu s$

Conclusions sur les drivers



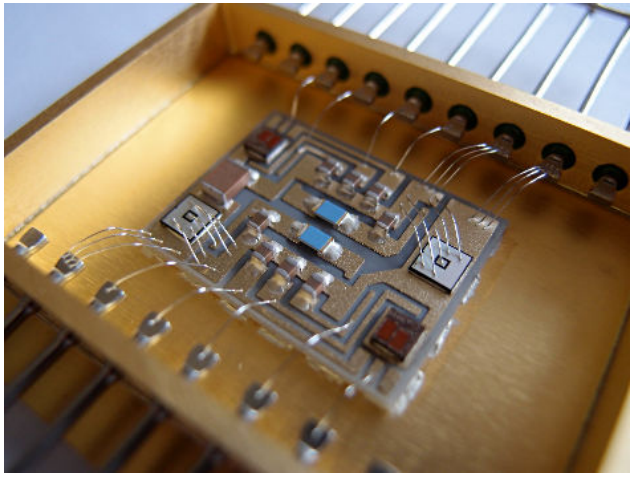
- Le module a arrêté de fonctionner à 315 °C
  - Il a redémarré dès que la température a baissé à nouveau.
- Formes d'ondes propres
  - fermeture rapide ($\approx$ 15 *ns*) ;
  - ouverture lente à cause d'un large temps mort et de la charge résistive ;
  - intérêt de rapprocher driver et (petit) découplage des interrupteurs.
- Pour aller plus loin :
  - encapsuler le module (parylène HT) ;
  - rendre l'ensemble du circuit compatible avec la haute température.

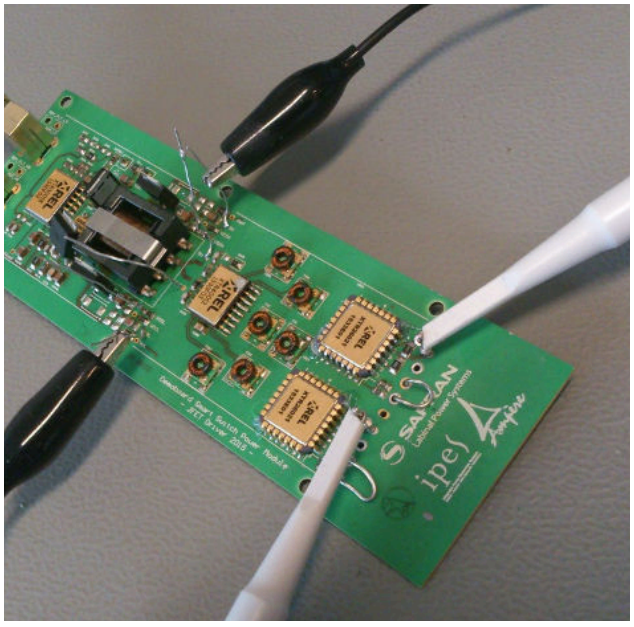
Conclusions sur les drivers



- Le module a arrêté de fonctionner à 315 °C
  - Il a redémarré dès que la température a baissé à nouveau.
- Formes d'ondes propres
  - fermeture rapide ($\approx$ 15 *ns*) ;
  - ouverture lente à cause d'un large temps mort et de la charge résistive ;
  - intérêt de rapprocher driver et (petit) découplage des interrupteurs.
- Pour aller plus loin :
  - encapsuler le module (parylène HT) ;
  - rendre l'ensemble du circuit compatible avec la haute température.

Conclusions sur les drivers





- Le module a arrêté de fonctionner à 315 °C
  - Il a redémarré dès que la température a baissé à nouveau.
- Formes d'ondes propres
  - fermeture rapide ($\approx$ 15 *ns*) ;
  - ouverture lente à cause d'un large temps mort et de la charge résistive ;
  - intérêt de rapprocher driver et (petit) découplage des interrupteurs.
- Pour aller plus loin :
  - encapsuler le module (parylène HT) ;
  - rendre l'ensemble du circuit compatible avec la haute température.

Sommaire

Introduction

Composants

- semiconducteurs de puissance
- Circuits de commande
- Passifs

Packaging et Procédés

- Généralités Packaging
- Attache de composants
- Circuits imprimés

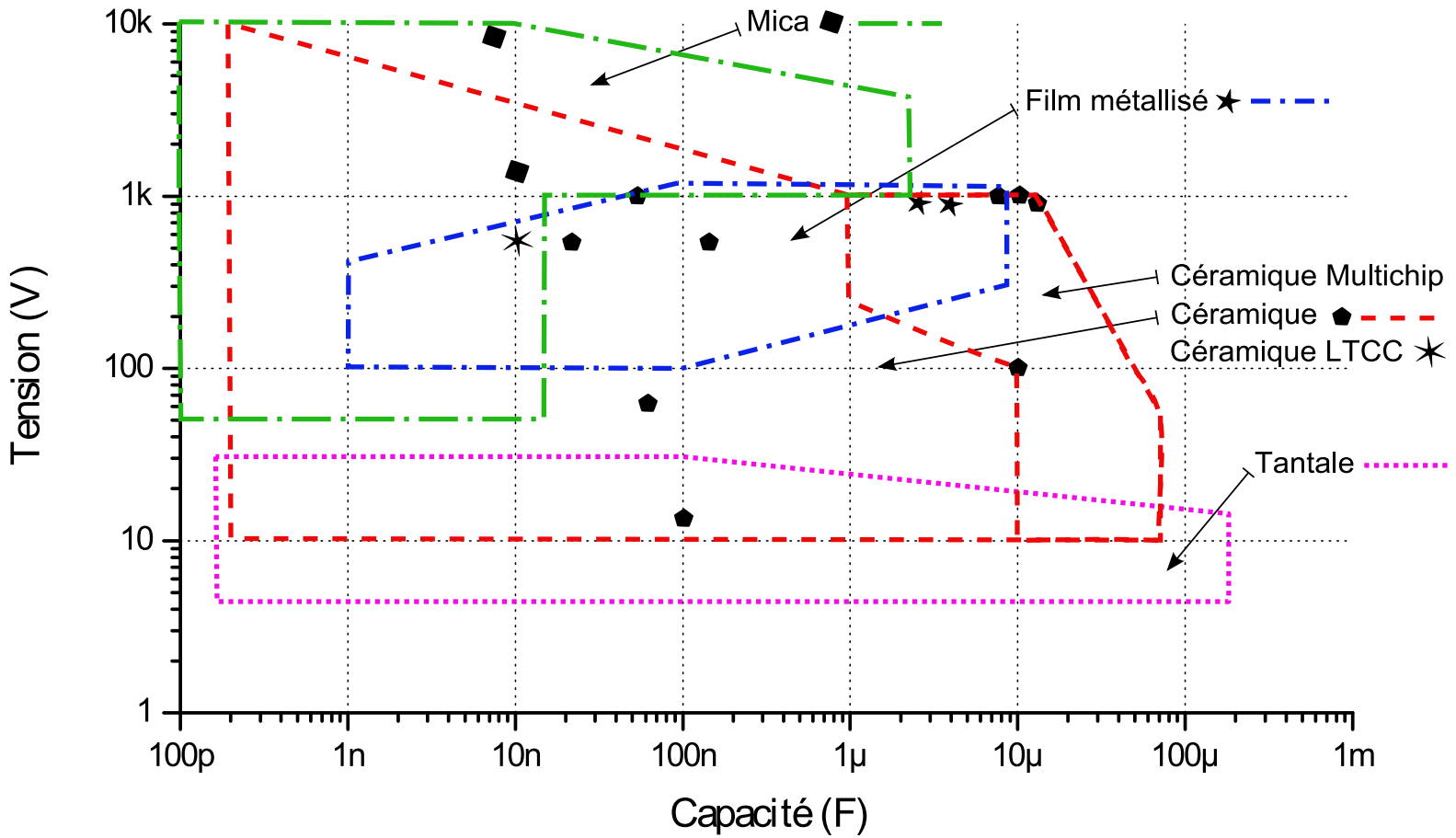
Conclusions

Condensateurs [4]

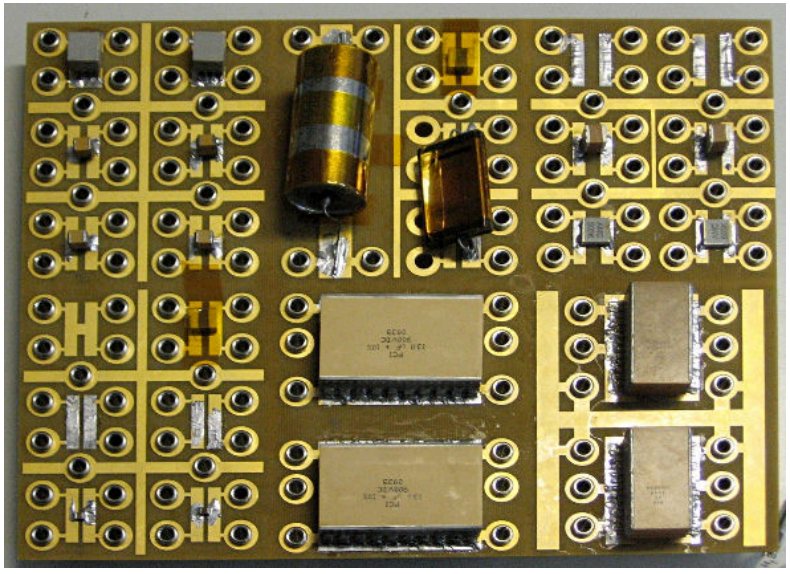
Beaucoup de technologies sont inutilisables en haute température :

- Electrochimiques
- Nombreux films (PET, PC, PPS, PP)

Au-delà de 200 °C, il reste [9] :



Vieillissement de condensateurs [4]



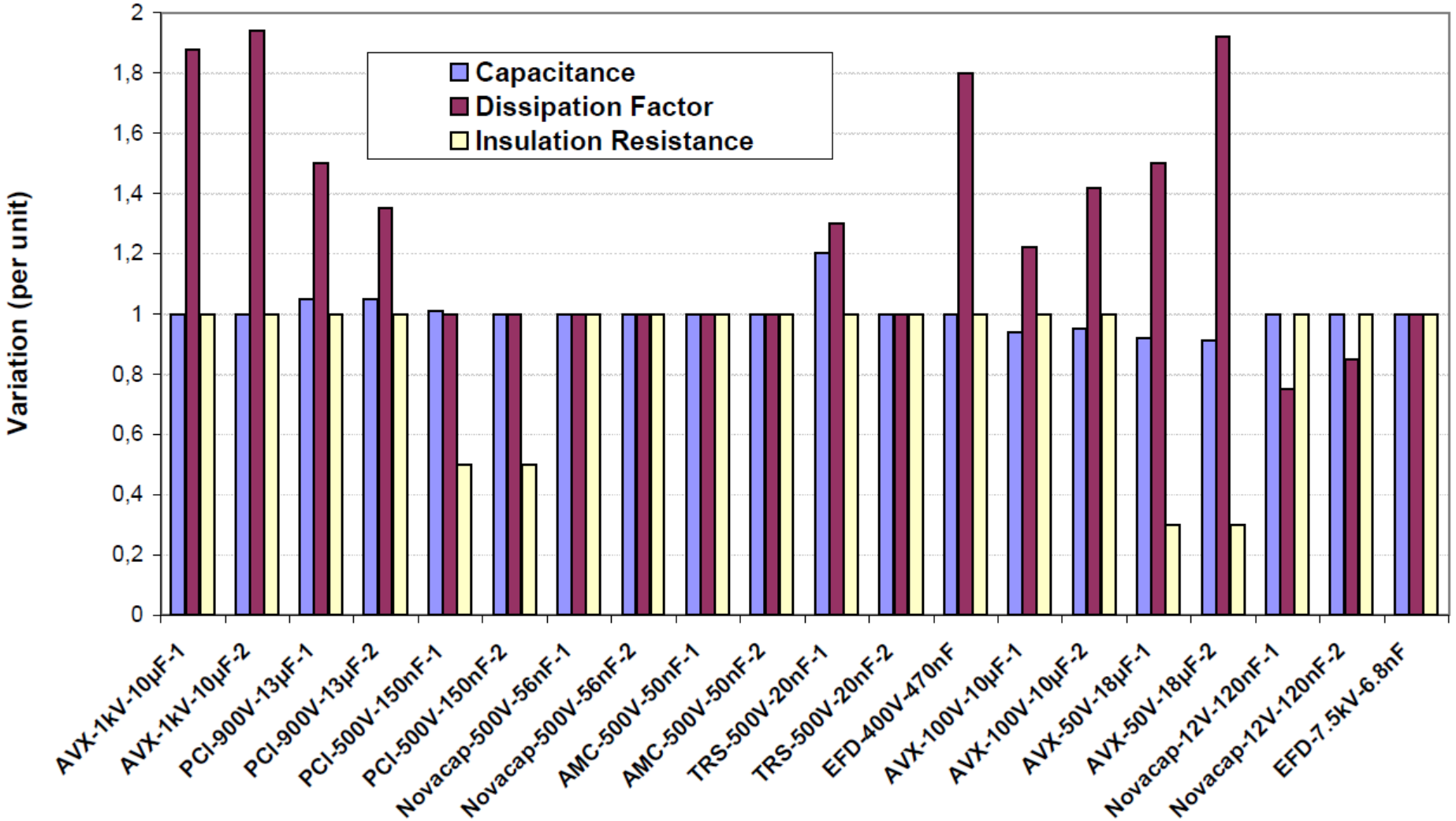
Vue d'ensemble de la carte de test

20 échantillons de différentes technologies/fabricants pour des applications EP

Manuf.	Nom.	Capacité (1V/1kHz)	Dielectrique	Utilisation
AVX	1kV	10μF	X7R	DC-link
PCI	900V	13μF	X7R/BX	DC-link
PCI	500V	150nF	X7R/BX	Common Mode
Novacap	500V	56nF	NP0	Common Mode
AMC	500V	50nF	NP0	Common Mode
TRS	500V	20nF	HT300	Common Mode
EFD	400V	470nF	PTFE	DC-link
AVX	100V	10μF	X7R	DC-link cap-SMPS
AVX	50V	18μF	X7R	DC-link cap-SMPS
Novacap	12V	120nF	H type	Control Board
EFD	7.5kV	6.8nF	Mica	Common Mode

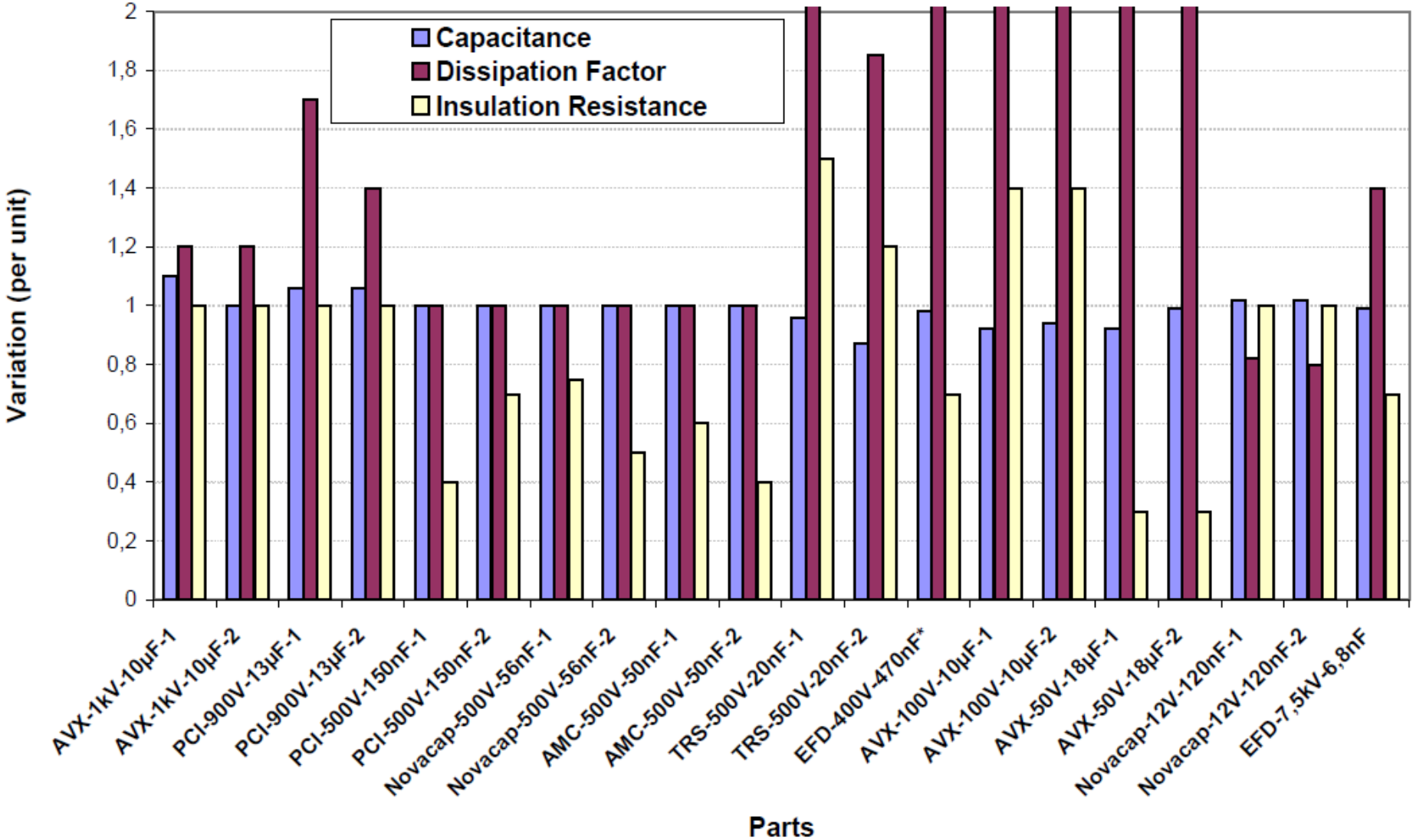
Vieillissement de condensateurs [4] – 2

Après 1000 h à 200 °C



Vieillissement de condensateurs [4] – 3

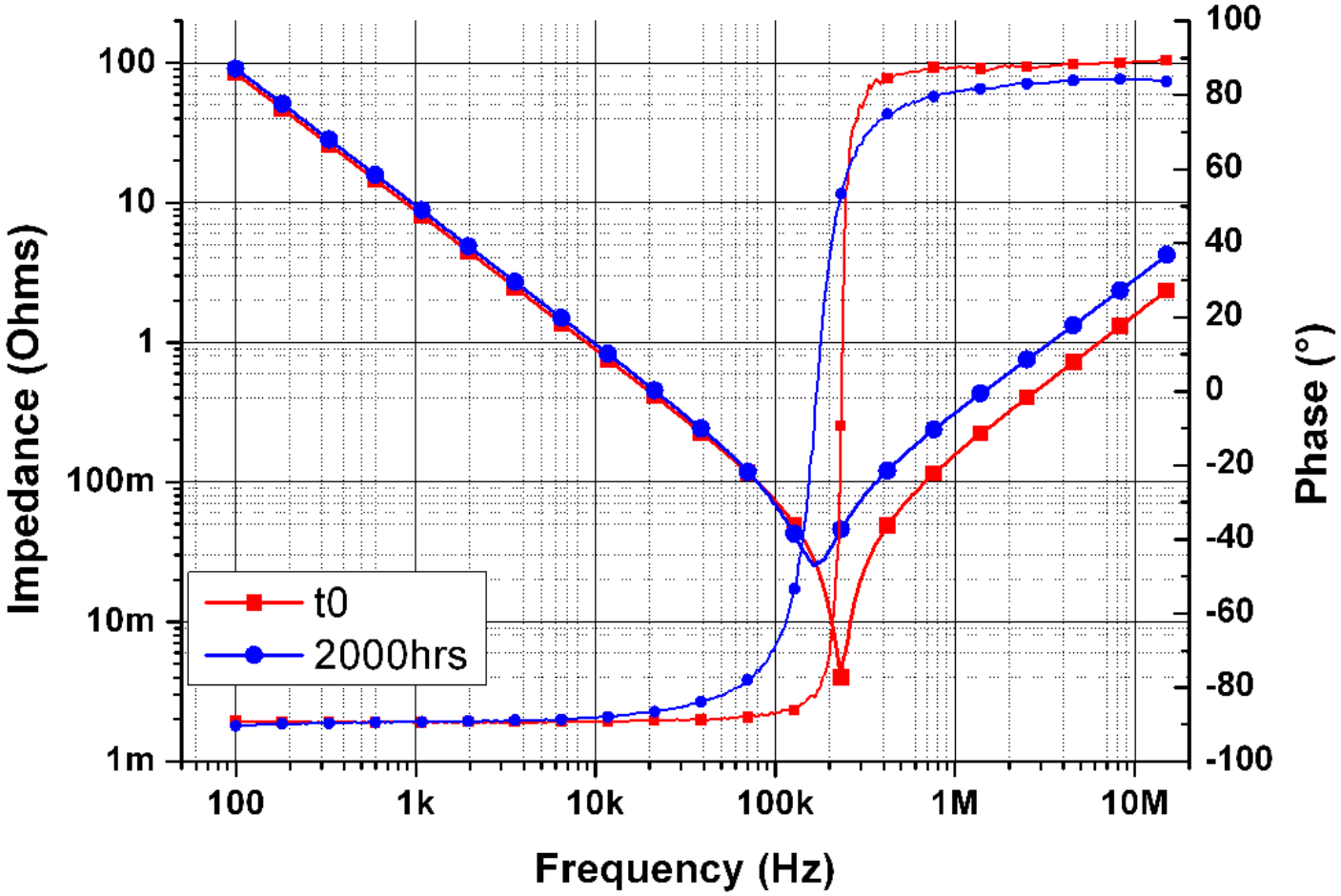
Après 1000 h à 200 °C, puis augmentation de 10 °C toutes les 200 h jusqu'à 250 °C



*Après 1800 h pour les EFD-400V-470nF pour cause de défaillance durant la dernière étape

Vieillissement de condensateurs [4] – 4

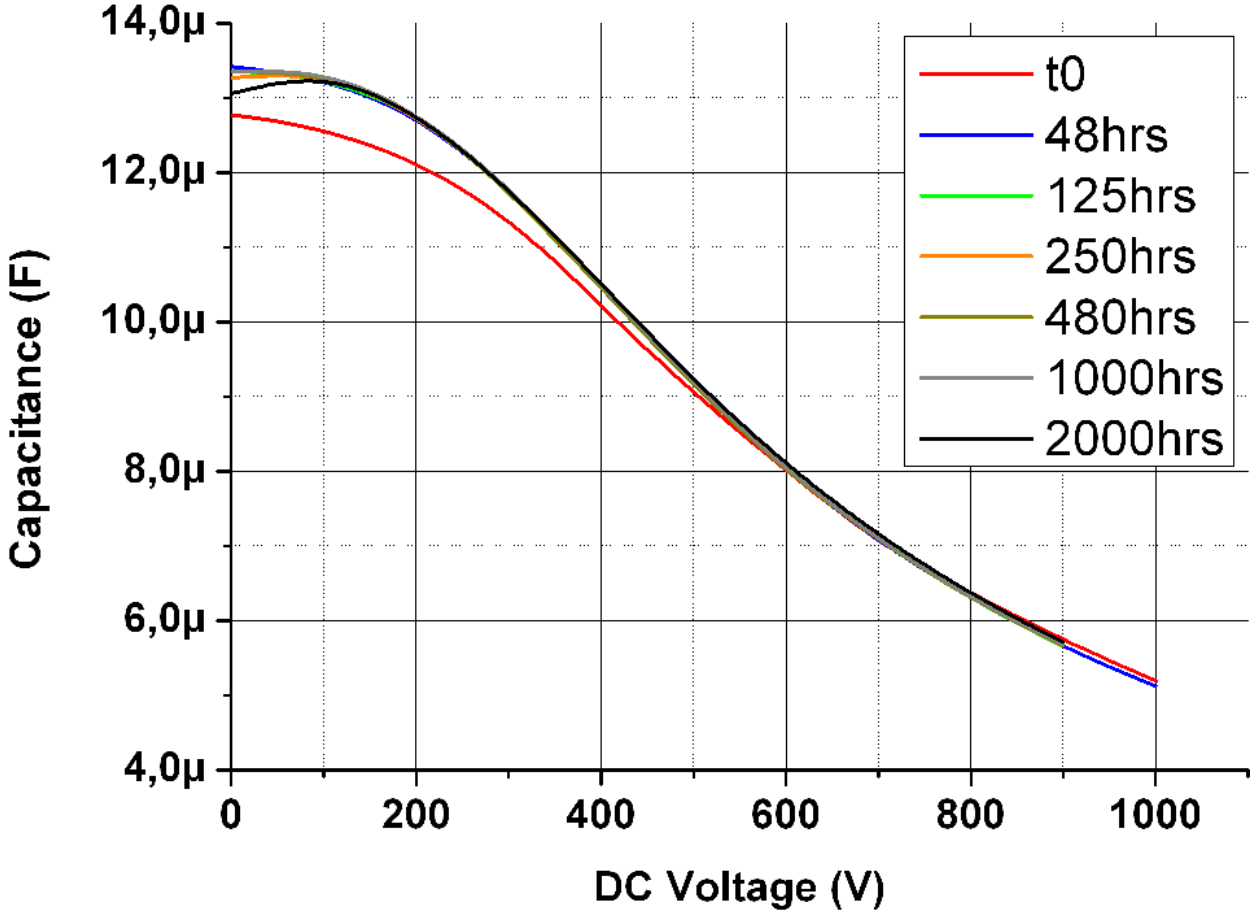
Variation d'impédance pour un condensateur X7R
Échantillon AVX-50V-18μF #1



Effet du vieillissement sur la capacité et sur le facteur de dissipation.

Vieillissement de condensateurs [4] – 4

Variation d'impédance pour un condensateur X7R
Échantillon PCI-900V-13μF #1



Capacité non linéaire, varie fortement avec la polarisation électrique

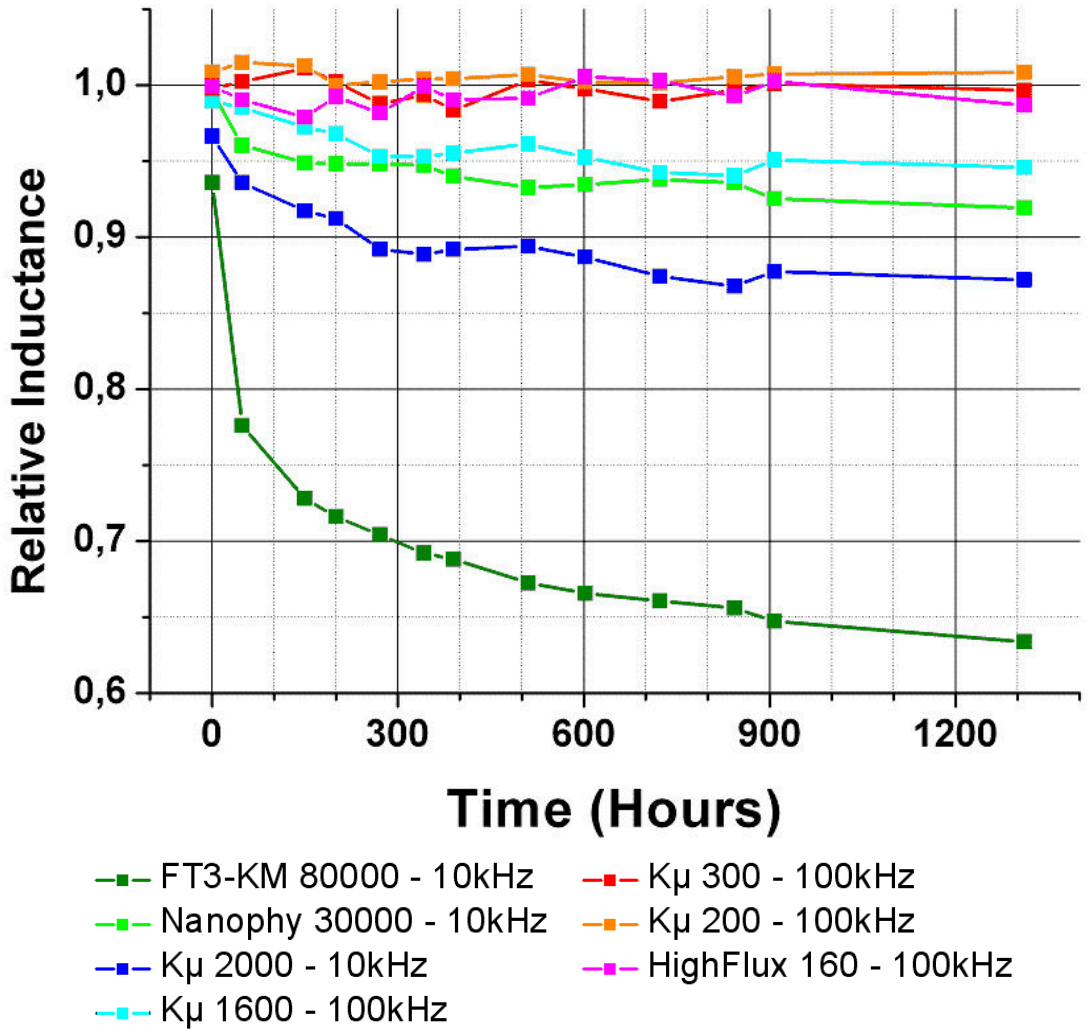
Vieillissement de matériaux magnétiques [4]



Noyaux sous test

Matériau	Perm.	Js (T)	Température de Curie (°C)	Utilisation possible
HighFlux	160	1.5	500	Inductance mode diff.
kμ200	200	1.25	570	Inductance mode diff.
kμ300	300	1.25	570	Inductance mode diff.
kμ1600	1600	1.25	570	Capteur de courant
kμ2000	2000	1.25	570	Capteur de courant
Nanophy	30000	1.25	570	Inductance mode commun
FT-3KM	80000	1.25	570	Inductance mode commun

Vieillissement de matériaux magnétiques [4] – 2



Les matériaux haute permeabilité sont le plus affectés par le vieillissement à 200 °C

Passifs haute température – conclusions

Condensateurs

- Peu de technologies disponibles au-delà de 200 °C pour l'EP
- Vieillissement net de toutes les technologies à 250 °C
- Mécanismes de vieillissement complexes (effet différents suivant les condensateurs)

- Les matériaux faible perméabilité sont peu affectés à 200 °C
- Nombreux problèmes de packaging (encapsulant, isolant. . .) en HT

➜ La limite en température est surtout liée au packaging

Passifs haute température – conclusions

Condensateurs

- Peu de technologies disponibles au-delà de 200 °C pour l'EP
- Vieillissement net de toutes les technologies à 250 °C
- Mécanismes de vieillissement complexes (effet différents suivant les condensateurs)

Matériaux magnétiques

- Les matériaux faible perméabilité sont peu affectés à 200 °C
- Nombreux problèmes de packaging (encapsulant, isolant. . .) en HT

➜ La limite en température est surtout liée au packaging

Composants pour la haute température – conclusions

Composants disponibles jusqu'à 200 – 250 °C

- Composants actifs (SiC notamment) :
  - Diode, MOSFET (le JFET et le BJT se font rares)
  - Et il faut les refroidir convenablement !
- SOI pour les circuits intégrés
- Passifs : il faut évaluer leur vieillissement au cas par cas

Pour aller au-delà

- Quelques composants SiC supportent 300 °C ou plus
- Il existe des technologies de circuits intégrés WBG
- Les passifs manquent (condensateurs, notamment)
- Dans l'ensemble, il s'agit de technologies « recherche »

Composants pour la haute température – conclusions

Composants disponibles jusqu'à 200 – 250 °C

- Composants actifs (SiC notamment) :
  - Diode, MOSFET (le JFET et le BJT se font rares)
  - Et il faut les refroidir convenablement !
- SOI pour les circuits intégrés
- Passifs : il faut évaluer leur vieillissement au cas par cas

Pour aller au-delà

- Quelques composants SiC supportent 300 °C ou plus
- Il existe des technologies de circuits intégrés WBG
- Les passifs manquent (condensateurs, notamment)
- Dans l'ensemble, il s'agit de technologies « recherche »

Sommaire

Introduction

Composants
- semiconducteurs de puissance
- Circuits de commande
- Passifs

Packaging et Procédés
- Généralités Packaging
- Attache de composants
- Circuits imprimés

Conclusions

Sommaire

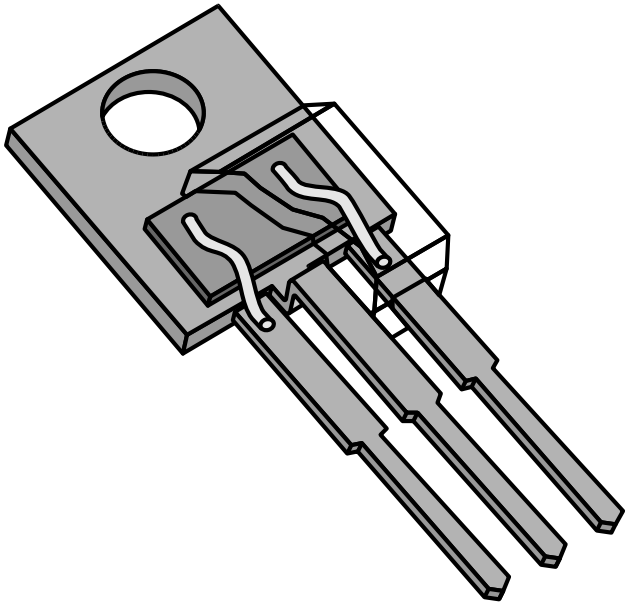
Introduction

Composants
- semiconducteurs de puissance
- Circuits de commande
- Passifs

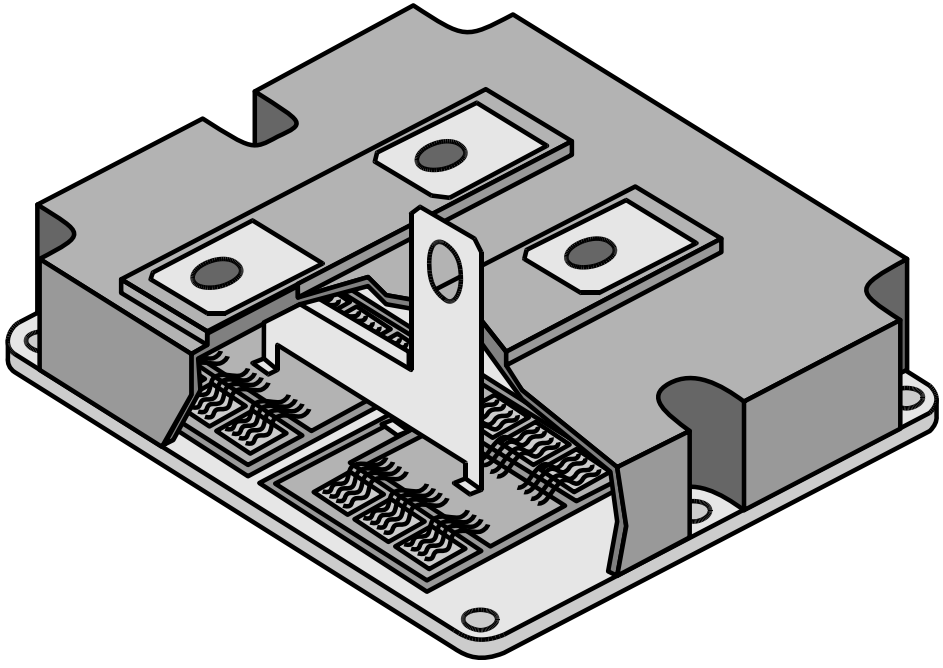
Packaging et Procédés
- Généralités Packaging
- Attache de composants
- Circuits imprimés

Conclusions

Deux classes : discrets et modules



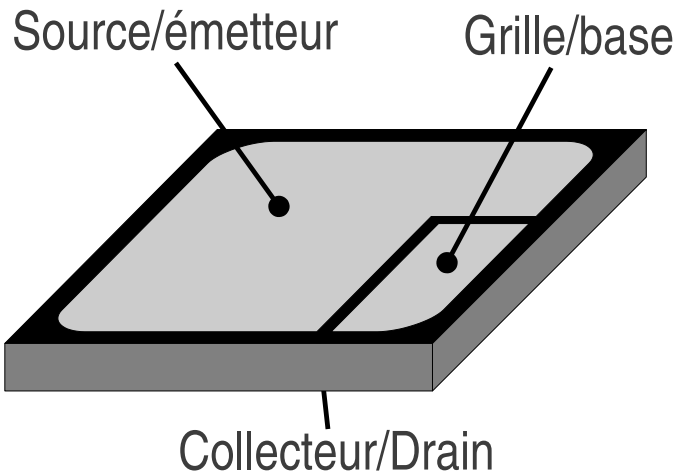
- Un composant élémentaire (transistor, diode) par boîtier
- (souvent) Pas d'isolation
- Puissances faibles ou très fortes

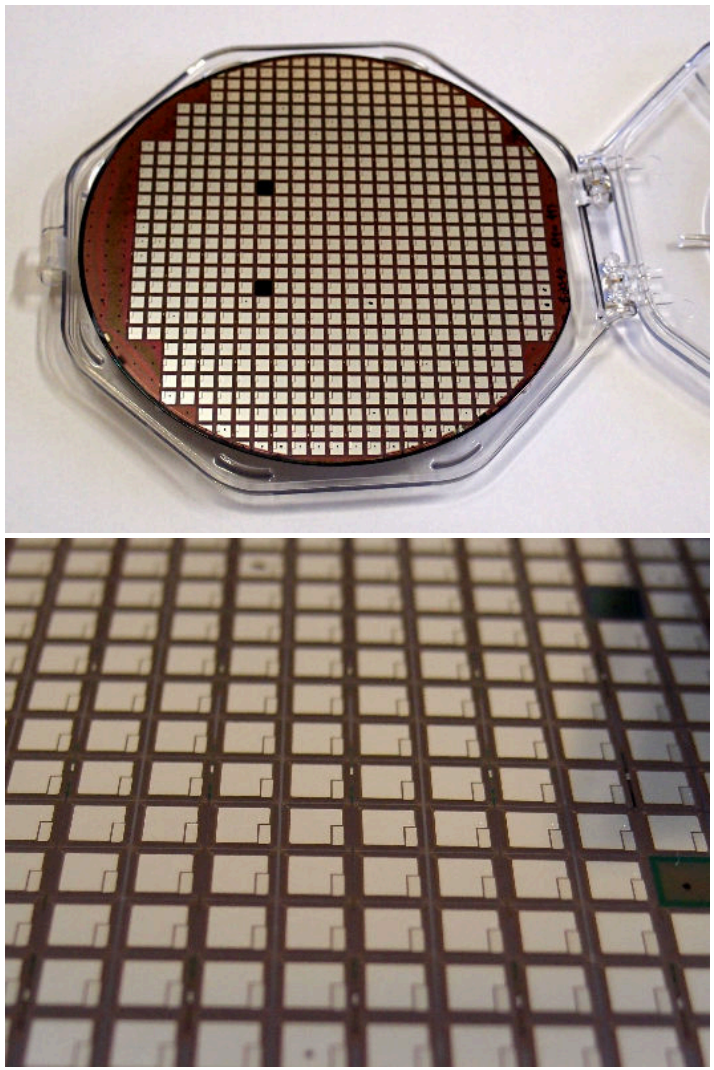


- Plusieurs puces par boîtier
- Forme un circuit ou un seul composant élémentaire
- Assure l'isolation électrique
- Puissances moyennes à fortes

Puces de puissance

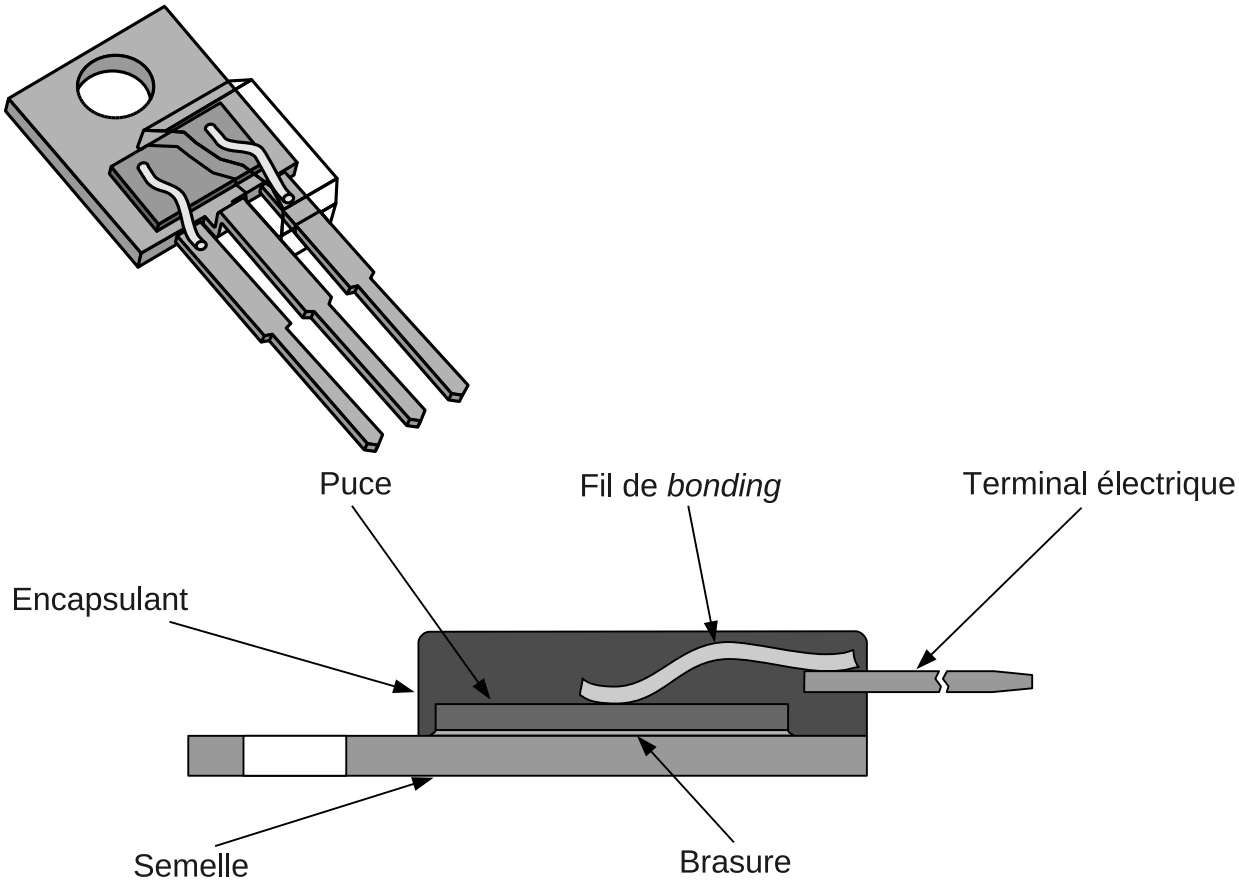
- Structure verticale, avec un (ou deux) contacts dessus et un dessous
- Épaisseur de 50 à 500 μm
- Côté de 1 à 13 mm



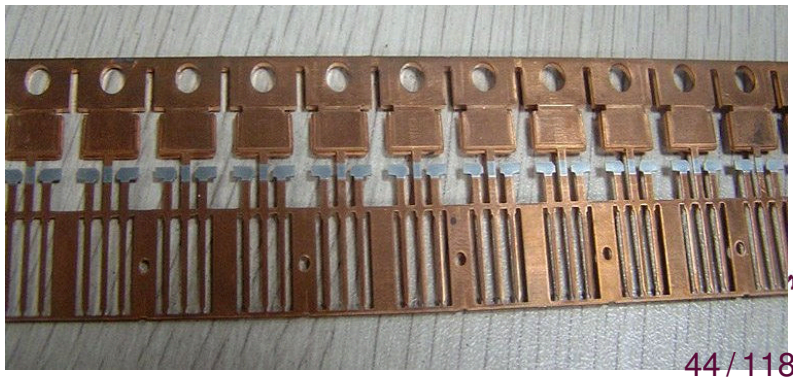


wafer IGBT International Rectifier, puces de 5x5 mm, wafer diamètre 6 pouces

Structure d'un boîtier discret



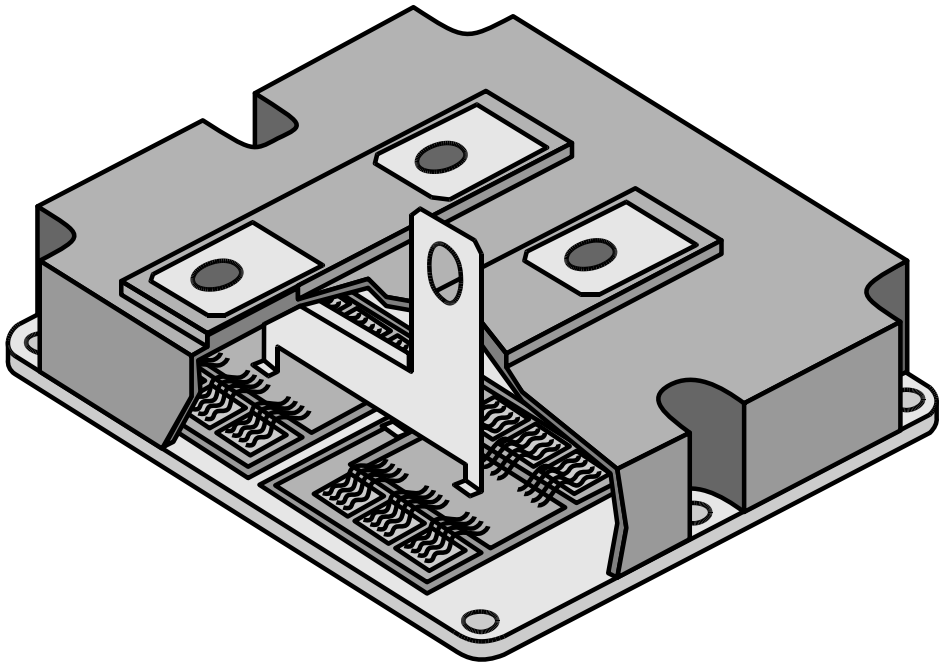
- technologie bas coût ;
- grande cadence de production ;
- matériaux : cuivre, brasure, aluminium, epoxy
- courant max. < 100 A

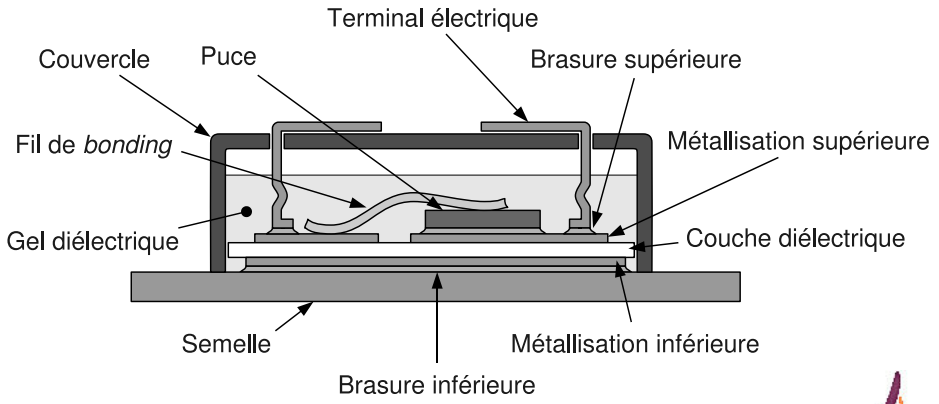


Source : http://www.cooknart.com

Modules

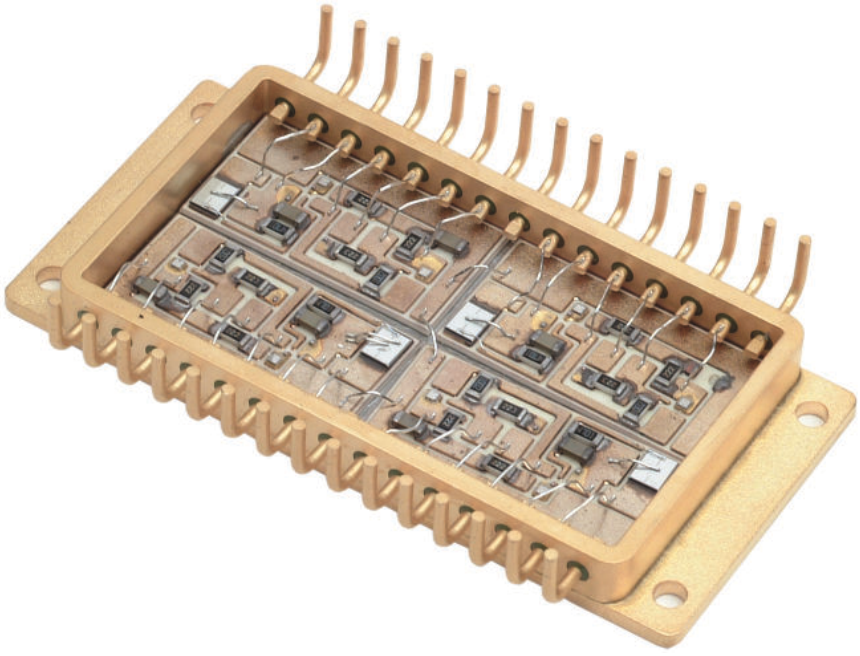
- Plusieurs puces
  - Un composant équivalent (transistor, diode)
  - Un circuit complet (onduleur, redresseur…)
- Besoin d'isolation électrique
- Peu standardisé
- Courant max < 3600 A
- Tension max < 6500 V
- Dimensions de qques cm de côté à 20x15x5 cm
- Plusieurs constructeurs européens (ABB, Infineon,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





Modules





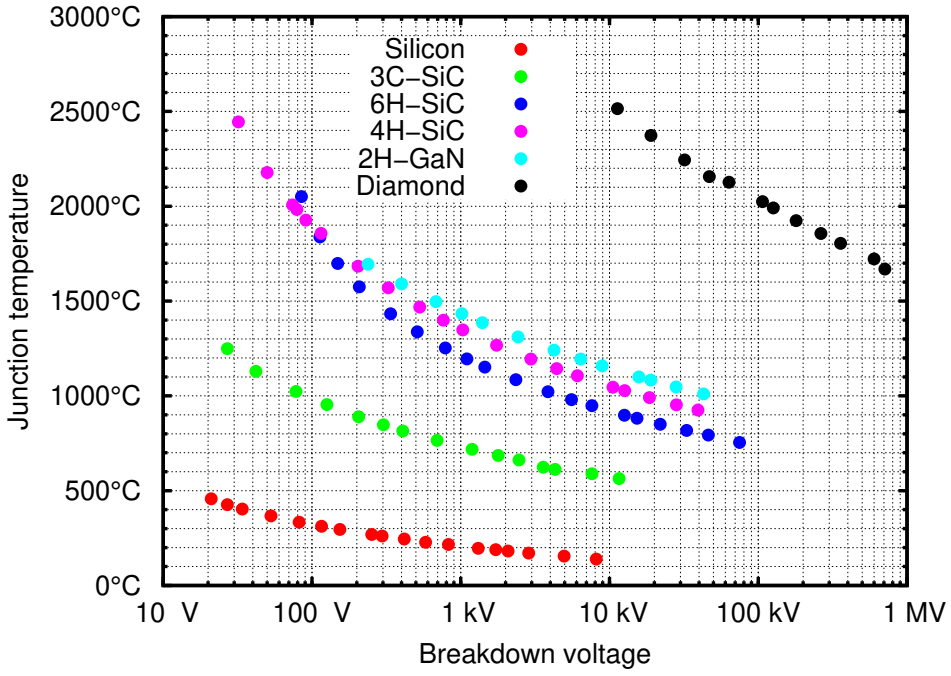
- Plusieurs types de boîtiers
  - Plastique
  - Hermétique
- Ajout de fonctions
  - Capteurs (courant, température)
  - Circuits de commande
  - ...

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

Limites thermiques

Quelques limites :

2500 °C	fusion/sublimation GaN/SIC
1414 °C	fusion du silicium
660 °C	fusion de l'aluminium
≈ 300 °C	fusion de la brasure de puce
217 °C	fusion de SAC 305

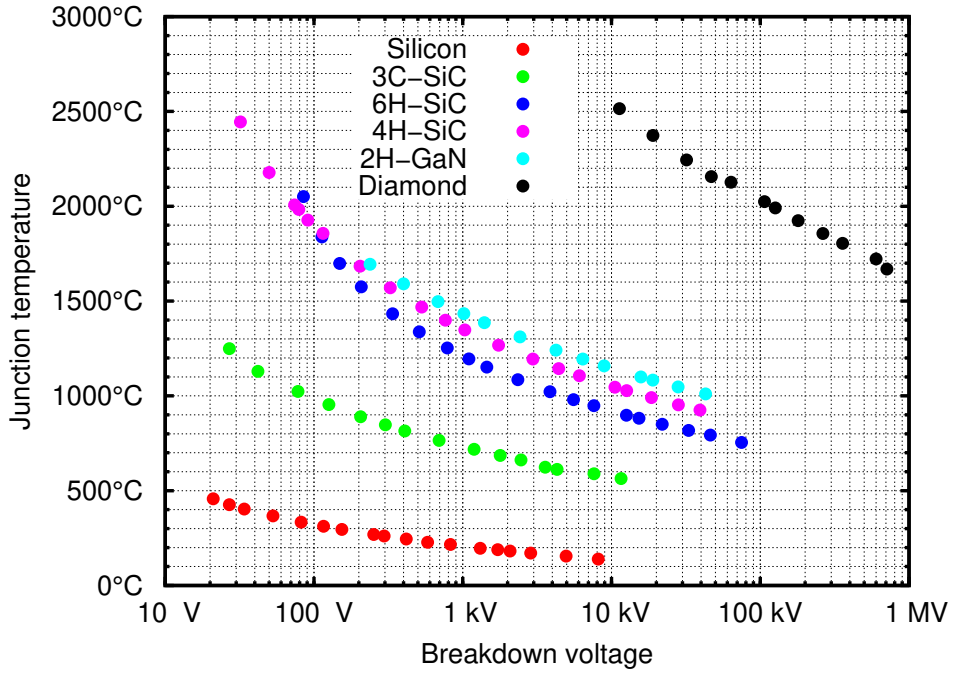


- De nombreux composants (MOSFETs, diodes) sont moins performants lorsque la température augmente.
- Les fortes variations de température posent des problèmes de fiabilité.

Limites thermiques

Quelques limites :

- 2500 °C fusion/sublimation GaN/SIC
- 1414 °C fusion du silicium
- 660 °C fusion de l'aluminium
- ≈ 300 °C fusion de la brasure de puce
- 217 °C fusion de SAC 305

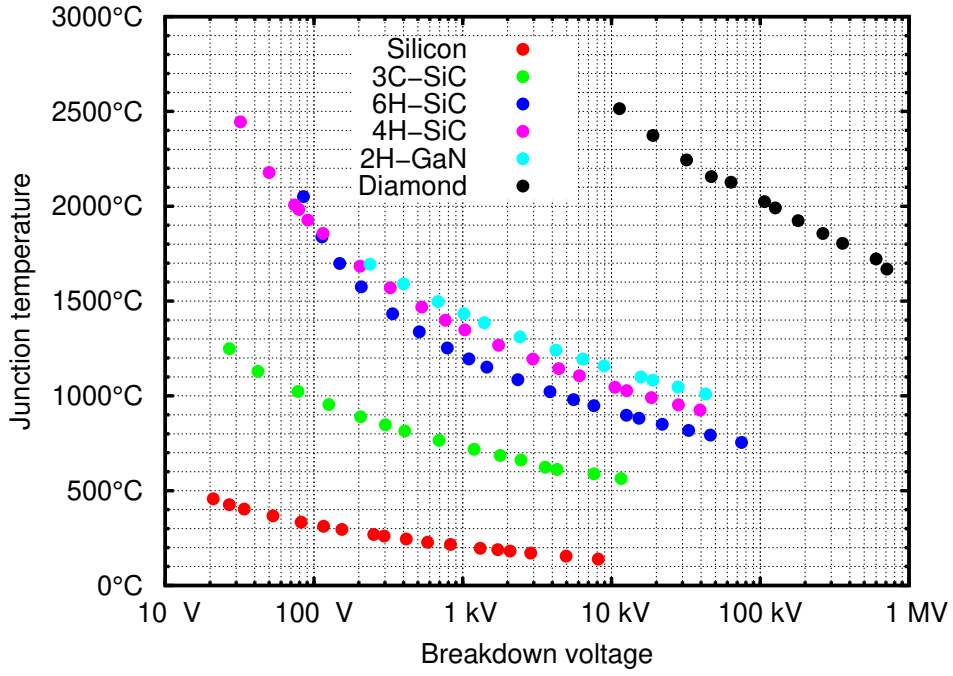


- De nombreux composants (MOSFETs, diodes) sont moins performants lorsque la température augmente.
- Les fortes variations de température posent des problèmes de fiabilité.

Limites thermiques

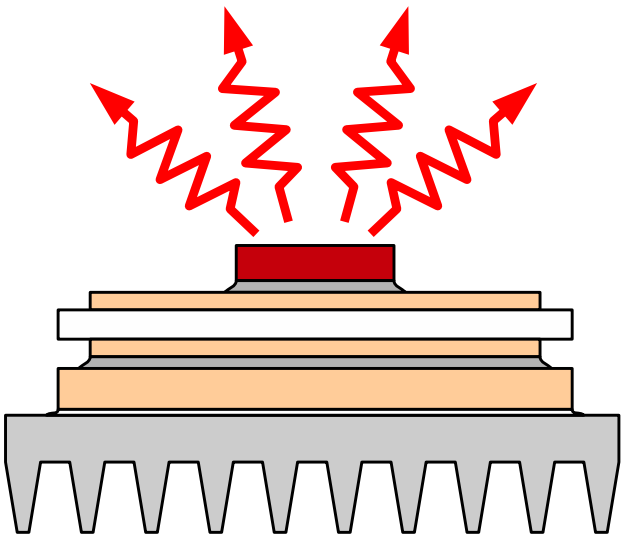
Quelques limites :

- 2500 °C fusion/sublimation GaN/SIC
- 1414 °C fusion du silicium
- 660 °C fusion de l'aluminium
- ≈ 300 °C fusion de la brasure de puce
- 217 °C fusion de SAC 305



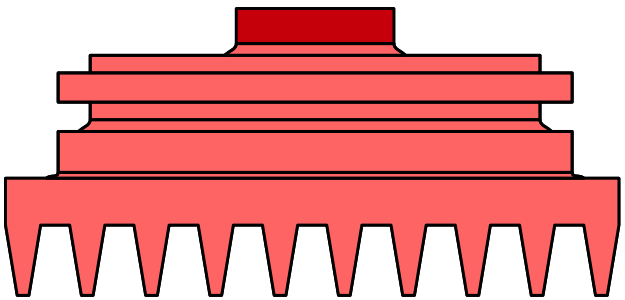
- De nombreux composants (MOSFETs, diodes) sont moins performants lorsque la température augmente.
- Les fortes variations de température posent des problèmes de fiabilité.

Mécanismes de transport de la chaleur



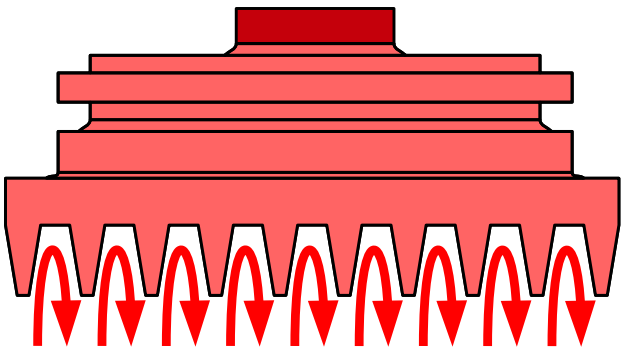
- Rayonnement
  - Loi de Stefan-Boltzmann : $P = \varepsilon S \sigma T^4$ avec $\sigma = 5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ et $\varepsilon < 1$
  - à 400 K, P=0,15 W.cm^{-2}
  - Négligeable pour les dimensions et températures classiques de l'électronique
- Conduction
  - transfert de chaleur dans la matière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



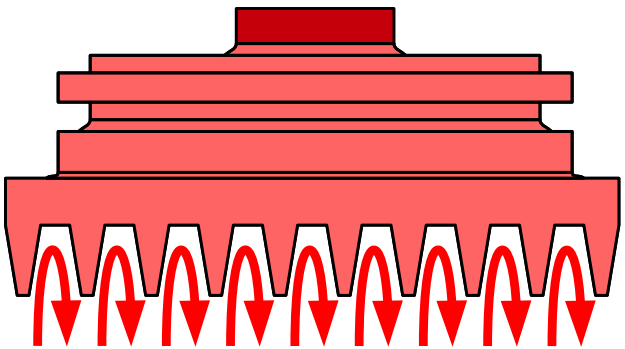
- Rayonnement
  - Loi de Stefan-Boltzmann : $P = \varepsilon S \sigma T^4$ avec $\sigma = 5,67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ et $\varepsilon < 1$
  - à 400 K, P=0,15 W.cm^{-2}
  - Négligeable pour les dimensions et températures classiques de l'électronique
- Conduction
  - transfert de chaleur dans la matière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

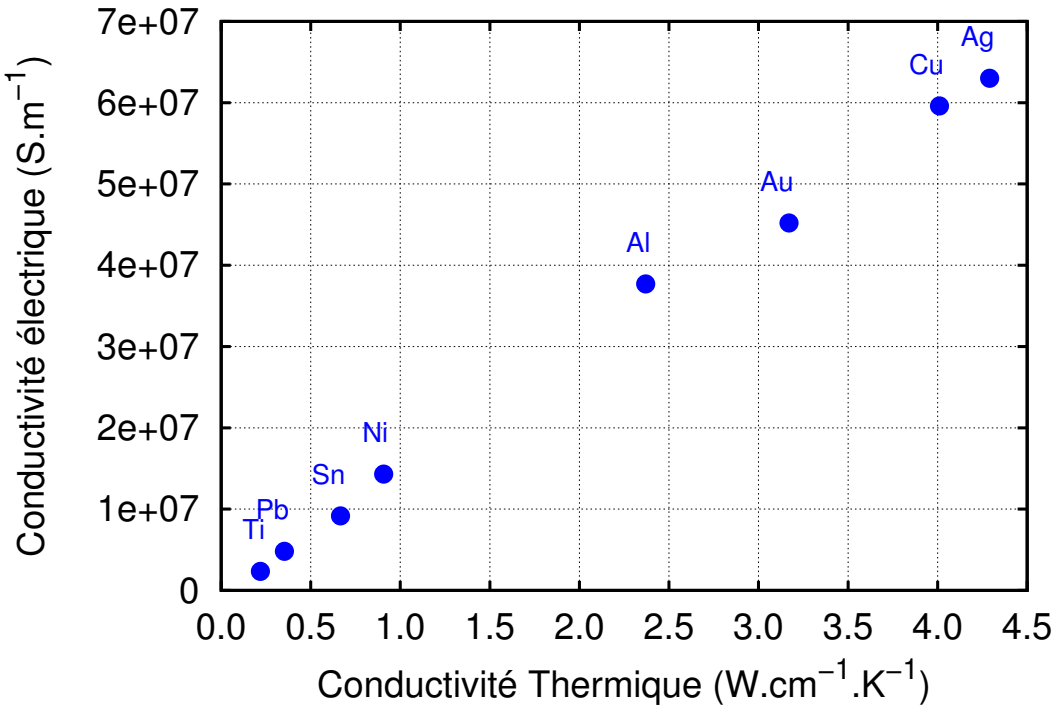
Mécanismes de transport de la chaleur



- 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

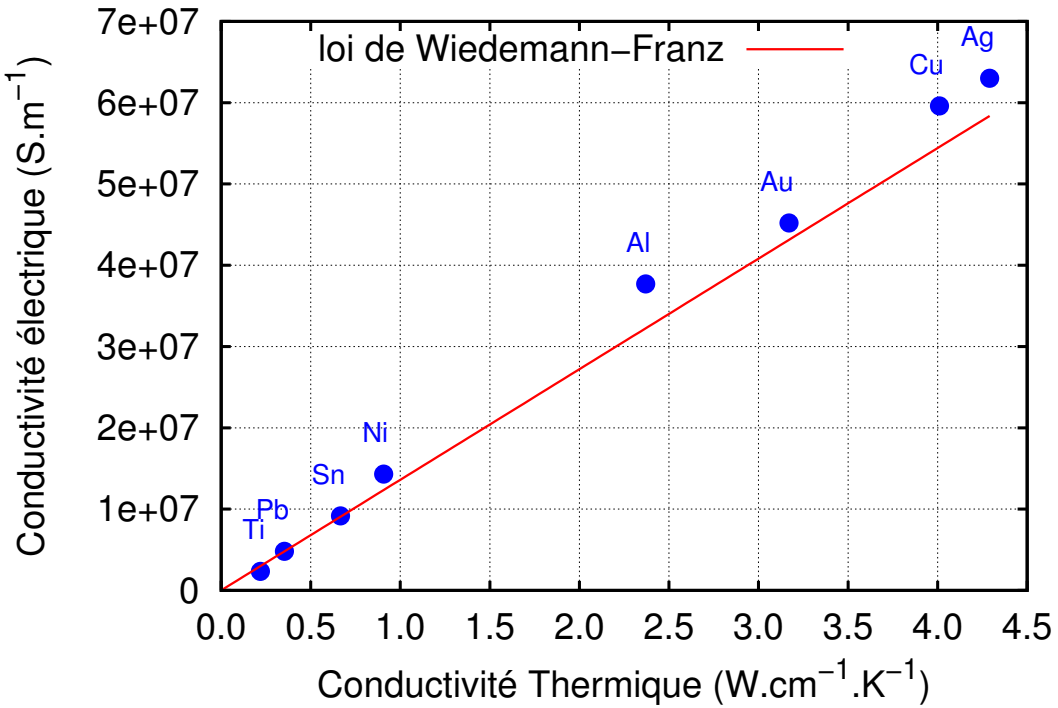
Relation entre conductivités thermique et électrique



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

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

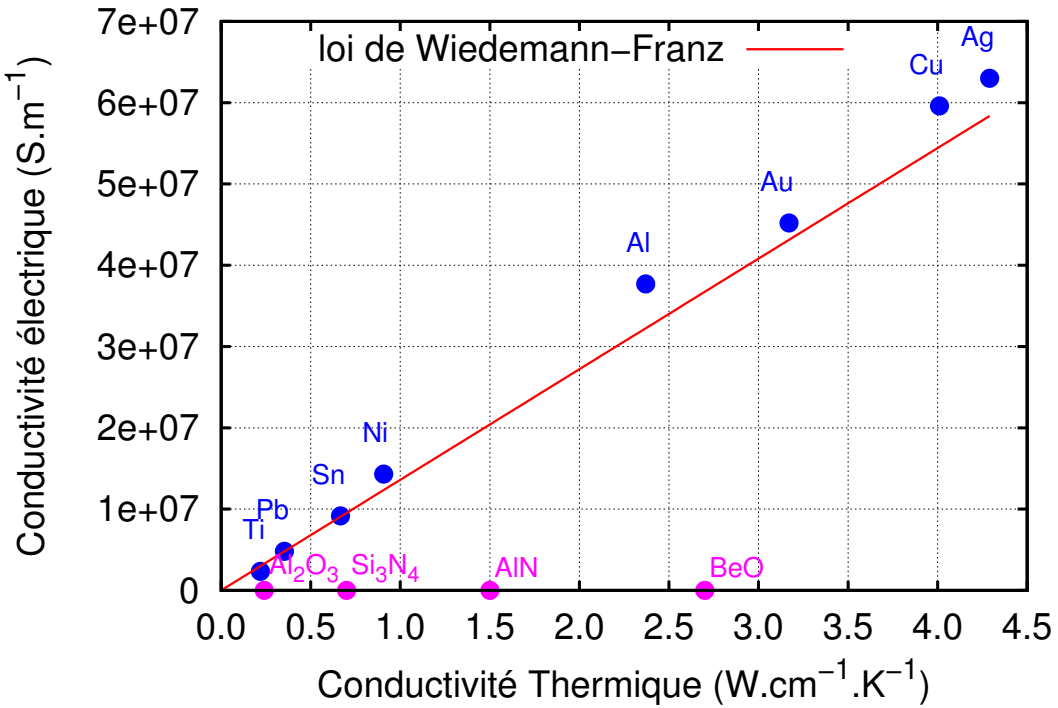
Relation entre conductivités thermique et électrique



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

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

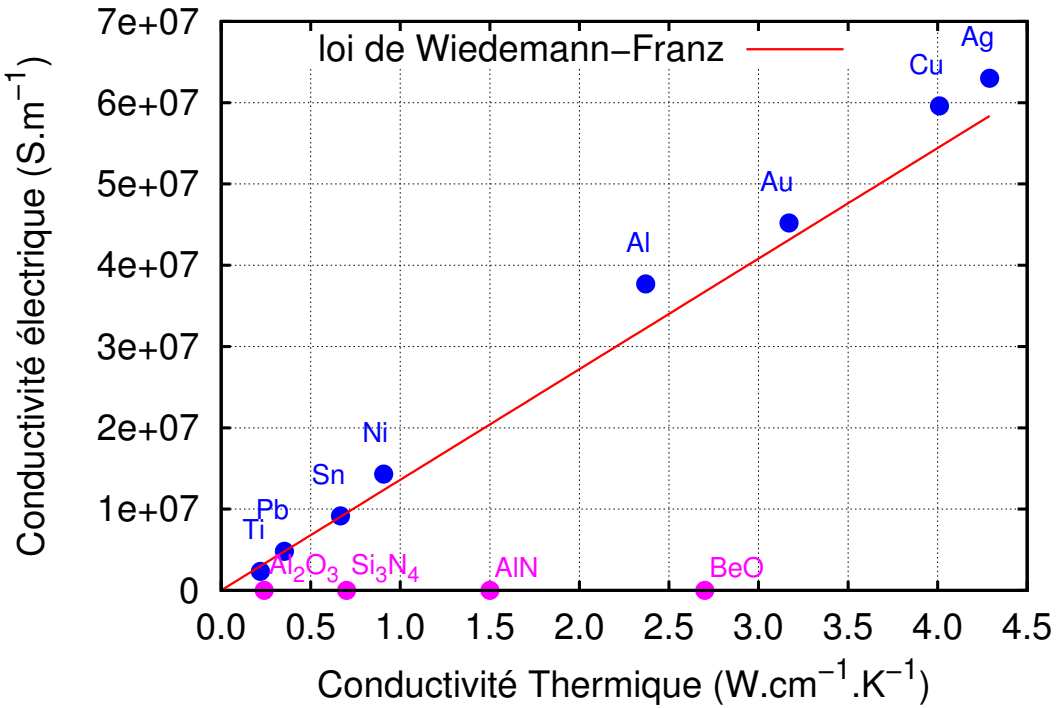
Relation entre conductivités thermique et électrique



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

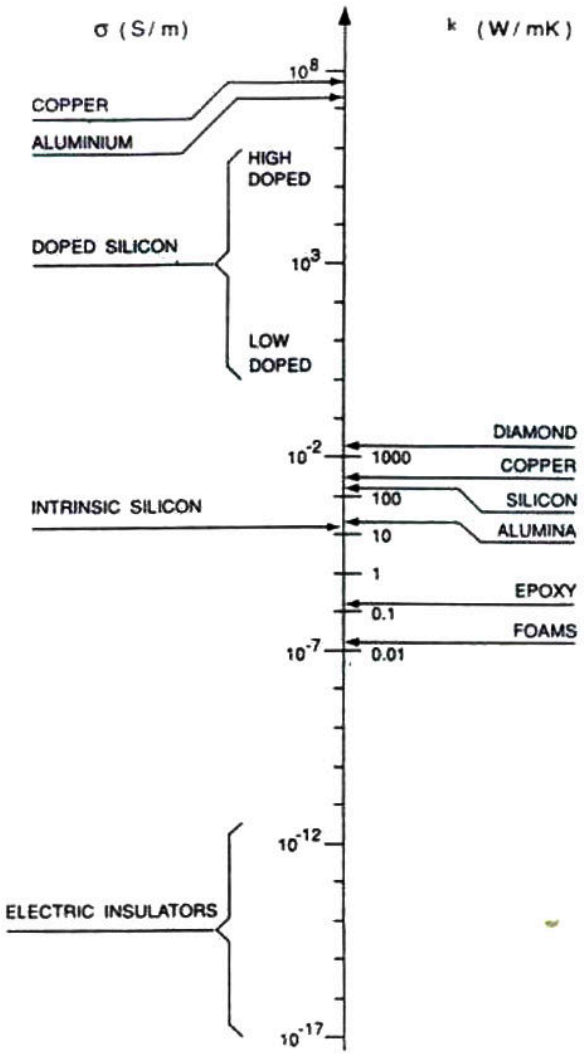
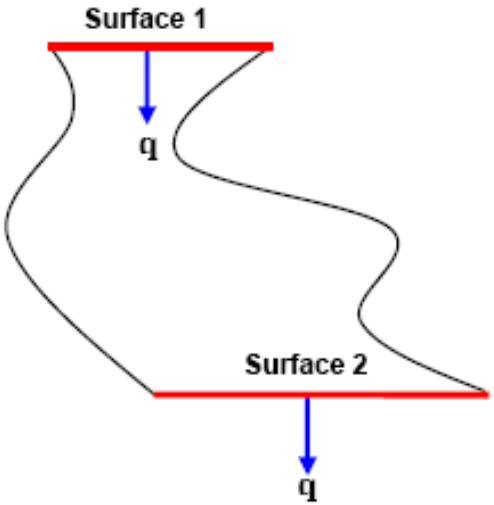


Figure 1: Comparison between electrical and thermal conductivities

Source : Heat Spreading : not a trivial issue, C. Lansance, ECPE Workshop on advanced cooling, 20–21 November 2008, 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

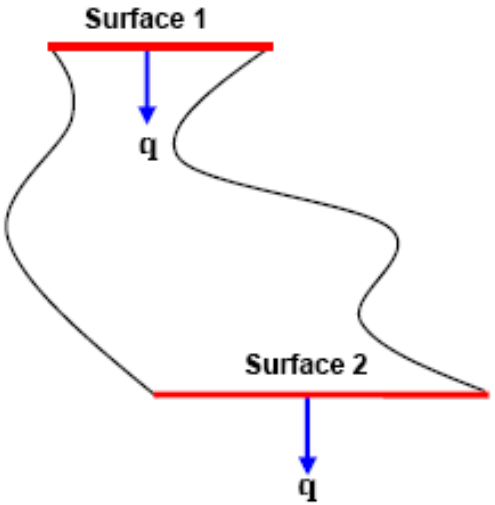


Source : Heat Spreading : not a trivial issue, C. Lansance, ECPE Workshop on advanced cooling, 20–21 November 2008, Delft.

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

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

Représentation circuit thermique



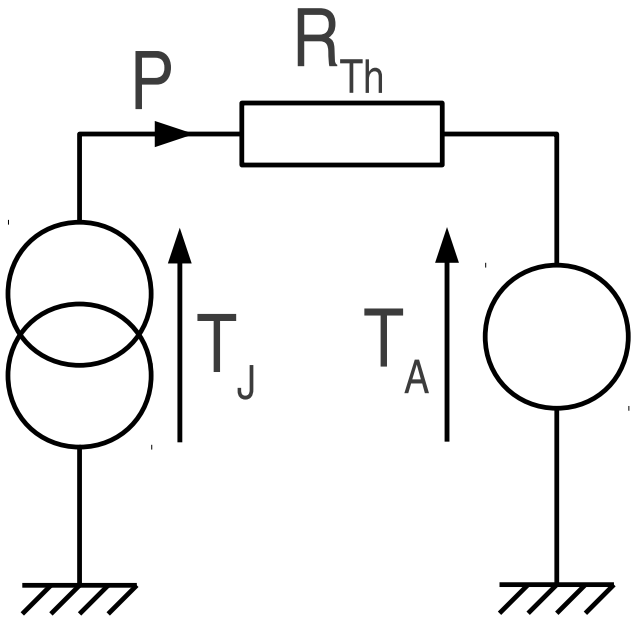
Source : Heat Spreading : not a trivial issue, C. Lansance, ECPE Workshop on advanced cooling, 20–21 November 2008, Delft.

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

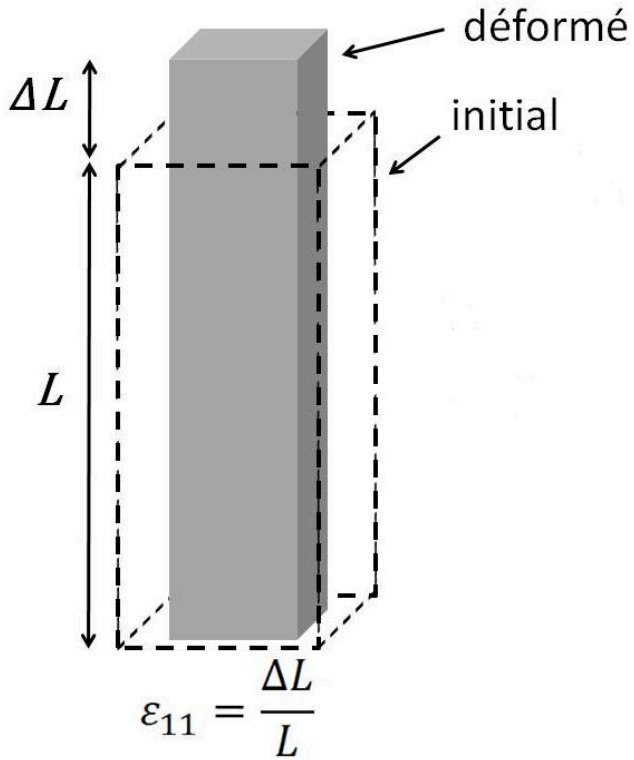
- Les surfaces 1 et 2 sont isothermes
- Un flux thermique identique travere les deux surfaces (conservation)

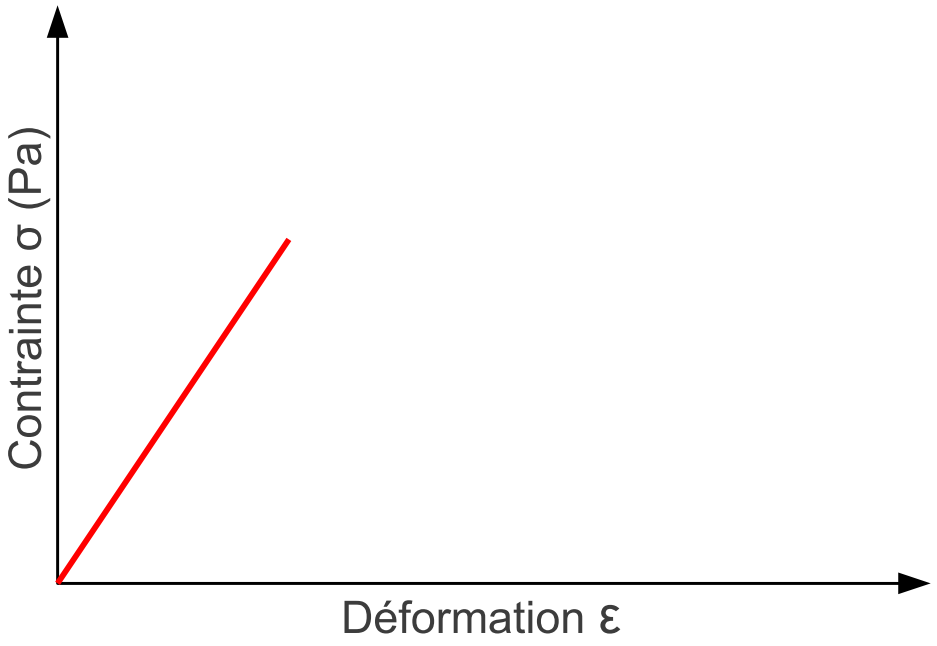
On peut alors définir une représentation circuit

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



Un peu de mécanique. . .

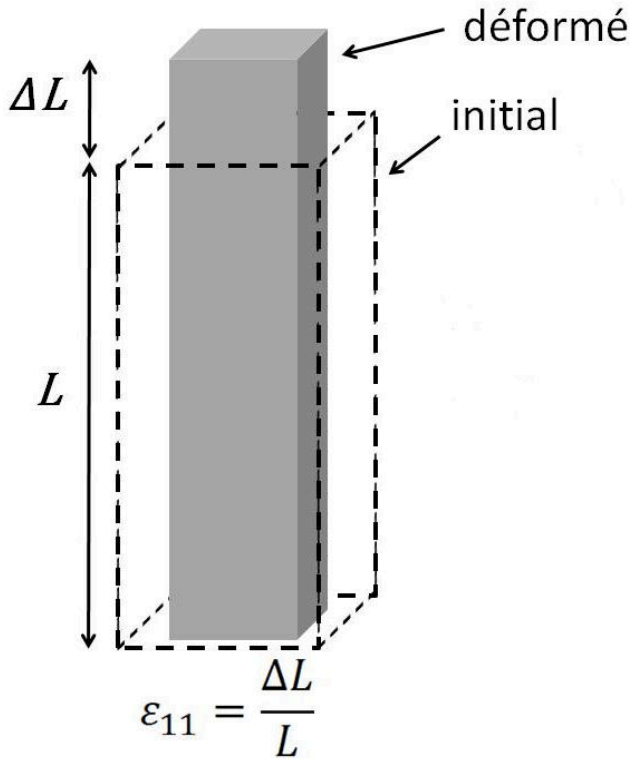


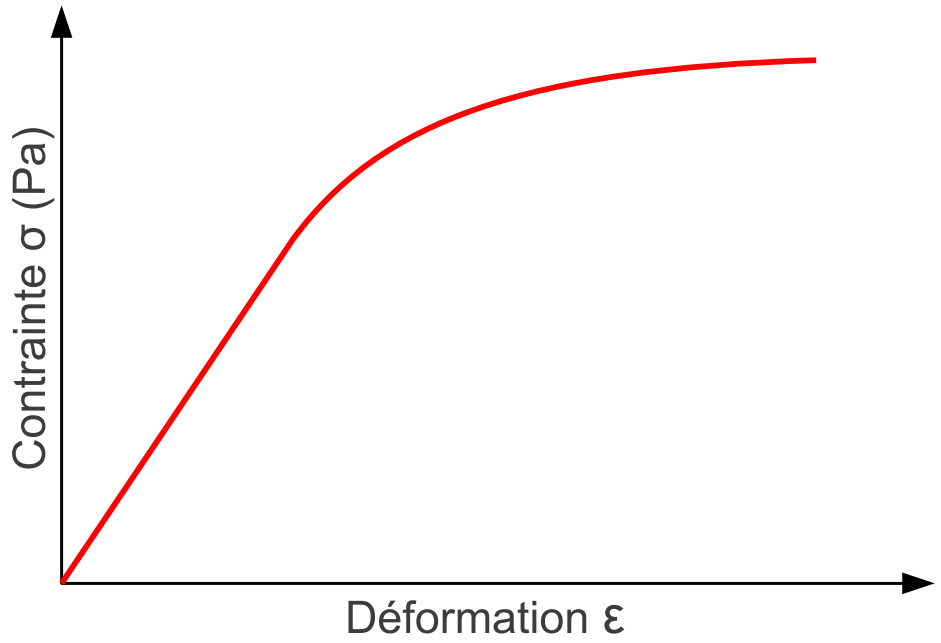


Source : thèse L. Pietranico, `http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00543040/fr/`

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

Un peu de mécanique. . .

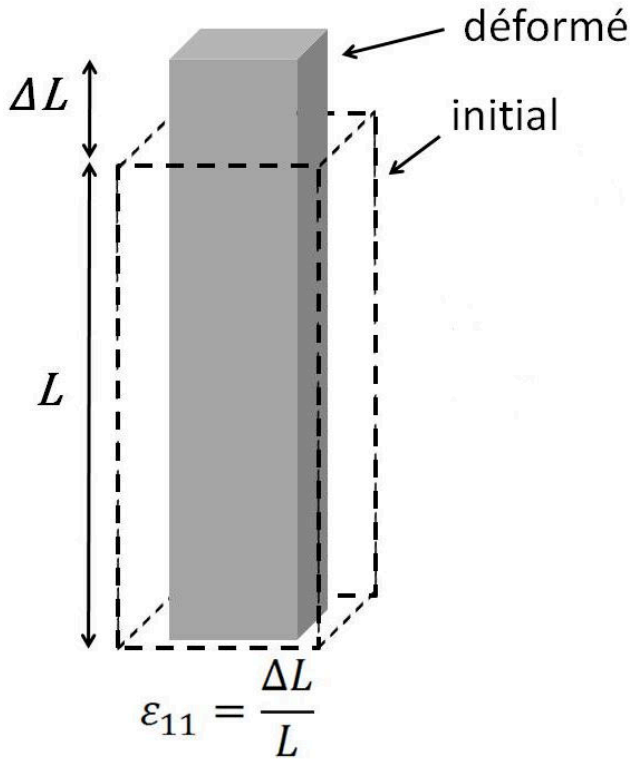


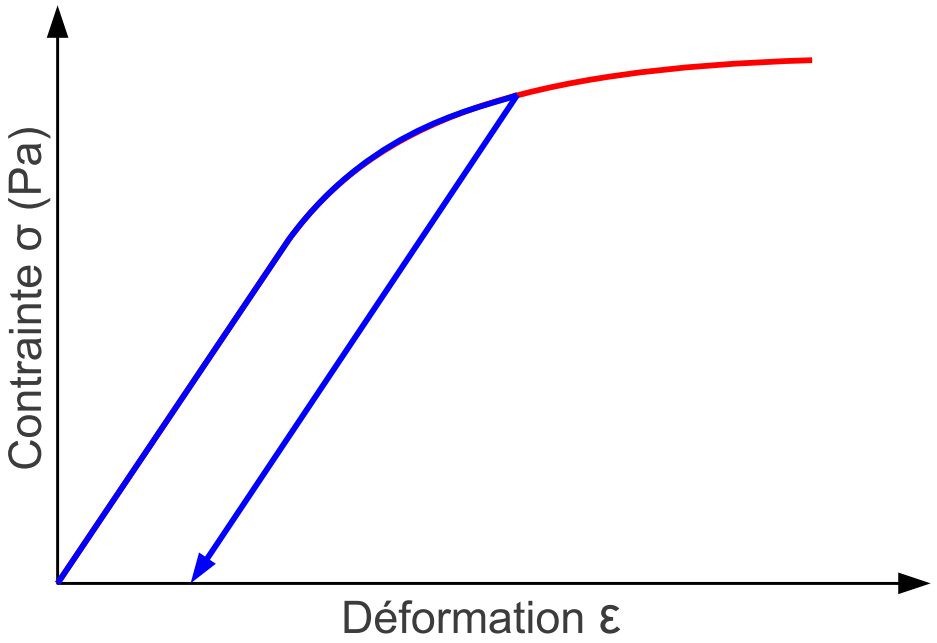


Source : thèse L. Pietranico, `http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00543040/fr/`

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

Un peu de mécanique. . .

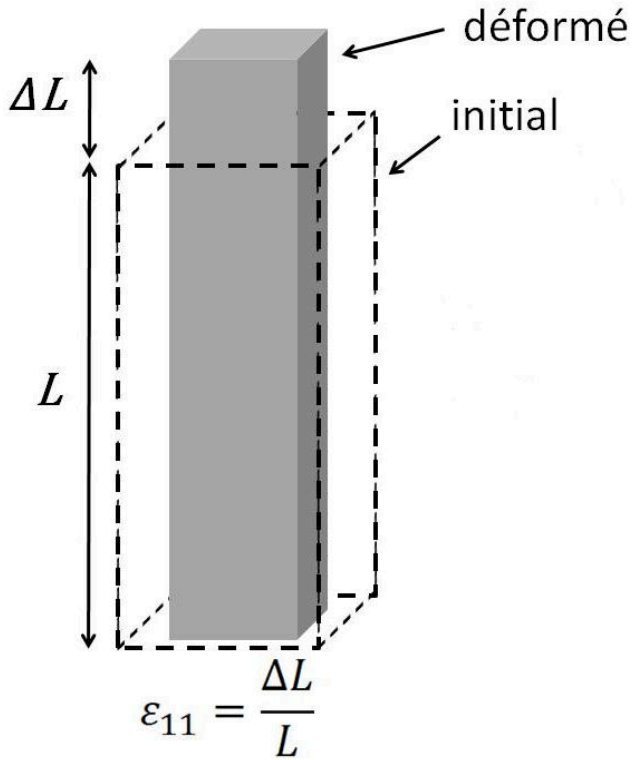


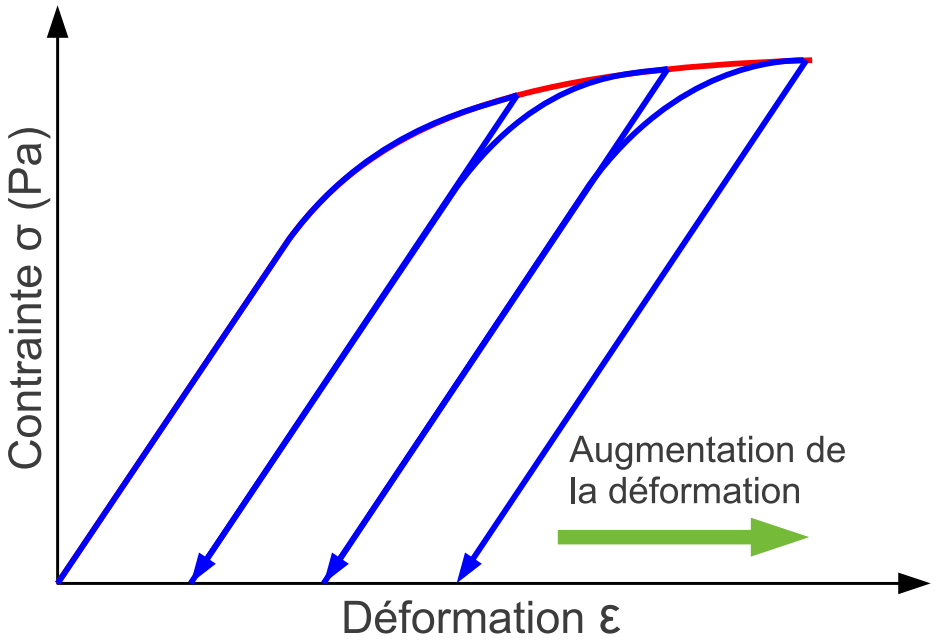


Source : thèse L. Pietranico, `http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00543040/fr/`

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

Un peu de mécanique. . .

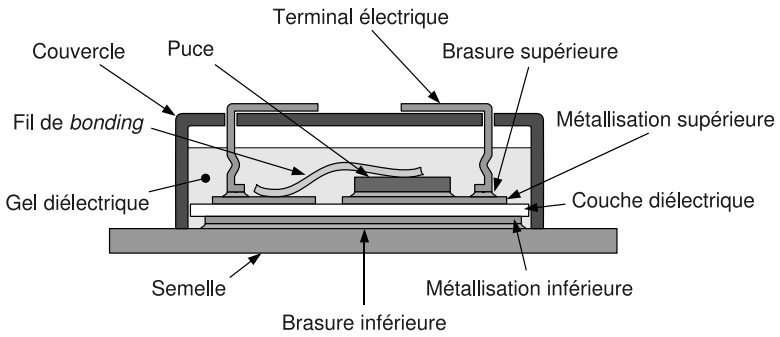




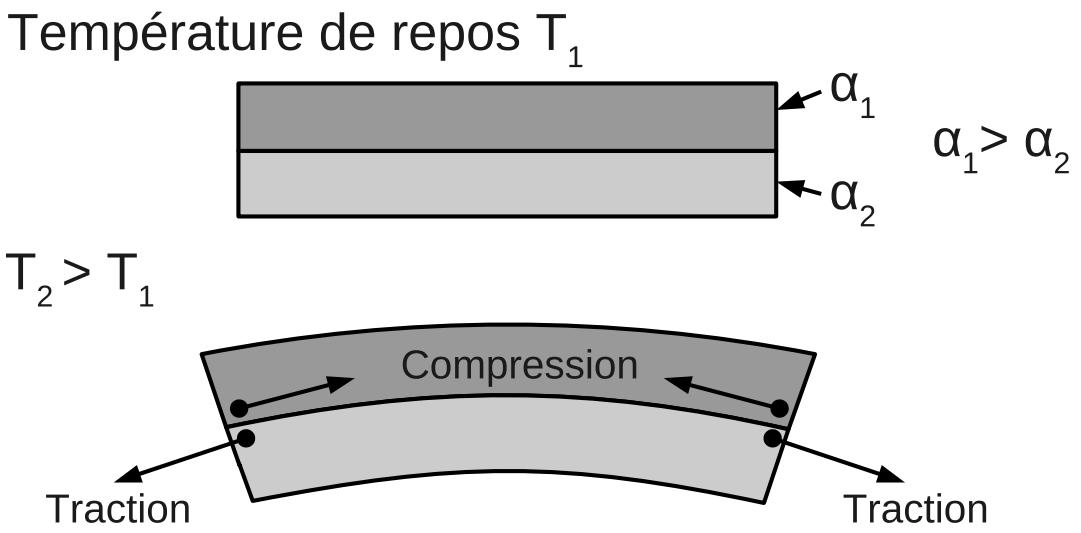
Source : thèse L. Pietranico, `http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00543040/fr/`

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

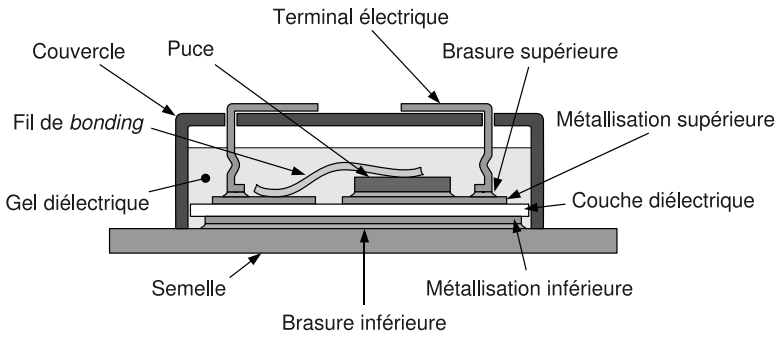
Effet des coefficients de dilatation



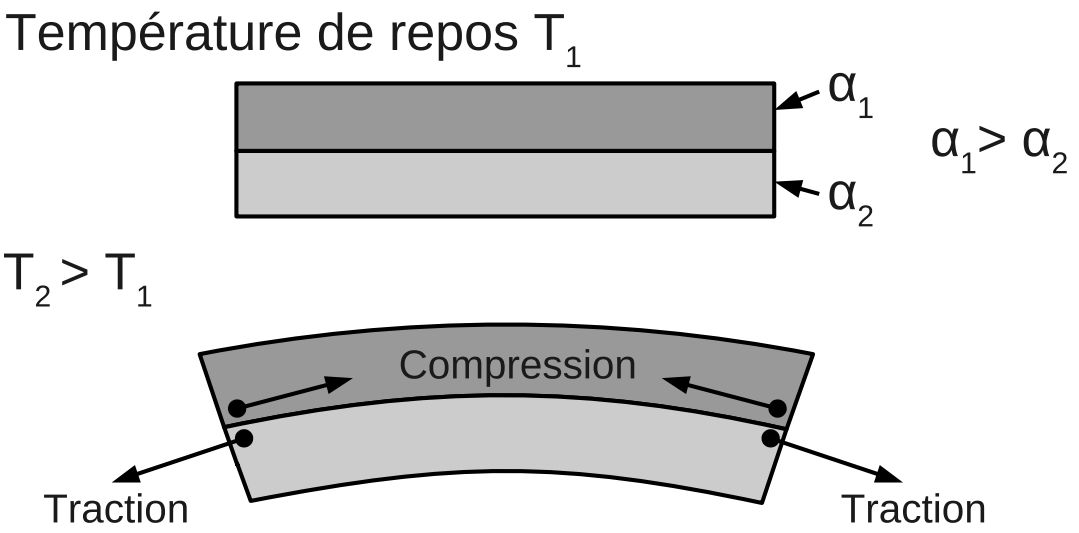
- α en ppm/K
- $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- la température génère des contraintes mécaniques

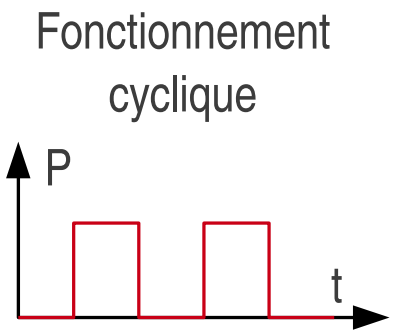


Effet des coefficients de dilatation

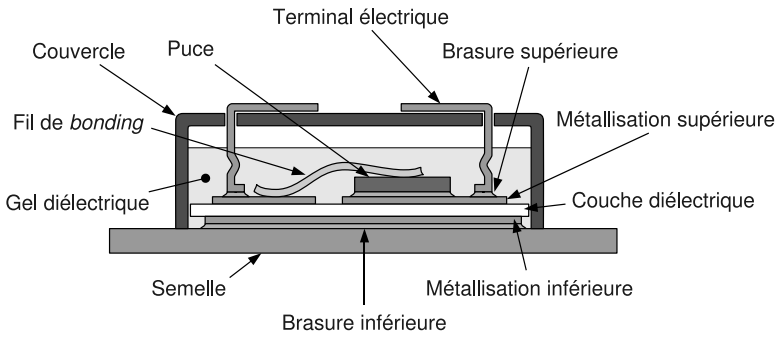


- α en ppm/K
- $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- la température génère des contraintes mécaniques

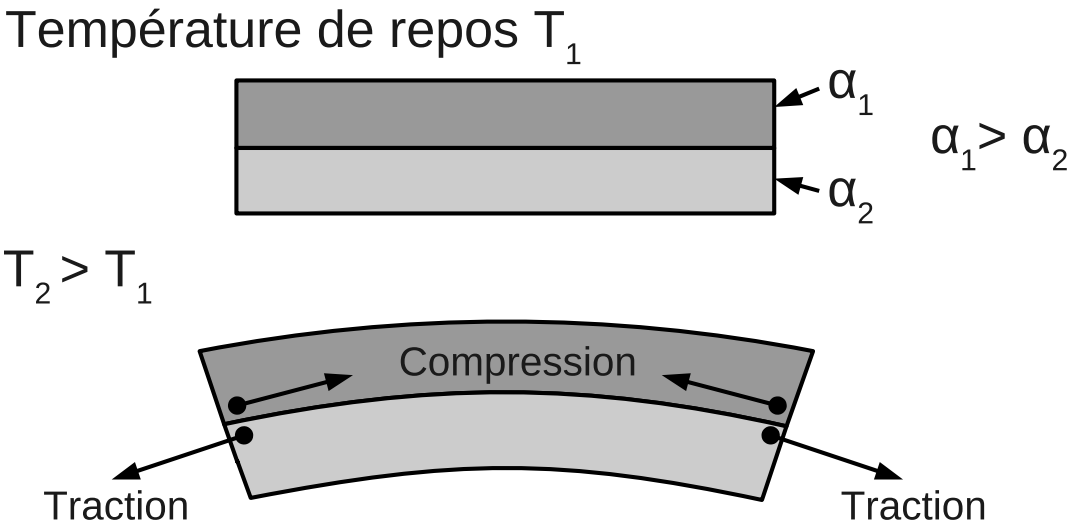


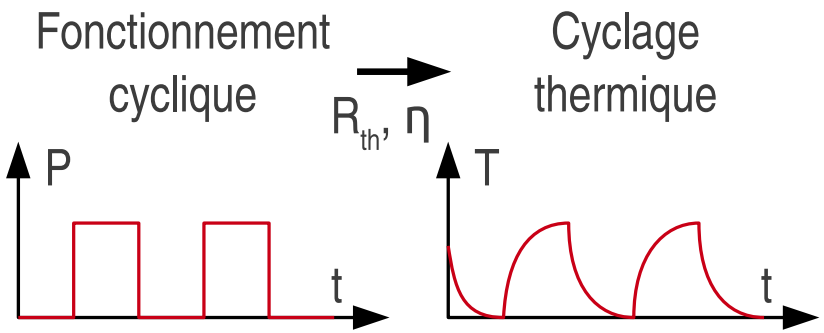


Effet des coefficients de dilatation

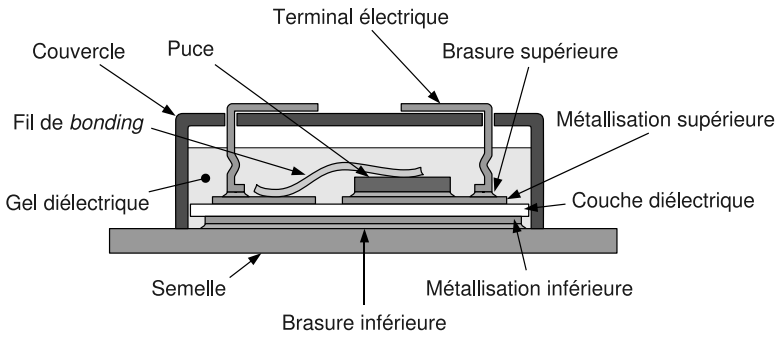


- α en ppm/K
- $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- la température génère des contraintes mécaniques

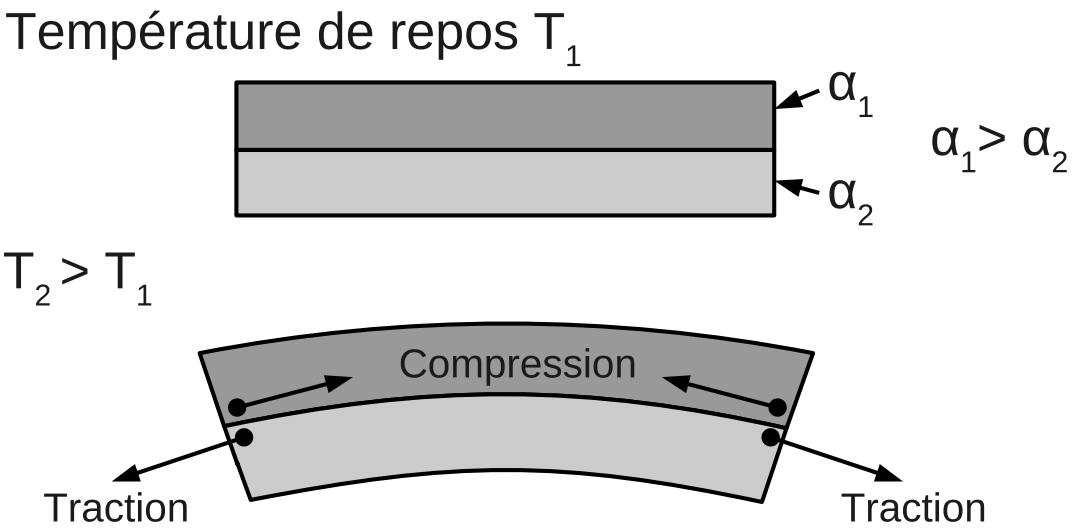


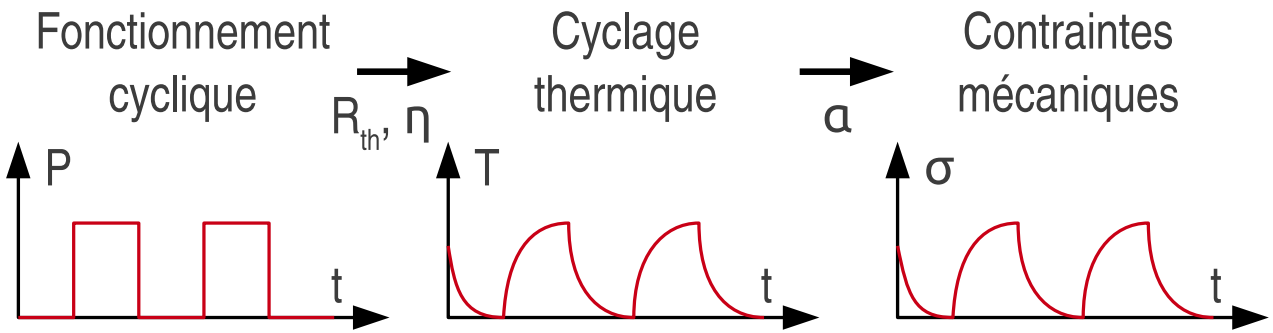


Effet des coefficients de dilatation

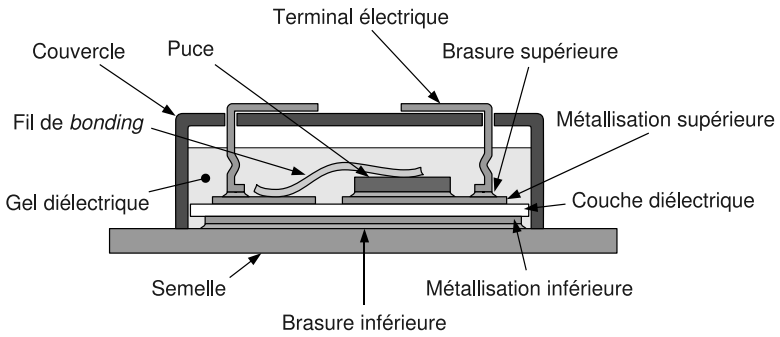


- α en ppm/K
- $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- la température génère des contraintes mécaniques

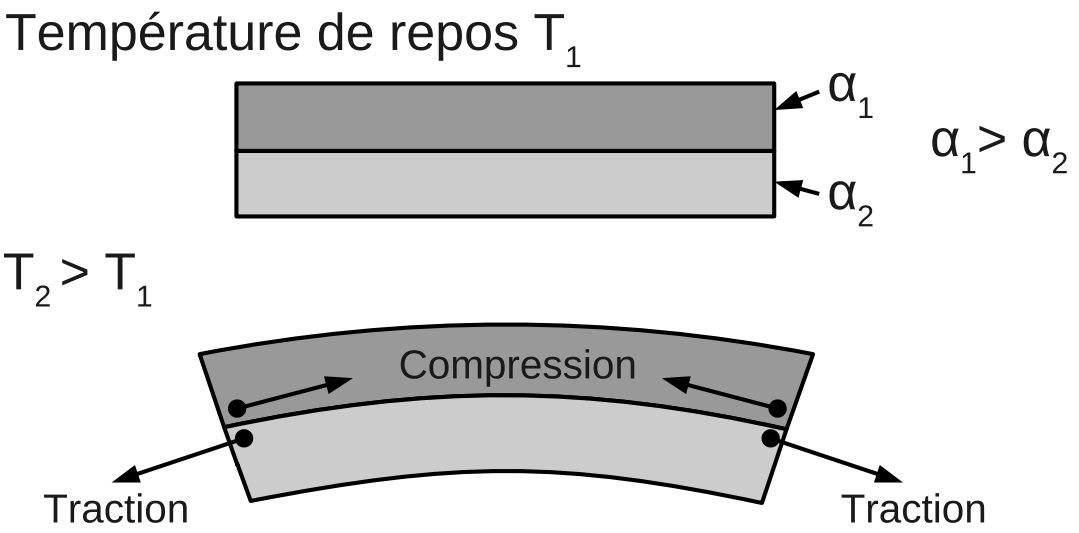


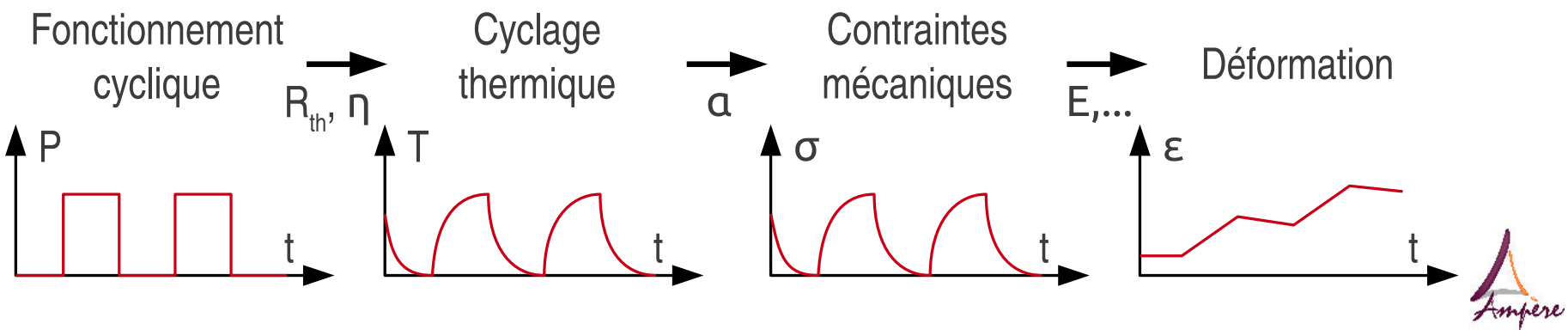


Effet des coefficients de dilatation

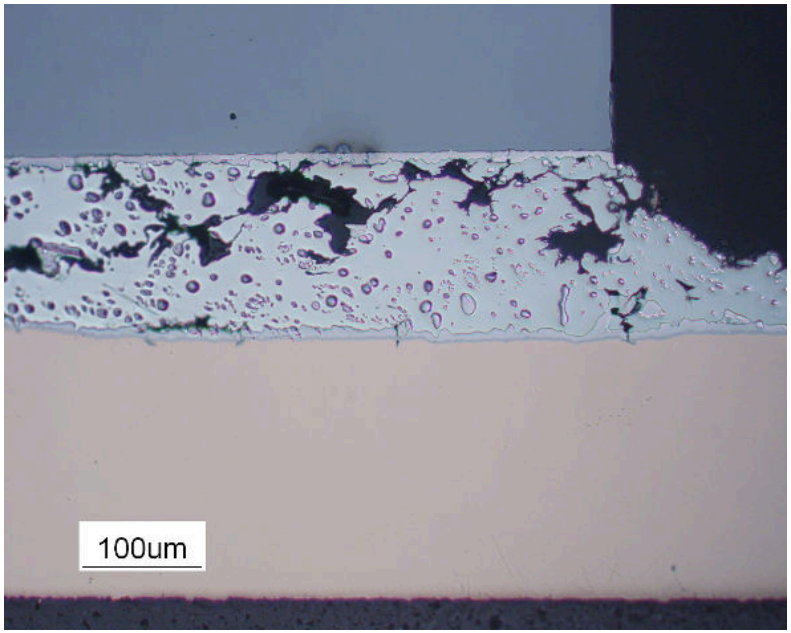


- α en ppm/K
- $3.10^{-6} < \alpha < 20.10^{-6} K^{-1}$
- la température génère des contraintes mécaniques





Effet des contraintes thermo-mécaniques

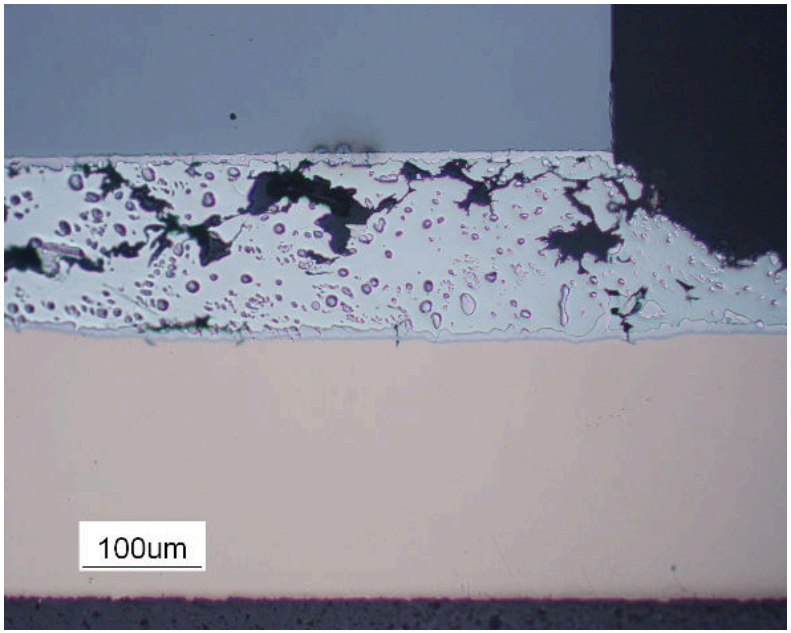


Source : Université de Nottingham

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



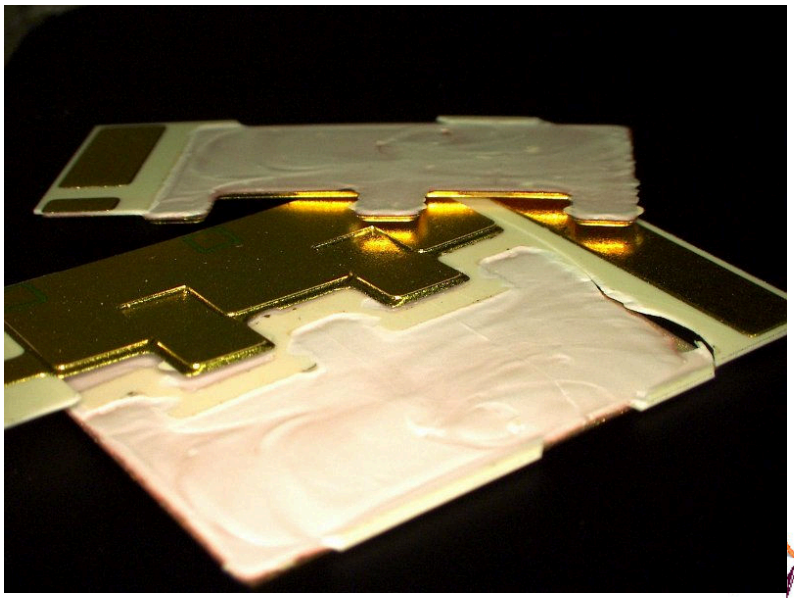
Source : Université de Nottingham

Brasure puce-substrat

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

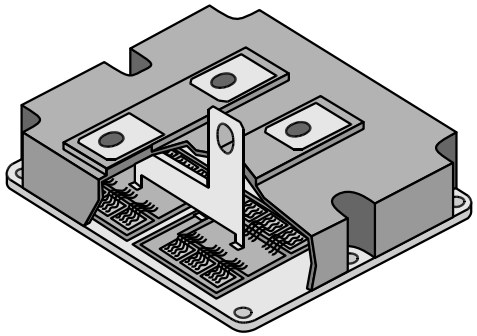
Substrat céramique métallisé

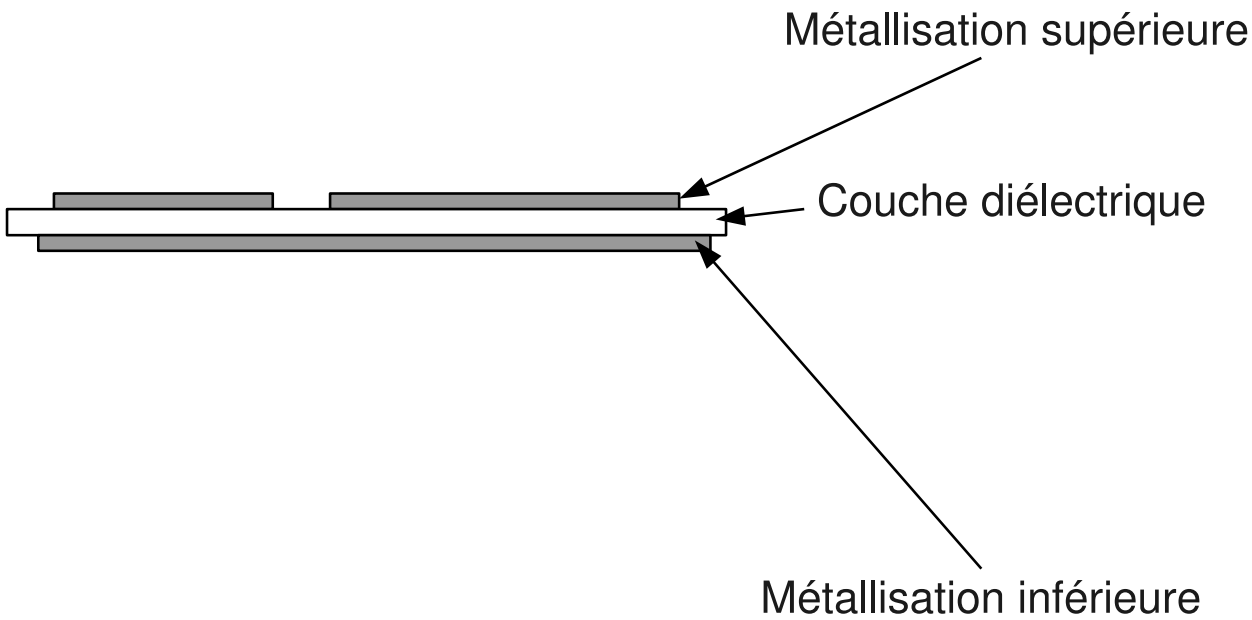
- Conducteur en cuivre (17 ppm/K)
- Substrat céramique (6 ppm/K)
- Fissuration « conchoïdale » de la céramique



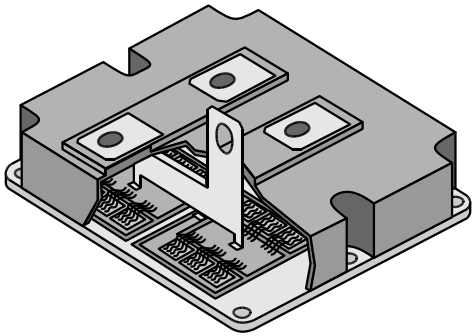
Source : Université de Nottingham

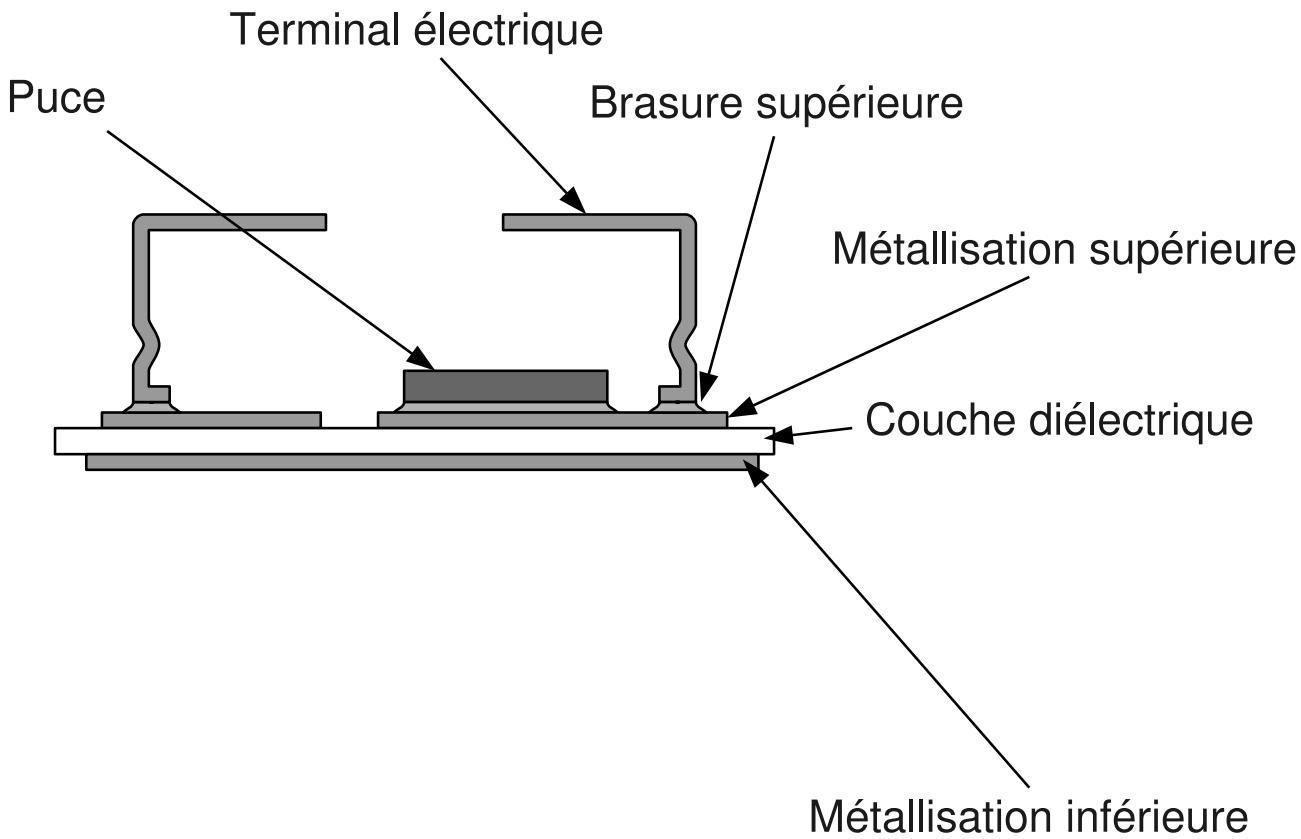
Coupe d'un module de puissance



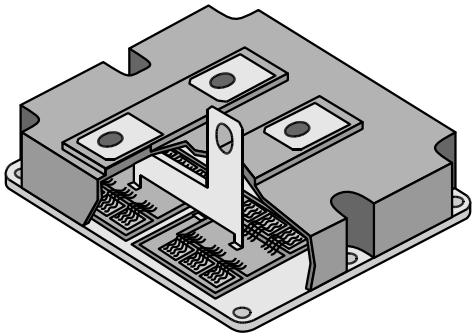


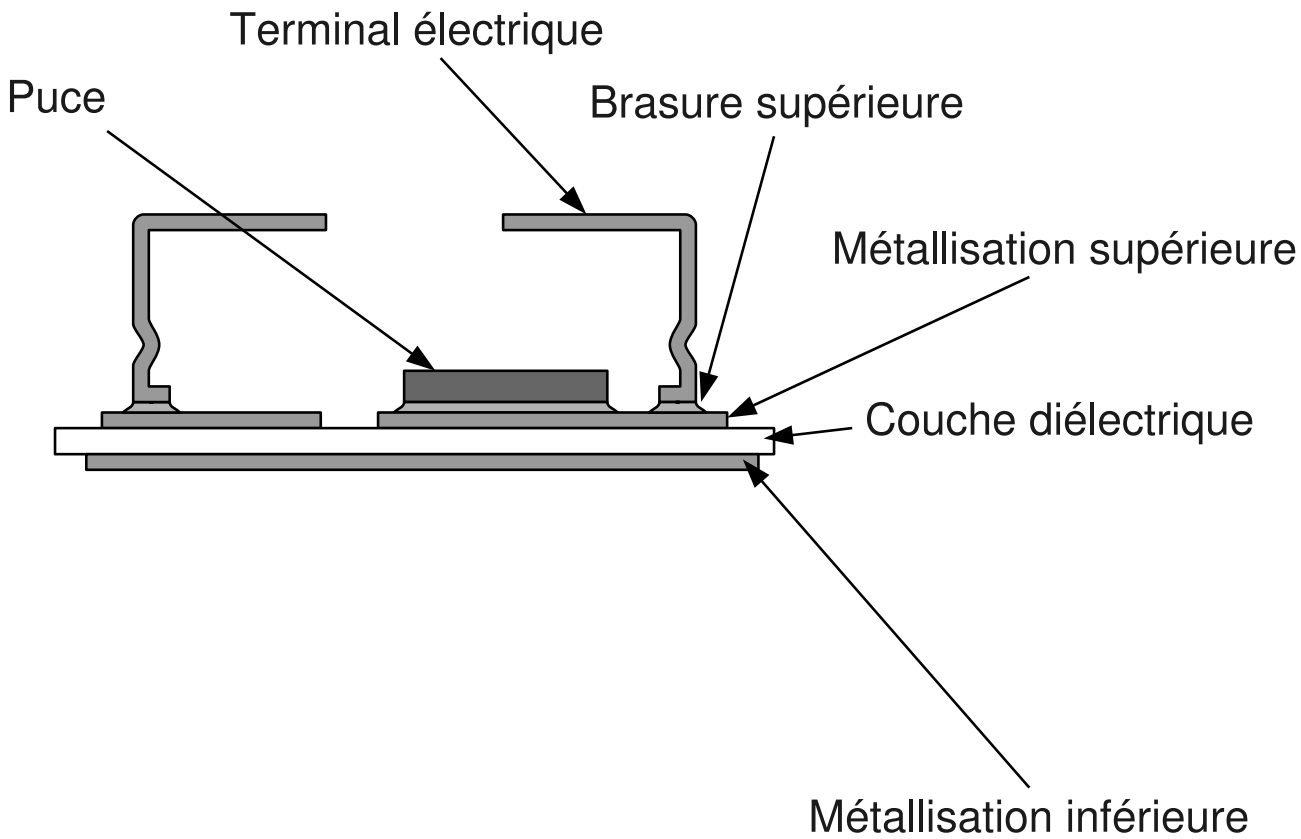
Coupe d'un module de puissance



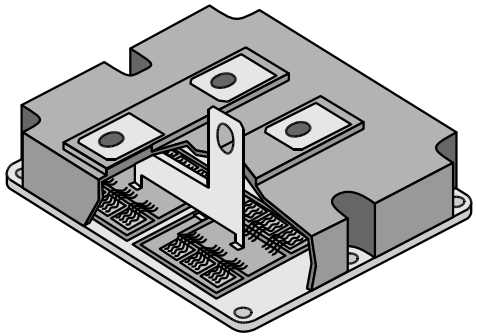


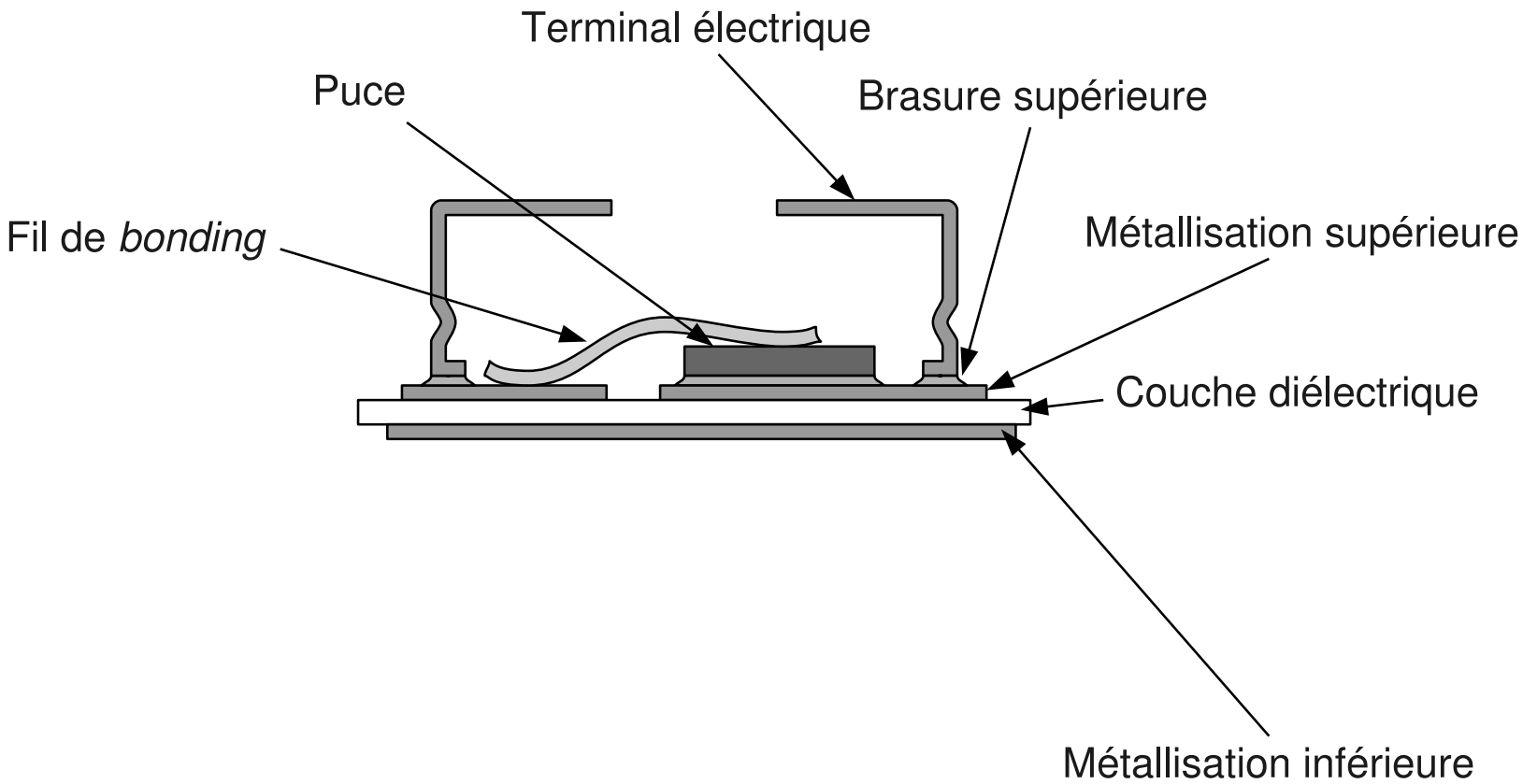
Coupe d'un module de puissance



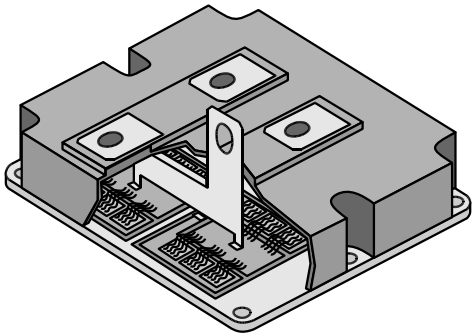


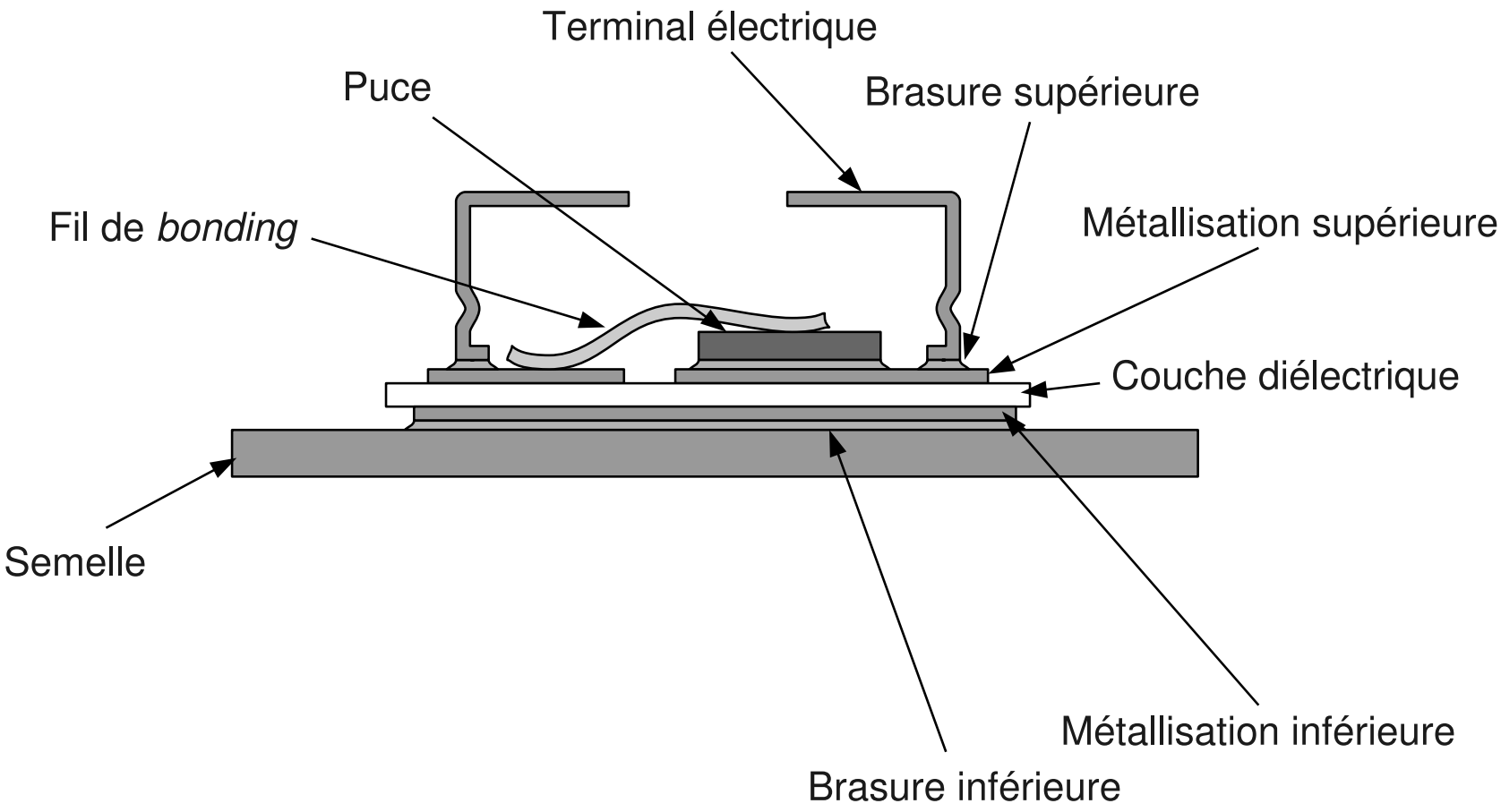
Coupe d'un module de puissance



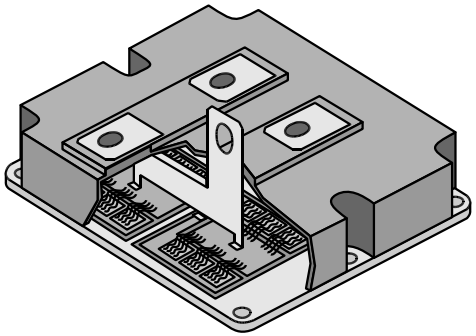


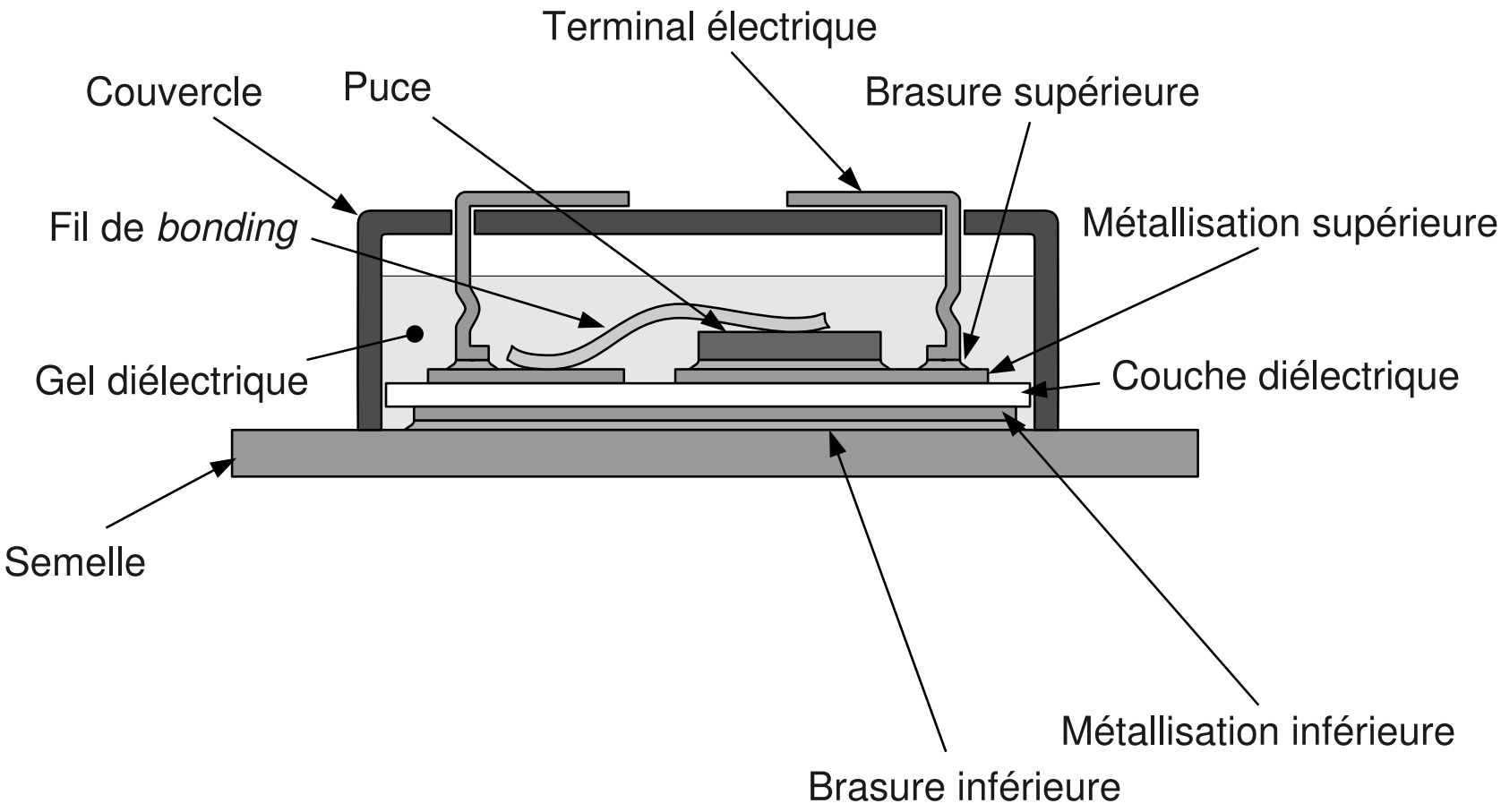
Coupe d'un module de puissance



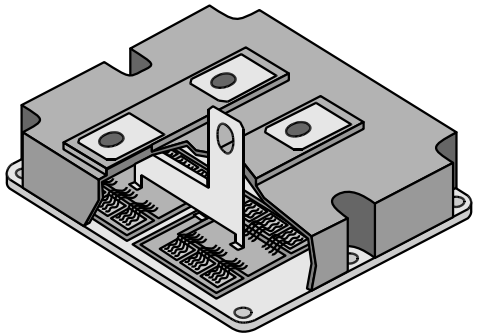


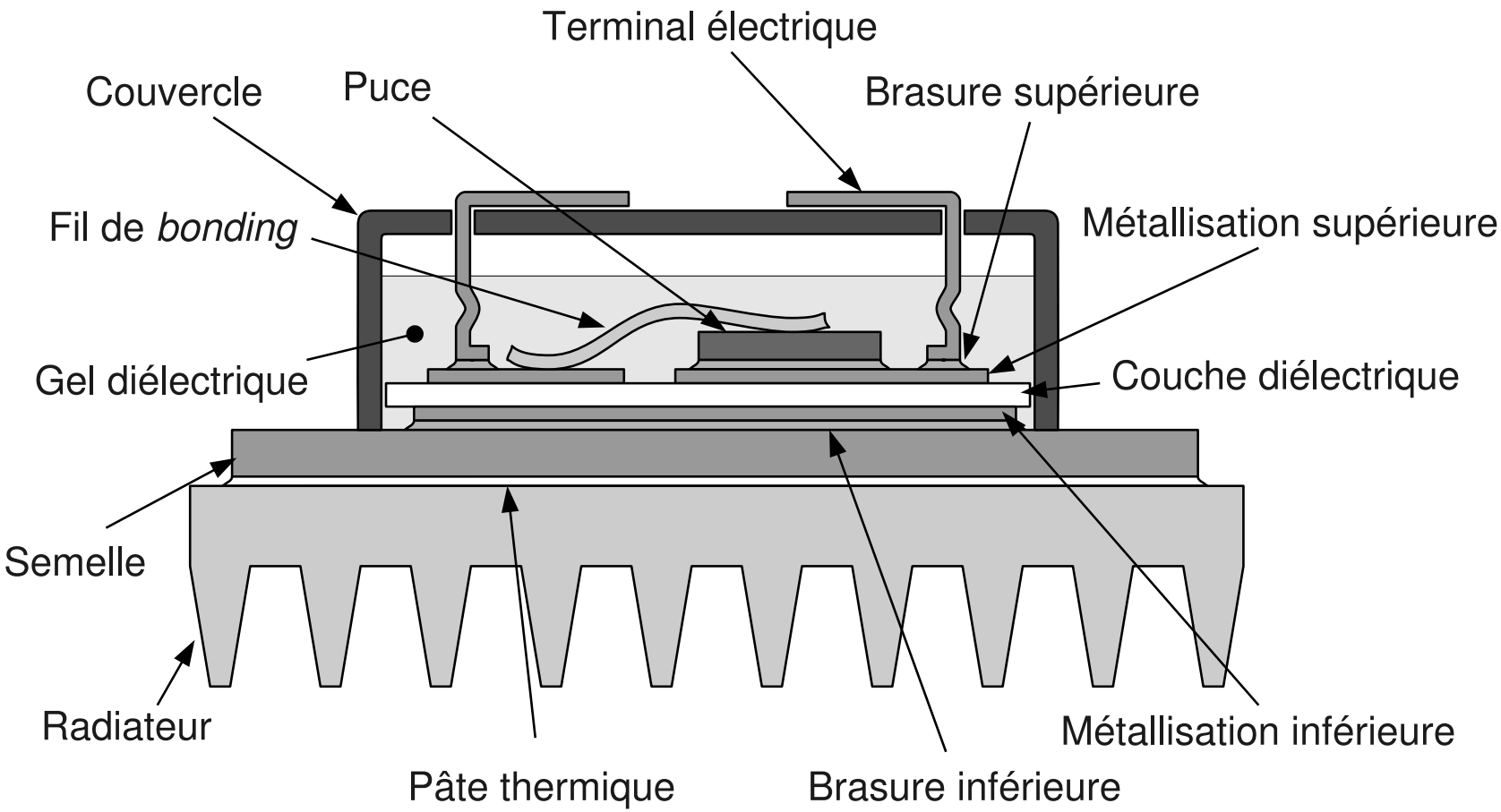
Coupe d'un module de puissance



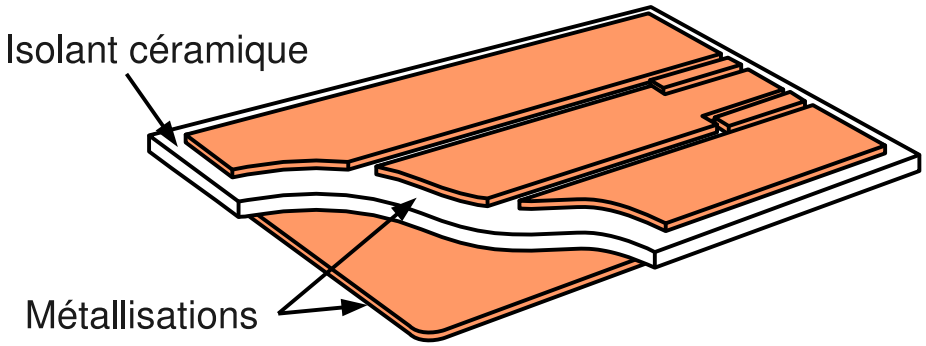


Coupe d'un module de puissance

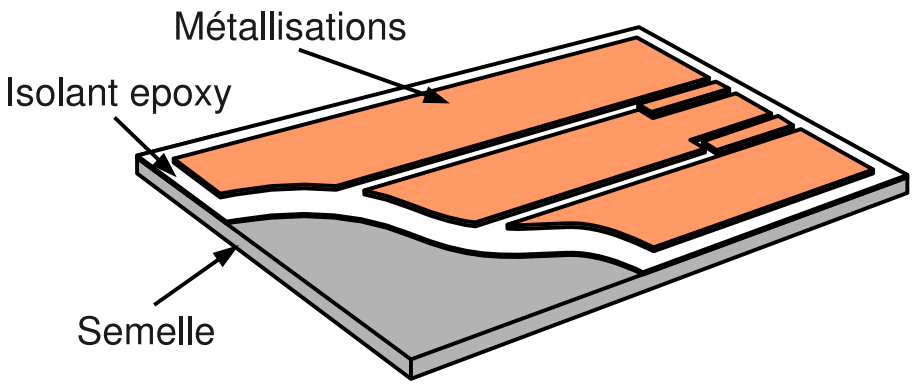




Substrats isolés



(a)



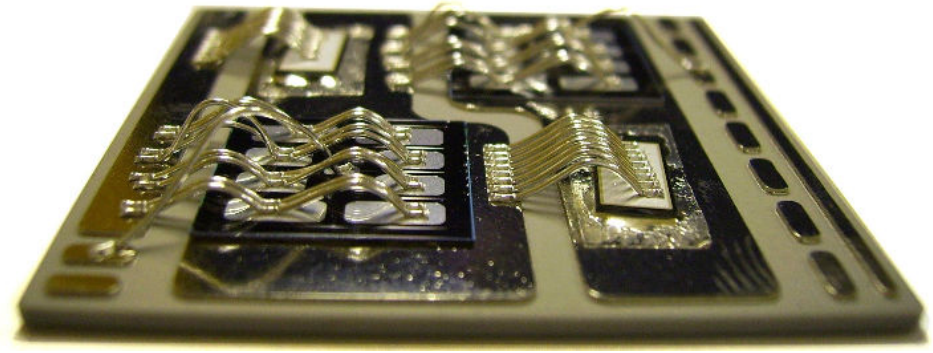
(b)

Plusieurs technologies :

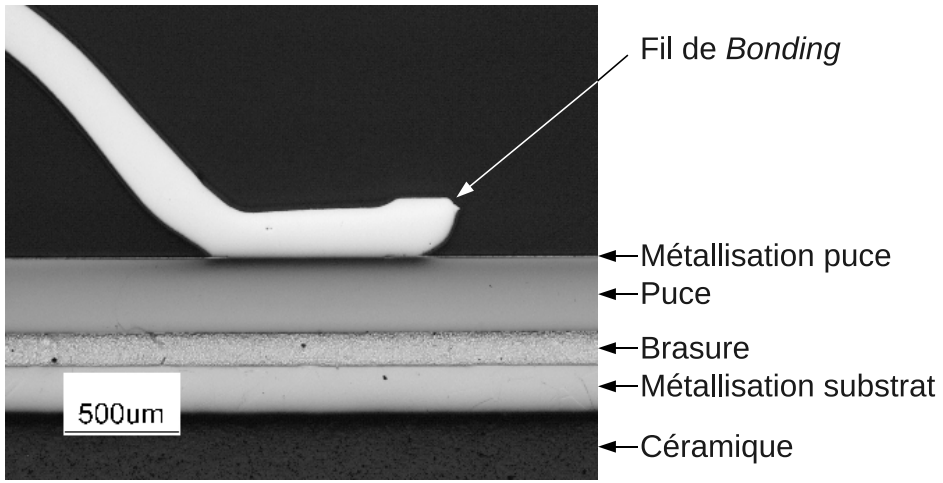
- Les substrats céramiques (DBC, DBA, ...)
  - Céramique (0,3 à 1 mm)
  - Cuivre (0,1 à 0,3 mm)
  - Bonnes performances thermiques et électriques
  - Cher
- Les Substrats Métalliques Isolés (SMI)
  - Aluminium (1 à 3 mm)
  - Isolant (0,1 mm)
  - Cuivre (0,035 à 0,2 mm)
  - Performances moyennes
  - Coef. de dilatation plus fort
  - Moins cher
  - Limité à $<175\,^{\circ}C$

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. . .

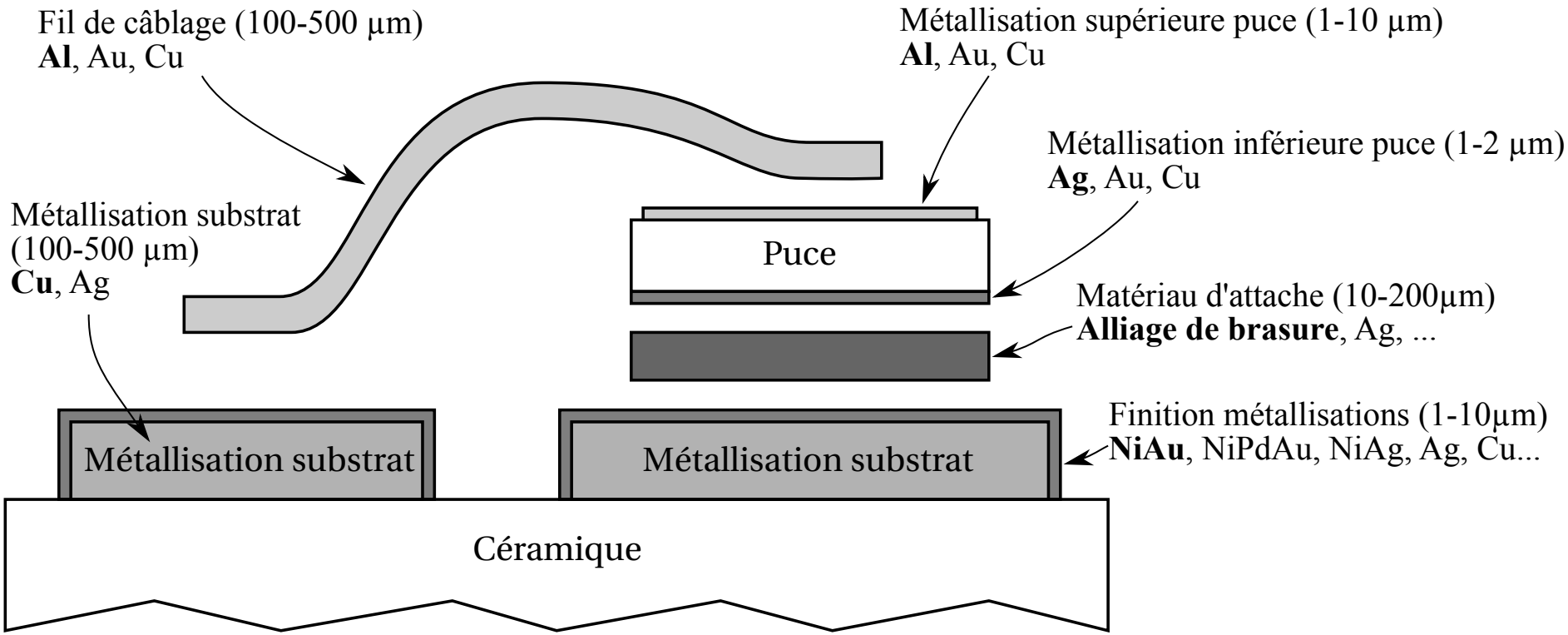


Source : Université Nottingham



Source : Université Nottingham

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.

Sommaire

Introduction

Composants

- semiconducteurs de puissance
- Circuits de commande
- Passifs

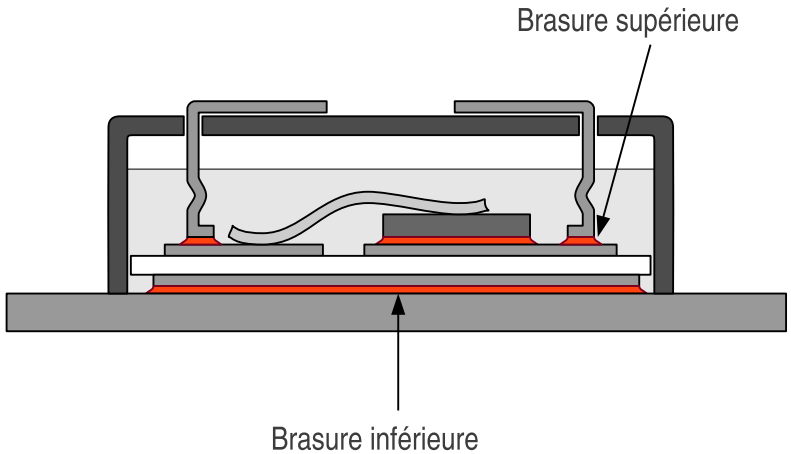
Packaging et Procédés

- Généralités Packaging
- Attache de composants
- Circuits imprimés

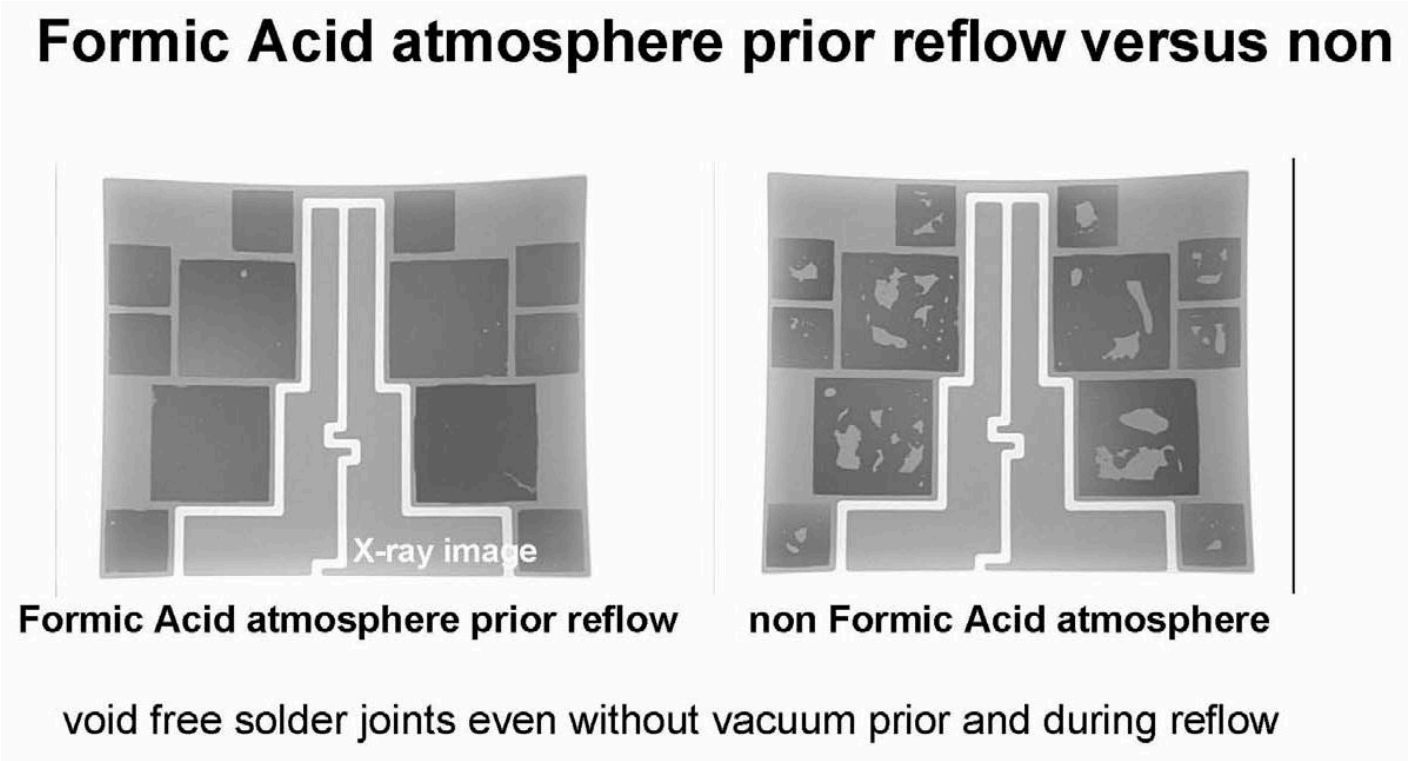
Conclusions

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 – problème des vides

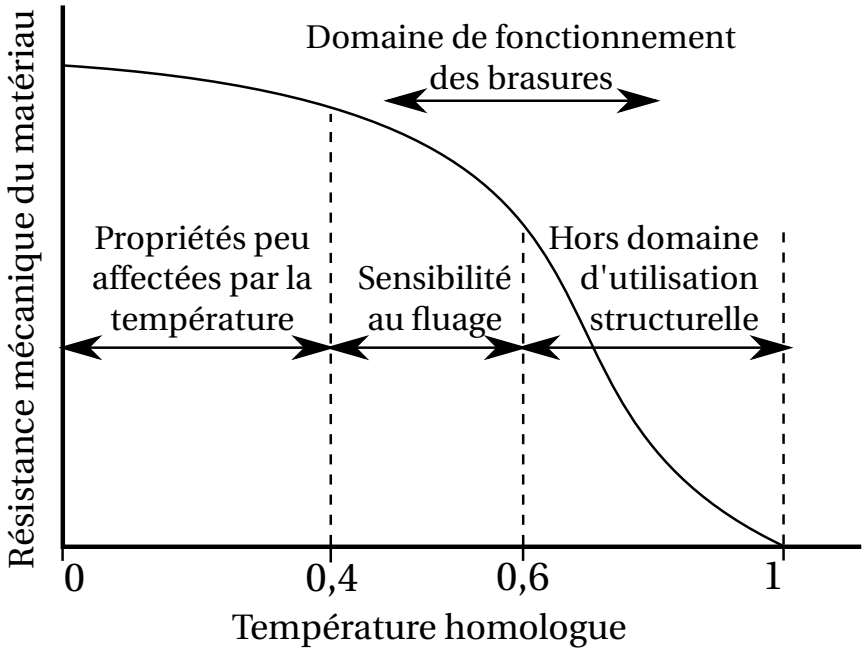


Source : Reflow Soldering Technology for large die area Power Electronics, Matthias Hutter, Microcar, Leipzig, 21 juin 2005

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...)

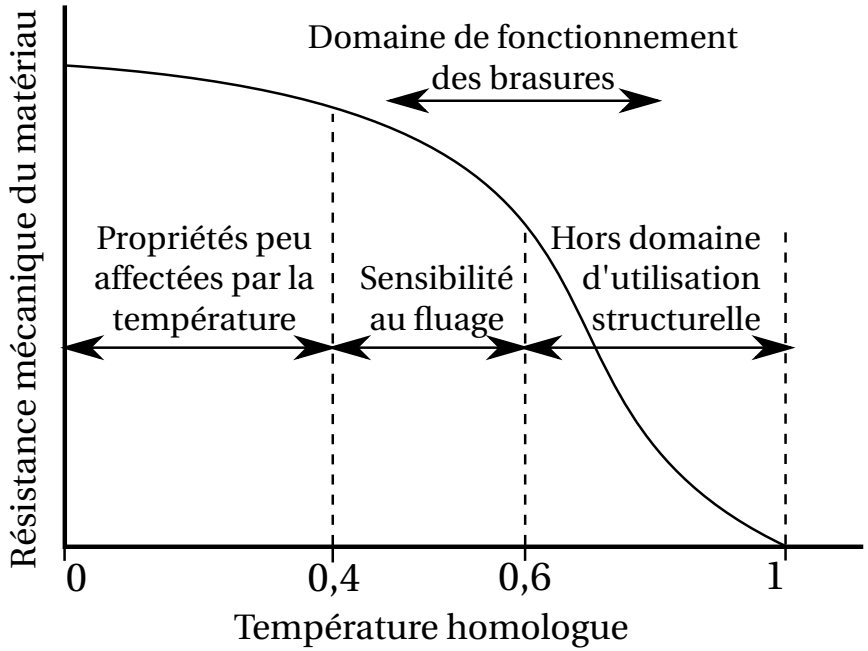
Les brasures – limites de fonctionnement



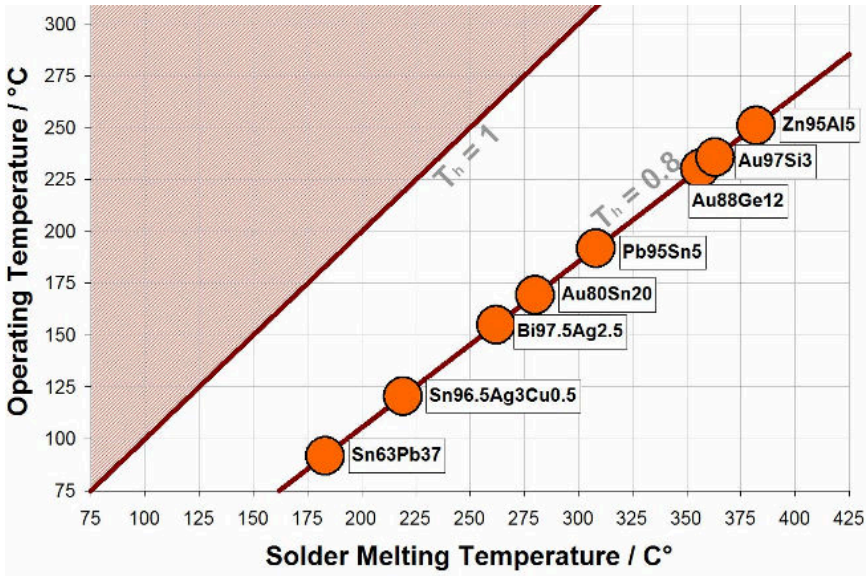
Source : http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0123_mpm/

- 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



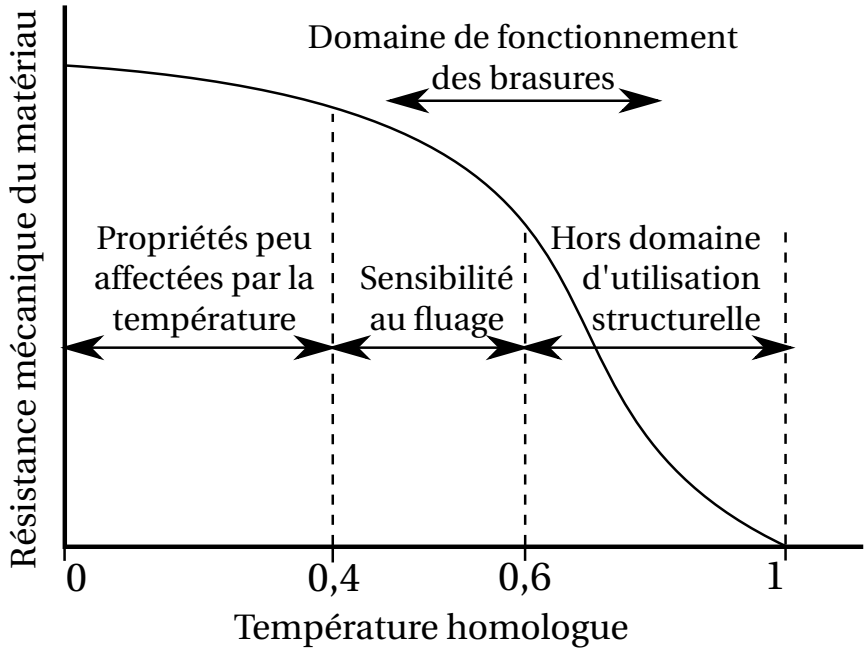
Source : http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0123_mpm/



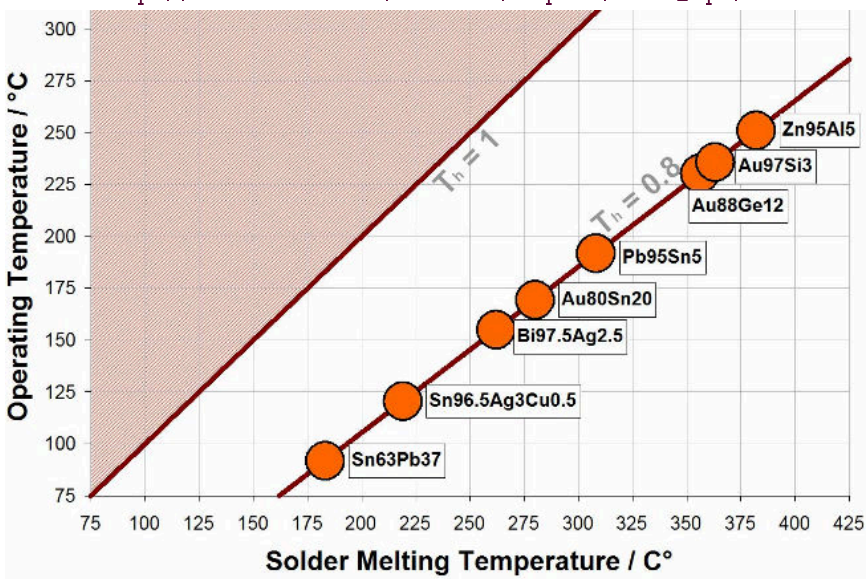
Source : Power Semiconductor Joining through Sintering of Silver Nanoparticles...
M.Knoerr et al, CIPS 2010

- 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



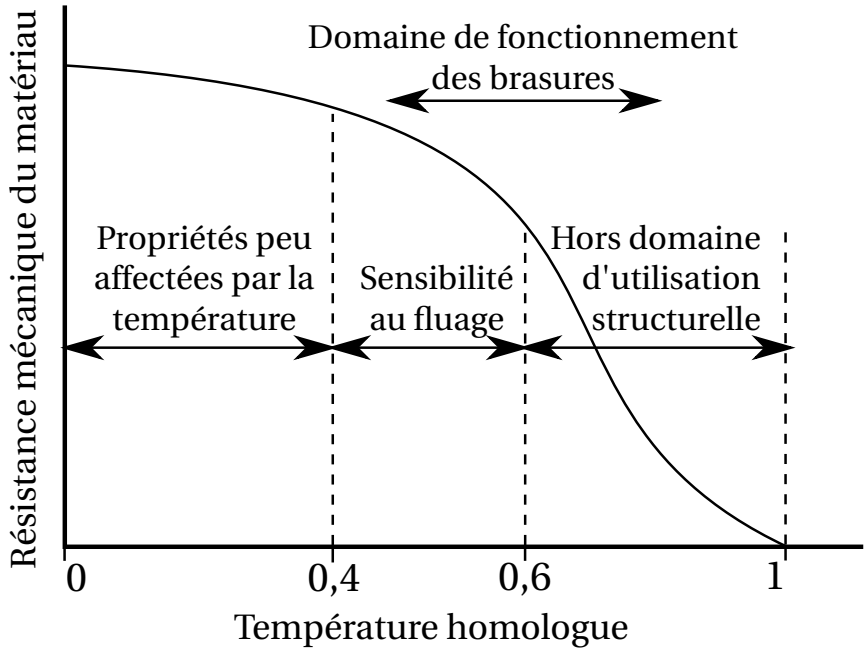
Source : http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0123_mpm/



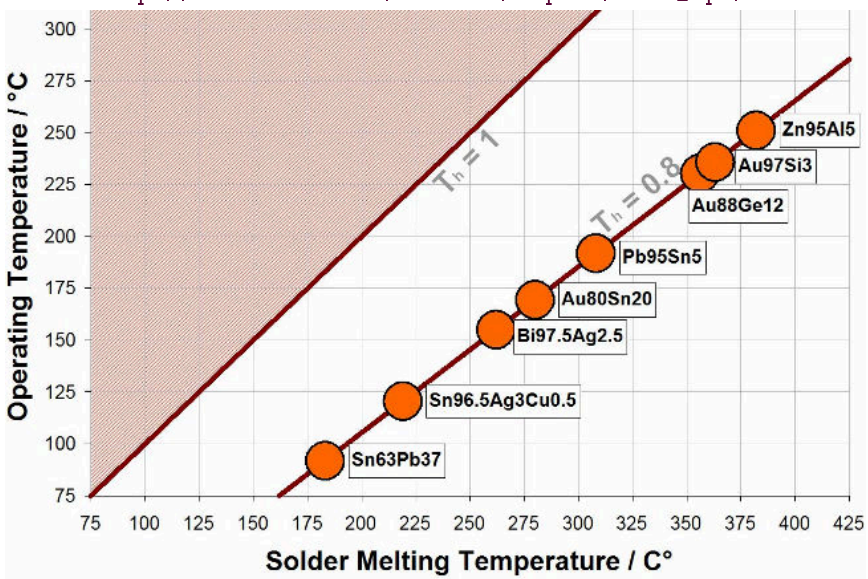
Source : Power Semiconductor Joining through Sintering of Silver Nanoparticles...
M.Knoerr et al, CIPS 2010

- 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



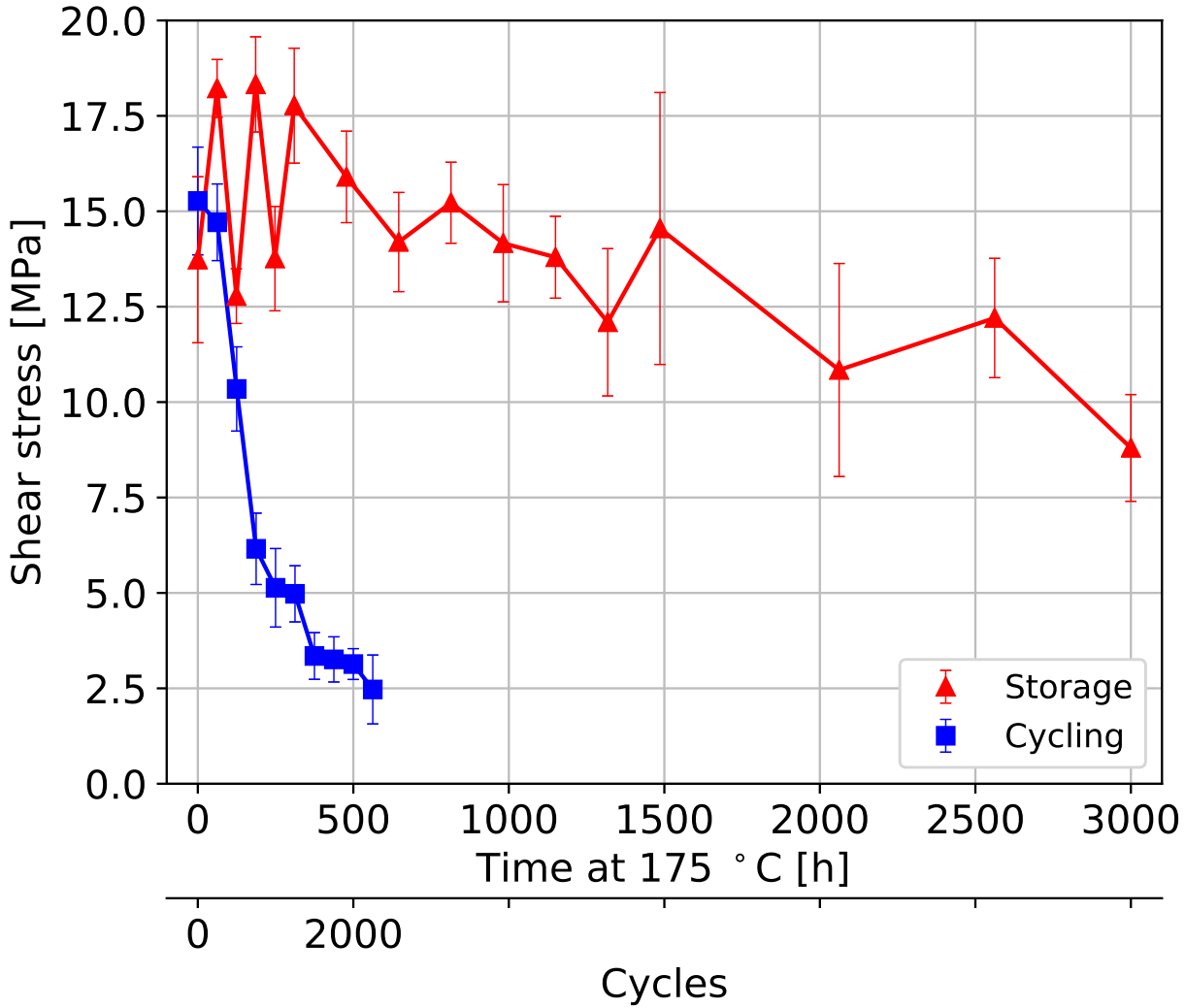
Source : http://www.ami.ac.uk/courses/topics/0123_mpm/



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

Vieillissement haute température de brasures [10]

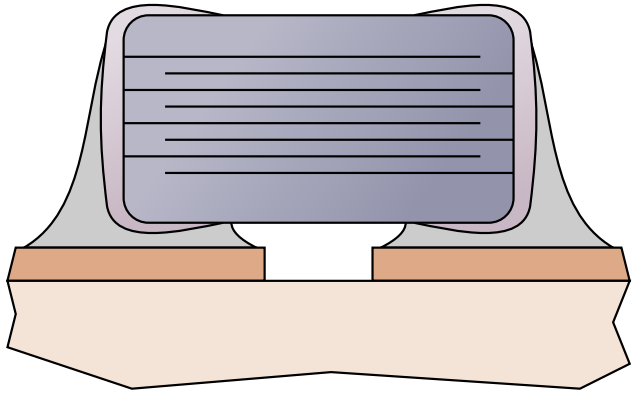


Conditions : cyclage -55/175 °C (IMS), stockage 175 °C(Ampère)

- Dégradation rapide en cyclage (arrêt après 2250 cycles)
- Lente diminution en stockage (-40 % après 3000 h)

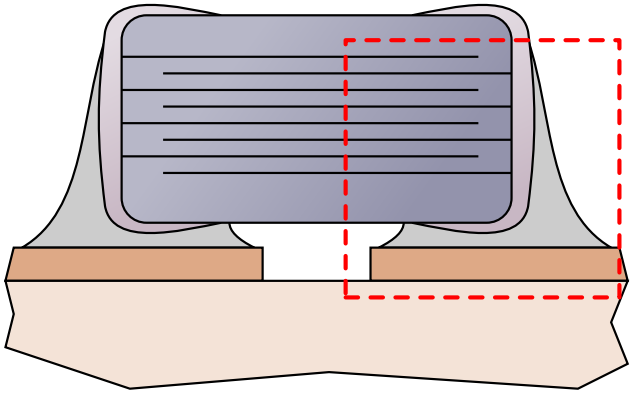
Vieillissement haute température de brasures [10] – 2

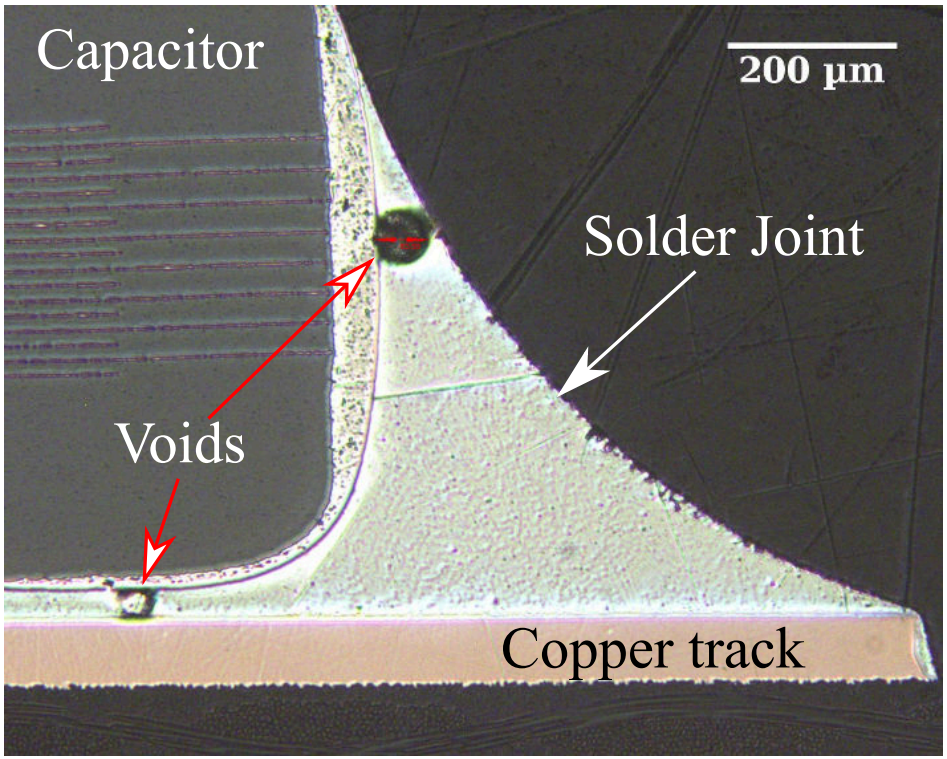
- Vacuoles dans le joint dès le début
- Après cyclage (750 cycles) :
  - Plus de vacuoles
  - Amorce de fissuration
  - Rugosification de surface



Vieillissement haute température de brasures [10] – 2

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

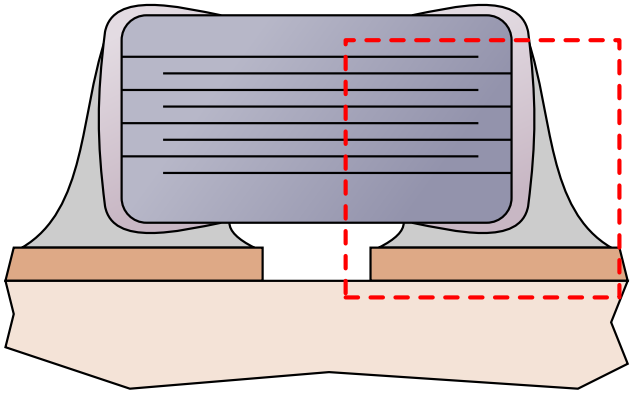


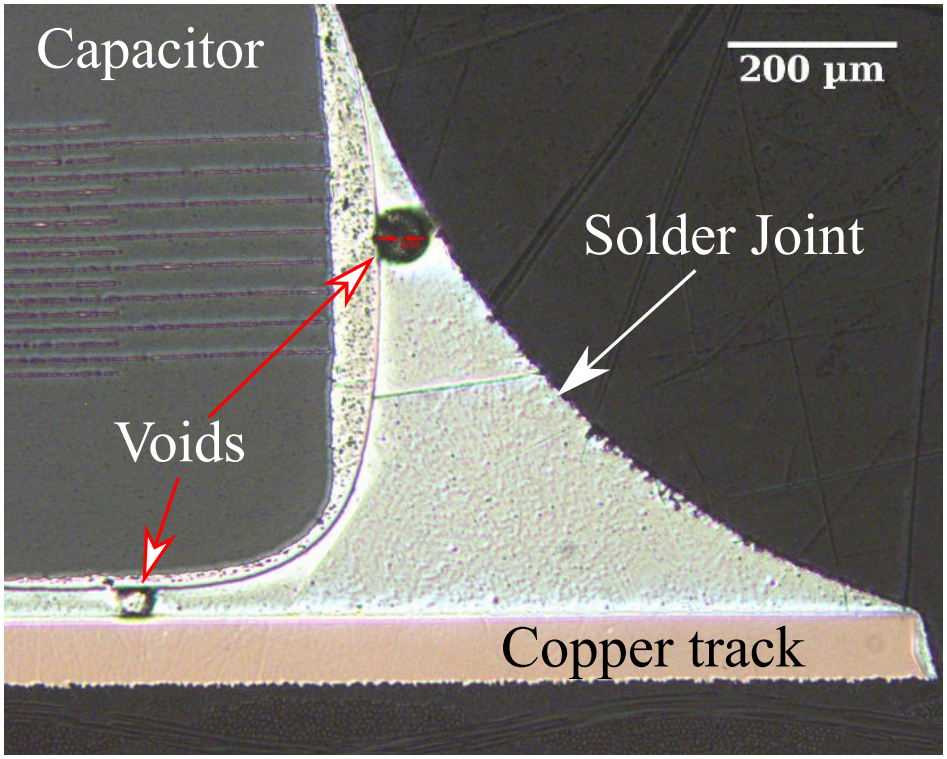


t=0

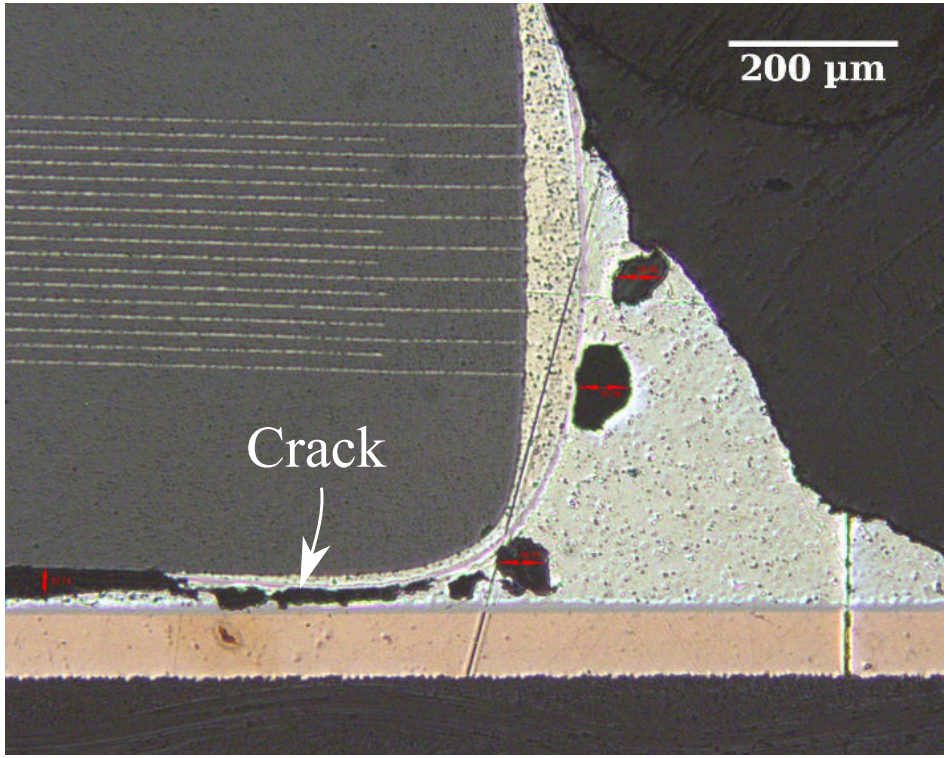
Vieillissement haute température de brasures [10] – 2

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



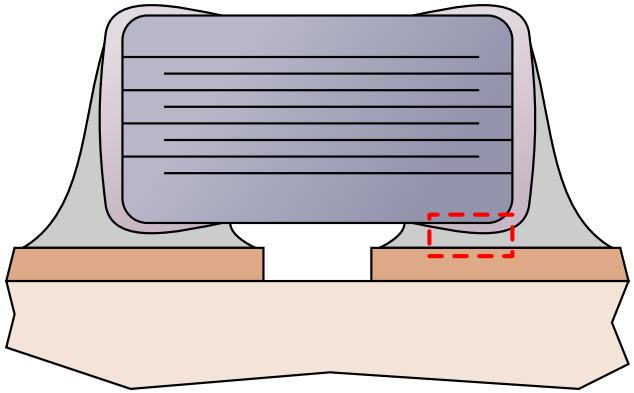


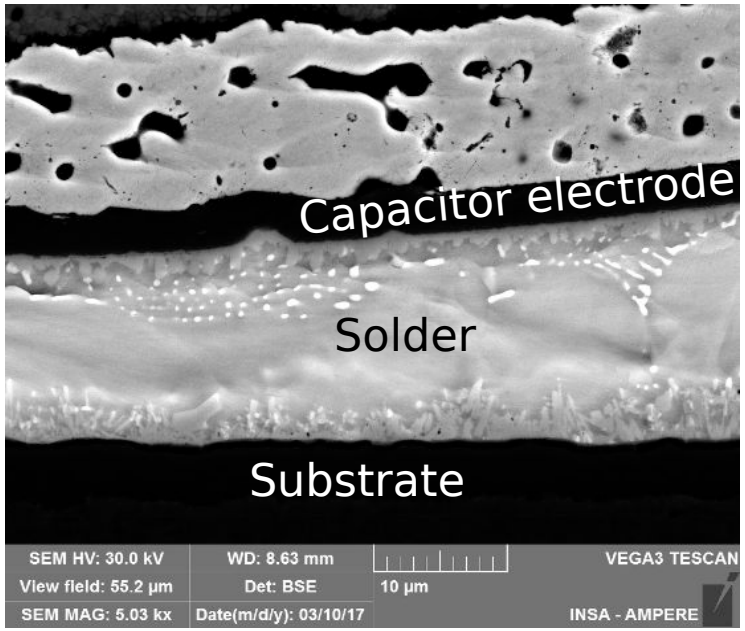
t=0



750 cycles (-55/+175°C)

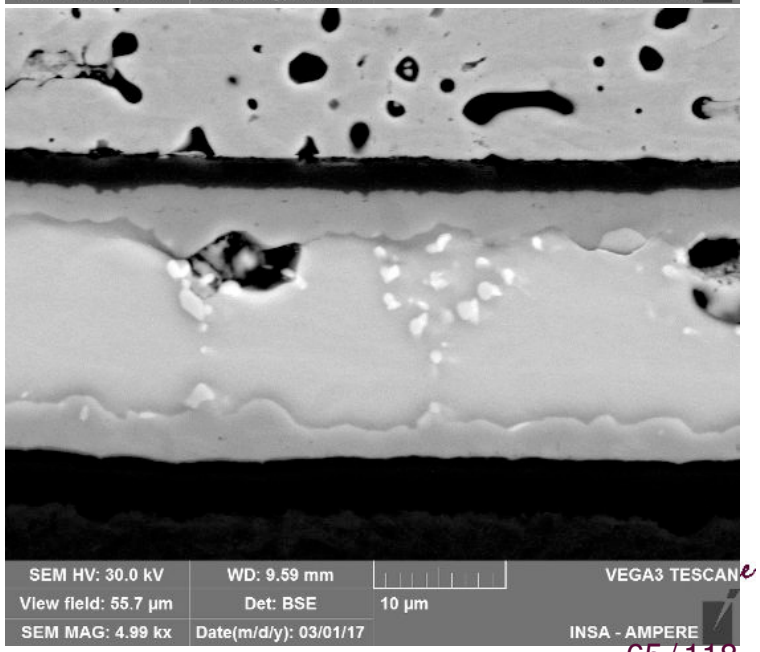
Vieillissement haute température de brasures [10] – 3





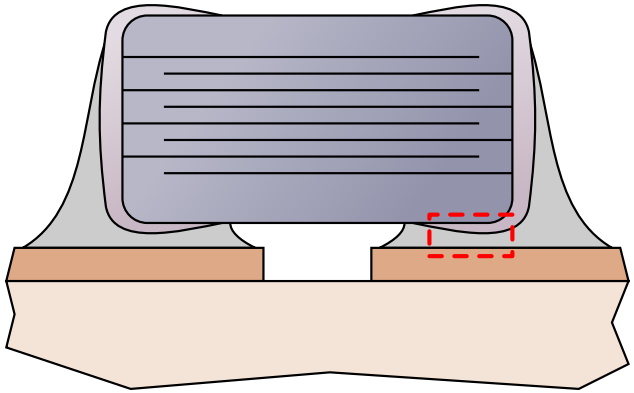
Stockage 175 °C, 310 h

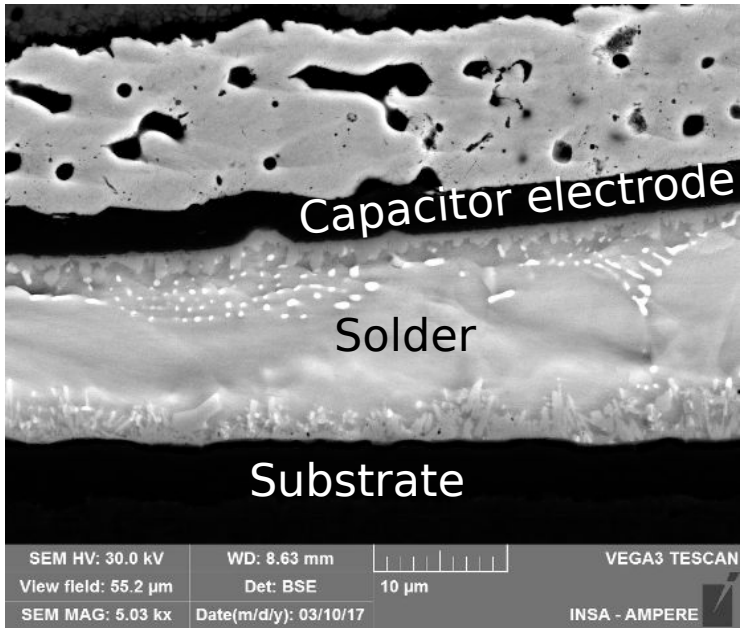
- Les IMC interfaciaux sont continus
- Pas de fissuration

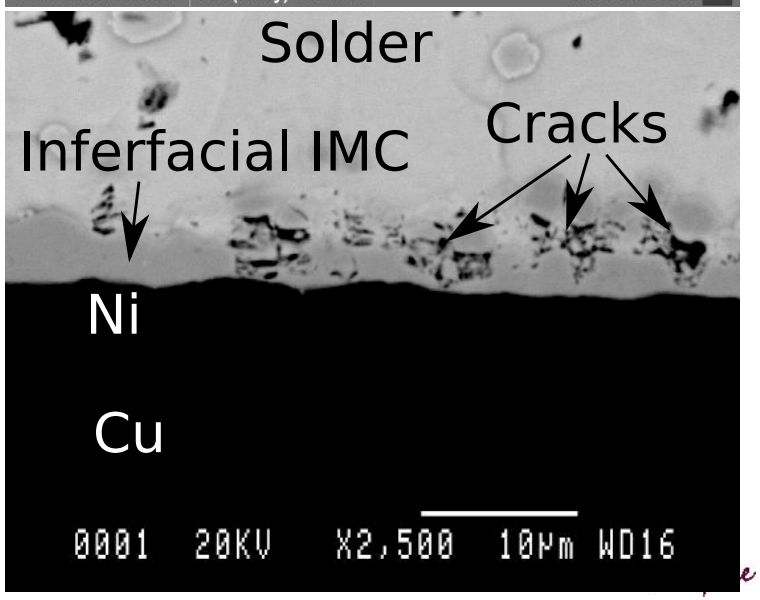


Haut droit : stockage, bas droit : stockage.

Vieillissement haute température de brasures [10] – 3







Stockage 175 °C, 310 h

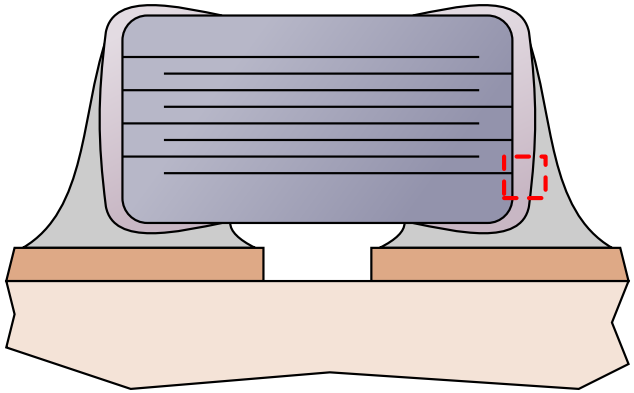
- Les IMC interfaciaux sont continus
- Pas de fissuration

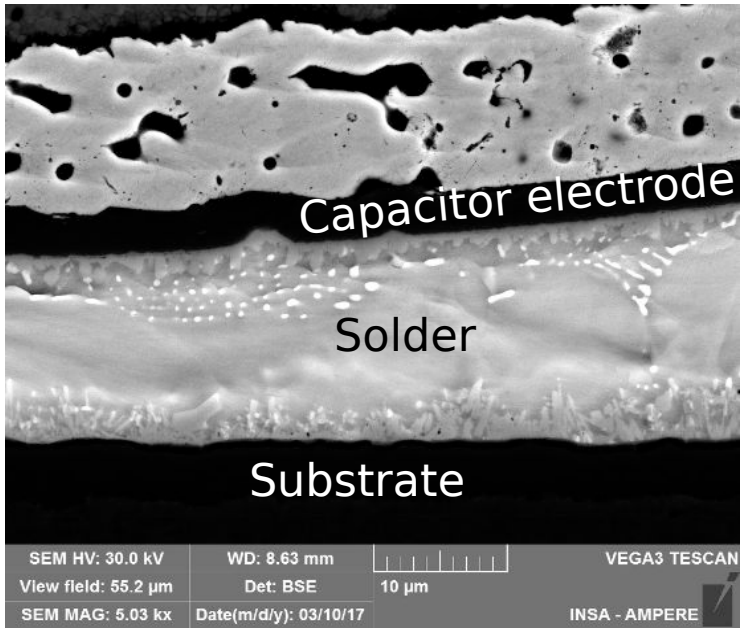
Cyclage -55/+175 °C, 1500 cycles

- Les IMC interfaciaux sont continus
- Fissures entre les IMC et la brasure
- S'observe aussi côté condensateur

Haut droit : stockage, bas droit : cyclage.

Vieillissement haute température de brasures [10] – 3





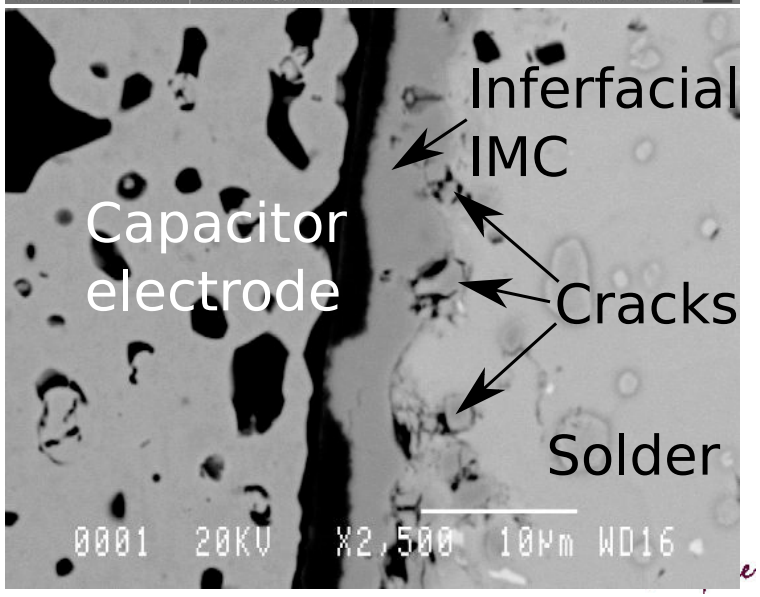
Stockage 175 °C, 310 h

- Les IMC interfaciaux sont continus
- Pas de fissuration

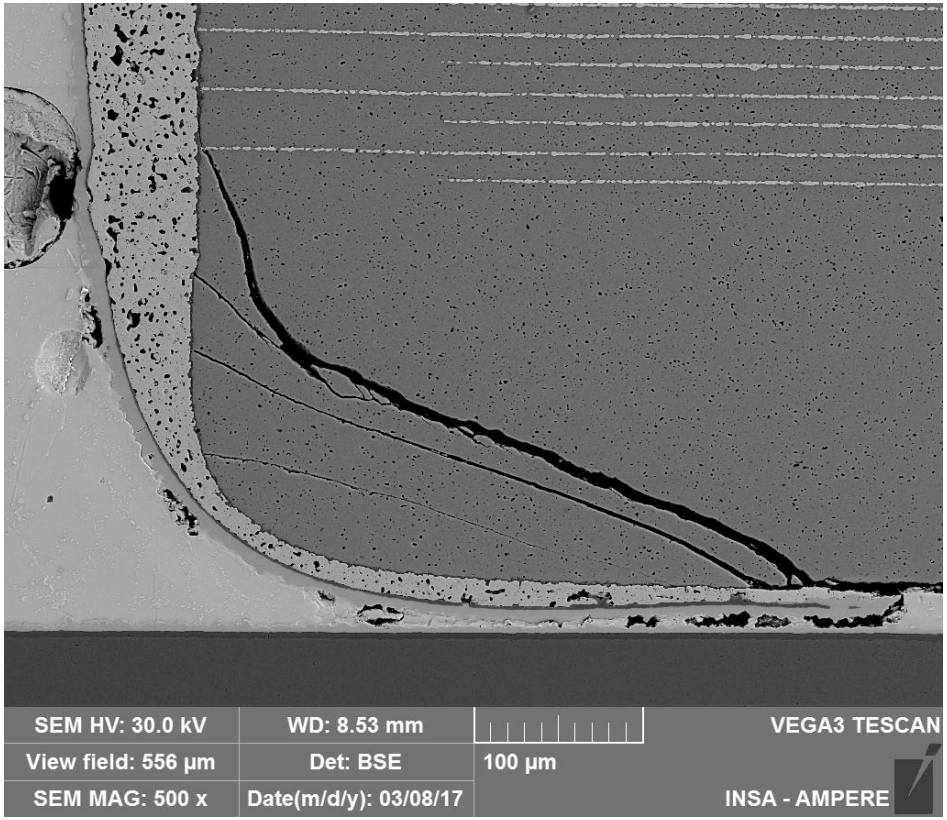
Cyclage -55/+175°C, 1500 cycles

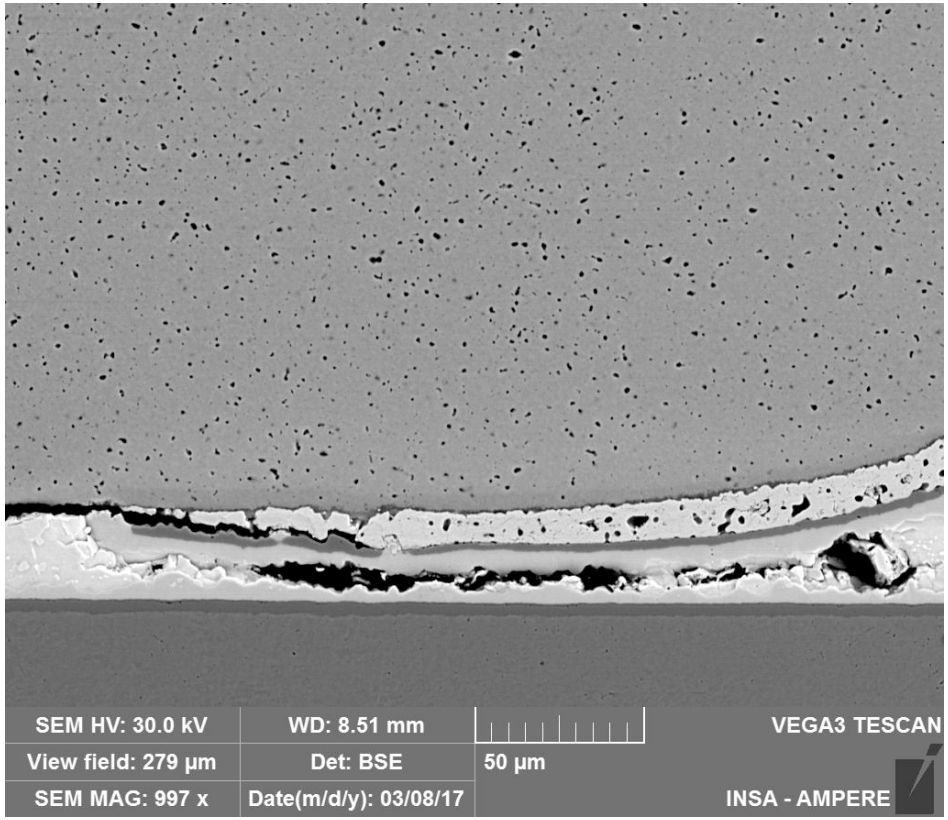
- Les IMC interfaciaux sont continus
- Fissures entre les IMC et la brasure
- S'observe aussi côté condensateur

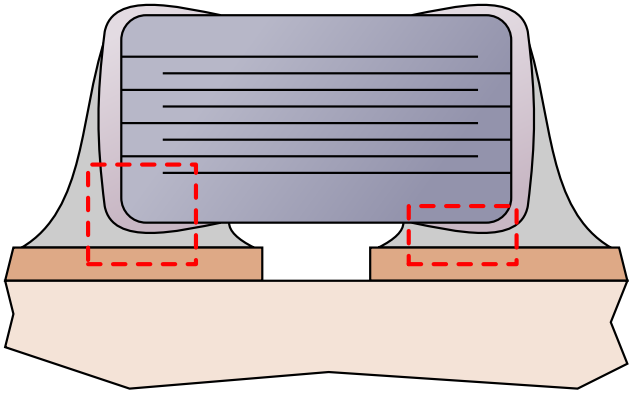
Haut droit : stockage, bas droit : cyclage.



Vieillissement haute température de brasures [10] – 4



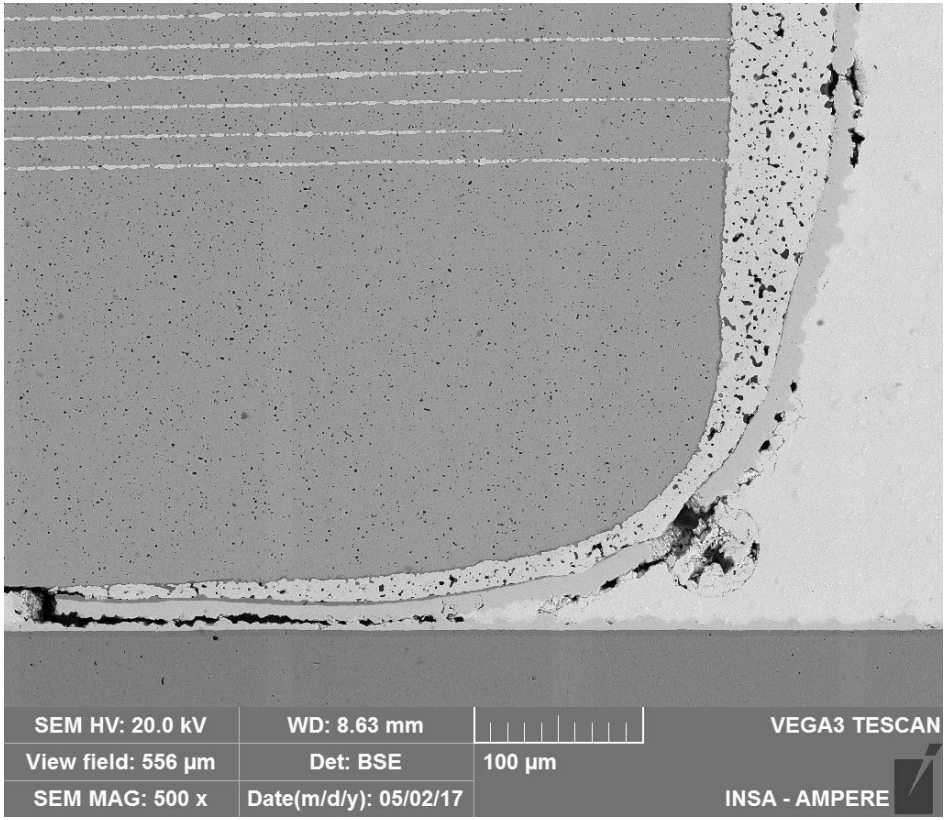


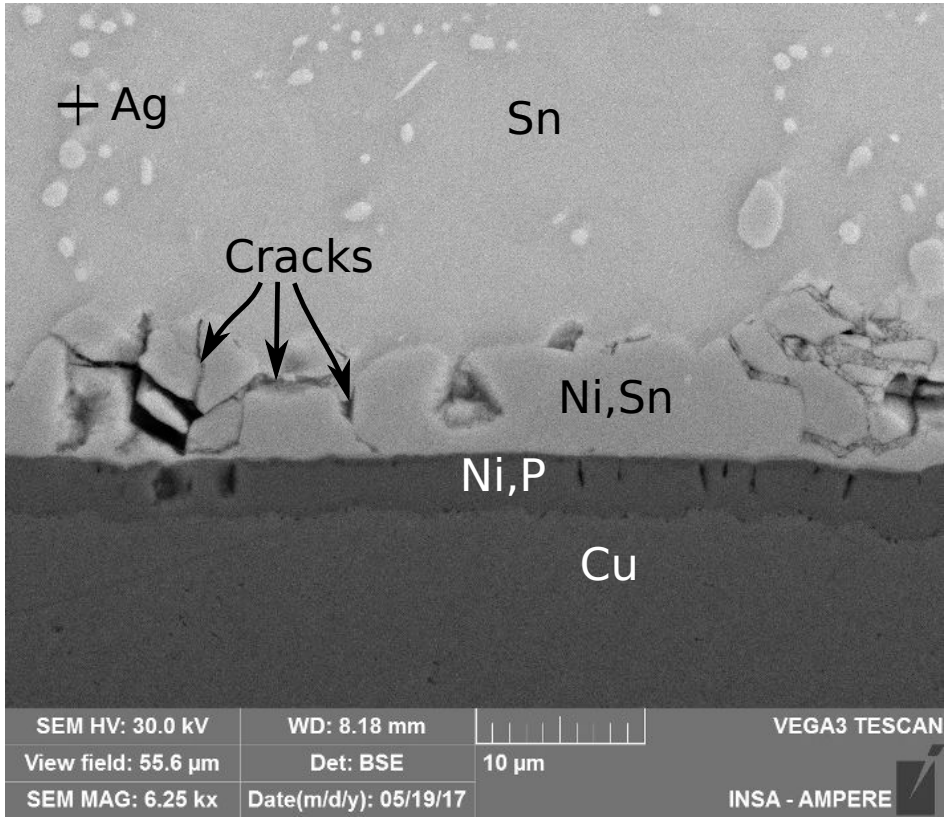


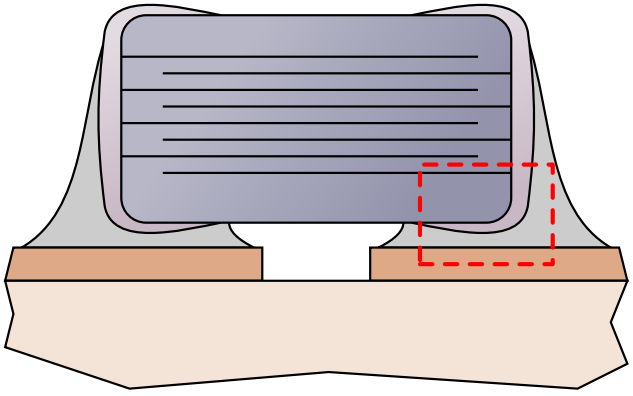
stockage 175 °C, 1000 h

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

Vieillissement haute température de brasures [10] – 4



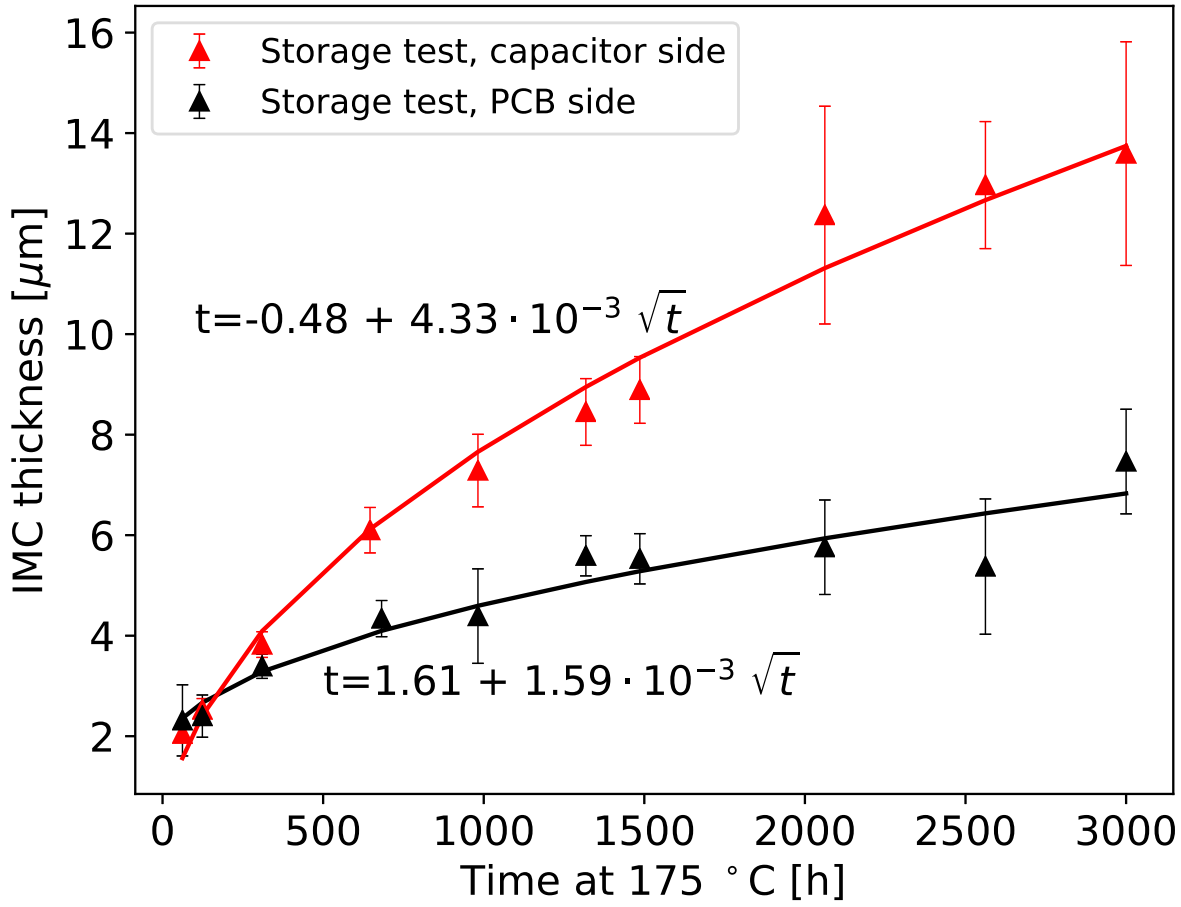




Stockage 175 °C, 2562 h

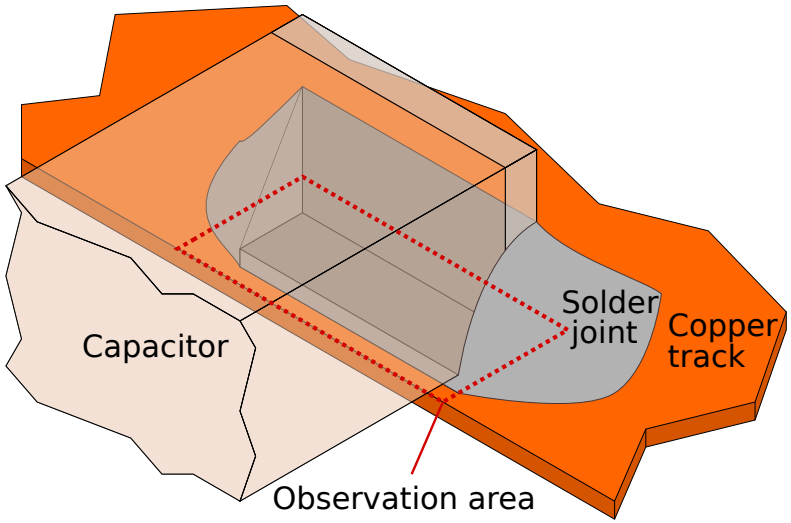
- Les IMC croissent là où c'est possible
- Les fissures continuent à se propager
- Elles se produisent aussi dans les IMC

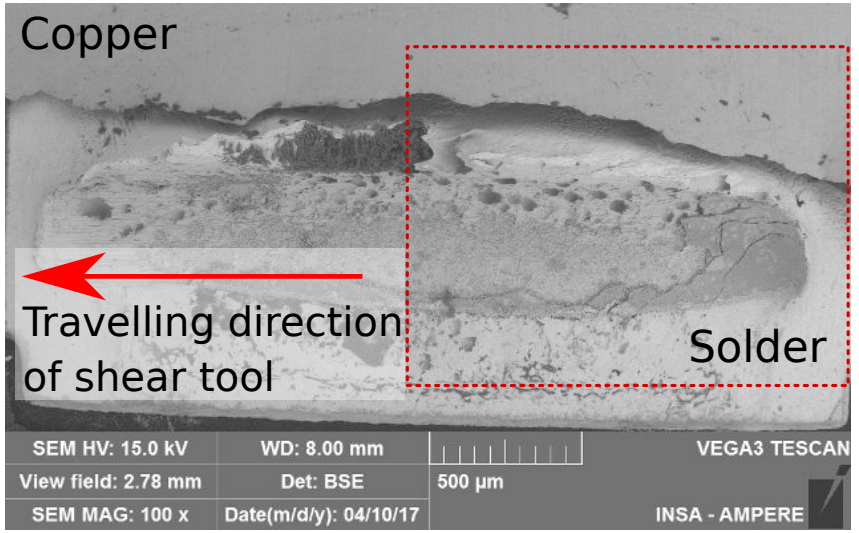
Vieillissement haute température de brasures [10] – 5



- Mesure sur images MEB, en 40 points, sur 4 zones
- Par endroits, la croissance est limitée par les fissures
- Finition du PCB : Ni/Au (ENIG), des condensateurs : Ni/Sn

Vieillissement haute température de brasures [10] – 6





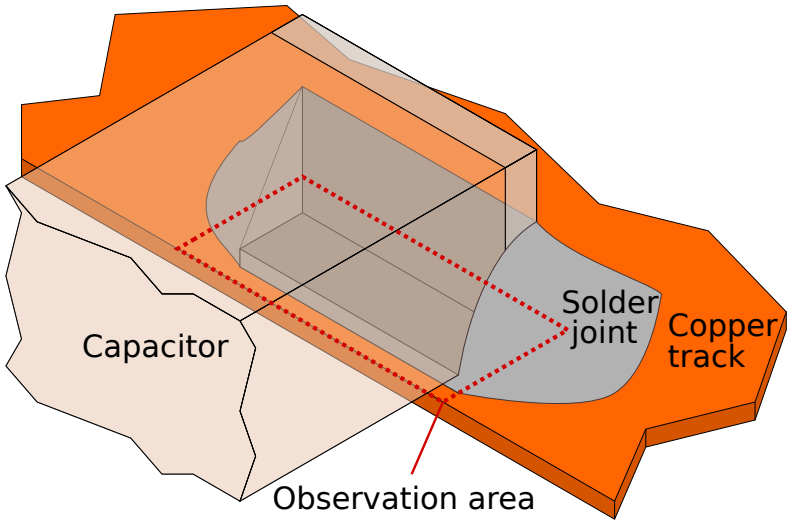
- Tenue cisaillement : 10 MPa, après 2062 h, $\approx$ 70 % de t_0

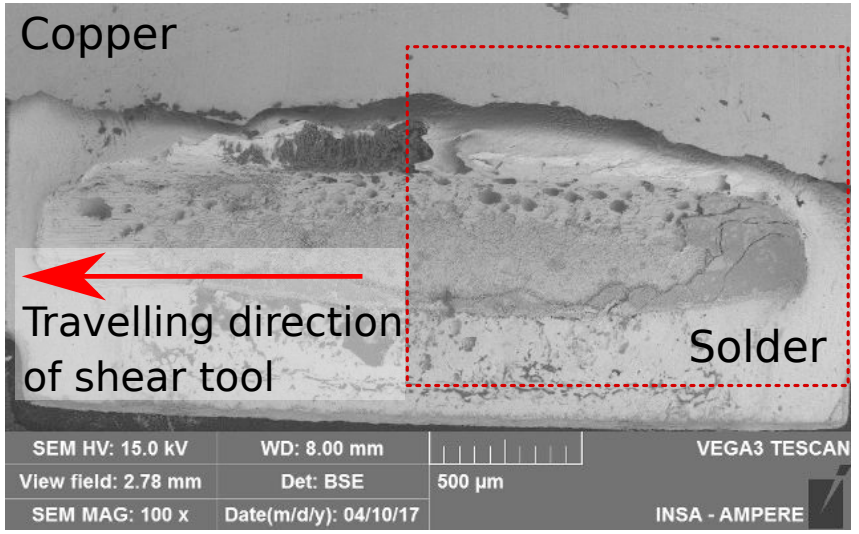
A : Sous le condensateur : fissuration continue

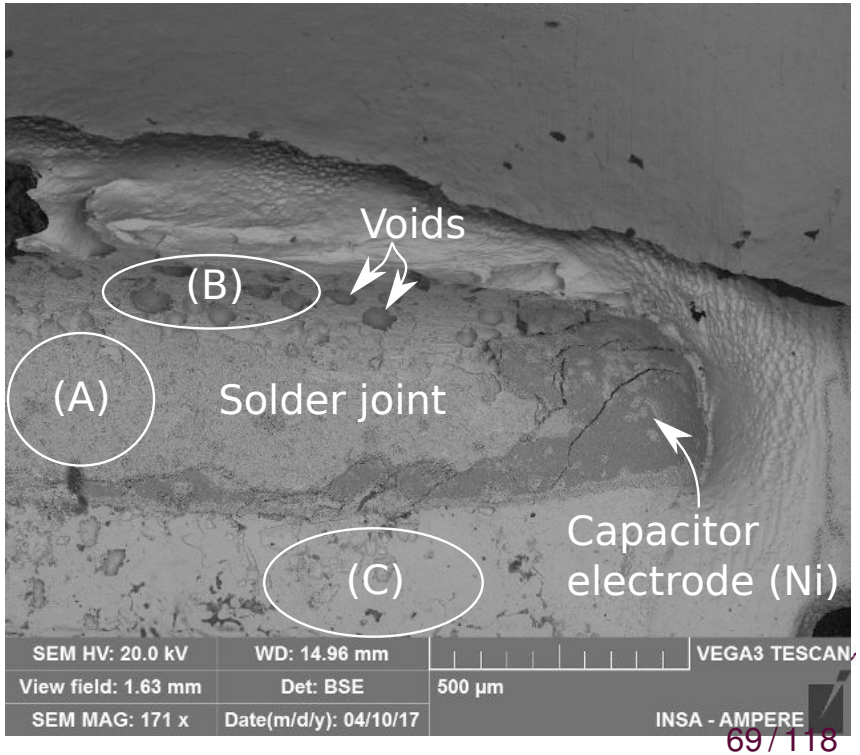
B : Côté du joint : larges vacuoles contact par endroits, (ex. coin)

C : Sous le condensateur : aucune attache

Vieillissement haute température de brasures [10] – 6







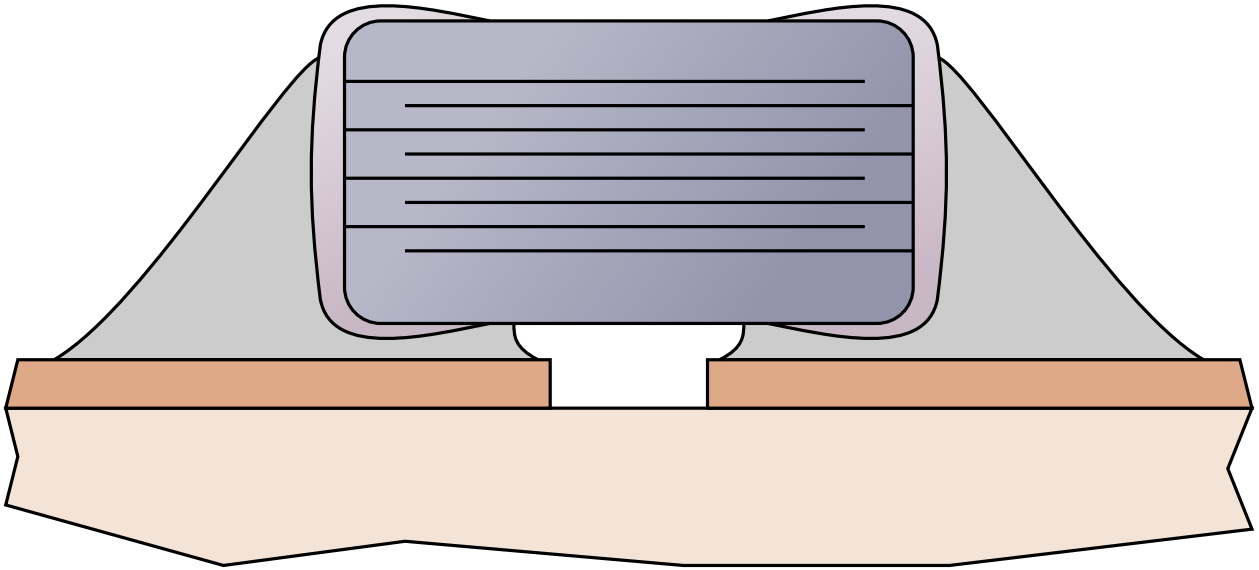
- Tenue cisaillement : 10 MPa, après 2062 h, ≈ 70 % de t_0

A : Sous le condensateur : fissuration continue

B : Côté du joint : larges vacuoles contact par endroits, (ex. coin)

C : Sous le condensateur : aucune attache

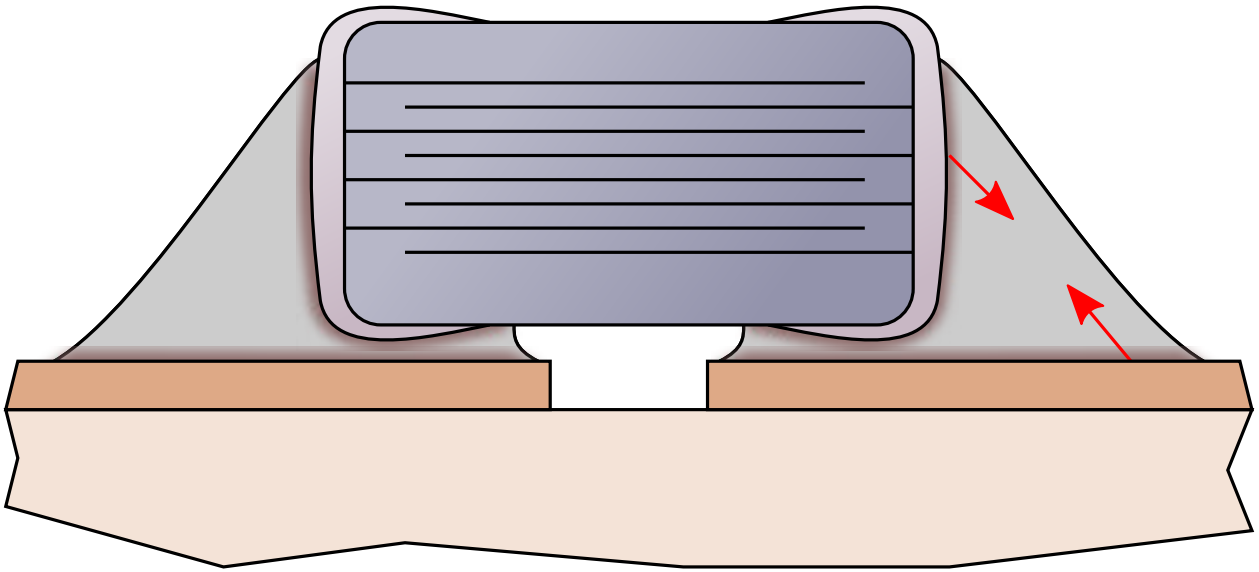
Vieillissement haute température de brasures [10] – 7

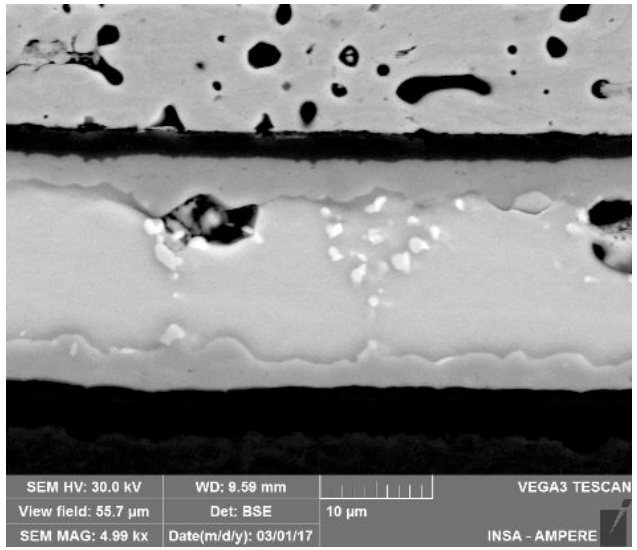


Mécanismes du vieillissement isotherme :

- 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
- Solution possible :
  - « Piédestal » de brasure plus épais
  - Nécessite des essais ou une modélisation mécanothermique

Vieillissement haute température de brasures [10] – 7

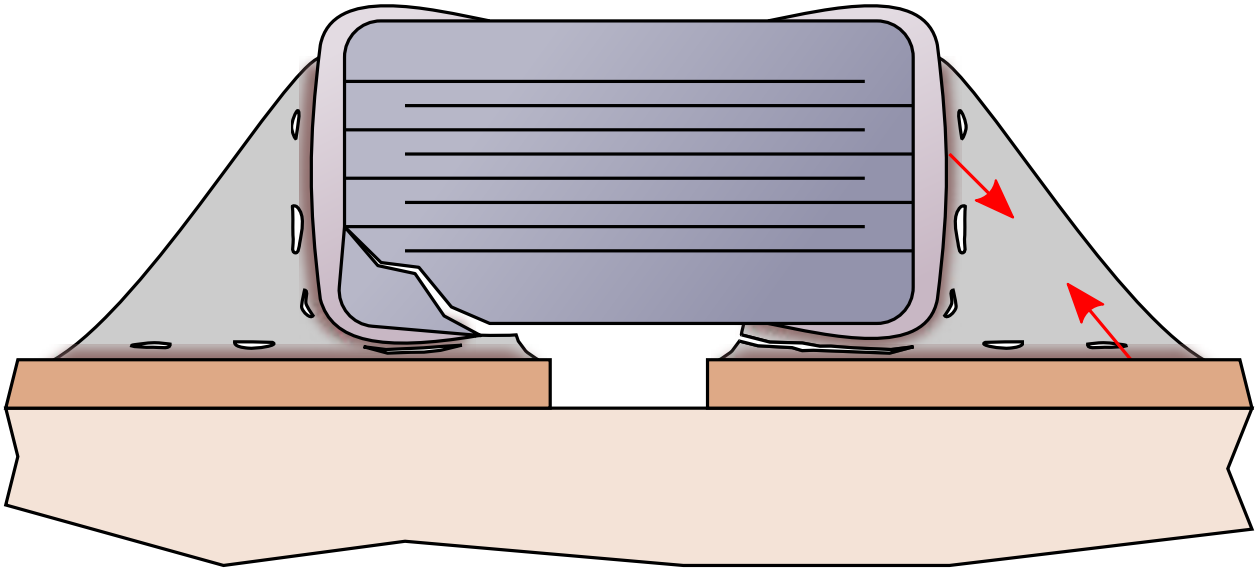


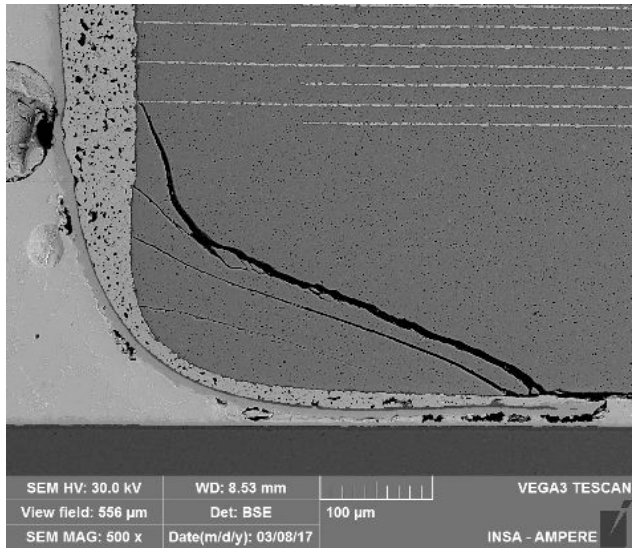


Mécanismes du vieillissement isotherme :

- 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
- Solution possible :
  - « Piédestal » de brasure plus épais
  - Nécessite des essais ou une modélisation mécanothermique

Vieillissement haute température de brasures [10] – 7

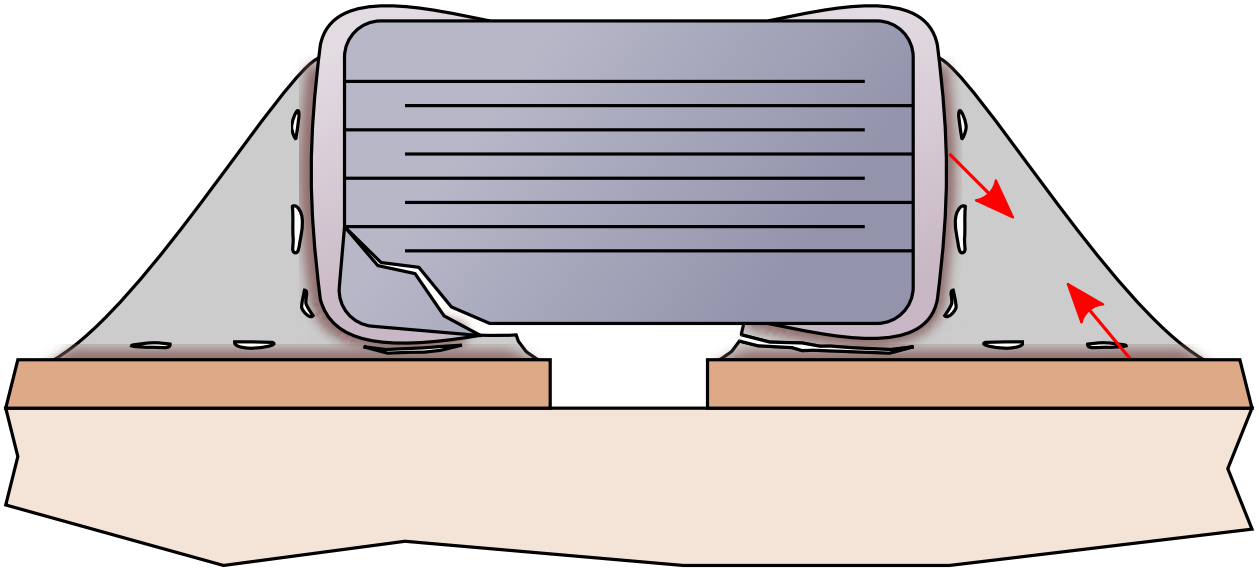




Mécanismes du vieillissement isotherme :

- 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
- Solution possible :
  - « Piédestal » de brasure plus épais
  - Nécessite des essais ou une modélisation mécanothermique

Vieillissement haute température de brasures [10] – 7



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
- Solution possible :
  - « Piédestal » de brasure plus épais
  - Nécessite des essais ou une modélisation mécanothermique

Vieillissement haute température de brasures [10] – 8

- À 175 °C, les joints de brasure SAC 305 se dégradent rapidement
  - Particulièrement vrai en cyclage (2000 cycles max.)
- Vitesse de croissance des IMC compatible avec [11] :
  - Pas de nouveau mécanisme de défaillance
  - La dégradation est plus rapide à 175 °C qu'à 125 °C ou 150 °C.
- Concernant la tenue mécanique :
  - La fissuration est observée en cyclage et en stockage
  - Elle est plus rapide en cyclage

➜ **La SAC 305 fond à** 217 °C**, mais même sans cyclage, elle ne peut fonctionner longtemps à** 175 °C**…**

Vieillissement haute température de brasures [10] – 8

- À 175 °C, les joints de brasure SAC 305 se dégradent rapidement
  - Particulièrement vrai en cyclage (2000 cycles max.)
- Vitesse de croissance des IMC compatible avec [11] :
  - Pas de nouveau mécanisme de défaillance
  - La dégradation est plus rapide à 175 °C qu'à 125 °C ou 150 °C.
- Concernant la tenue mécanique :
  - La fissuration est observée en cyclage et en stockage
  - Elle est plus rapide en cyclage

➜ **La SAC 305 fond à** 217 °C**, mais même sans cyclage, elle ne peut fonctionner longtemps à** 175 °C**…**

Vieillissement haute température de brasures [10] – 8

- À 175 °C, les joints de brasure SAC 305 se dégradent rapidement
  - Particulièrement vrai en cyclage (2000 cycles max.)
- Vitesse de croissance des IMC compatible avec [11] :
  - Pas de nouveau mécanisme de défaillance
  - La dégradation est plus rapide à 175 °C qu'à 125 °C ou 150 °C.
- Concernant la tenue mécanique :
  - La fissuration est observée en cyclage et en stockage
  - Elle est plus rapide en cyclage

➜ **La SAC 305 fond à 217 °C, mais même sans cyclage, elle ne peut fonctionner longtemps à 175 °C…**

Vieillissement haute température de brasures [10] – 8

- À 175 °C, les joints de brasure SAC 305 se dégradent rapidement
  - Particulièrement vrai en cyclage (2000 cycles max.)
- Vitesse de croissance des IMC compatible avec [11] :
  - Pas de nouveau mécanisme de défaillance
  - La dégradation est plus rapide à 175 °C qu'à 125 °C ou 150 °C.
- Concernant la tenue mécanique :
  - La fissuration est observée en cyclage et en stockage
  - Elle est plus rapide en cyclage

➜ **La SAC 305 fond à** 217 °C**, mais même sans cyclage, elle ne peut fonctionner longtemps à** 175 °C**…**

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 $T_{fonctionnement}$.

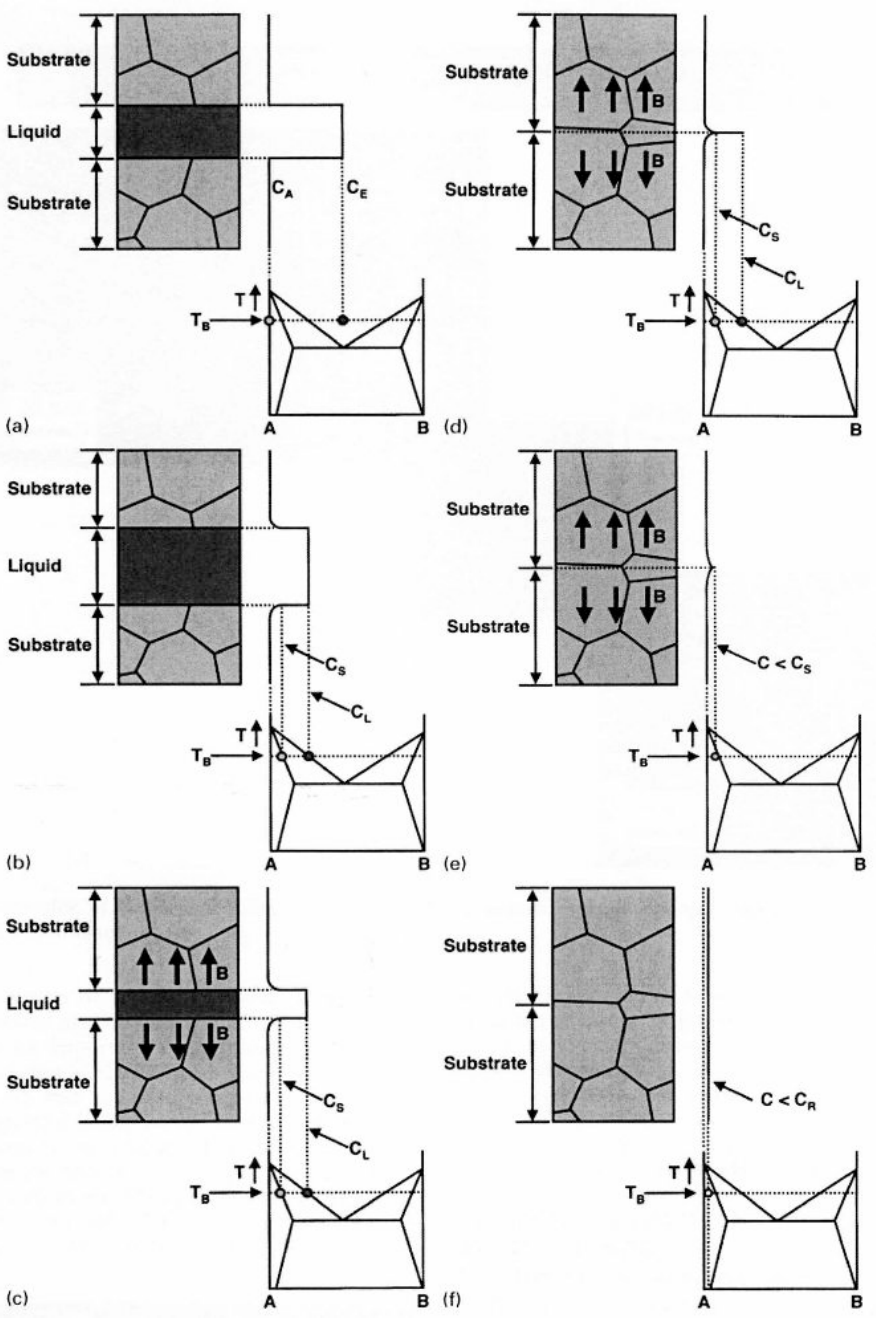
- Brasure : $T_{process} > T_{fusion} > T_{fonctionnement}$ par définition.
- Frittage :
  - phénomène de diffusion (habituellement à l'état solide) ;
  - $T_{process} < T_{fusion}$.
- Soudure en phase liquide transitoire (TLPB, SLID) :
  - fusion d'un matériau de liaison ;
  - diffusion du liquide dans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

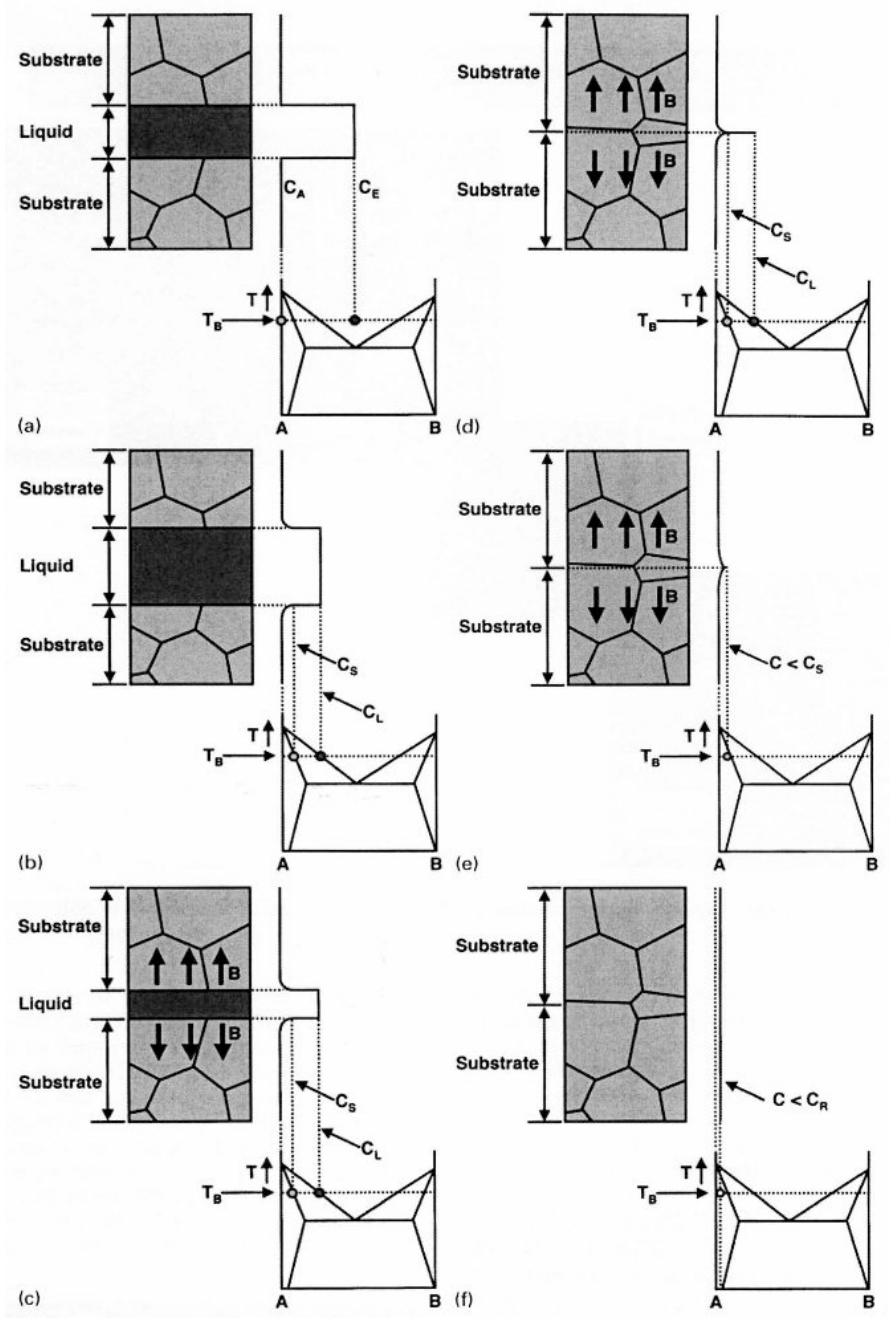
Soudure en phase liquide transitoire



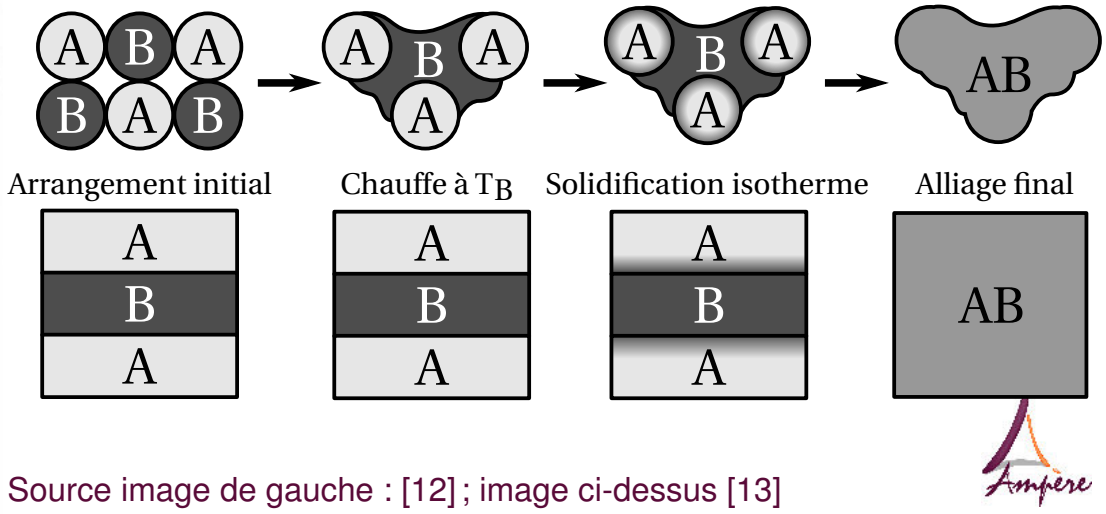
- Matériau fusible : Sn, In
- Matériau substrat : Cu, Ag, Au
- Épaisseurs :
  - Substrat : dizaines de microns
  - Couche fusible : microns
- Alternative : utilisation de poudres
- Mise au point complexe (IMC)

Source image de gauche : [12] ; image ci-dessus [13]

Soudure en phase liquide transitoire

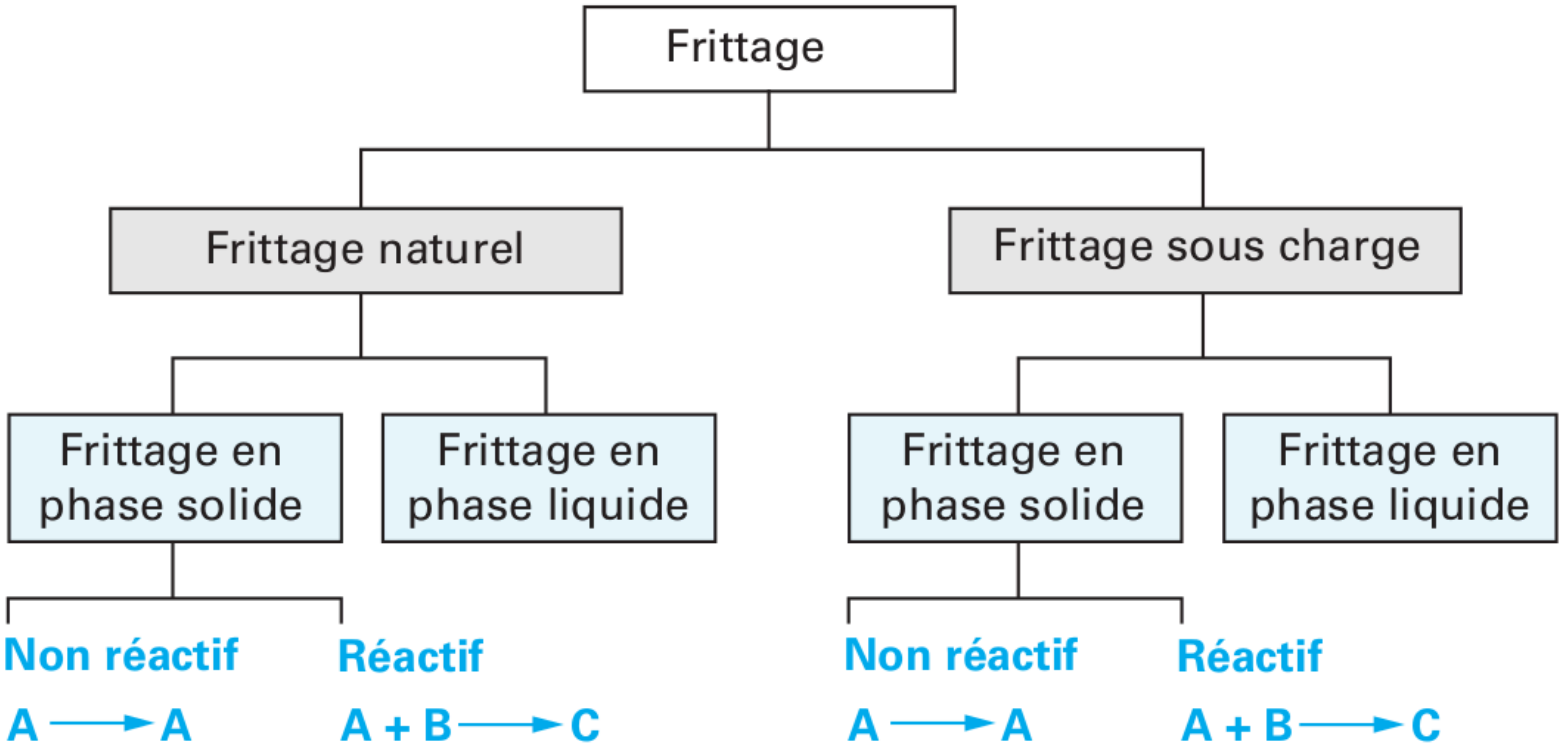


- Matériau fusible : Sn, In
- Matériau substrat : Cu, Ag, Au
- Épaisseurs :
  - Substrat : dizaines de microns
  - Couche fusible : microns
- Alternative : utilisation de poudres
- Mise au point complexe (IMC)



Source image de gauche : [12] ; image ci-dessus [13]

Le frittage, une alternative à la brasure

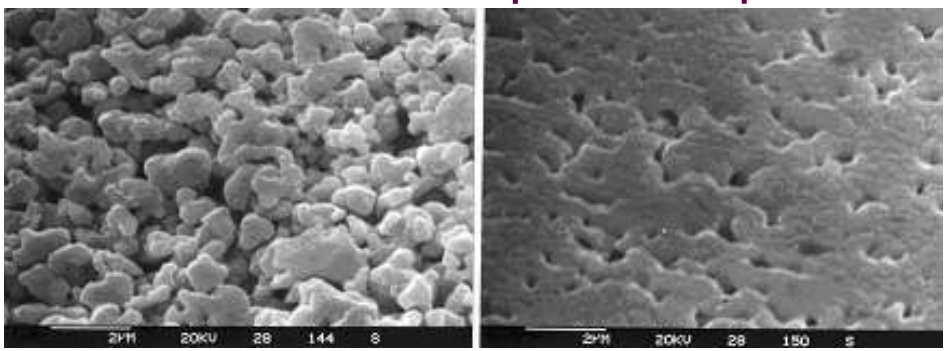


Source : Article Frittage techniques de l'ingénieur [14]

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

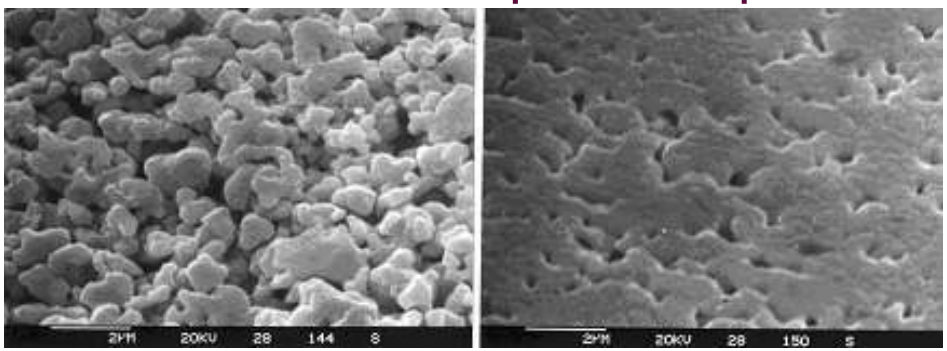
Densification sans phase liquide



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

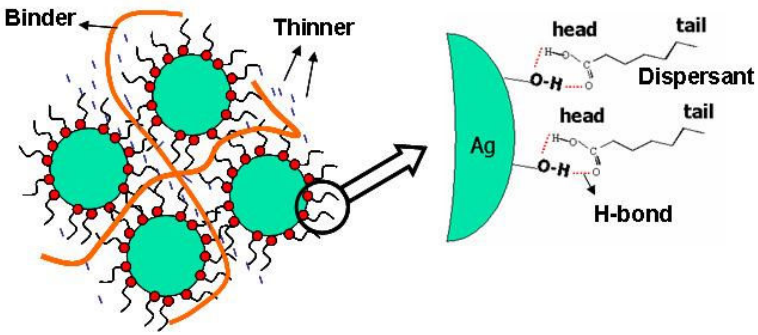
Attache de puce par frittage d'argent

Densification sans phase liquide



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

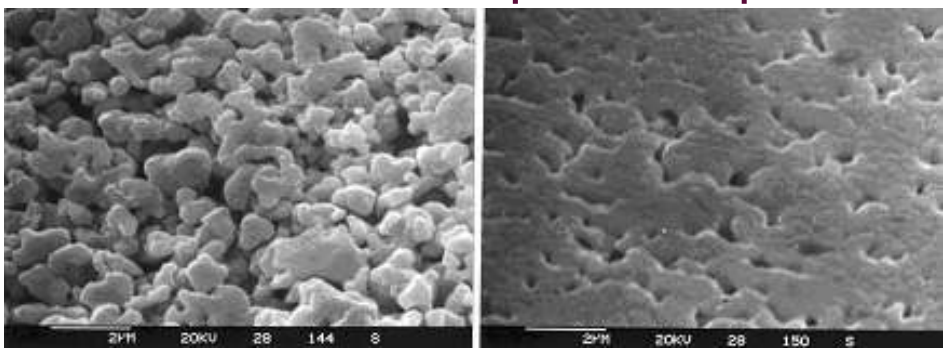
On rajoute de quoi faire une pâte



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

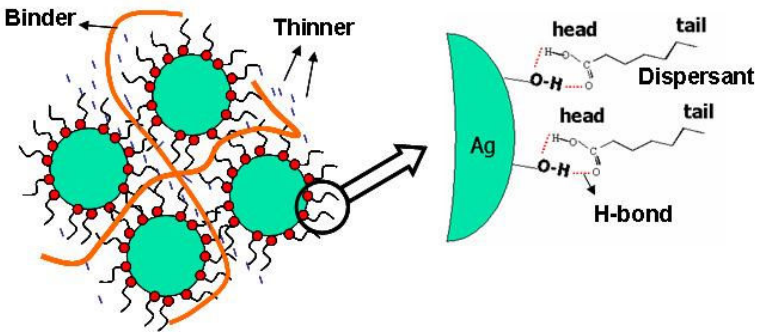
Attache de puce par frittage d'argent

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 :

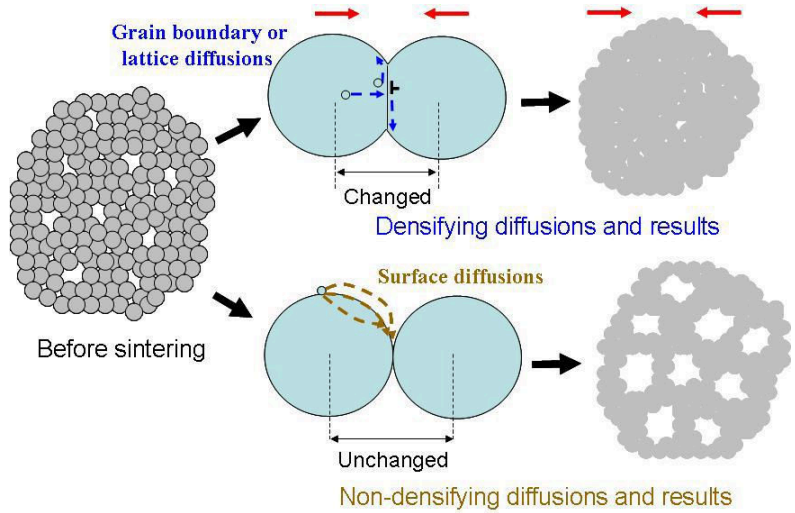
- Les conditions de séchage
- Les rampes de montée en température
- L'atmosphère de frittage
- La taille de puce
- …

Quelques problèmes qu'on peut rencontrer

- Composés organiques mal évacués
  - Leur ébullition cause des vides
  - Il faut les évacuer doucement et complètement
- Mauvaise densification
  - Manque d'uniformité, frittage partiel
  - Modification du profil de température
- Pas de phénomène de mouillage
  - Peu ou pas de tolérance aux erreurs d'alignement
  - L'écoulement de la pâte est contrôlé par la pression

Quelques problèmes qu'on peut rencontrer

- Composés organiques mal évacués
  - Leur ébullition cause des vides
  - Il faut les évacuer doucement et complètement
- Mauvaise densification
  - Manque d'uniformité, frittage partiel
  - Modification du profil de température

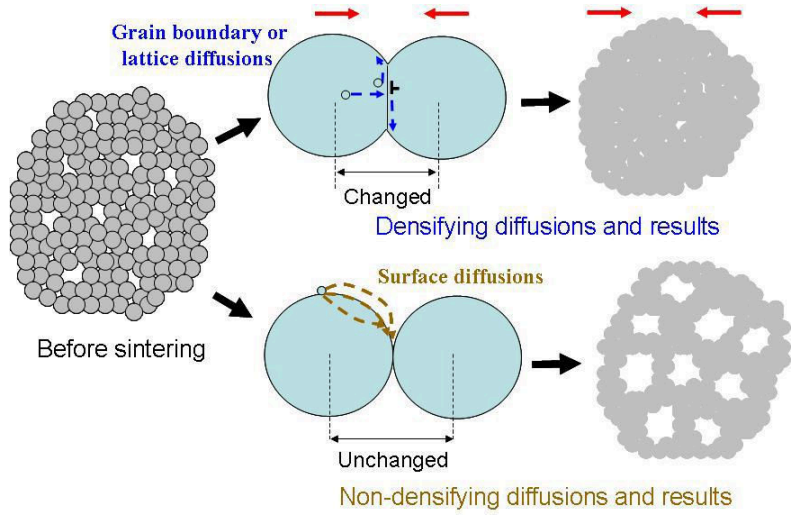


Bai, G. "Low-Temperature Sintering of Nanoscale Silver Paste for Semiconductor Device Interconnection" Thèse Virginia Tech., 2005

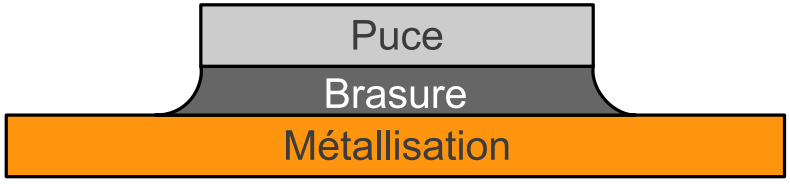
- Pas de phénomène de mouillage
  - Peu ou pas de tolérance aux erreurs d'alignement
  - L'écoulement de la pâte est contrôlé par la pression

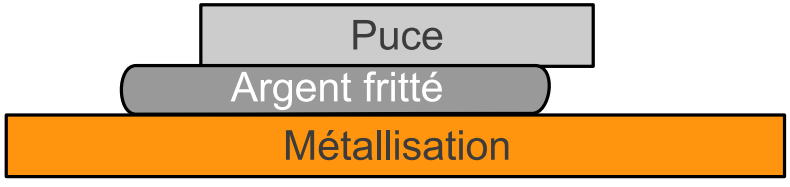
Quelques problèmes qu'on peut rencontrer

- Composés organiques mal évacués
  - Leur ébullition cause des vides
  - Il faut les évacuer doucement et complètement
- Mauvaise densification
  - Manque d'uniformité, frittage partiel
  - Modification du profil de température



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





- Pas de phénomène de mouillage
  - Peu ou pas de tolérance aux erreurs d'alignement
  - L'écoulement de la pâte est contrôlé par la pression

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.

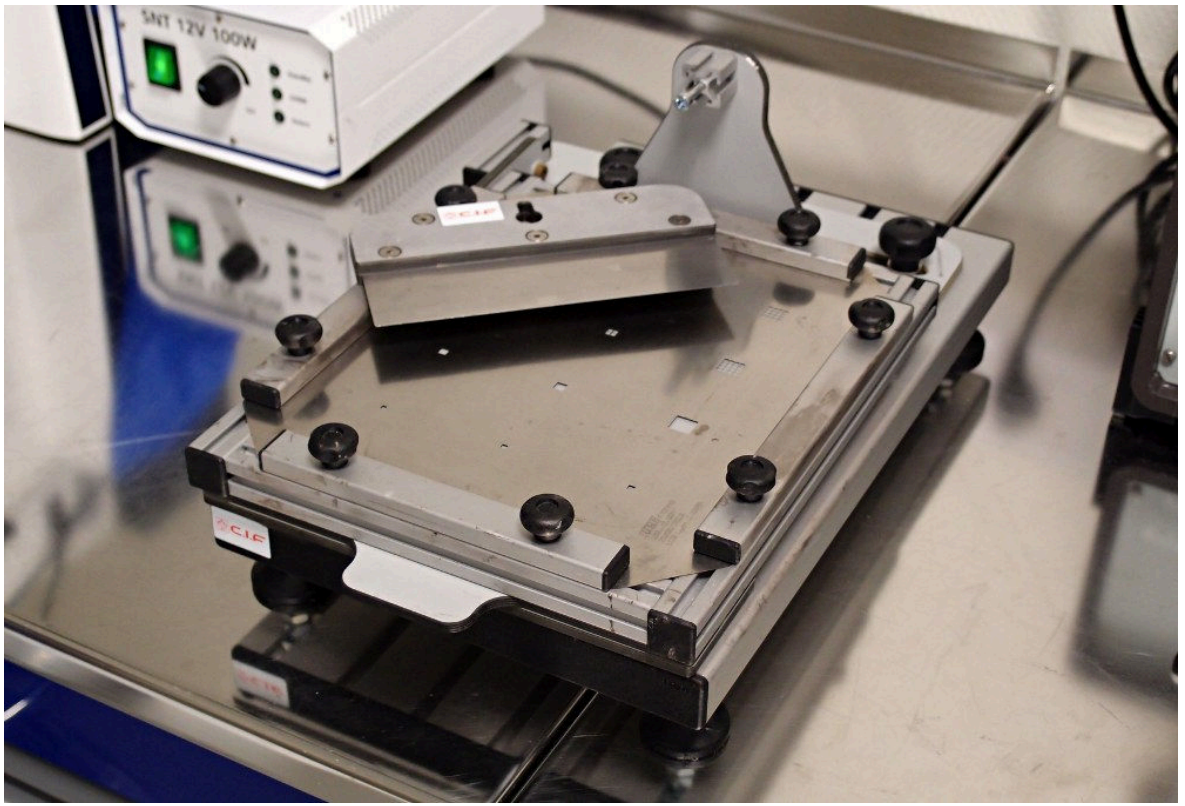
Dépôt de la pâte

Système très simple :

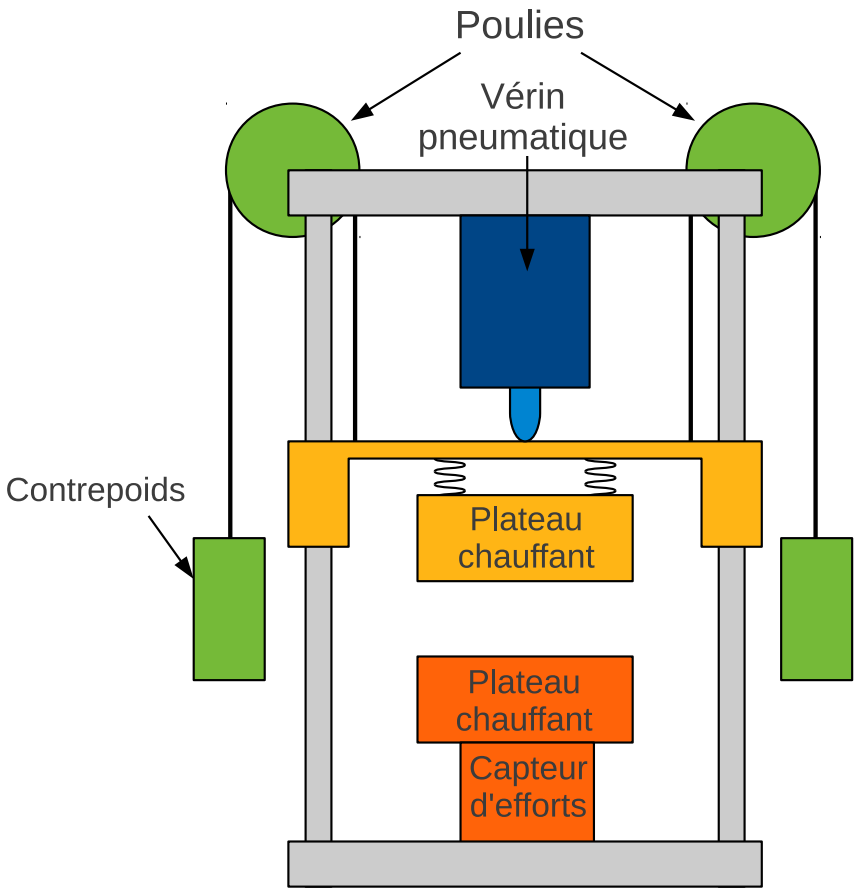
- Pochoirs métalliques, de 50 ou 100 μm
- Raclette manuelle.
- Taille $\approx$ A4

Autres méthodes :

- Seringue
- film

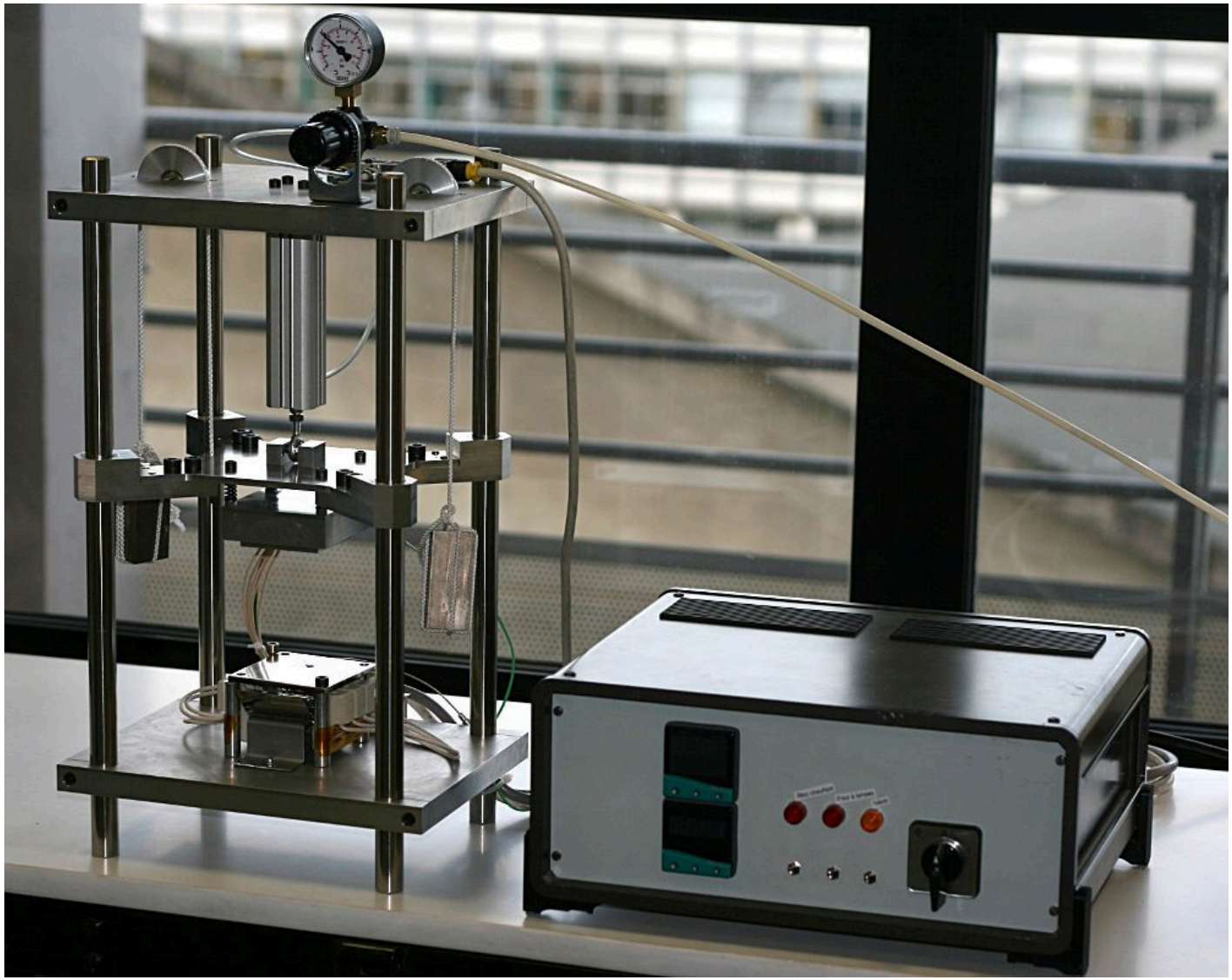


Développement spécifique d'une presse :

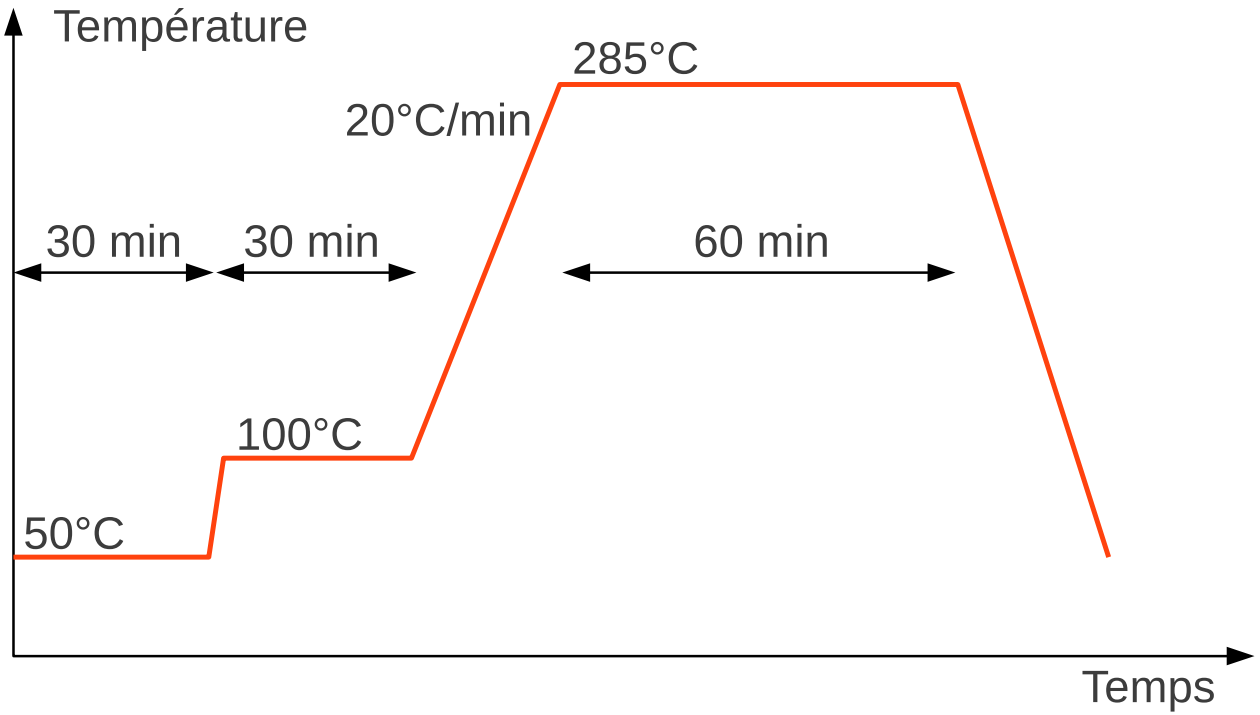


- Deux plateaux chauffants
  - Fonctionnement indépendant ou couplé
  - Rampes jusqu'à 50 °C/min
- Vérin pneumatique
  - Faible force mini (5 N avec contrepoids)
  - Force maxi : 1 kN
  - Déclenchement du vérin automatique
- Plateaux guidés pour le parallélisme
- Capteur de force

Frittage – 2



Frittage – 3, exemple de cycle



- Pression appliquée dès le début de cycle
- Procédure prévue pour les petites puces (<3×3 mm^2)
- Séchage long, rampe rapide
- Refroidissement naturel (1h)
- Plateaux en contact direct avec les puces
- Process sous air.

Les pâtes/film d'argent



Source : Bai, G. [15]

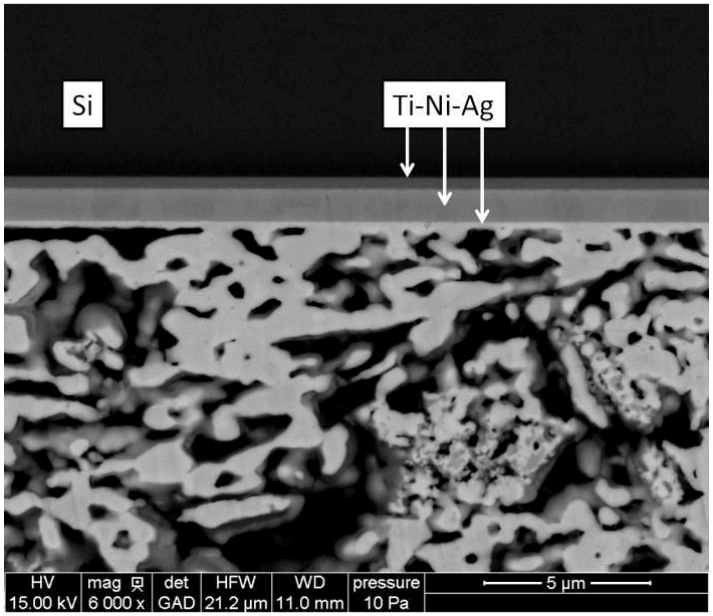
Deux grandes classes de matériaux :

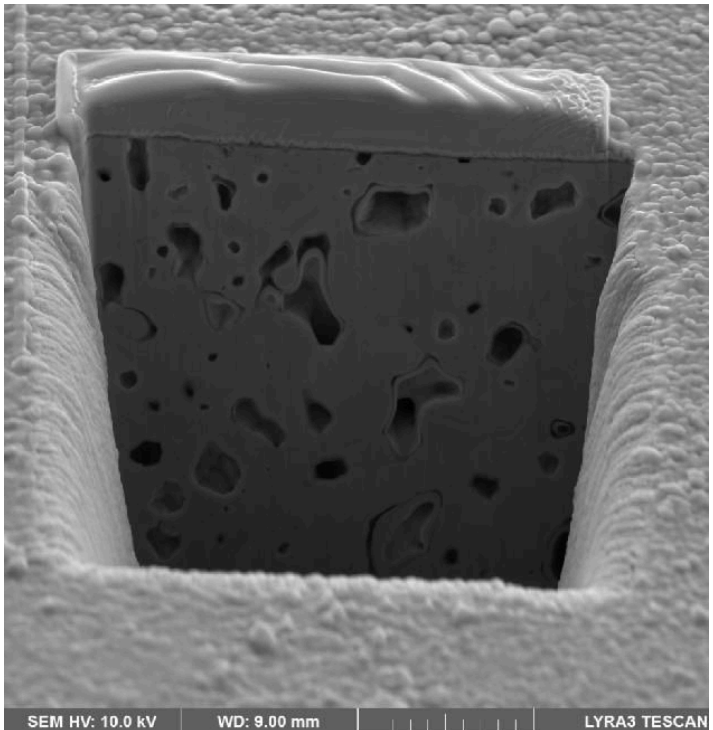
- Nanoparticules :
  - Frittage basse ou sans pression
  - Toxicité potentielle
  - plus cher
- Microparticules
  - frittage forte pression (40 MPa), parfois sans pression possible
  - peu cher, non toxique

Mais il y a aussi des hybrides :

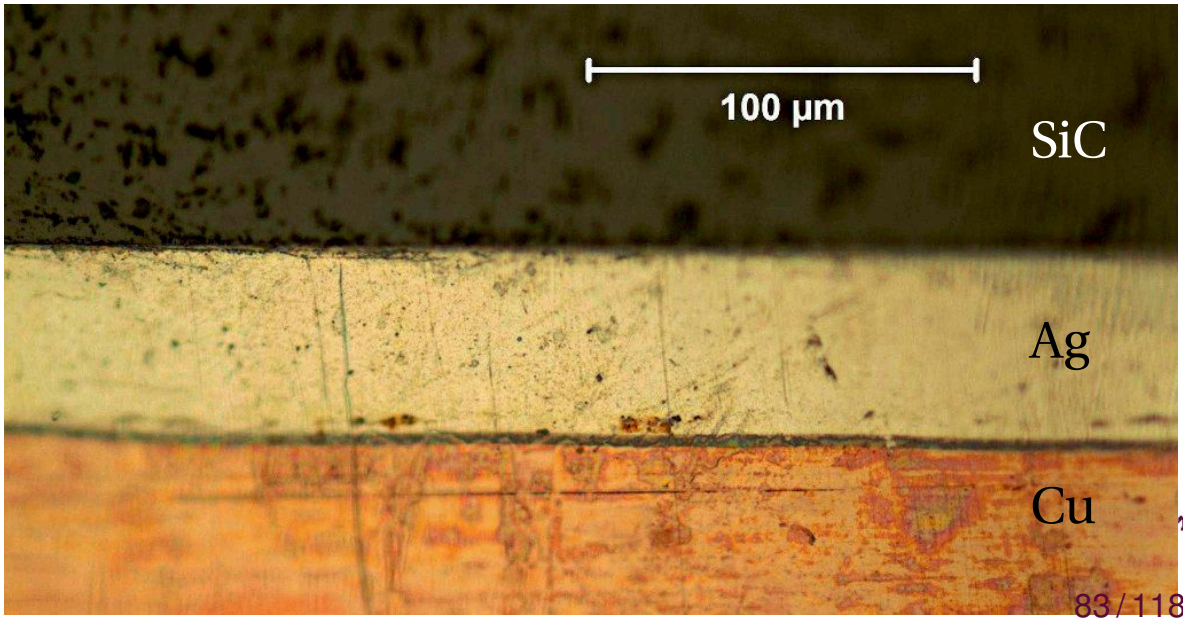
- additifs qui libèrent des nanoparticules pour favoriser le frittage
- Ajout de résine pour combler les vacuoles, fritter sans pression et permettre l'adhésion sur silicium

Attaches frittées [16, 17, 18]

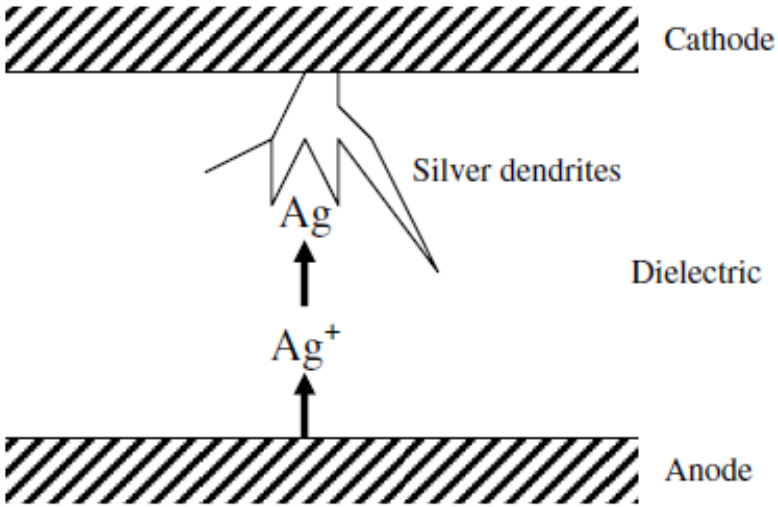




- Procédé robuste (sous air)
- Robuste en cyclage et vieillissement
  - La haute température poursuit le frittage
  - Pas d'intermétalliques
  - Finition idéale : Ag
- Joints plus ou moins poreux
  - Attention à la mesure de porosité



Le frittage et la haute température : problème de migration



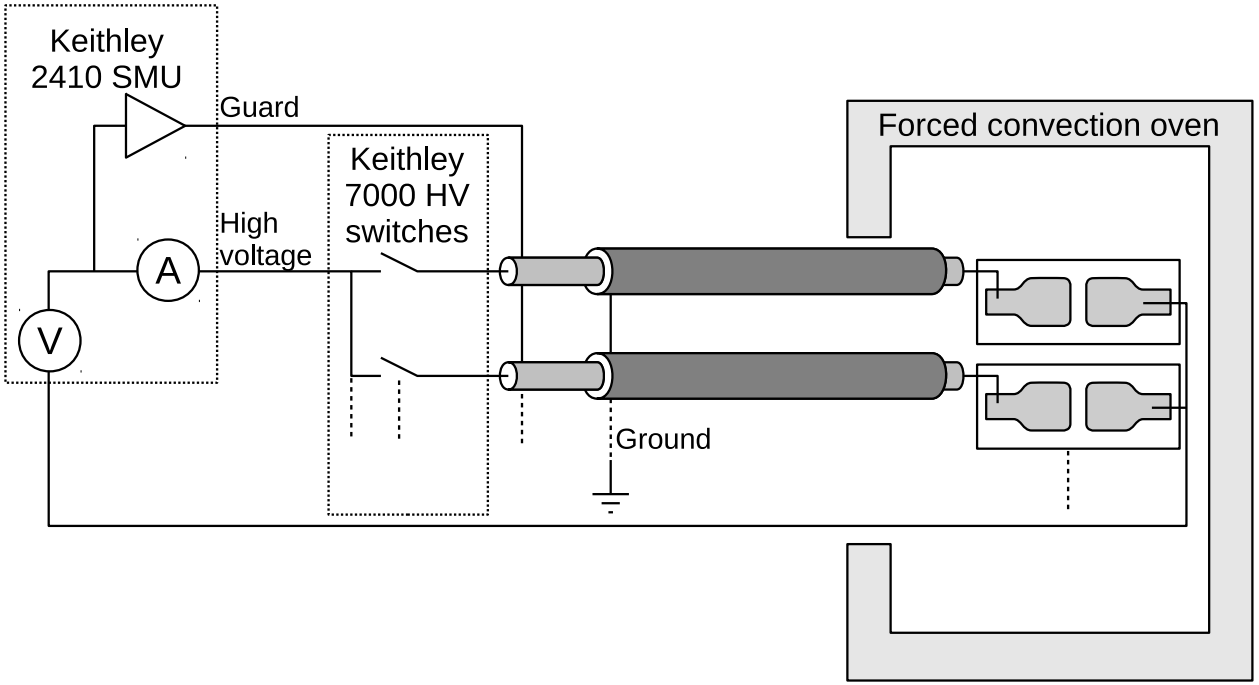
Source : Yang S et al. Initial stage of silver electrochemical migration degradation. Microelectron Reliab 2006 ;46(9) :1915–21.

Les atomes d'argent peuvent migrer en présence simultanée de :

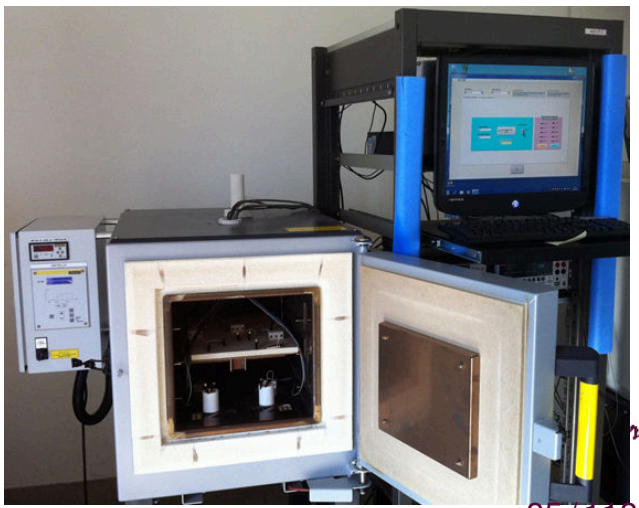
- Haute température
- Oxygène/Humidité
- Champ électrique

L'argent peut alors former des filaments qui suivent le champ électrique, causant des courts-circuits !

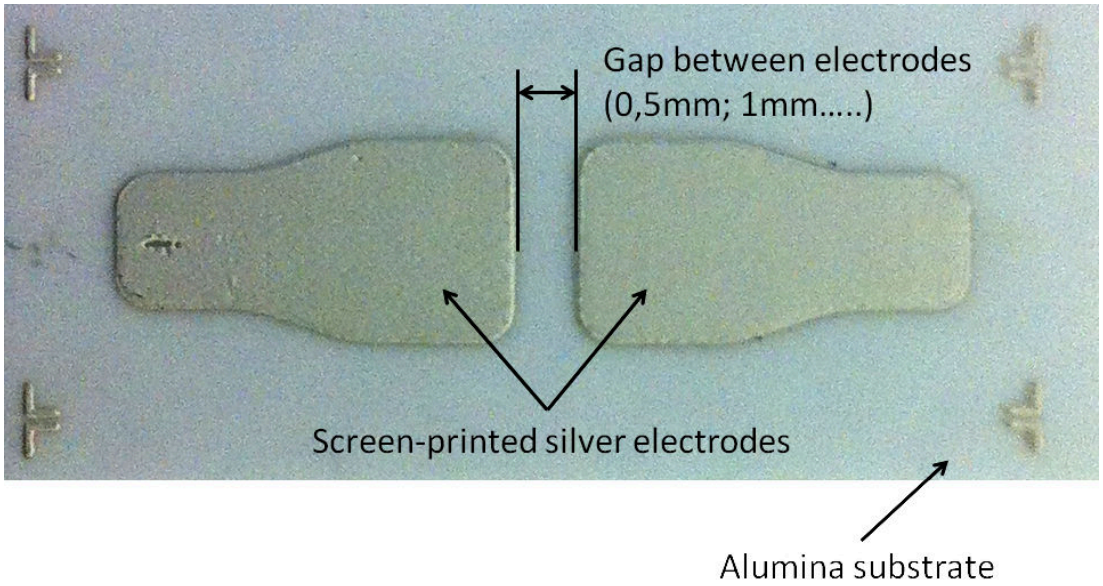
Banc de caractérisation pour la migration [19]



- Jusqu'à 10 échantillons polarisés simultanément et caractérisés régulièrement
- polarisation $\leq$1100 V, précision $<$ 10 nA
- Tests effectués à 300 °C

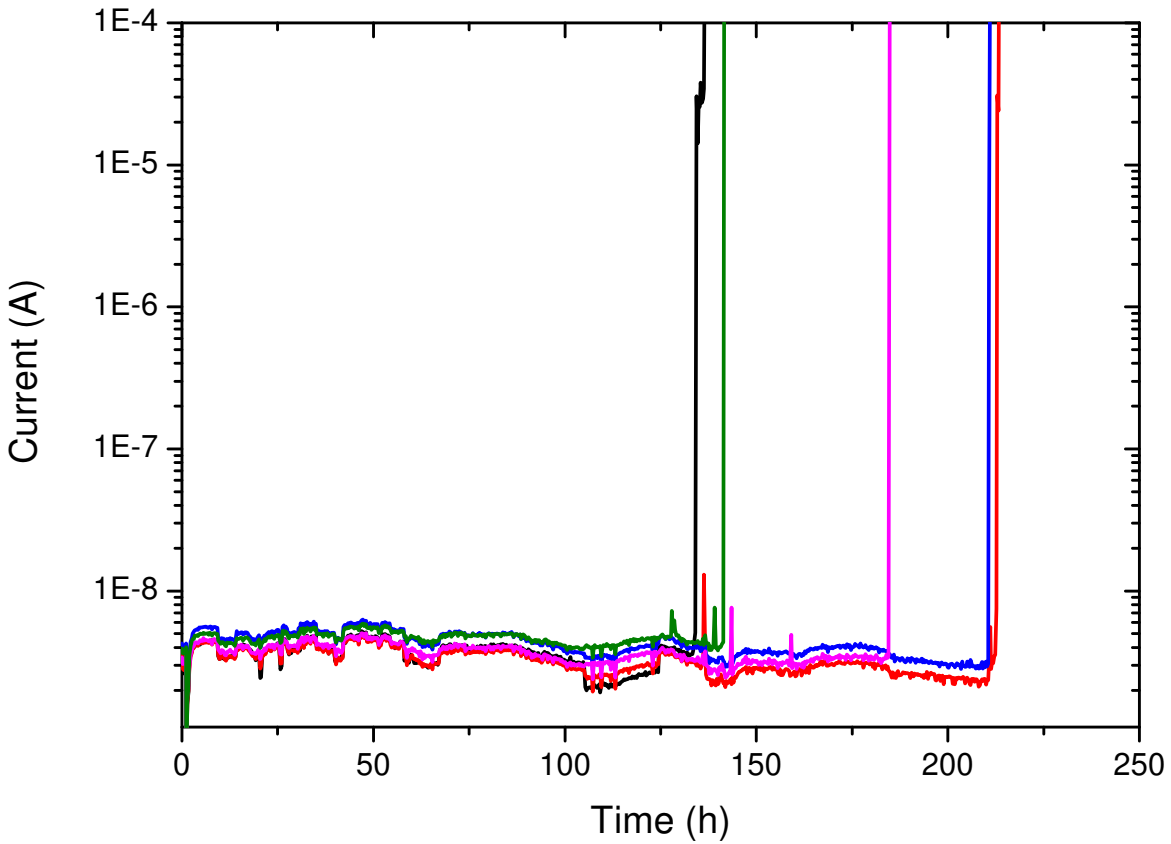


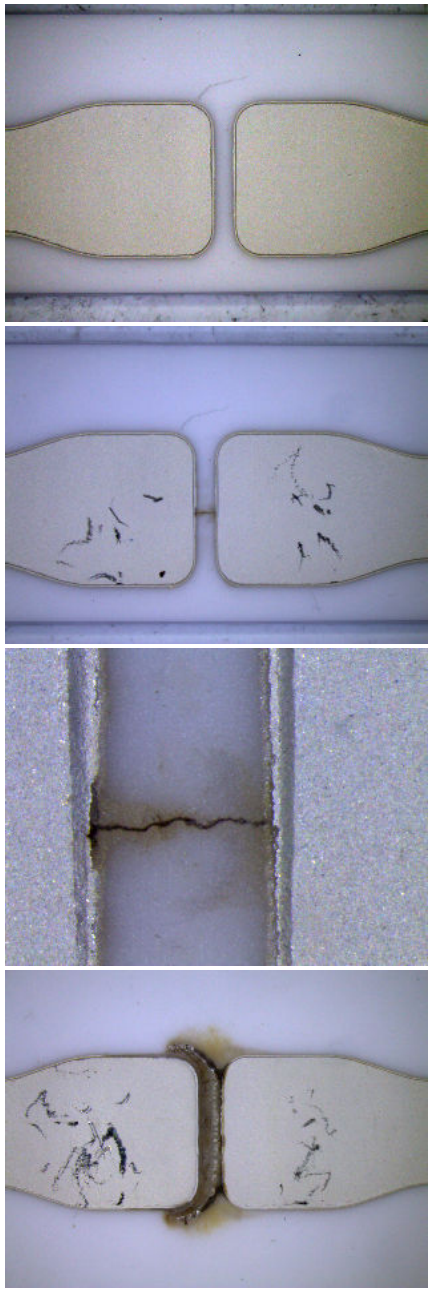
Migration – Véhicules de test



- Sérigraphie de pâte d'argent sur alumine, frittage 300 °C
- Espace entre électrodes : 0.5, 1, 1.5, 2 mm
- Encapsulation :
  - Sans protection
  - Protégé avec une couche de 20 μm de parylene HT
- 5 échantillons par configuration

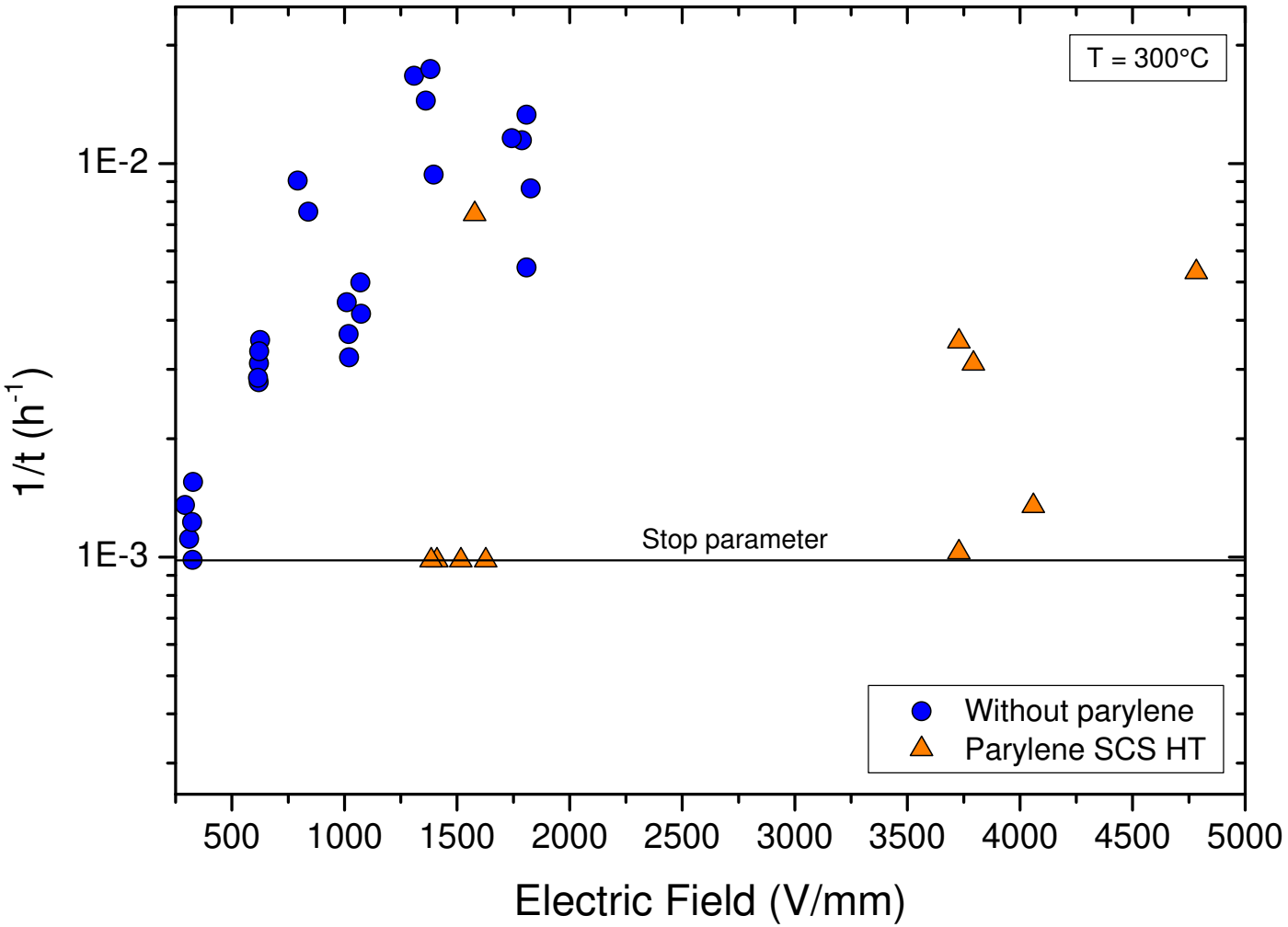
Migration – Resultats : Échantillons non protégés





- Le courant reste négligeable jusqu'au court-circuit
- Grande variation entre échantillons identiques :
  - Forme des filaments
  - Temps avant défaillance

Migration – Résultats



- Faible temps avant défaillance sans protection (100–1000 h)
- Amélioration nette avec l'encapsulation parylène
- Essais stoppés après 1000 h si pas de défaillance

Conclusions sur les attaches de puces HT

- La brasure est intrinsèquement limitée ($T_{process} > T_{utilisation}$)
  - Problème de la température homologue
- Deux solutions alternatives :
  - TLPB : prometteur, bon marché, mais complexe à mettre en œuvre
  - Frittage :

Conclusions sur les attaches de puces HT

- La brasure est intrinsèquement limitée ($T_{process} > T_{utilisation}$)
  - Problème de la température homologue
- Deux solutions alternatives :
  - TLPB : prometteur, bon marché, mais complexe à mettre en œuvre
  - Frittage :
    - mise en œuvre aisée ;
    - relativement peu cher ;
    - compatible avec les finitions existantes ;
    - chimiquement stable ;
    - la migration reste un problème mineur, non rencontré sur des échantillons réalistes ;
    - en cours de développement à l'échelle industrielle.

Sommaire

Introduction

Composants

- semiconducteurs de puissance
- Circuits de commande
- Passifs

Packaging et Procédés

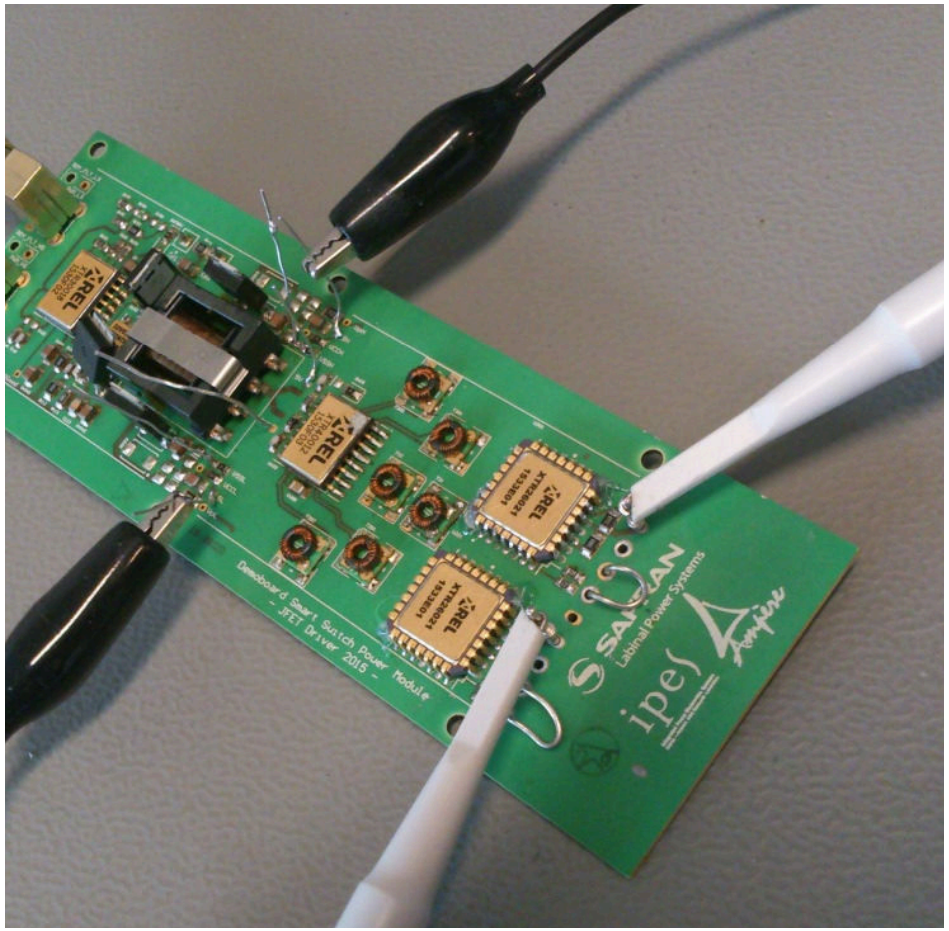
- Généralités Packaging
- Attache de composants
- Circuits imprimés

Conclusions

PCB haute température – Introduction [20]

Application : driver haute température pour des MOSFETs SiC

- Carte relativement complexe
  - Plusieurs CI
  - Gros composants magnétiques
  - Pas adapté à des substrats de puissance (DBC)
- Besoin de solution de prototypage
  - Fourniture simple
  - Bon marché
- Objectif : à terme 200 °C

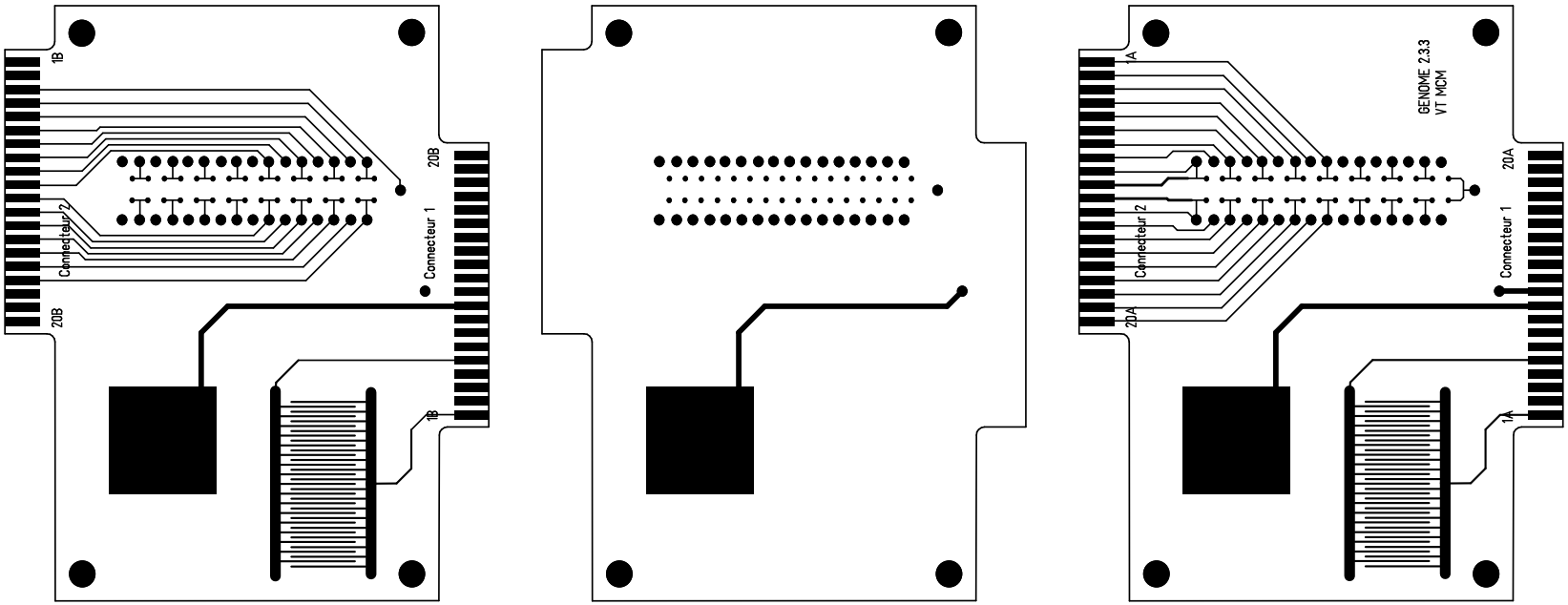


➜ Utilisation de circuits imprimés (PCB)

PCB haute température – Étude

- Étudier le comportement haute température de PCBs
  - Premiers essais à Ampère sur le vieillissement PCB
  - Travail sur le protocole d'essais
- Proposer une technologie PCB pour les drivers
  - Pas d'étude en cyclage
  - Étude sous air et sous azote pur

PCB Haute Température – Véhicules de Test



- PCB 6 couches, 70 μm Cu, finition Ni/Au (6 μm/80 nm)
  - Un jeu sur FR4 (Panasonic R-1755-V, T_G >170 °C)
  - Un jeu sur polyimide (Arlon 85N, T_G >250 °C)
- 3 motifs de test :
  - SIR (Surface isolation resistance), espacement 500 μm
  - Capa plane, 20x20 mm^2
  - Série de vias (450 μm de diamètre de trou)

PCB Haute Temp. – Conditions de vieillissement



Source : MMM



- Vieillissement isotherme (« stockage », température constante)
- Deux atmosphères de test :
  - Air (standard, four à convection forcée)
  - Faible taux d'oxygène
    (alimentation N_2, taux 0_2 maintenu sous <0.1 %)

PCB Haute Température – Caractérisation Électrique

- **Surface Isolation Resistance** :
  - Polarisation continue : 25 V/mm, avec des connexions HT (voir [20])
  - Caractérisation hebdomadaire hors du four
    (Keithley 2410 SMU, 200 MΩ max)
- **Motifs capacité plane**
  - Caractérisation hebdomadaire
    (Keysight E4990 impedance analyzer, 1–2 pF répétabilité)
  - Dispositif de mesure fixe (câbles BNC, connecteur edgeboard)
- **Résistance des vias**
  - Caractérisation hebdomadaire (Keithley 2410 SMU, 10 µΩ résolution)



Source : Keithley

PCB Haute Température – Caractérisation Électrique

- **Surface Isolation Resistance** :
  - Polarisation continue : 25 V/mm, avec des connexions HT (voir [20])
  - Caractérisation hebdomadaire hors du four
    (Keithley 2410 SMU, 200 MΩ max)
- **Motifs capacité plane**
  - Caractérisation hebdomadaire
    (Keysight E4990 impedance analyzer, 1–2 pF répétabilité)
  - Dispositif de mesure fixe (câbles BNC, connecteur edgeboard)
- **Résistance des vias**
  - Caractérisation hebdomadaire (Keithley 2410 SMU, 10 µΩ résolution)



Source : Keithley



Source : Keysight

PCB Haute Température – Caractérisation Électrique

- **Surface Isolation Resistance** :
  - Polarisation continue : 25 V/mm, avec des connexions HT (voir [20])
  - Caractérisation hebdomadaire hors du four
    (Keithley 2410 SMU, 200 MΩ max)
- **Motifs capacité plane**
  - Caractérisation hebdomadaire
    (Keysight E4990 impedance analyzer, 1–2 pF répétabilité)
  - Dispositif de mesure fixe (câbles BNC, connecteur edgeboard)
- **Résistance des vias**
  - Caractérisation hebdomadaire (Keithley 2410 SMU, 10 $\mu\Omega$ resolution)



Source : Keithley



Source : Keysight

PCB Haute Température – Caractérisation Physique



Source : Ohaus



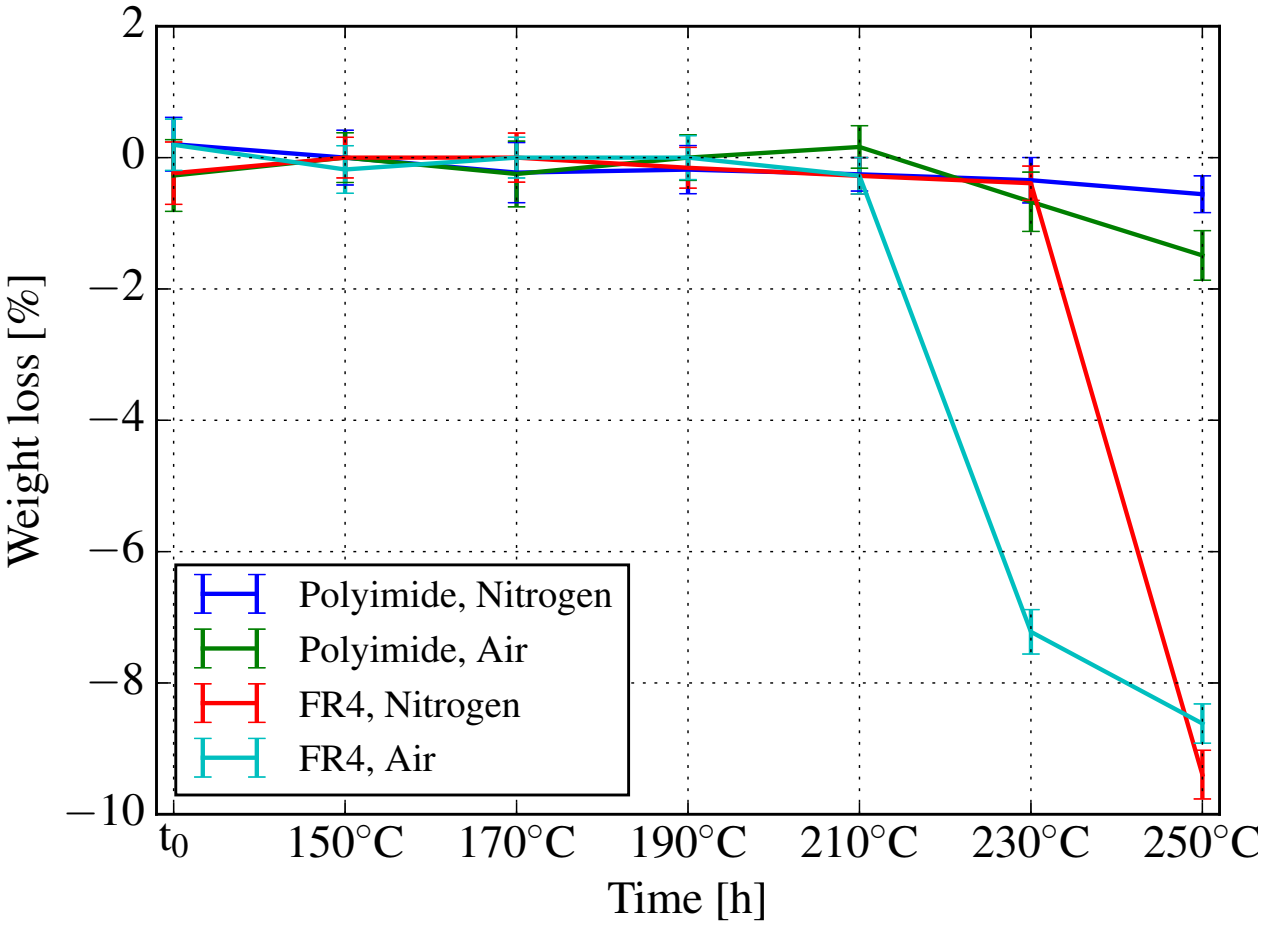
Source : Leica



Source : Presi

- Mesure de poids
  - Caractérisation hebdomadaire avec une balance résolution 1 mg
- Inspection Visuelle
  - Photographie hebdomadaire avec bino. Leica M205C
  - Balance des blancs et éclairage mémorisés
- Microsections

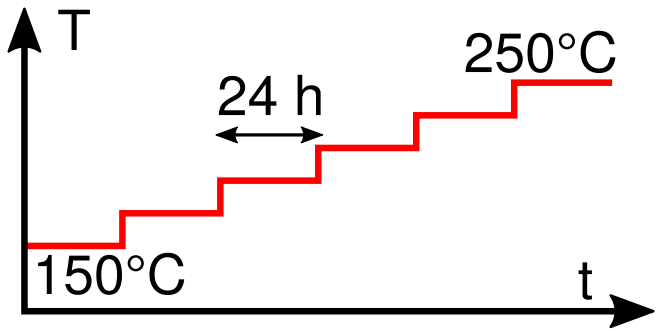
PCB Haute Température – Tests préliminaires



Step stress

Paliers de 24 h, 20 °C

De 150 à 250 °C



- Perte de poids mesurée sur de petits coupons (qques grammes)
- Pas de variation observée avant le pallier 230 °C

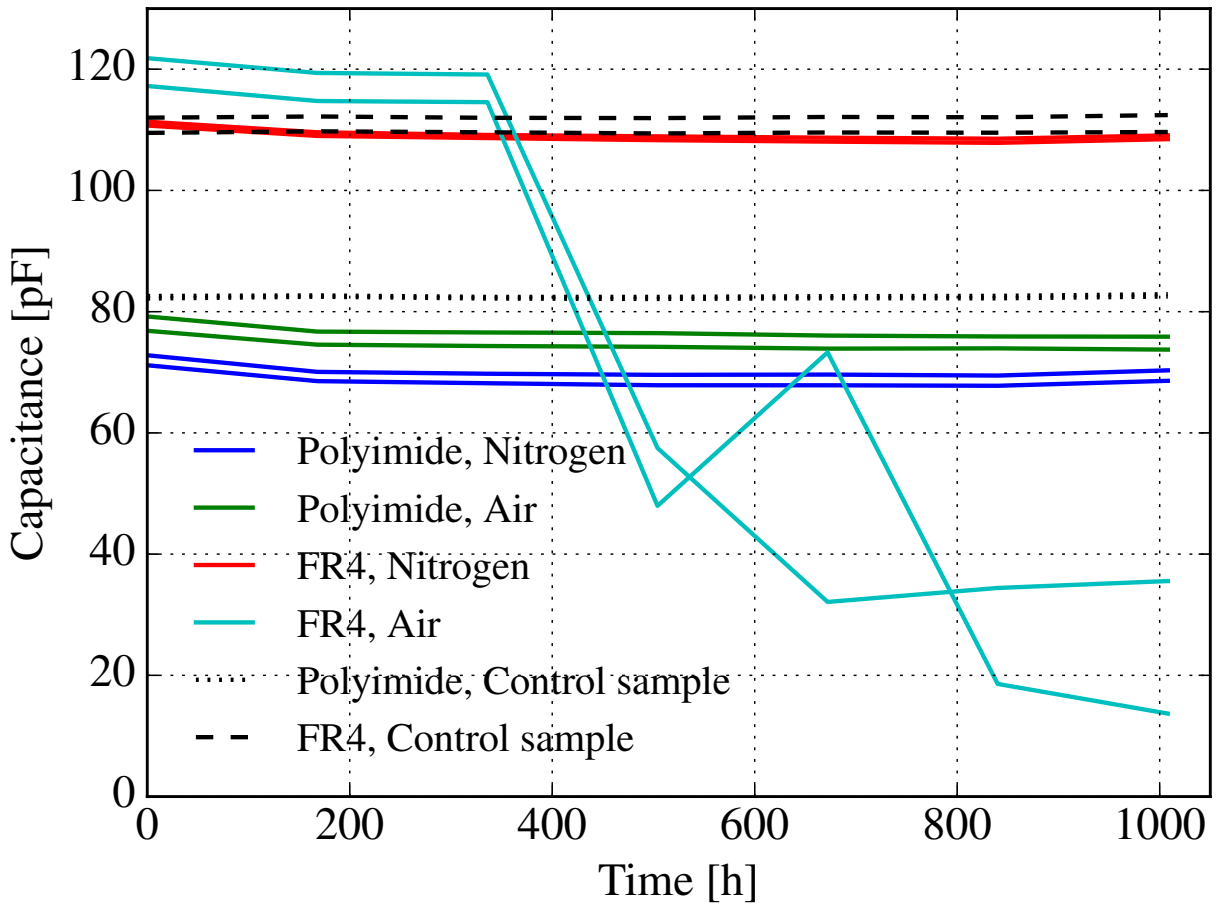
➜ 190 °C choisi pour les essais 1000 h

PCB Haute Température – Essais longs

- Deux atmosphères :
  - **Air**
  - **Faible taux d'oxygène** ($<$0.1 %)
- Cartes séchées 6 h, 120 °C sous air avant les essais
- Température de stockage : **190 °C**
- Durée des essais : **6 semaines** (1000 h)
  - Caractérisation hebdomadaire hors du four

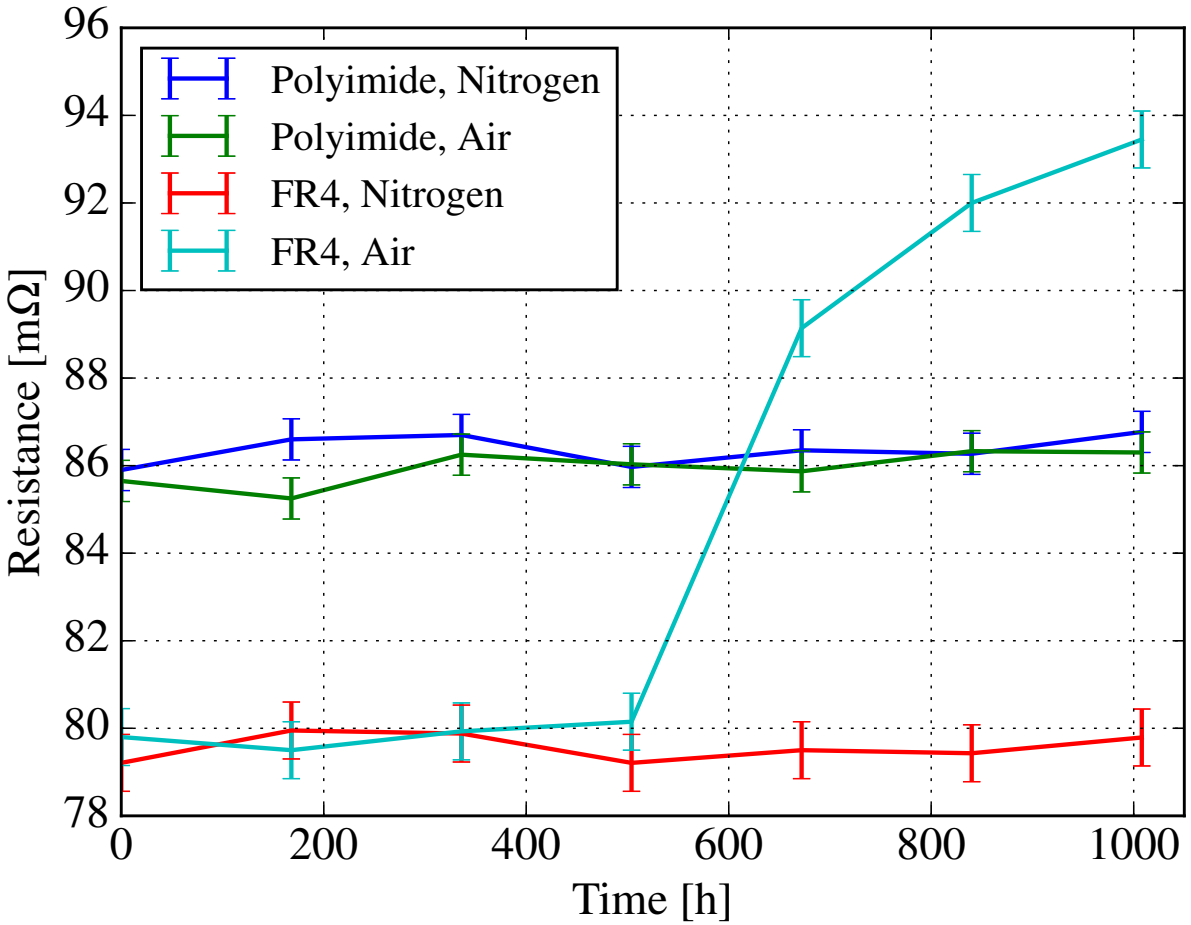
PCB Haute Température – Variation de Capacité

- Aucun changement, sauf pour le FR4 sous air
- Pour ce dernier, gonflement autour du motif capacité après 504 h
- Ces cloques peuvent être causées par les électrodes qui ne sont pas perméables aux gaz de décomposition

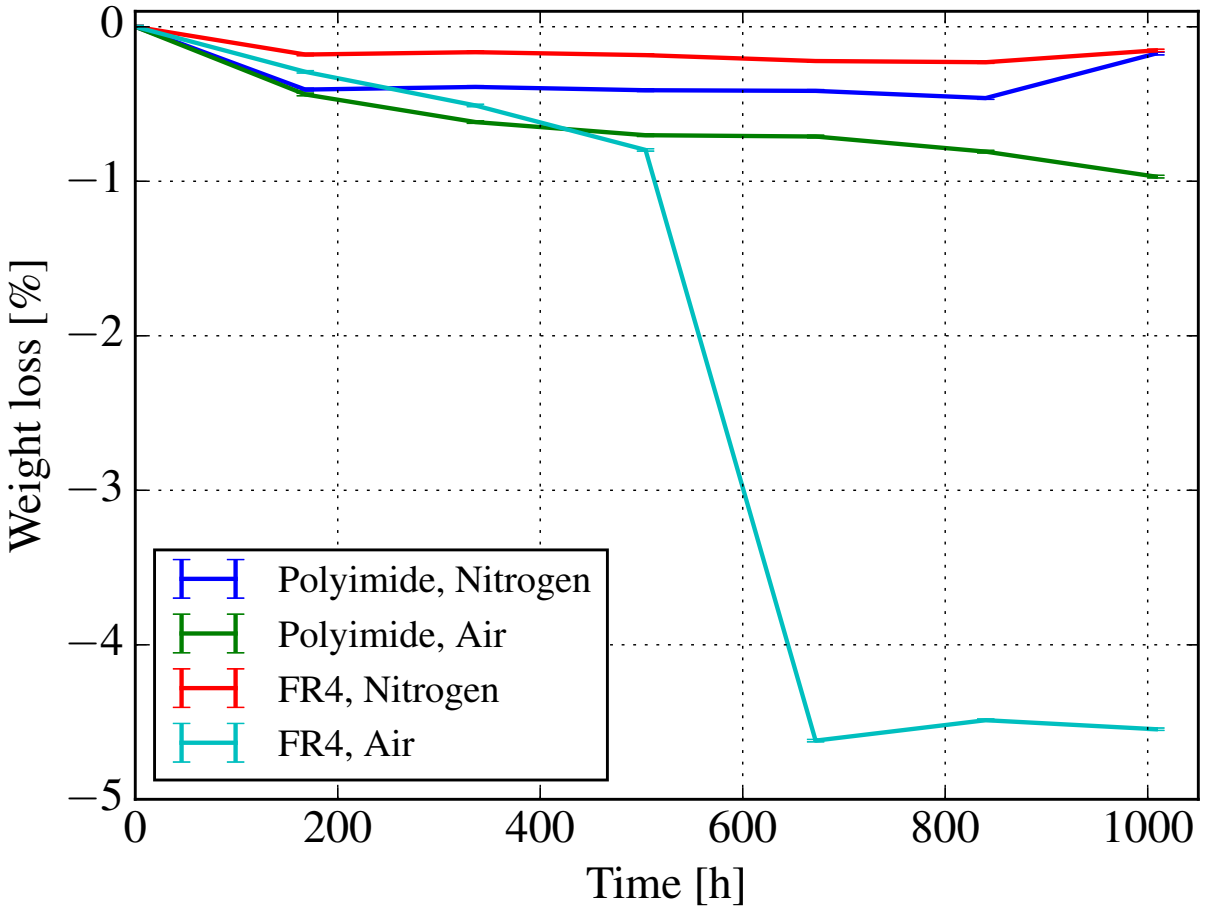


PCB Haute Température – Résistance des Vias

- Comme pour les capacités, changement visibles pour FR4 sous air
- Le gonflement du FR4 sous air cause l'augmentation de résistance
- Décalage d'une semaine par rapport aux condensateurs (672 h)

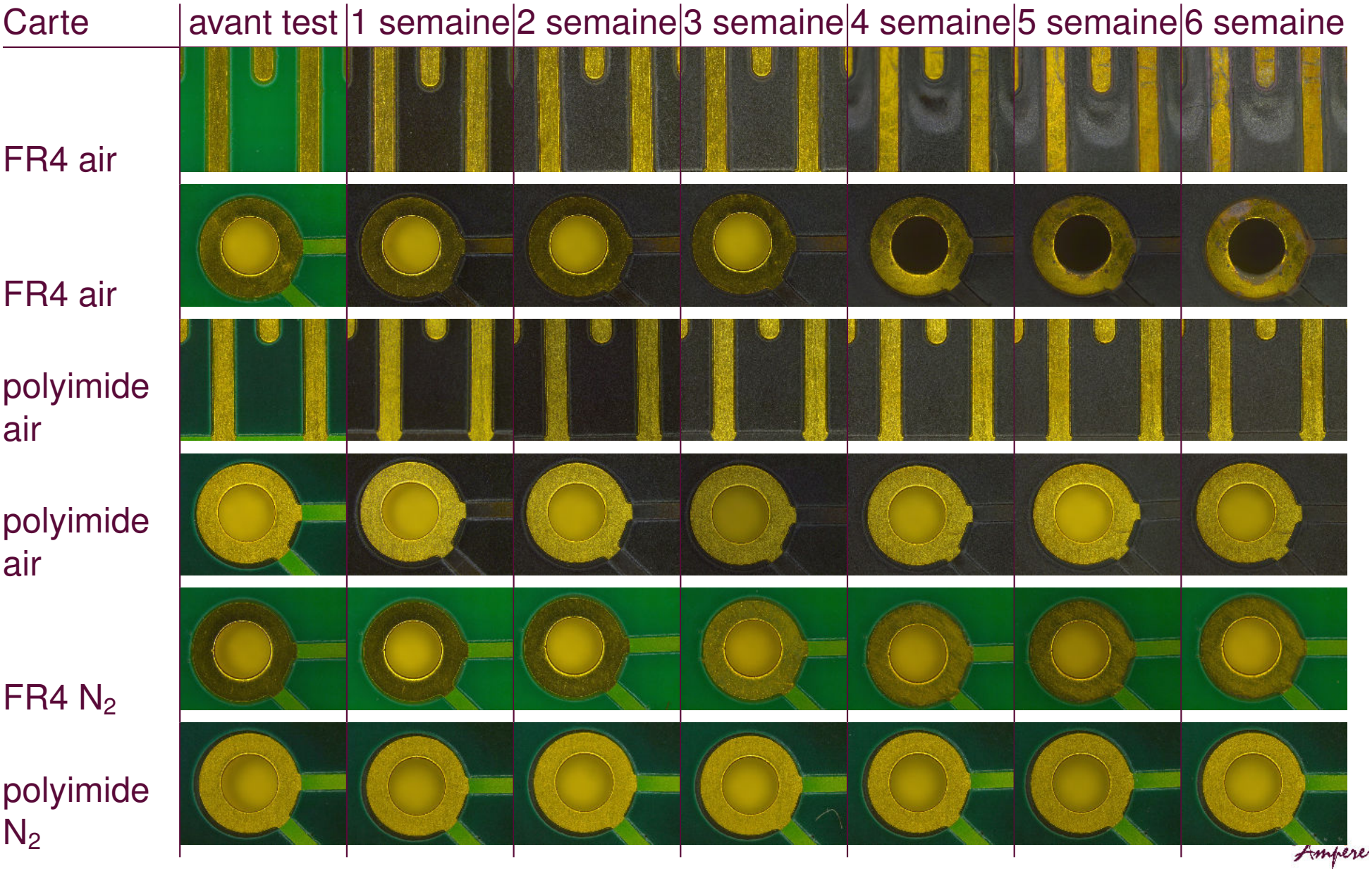


PCB Haute Température – Perte de poids

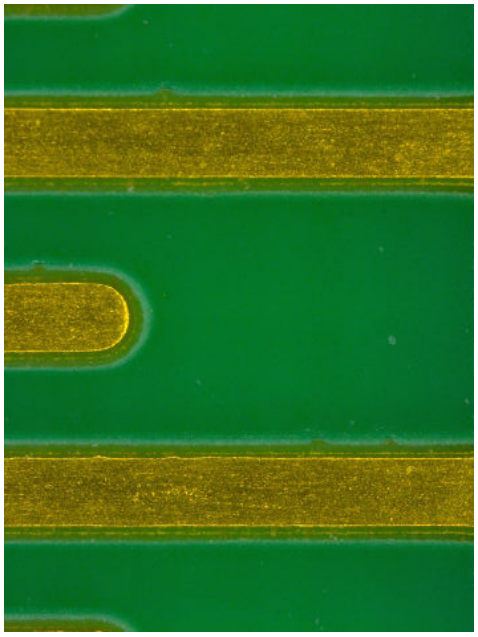


- Large perte de poids pour le FR4 sous air après 672 h
- Perte de poids notable (1 %) pour le polyimide sous air
- Perte de poids négligeable sous N_2, pour polyimide et FR4

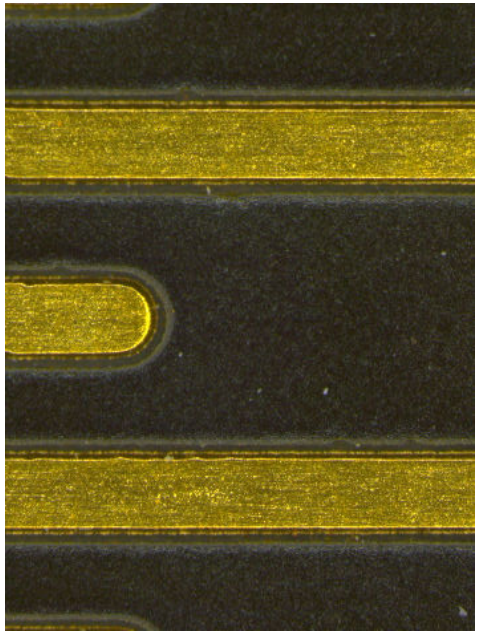
PCB Haute Température – Inspection visuelle (190 °C)



PCB Haute Température – Inspection visuelle (190 °C)



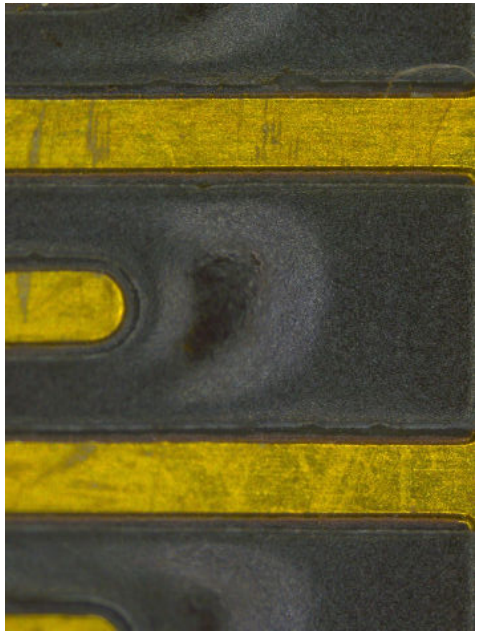
Initial



1 sem.(168 h)



3 sem. (504 h)



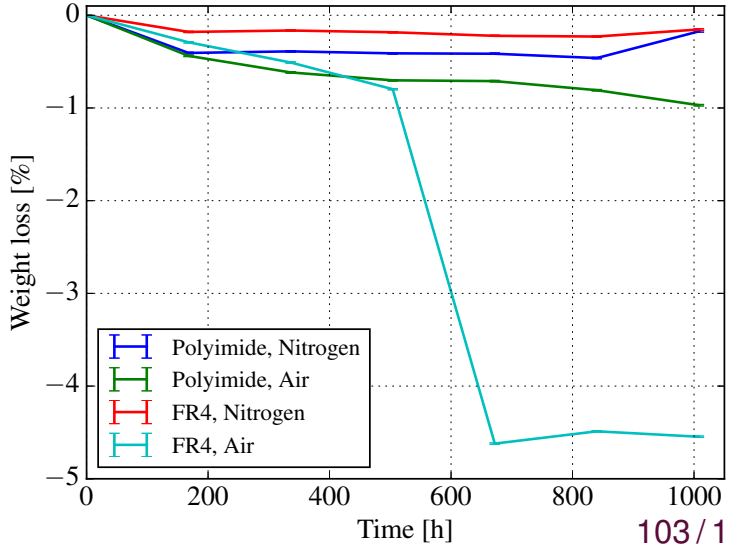
4 sem. (672 h)

FR4, sous air

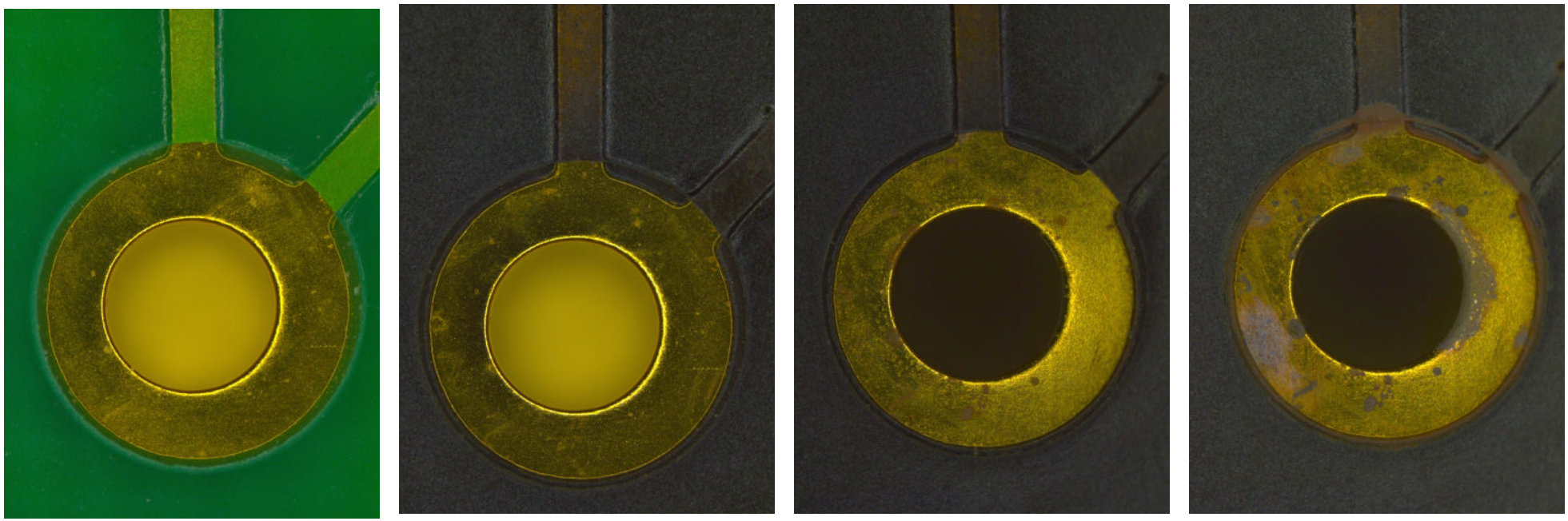
1 semaine : noircissement du solder resist

3 semaines : aspect mat

4 semaines : inhomogenéités d'aspect, forte perte de poids



PCB Haute Température – Inspection visuelle (190 °C)



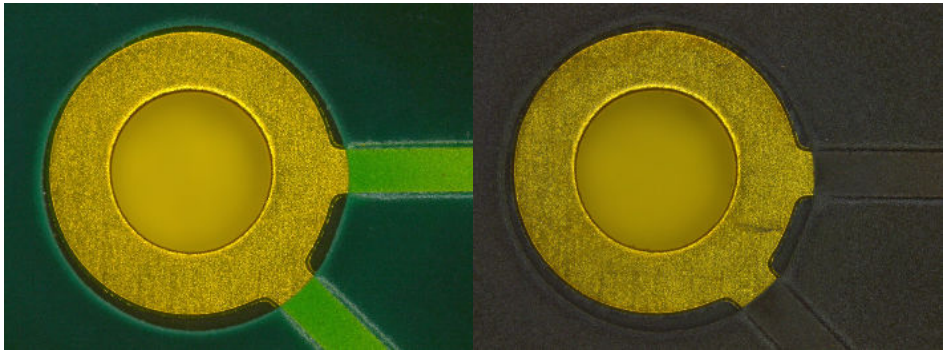
Initial | 3 sem. (504 h) | 4 sem. (672 h) | 6 sem. (1008 h)

FR4, sous air

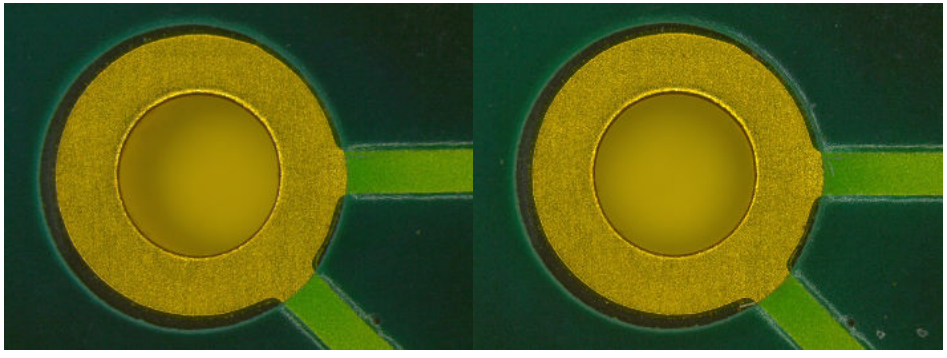
- Le métal des vias (Ni/Au sur Cu) garde son aspect jusqu'à 3 semaines
- Des marques de corrosion apparaissent après 4 semaines
- Corrélé à la perte de poids

PCB Haute Température – Inspection visuelle (190 °C)

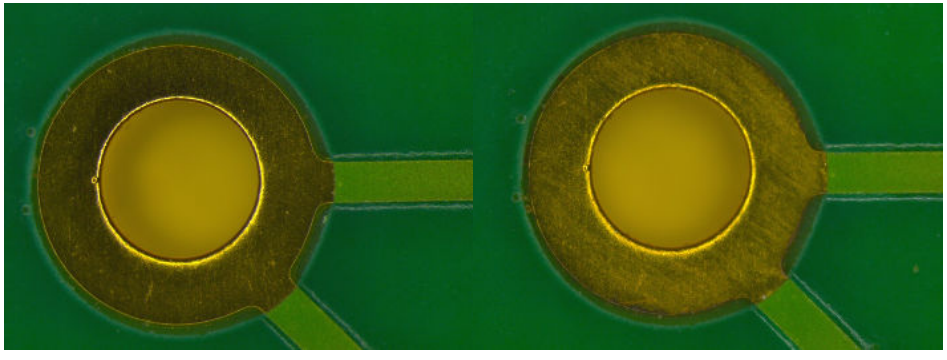
Polyimide, stockage air , intial – 6 sem.



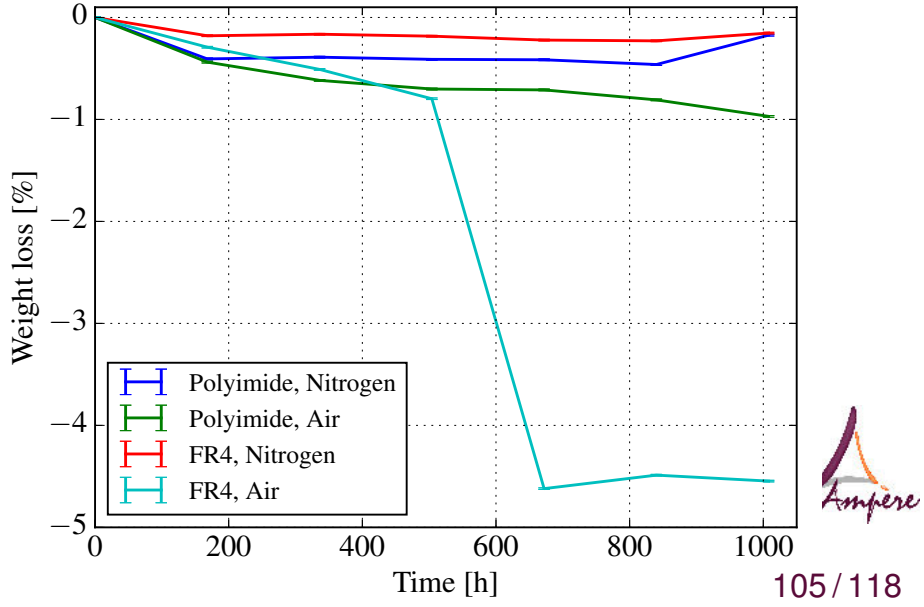
Polyimide, stockage N_2, intial – 6 sem.



FR4, stockage N_2, intial – 6 sem.

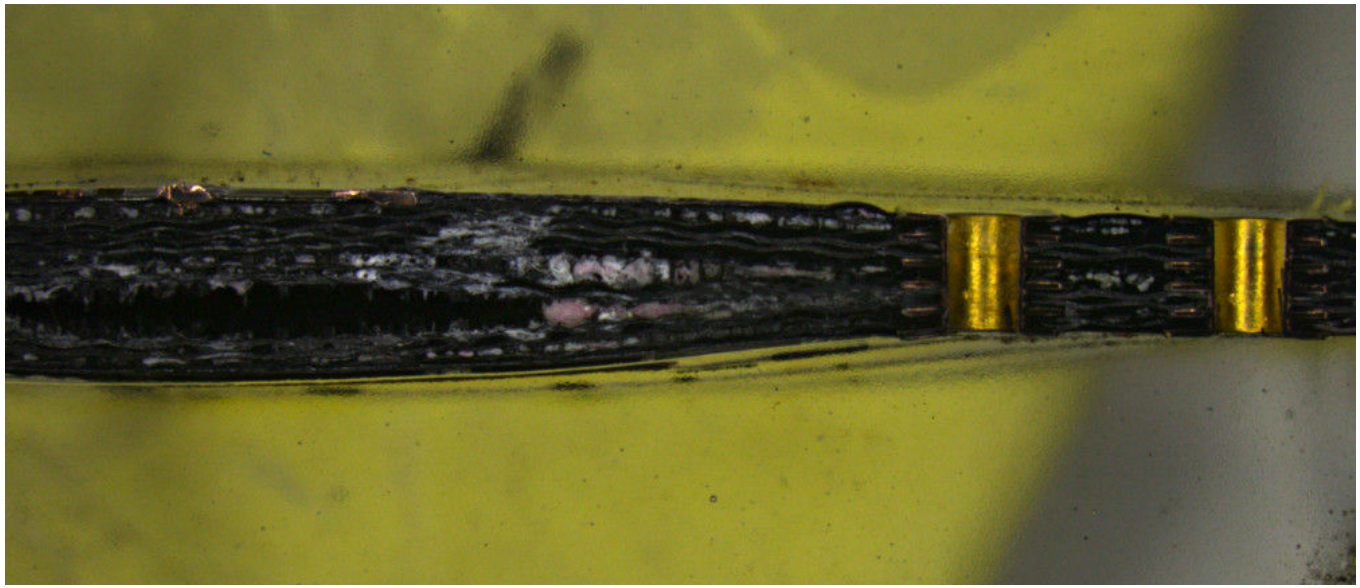


- Pour le polyimide :
  - Sous air, noircissement du solder resist
  - Pas d'autre changement notable
  - Sous azote, pas de changement
- pour le FR4 sous azote :
  - Pas de changement visuel
  - Pas de corrosion de la finition Au



PCB Haute Température – Surface Isolation Resistance (SIR)

- Deux motifs SIR polarisés et caractérisés par carte :
  - Un avec finition Ni/Au
  - Un avec finition Ni/Au et brasure SAC sérigraphiée
- Tous les motifs dépassent 200 MΩ (limite de la mesure) sauf le FR4 sous air
  - Pour le FR4 sous air, le SIR chute à $\approx$ 1MΩ après 4 semaines
  - Même comportement pour les motifs Au et SAC
  - Finalement, gonflement tel que la caractérisation devient impossible



PCB Haute Température – Résumé des résultats

- Pour les échantillons stockés sous N_2 :
  - Pas de changement notable (polyimide et FR4)
- Pour les échantillons stockés sous air :
  - Noircissement rapide (FR4 et polyimide) :
  - Après ça, pas de dégradation du polyimide (mis à part une lente perte de poids, 1 % sur 1000 h)
  - Forte dégradation du FR4 sous air après 3 semaines :

PCB Haute Température – Résumé des résultats

- Pour les échantillons stockés sous N_2 :
  - Pas de changement notable (polyimide et FR4)
- Pour les échantillons stockés sous air :
  - Noircissement rapide (FR4 et polyimide) :
    - ➜ Dégradation du solder resist
  - Après ça, pas de dégradation du polyimide (mis à part une lente perte de poids, 1 % sur 1000 h)
  - Forte dégradation du FR4 sous air après 3 semaines :

    3 semaines : Gonflement, d'abord sous les plans de cuivre

    4 semaines : Le gonflement se propage, forte perte de poids

    5–6 semaines : Corrosion des finitions Au

PCB Haute Température – Résumé des résultats

- Pour les échantillons stockés sous N_2 :
  - Pas de changement notable (polyimide et FR4)
- Pour les échantillons stockés sous air :
  - Noircissement rapide (FR4 et polyimide) :
    - ➜ Dégradation du solder resist
  - Après ça, pas de dégradation du polyimide
    (mis à part une lente perte de poids, 1 % sur 1000 h)
  - Forte dégradation du FR4 sous air après 3 semaines :
    3 semaines : Gonflement, d'abord sous les plans de cuivre
    4 semaines : Le gonflement se propage, forte perte de poids
    5–6 semaines : Corrosion des finitions Au

PCB Haute Température – Résumé des résultats

- Pour les échantillons stockés sous N_2 :
  - Pas de changement notable (polyimide et FR4)
- Pour les échantillons stockés sous air :
  - Noircissement rapide (FR4 et polyimide) :
    - ➜ Dégradation du solder resist
  - Après ça, pas de dégradation du polyimide
    (mis à part une lente perte de poids, 1 % sur 1000 h)
  - Forte dégradation du FR4 sous air après 3 semaines :

    3 semaines : Gonflement, d'abord sous les plans de cuivre
    4 semaines : Le gonflement se propage, forte perte de poids
    5–6 semaines : Corrosion des finitions Au.

PCB Haute Température – Résumé des résultats – 2

- **Les caractérisations simples sont uties :**
  - Perte de poids (même hors four, avec une balance standard)
  - Inspection visuelle (avec prise de vue reproductible)
- **Les tests électriques apportent peu, mais sont nécessaires :**
  - SIR
  - Résistance des vias
- **Les capacités planes ont accéléré le gonflement**
  - Il avait débuté de toutes façons
  - Besoin de motifs de cuivre représentatifs pour les cartes de test
  - Les plans de masse pleins sont à déconseiller. (Motifs grillagés mieux)
- Pas de problème lié aux tests hebdomadaires hors four
- Les connecteurs edgeboard HT sont fiables (sauf gonflement carte)
- Pas de tests mécaniques effectués, mais pas de décollement visible.

PCB Haute Température – Résumé des résultats – 2

- **Les caractérisations simples sont uties :**
  - Perte de poids (même hors four, avec une balance standard)
  - Inspection visuelle (avec prise de vue reproductible)
- **Les tests électriques apportent peu, mais sont nécessaires :**
  - SIR
  - Résistance des vias
- **Les capacités planes ont accéléré le gonflement**
  - Il avait débuté de toutes façons
  - Besoin de motifs de cuivre représentatifs pour les cartes de test
  - Les plans de masse pleins sont à déconseiller. (Motifs grillagés mieux)
- Pas de problème lié aux tests hebdomadaires hors four
- Les connecteurs edgeboard HT sont fiables (sauf gonflement carte)
- Pas de tests mécaniques effectués, mais pas de décollement visible.

PCB Haute Température – Résumé des résultats – 2

- **Les caractérisations simples sont uties :**
  - Perte de poids (même hors four, avec une balance standard)
  - Inspection visuelle (avec prise de vue reproductible)
- **Les tests électriques apportent peu, mais sont nécessaires :**
  - SIR
  - Résistance des vias
- **Les capacités planes ont accéléré le gonflement**
  - Il avait débuté de toutes façons
  - Besoin de motifs de cuivre représentatifs pour les cartes de test
  - Les plans de masse pleins sont à déconseiller. (Motifs grillagés mieux)
- Pas de problème lié aux tests hebdomadaires hors four
- Les connecteurs edgeboard HT sont fiables (sauf gonflement carte)
- Pas de tests mécaniques effectués, mais pas de décollement visible.

PCB Haute Température – Résumé des résultats – 2

- **Les caractérisations simples sont uties :**
  - Perte de poids (même hors four, avec une balance standard)
  - Inspection visuelle (avec prise de vue reproductible)
- **Les tests électriques apportent peu, mais sont nécessaires :**
  - SIR
  - Résistance des vias
- **Les capacités planes ont accéléré le gonflement**
  - Il avait débuté de toutes façons
  - Besoin de motifs de cuivre représentatifs pour les cartes de test
  - Les plans de masse pleins sont à déconseiller. (Motifs grillagés mieux)
- Pas de problème lié aux tests hebdomadaires hors four
- Les connecteurs edgeboard HT sont fiables (sauf gonflement carte)
- Pas de tests mécaniques effectués, mais pas de décollement visible.

PCB Haute Température – Résumé des résultats – 2

- **Les caractérisations simples sont uties :**
  - Perte de poids (même hors four, avec une balance standard)
  - Inspection visuelle (avec prise de vue reproductible)
- **Les tests électriques apportent peu, mais sont nécessaires :**
  - SIR
  - Résistance des vias
- **Les capacités planes ont accéléré le gonflement**
  - Il avait débuté de toutes façons
  - Besoin de motifs de cuivre représentatifs pour les cartes de test
  - Les plans de masse pleins sont à déconseiller. (Motifs grillagés mieux)
- Pas de problème lié aux tests hebdomadaires hors four
- Les connecteurs edgeboard HT sont fiables (sauf gonflement carte)
- Pas de tests mécaniques effectués, mais pas de décollement visible.

PCB Haute Température – Résumé des résultats – 2

- **Les caractérisations simples sont uties :**
  - Perte de poids (même hors four, avec une balance standard)
  - Inspection visuelle (avec prise de vue reproductible)
- **Les tests électriques apportent peu, mais sont nécessaires :**
  - SIR
  - Résistance des vias
- **Les capacités planes ont accéléré le gonflement**
  - Il avait débuté de toutes façons
  - Besoin de motifs de cuivre représentatifs pour les cartes de test
  - Les plans de masse pleins sont à déconseiller. (Motifs grillagés mieux)
- Pas de problème lié aux tests hebdomadaires hors four
- Les connecteurs edgeboard HT sont fiables (sauf gonflement carte)
- Pas de tests mécaniques effectués, mais pas de décollement visible.

PCB Haute Température – Résumé des résultats – 3

- Comme prévu, le FR4 ($T_g > 170$ °C) est plus sensible à la température que le polyimide ($T_g > 250$ °C)
- Le solder resist se dégrade rapidement à 190 °C
  - Cela ne semble pas avoir de grandes conséquences
- L'atmosphère joue un rôle prépondérant
  - Sous air, même le polyimide se dégrade, plus lentement que le FR4
  - Sous azote, pas de vieillissement observé
  - Intéressant pour des tests labos (PCB FR4 moins chers)
  - ⚠ Nous n'avons pas fait de cyclage thermique

PCB Haute Température – Résumé des résultats – 3

- Comme prévu, le FR4 ($T_g > 170$ °C) est plus sensible à la température que le polyimide ($T_g > 250$ °C)
- Le solder resist se dégrade rapidement à 190 °C
  - Cela ne semble pas avoir de grandes conséquences
- L'atmosphère joue un rôle prépondérant
  - Sous air, même le polyimide se dégrade, plus lentement que le FR4
  - Sous azote, pas de vieillissement observé
  - Intéressant pour des tests labos (PCB FR4 moins chers)
  - ⚠ Nous n'avons pas fait de cyclage thermique

PCB Haute Température – Résumé des résultats – 3

- Comme prévu, le FR4 ($T_g > 170$ °C) est plus sensible à la température que le polyimide ($T_g > 250$ °C)
- Le solder resist se dégrade rapidement à 190 °C
  - Cela ne semble pas avoir de grandes conséquences
- L'atmosphère joue un rôle prépondérant
  - Sous air, même le polyimide se dégrade, plus lentement que le FR4
  - Sous azote, pas de vieillissement observé
  - Intéressant pour des tests labos (PCB FR4 moins chers)
  - ⚠ Nous n'avons pas fait de cyclage thermique

Sommaire

Introduction

Composants
- semiconducteurs de puissance
- Circuits de commande
- Passifs

Packaging et Procédés
- Généralités Packaging
- Attache de composants
- Circuits imprimés

Conclusions

Conclusions

L'électronique haute température pose des problèmes :

- **De composants**
  - Actifs « grands gaps » pour la puissance,
  - Circuits intégrés Si pour la basse tension
  - Gros manques au niveau des passifs (capas surtout)
- **De packaging**
  - Haute température :
    - Dégradation des matériaux organiques
    - Diffusion des espèces chimiques
  - Fort cyclage
    - Problèmes thermo-mécaniques

À 200 °C, des solutions sont applicables et disponibles (avec précautions et vérifications)

Conclusions – Perspectives

Au-delà de 300 °C

- **Presque plus de composants**
  - Quelques composants grands gaps,
  - Circuits intégrés SiC ou GaN nécessaires
  - Plus de capas (hors SiO_2)
- **Et pour le packaging**
  - Presque plus de matériaux organiques
  - Substrats céramiques uniquement
  - Durée de vie inconnue
- Pour le moment, surtout applications capteurs
- Encore beaucoup de travail de recherche !

Remerciements

- Aux doctorants : Amandine, Rémi, Khalil, Raphaël, Stanislas, Wissam, Oriol,
- Aux collègues d'Ampère : Christian, Hervé, Christophe, Dominque, Pascal, Bruno
- À ceux des autres labos : LAPLACE, IMS, SATIE
- À l'école d'été grands gaps pour l'invitation !

Pour me faire part de vos remarques, pour des questions :

`cyril.buttay@insa-lyon.fr`











Credits

- picture of the Airbus A350 : airbus
- picture of the Toyota Prius : Picture by Pawel Golsztajn, CC-SA, available on Wikimedia Commons `http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Toyota_Prius.2.JPG`
- geothermal power plant : `http://energy.gov/eere/geothermal/photos/geothermal-photo-gallery`
- picture of Jupiter : NASA `http://en.wikipedia.org/wiki/File:PIA04866_modest.jpg`

References I


C. Raynaud, D. Tournier, H. Morel, and D. Planson, “Comparison of high voltage and high temperature performances of wide bandgap semiconductors for vertical power devices,” *Diamond and Related Materials*, vol. 19, no. 1, pp. 1–6, 2010. [Online]. Available : http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TWV-4XCJ4M2-1/2/76c76271c9345bf77d4fc29077179d2a


R. Pérez, N. Mestres, D. Tournier, X. Jordà, P. Godignon, and M. Vellvehi, “Temperature Dependence of 4H-SiC JBS and Schottky Diodes after High Temperature Treatment of Contact Metal,” *Materials Science Forum*, vol. 483–485, pp. 945–948, May 2005. [Online]. Available : http://www.scientific.net/MSF.483-485.945


N. Lundberg, M. Östling, C.-M. Zetterling, P. Tägtström, and U. Jansson, “CVD-based tungsten carbide schottky contacts to 6H-SiC for very high-temperature operation,” *Journal of Electronic Materials*, vol. 29, pp. 372–375, 2000.


C. Buttay, R. Robutel, C. Martin, C. Raynaud, S. Dampieni, D. Bergogne, and T. Chailloux, “Effect of High Temperature Ageing on Active and Passive Power Devices,” in *HiTEC 2010*, Albuquerque, United States, May 2010, p. 000228. [Online]. Available : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00485273


C. Buttay, C. Raynaud, H. Morel, G. Civrac, M.-L. Locatelli, and F. Morel, “Thermal Stability of Silicon Carbide Power Diodes,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 59, no. 3, pp. 761–769, 2012. [Online]. Available : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00672440


C. Buttay, R. Ouaida, H. Morel, D. Bergogne, C. Raynaud, and F. Morel, “Thermal Stability of Silicon Carbide Power JFETs,” *IEEE transactions on Electron Devices*, vol. 60, no. 12, pp. 4191–4198, Dec. 2013. [Online]. Available : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00881667


K. El Falahi, “Contribution à la conception de driver en technologie CMOS SOI pour la commande de transistors JFET SiC pour un environnement de haute température,” Ph.D. dissertation, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Villeurbanne, Jun. 2012. [Online]. Available : http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00770657

References II



K. El Falahi, S. Hascoët, C. Buttay, P. Bevilacqua, L. V. Phung, D. Tournier, B. Allard, and D. Planson, "High temperature, Smart Power Module for aircraft actuators," in *Proceedings of the High Temperature Electronics Network (HiTEN)*. Oxford, UK : IMAPS, Jul. 2013. [Online]. Available : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00874666



R. Robutel, "Passive components for high temperature power electronics : application to the EMI input filter," Theses, INSA de Lyon, Nov. 2011. [Online]. Available : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00665819



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



M. Berthou, P. Retailleau, H. Frémont, A. Guédon-Gracia, and C. Jéphos-Davennel, "Microstructure evolution observation for SAC solder joint : Comparison between thermal cycling and thermal storage," *Microelectronics Reliability*, vol. 49, no. 9–11, pp. 1267 – 1272, 2009, 20th European Symposium on the Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis20th European Symposium on the Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis. [Online]. Available : http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271409002509



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.

References III


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


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.


R. Riva, C. Buttay, B. Allard, and P. Bevilacqua, "Migration issues in sintered-silver die attaches operating at high temperature," *Microelectronics Reliability*, vol. 53, pp. 1592–1506, 2013. [Online]. Available : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00874458

References IV



O. Avino-Salvado, W. Sabbah, C. Buttay, H. Morel, and P. Bevilacqua, “Evaluation of printed-circuit boards materials for high temperature operation,” in *International Conference and Exhibition on High Temperature Electronics Network (HiTEN 2017)*, ser. Proceedings of the High Temperature Electronics Network (HiTEN 2017). Cambridge, United Kingdom : IMAPS, Jul. 2017. [Online]. Available : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01565131