

# ÉTUDE DE CONCEPTS D'ASSEMBLAGE DE PUISSANCE MODULAIRES ET DÉMONTABLES POUR LA MISE EN ŒUVRE DE COMPOSANTS SIC

Paul BRUYERE<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, Grenoble, France

<sup>2</sup>Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, Ampère, UMR5005, 69130 Ecully, France

**Sous la direction de Yvan AVENAS<sup>1</sup> et le co-encadrement de Éric VAGNON<sup>2</sup>**

Soutenance de thèse – ED EEATS, spécialité Génie Électrique – 24/11/2025

---

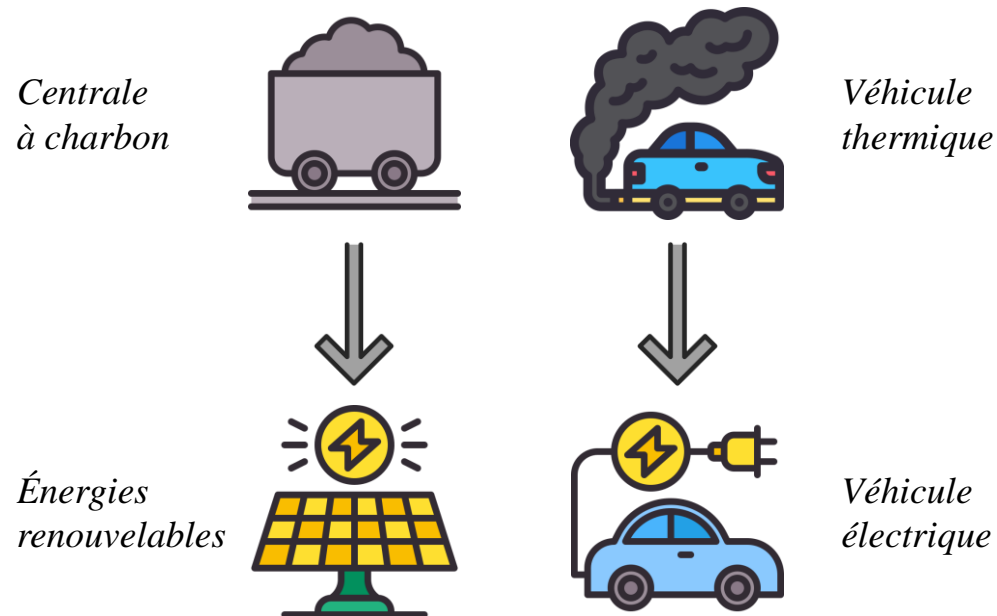
## Membres du jury

- Mounira BOUARROUDJ – Directrice de Recherche, Université Gustave Eiffel – **Rapporteure**
  - Paul-Etienne VIDAL – Professeur des Universités, Université de Technologie Tarbes Occitanie Pyrénées – **Rapporteur**
  - Marie-Laure LOCATELLI – Chargée de Recherche, CNRS – **Examinatrice**
  - Cyril BUTTAY – Directeur de Recherche, CNRS – **Examineur**
  - Léo STERNA – Ingénieur de Recherche, CEA – LETI – **Examineur**
- 



### Vers une transition énergétique

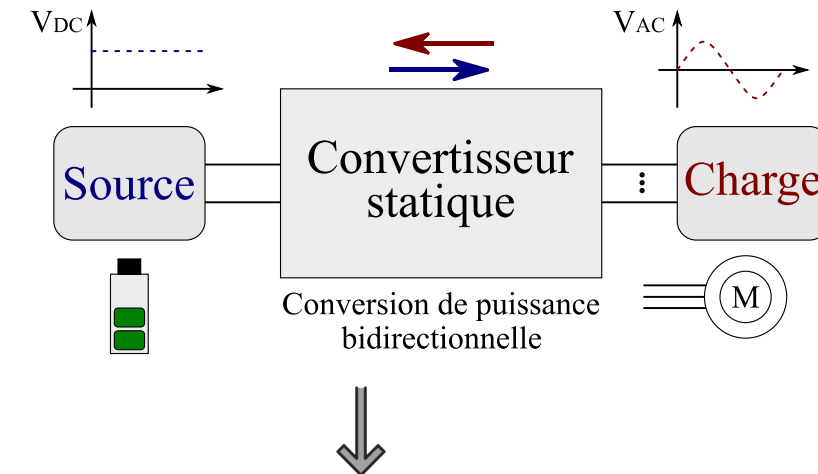
- Secteur de la production
- Secteur du transport



**Consensus : utilisation massive  
du vecteur électrique**

### Objectif du convertisseur :

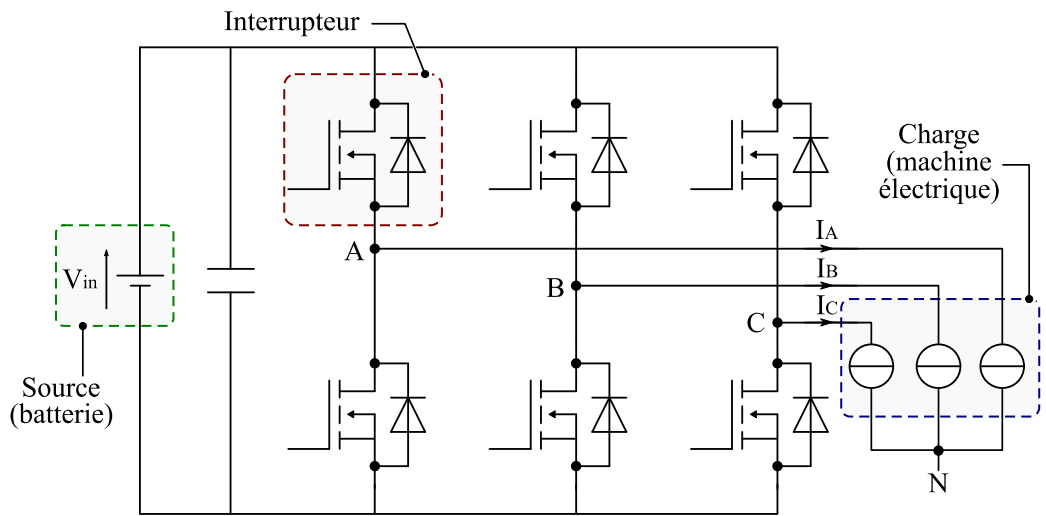
- Convertir une onde électrique ( $V, I$ ) entre un système électrique amont (**une source**) et aval (**une charge**)



### Indicateurs de performance :

- ↘ coûts
- ↗ densités de puissance
- ↗ rendements

### Schéma électrique d'un onduleur triphasé



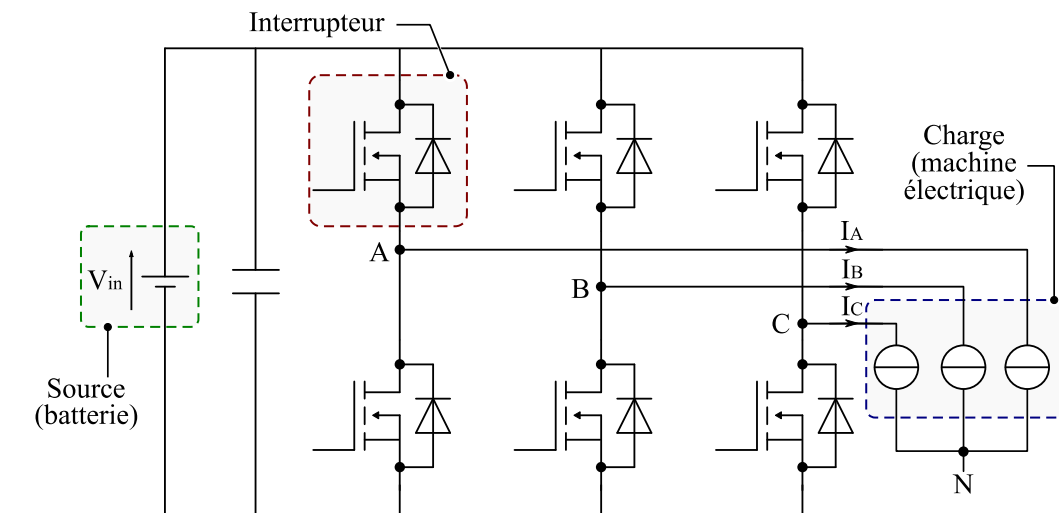
**Interrupteur = puce semi-conductrice**



**❌ Puce non utilisable dans son état initial**

[1] D. Cittanti *et al.*, « New FOM-Based Performance Evaluation of 600/650 V SiC and GaN Semiconductors for Next-Generation EV Drives »

### Schéma électrique d'un onduleur triphasé

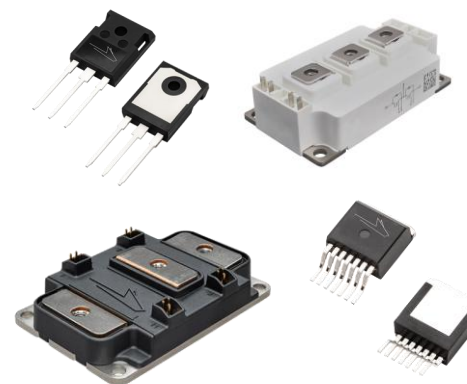


**Interrupteur** = puce  
semi-conductrice

❌ Puce non utilisable dans son état initial



### Packaging



**Objectif** : Développer un environnement d'intégration spécifique permettant de rendre une puce exploitable au sein d'un convertisseur

- Connexions électriques de la puce
- Gestion thermique
- Assemblage mécanique
- Protection vis-à-vis des conditions externes

- Focus sur les composants en **carbure de silicium (SiC)**
  - ✅ Convertisseurs compacts de forte puissance avec des rendements élevés [1]
  - ❌ **Packaging = facteur limitant** à l'exploitation du plein potentiel des composants SiC



**Quelles solutions de packaging existent pour les composants SiC ?**

### Module de puissance multi-puces

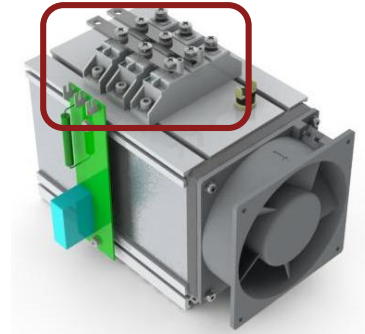


#### Avantages :

- ✓ Technologie mature et industrialisée
- ✓ Large choix de calibre ( $V$ ,  $I$ )
- ✓ Performances électriques

#### Inconvénients :

- ✗ Interconnexions
- ✗ Utilisation du système de refroidissement



*Assemblage du module sur un système de refroidissement*

#### Indicateurs de performance :



- ✓ Coûts
- ✓ Rendements
- ✗ Densités de puissance

### Module de puissance multi-puces

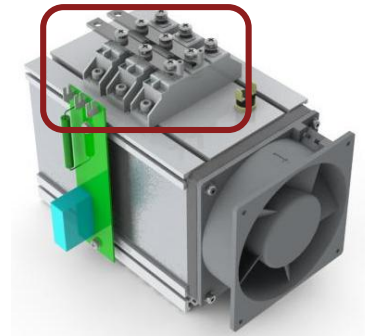


#### Avantages :

- ✓ Technologie mature et industrialisée
- ✓ Large choix de calibre ( $V$ ,  $I$ )
- ✓ Performances électriques

#### Inconvénients :

- ✗ Interconnexions
- ✗ Utilisation du système de refroidissement



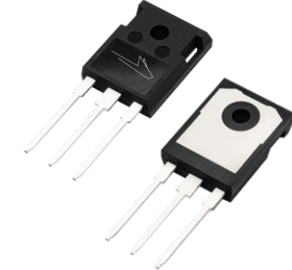
*Assemblage du module sur un système de refroidissement*

#### Indicateurs de performance :



- ✓ Coûts
- ✓ Rendements
- ✗ Densités de puissance

### Packaging unitaire (boîtiers discrets)



#### Avantages :

- ✓ Technologie mature et industrialisée
- ✓ Large choix de calibre ( $V$ ,  $I$ )

#### Inconvénients :

- ✗ Performances électriques inférieures aux modules de puissance
- ✗ Refroidissement simple-face des puces

#### Indicateurs de performance :



- ✓ Coûts
- ✗ Rendements
- ✗ Densités de puissance

### Module de puissance multi-puces

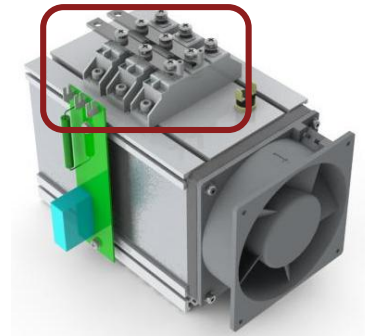


#### Avantages :

- ✓ Technologie mature et industrialisée
- ✓ Large choix de calibre ( $V$ ,  $I$ )
- ✓ Performances électriques

#### Inconvénients :

- ✗ Interconnexions
- ✗ Utilisation du système de refroidissement



*Assemblage du module sur un système de refroidissement*

#### Indicateurs de performance :



- ✓ Coûts
- ✓ Rendements
- ✗ Densités de puissance

### Packaging unitaire (boitiers discrets)



#### Avantages :

- ✓ Technologie mature et industrialisée
- ✓ Large choix de calibre ( $V$ ,  $I$ )

#### Inconvénients :

- ✗ Performances électriques inférieures aux modules de puissance
- ✗ Refroidissement simple-face des puces

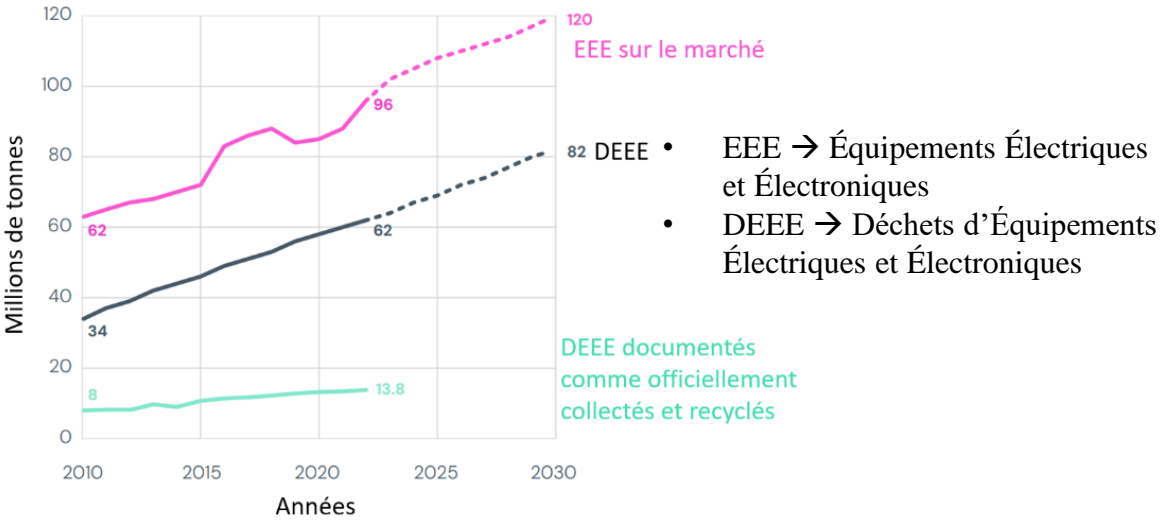
#### Indicateurs de performance :



- ✓ Coûts
- ✗ Rendements
- ✗ Densités de puissance



**Le développement des packagings est majoritairement tourné vers la performance**



L'éco-conception

**Définition :** Prendre en compte la préservation de l'environnement dès la phase de conception des convertisseurs [1]



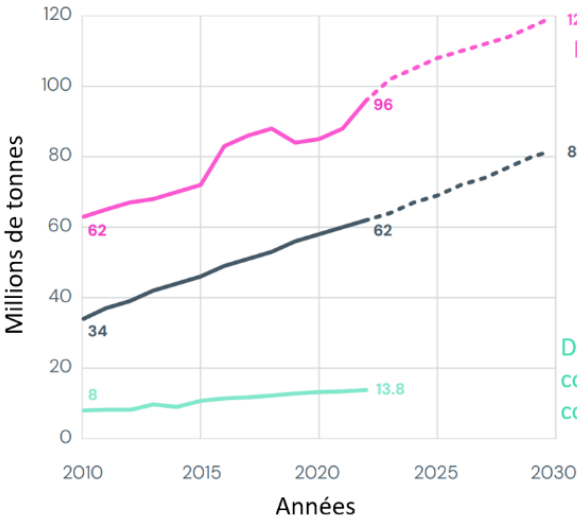
Le packaging et la modularité sont des éléments de réponse à cette démarche d'éco-conception (*Thèse B. Baudais SATIE* [2])



- Packaging :**
- ✓ Unitaire
  - ✓ Facilement démontable du convertisseur

[1] M. Rio *et al.*, « Addressing Circularity to Product Designers: Application to a Multi-Cell Power Electronics Converter »  
[2] B. Baudais, « Écoconception en électronique de puissance. Impacts du dimensionnement, de la modularité et de la diagnosticabilité »





- EEE → Équipements Électriques et Électroniques
- DEEE → Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques

DEEE documentés  
comme officiellement  
collectés et recyclés

### L'éco-conception

**Définition** : Prendre en compte la préservation de l'environnement dès la phase de conception des convertisseurs [1]

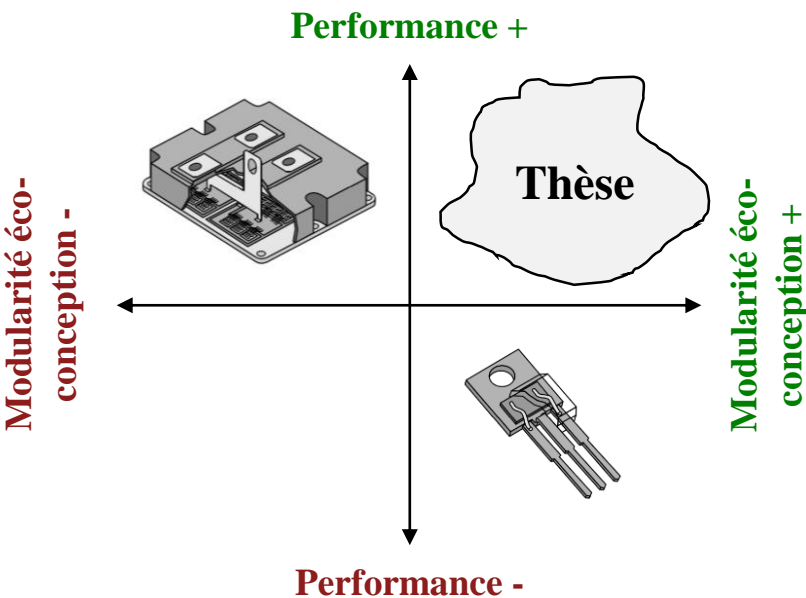


- Packaging :**
- ✓ **Unitaire**
  - ✓ **Facilement démontable du convertisseur**

**Le packaging et la modularité** sont des éléments de réponse à cette démarche d'éco-conception (*Thèse B. Baudais SATIE* [2])

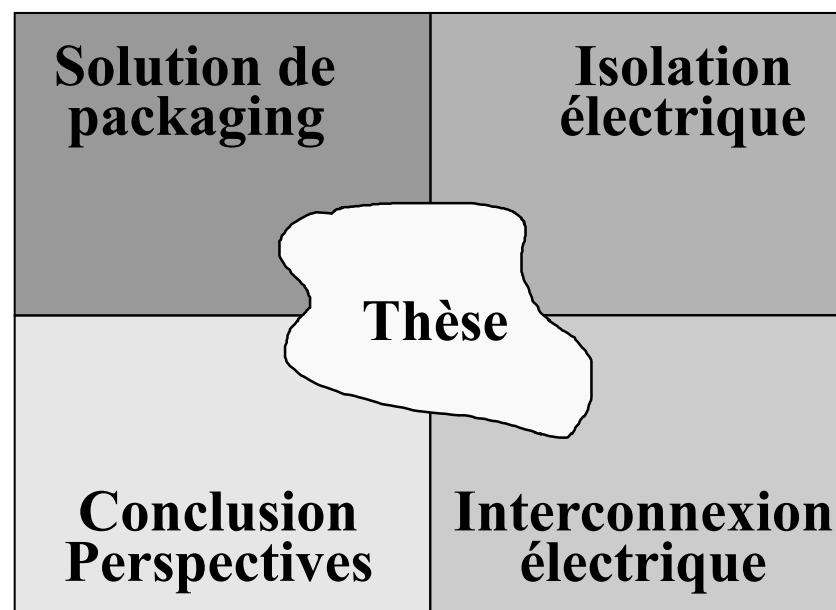
### Résumé

### Cadrant Performance / Modularité éco-conception



Comment assurer la mise en œuvre des **composants SiC** dans un contexte de **modularité et démontabilité**, tout en assurant des **performances satisfaisantes** ?

[1] M. Rio *et al.*, « Addressing Circularity to Product Designers: Application to a Multi-Cell Power Electronics Converter »  
[2] B. Baudais, « Écoconception en électronique de puissance. Impacts du dimensionnement, de la modularité et de la diagnosticabilité »



**1** **Solution de packaging modulaire, démontable et performante**

**2** **Isolation électrique de la solution de packaging**

**3** **Interconnexions électriques modulaires et démontables**

**4** **Conclusion et Perspectives**

**Solution de  
packaging**

**Thèse**

**1**

**Solution de packaging modulaire, démontable et performante**

2

Isolation électrique de la solution de packaging

3

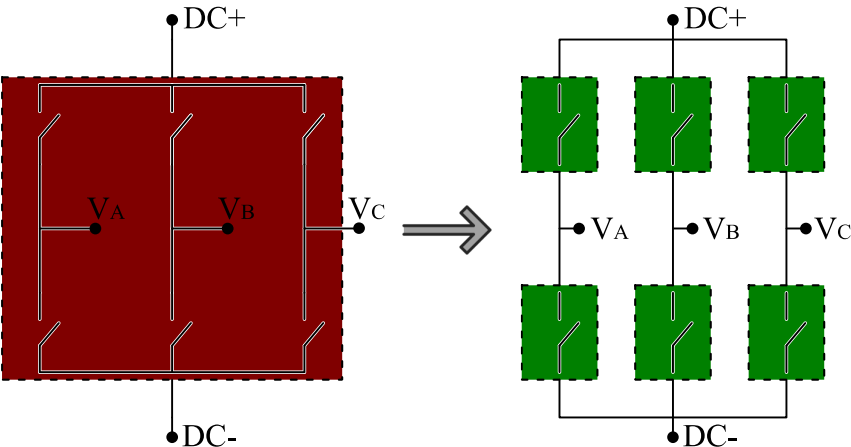
Interconnexions électriques modulaires et démontables

4

Conclusion et Perspectives

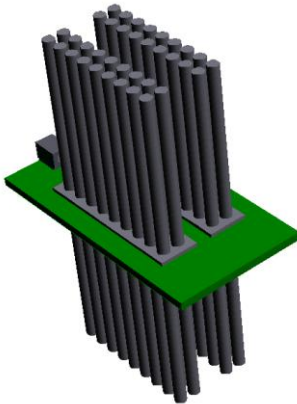
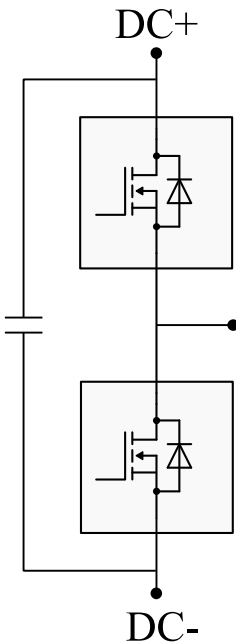
Prise en compte des notions d'éco-conception

- Assemblage très intégré
- Assemblage modulaire pour l'éco-conception



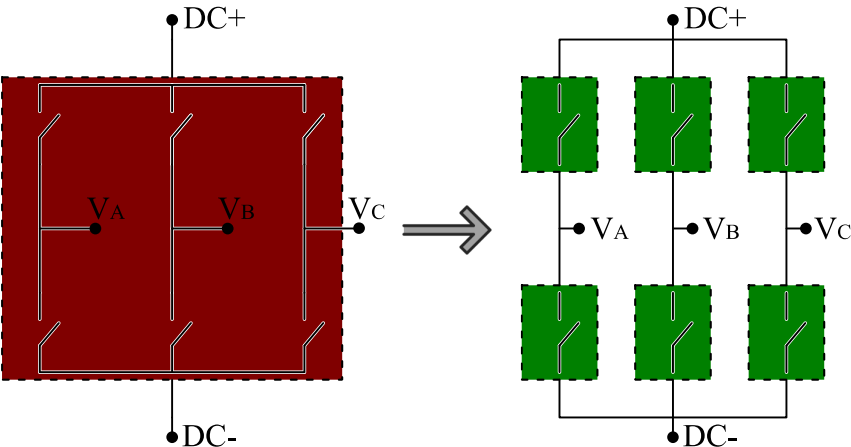
Assemblage proposé

- Cellule de commutation → assemblage de 2 prépackages et du condensateur de découplage



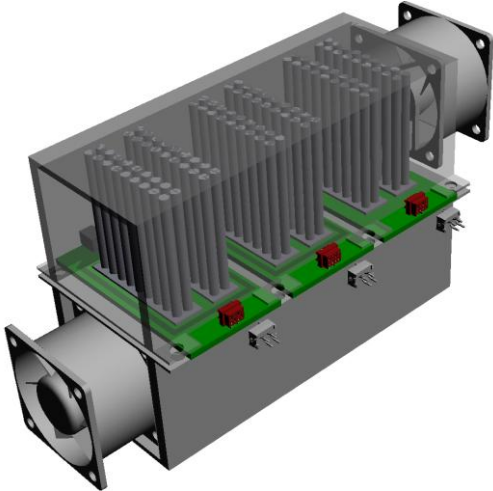
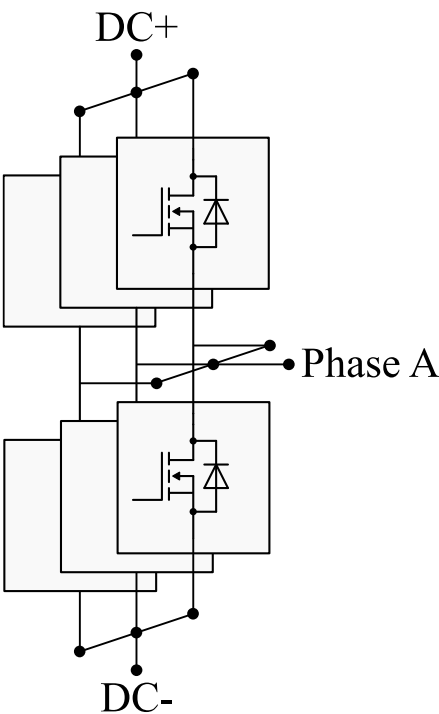
Prise en compte des notions d'éco-conception

- Assemblage très intégré
- Assemblage modulaire pour l'éco-conception



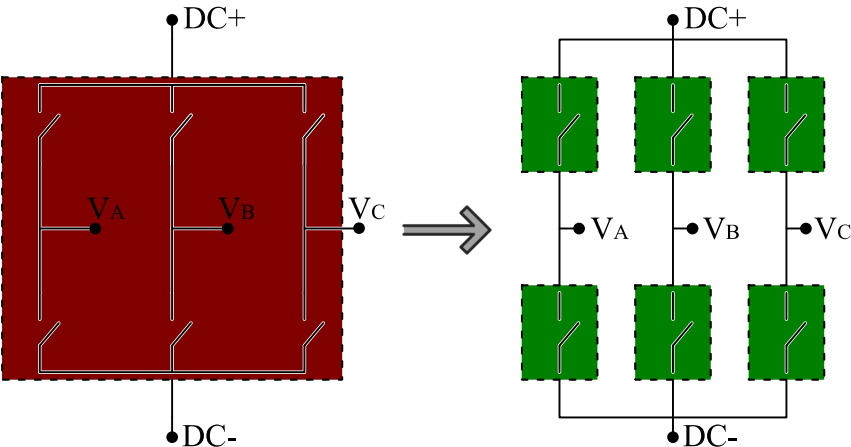
Assemblage proposé

- Assemblage de cellules de commutation → mise en parallèle



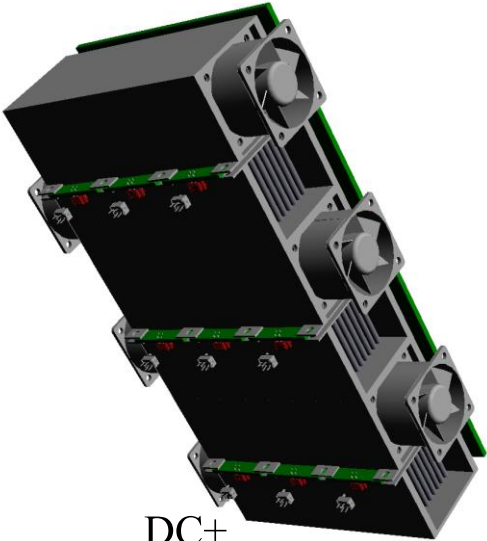
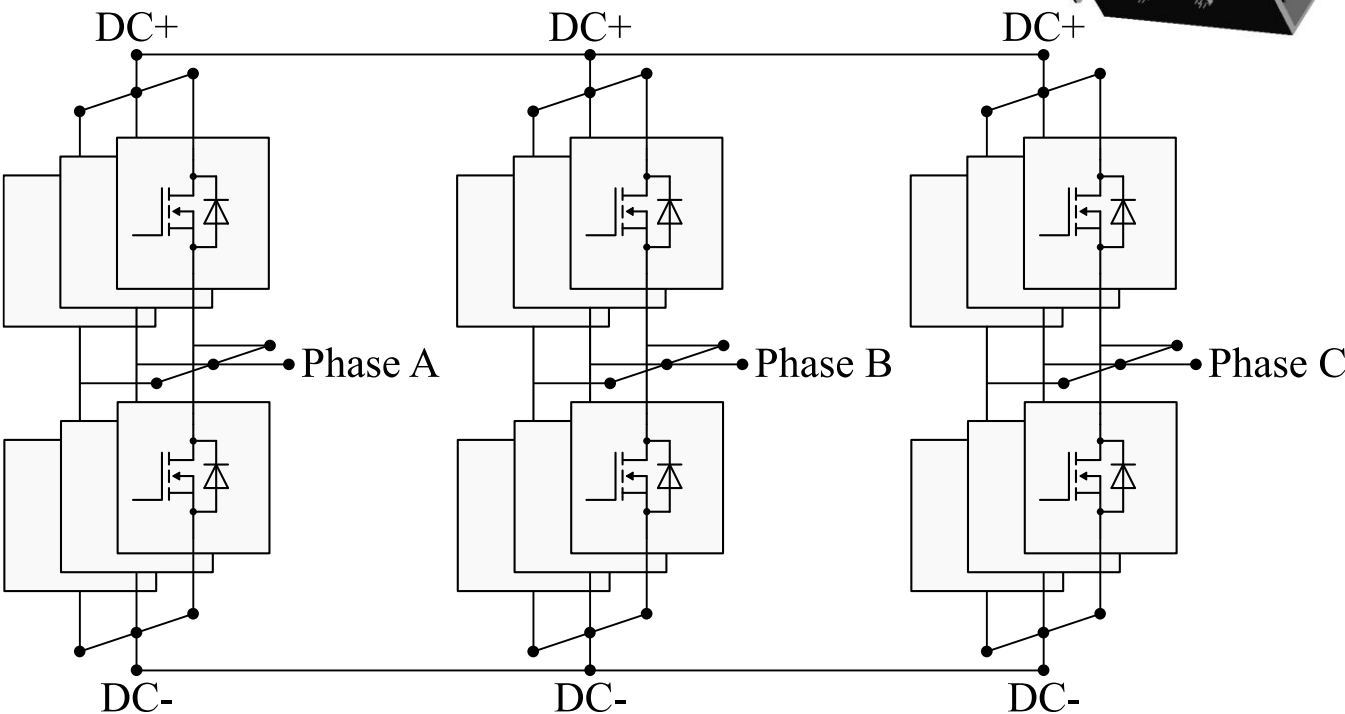
Prise en compte des notions d'éco-conception

- Assemblage très intégré
- Assemblage modulaire pour l'éco-conception



Assemblage proposé

- Assemblage de phases → onduleur triphasé

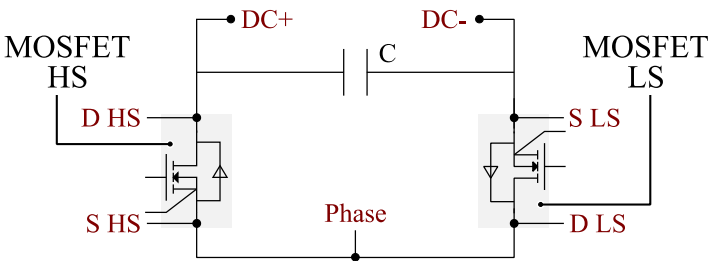


# PROPOSITION TECHNOLOGIQUE









## CELLULE DE COMMUTATION PERFORMANTE ET DÉMONTABLE

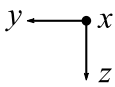
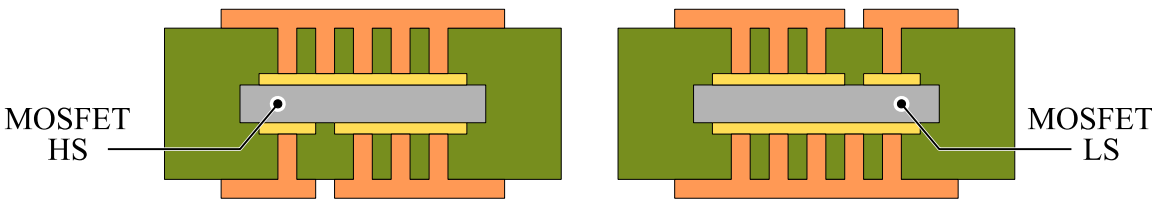
### Cellule de commutation performante et démontable

- Prépackages :
  - ✓ Packaging d'une puce SiC
  - ✓ Intégration unitaire



### Vue en coupe assemblage

 PCB carte-mère	 Puce SiC	 TIM isolant	 Joint
 PCB prépackage	 EIM	 Dissipateur	 Pression

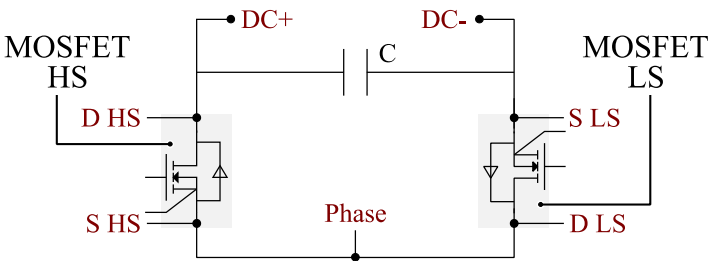


# PROPOSITION TECHNOLOGIQUE

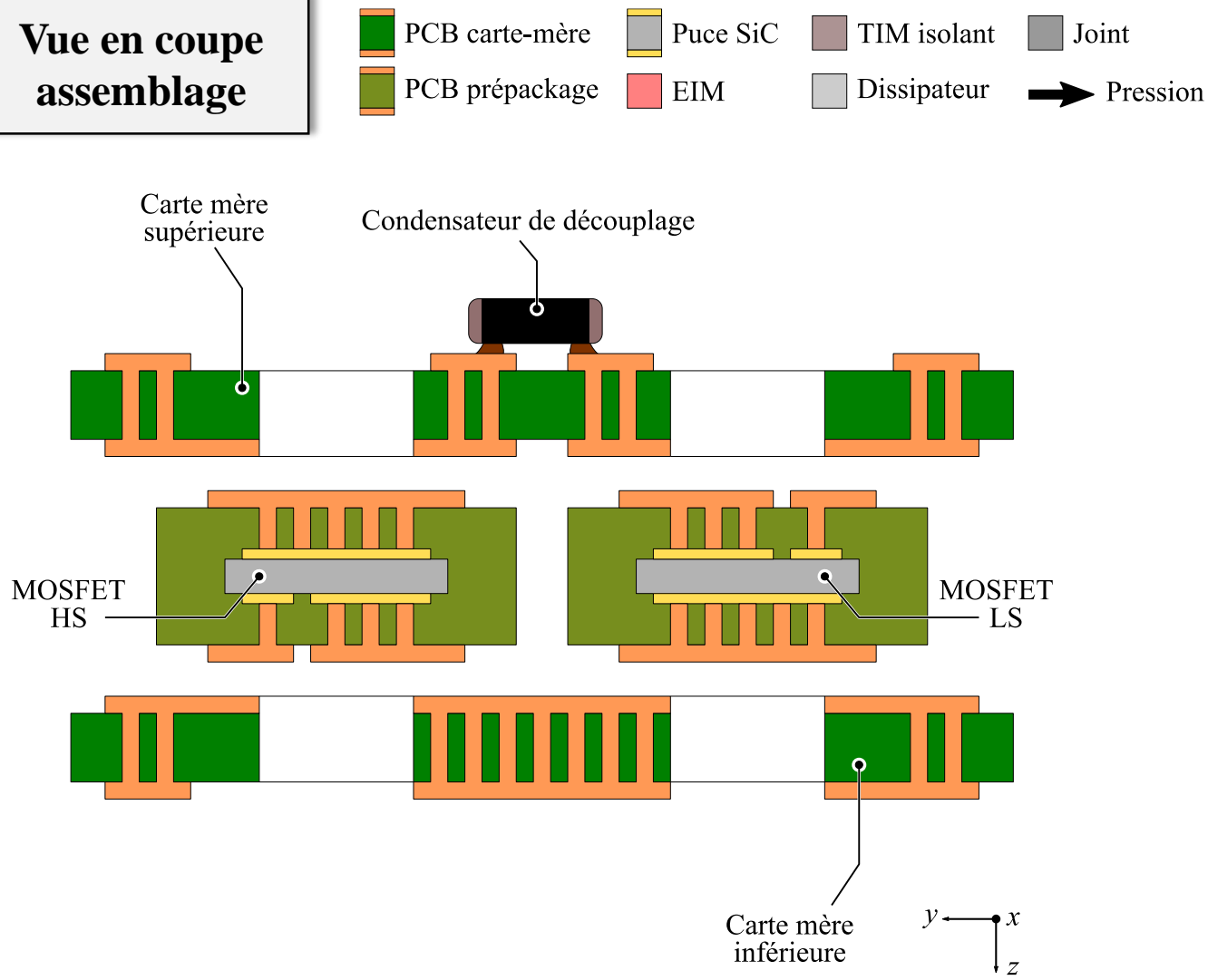
## CELLULE DE COMMUTATION PERFORMANTE ET DÉMONTABLE

### Cellule de commutation performante et démontable

- Prépackages = 1 puce SiC
- PCBs carte-mère :
  - ✓ Interconnexion électrique des prépackages
  - ✓ Connexion au reste du convertisseur
  - ✓ Condensateurs de découplage



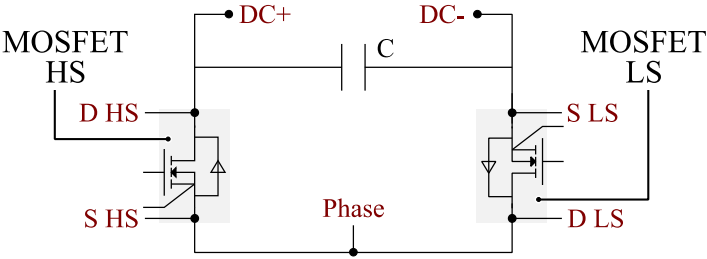
### Vue en coupe assemblage



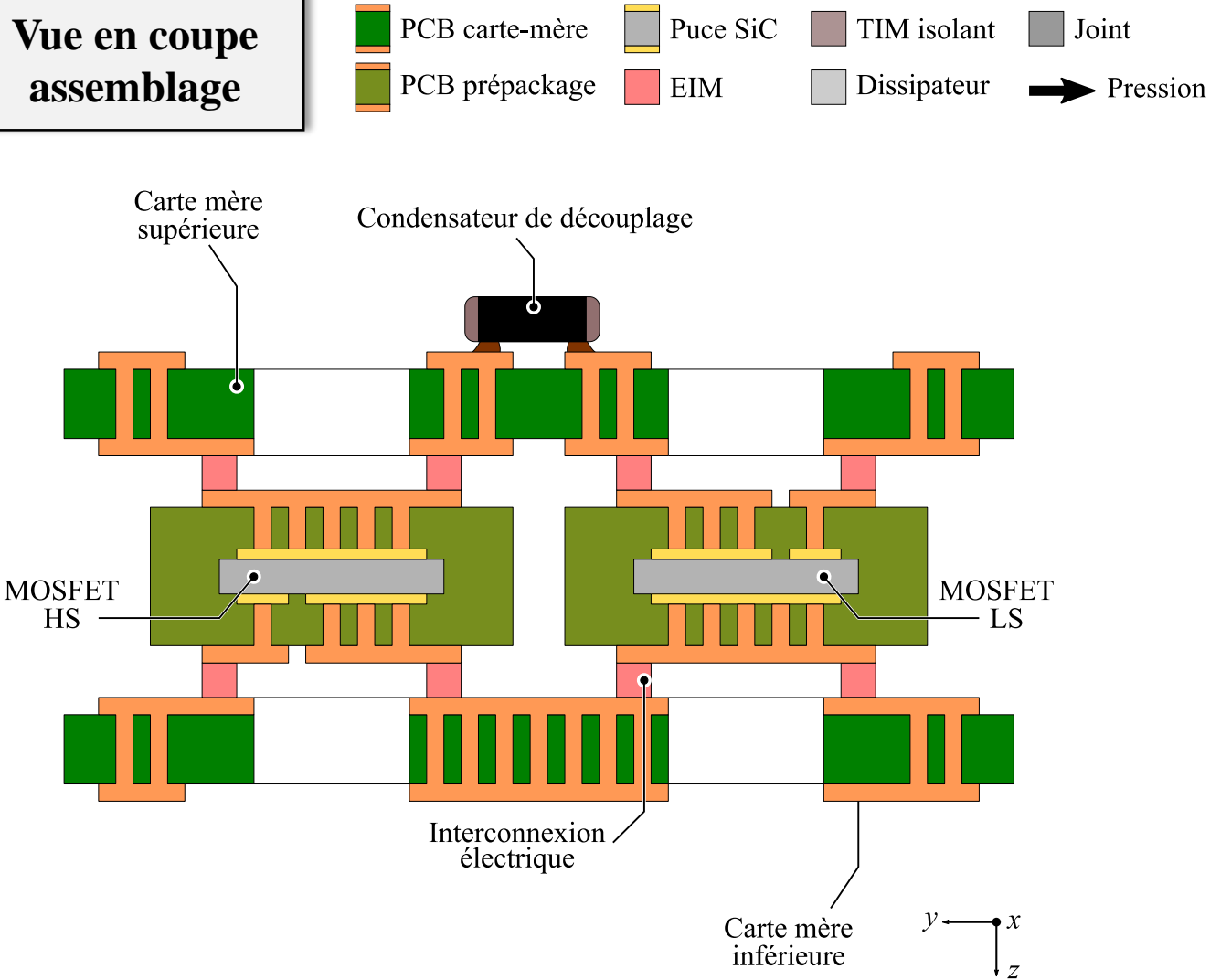


### Cellule de commutation performante et démontable

- Prépackages = 1 puce SiC
- PCBs carte-mère
- **Interconnexions électriques (EIM) :**
  - ✓ Interconnexion électrique des prépackages et cartes-mères



### Vue en coupe assemblage

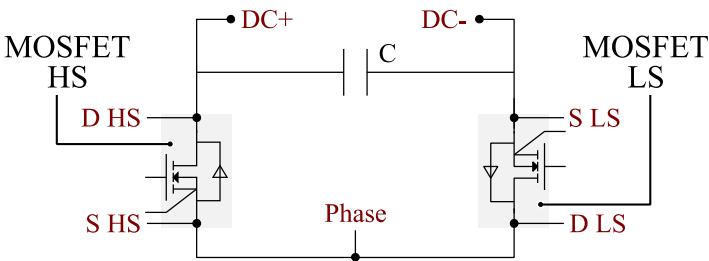


# PROPOSITION TECHNOLOGIQUE

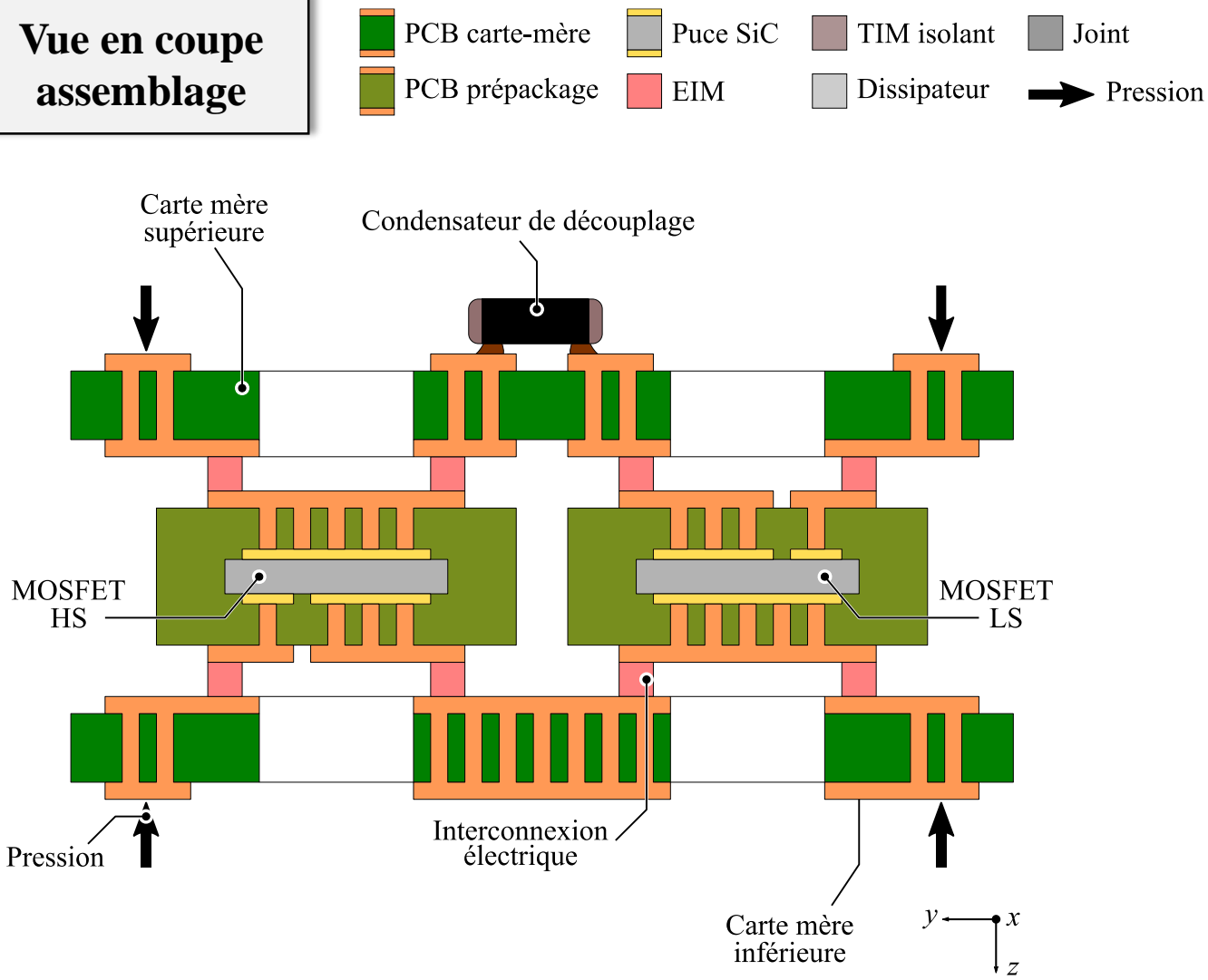
## CELLULE DE COMMUTATION PERFORMANTE ET DÉMONTABLE

### Cellule de commutation performante et démontable

- Prépackages = 1 puce SiC
- PCBs carte-mère
- Interconnexions électriques (EIM)
- **Assemblage par pression :**
  - ✓ Maintien des diverses couches de la cellule de commutation

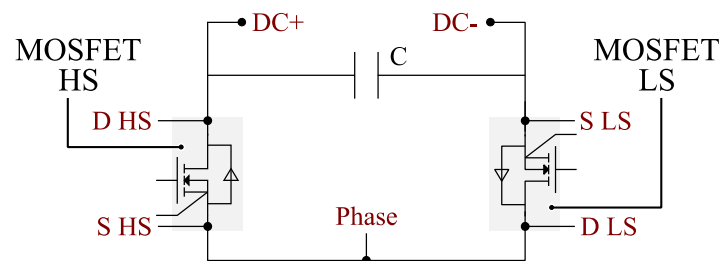


### Vue en coupe assemblage

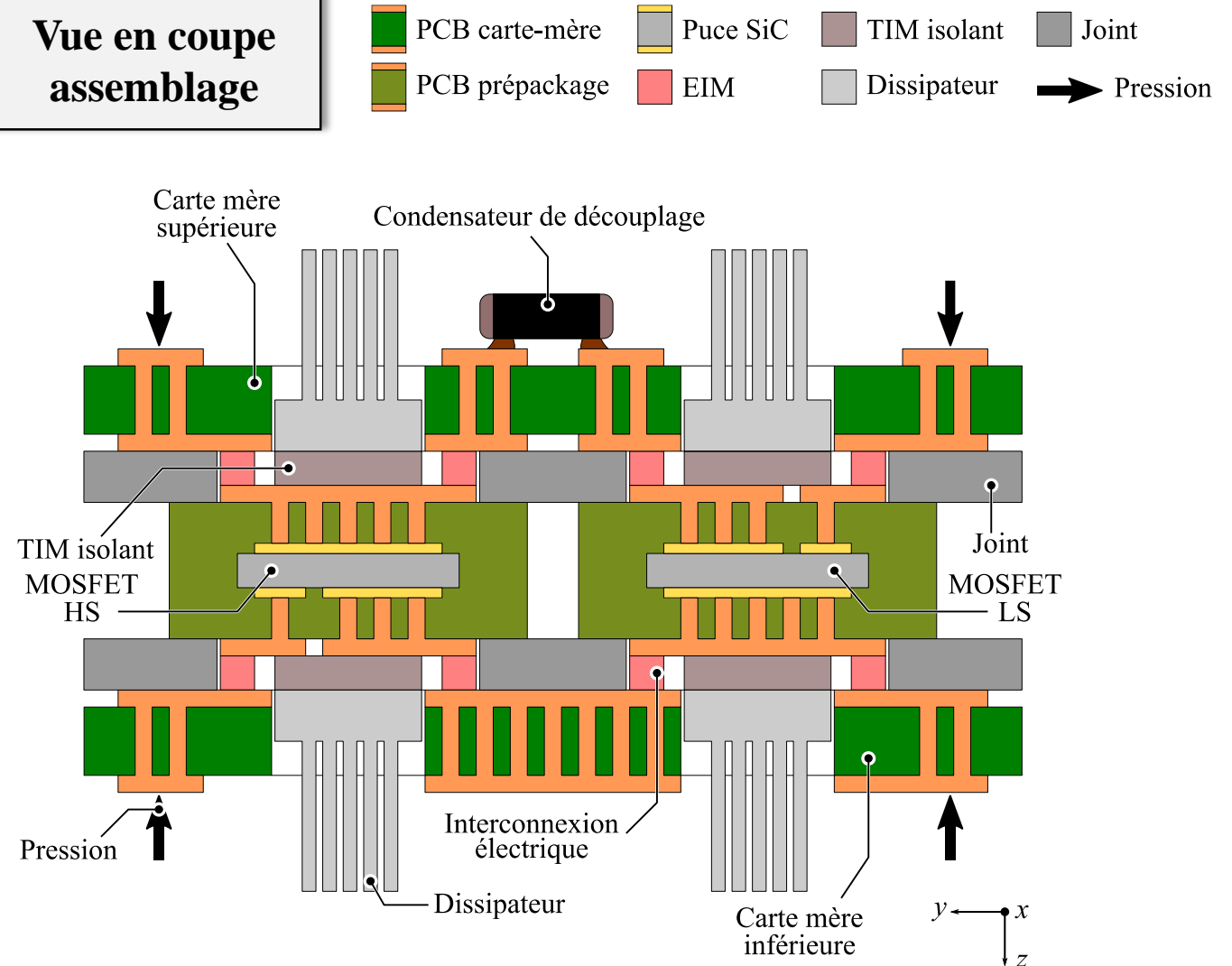


### Cellule de commutation performante et démontable

- Prépackages = 1 puce SiC
- PCBs carte-mère
- Interconnexions électriques (EIM)
- Assemblage par pression
- **Solution de refroidissement :**
  - ✓ Gestion thermique des puces SiC
  - ✓ TIM isolant



### Vue en coupe assemblage



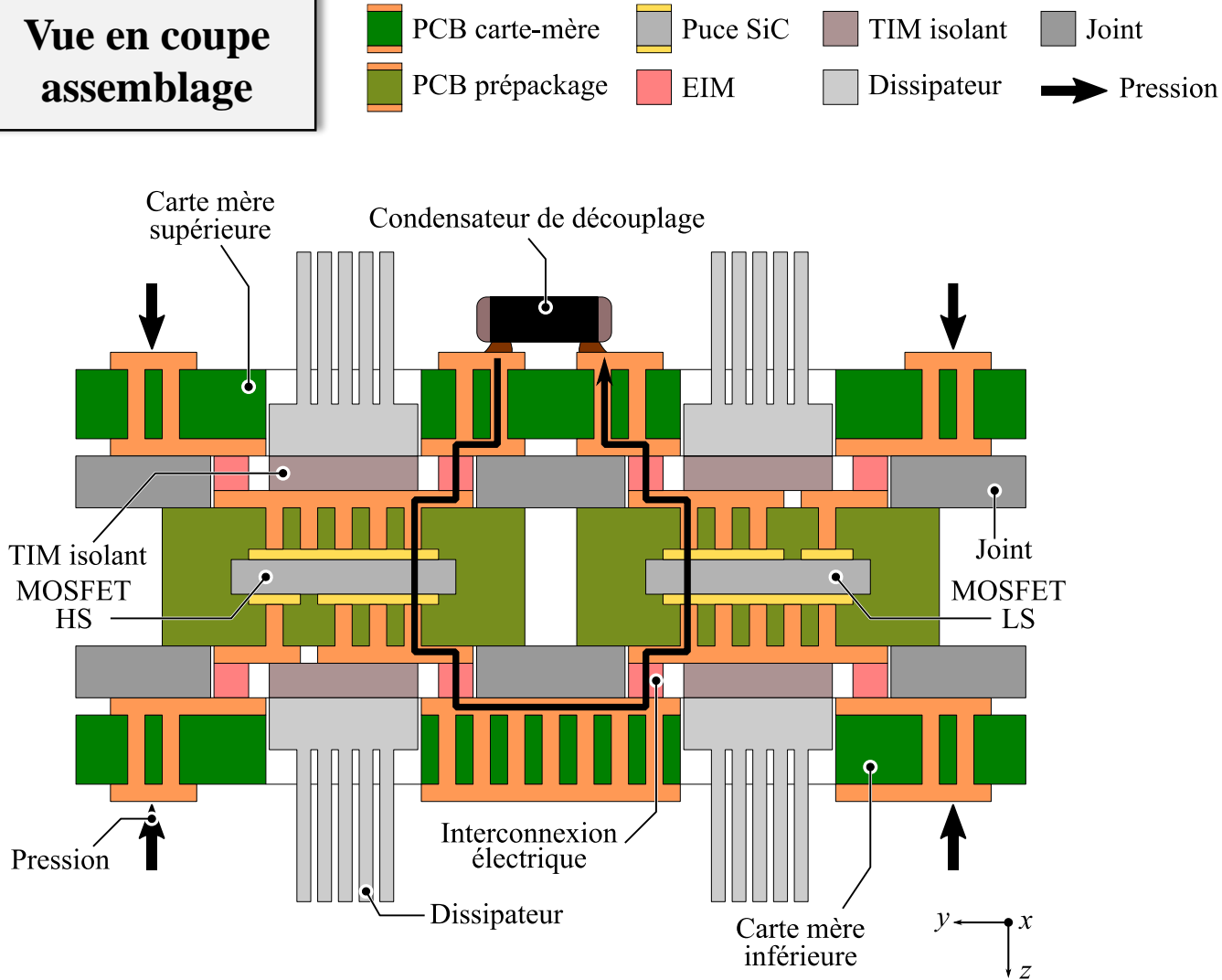
Performances bénéfiques  
aux composants SiC



- ✓ Performances électriques :
- Technique d'intégration PCB pour les prépackages
  - Proximité de l'étage de découplage et des puces de la cellule

→ Inductance parasite  $L_s \approx 1 \text{ nH}$  [1]

Vue en coupe  
assemblage



[1] M. Ferber *et al.*, « Stray Inductance of a Modular Switching Cell Designed for Easier Disassembly »

### Performances bénéfiques aux composants SiC



#### ✓ Performances électriques :

- Technique d'intégration PCB pour les prépackages
- Proximité de l'étage de découplage et des puces de la cellule

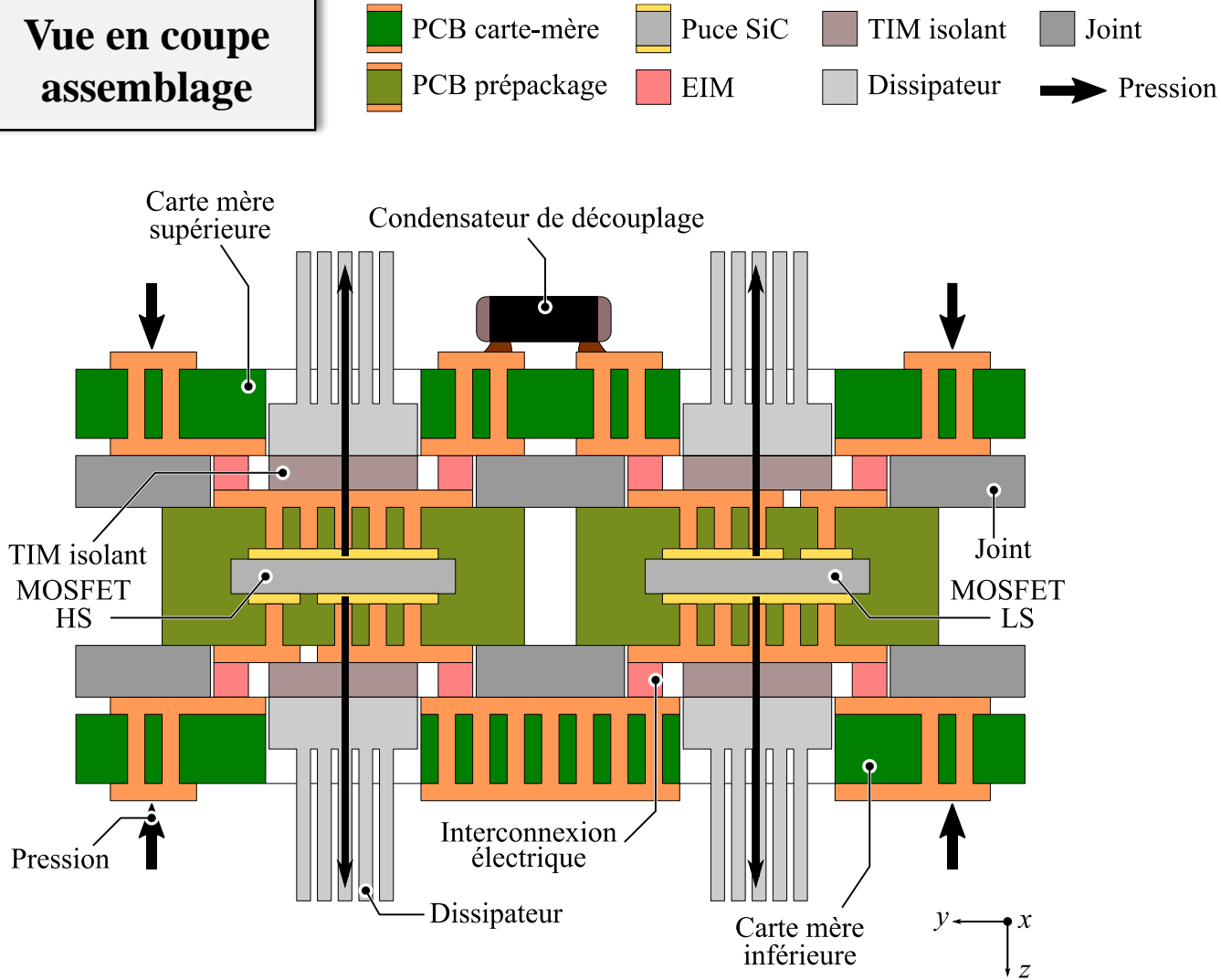
→ Inductance parasite  $L_S \approx 1 \text{ nH}$  [1]

#### ✓ Performances thermiques :

- Refroidissement double-face des puces de la cellule

→ Résistance thermique  $R_{thj-a} \approx 1,2 \text{ K/W}$  (convection forcée à l'air)

### Vue en coupe assemblage



[1] M. Ferber *et al.*, « Stray Inductance of a Modular Switching Cell Designed for Easier Disassembly »

# PROPOSITION TECHNOLOGIQUE

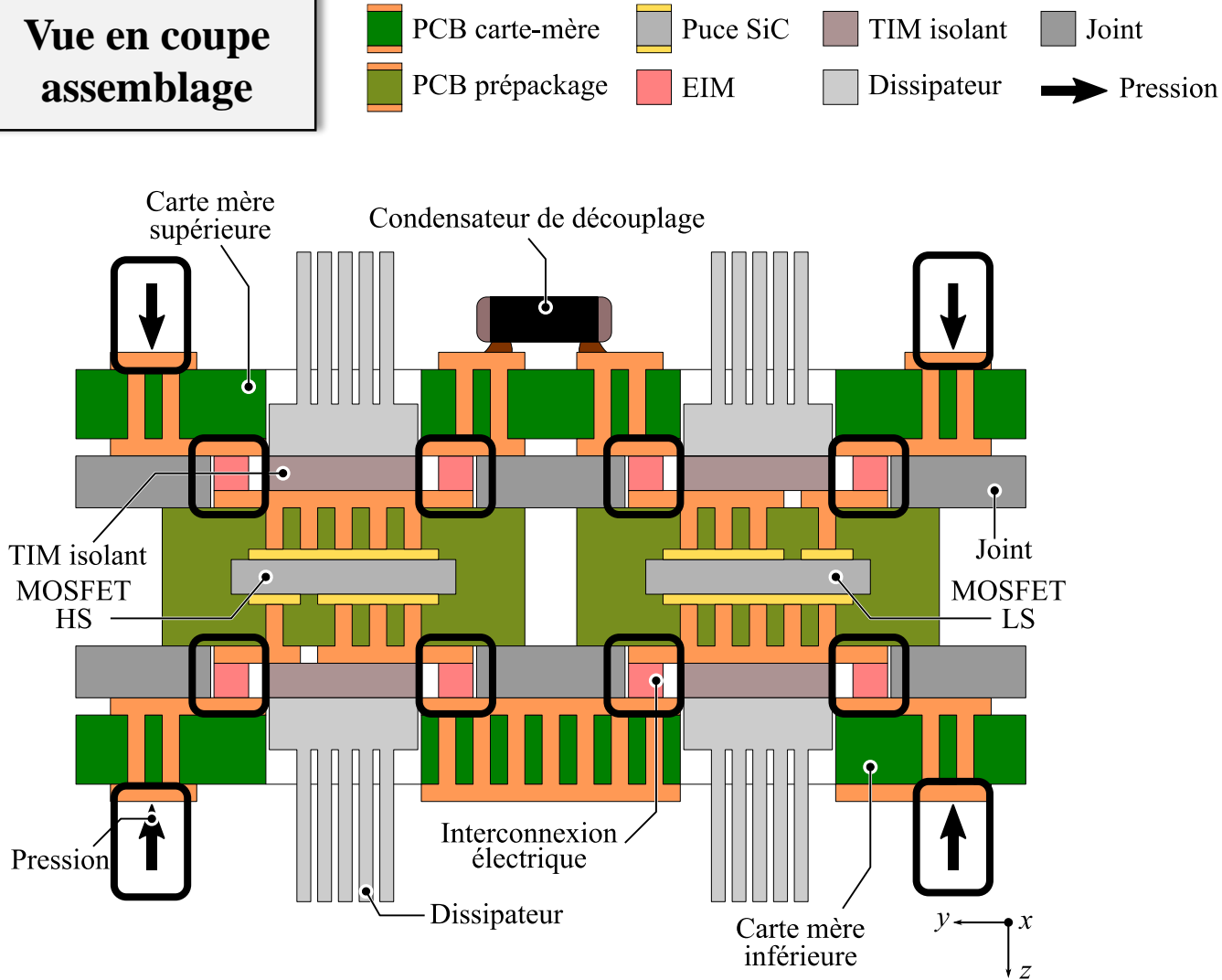
## OPPORTUNITÉS POUR LE PACKAGING DES COMPOSANTS SiC

Démontabilité



- ✓ Assemblage mécanique par pression
- ✓ Utilisation d'interconnexions électriques sans liaison mécanique permanente

Vue en coupe assemblage



# PROPOSITION TECHNOLOGIQUE

## OPPORTUNITÉS POUR LE PACKAGING DES COMPOSANTS SiC

### Démontabilité



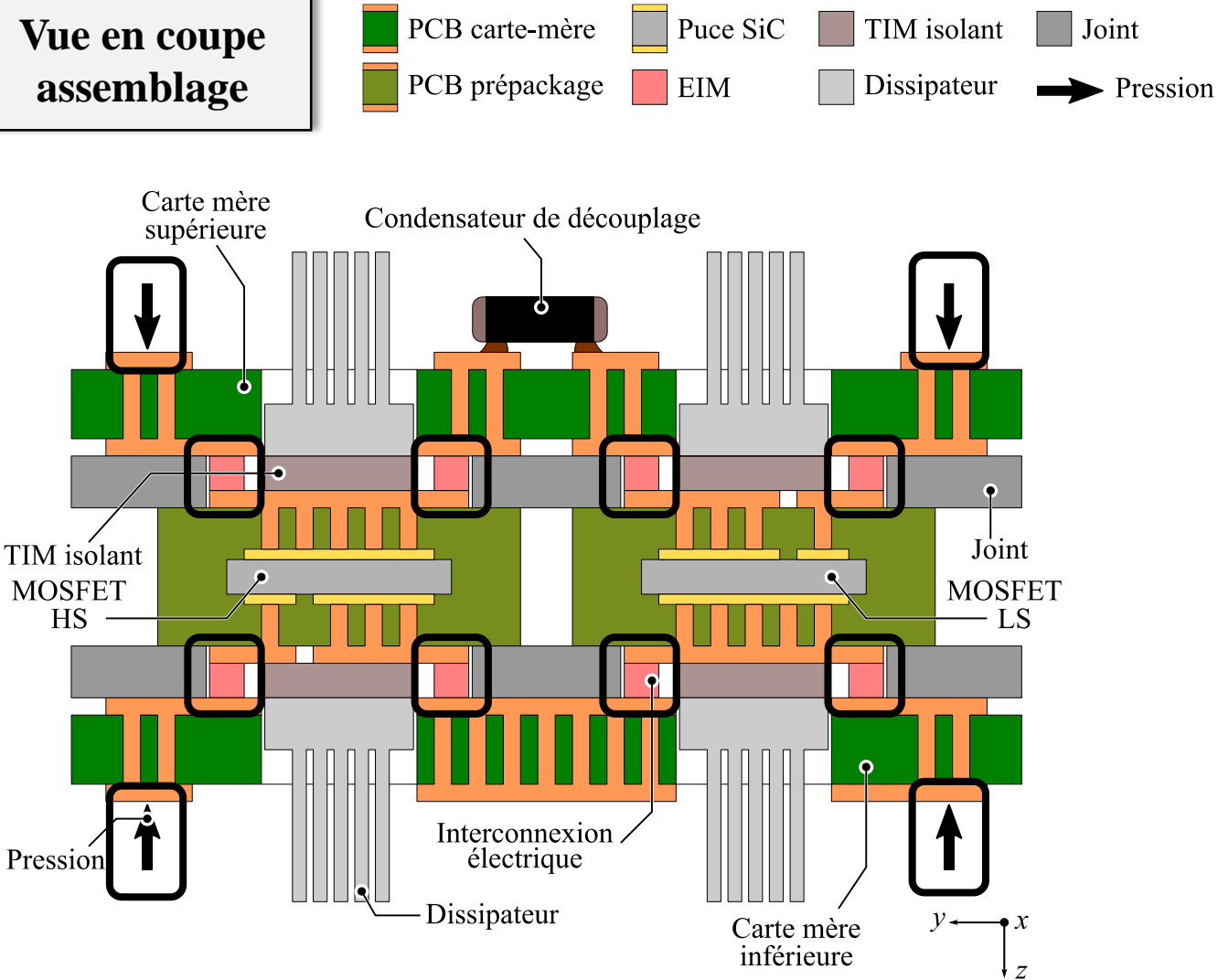
- ✓ Assemblage mécanique par pression
- ✓ Utilisation d'interconnexions électriques sans liaison mécanique permanente

### Modularité



- ✓ Assemblage via des cartes-mères
- ✓ Répartition des sources de chaleur

### Vue en coupe assemblage

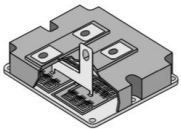




Isolation  
électrique

Proximité des prépackages → intensification  
du champ électrique dans l'assemblage :

- Entre les prépackages
- Sur la bordure des prépackages



Utilisation d'un gel  
diélectrique pour l'isolation

✓ Propriétés isolantes



Utilisation de l'air pour  
l'isolation

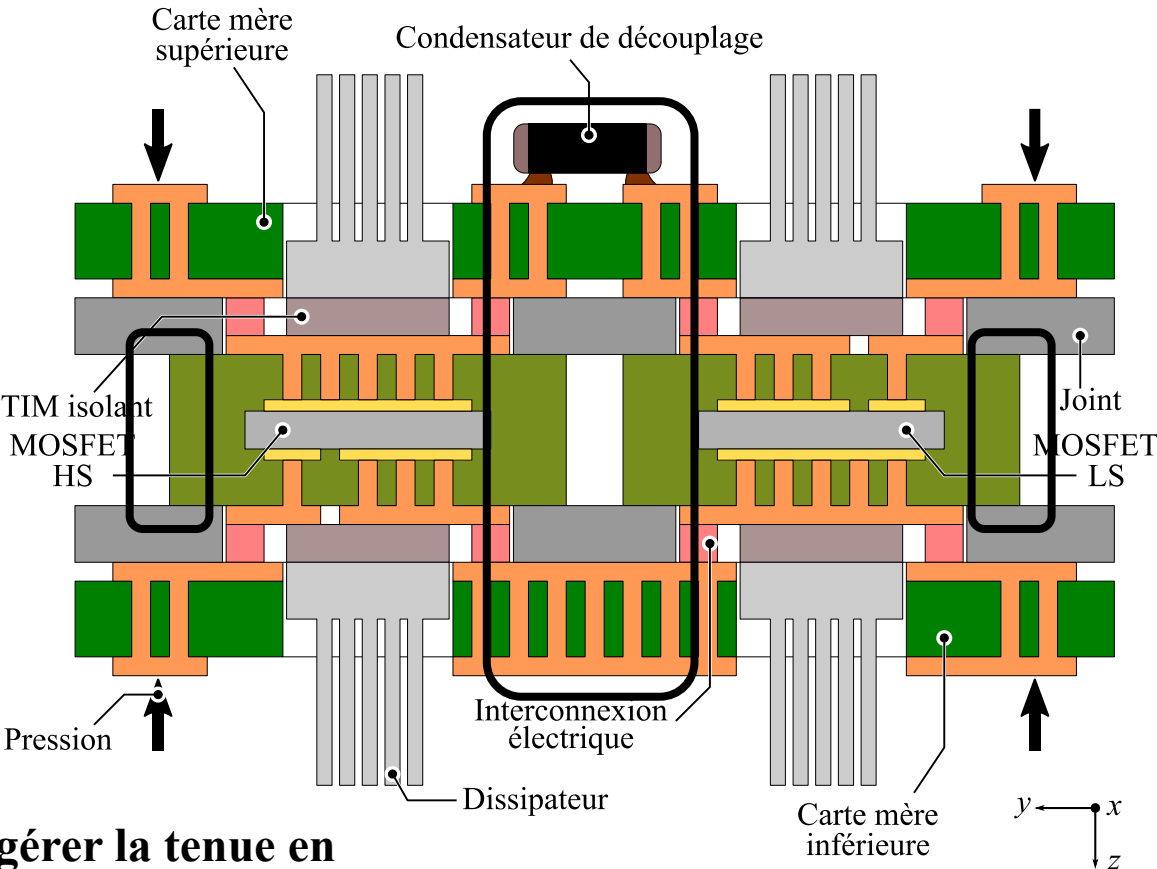
✗ Propriétés isolantes



Stratégies d'isolation nécessaires afin de gérer la tenue en  
tension de la solution de packaging

Vue en coupe  
assemblage

- |                |          |             |          |
|----------------|----------|-------------|----------|
| PCB carte-mère | Puce SiC | TIM isolant | Joint    |
| PCB prépackage | EIM      | Dissipateur | Pression |

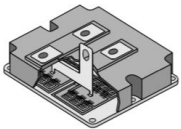






Interconnexions  
électriques

Démontabilité → interconnexions électriques  
sans liaisons mécaniques permanentes et  
performantes (résistance)



Utilisation de brasures

- ✓ Propriétés électriques
- ✗ Démontabilité complexe



Thèse

Utilisation de blocs en cuivre  
massif

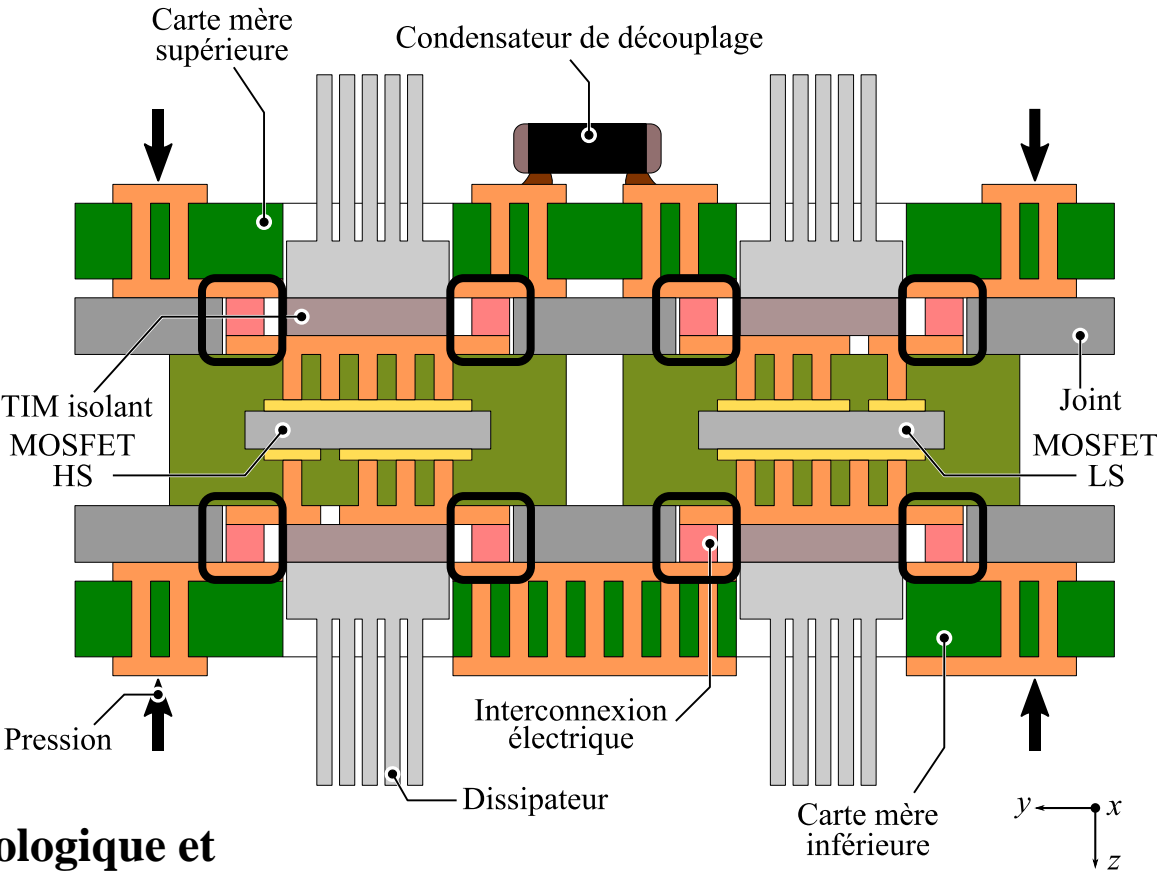
- ✓ Démontable
- Propriétés électriques → ???



Interconnexion électrique → choix technologique et  
évaluation expérimentale des performances

Vue en coupe  
assemblage

- PCB carte-mère
- PCB prépackage
- Puce SiC
- EIM
- TIM isolant
- Dissipateur
- Joint
- Pression

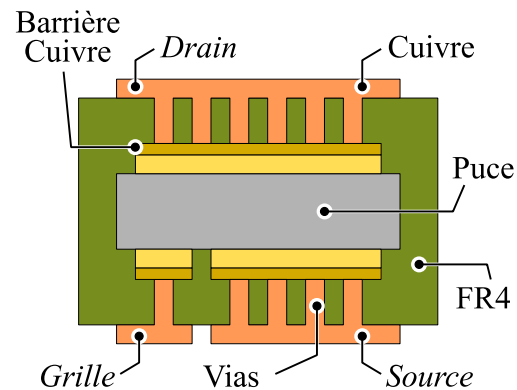




**Performances électriques  
intéressantes pour les  
composants SiC ?**



**Développement d'une  
preuve de concept :**



- ✓ Inductance parasite  $L_s \approx 1 \text{ nH}$   
estimée en simulation [1]
- ✗ Process technologique complexe

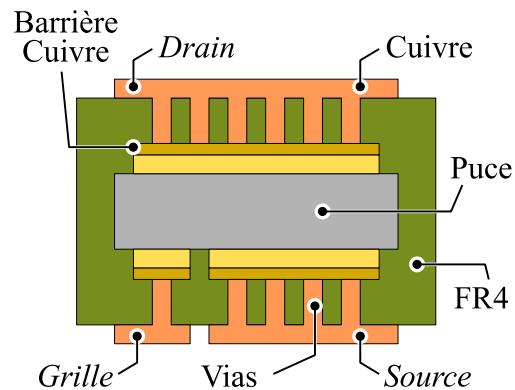
[1] M. Ferber *et al.*, « Stray Inductance of a Modular Switching Cell Designed for Easier Disassembly »



Performances électriques  
intéressantes pour les  
composants SiC ?

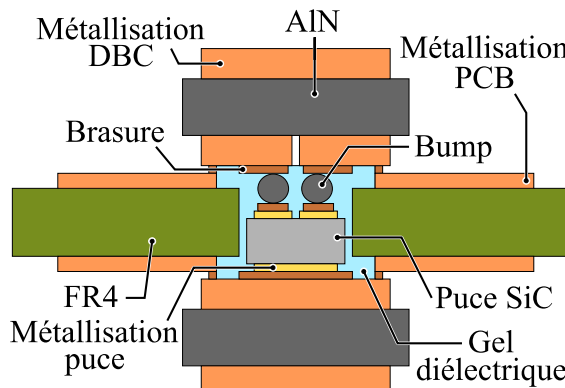


### Développement d'une preuve de concept :

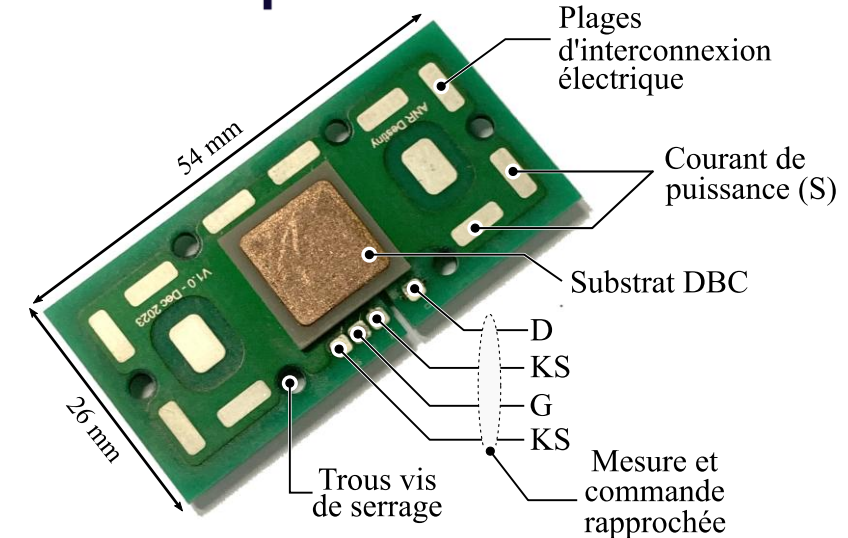


- ✓ Inductance parasite  $L_S \approx 1$  nH  
estimée en simulation [1]
- ✗ Process technologique complexe

### Solution alternative pour le prépackage

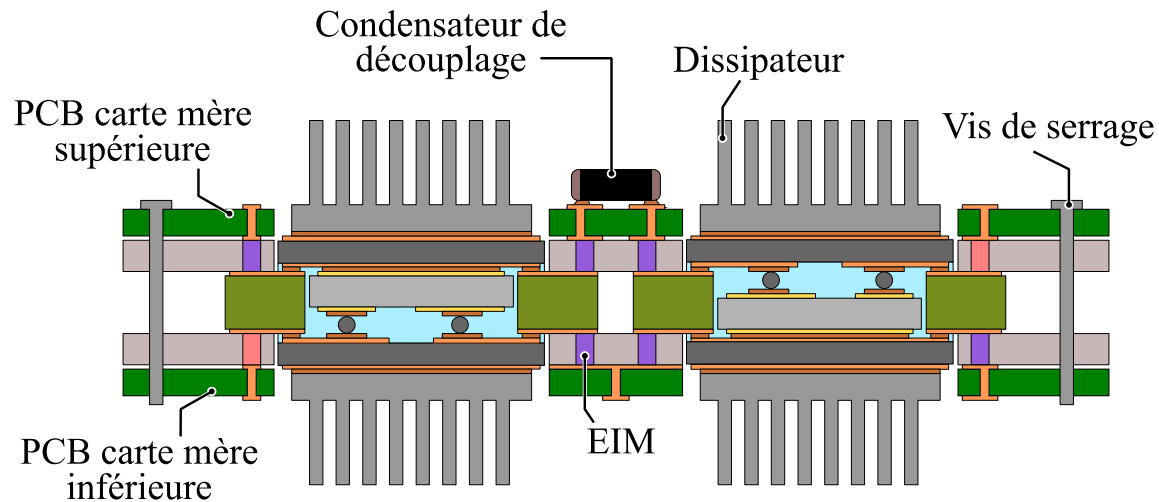
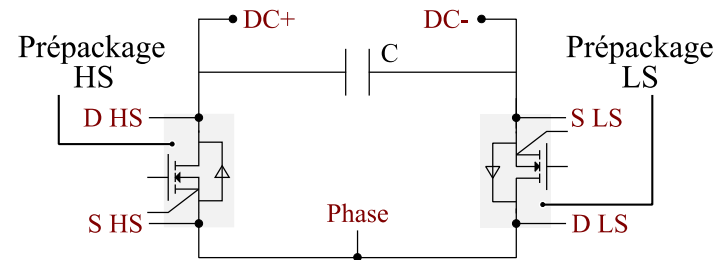


- ✓ S'intègre comme la solution PCB
- ✓ Isolation double-face
- ✗ Process développé spécifiquement
- ✗ Inductance parasite ( $L_S$ )



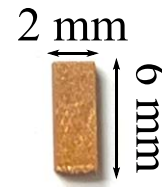
Assemblage de prépackages pour  
obtenir une cellule de commutation

### Assemblage des prépackages

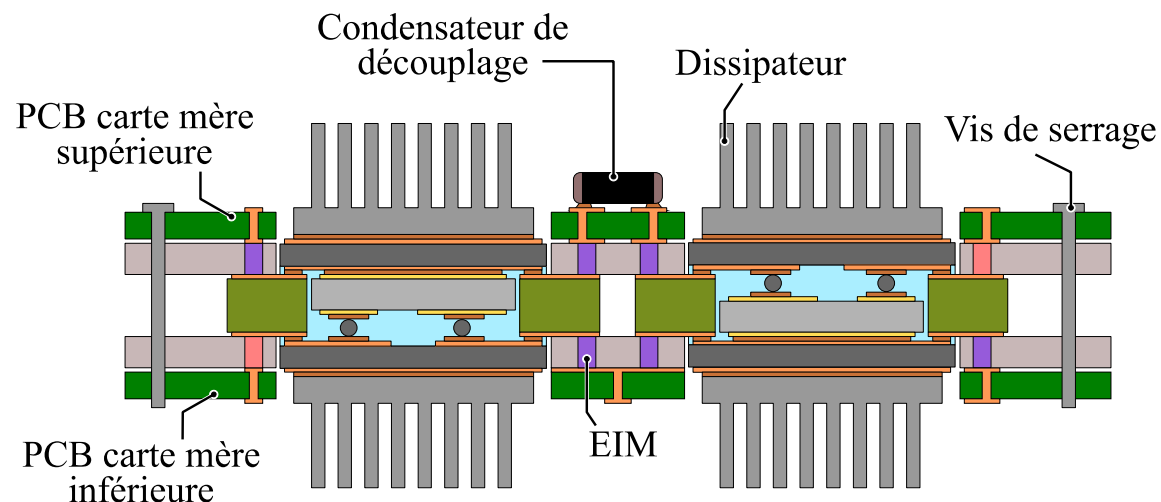
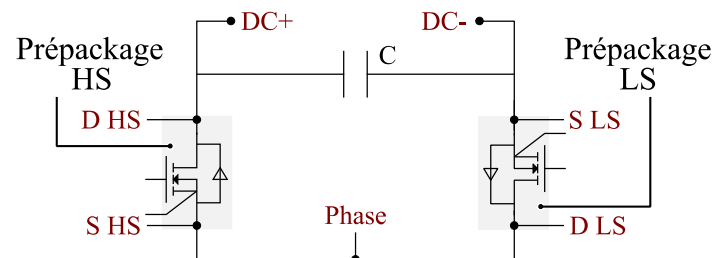


### Assemblage constitué de :

- Prépackages
- PCBs carte-mère
- Interconnexions électriques → Blocs de cuivre massif
- Système de mise en pression → Vis
- Dissipateurs

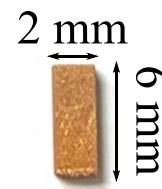


### Assemblage des prépackages

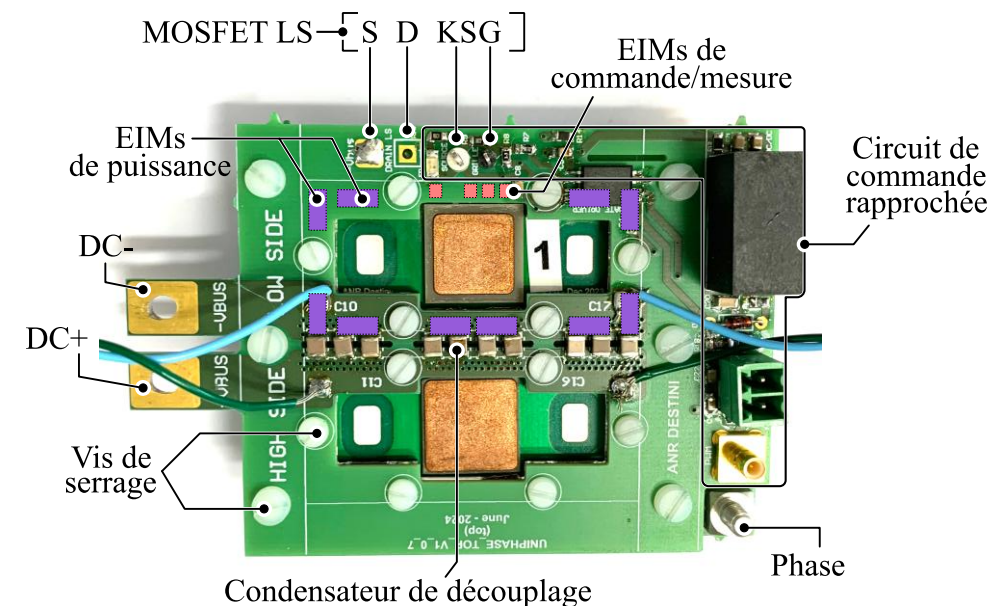


### Assemblage constitué de :

- Prépackages
- PCBs carte-mère
- Interconnexions électriques → Blocs de cuivre massif
- Système de mise en pression → Vis
- Dissipateurs



### Réalisation finale



### Cellule de commutation :

- ✓ Maille de commutation
- ✓ Assemblée par pression via des vis
- ✓ Démontable
- ✓ Modulaire vis-à-vis du système (cartes-mères)

Résultats  
expérimentaux

	$L_s$ (nH)
Thèse	3
Module de puissance commercial	17,4 [1]
Boitier TO-247	35,7 [2]
Module amélioré	0,4 – 3,4

- Inductance parasite inférieure aux concepts d'intégration commerciaux (MCM et SCM)
- Inductance parasite supérieure aux modules améliorés → optimisation de  $L_s$

➡ ☒ La modularité et la démontabilité n'impliquent pas une baisse des performances

☒  $L_s$  intégration PCB =  $L_s$  module amélioré

[1] Module de puissance CCB021M12FM3, Wolfspeed  
[2] J. Wildauer *et al.*, « Comprehensive electric and thermal evaluation of SiC high-power discrete packages for next generation power supplies »

Résultats  
expérimentaux

	$L_s$ (nH)
Thèse	3
Module de puissance commercial	17,4 [1]
Boitier TO-247	35,7 [2]
Module amélioré	0,4 – 3,4

- Inductance parasite inférieure aux concepts d'intégration commerciaux (MCM et SCM)
- Inductance parasite supérieure aux modules améliorés → optimisation de  $L_s$

- 
- ✓ La modularité et la démontabilité n'impliquent pas une baisse des performances
  - ✓  $L_s$  intégration PCB =  $L_s$  module amélioré



Isolation  
électrique



**Objectif :** Proposer des stratégies d'isolation permettant de gérer la tenue en tension de la solution de packaging



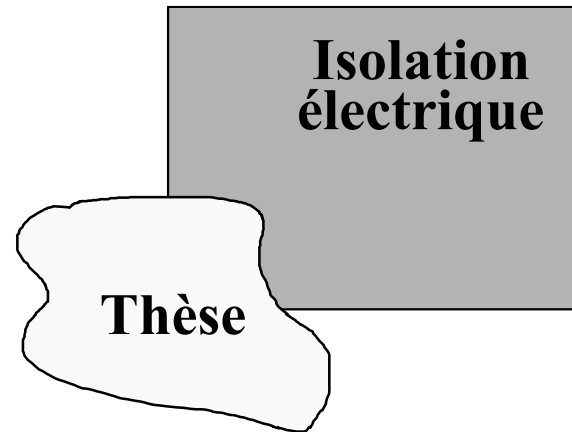
Interconnexions  
électriques



**Objectif :** Évaluer les propriétés électriques des interconnexions utilisées pour la solution de packaging

[1] Module de puissance CCB021M12FM3, Wolfspeed

[2] J. Wildauer et al., « Comprehensive electric and thermal evaluation of SiC high-power discrete packages for next generation power supplies »



1

Solution de packaging modulaire, démontable et performante

2

**Isolation électrique de la solution de packaging**

3

Interconnexions électriques modulaires et démontables

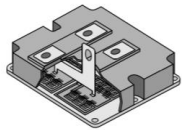
4

Conclusion et Perspectives



### ■ Proximité des prépackages → intensification du champ électrique dans l'assemblage :

- Entre les prépackages
- Sur la bordure des prépackages



### Utilisation d'un gel diélectrique pour l'isolation

✓ Propriétés isolantes



Thèse

### Utilisation de l'air pour l'isolation

✗ Propriétés isolantes

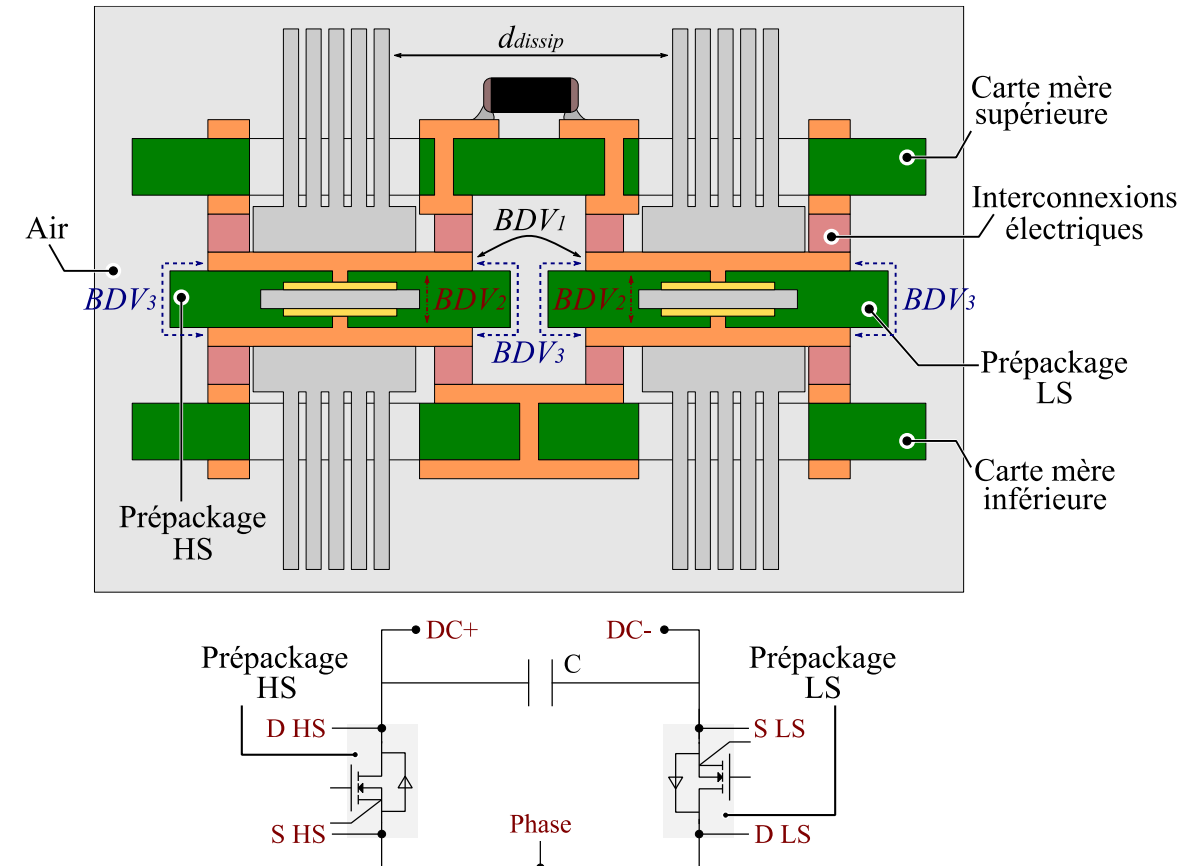
### Étude complexe :

- Géométrie non fixée
- Multiples paramètres

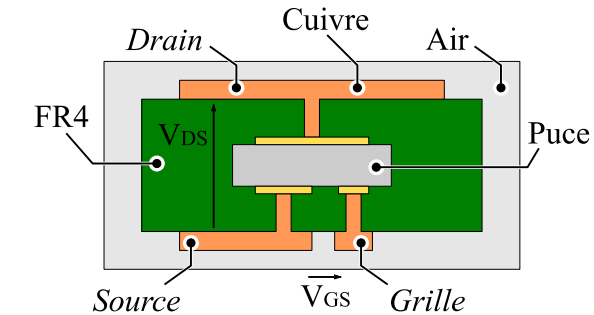


### Réduction de la zone d'étude aux prépackages

### Zones de contrainte



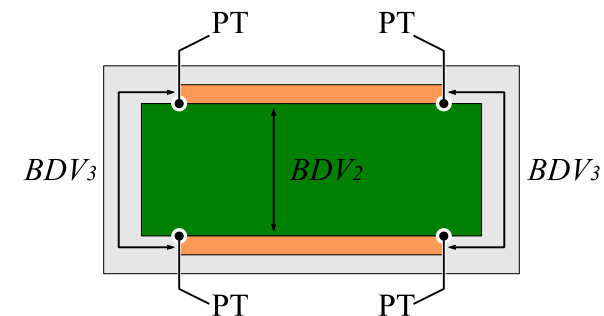
### Identification des zones de contrainte



#### ■ Puce intégrée au sein d'un PCB

- ✓ Isolation autour de la puce réalisée par le substrat PCB [1]

↓  
*Simplification de la géométrie*

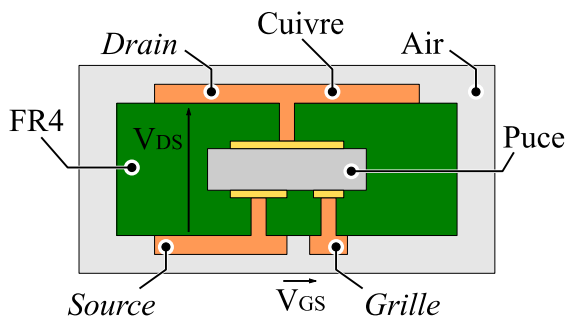


#### ■ PCB avec contrainte en tension au travers du substrat

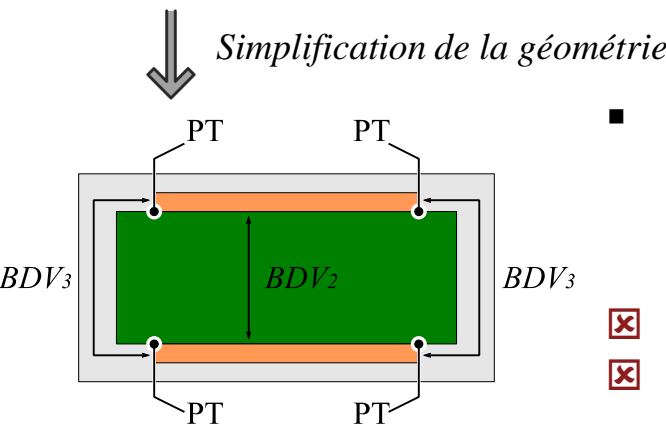
- ✗ Isolation à l'air
- ✗ Présence de Point Triple (PT)

[1] L. Böttcher *et al.*, « Concepts for realizing High-Voltage Power Modules by Embedding of SiC Semiconductors »

### Identification des zones de contrainte



- **Puce intégrée au sein d'un PCB**
  - ✓ Isolation autour de la puce réalisée par le substrat PCB [1]



- **PCB avec contrainte en tension au travers du substrat**
  - ✗ Isolation à l'air
  - ✗ Présence de Point Triple (PT)

### Point Triple (PT)

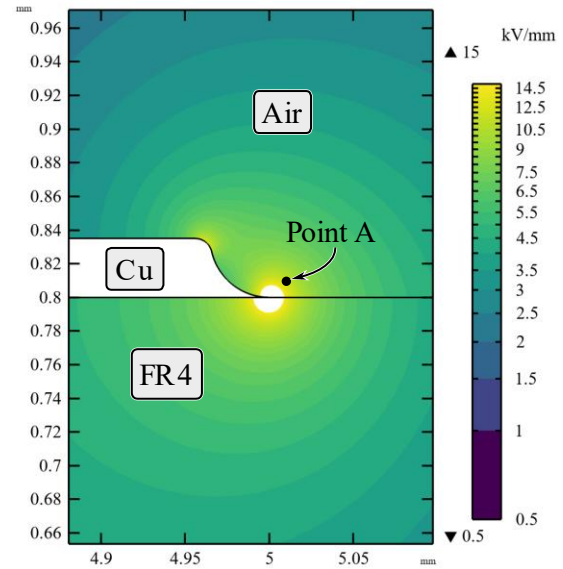
**Définition** : Jonction de 3 matériaux de permittivité différente

- Permittivité FR4 : 3,5
- Permittivité Cuivre : 1
- Permittivité Air : 1,0006

✗ Renforcement du champ électrique autour du PT

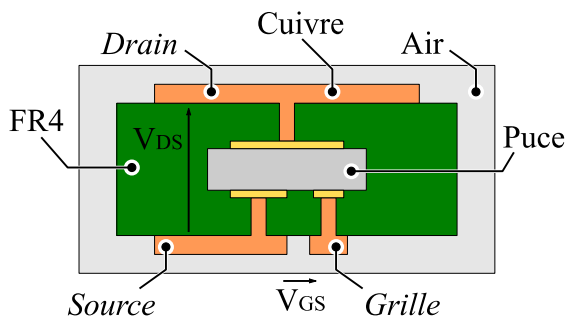
↓ Phénomènes physiques

- **Décharge Partielle (DP)**
  - PDIV → tension d'apparition des DP
- **Claquage diélectrique**
  - BDV → tension de claquage

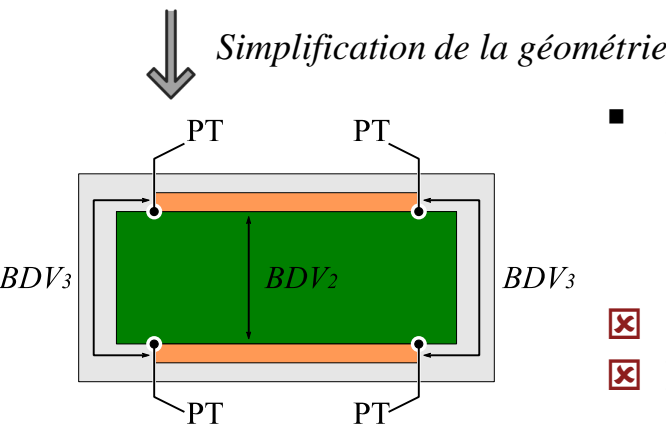


[1] L. Böttcher *et al.*, « Concepts for realizing High-Voltage Power Modules by Embedding of SiC Semiconductors »

### Identification des zones de contrainte



- **Puce intégrée au sein d'un PCB**
  - ✓ Isolation autour de la puce réalisée par le substrat PCB [1]



- **PCB avec contrainte en tension au travers du substrat**
  - ✗ Isolation à l'air
  - ✗ Présence de Point Triple (PT)

### Point Triple (PT)

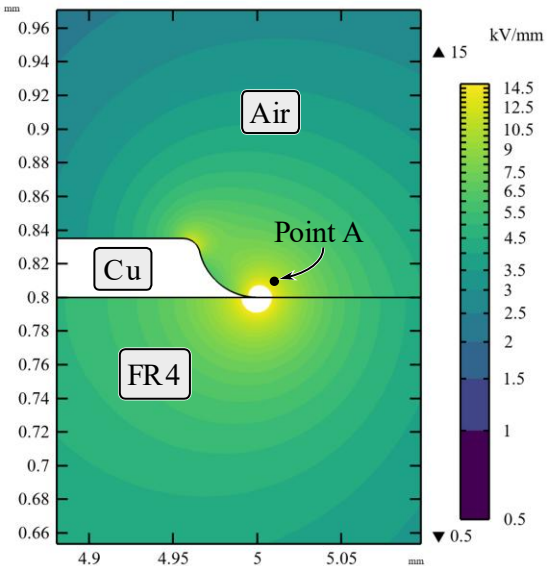
**Définition** : Jonction de 3 matériaux de permittivité différente

- Permittivité FR4 : 3,5
- Permittivité Cuivre : 1
- Permittivité Air : 1,0006

- ✗ Renforcement du champ électrique autour du PT

↓ *Phénomènes physiques*

- **Décharge Partielle (DP)**
  - PDIV → tension d'apparition des DP
- **Claquage diélectrique**
  - BDV → tension de claquage



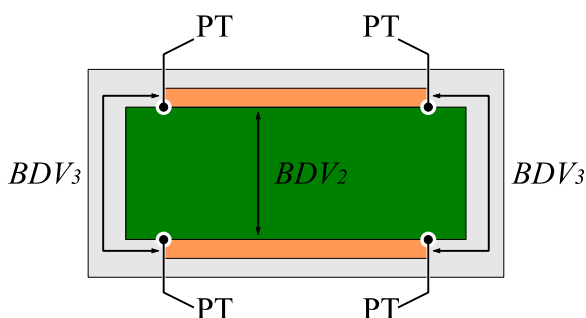
➔ **Stratégies d'isolation** nécessaires afin de gérer la tenue en tension du PCB

[1] L. Böttcher *et al.*, « Concepts for realizing High-Voltage Power Modules by Embedding of SiC Semiconductors »

### Démarche pour l'étude des stratégies d'isolation

**Objectif principal** : Évaluer si des stratégies d'isolation permettent ou non d'atténuer le renforcement du champ électrique aux PTs du PCB

- **PCB** avec contrainte en tension appliquée au travers du PCB



#### Étude en simulation numérique

- Critère du champ électrique au PT → **physique électrostatique**



#### Tendances déduites en simulation

- Vérification de la dépendance du champ électrique aux paramètres des stratégies

#### Définition de véhicules de test

- Designs de PCB permettant d'évaluer les tendances déduites en simulation numérique

#### Évaluation des performances

- Caractérisation de l'activité de DP → **PDIV**
- Caractérisation du claquage → **BDV**

**Étapes présentées pour la soutenance**

Norme IPC-2221A



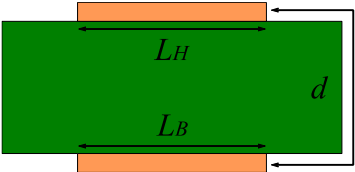
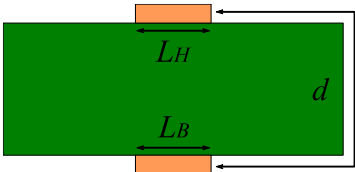
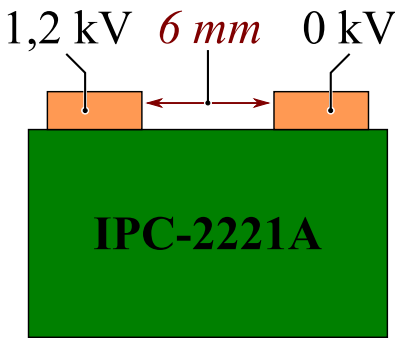
« Si la tension ↗ → la distance d'isolation ↗ »

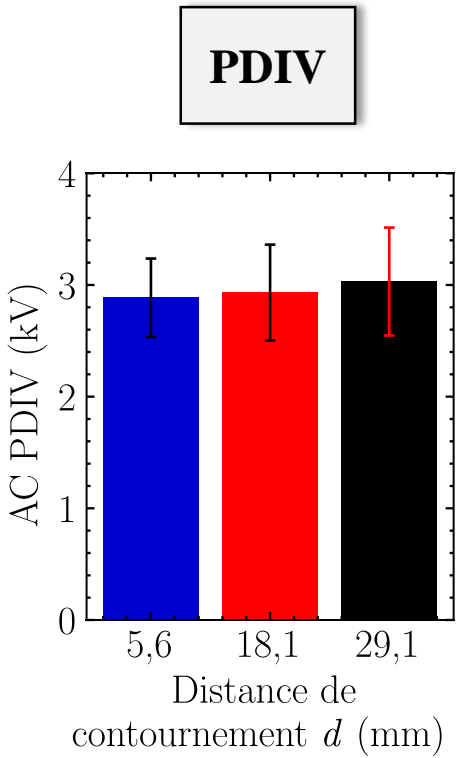
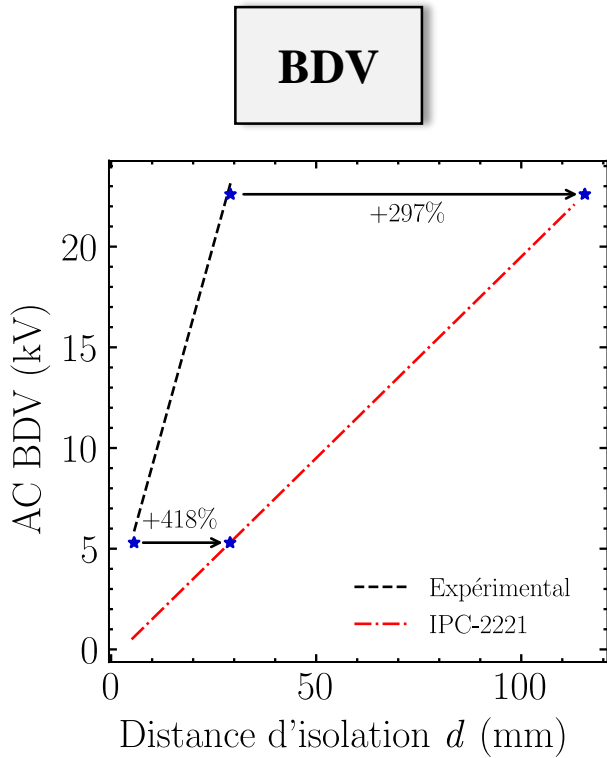
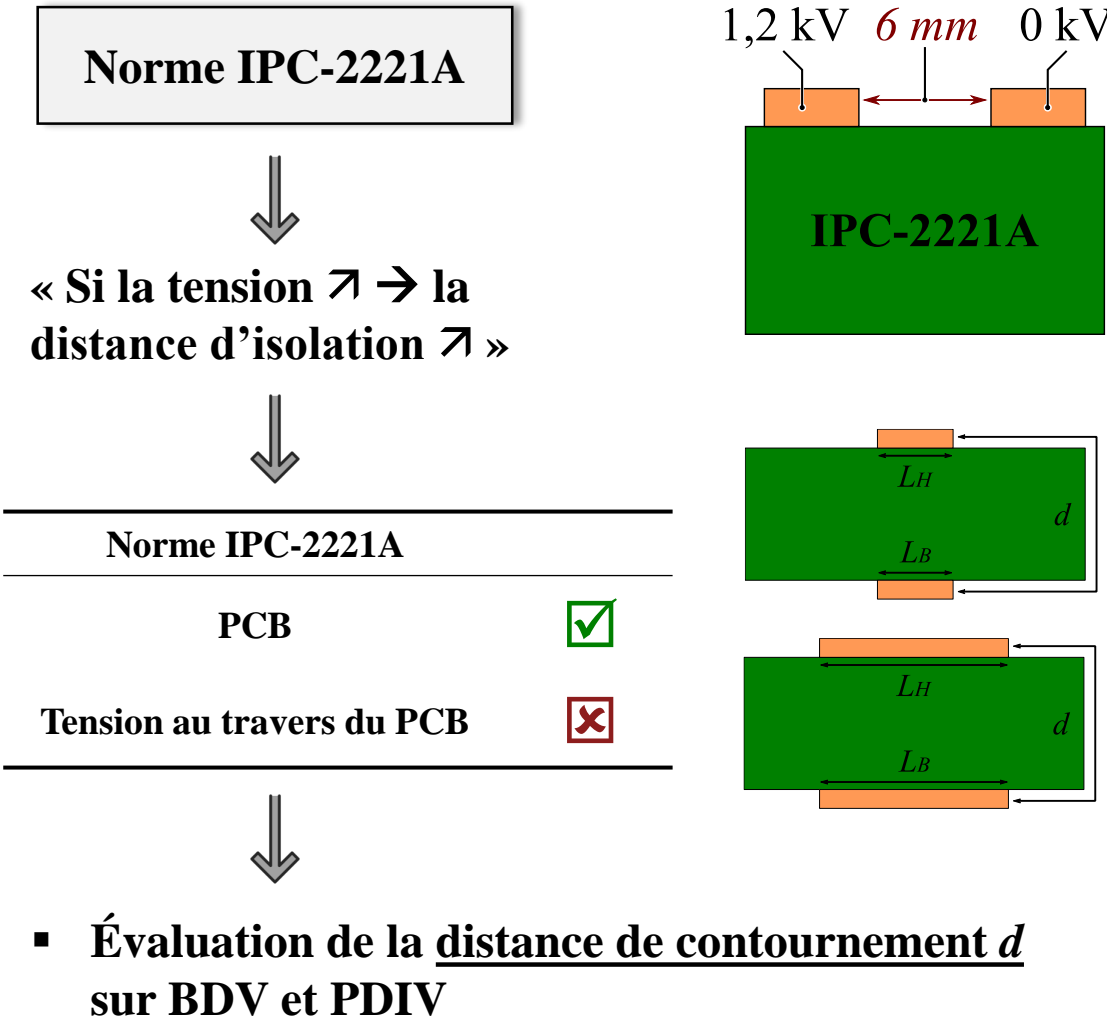


Norme IPC-2221A	
PCB	✓
Tension au travers du PCB	✗

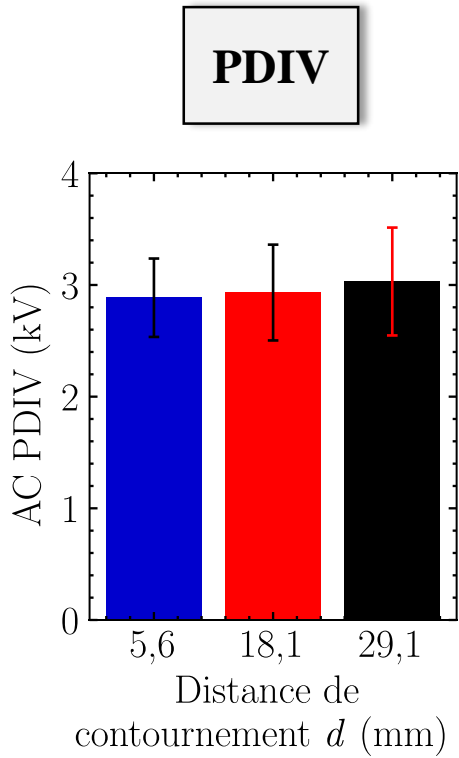
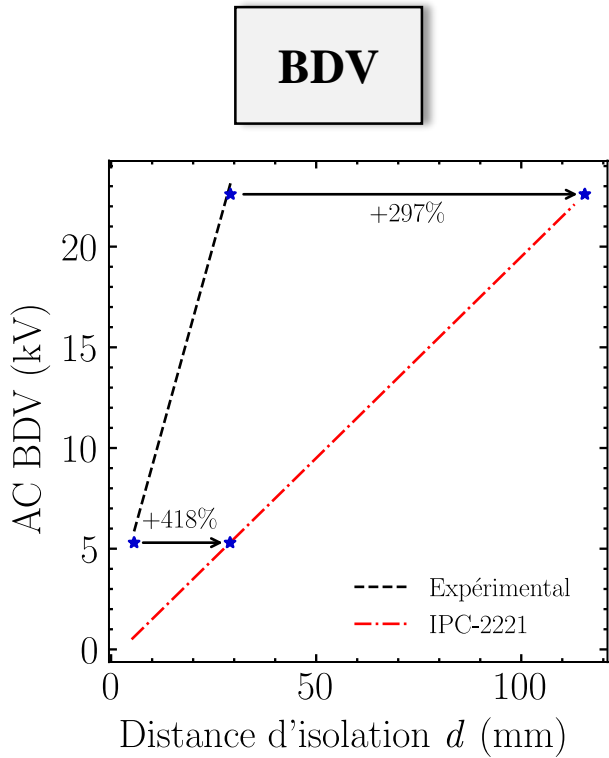
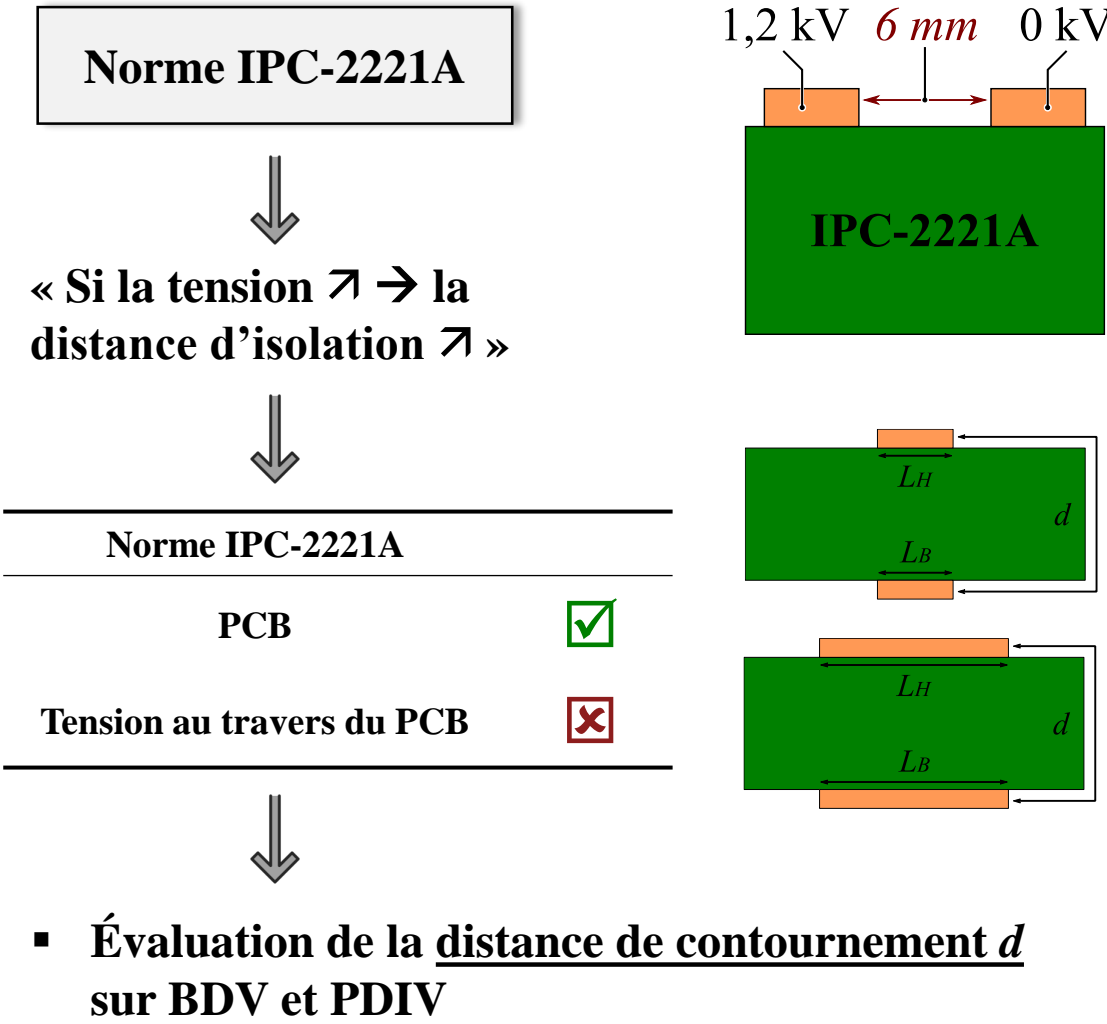


- Évaluation de la distance de contournement  $d$  sur BDV et PDIV





- Lorsque la distance de contournement ↗ :
  - BDV ↗
  - PDIV évolue peu
- Norme IPC-2221A → nette marge de sécurité sur BDV



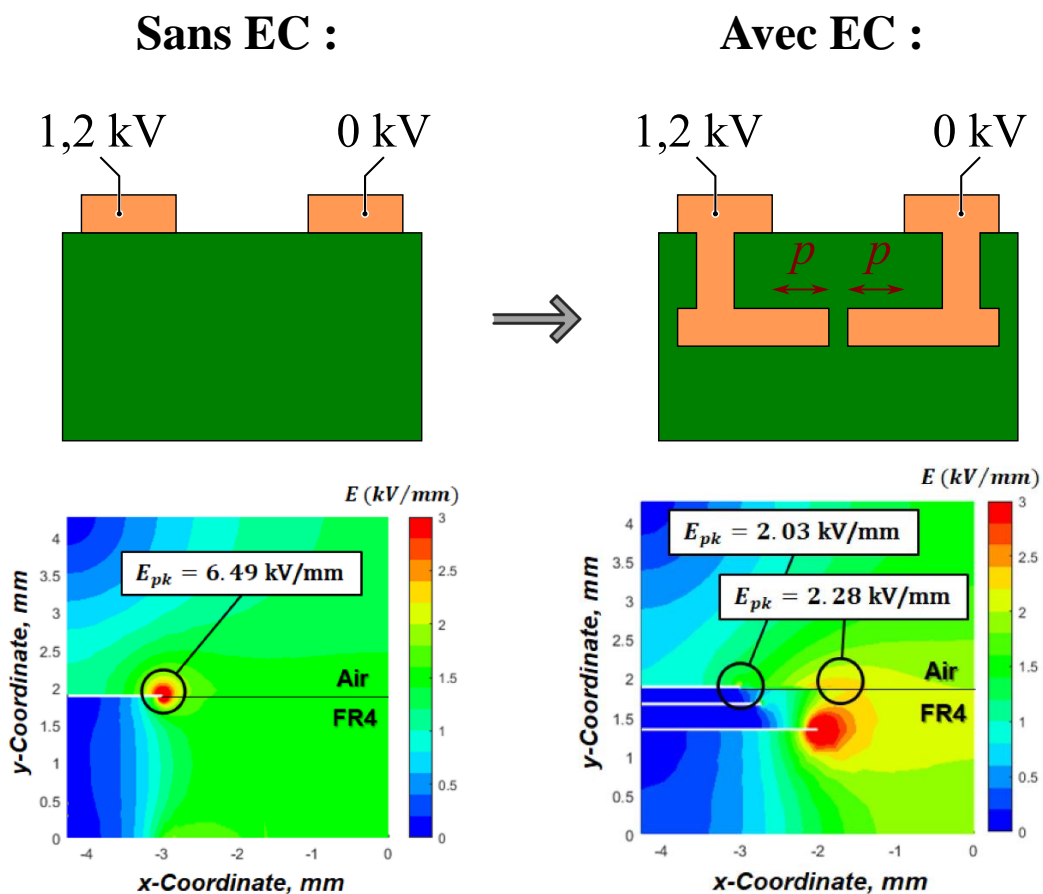
- Lorsque la distance de contournement ↗ :
  - BDV ↗
  - PDIV évolue peu
- Norme IPC-2221A → nette marge de sécurité sur BDV

➔ Une modification géométrique du PCB influence le claquage MAIS pas les DPs (PDIV)



Concept d'électrode de champ (EC) [1]

Modification de la topologie du PCB avec prolongation d'équipotentielle  $p$



- Champ électrique maximum au PT
- Atténuation du champ électrique au PT

✓ Effet des ECs sur le champ électrique au PT

[1] M. Cairnie *et al.*, « Bayesian Optimization of PCB-Integrated Field Grading for a High-Density 10 kV SiC Power Module Interface »

Concept d'électrode de champ (EC) [1]

Modification de la topologie du PCB avec prolongation d'équipotentielle  $p$

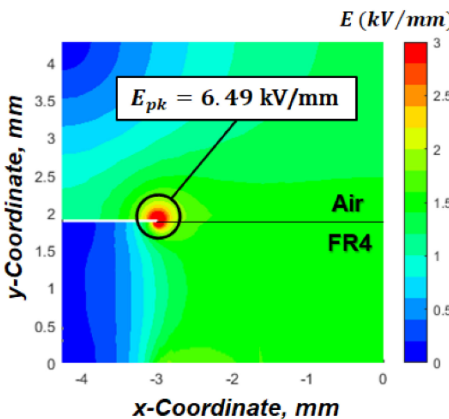
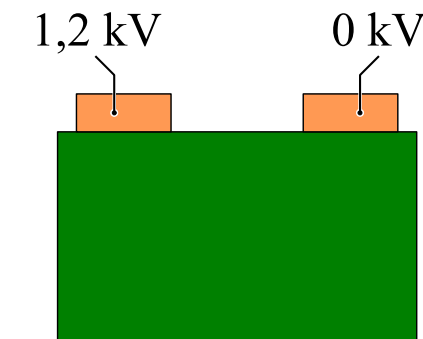


Concept d'EC	
PCB	✓
Tension au travers du PCB	✗



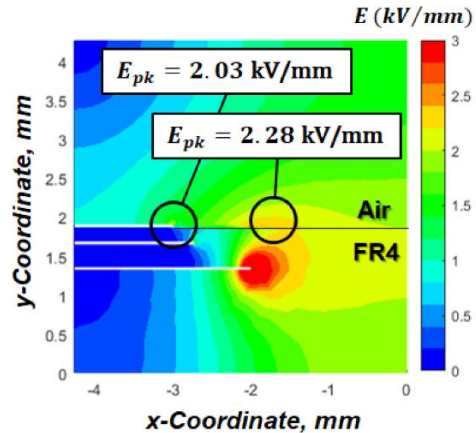
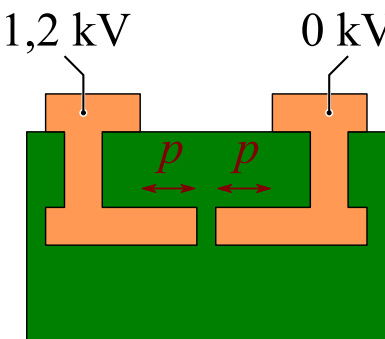
- Évaluation de la prolongation d'équipotentielle  $p$  sur PDIV

Sans EC :



- Champ électrique maximum au PT

Avec EC :



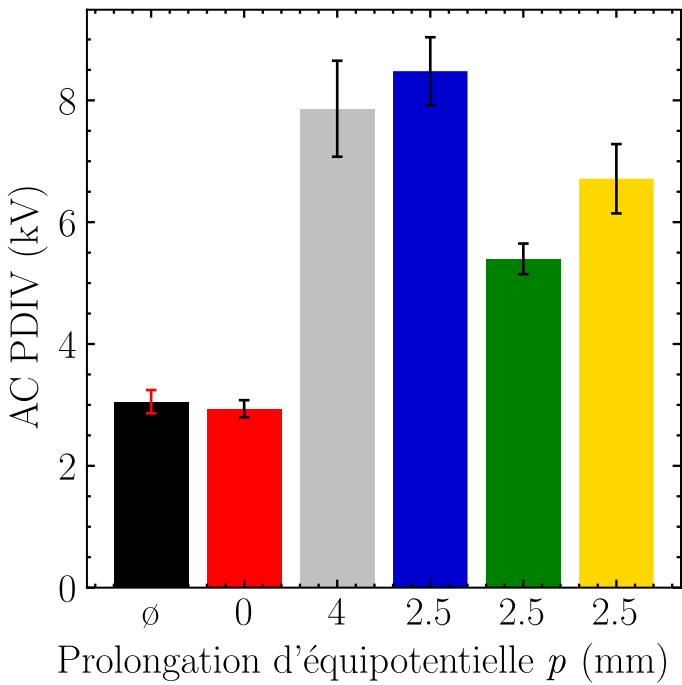
- Atténuation du champ électrique au PT

✓ Effet des ECs sur le champ électrique au PT

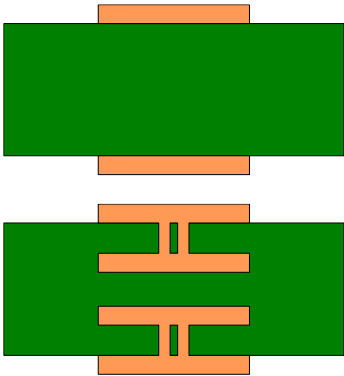
[1] M. Cairnie et al., « Bayesian Optimization of PCB-Integrated Field Grading for a High-Density 10 kV SiC Power Module Interface »

### PDIV

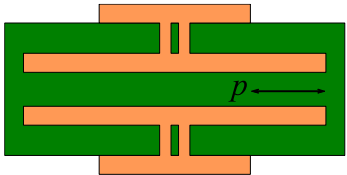
Évaluation de la prolongation  
d'équipotentielle  $p$  sur PDIV



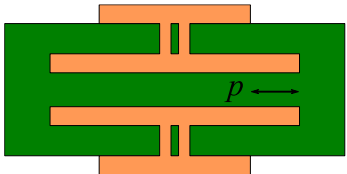
### Schéma PCB



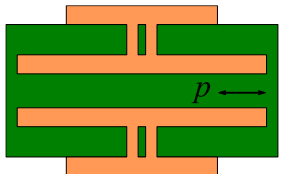
- Si  $p = 0$  mm  $\rightarrow$  PDIV varie très peu
- Si  $p > 0$  mm  $\rightarrow$  PDIV  $\nearrow$
- Si  $p = \text{cst}$   $\rightarrow$  PDIV  $\searrow$



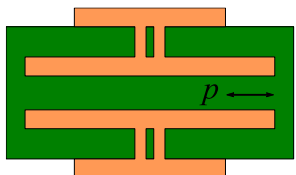
$p = 4$  mm



$p = 2,5$  mm



$p = 2,5$  mm



$p = 2,5$  mm

PDIV

Évaluation de la prolongation  
d'équipotentielle p sur PDIV

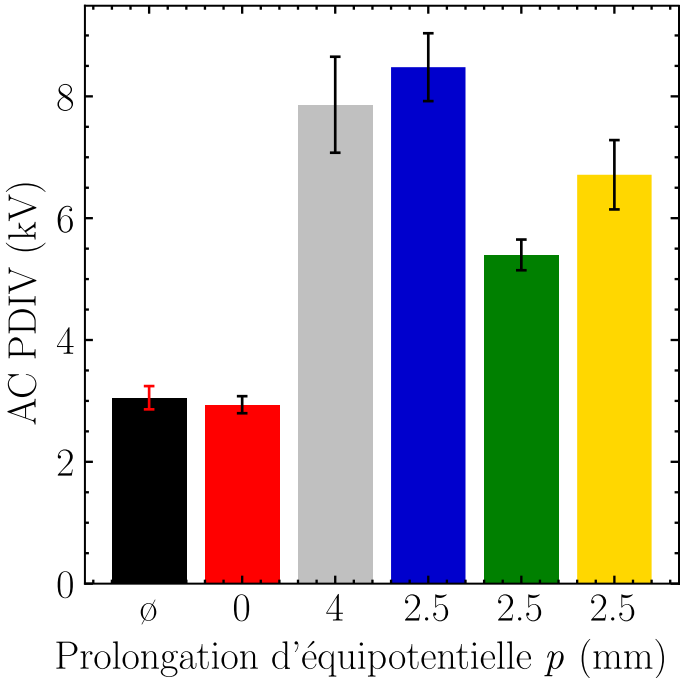
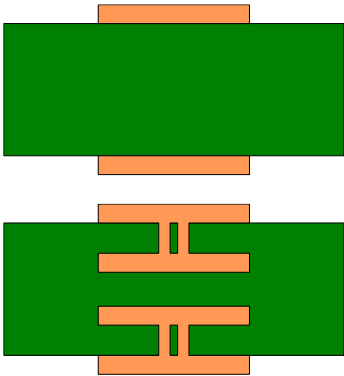


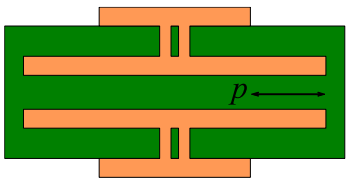
Schéma PCB



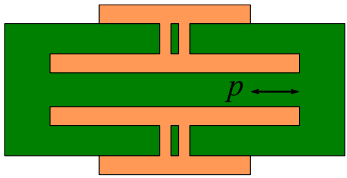
Sans EC

$p = 0$  mm

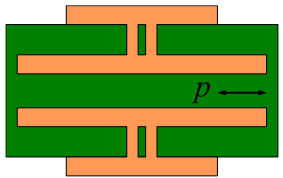
- Si  $p = 0$  mm  $\rightarrow$  PDIV varie très peu
- Si  $p > 0$  mm  $\rightarrow$  PDIV  $\nearrow$
- Si  $p = \text{cst}$   $\rightarrow$  PDIV  $\searrow$



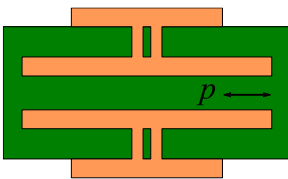
$p = 4$  mm



$p = 2,5$  mm

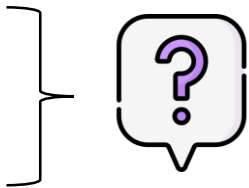


$p = 2,5$  mm



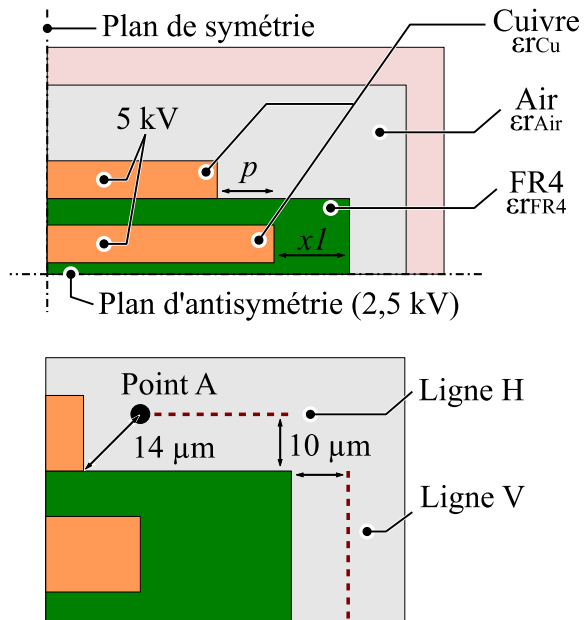
$p = 2,5$  mm

- ✓ Influence des ECs sur le PDIV
- ✗ Diminution du PDIV pour un même design d'électrode



Comment se comporte le  
champ électrique ?

### Géométrie simulée



**Objectif** : faire varier la prolongation d'équipotentielle  $p$  et évaluer le champ électrique sur les différentes zones d'observation

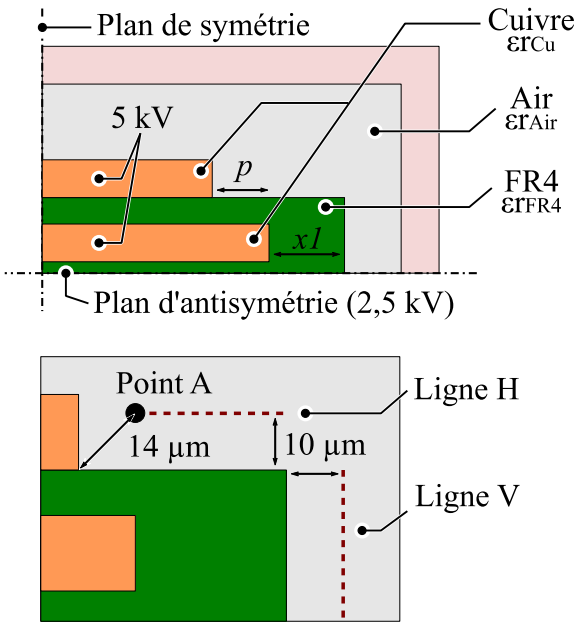


- $0 \leq p \leq 4,9 \text{ mm}$  |  
 $l_{PCB} = 10 \text{ mm}$

### ▪ Zones d'observation du champ électrique :

- PT du PCB (**Point A**)
- Surface horizontale du PCB (**Ligne H**)
- Surface verticale du PCB (**Ligne V**)

### Géométrie simulée



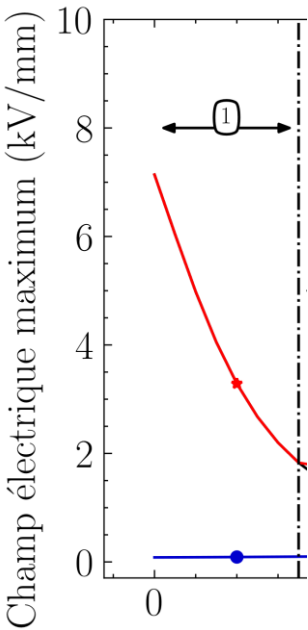
■ Zones d'observation du champ électrique :

- PT du PCB (**Point A**)
- Surface horizontale du PCB (**Ligne H**)
- Surface verticale du PCB (**Ligne V**)

Objectif : faire varier la prolongation d'équipotentielle  $p$  et évaluer le champ électrique sur les différentes zones d'observation



■  $0 \leq p \leq 4,9 \text{ mm} \mid$   
 $l_{PCB} = 10 \text{ mm}$



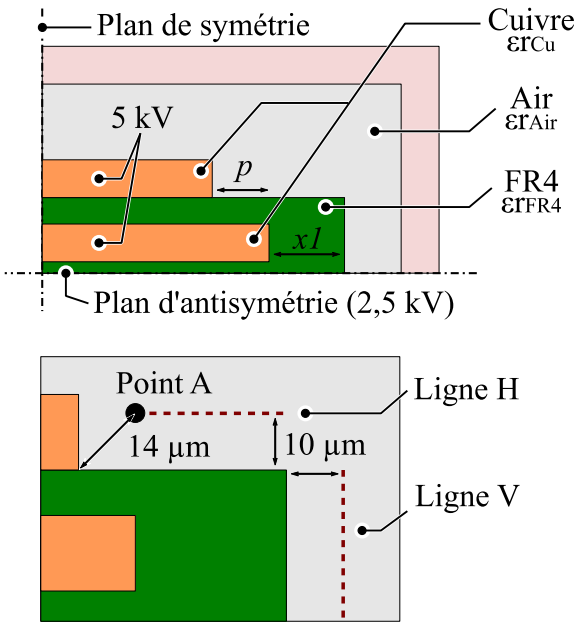
Zone d'évaluation

- Point A
- Ligne H
- Ligne V

Champ maximum du PCB au PT



### Géométrie simulée

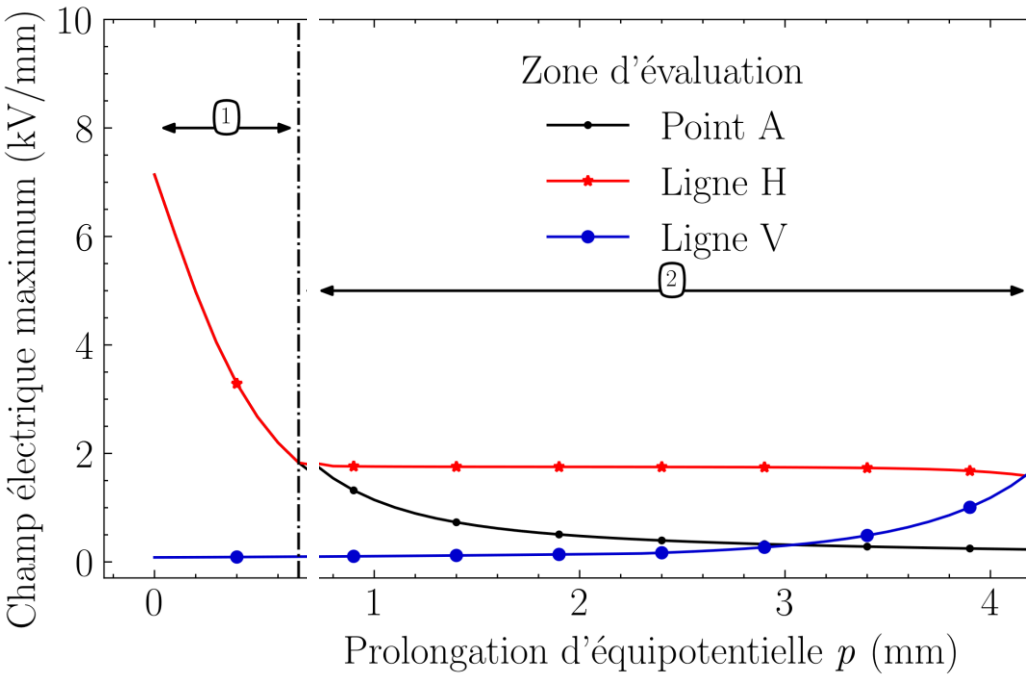


### Zones d'observation du champ électrique :

- PT du PCB (Point A)
- Surface horizontale du PCB (Ligne H)
- Surface verticale du PCB (Ligne V)

**Objectif :** faire varier la prolongation d'équipotentielle  $p$  et évaluer le champ électrique sur les différentes zones d'observation

▪  $0 \leq p \leq 4,9 \text{ mm}$  |  
 $l_{PCB} = 10 \text{ mm}$



Champ maximum  
du PCB au PT

Champ maximum du PCB  
en surface horizontale



Zone d'évaluation

- Point A
- ★— Ligne H
- Ligne V

Zone d'évaluation

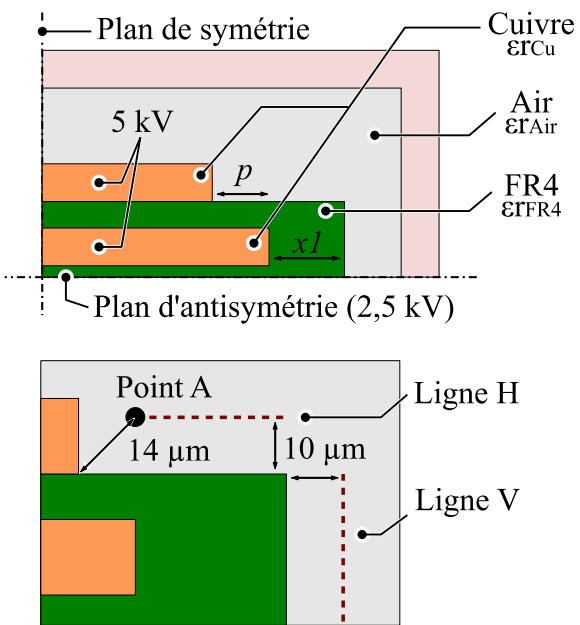
- Point A
- ★— Ligne H
- Ligne V

## CONCEPT D'EC – SIMULATION NUMÉRIQUE

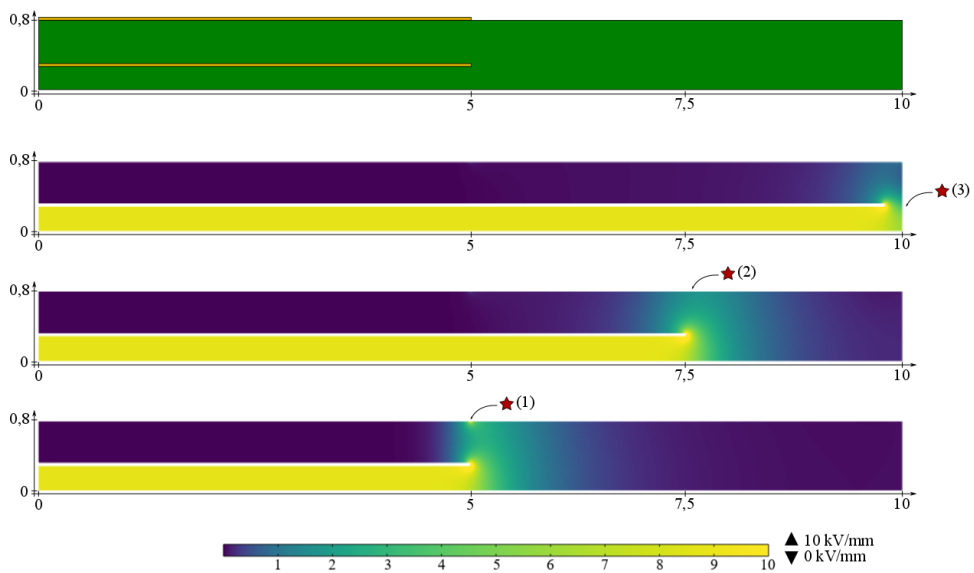
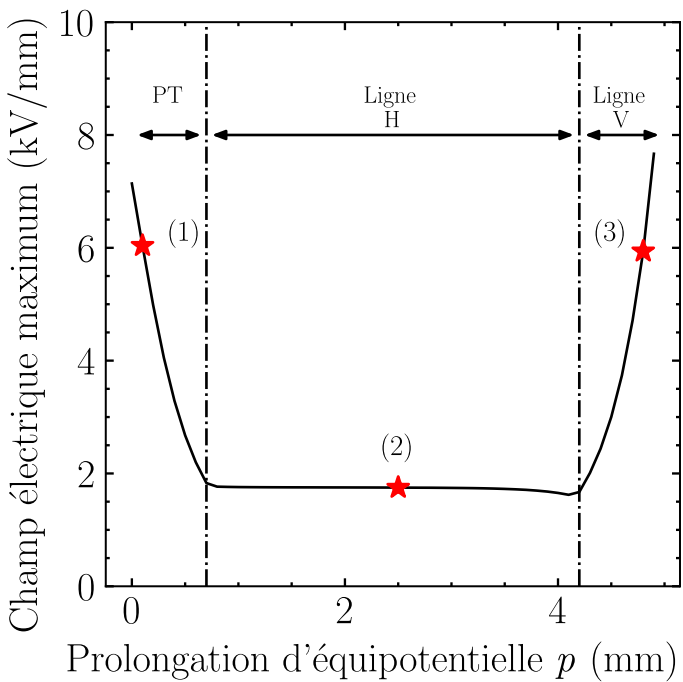
## 48



### Géométrie simulée



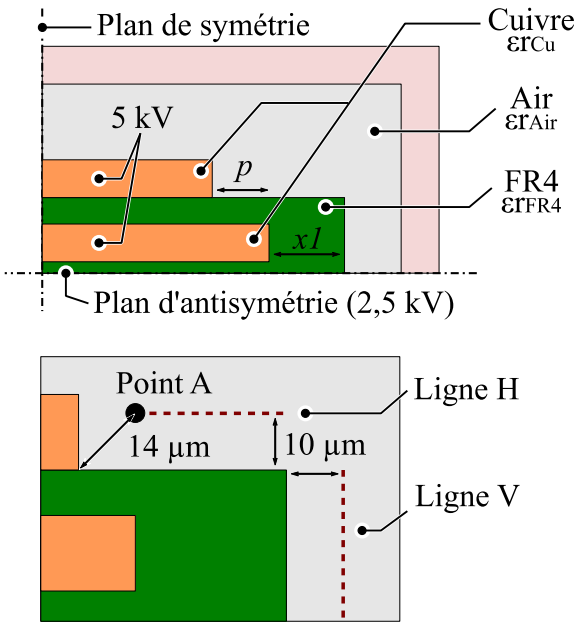
### Tendances observées



### Zones d'observation du champ électrique :

- PT du PCB (**Point A**)
- Surface horizontale du PCB (**Ligne H**)
- Surface verticale du PCB (**Ligne V**)

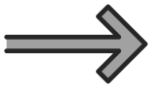
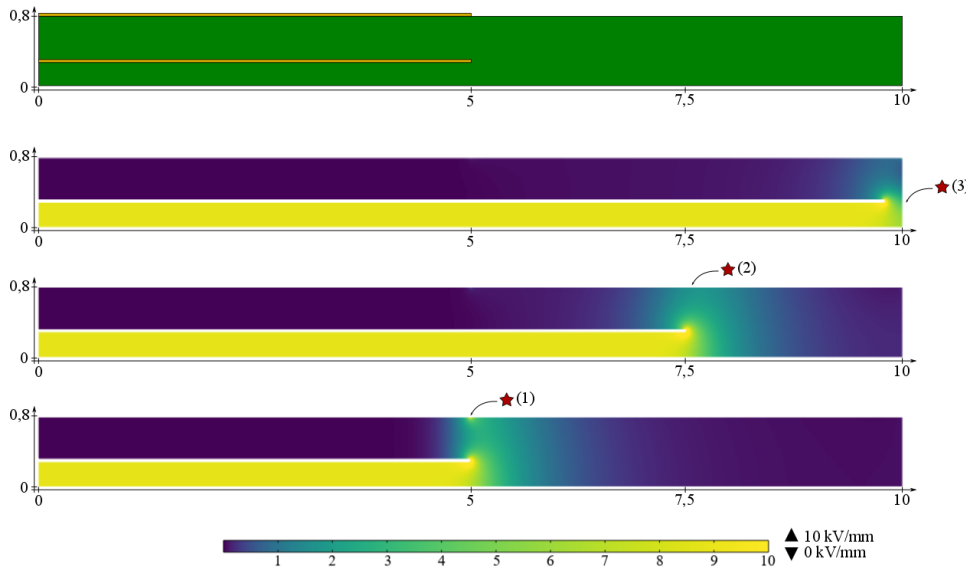
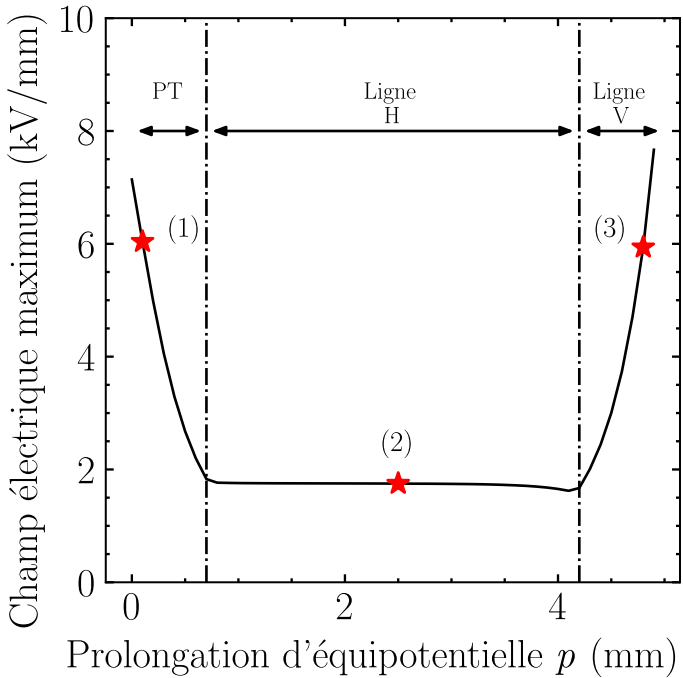
### Géométrie simulée



■ **Zones d'observation du champ électrique :**

- PT du PCB (Point A)
- Surface horizontale du PCB (Ligne H)
- Surface verticale du PCB (Ligne V)

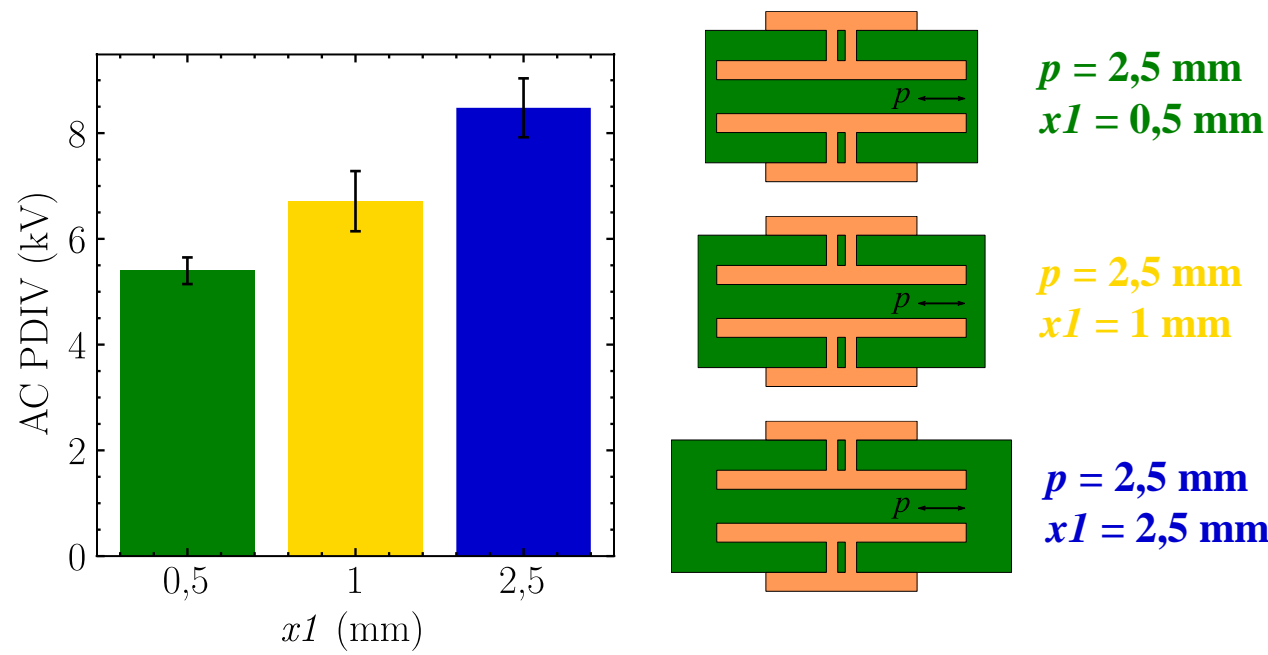
### Tendances observées



- **Changement du lieu de renforcement pour le champ électrique**
- **Pour minimiser le champ électrique → adaptation entre  $p$  et  $x1$  pour le design des ECs**

**PDIV**

Évaluation de la bordure du PCB  $x1$  sur PDIV

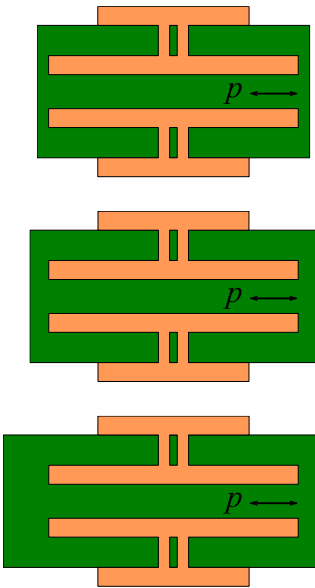
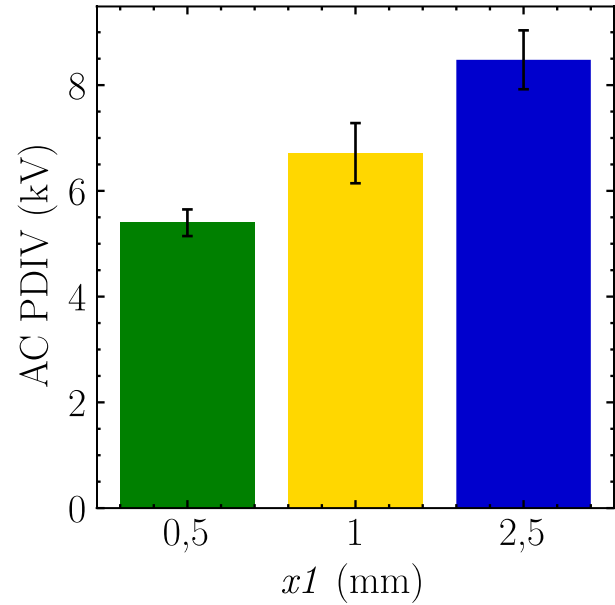


- Si  $x1 \searrow$  à  $p = \text{cst}$   $\rightarrow$  PDIV  $\searrow$
  - Adaptation entre  $p$  et  $x1 \rightarrow$  PDIV maximisé (design I)
- ✓ Influence de la bordure du PCB sur PDIV

✓ +178% sur le PDIV comparé à un PCB sans EC

### PDIV

### Évaluation de la bordure du PCB $x1$ sur PDIV



$p = 2,5 \text{ mm}$   
 $x1 = 0,5 \text{ mm}$

$p = 2,5 \text{ mm}$   
 $x1 = 1 \text{ mm}$

$p = 2,5 \text{ mm}$   
 $x1 = 2,5 \text{ mm}$

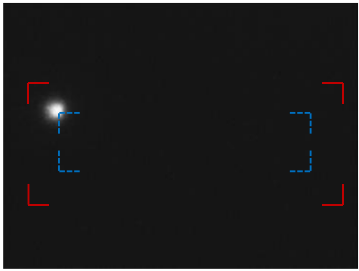
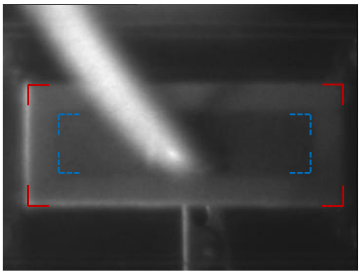
- Si  $x1 \searrow$  à  $p = \text{cst}$   $\rightarrow$  PDIV  $\searrow$
- Adaptation entre  $p$  et  $x1 \rightarrow$  PDIV maximisé (design I)

- ✓ Influence de la bordure du PCB sur PDIV
- ✓ +178% sur le PDIV comparé à un PCB sans EC

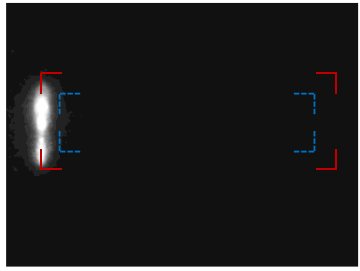
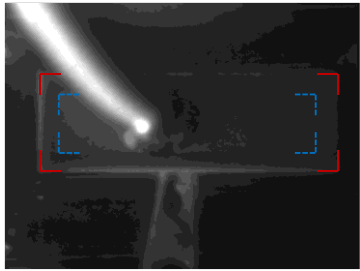
### Lieu des DPs

### Visualisation optique du lieu des DPs

PCB sans EC



PCB avec EC

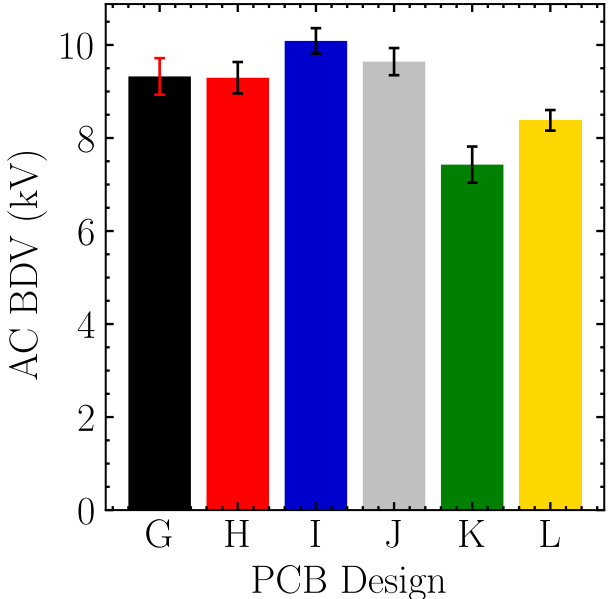
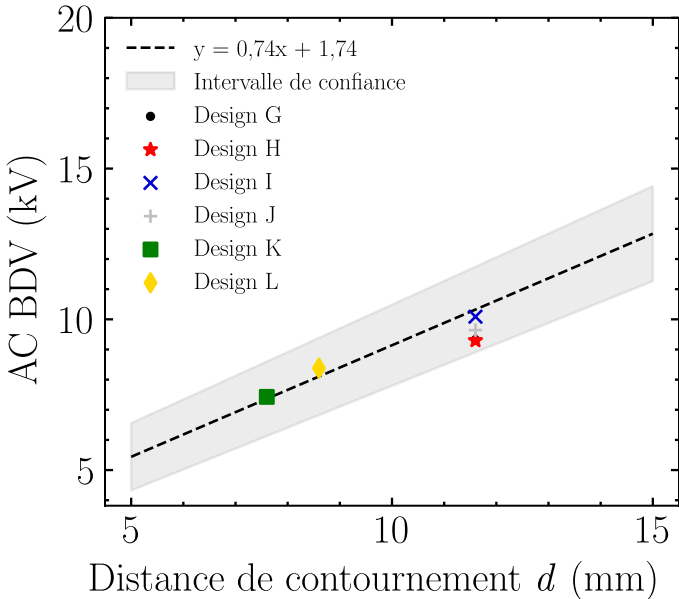


- Sans EC  $\rightarrow$  DP au PT
- Avec EC et faible  $x1 \rightarrow$  DPs sur la tranche du PCB

- ✓ Changement de zone pour le renforcement du champ

BDV

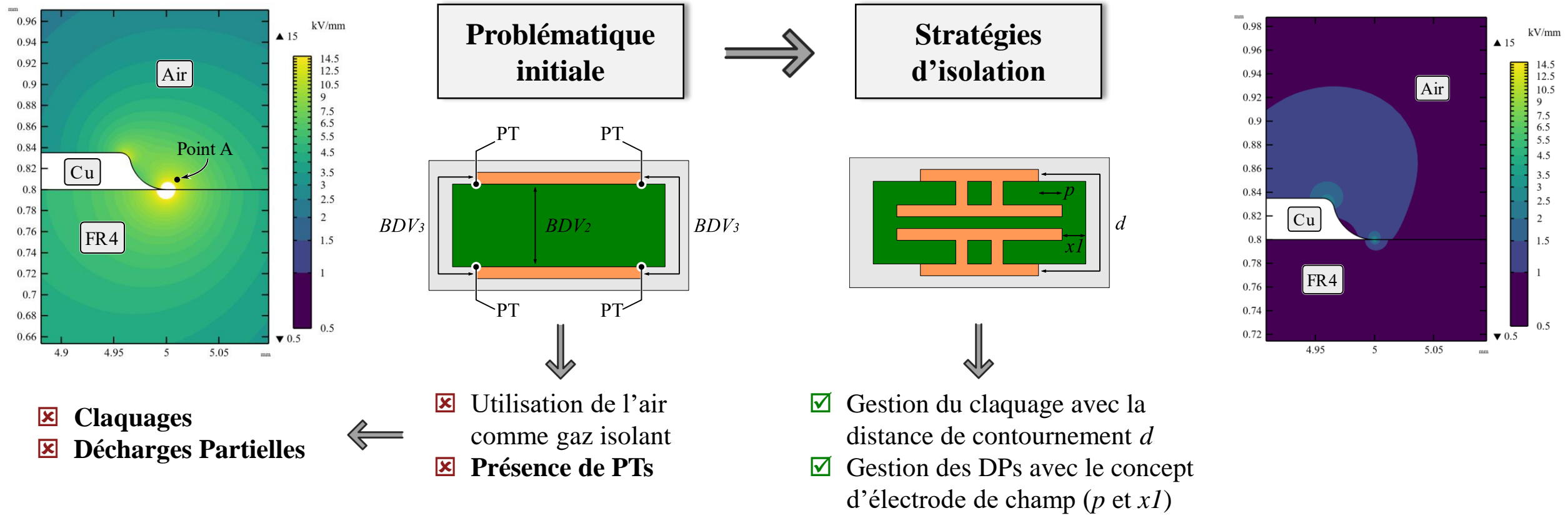
Évaluation de la prolongation d'équipotentielle  $p$  et de la bordure du PCB  $x_l$  sur BDV

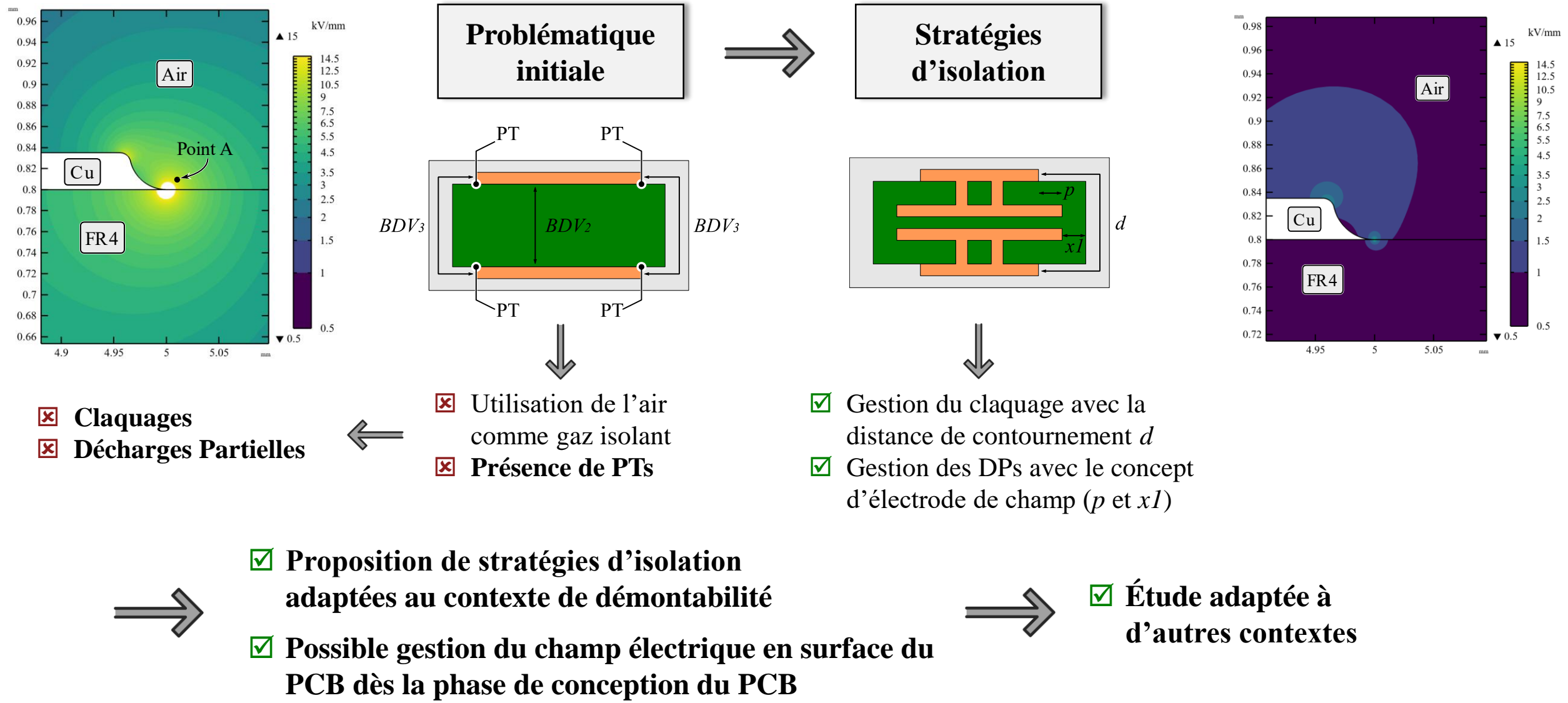


Design	I	J	L
PDIV (kV)	8,5	7,9	6,7
BDV (kV)	10,1	9,6	8,4

- Lorsque la distance de contournement  $\nearrow \rightarrow$  BDV  $\nearrow$
- Pour certains PCB avec EC (I, J et L)  $\rightarrow$  PDIV proche de BDV

- ✓ Malgré les ECs, le claquage dépend de la distance de contournement
- ✓ Réduction du champ électrique  $\rightarrow$  critère d'initiation DP = initiation claquage





**Thèse**

**Interconnexion  
électrique**

1

Solution de packaging modulaire, démontable et performante

2

Isolation électrique de la solution de packaging

3

**Interconnexions électriques modulaires et démontables**

4

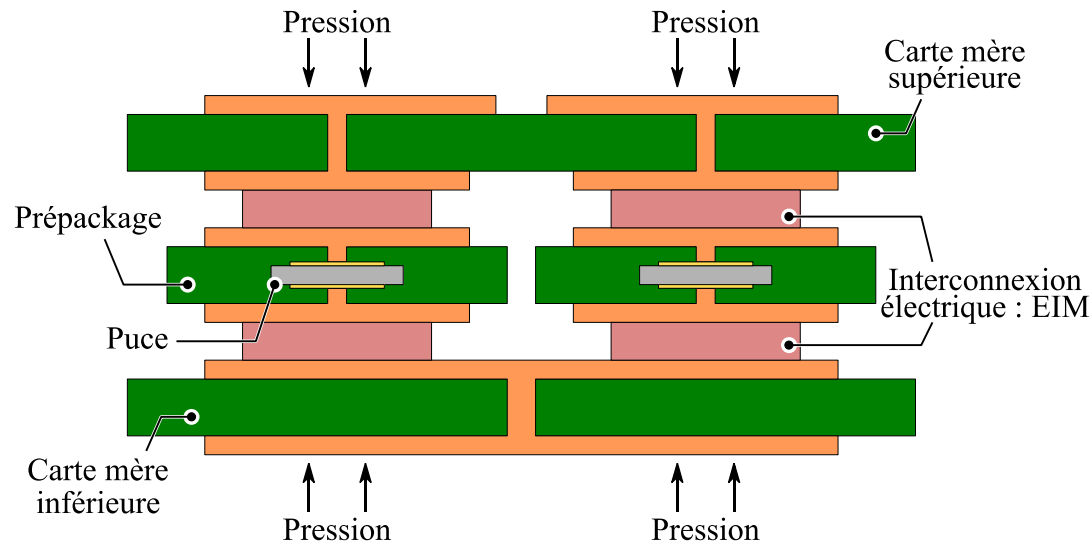
Conclusion et Perspectives



### Assemblage de puissance

#### Constitué de :

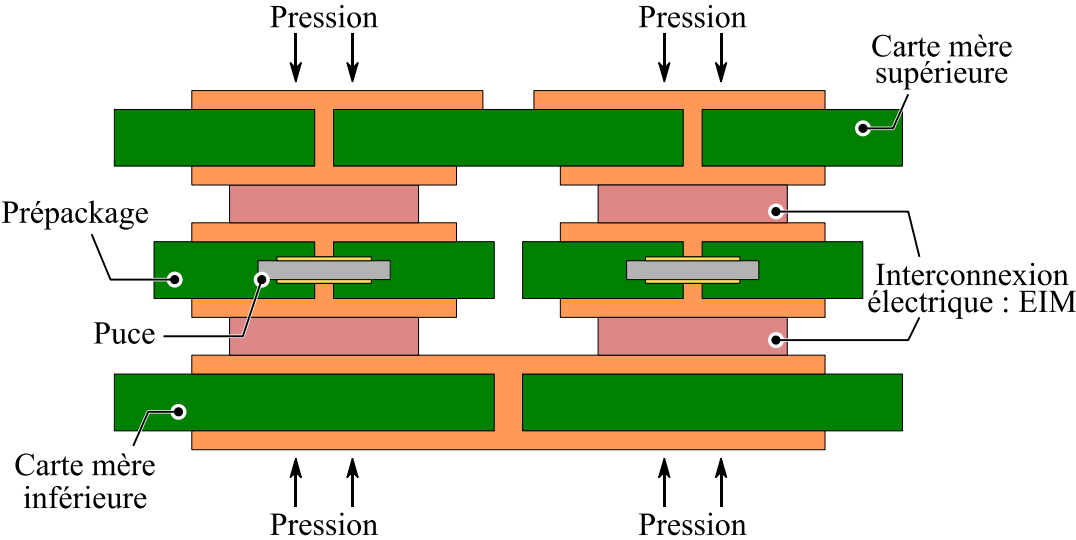
- PCBs carte-mère
- Prépackages
- Système de mise en pression
- Interconnexions électriques (EIM)



Quelle **solution d'interconnexion électrique** utiliser afin de mettre en œuvre un assemblage de puissance **modulaire** et **démontable** ?

### Assemblage de puissance

- Constitué de :
- PCBs carte-mère
  - Prépackages
  - Système de mise en pression
  - Interconnexions électriques (EIM)

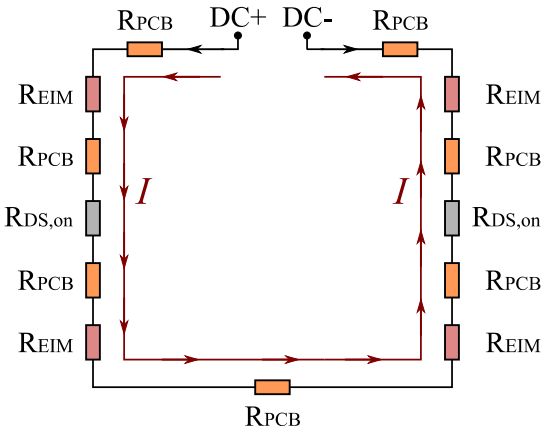


Quelle **solution d'interconnexion électrique** utiliser afin de mettre en œuvre un assemblage de puissance **modulaire** et **démontable** ?

### Critères électriques



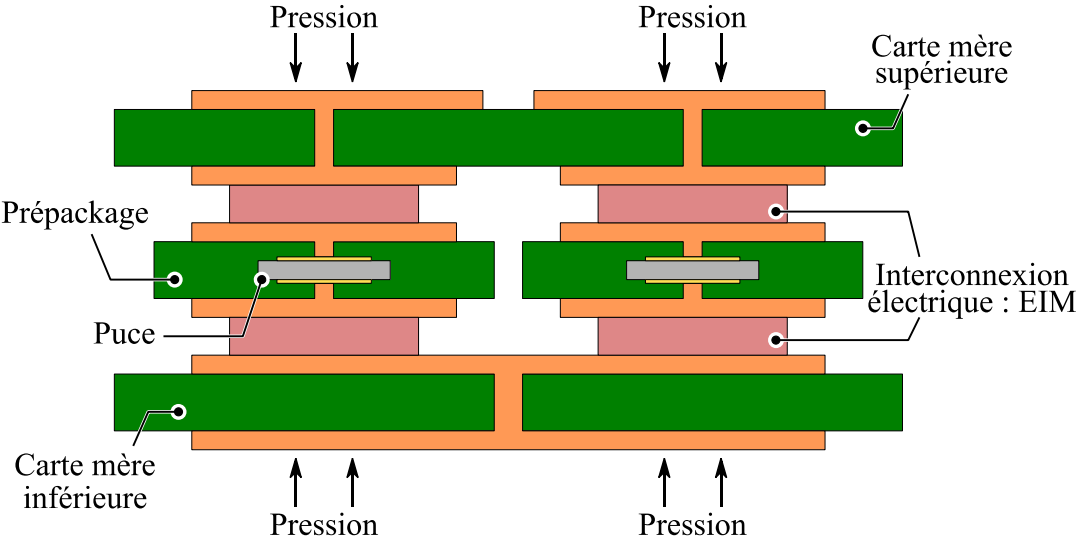
- Conduction du courant de puissance
- Résistance de l'interconnexion limitée  
→  $R_{EIM} \ll R_{DS,on}$



- Puces SiC :
- $V_{DS} = 1,2 \text{ kV}$
  - $I_D \approx 100 \text{ A}$
  - $R_{DS,on} \approx 20 \text{ m}\Omega$

### Assemblage de puissance

- Constitué de :**
- PCBs carte-mère
  - Prépackages
  - Système de mise en pression
  - Interconnexions électriques (EIM)



Quelle **solution d'interconnexion électrique** utiliser afin de mettre en œuvre un assemblage de puissance **modulaire** et **démontable** ?

### Critères électriques

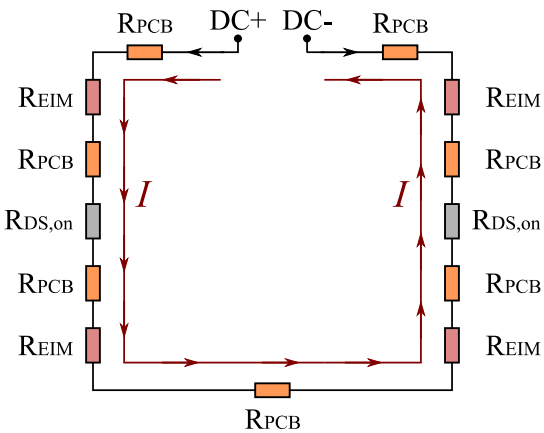


- Conduction du courant de puissance
- Résistance de l'interconnexion limitée  
→  $R_{EIM} \ll R_{DS,on}$

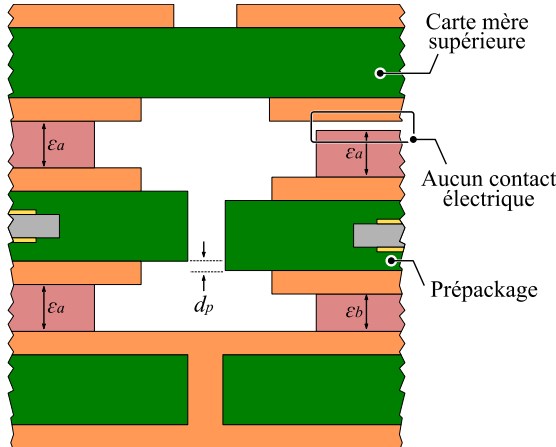
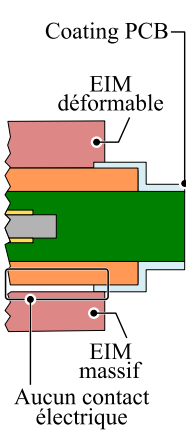
### Critères mécaniques



- EIM déformable
- Sans liaison mécanique permanente



- Puces SiC :
- $V_{DS} = 1,2 \text{ kV}$
  - $I_D \approx 100 \text{ A}$
  - $R_{DS,on} \approx 20 \text{ m}\Omega$



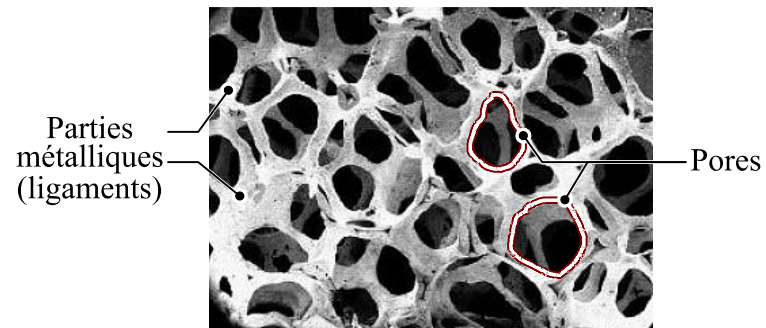
- Tolérances mécaniques
- Défauts de fabrication
- Différences d'épaisseur (10 – 100  $\mu\text{m}$ )

### Utilisation d'un matériau déformable

**Définition** : Matériau à structure **poreuse** acceptant une déformation sous l'effet d'une contrainte

#### ▪ Les mousses métalliques :

- Matériau hétérogène (métal/air) et poreux
- Métal, porosité, grade, taille des pores, etc



[1] Y. Pascal, « Étude multicritère pour l'enfouissement partiel ou total de convertisseurs d'électronique de puissance dans un circuit imprimé »

[2] S. Bensebaa, « Etude de la Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans un circuit imprimé PCB »

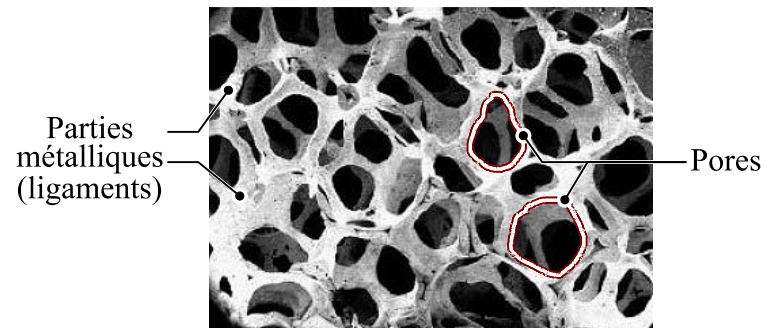
[3] R. Yao *et al.*, « A Double-Sided Cooling approach of Discrete SiC MOSFET Device Based on Press-Pack Package »

### Utilisation d'un matériau déformable

**Définition** : Matériau à structure **poreuse** acceptant une déformation sous l'effet d'une contrainte

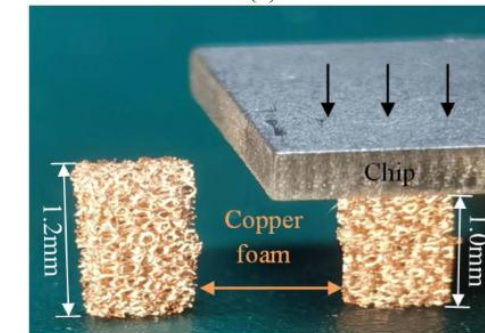
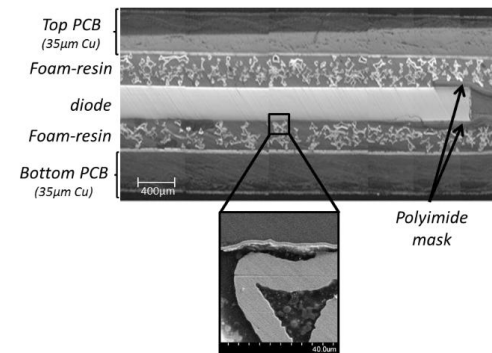
#### ■ Les mousses métalliques :

- Matériau hétérogène (métal/air) et poreux
- Métal, porosité, grade, taille des pores, etc



#### ■ Quelques cas d'étude portant sur le packaging :

- Thèse de Y. Pascal SATIE [1]
- Thèse de S. Bensebaa SATIE [2]
- Yao *et al.* [3]



[1] Y. Pascal, « Étude multicritère pour l'enfouissement partiel ou total de convertisseurs d'électronique de puissance dans un circuit imprimé »

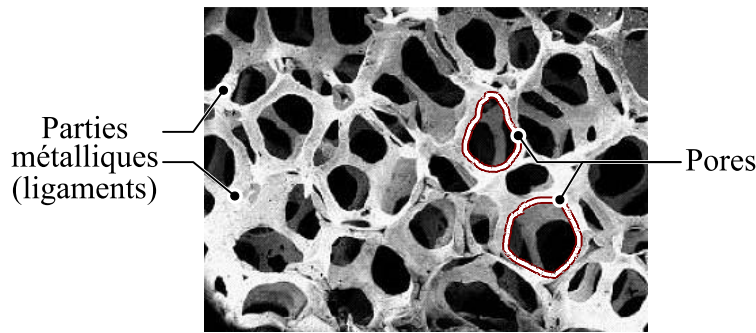
[2] S. Bensebaa, « Etude de la Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans un circuit imprimé PCB »

[3] R. Yao *et al.*, « A Double-Sided Cooling approach of Discrete SiC MOSFET Device Based on Press-Pack Package »

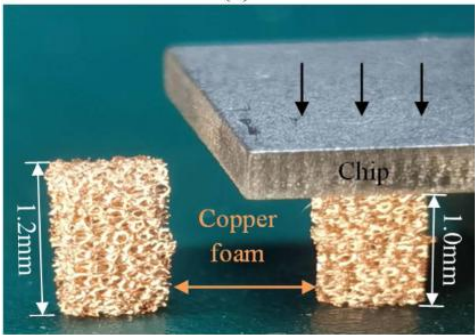
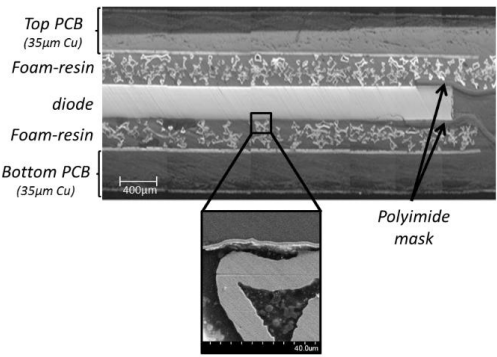
### Utilisation d'un matériau déformable

**Définition** : Matériau à structure **poreuse** acceptant une déformation sous l'effet d'une contrainte

- **Les mousses métalliques :**
  - Matériau hétérogène (métal/air) et poreux
  - Métal, porosité, grade, taille des pores, etc

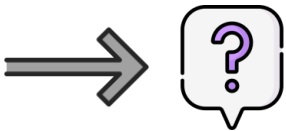


- **Quelques cas d'étude portant sur le packaging :**
  - Thèse de Y. Pascal SATIE [1]
  - Thèse de S. Bensebaa SATIE [2]
  - Yao et al. [3]

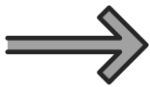


### Mousses métalliques :

- ✓ Démontable
- ✓ Déformable
- ✓ Versatile sur la forme



- Les **mousses métalliques** peuvent-elles être intéressantes pour **notre application** ?
- Quelles sont leurs **performances** ?



**Caractérisation expérimentale**

[1] Y. Pascal, « Étude multicritère pour l'enfouissement partiel ou total de convertisseurs d'électronique de puissance dans un circuit imprimé »  
[2] S. Bensebaa, « Etude de la Fiabilité des convertisseurs d'électronique de puissance intégrés dans un circuit imprimé PCB »  
[3] R. Yao et al., « A Double-Sided Cooling approach of Discrete SiC MOSFET Device Based on Press-Pack Package »

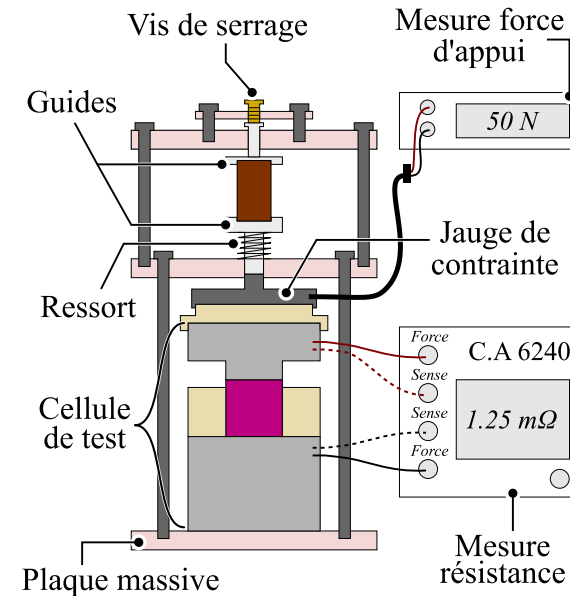


Mesure de  $R_{EIM}$  en  
fonction de  $F$

### Objectif :

- Isoler la résistance de l'interconnexion et évaluer l'influence de la force d'appui sur cette grandeur

Banc de  
caractérisation



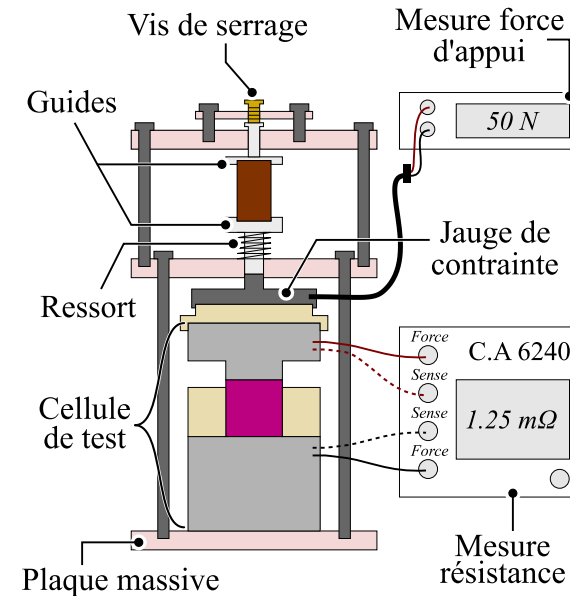
- Système de mise en pression
- Jauge de contrainte
- Micro-ohmmètre
- Cellule de test

### Mesure de $R_{EIM}$ en fonction de $F$

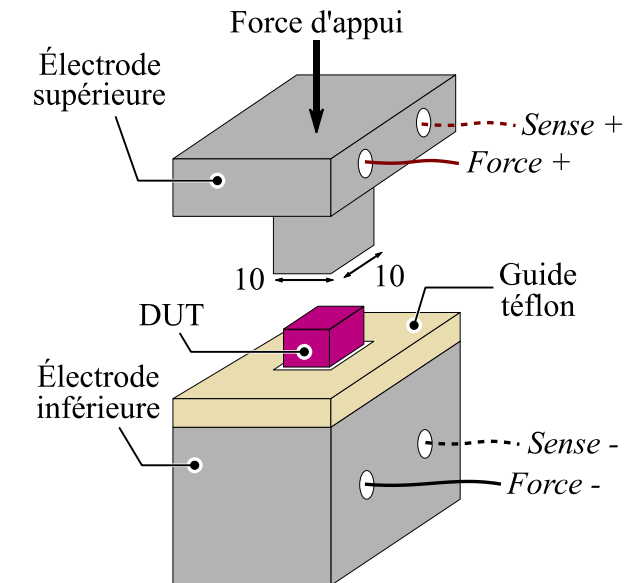
#### Objectif :

- Isoler la résistance de l'interconnexion et évaluer l'influence de la force d'appui sur cette grandeur

### Banc de caractérisation



- Système de mise en pression
- Jauge de contrainte
- Micro-ohmmètre
- Cellule de test



- 2 électrodes métalliques
- Guide de placement
- Interconnexion électrique (DUT)



### Mesure de $R_{EIM}$ en fonction de $F$

#### Objectif :

- Isoler la résistance de l'interconnexion et évaluer l'influence de la force d'appui sur cette grandeur

Mesure :

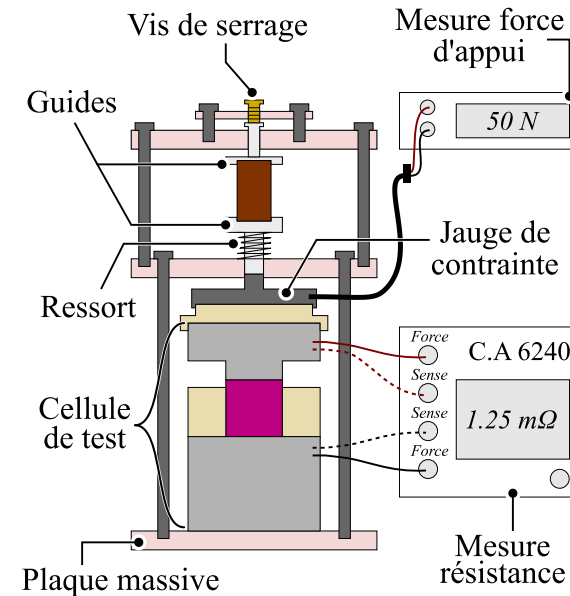
$$\begin{cases} R_{TOT} = \frac{V_{TOT}}{I_R} = R_{\text{électrodes}} + R_{EIM} \\ R_{EIM} = R_A + 2 \cdot R_C \end{cases}$$

- $R_{EIM} \rightarrow$  résistance totale du DUT
- $R_A \rightarrow$  résistance en volume du DUT
- $R_C \rightarrow$  résistance de contact

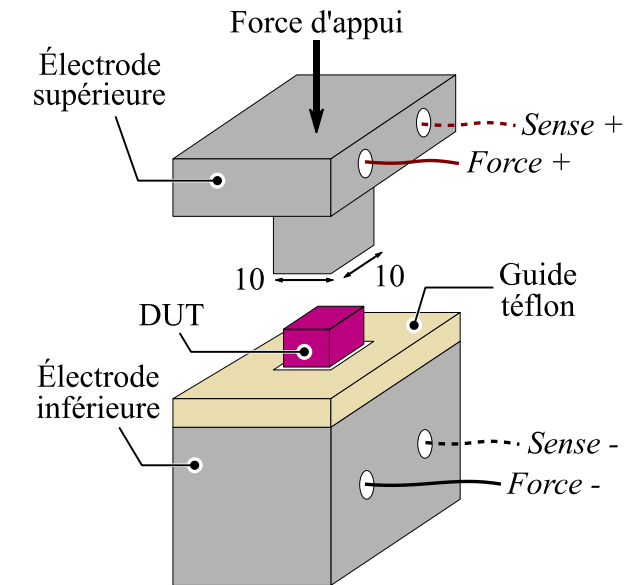


$$R_{EIM} = f(F) \rightarrow \begin{cases} 0 \leq F \leq 1000 \text{ N} \\ 0 \leq P \leq 10 \text{ MPa} \end{cases}$$

### Banc de caractérisation



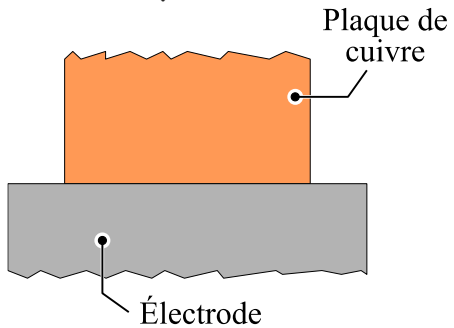
- Système de mise en pression
- Jauge de contrainte
- Micro-ohmmètre
- Cellule de test



- 2 électrodes métalliques
- Guide de placement
- Interconnexion électrique (DUT)



**Intérêt des propriétés de déformation pour la résistance électrique ?**

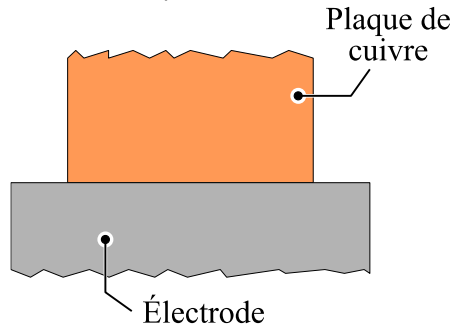


- **Contact sec** : interconnexion directe entre 2 parties métalliques via un système de mise en pression

- ✓ Faible résistance
- ✓ Démontable
- ✗ Très faiblement déformable



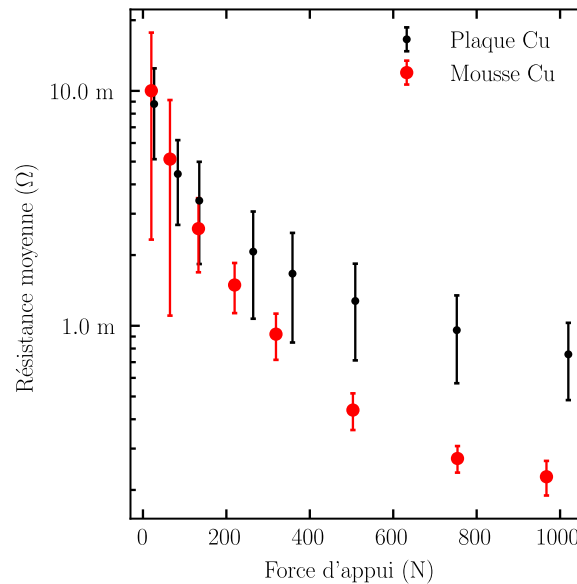
Intérêt des propriétés de déformation pour la résistance électrique ?



- **Contact sec** : interconnexion directe entre 2 parties métalliques via un système de mise en pression

- ✓ Faible résistance
- ✓ Démontable
- ✗ Très faiblement déformable

### Mousse Cu vs Plaque Cu



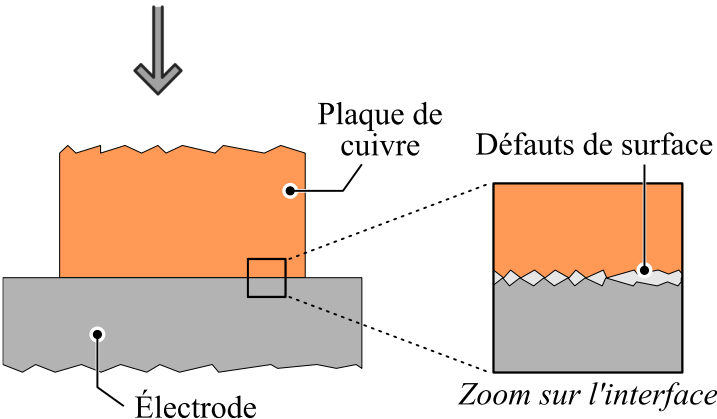
- Si  $F \nearrow \rightarrow R_{EIM} \searrow$  fortement



- ✓ **Influence de la force d'appui sur la résistance d'interconnexion**

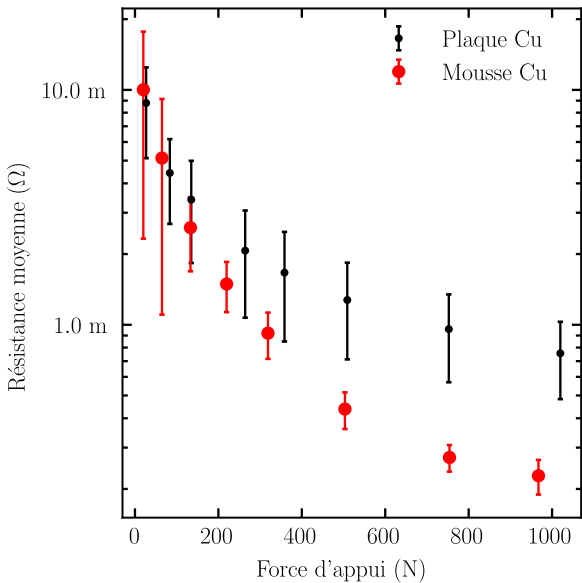


Intérêt des propriétés de déformation pour la résistance électrique ?



- **Contact sec** : interconnexion directe entre 2 parties métalliques via un système de mise en pression
  - ✓ Faible résistance
  - ✓ Démontable
  - ✗ Très faiblement déformable

Mousse Cu vs Plaque Cu



• Si  $F \nearrow \rightarrow R_{EIM} \searrow$  fortement

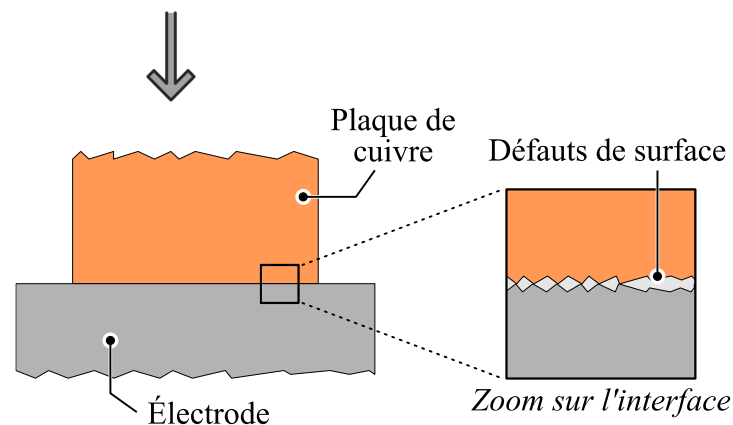


✓ **Influence de la force d'appui sur la résistance d'interconnexion**

Plaque Cu { ✓ **Sous l'effet de F, la ductilité des matériaux permet de corriger les défauts de surface/planéité →  $R_C$  améliorées**



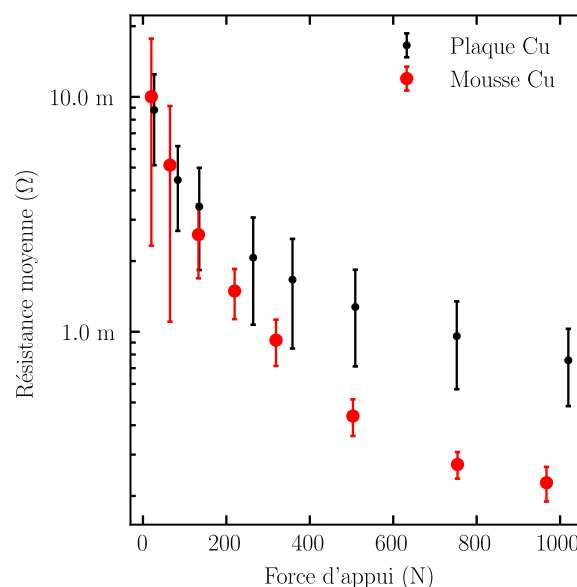
Intérêt des propriétés de déformation pour la résistance électrique ?



- **Contact sec** : interconnexion directe entre 2 parties métalliques via un système de mise en pression

- ✓ Faible résistance
- ✓ Démontable
- ✗ Très faiblement déformable

### Mousse Cu vs Plaque Cu



- Si  $F \nearrow \rightarrow R_{EIM} \searrow$  fortement



✓ **Influence de la force d'appui sur la résistance d'interconnexion**

Plaque Cu

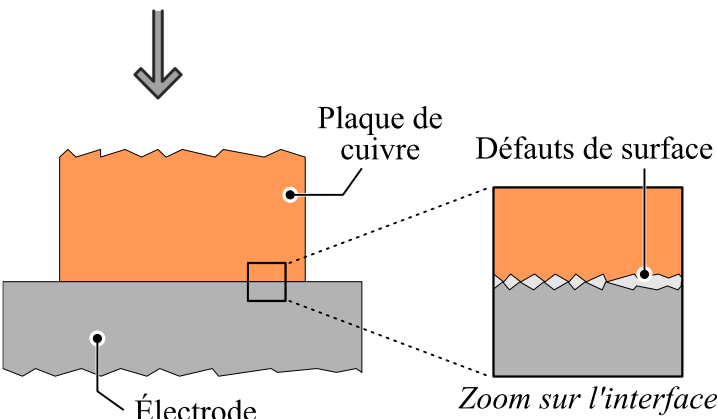
- ✓ Sous l'effet de  $F$ , la ductilité des matériaux permet de **corriger les défauts de surface/planéité** →  **$R_C$  améliorées**

Mousse Cu

- ✓ Régime de décroissance complexe à expliquer
- ✓ **Forte décroissance de  $R_{EIM}$  à faible  $F$**
- ✓ **Déformation de la mousse**

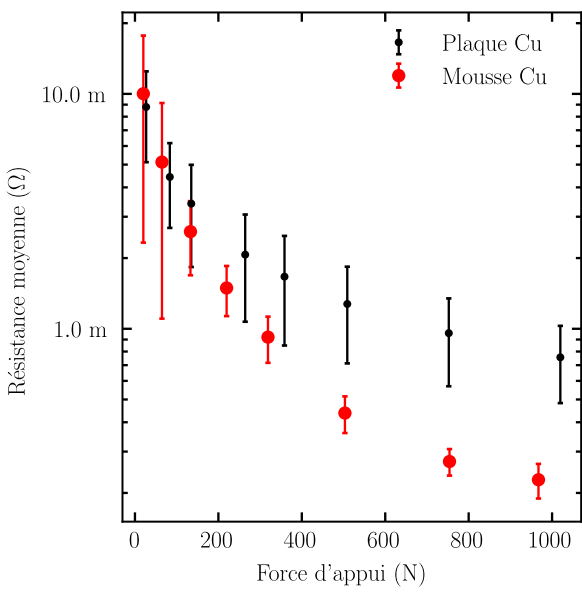


Intérêt des propriétés de déformation pour la résistance électrique ?



- **Contact sec** : interconnexion directe entre 2 parties métalliques via un système de mise en pression
  - ✓ Faible résistance
  - ✓ Démontable
  - ✗ Très faiblement déformable

Mousse Cu vs Plaque Cu



• Si  $F \nearrow \rightarrow R_{EIM} \searrow$  fortement



✓ Influence de la force d'appui sur la résistance d'interconnexion

- Plaque Cu

  - ✓ Sous l'effet de  $F$ , la ductilité des matériaux permet de **corriger les défauts de surface/planéité**  $\rightarrow$   $R_C$  améliorées
- Mousse Cu

  - ✓ Régime de décroissance complexe à expliquer
  - ✓ Forte décroissance de  $R_{EIM}$  à faible  $F$
  - ✓ Déformation de la mousse

➔ Malgré des résultats identiques à faible force, des résistances + faibles peuvent être obtenues pour les mousses à forte force



**Influence de la nature du matériau métallique  
sur la résistance électrique des mousses ?**



### Matériaux caractérisés :

- Nickel (Ni)
- Nickel-Chrome (NC)
- Cuivre (Cu)



**Influence de la nature du matériau métallique  
sur la résistance électrique des mousses ?**

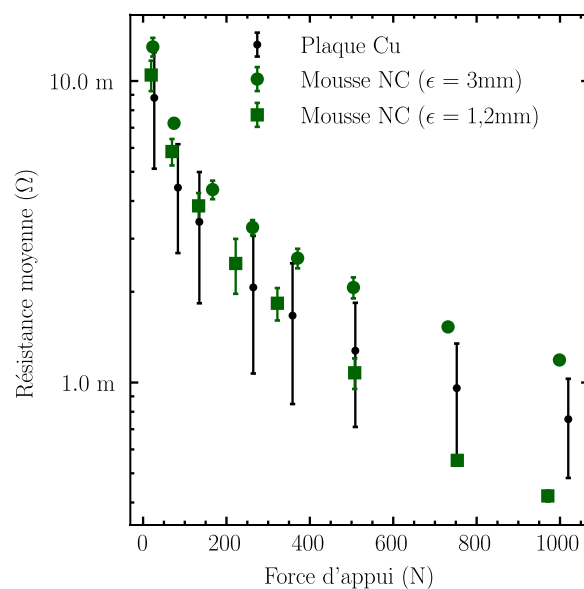


**RECEMAT BV**  
CELL MATERIAL ENGINEERING

**Matériaux caractérisés :**

- Nickel (Ni)
- Nickel-Chrome (NC)
- Cuivre (Cu)

**Mousse NC**



- Si  $F \nearrow \rightarrow R_{EIM} \searrow$
- 1,2 mm  $\rightarrow R_{EIM}$  + faible
- $F_{\max} \rightarrow -45\%$





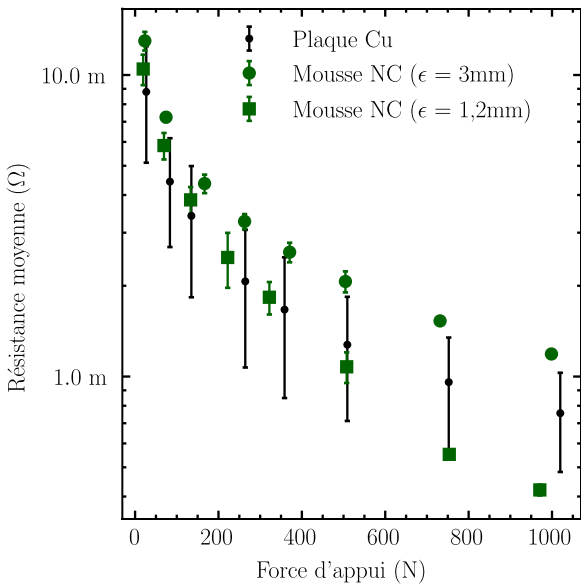
Influence de la nature du matériau métallique sur la résistance électrique des mousses ?



Matériaux caractérisés :

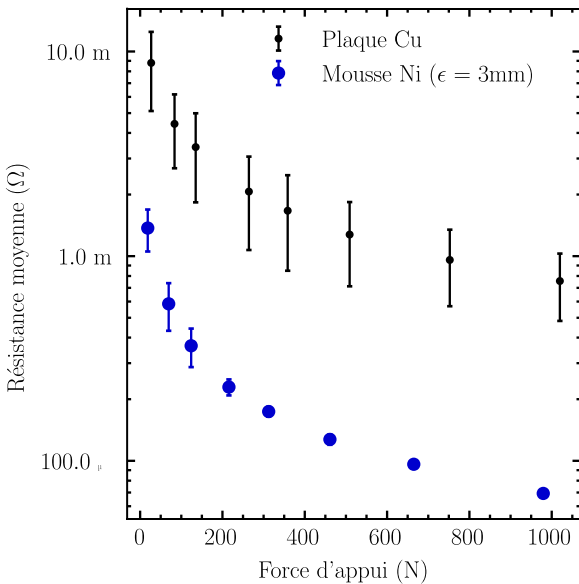
- Nickel (Ni)
- Nickel-Chrome (NC)
- Cuivre (Cu)

Mousse NC



- Si  $F \nearrow \rightarrow R_{EIM} \searrow$
- 1,2 mm  $\rightarrow R_{EIM}$  + faible
- $F_{\max} \rightarrow -45\%$

Mousse Ni



- Si  $F \nearrow \rightarrow R_{EIM} \searrow$
- $F_{\min} \rightarrow -84\%$
- $F_{\max} \rightarrow -91\%$



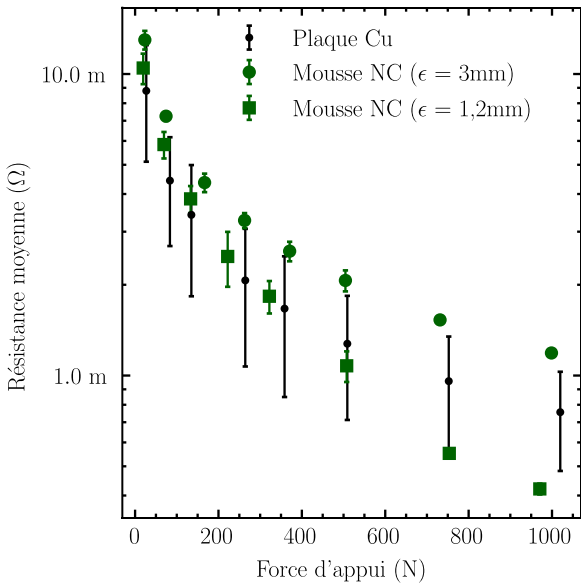
Influence de la nature du matériau métallique sur la résistance électrique des mousses ?



Matériaux caractérisés :

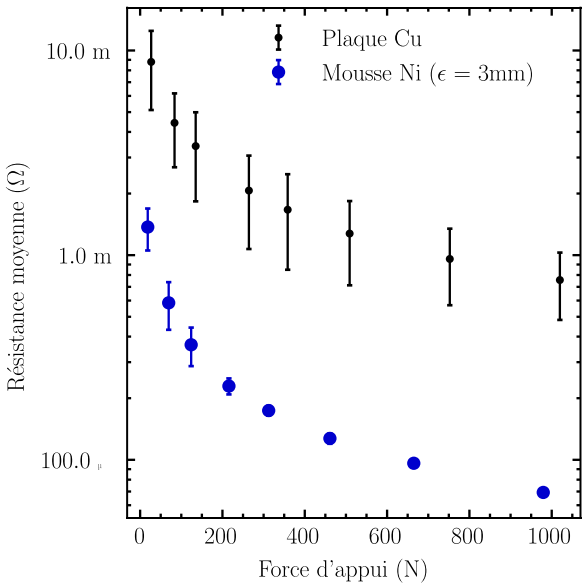
- Nickel (Ni)
- Nickel-Chrome (NC)
- Cuivre (Cu)

Mousse NC



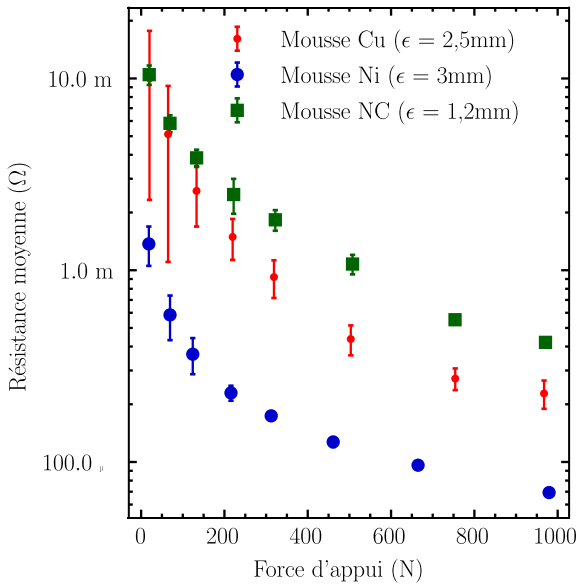
- Si  $F \nearrow \rightarrow R_{EIM} \searrow$
- 1,2 mm  $\rightarrow R_{EIM}$  + faible
- $F_{\max} \rightarrow -45\%$

Mousse Ni



- Si  $F \nearrow \rightarrow R_{EIM} \searrow$
- $F_{\min} \rightarrow -84\%$
- $F_{\max} \rightarrow -91\%$

Comparaison



- Ni  $\rightarrow R_{EIM}$  + faible



Influence de la nature du matériau métallique sur la résistance électrique des mousses ?

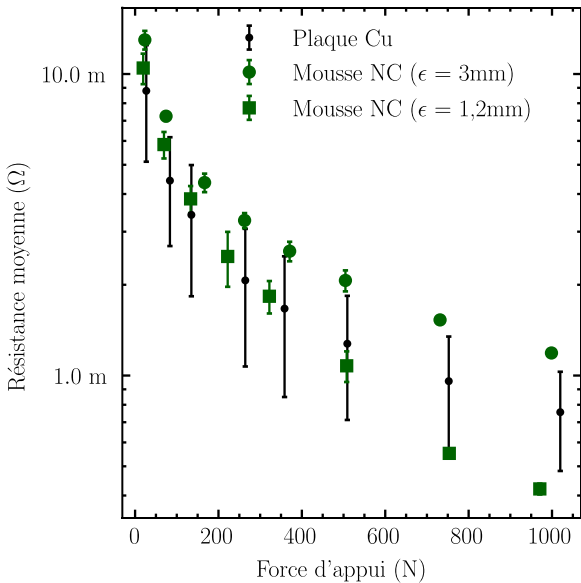


Matériaux caractérisés :

- Nickel (Ni)
- Nickel-Chrome (NC)
- Cuivre (Cu)

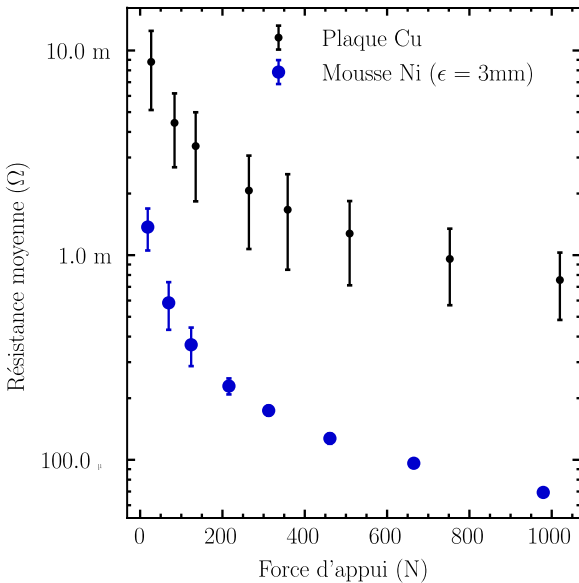


Mousse NC



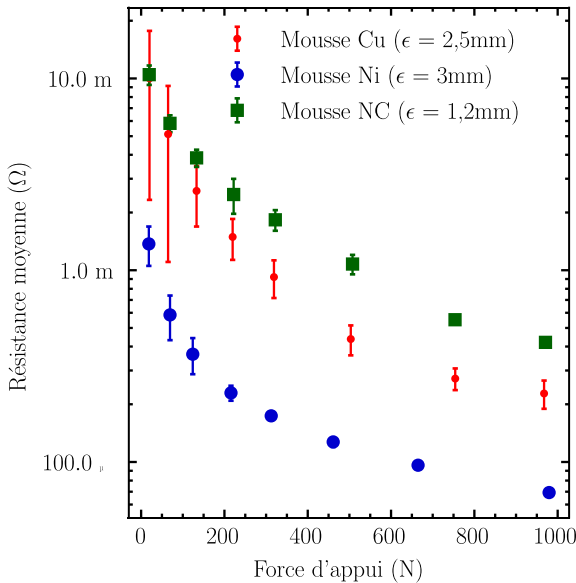
- Si  $F \nearrow \rightarrow R_{EIM} \searrow$
- 1,2 mm  $\rightarrow R_{EIM}$  + faible
- $F_{\max} \rightarrow -45\%$

Mousse Ni



- Si  $F \nearrow \rightarrow R_{EIM} \searrow$
- $F_{\min} \rightarrow -84\%$
- $F_{\max} \rightarrow -91\%$

Comparaison



- Ni  $\rightarrow R_{EIM}$  + faible

- ✓ Influence de l'épaisseur pour la mousse de NC
- ✓ Possibles meilleures propriétés électriques pour la mousse de Ni

**Objectifs :**

- Isoler la résistance de l’interconnexion et évaluer l’influence de la force d’appui sur cette grandeur
- Comparaison à une interconnexion massive



Recours à la caractérisation expérimentale



- ✓ Si  $F \nearrow \rightarrow R_{EIM} \searrow$  fortement
- ✓ Interconnexions déformables meilleures que massives

	Épaisseur (mm)	Pression (MPa)	$R_{EIM}$ ( $\mu\Omega.cm^2$ )
Plaque Cu	1,6	10	760
Mousse Cu	2,5	10	230
Mousse Ni	3	10	71
Mousse NC	1,2	10	420

**Objectifs :**

- Isoler la résistance de l’interconnexion et évaluer l’influence de la force d’appui sur cette grandeur
- Comparaison à une interconnexion massive



Recours à la caractérisation expérimentale



✓ Si  $F \nearrow \rightarrow R_{EIM} \searrow$  fortement  
✓ Interconnexions déformables meilleures que massives

	Épaisseur (mm)	Pression (MPa)	$R_{EIM}$ ( $\mu\Omega.cm^2$ )
Plaque Cu	1,6	10	760
Mousse Cu	2,5	10	230
Mousse Ni	3	10	71
Mousse NC	1,2	10	420
Puce SiC (20 mΩ   5x5 mm²)	Ø	Ø	5000

Critères électriques



- Conduction du courant de puissance ✓
- Résistance de l’interconnexion limitée ✓

Critères mécaniques



- EIM déformable ✓
- Sans liaison mécanique permanente ✓

**Objectifs :**

- Isoler la résistance de l’interconnexion et évaluer l’influence de la force d’appui sur cette grandeur
- Comparaison à une interconnexion massive



Recours à la caractérisation expérimentale



✓ Si  $F \nearrow \rightarrow R_{EIM} \searrow$  fortement  
✓ Interconnexions déformables meilleures que massives

	Épaisseur (mm)	Pression (MPa)	$R_{EIM}$ ( $\mu\Omega.cm^2$ )
Plaque Cu	1,6	10	760
Mousse Cu	2,5	10	230
Mousse Ni	3	10	71
Mousse NC	1,2	10	420
Puce SiC (20 mΩ   5x5 mm²)	∅	∅	5000
Contact sec (cuivre – aluminium)	∅	10	180
Fils de bonding (x10   5x5 mm²)	∅	∅	135

Critères électriques



- Conduction du courant de puissance ✓
- Résistance de l’interconnexion limitée ✓

Critères mécaniques



- EIM déformable ✓
- Sans liaison mécanique permanente ✓



Par rapport aux solutions d’interconnexion classiques du packaging ?



✓ Mêmes ordres de grandeur **MAIS** démontable + déformable

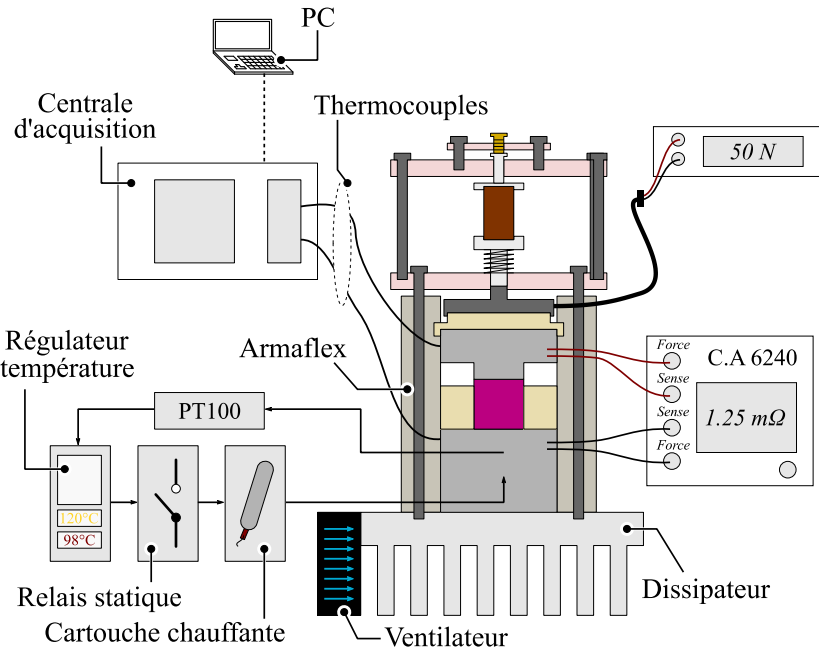


Manuscrit



$$R_{EIM} = f(F, T)$$

- Caractérisation de  $R_{EIM}$  en fonction de  $F$  et  $T$  (50 – 80 °C) pour Plaque Cu, Mousse Cu et Mousse Ni

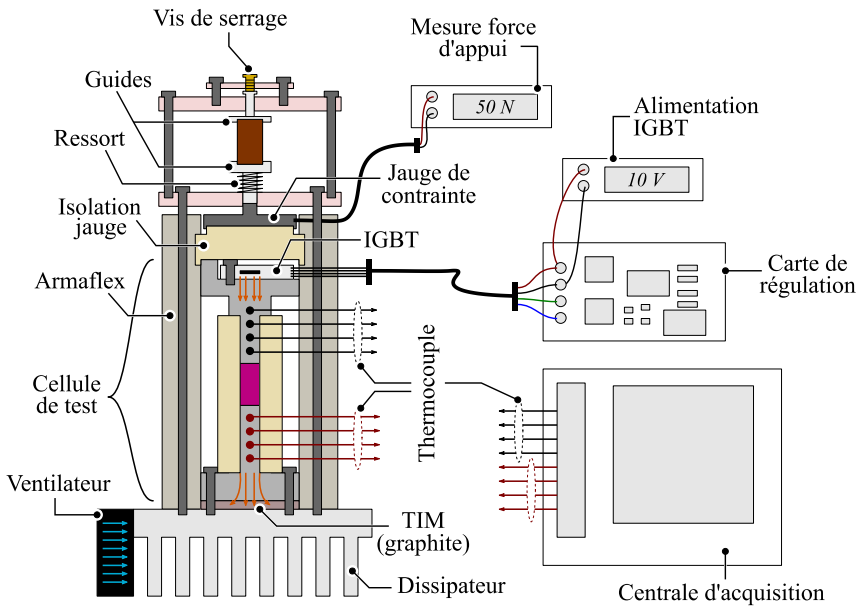


Manuscrit



$$R_{th} = f(F)$$

- Caractérisation thermique de mousses métalliques en fonction de la force d'appui



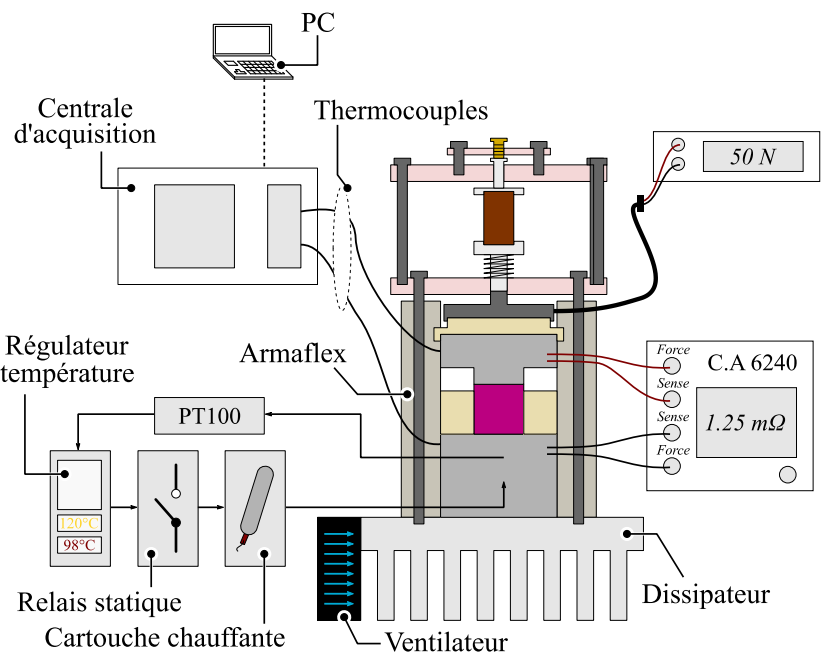


Manuscrit



$$R_{EIM} = f(F, T)$$

- Caractérisation de  $R_{EIM}$  en fonction de  $F$  et  $T$  (50 – 80 °C) pour Plaque Cu, Mousse Cu et Mousse Ni

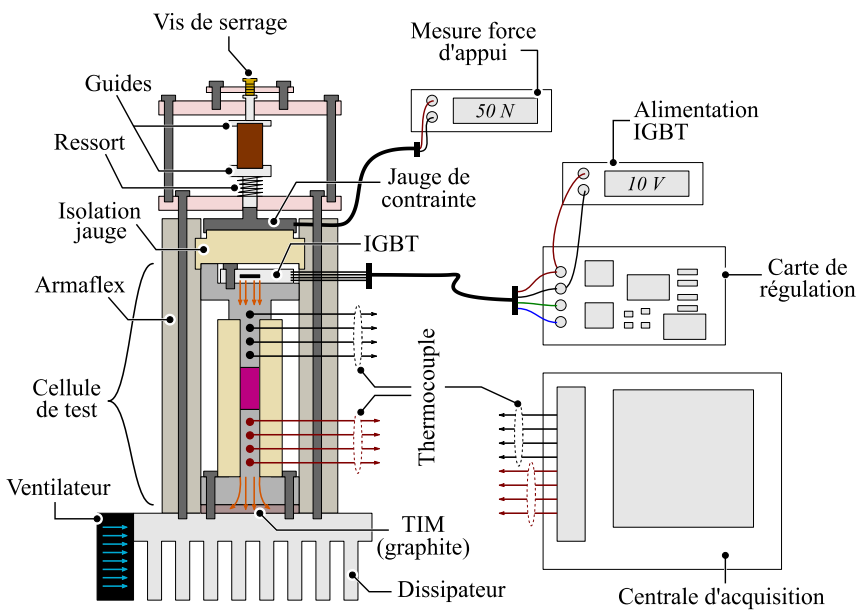


Manuscrit



$$R_{th} = f(F)$$

- Caractérisation thermique de mousses métalliques en fonction de la force d'appui

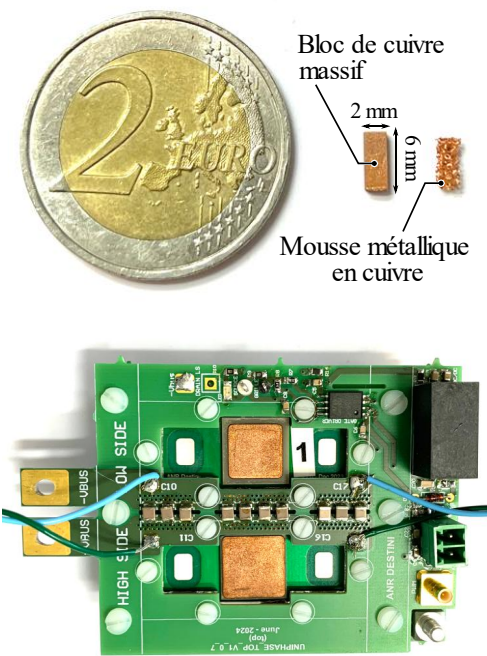


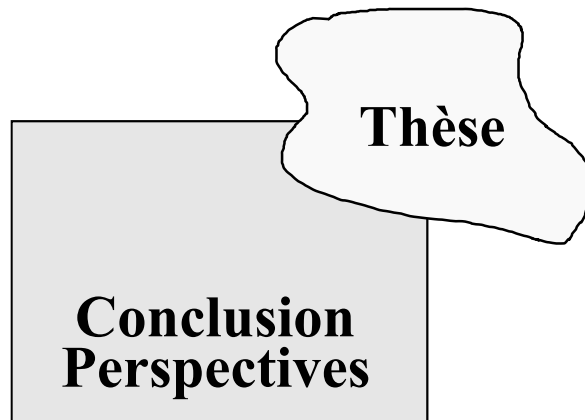
Manuscrit



Tests en conditions réelles

- Tests de mousses métalliques dans un assemblage de puissance





1

Solution de packaging modulaire, démontable et performante

2

Isolation électrique de la solution de packaging

3

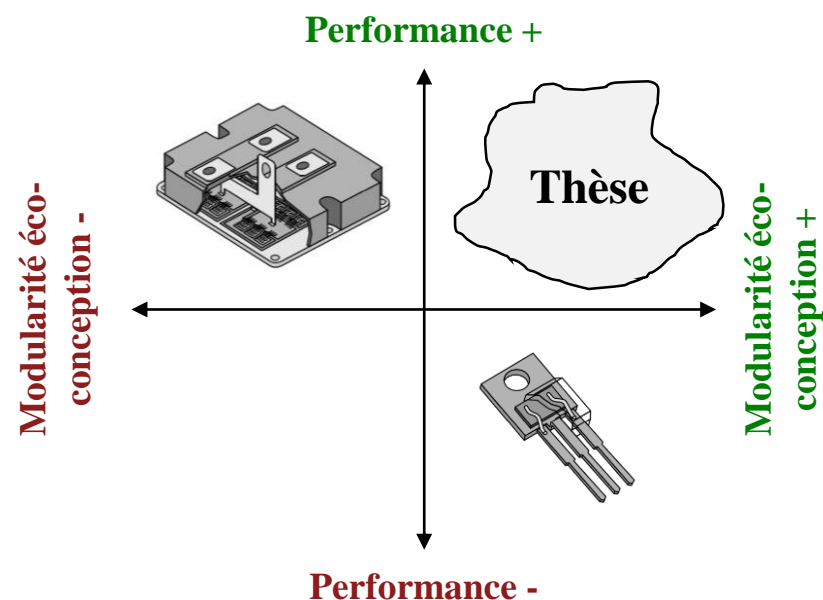
Interconnexions électriques modulaires et démontables

4

**Conclusion et Perspectives**

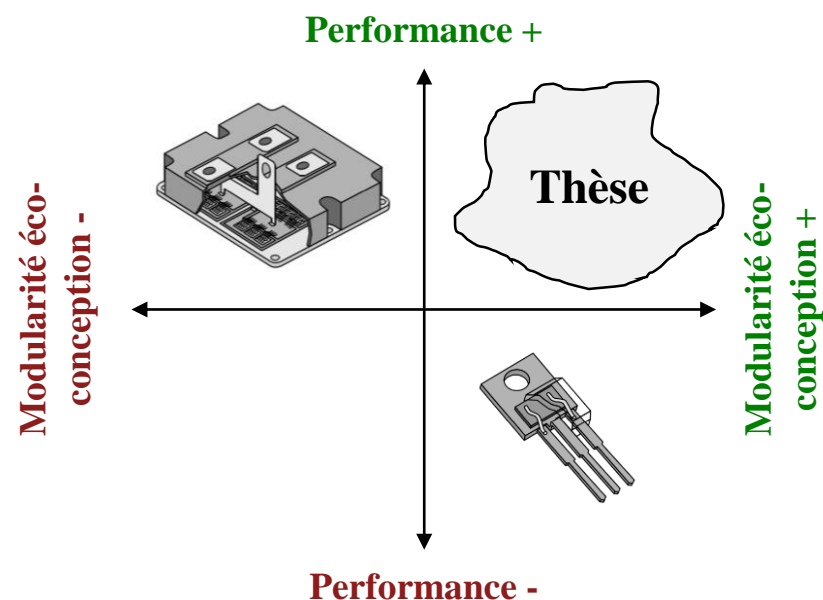


Comment assurer la mise en œuvre des **composants SiC** dans un contexte de **modularité** et **démontabilité**, tout en assurant des **performances satisfaisantes** pour l'EP ?





Comment assurer la mise en œuvre des **composants SiC** dans un contexte de **modularité** et **démontabilité**, tout en assurant des **performances satisfaisantes** pour l'EP ?

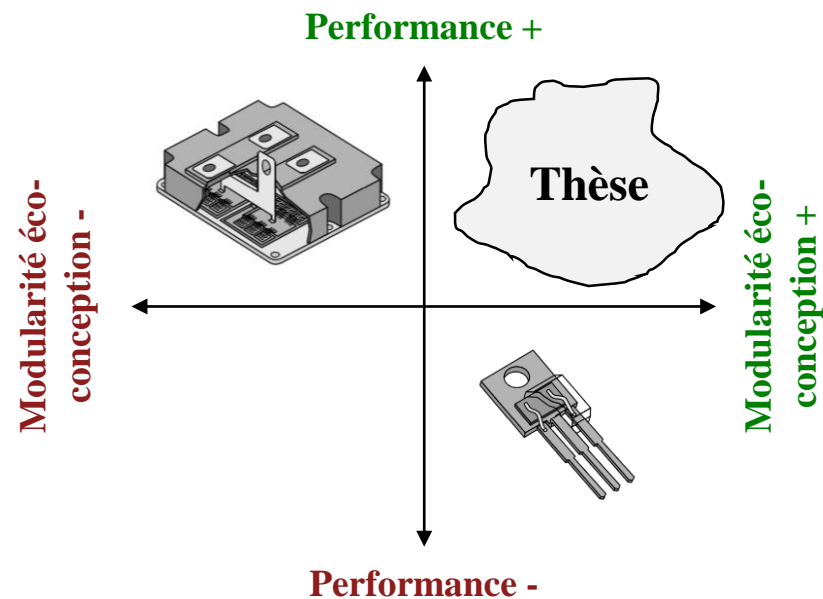


## Packaging modulaire pour l'éco-conception

- Intégration d'une puce SiC au sein d'un prépackage
- Assemblage de prépackages
- ✓ Performances électriques  $\rightarrow L_S = 3 \text{ nH} \rightarrow 1 \text{ nH}$  semble possible (intégration PCB)



Comment assurer la mise en œuvre des **composants SiC** dans un contexte de **modularité** et **démontabilité**, tout en assurant des **performances satisfaisantes** pour l'EP ?



## Packaging modulaire pour l'éco-conception

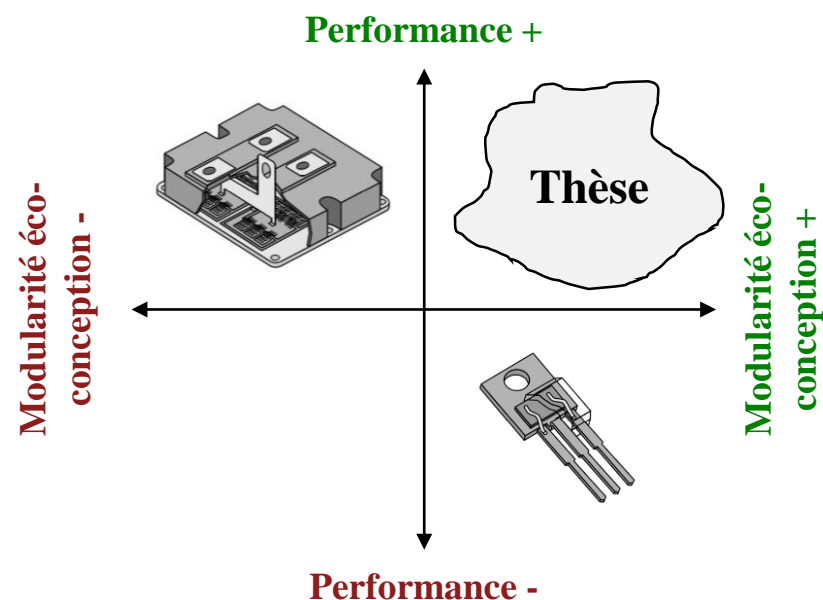
- Intégration d'une puce SiC au sein d'un prépackage
- Assemblage de prépackages
- ✓ **Performances électriques** →  $L_S = 3 \text{ nH} \rightarrow 1 \text{ nH}$  semble possible (intégration PCB)

## Isolation électrique

- Gestion du champ électrique en surface du PCB
- Stratégies : design géométrique et topologie du PCB
- ✓ **Effet des stratégies d'isolation sur le champ électrique**



Comment assurer la mise en œuvre des **composants SiC** dans un contexte de **modularité** et **démontabilité**, tout en assurant des **performances satisfaisantes** pour l'EP ?



## Packaging modulaire pour l'éco-conception

- Intégration d'une puce SiC au sein d'un prépackage
- Assemblage de prépackages
- ✓ **Performances électriques**  $\rightarrow L_S = 3 \text{ nH} \rightarrow 1 \text{ nH}$  semble possible (intégration PCB)

## Isolation électrique

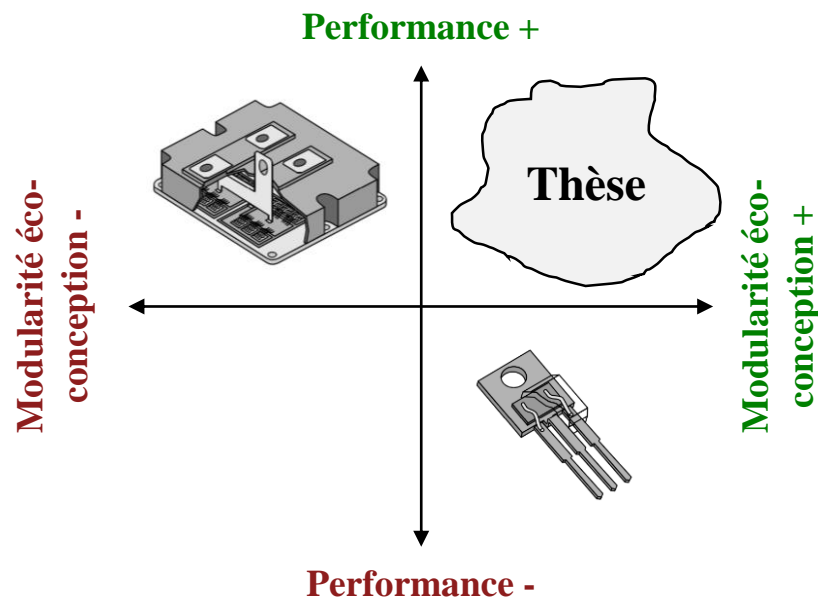
- Gestion du champ électrique en surface du PCB
- Stratégies : design géométrique et topologie du PCB
- ✓ **Effet des stratégies d'isolation sur le champ électrique**

## Interconnexions électriques

- Interconnexions déformables et démontables
- Étude des mousses métalliques
- ✓ **Résistance électrique limitée et impactée par la pression d'assemblage**
- ✓ **Tests en condition réelle**



Comment assurer la mise en œuvre des **composants SiC** dans un contexte de **modularité** et **démontabilité**, tout en assurant des **performances satisfaisantes** pour l'EP ?



## Packaging modulaire pour l'éco-conception

- Intégration d'une puce SiC au sein d'un prépackage
- Assemblage de prépackages
- ✓ **Performances électriques** →  $L_S = 3 \text{ nH} \rightarrow 1 \text{ nH}$  semble possible (intégration PCB)

## Isolation électrique

- Gestion du champ électrique en surface du PCB
- Stratégies : design géométrique et topologie du PCB
- ✓ **Effet des stratégies d'isolation sur le champ électrique**

## Interconnexions électriques

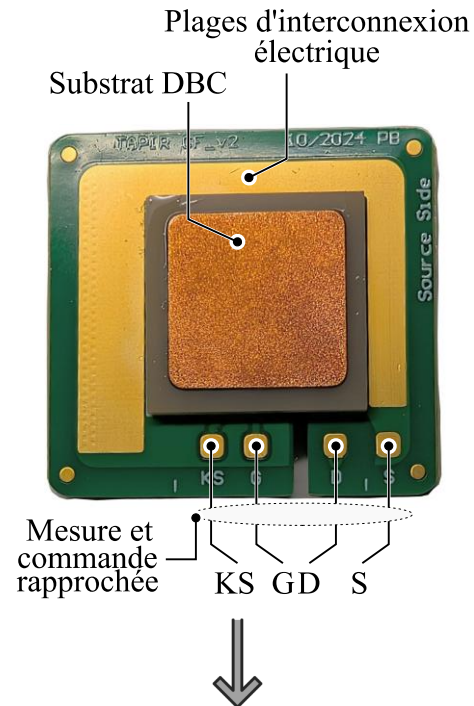
- Interconnexions déformables et démontables
- Étude des mousses métalliques
- ✓ **Résistance électrique limitée et impactée par la pression d'assemblage**
- ✓ **Tests en condition réelle**



- ✓ **Prise en compte de critères d'éco-conception dans le packaging des composants de puissance SiC**
- ✓ **Étude des différentes spécificités induites par les besoins de modularité et de démontabilité**

### Packaging modulaire pour l'éco-conception

### ❑ Étude des performances thermiques de l'assemblage de puissance

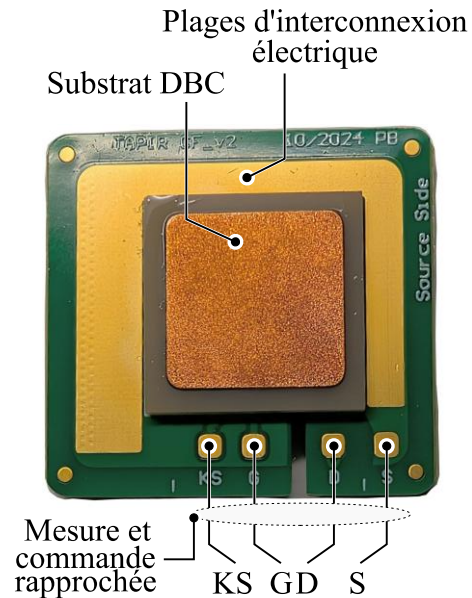


- Réalisation d'un second prépackage

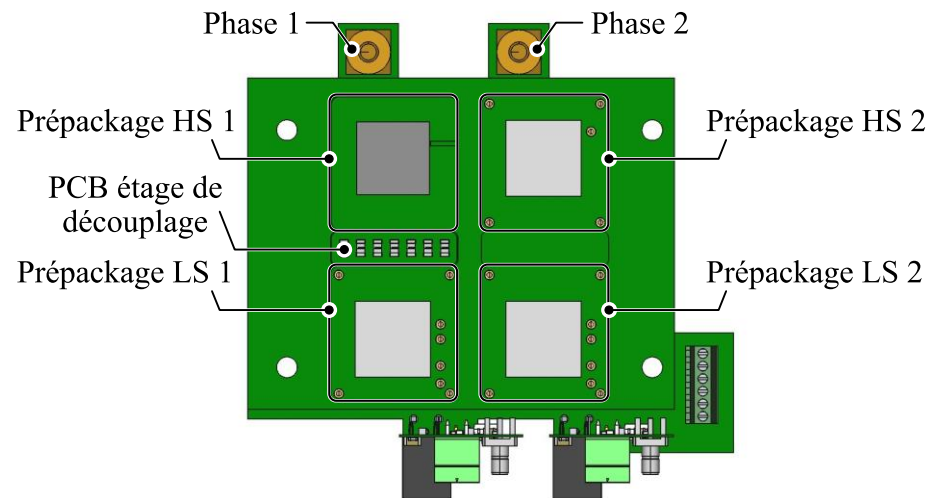


### Packaging modulaire pour l'éco-conception

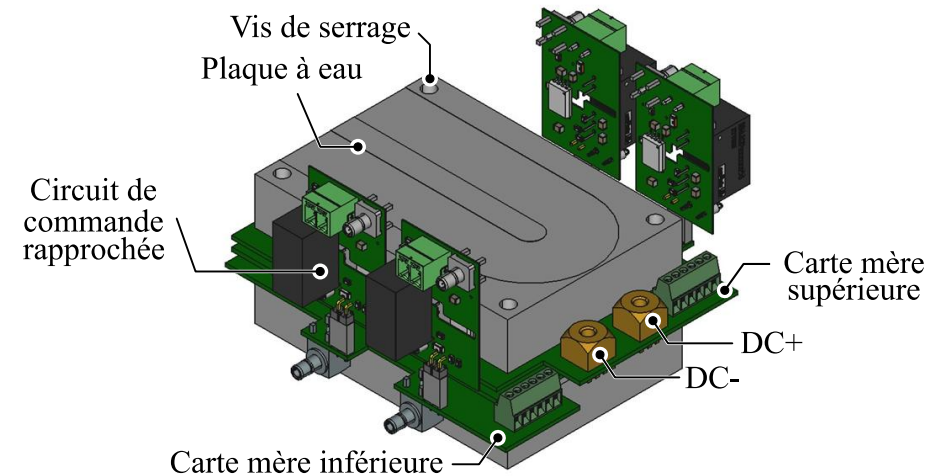
### ❑ Étude des performances thermiques de l'assemblage de puissance



- Réalisation d'un second prépackage

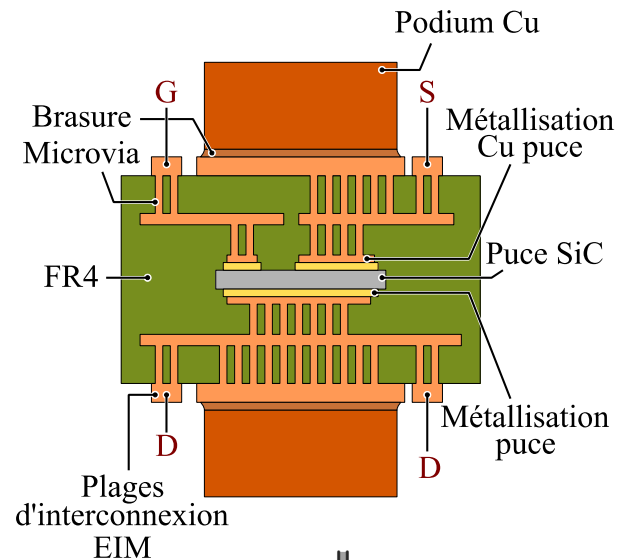


- Assemblage de 2 cellules de commutation au travers de plaques à eau
- Caractérisation électrique ( $L_s$ ) et thermique ( $R_{th}$ )
- Démonstration de la modularité

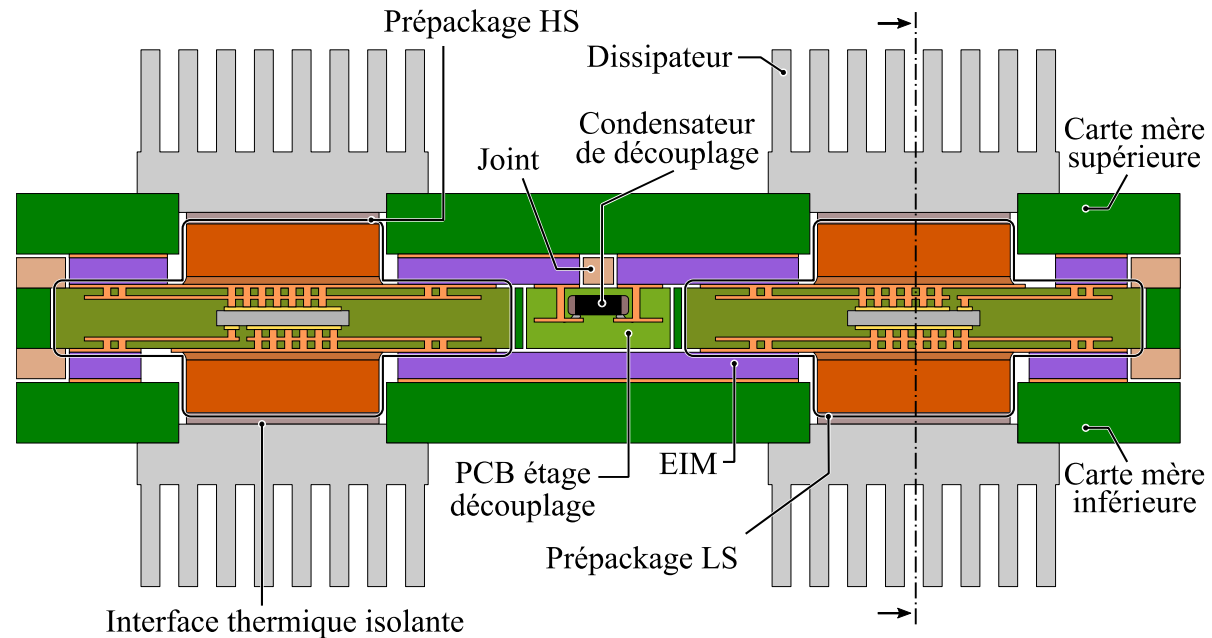


### Packaging modulaire pour l'éco-conception

### ❑ Prépackage basé sur la technique d'intégration PCB



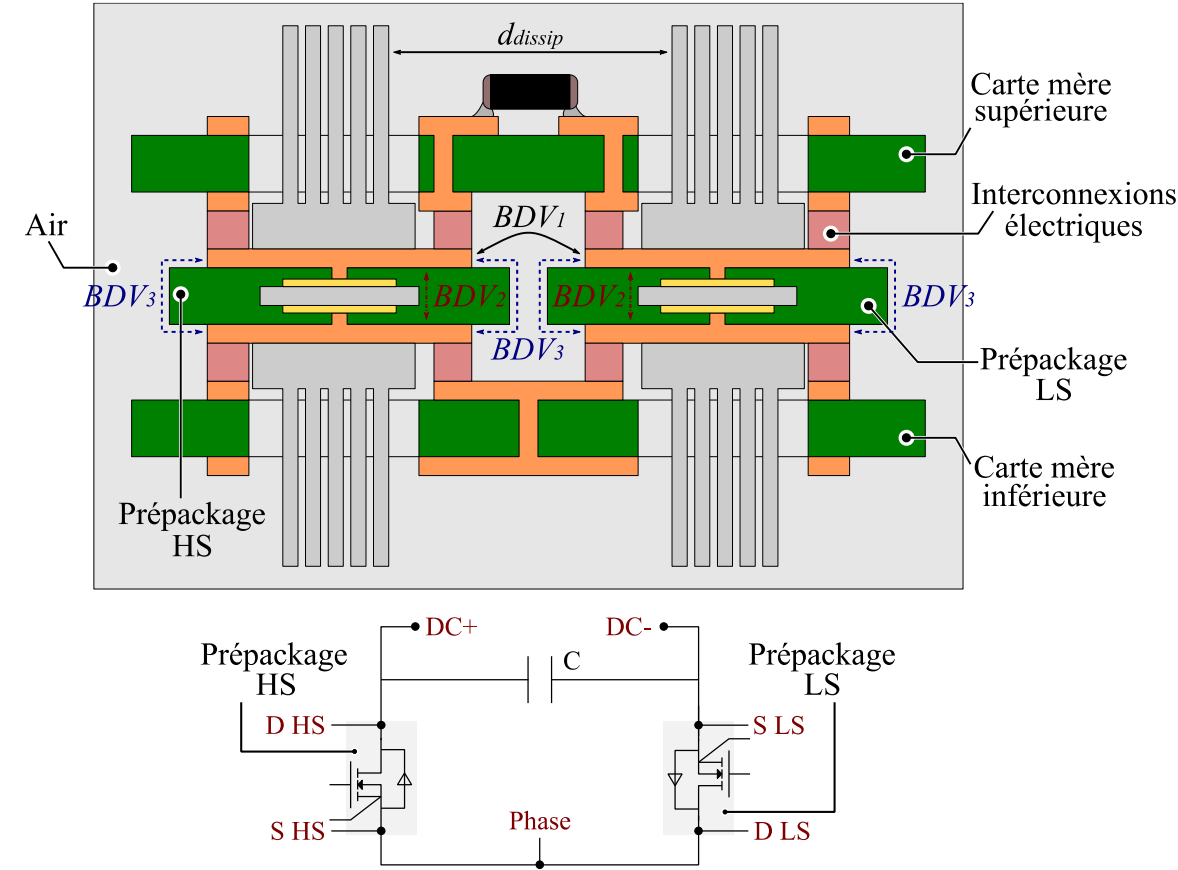
- Réalisation du prépackage et d'une cellule de commutation
- Caractérisation électrique ( $L_S$ ) et thermique ( $R_{th}$ )



- Intégration de l'étage de découplage dans un PCB dédié pouvant être désassemblé

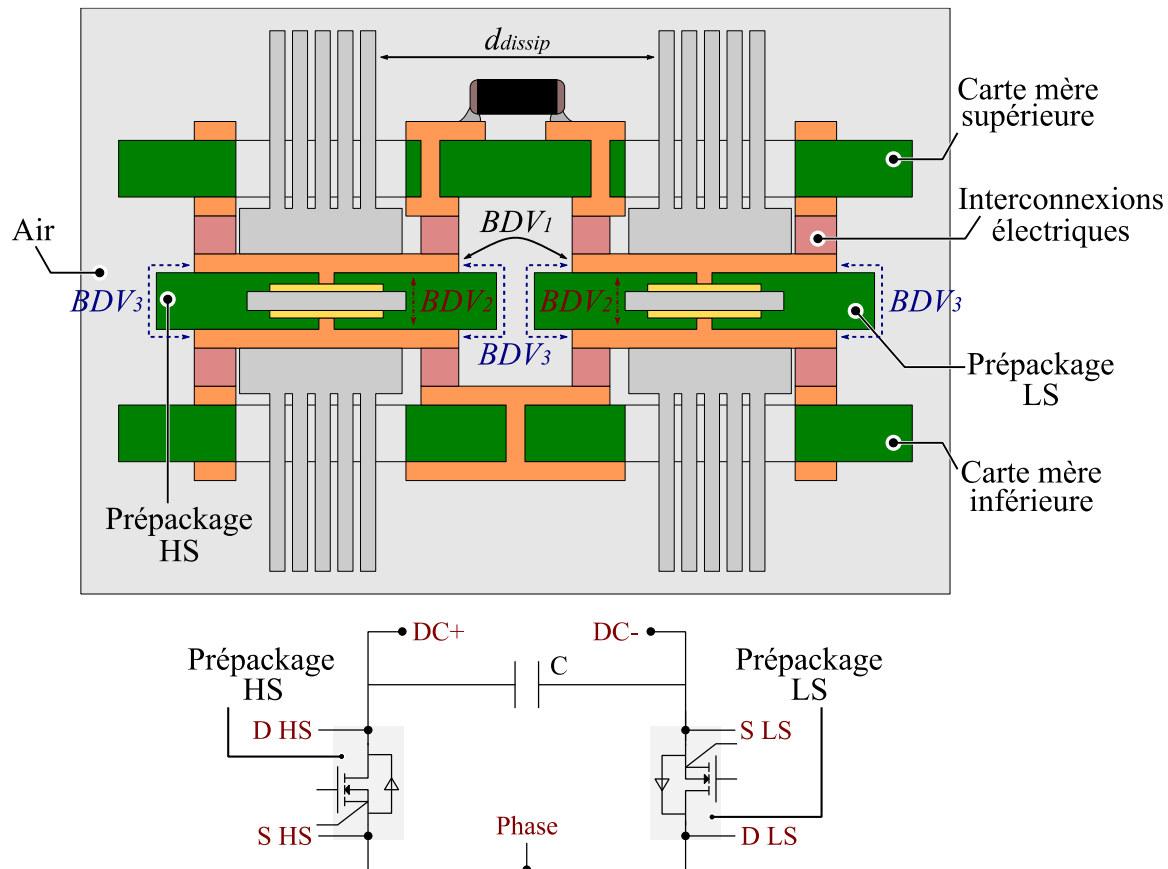
Isolation  
électrique

✖ Étude centrée sur une partie  
de l'assemblage de puissance



### Isolation électrique

✘ Étude centrée sur une partie de l'assemblage de puissance



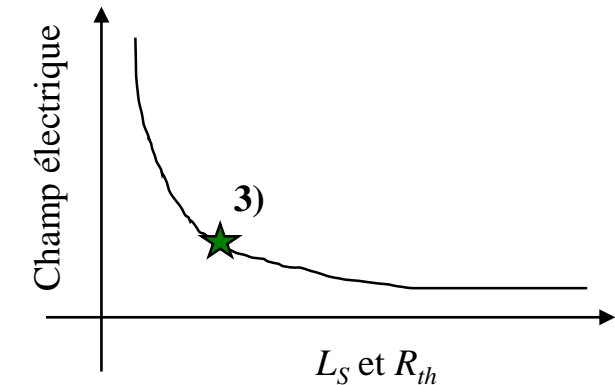
■ Évaluer l'influence des paramètres géométriques de l'assemblage de puissance sur le champ électrique

### 3) Optimum

- ✓ Champ électrique
- ✓ Maille de commutation
- ✓ Refroidissement

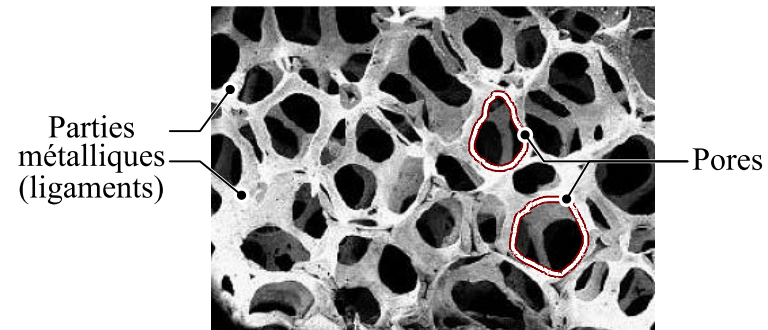


- Étude en simulation numérique d'un assemblage complet
- Étude d'autres stratégies d'isolation (coating, barrière matérielle, etc)



### Interconnexions électriques

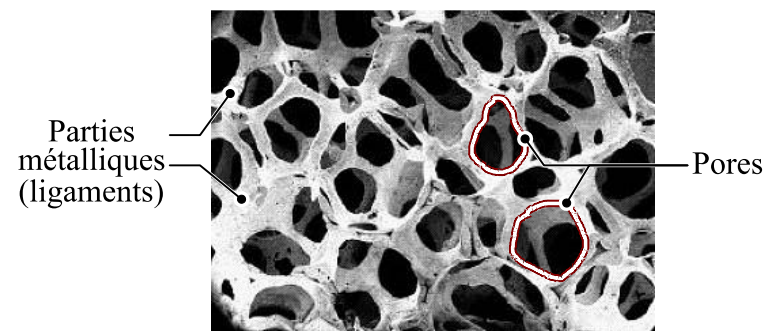
❌ **Aucune connaissance des propriétés  
physiques des matériaux poreux**



- Caractérisations supplémentaires sur le plan matériau :
  - Conductivité électrique équivalente
  - Conductivité thermique équivalente
  - Surface de contact
  - Mesure in-situ de l'épaisseur

### Interconnexions électriques

❌ **Aucune connaissance des propriétés physiques des matériaux poreux**

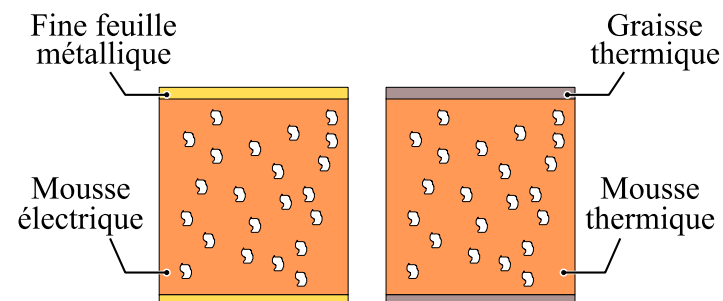


- Caractérisations supplémentaires sur le plan matériau :
  - Conductivité électrique équivalente
  - Conductivité thermique équivalente
  - Surface de contact
  - Mesure in-situ de l'épaisseur

❌ **Forte influence des résistances de contact**



- Étude de l'influence de couches additionnelles dans l'assemblage des interconnexions

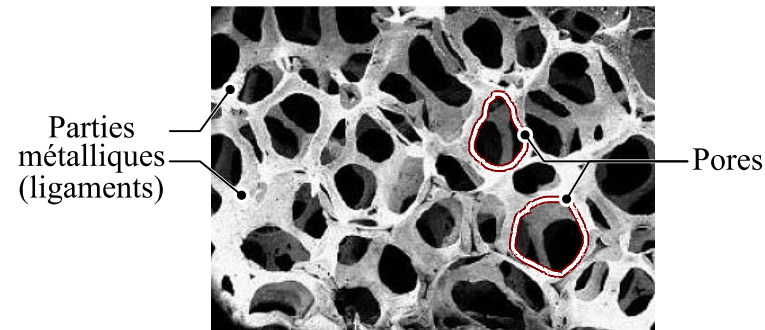


### Interconnexions électriques

❌ Aucune connaissance des propriétés physiques des matériaux poreux



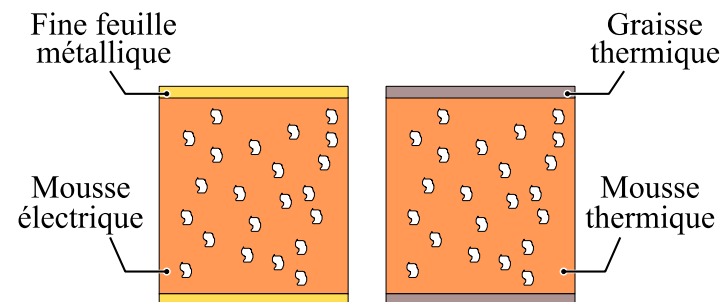
- Caractérisations supplémentaires sur le plan matériau :
  - Conductivité électrique équivalente
  - Conductivité thermique équivalente
  - Surface de contact
  - Mesure in-situ de l'épaisseur



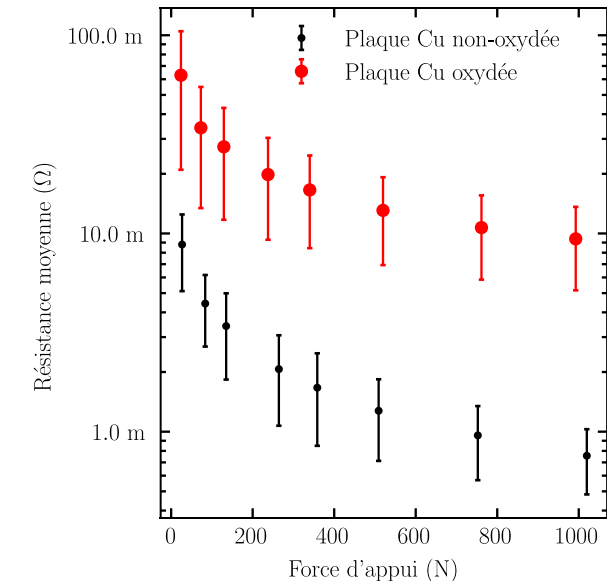
❌ Forte influence des résistances de contact



- Étude de l'influence de couches additionnelles dans l'assemblage des interconnexions



❌ Essais expérimentaux réalisés sous conditions initiales ( $t = 0$ )



- Étude du vieillissement (passif et actif) des interconnexions électriques et thermiques



Intérêt de certains matériaux métalliques pour les mousses ? **Nickel-Chrome ?**



## ■ Articles de revues internationales avec comité de relecture (2)

- **P. Bruyere**, E. Vagnon, Y. Avenas, “*Field Plate Integration for Mitigating Partial Discharge Activity in PCB-Embedded Power Electronics Modules*”, MDPI Energies 2024
- **P. Bruyere**, A. Derbey, B. Zynger, Y. Avenas, E. Vagnon, J.L. Schanen, J.M. Guichon, O. Sanjakdar, “*Electrical Characterization of Modular 3D Packaging Assembled with Removable Metal Parts*”, IEEE Transaction on IAS (soumis)

## ■ Articles de conférences internationales avec comité de relecture (5)

- **P. Bruyere**, E. Vagnon, Y. Avenas, “*Impact of the Printed Circuit Board Geometrical Design on the AC Breakdown and Partial Discharge Activity in Air*”, IEEE CEIDP 2023
- **P. Bruyere**, E. Vagnon, Y. Avenas, M. El Khattabi, “*Metal-Air-FR4 Electrical Field Management with Embedded Electrical Field Plates for PCB Embedded Power Electronics*”, IEEE CIPS 2024
- M. Ferber, **P. Bruyere**, N. Botter, A. Can, S. Bouzerd, J.M. Guichon, J.L. Schanen, A. Derbey, E. Vagnon, C. Combettes, V. Bley, E. Sarraute, L; Dupont, Y. Avenas, “*Stray Inductance of a Modular Switching Designed for Easier Disassembly*”, IEEE CIPS 2024
- **P. Bruyere**, E. Vagnon, Y. Avenas, “*Electrical Characterization of Solderless Interconnections Dedicated to Pressure Assembly Power Modules*”, IEEE IWIPP 2025
- **P. Bruyere**, A. Derbey, B. Zynger, Y. Avenas, E. Vagnon, J.L. Schanen, J.M. Guichon, O. Sanjakdar, “*Electrical Characterization of Modular 3D Packaging Assembled with Compressed Metal Foams*”, IEEE APEC 2025

## ■ Articles de conférences nationales avec comité de relecture (1)

- **P. Bruyere**, E. Vagnon, Y. Avenas, “*Caractérisation Électrique d’un Packaging Modulaire 3D Assemblé par Pression et Incluant des Mousses Métalliques*”, SGE 2025



# ÉTUDE DE CONCEPTS D'ASSEMBLAGE DE PUISSANCE MODULAIRES ET DÉMONTABLES POUR LA MISE EN ŒUVRE DE COMPOSANTS SiC

Paul BRUYERE<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, Grenoble, France

<sup>2</sup>Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, Ampère, UMR5005, 69130 Ecully, France

**Sous la direction de Yvan AVENAS<sup>1</sup> et le co-encadrement de Éric VAGNON<sup>2</sup>**

Soutenance de thèse – ED EEATS, spécialité Génie Électrique – 24/11/2025

---

## MERCI POUR VOTRE ATTENTION

---

