

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

Paul BRUYERE^{1,2}

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, Grenoble, France

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

Sous la direction de Yvan AVENAS¹ et le co-encadrement de Éric VAGNON²

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 – **Examinateuse**
 - Cyril BUTTAY – Directeur de Recherche, CNRS – **Examinateur**
 - Léo STERNA – Ingénieur de Recherche, CEA – LETI – **Examinateur**
-



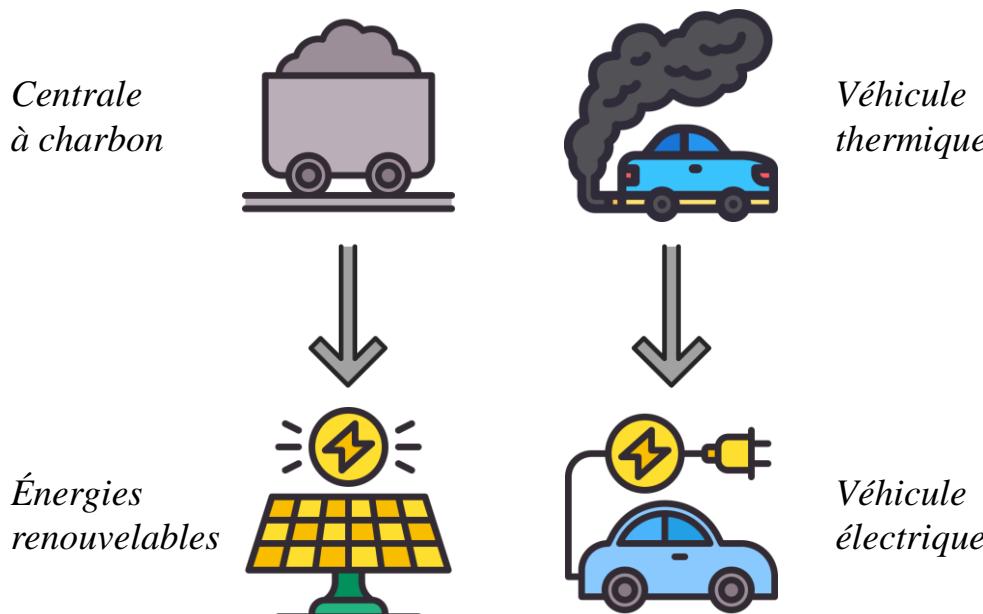
CONTEXTE ET OBJECTIFS

LES CONVERTISSEURS STATIQUES DE PUISSANCE



Vers une transition énergétique

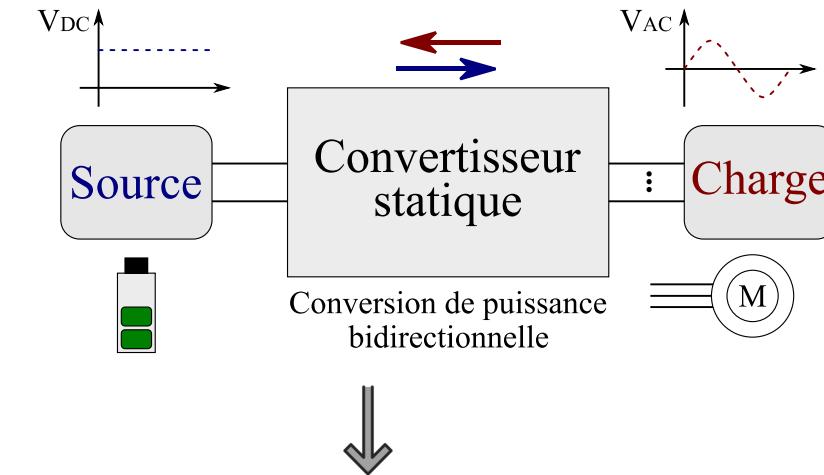
- Secteur de la production
- Secteur du transport



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)



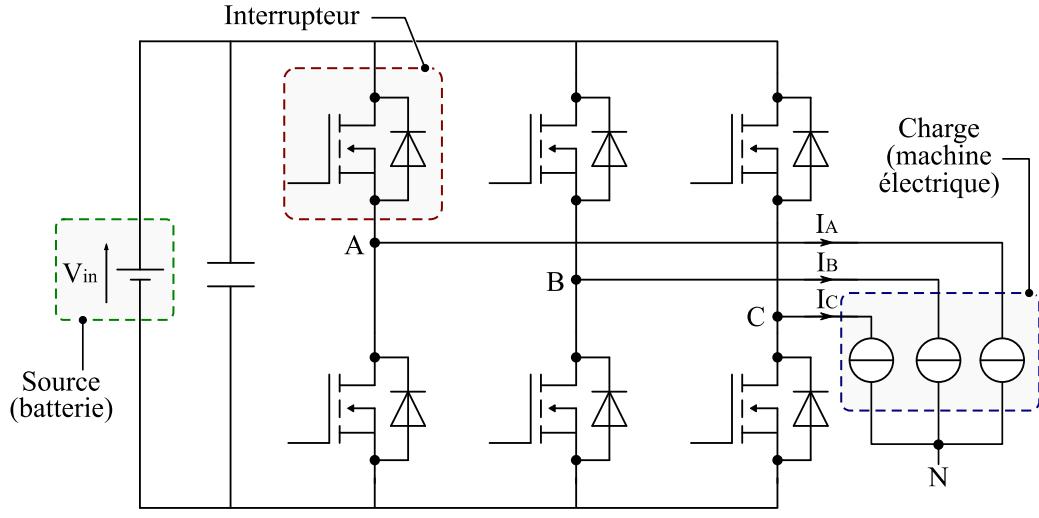
Indicateurs de performance :

- ↘ coûts
- ↗ densités de puissance
- ↗ rendements

CONTEXTE ET OBJECTIFS

LE PACKAGING EN EP

Schéma électrique d'un onduleur triphasé



Interrupteur = puce semi-conductrice

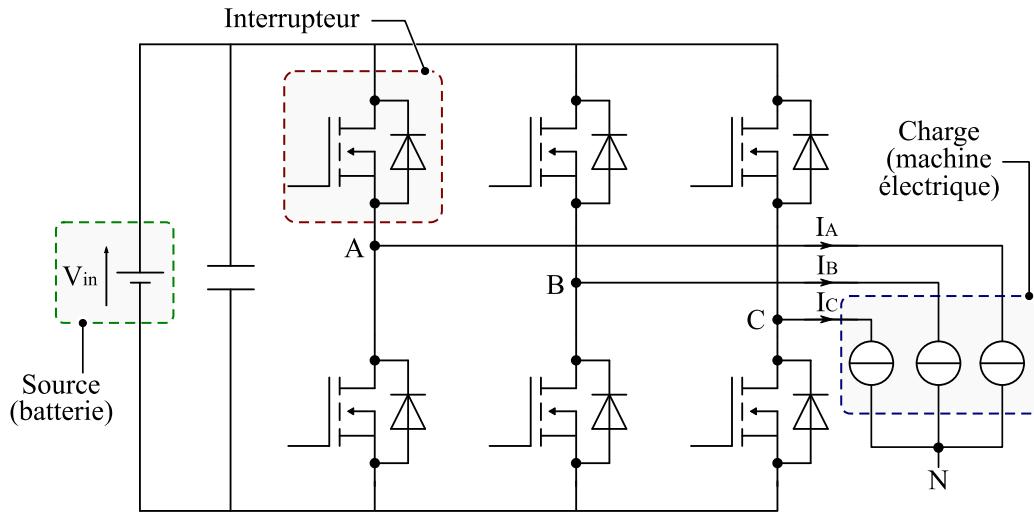


☒ **Puce non utilisable dans son état initial**

CONTEXTE ET OBJECTIFS

LE PACKAGING EN EP

Schéma électrique d'un onduleur triphasé

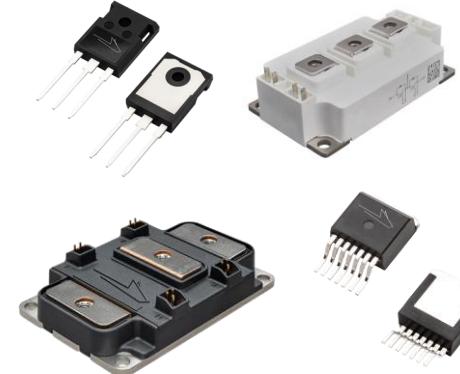


Interrupteur = puce semi-conductrice



☒ 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

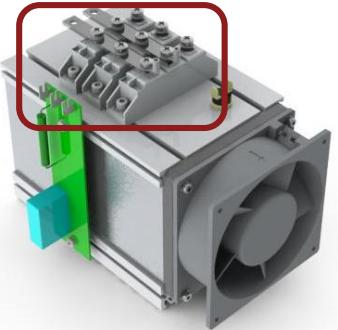
Inconvénients :

- Interconnexions
- Utilisation du système de refroidissement



Indicateurs de performance :

- Coûts
- Rendements
- Densités de puissance



Assemblage du module sur un système de refroidissement

Module de puissance multi-puces



Avantages :

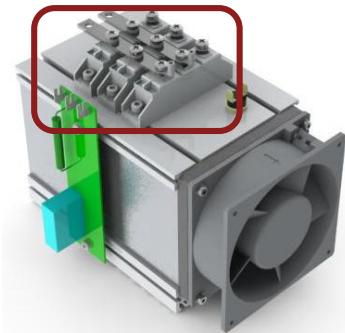
- Technologie mature et industrialisée
- Large choix de calibre (V, I)
- Performances électriques

Inconvénients :

- Interconnexions
- Utilisation du système de refroidissement

Indicateurs de performance :

-
- Coûts
 - Rendements
 - Densités de puissance



Assemblage du module sur un système de refroidissement

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

CONTEXTE ET OBJECTIFS

LES PACKAGINGS GÉNÉRIQUES

Module de puissance multi-puces



Avantages :

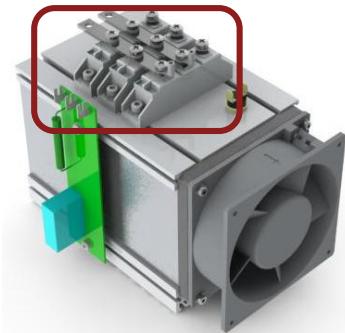
- Technologie mature et industrialisée
- Large choix de calibre (V, I)
- Performances électriques

Inconvénients :

- Interconnexions
- Utilisation du système de refroidissement

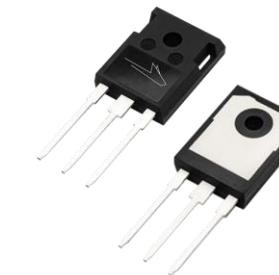
Indicateurs de performance :

-
- Coûts
 - Rendements
 - Densités de puissance



Assemblage du module sur un système de refroidissement

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

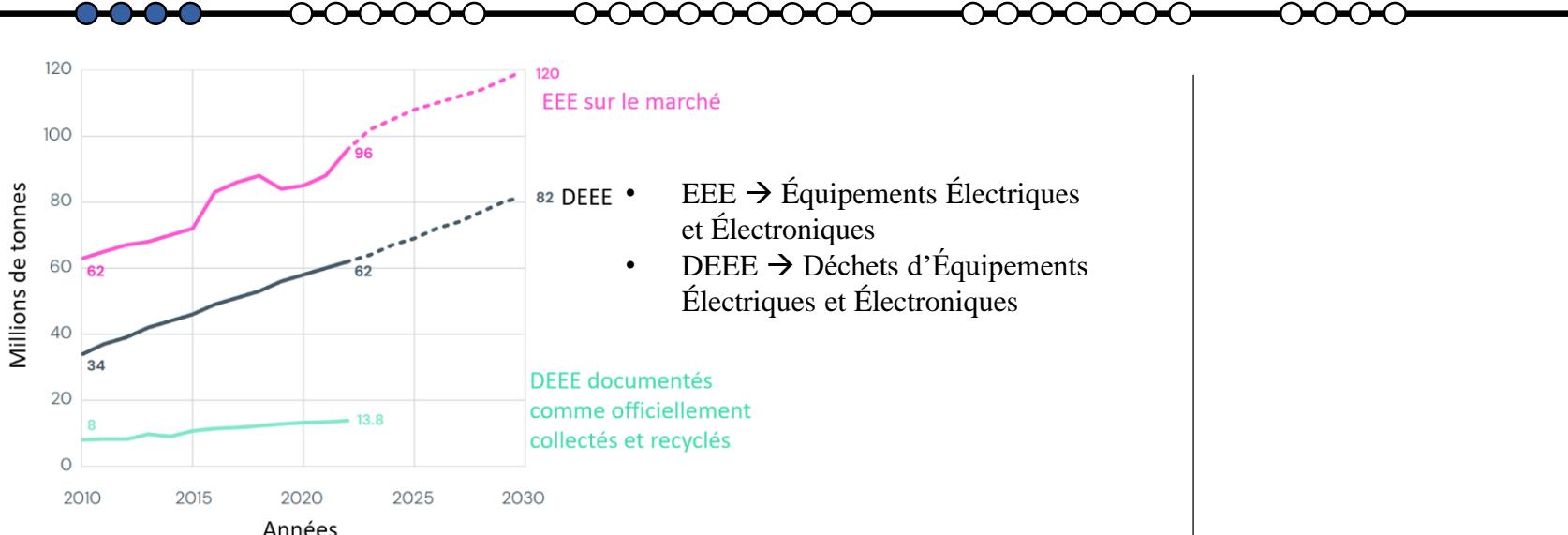
Indicateurs de performance :

-
- Coûts
 - Rendements
 - Densités de puissance

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

CONTEXTE ET OBJECTIFS

DÉMARCHE D'ÉCO-CONCEPTION



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**



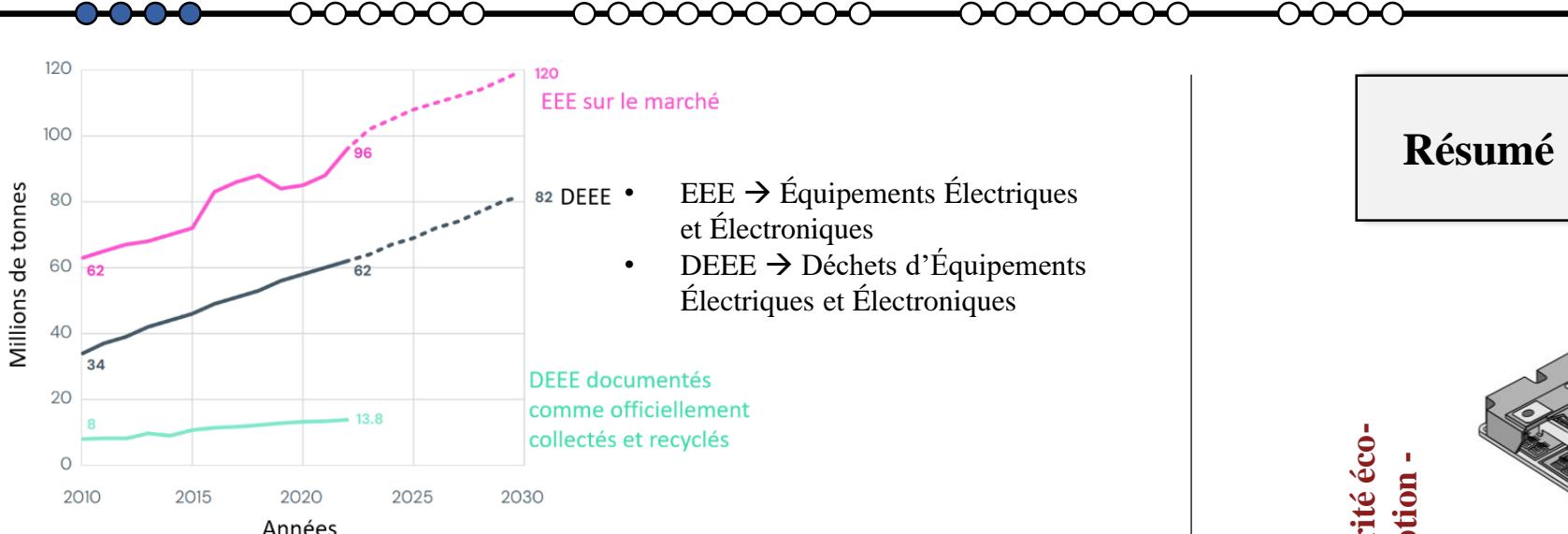
Le packaging et la modularité sont des éléments de réponse à cette démarche d'éco-conception (*Thèse B. Baudais SATIE* [2])

[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 »

CONTEXTE ET OBJECTIFS

DÉMARCHE D'ÉCO-CONCEPTION



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



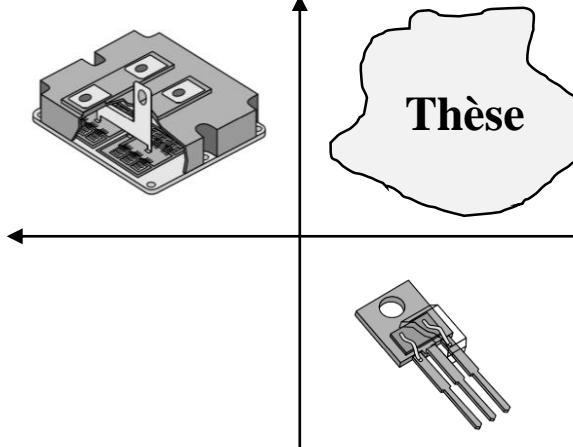
Le packaging et la modularité sont des éléments de réponse à cette démarche d'éco-conception (*Thèse B. Baudais SATIE [2]*)



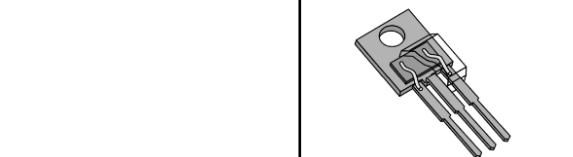
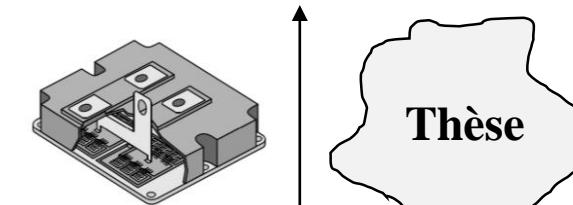
Cadrant Performance / Modularité éco-conception

Résumé

Modularité éco-conception -



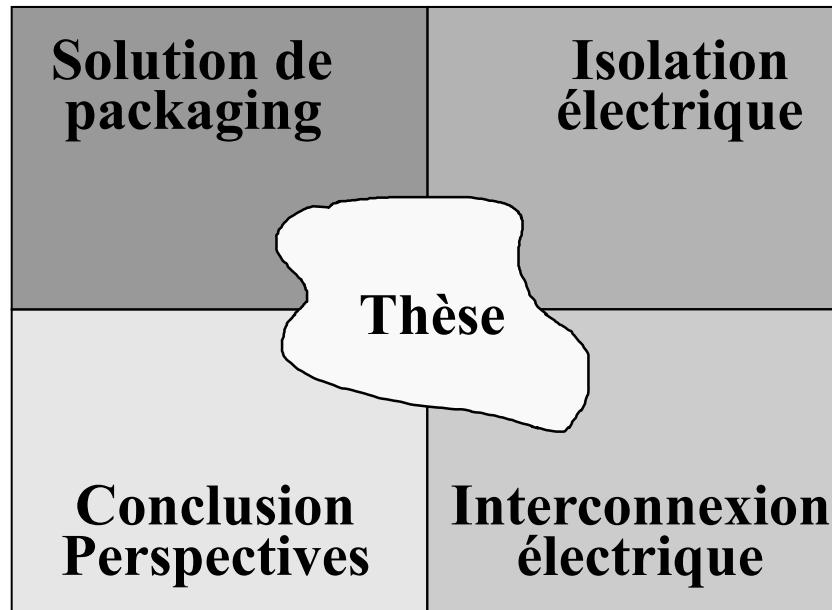
Modularité éco-conception +



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**



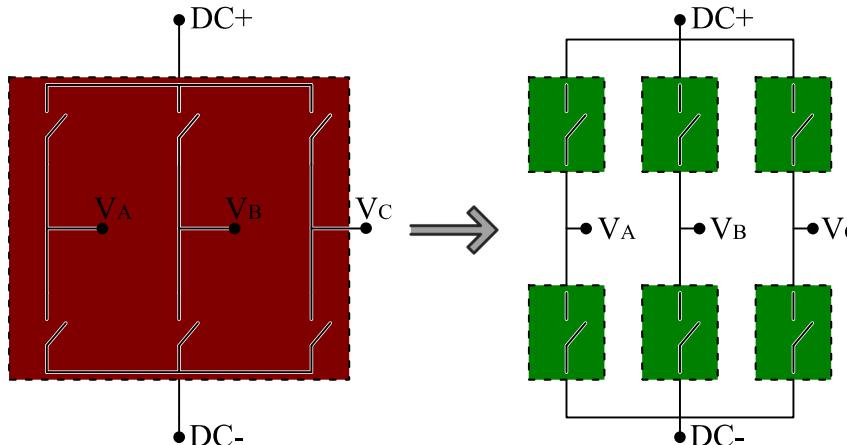
- 1** Solution de packaging modulaire, démontable et performante
- 2** Isolation électrique de la solution de packaging
- 3** Interconnexions électriques modulaires et démontables
- 4** Conclusion et Perspectives

PROPOSITION TECHNOLOGIQUE

PRÉSENTATION

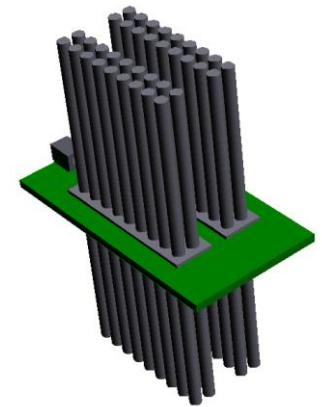
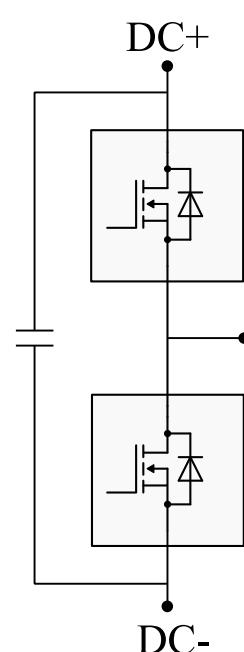
Prise en compte des notions d'éco-conception

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



Assemblage proposé

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

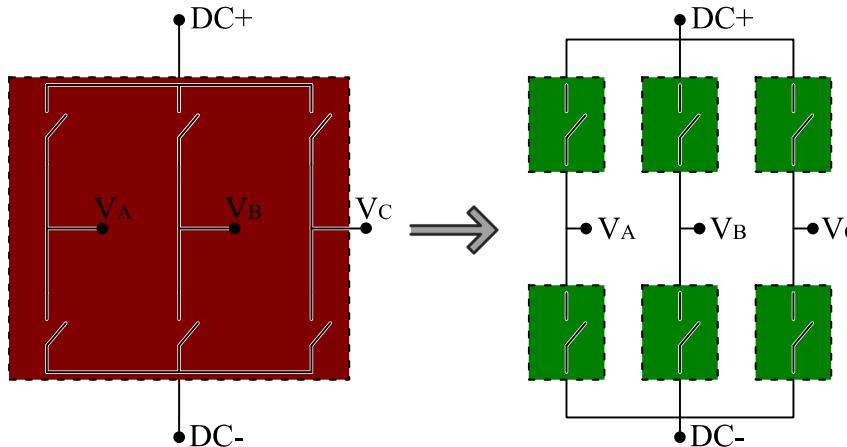


PROPOSITION TECHNOLOGIQUE

PRÉSENTATION

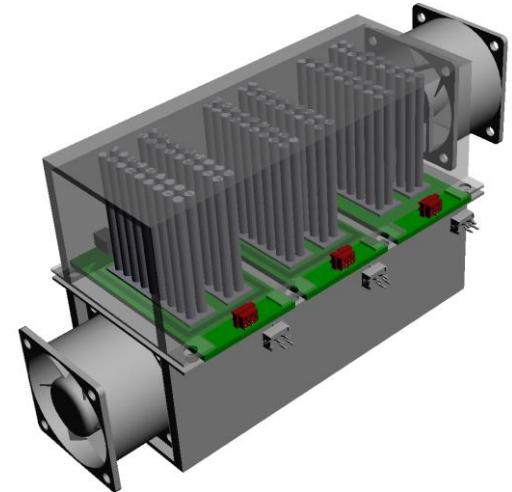
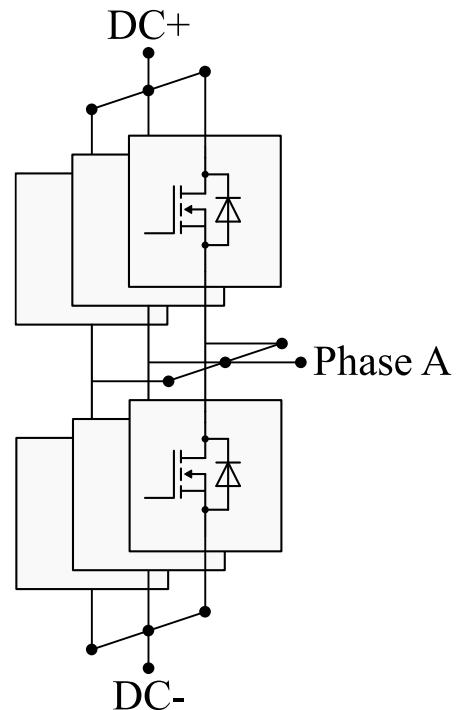
Prise en compte des notions d'éco-conception

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



Assemblage proposé

- Assemblage de cellules de commutation
→ mise en parallèle

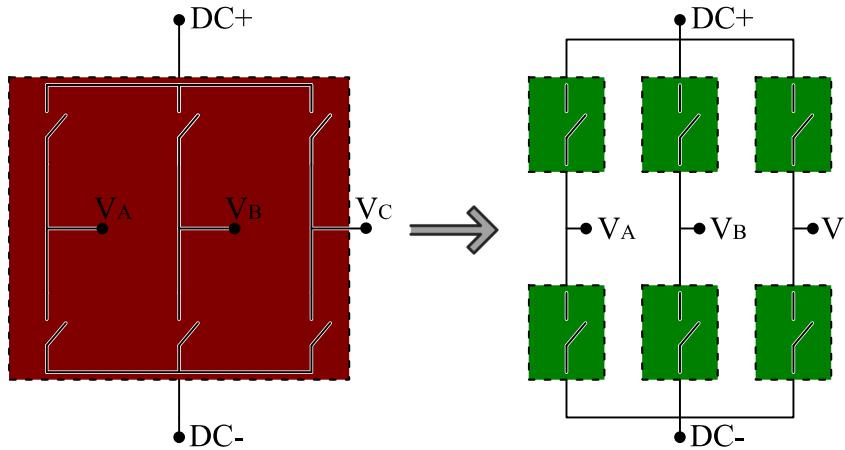


PROPOSITION TECHNOLOGIQUE

PRÉSENTATION

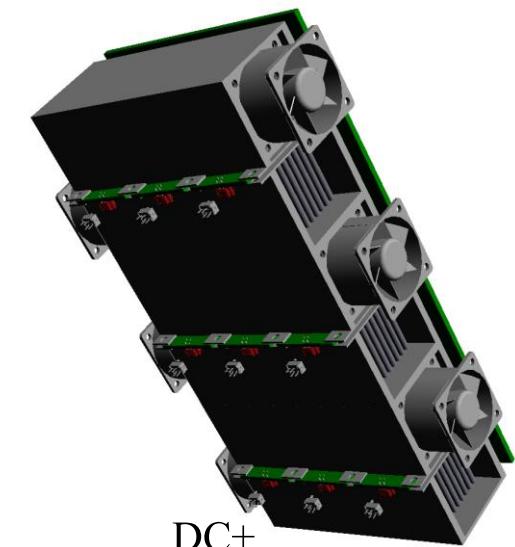
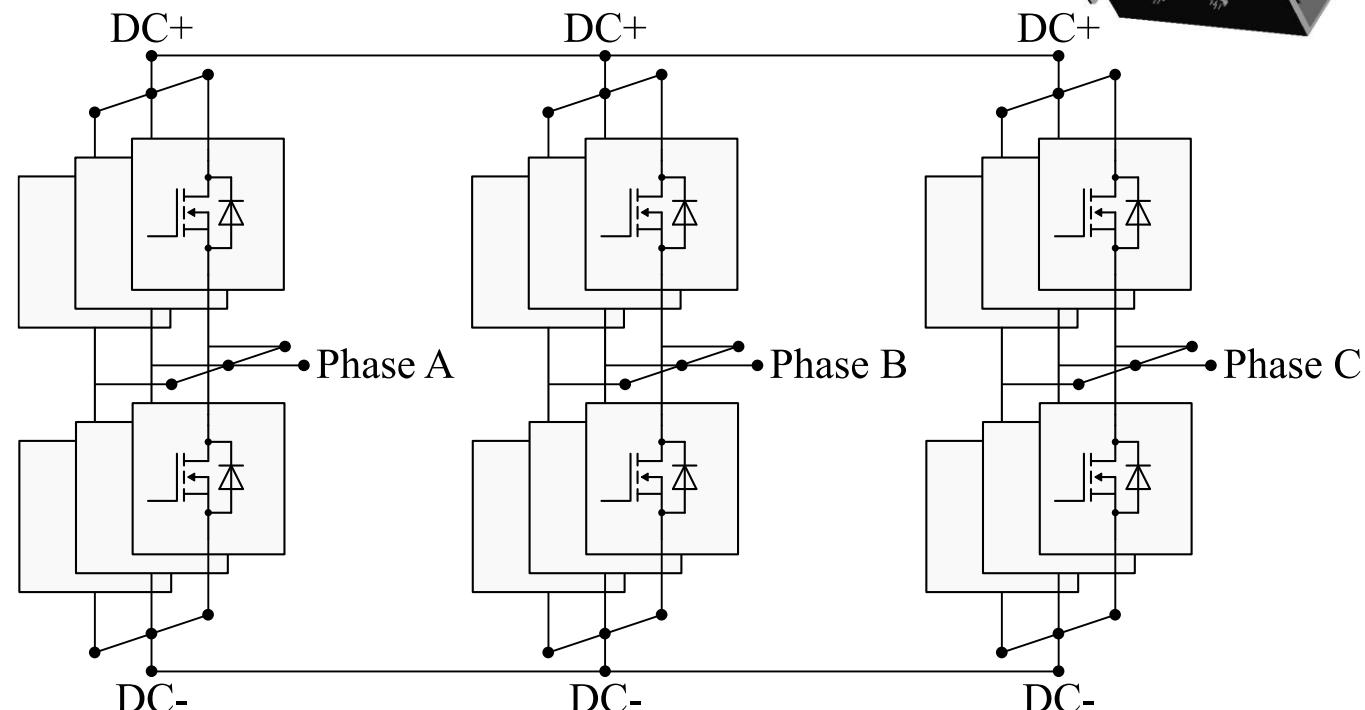
Prise en compte des notions d'éco-conception

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



Assemblage proposé

- Assemblage de phases → onduleur triphasé



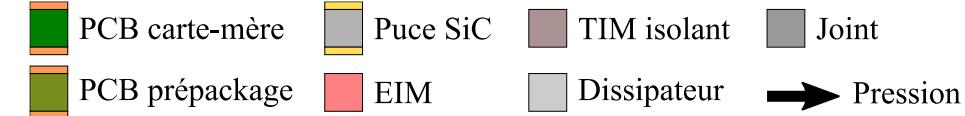
PROPOSITION TECHNOLOGIQUE

CELLULE DE COMMUTATION PERFORMANTE ET DÉMONTABLE



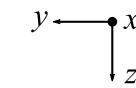
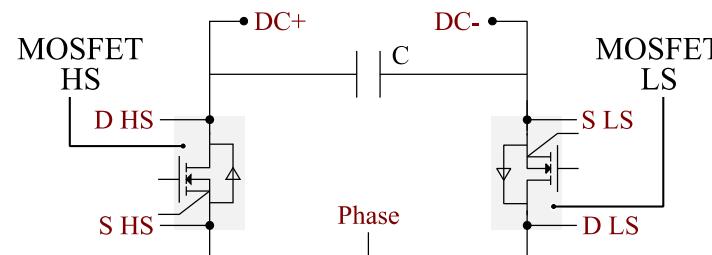
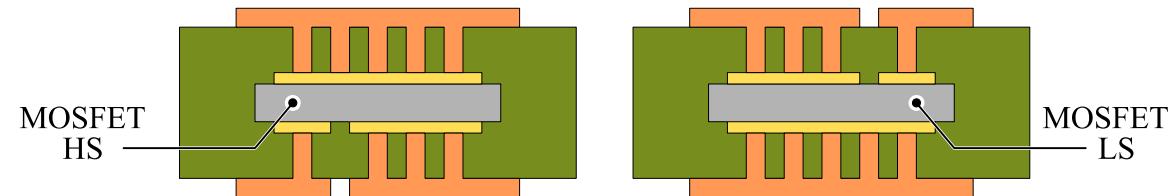
Cellule de commutation performante et démontable

Vue en coupe assemblage



- Prépackages :

- Packaging d'une puce SiC
- Intégration unitaire

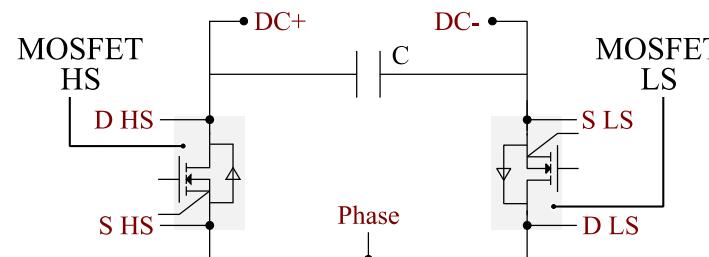


PROPOSITION TECHNOLOGIQUE

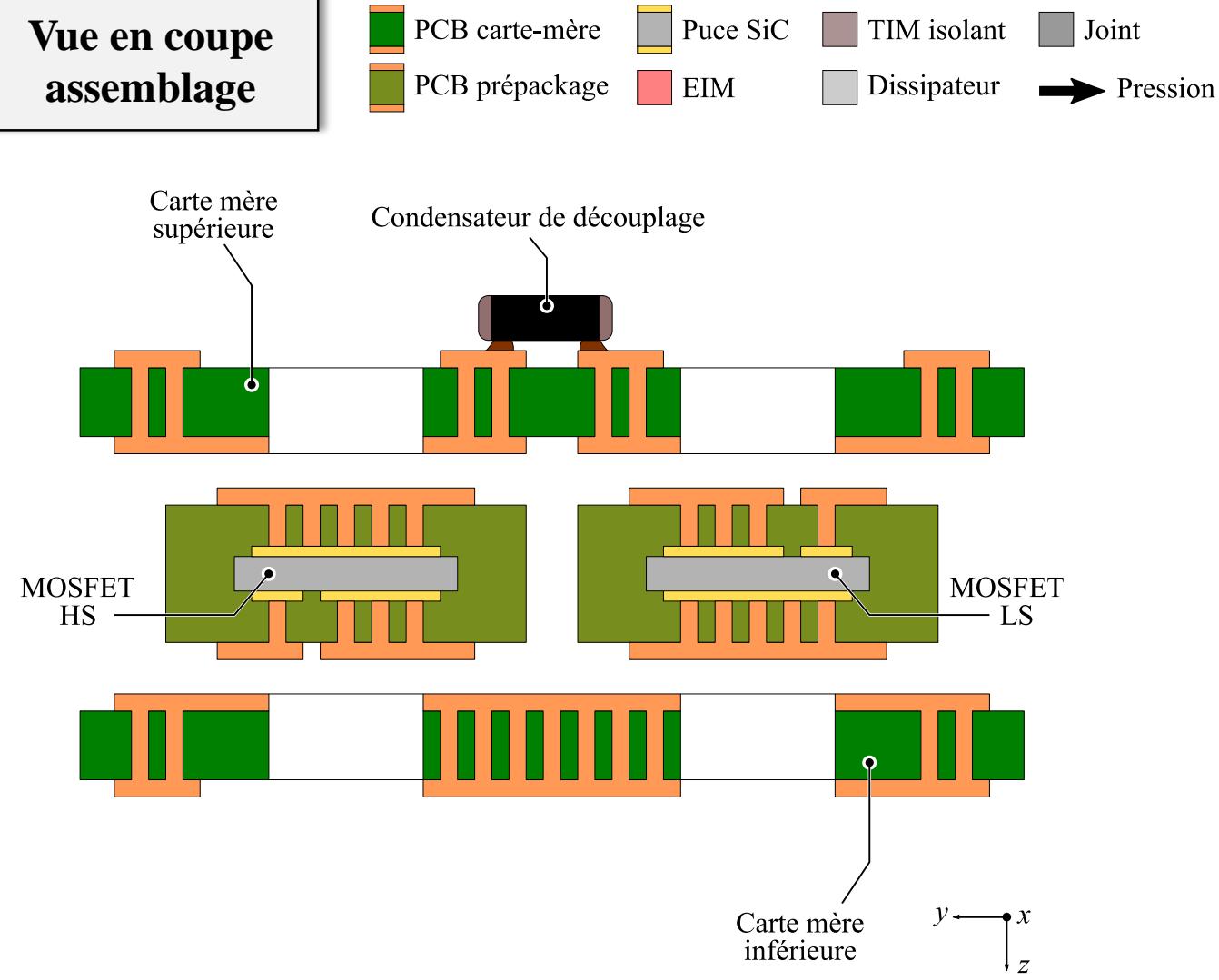
CELLULE DE COMMUTATION PERFORMANTE ET DÉMONTABLE

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 coupé assemblage

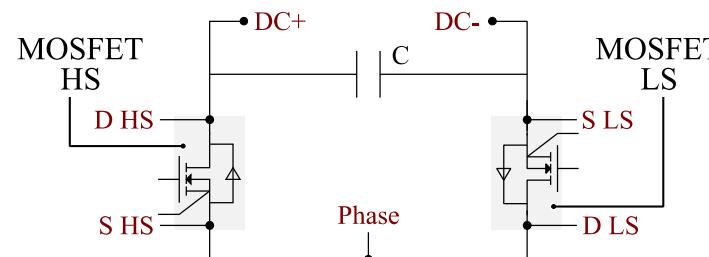


PROPOSITION TECHNOLOGIQUE

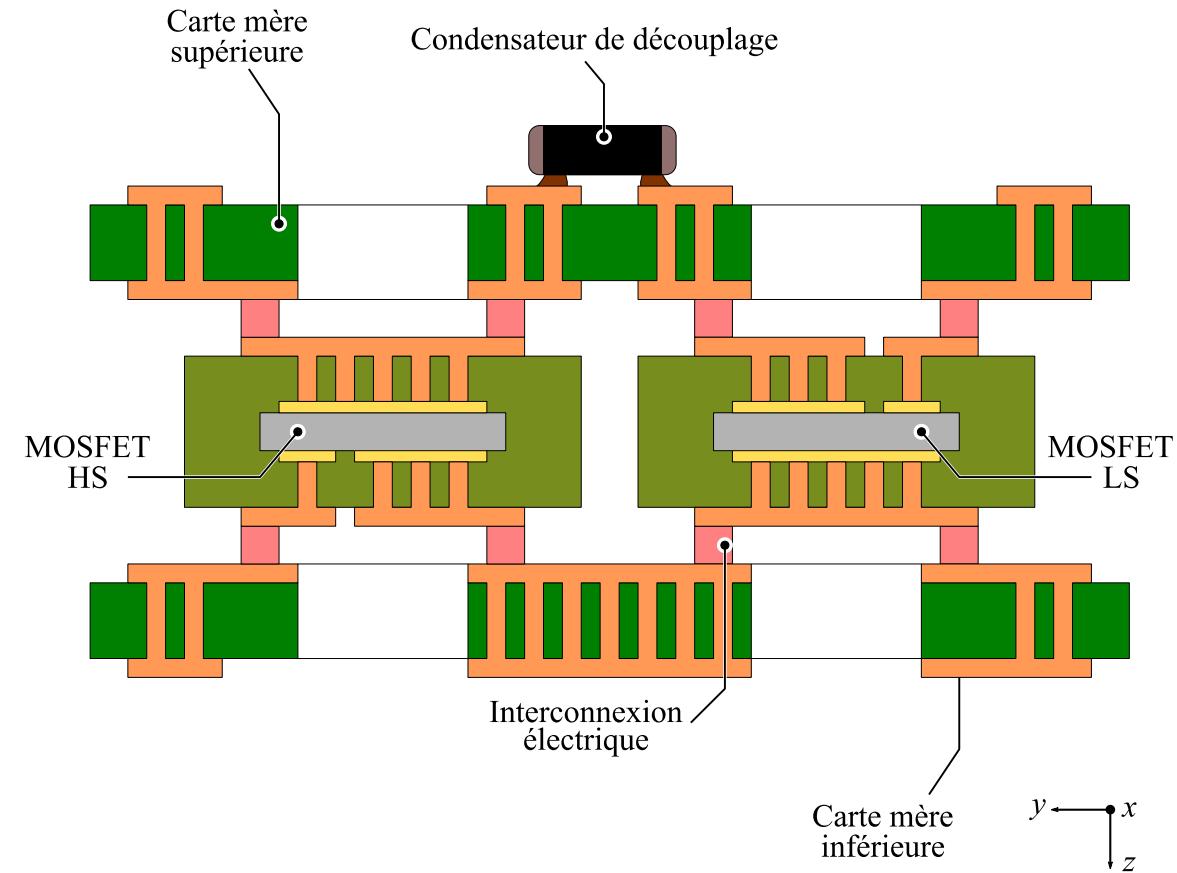
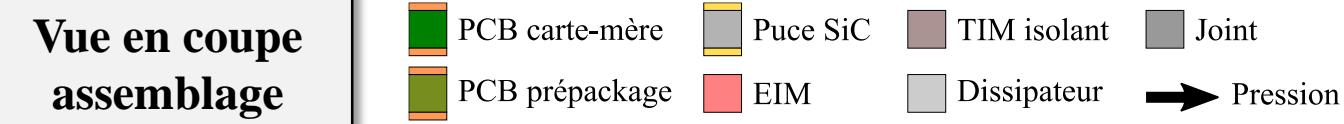
CELLULE DE COMMUTATION PERFORMANTE ET DÉMONTABLE

Cellule de commutation performante et démontable

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



Vue en coup assemblage

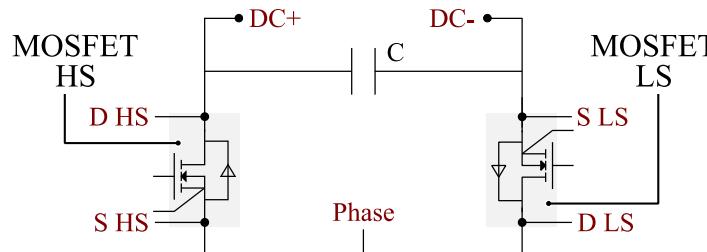


PROPOSITION TECHNOLOGIQUE

CELLULE DE COMMUTATION PERFORMANTE ET DÉMONTABLE

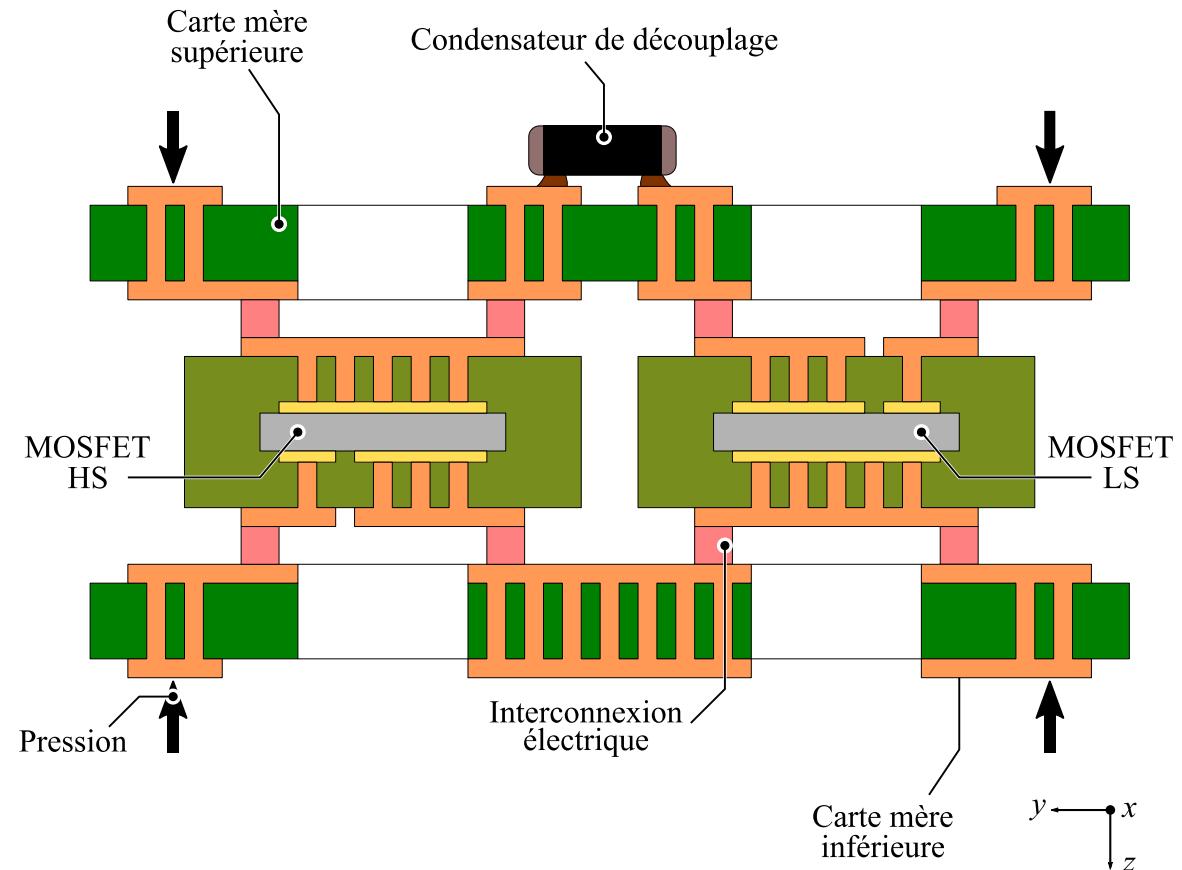
Cellule de commutation performante et démontable

- 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

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

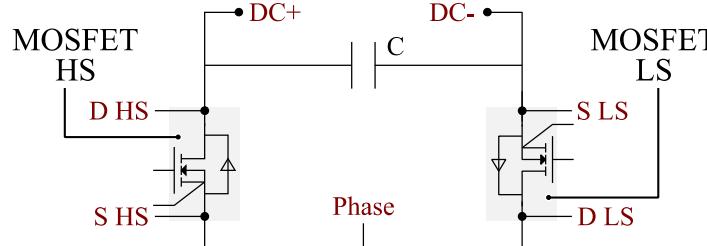


PROPOSITION TECHNOLOGIQUE

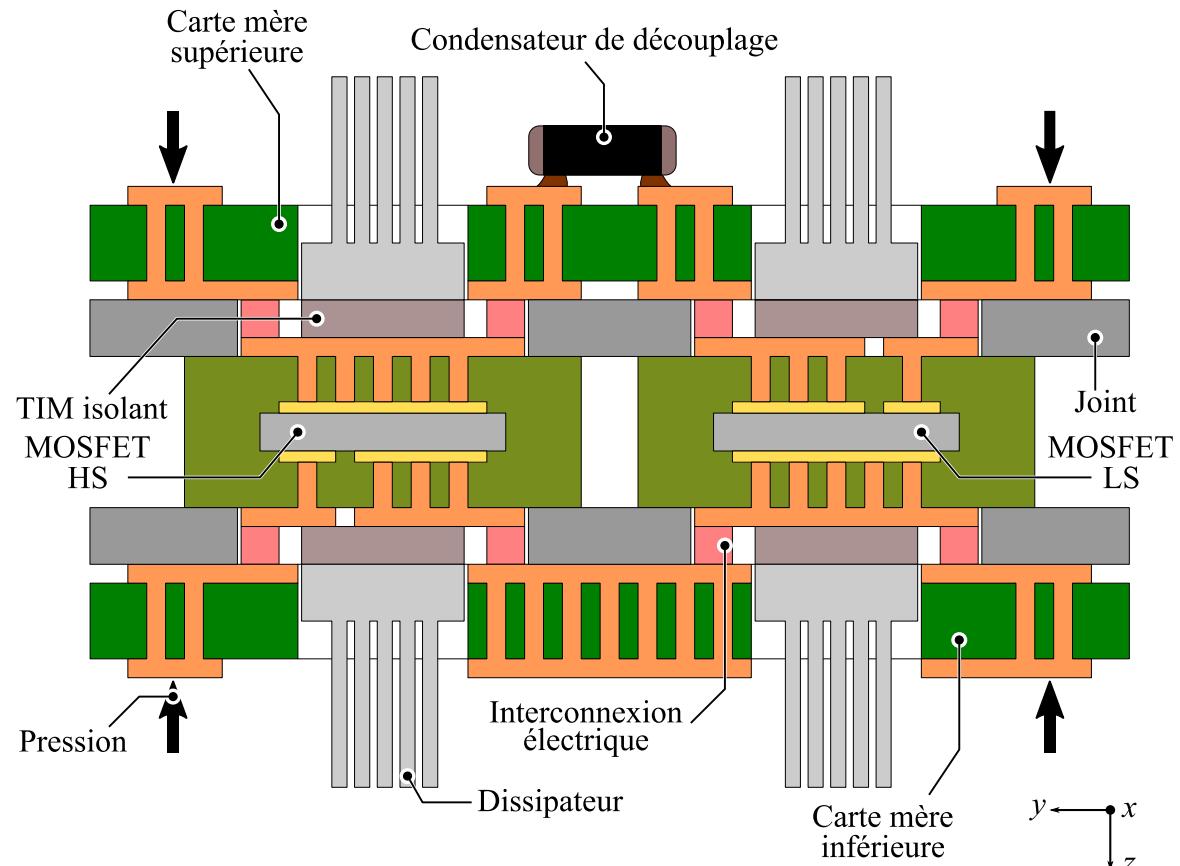
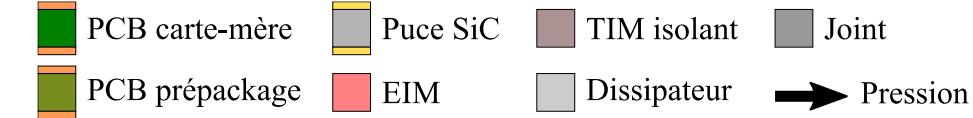
CELLULE DE COMMUTATION PERFORMANTE ET DÉMONTABLE

Cellule de commutation performante et démontable

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



Vue en coupe assemblage



Performances bénéfiques aux composants SiC

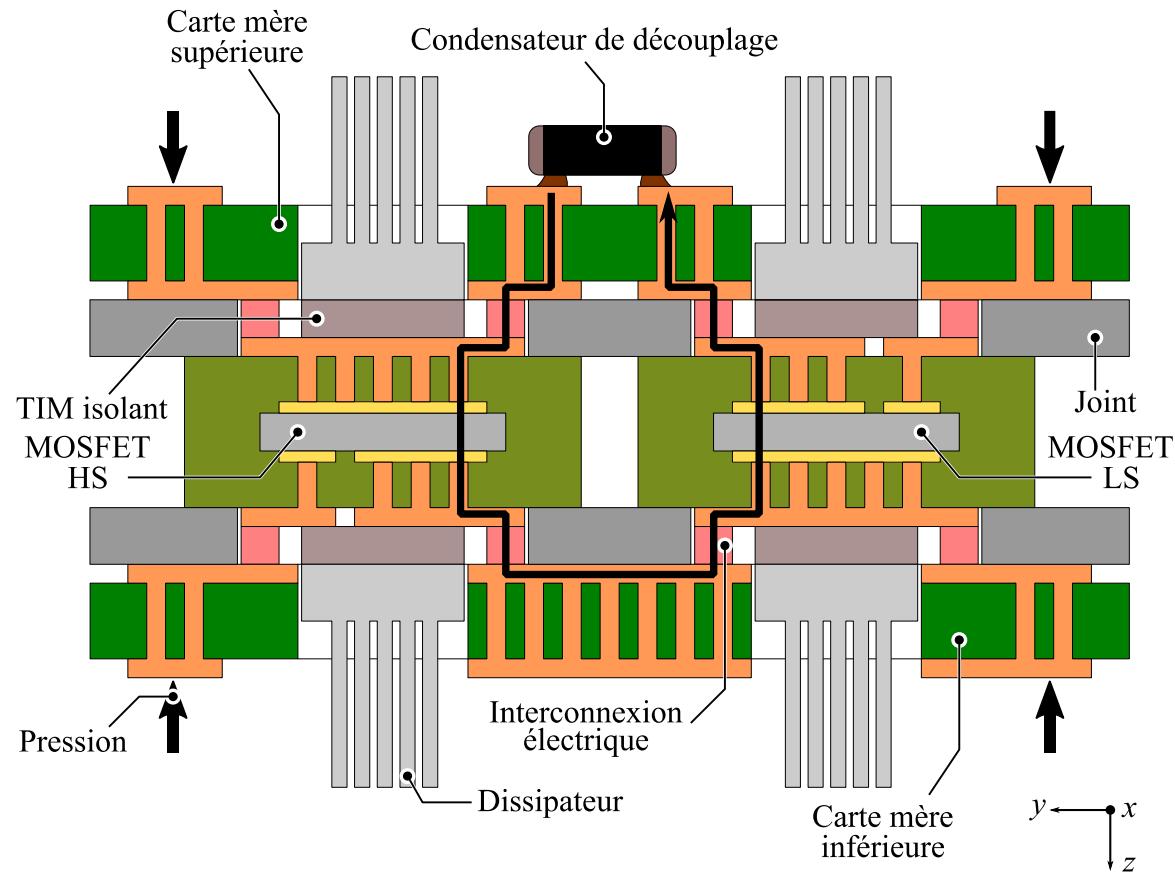
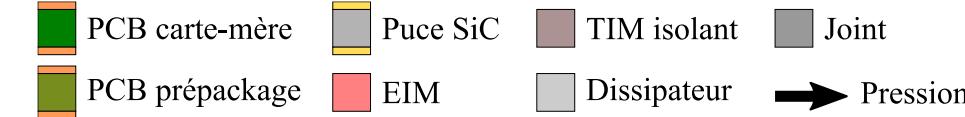


Performances électriques :

- 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

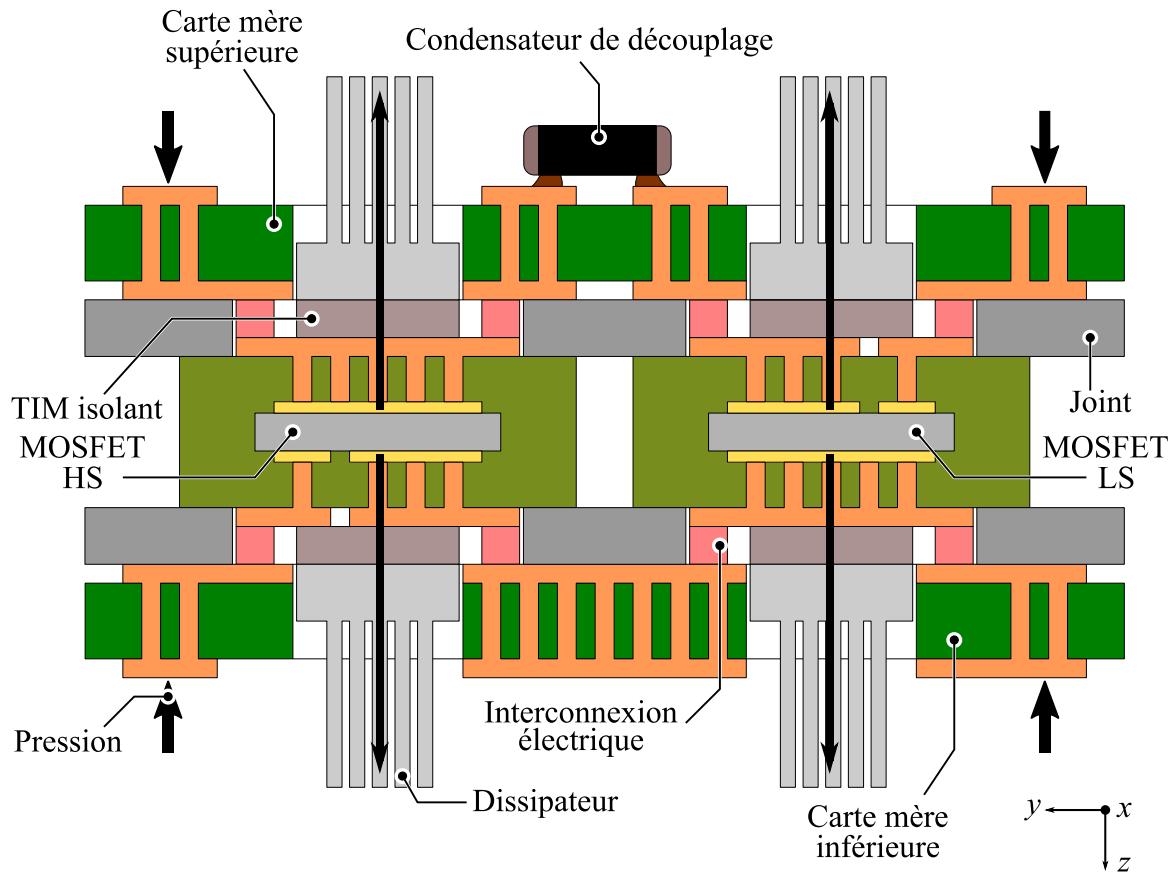
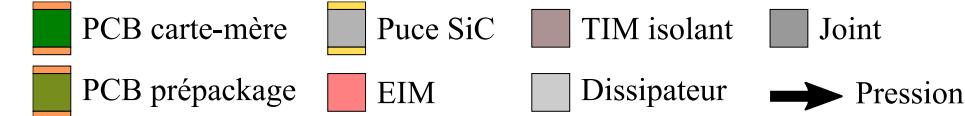
→ Inductance parasite $L_S \approx 1 \text{ nH}$ [1]

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



PROPOSITION TECHNOLOGIQUE

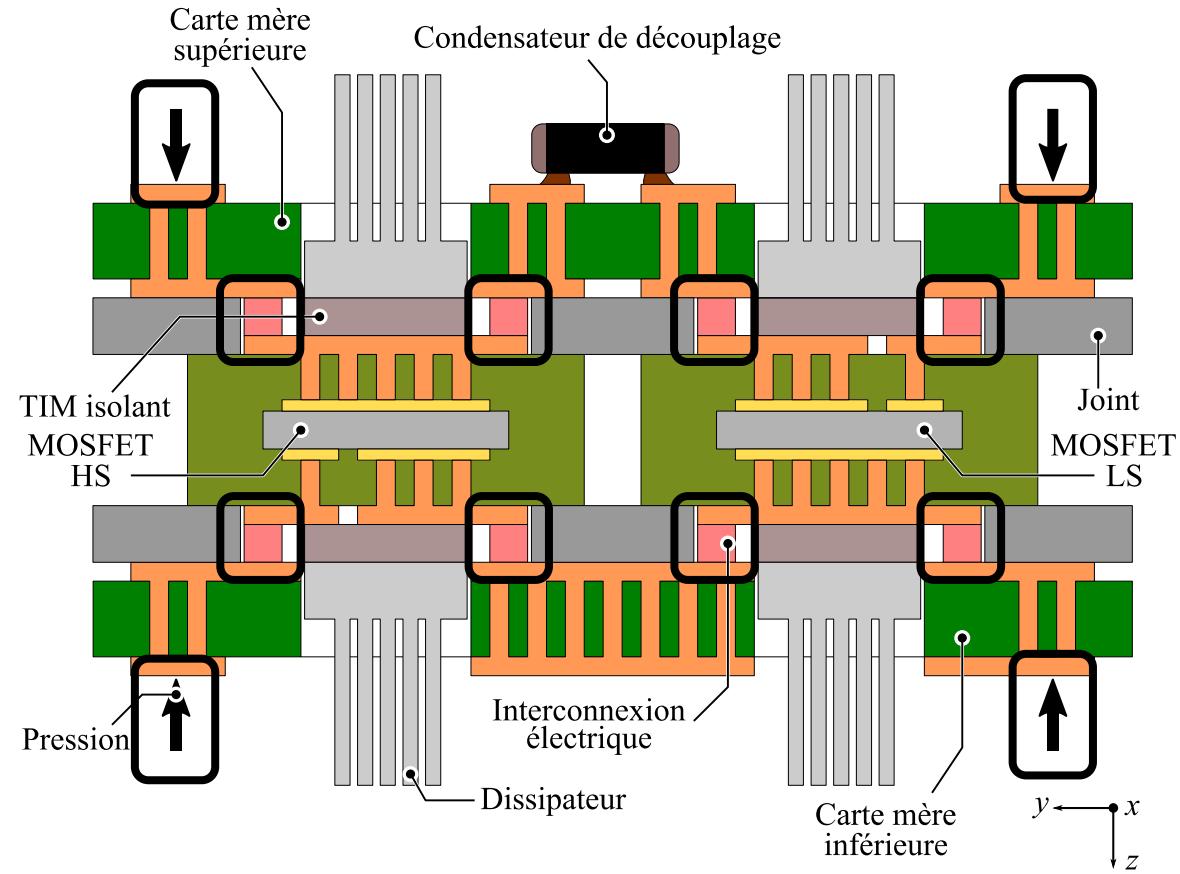
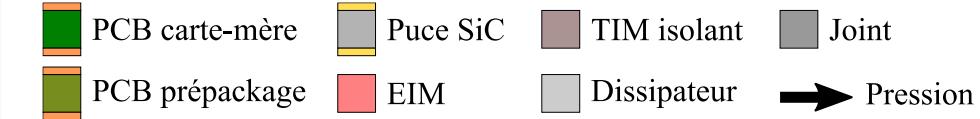
OPPORTUNITÉS POUR LE PACKAGING DES COMPOSANTS SiC

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



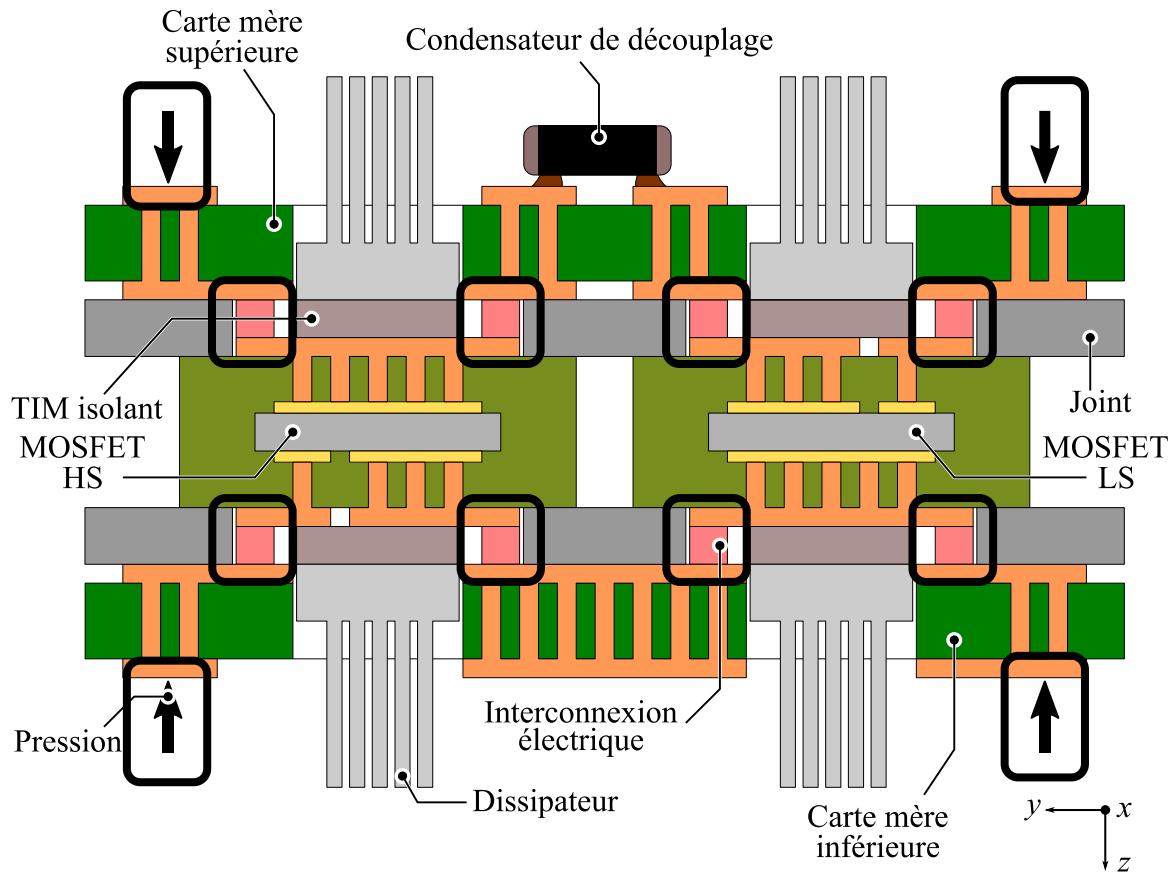
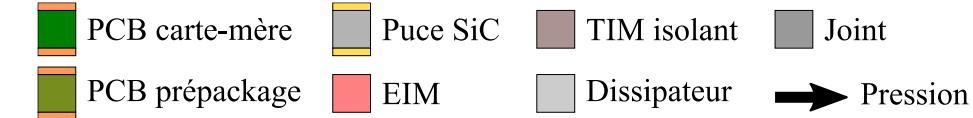
- Assemblage mécanique par pression
- Utilisation d'interconnexions électriques sans liaison mécanique permanente

Modularité



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

Vue en coupe assemblage



PROPOSITION TECHNOLOGIQUE

VERROUS TECHNOLOGIQUES



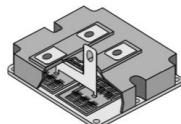
Isolation électrique

Vue en coupe assemblage

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

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

- Entre les prépackages
- Sur la bordure des prépackages

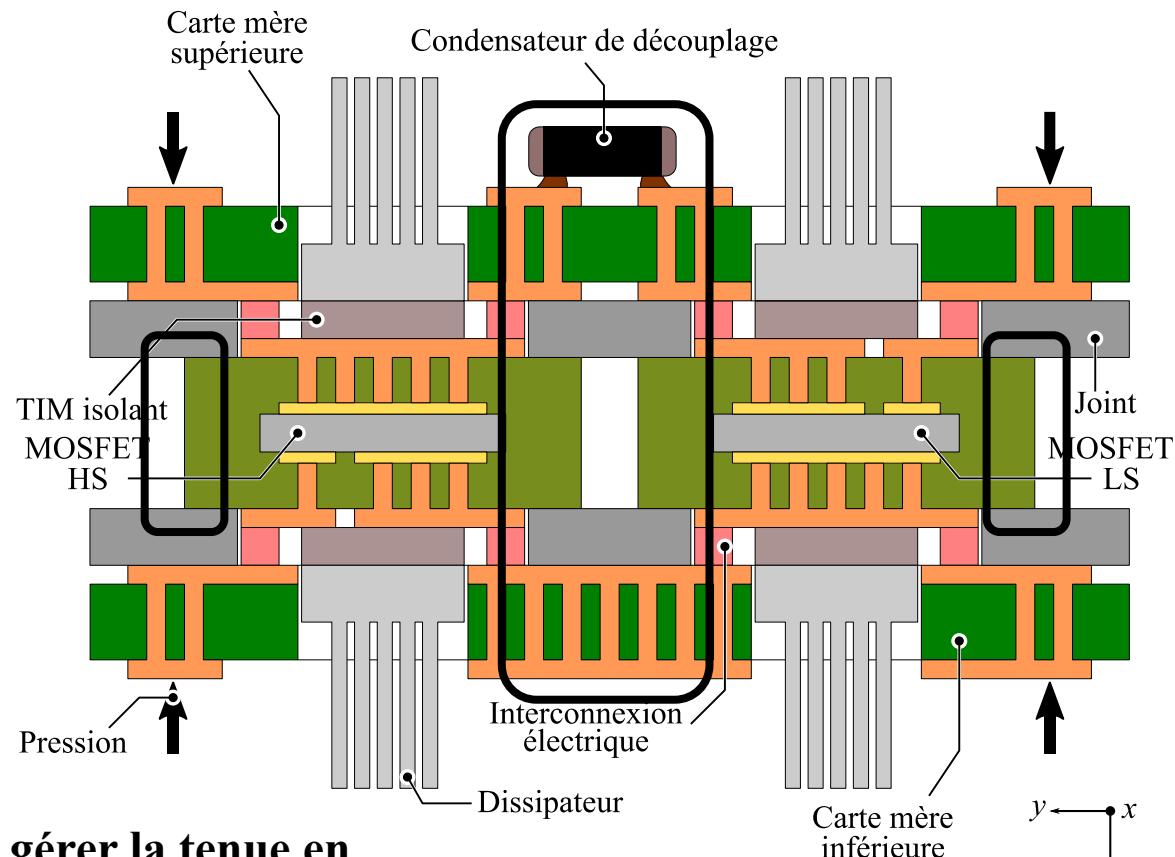


→ Utilisation d'un gel diélectrique pour l'isolation
✓ Propriétés isolantes



→ 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



PROPOSITION TECHNOLOGIQUE

VERROUS TECHNOLOGIQUES

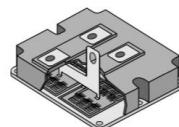


Interconnexions électriques

Vue en coupé assemblage



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



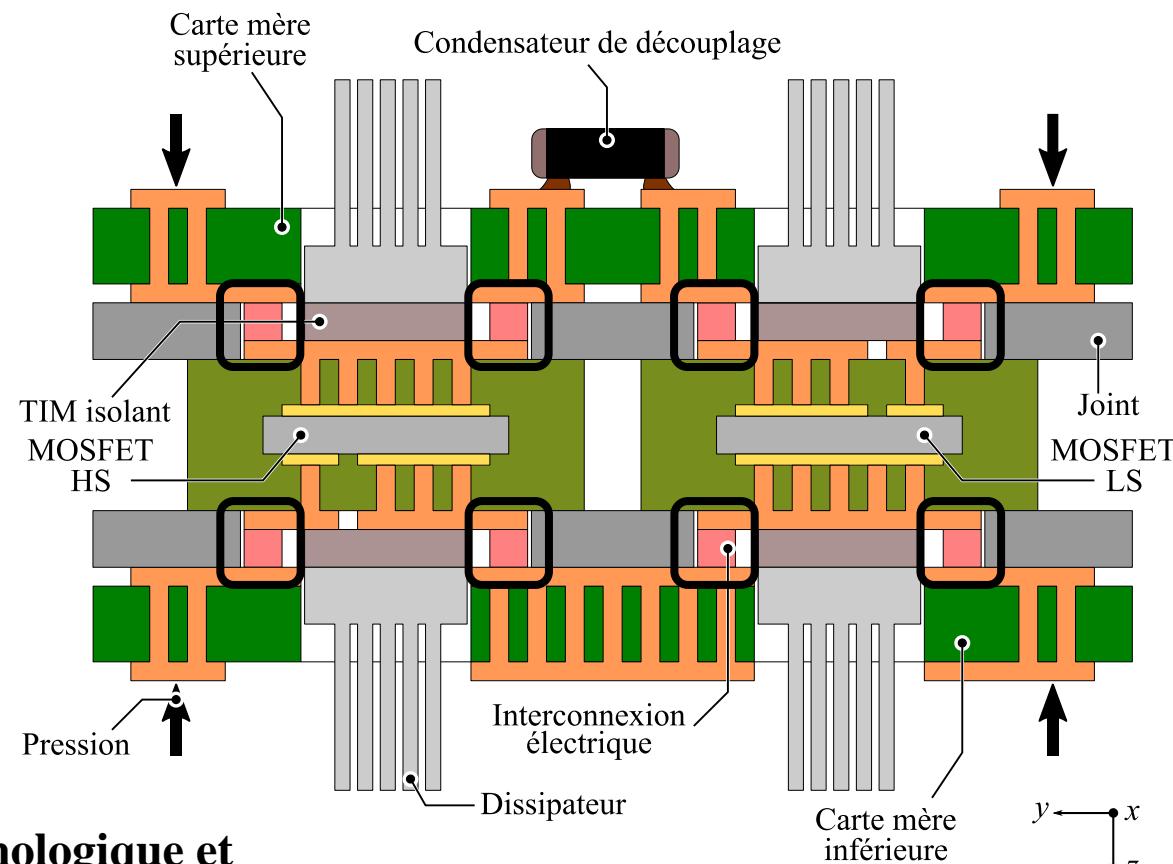
Utilisation de brasures

- Propriétés électriques
 - Démontabilité complexe



Utilisation de blocs en cuivre massif

→ Interconnexion électrique → choix technologique et évaluation expérimentale des performances



DÉMONSTRATION DE LA SOLUTION DE PACKAGING

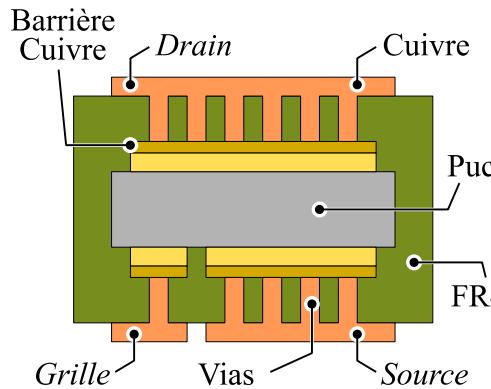
ÉVALUATION DES PERFORMANCES ÉLECTRIQUES – PREUVE DE CONCEPT



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 »

DÉMONSTRATION DE LA SOLUTION DE PACKAGING

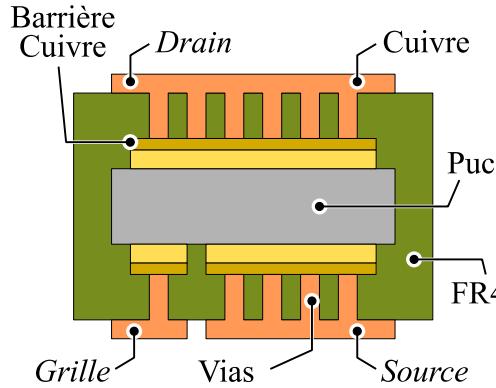
ÉVALUATION DES PERFORMANCES ÉLECTRIQUES – PREUVE DE CONCEPT



Performances électriques intéressantes pour les composants SiC ?

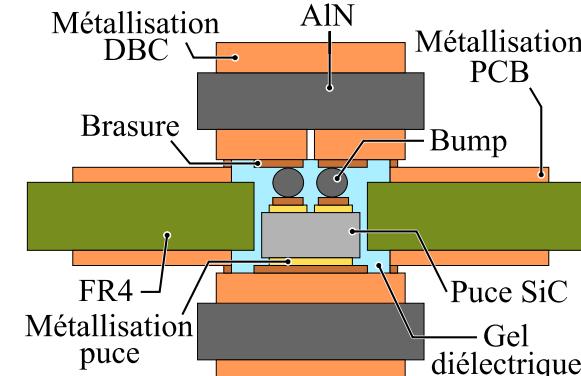


Développement d'une preuve de concept :

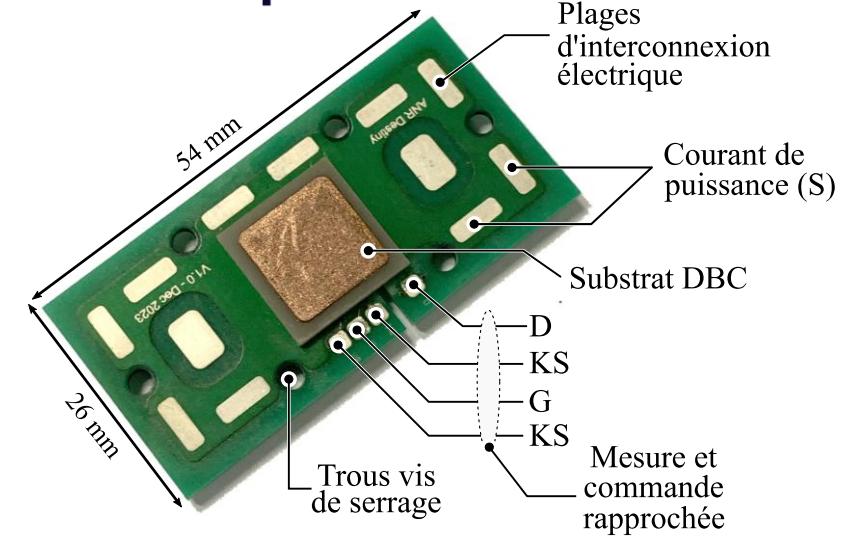


- Inductance parasite $L_S \approx 1 \text{ nH}$ estimée en simulation [1]
- Process technologique complexe

Solution alternative pour le prépackaging



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

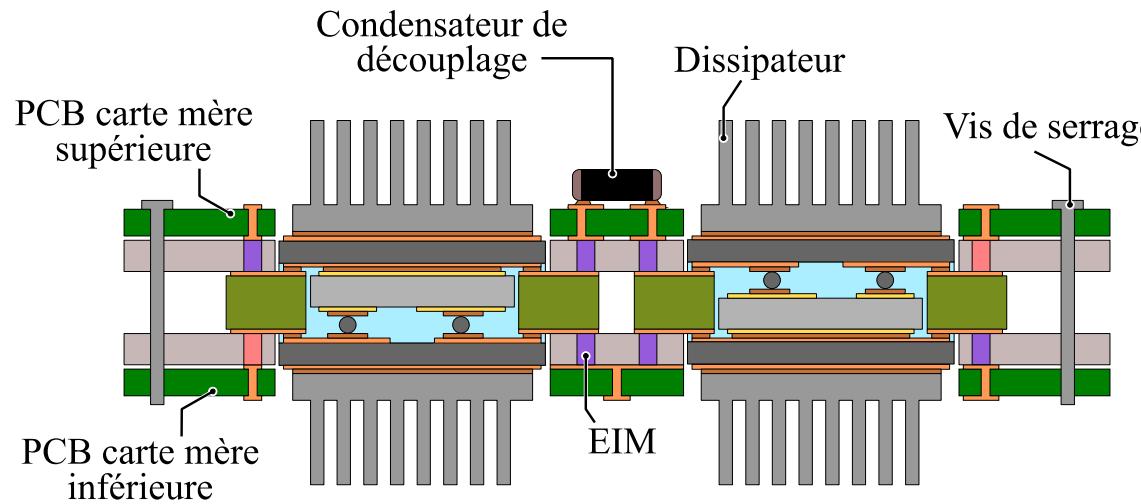
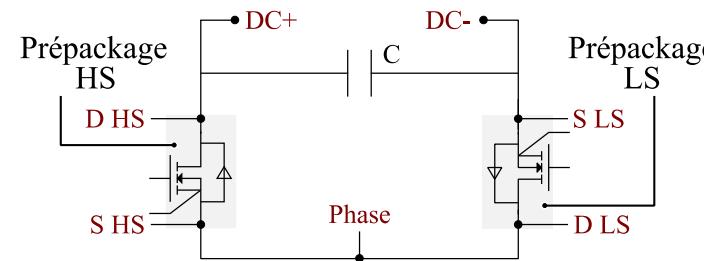


Assemblage de prépackages pour obtenir une cellule de commutation

DÉMONSTRATION DE LA SOLUTION DE PACKAGING

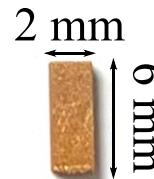
ÉVALUATION DES PERFORMANCES ÉLECTRIQUES – PREUVE DE CONCEPT

Assemblage des prépackages



Assemblage constitué de :

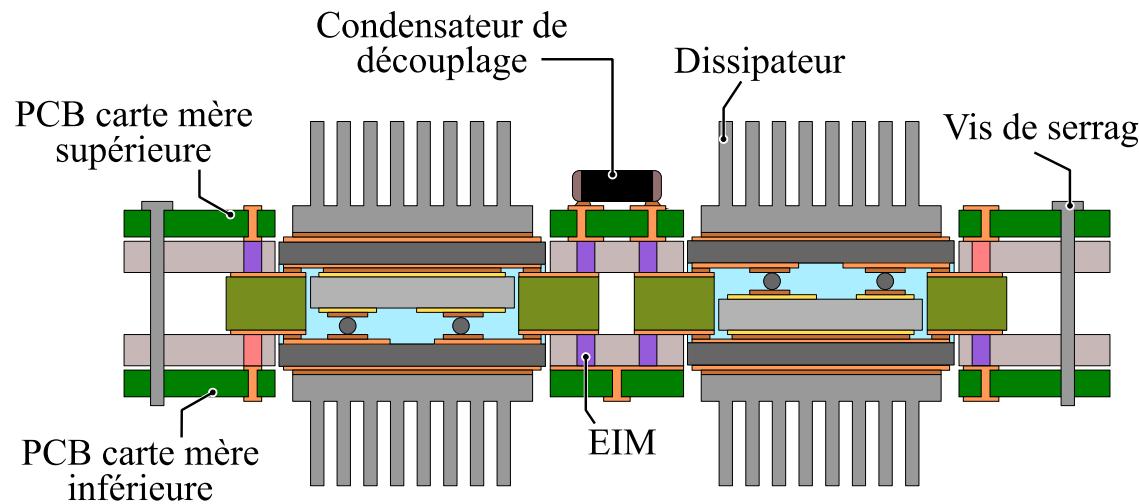
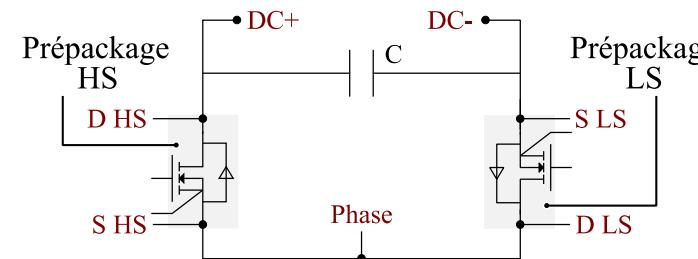
- Prépackages
- PCBs carte-mère
- Interconnexions électriques → Blocs de cuivre massif
- Système de mise en pression → Vis
- Dissipateurs



DÉMONSTRATION DE LA SOLUTION DE PACKAGING

ÉVALUATION DES PERFORMANCES ÉLECTRIQUES – PREUVE DE CONCEPT

Assemblage des prépackages

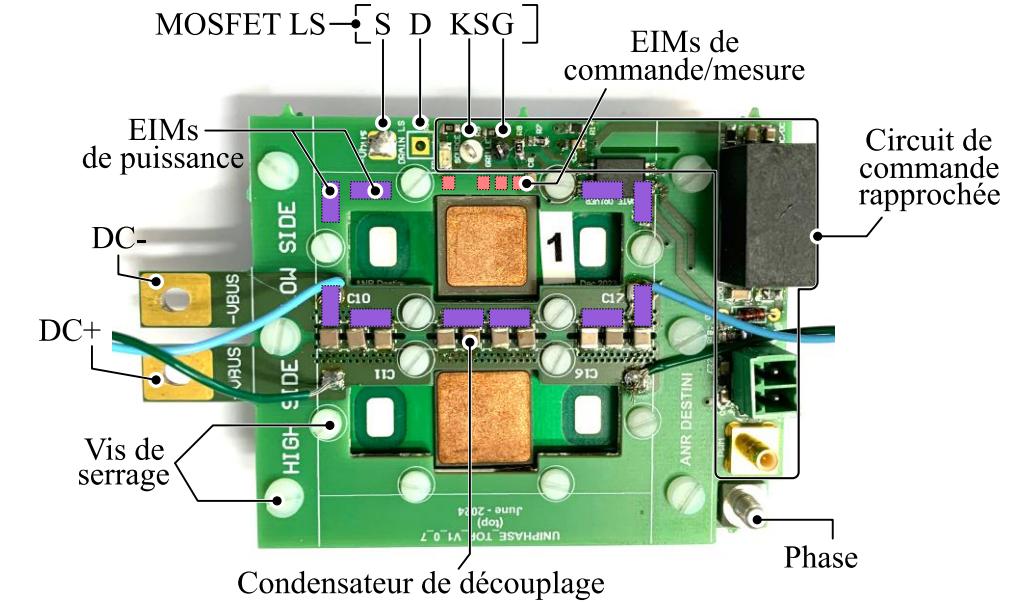


Assemblage constitué de :

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

2 mm
9 mm

Réalisation finale



Cellule de commutation :

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

DÉMONSTRATION DE LA SOLUTION DE PACKAGING

ÉVALUATION DES PERFORMANCES ÉLECTRIQUES – RÉSULTATS



Résultats expérimentaux

	L_S (nH)
Thèse	3
Module de puissance commercial	17,4 [1]
Boitier TO-247	35,7 [2]
Module <i>amélioré</i>	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 »

DÉMONSTRATION DE LA SOLUTION DE PACKAGING

ÉVALUATION DES PERFORMANCES ÉLECTRIQUES – RÉSULTATS

Résultats expérimentaux

	L_S (nH)
Thèse	3
Module de puissance commercial	17,4 [1]
Boîtier 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



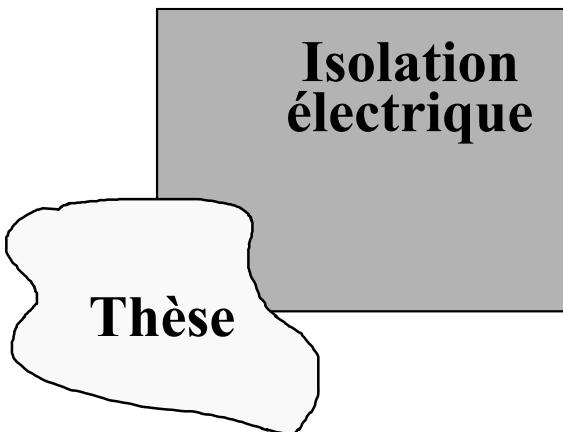
Interconnexions électriques



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 »



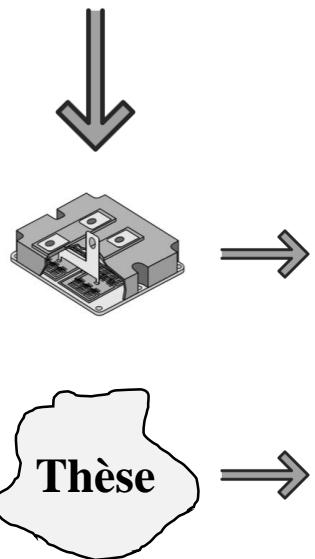
- 1** Solution de packaging modulaire, démontable et performante
- 2** Isolation électrique de la solution de packaging
- 3** Interconnexions électriques modulaires et démontables
- 4** Conclusion et Perspectives

ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

INTRODUCTION & PRINCIPALES PROBLÉMATIQUES

- 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

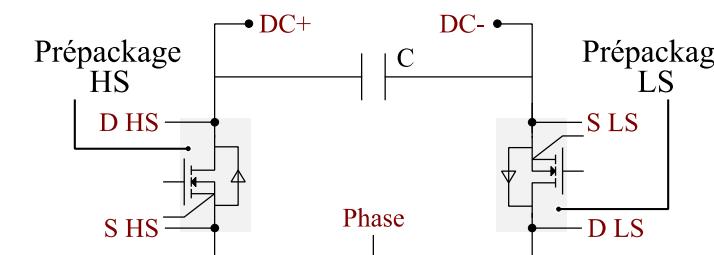
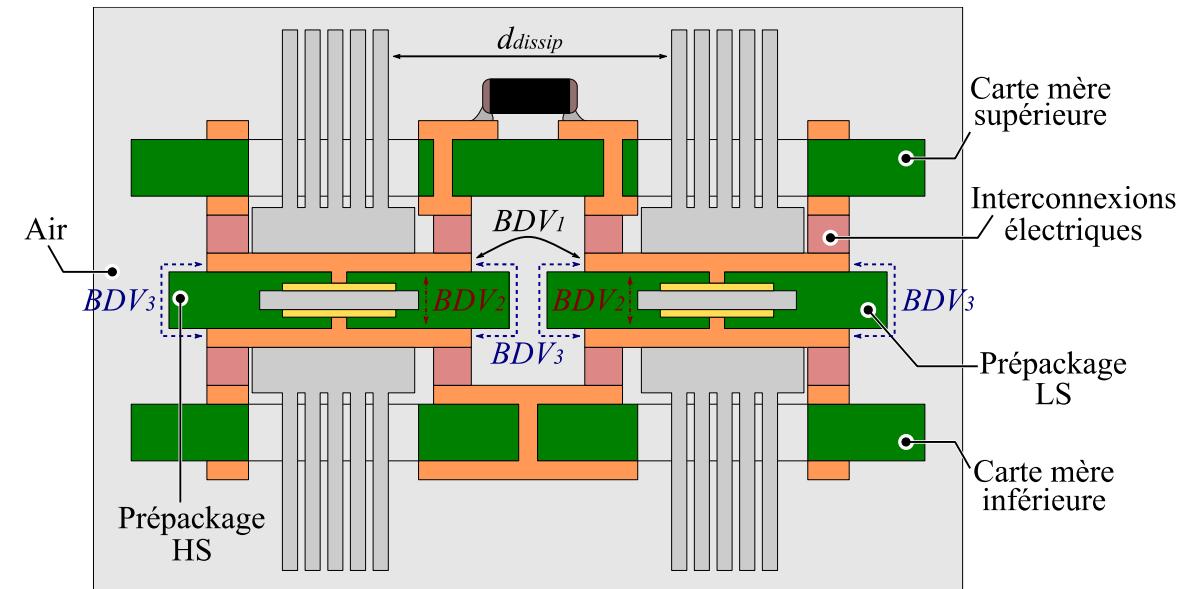
- Propriétés isolantes

Étude complexe :

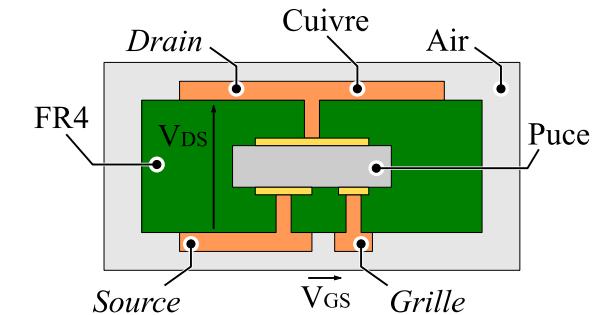
- Géométrie non fixée
- Multiples paramètres

Réduction de la zone d'étude aux prépackages

Zones de contrainte



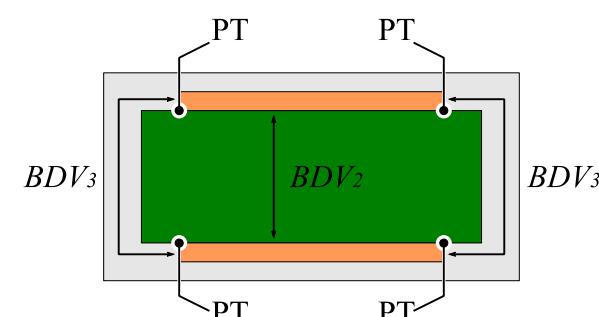
Identification des zones de contrainte



- **Puce intégrée au sein d'un PCB**

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

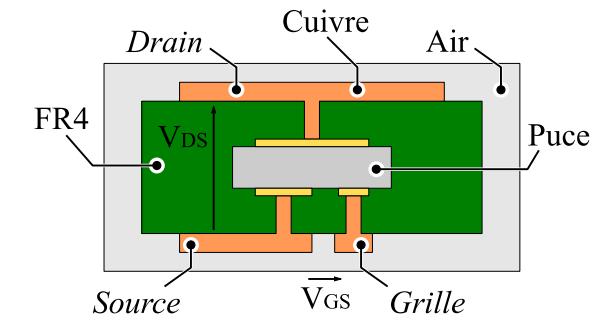
↓ *Simplification de la géométrie*



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

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

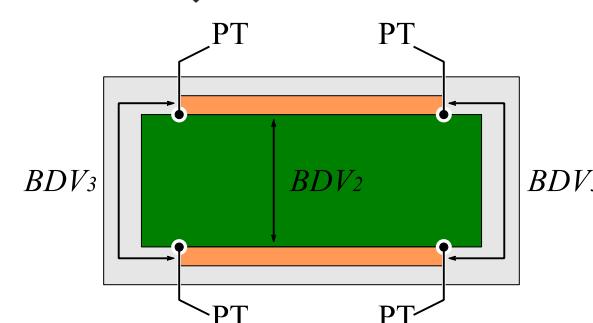
Identification des zones de contrainte



- **Puce intégrée au sein d'un PCB**

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

↓ Simplification de la géométrie

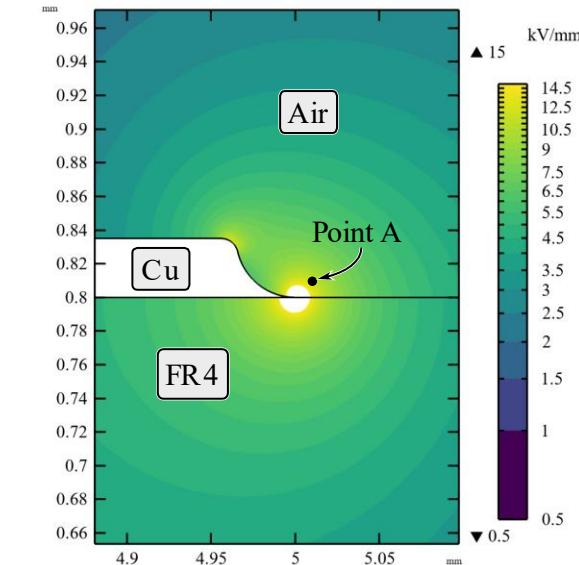


- **PCB avec contrainte en tension au travers du substrat**

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

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

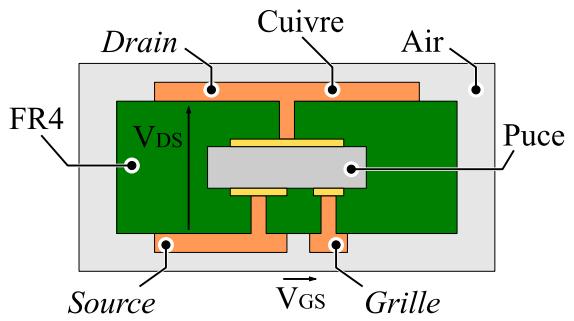
- **Décharge Partielle (DP)**

- PDIV → tension d'apparition des DPs

- **Claquage diélectrique**

- BDV → tension de claquage

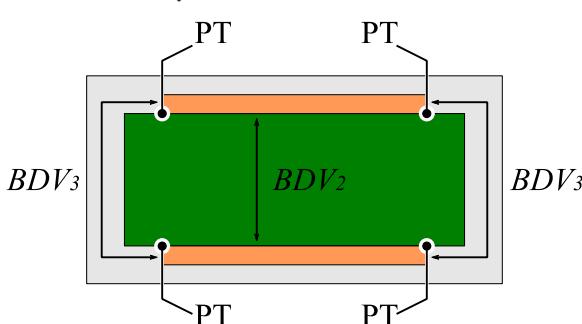
Identification des zones de contrainte



- **Puce intégrée au sein d'un PCB**

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

↓ Simplification de la géométrie

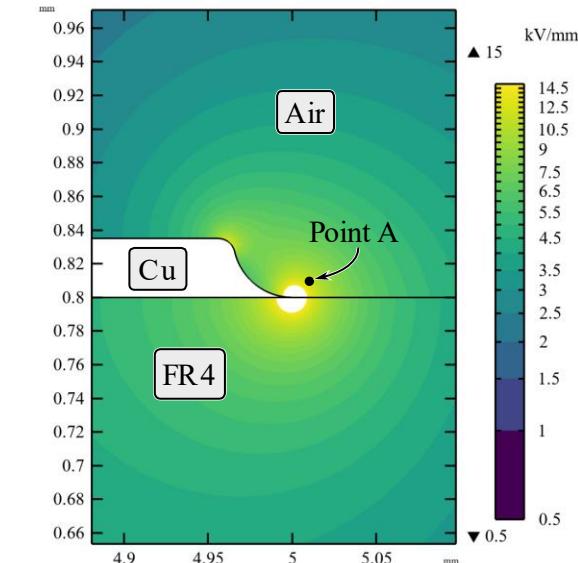


- **PCB avec contrainte en tension au travers du substrat**

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

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 DPs
- **Claquage diélectrique**
 - BDV → tension de claquage

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

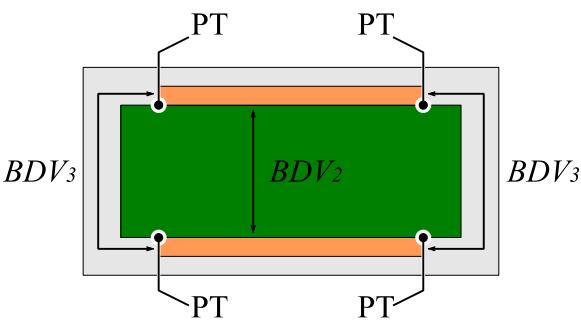
[1] L. Böttcher *et al.*, « Concepts for realizing High-Voltage Power Modules by Embedding of SiC Semiconductors »

ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

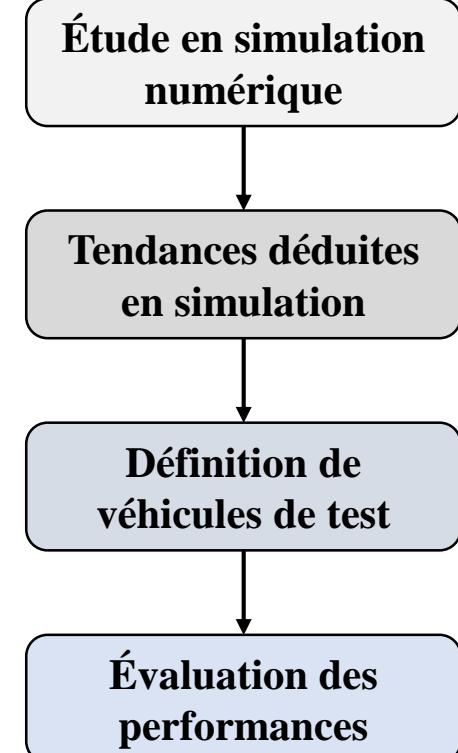
DÉMARCHE D'ÉTUDE DES STRATÉGIES D'ISOLATION

Démarche pour l'étude des stratégies d'isolation

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



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



- Critère du champ électrique au PT
→ physique électrostatique
- Vérification de la dépendance du champ électrique aux paramètres des stratégies
- Designs de PCB permettant d'évaluer les tendances déduites en simulation numérique
- Caractérisation de l'activité de DP → PDIV
- Caractérisation du claquage → BDV



Étapes présentées pour la soutenance

ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

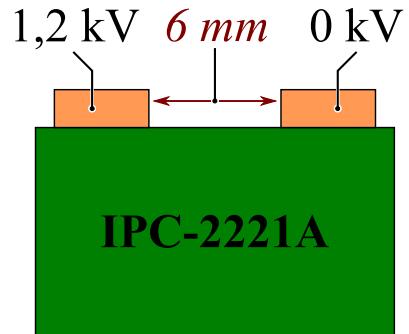
POSSIBLE STRATÉGIE D'ISOLATION – MODIFICATION GÉOMÉTRIQUE DU PCB



Norme IPC-2221A



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

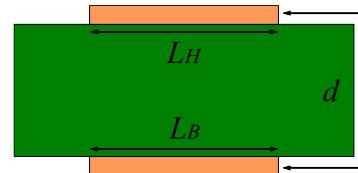
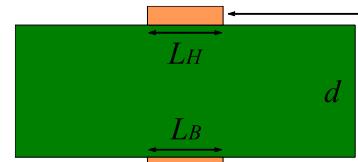


Norme IPC-2221A

PCB



Tension au travers du PCB



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

ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

POSSIBLE STRATÉGIE D'ISOLATION – MODIFICATION GÉOMÉTRIQUE DU PCB



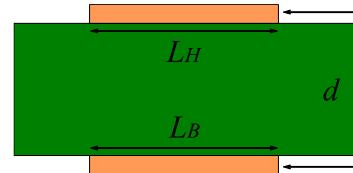
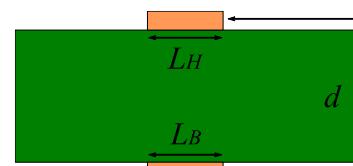
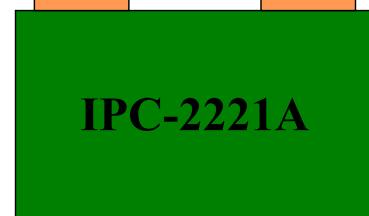
Norme IPC-2221A



« Si la tension $\uparrow \rightarrow$ la
distance d'isolation \uparrow »



1,2 kV *6 mm* 0 kV



Norme IPC-2221A

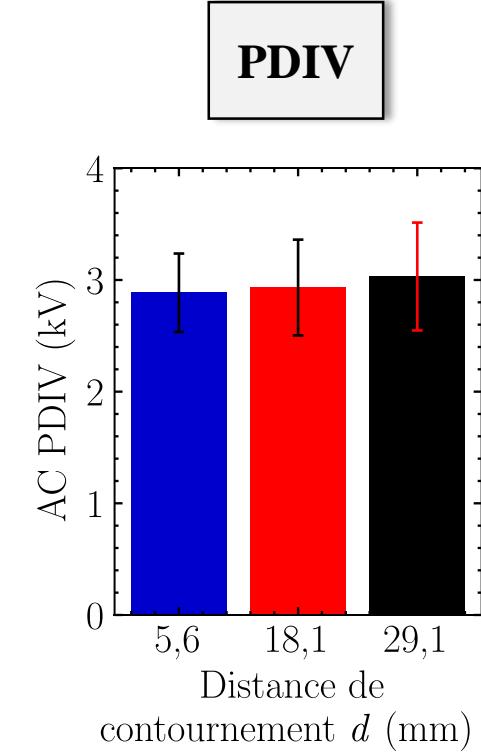
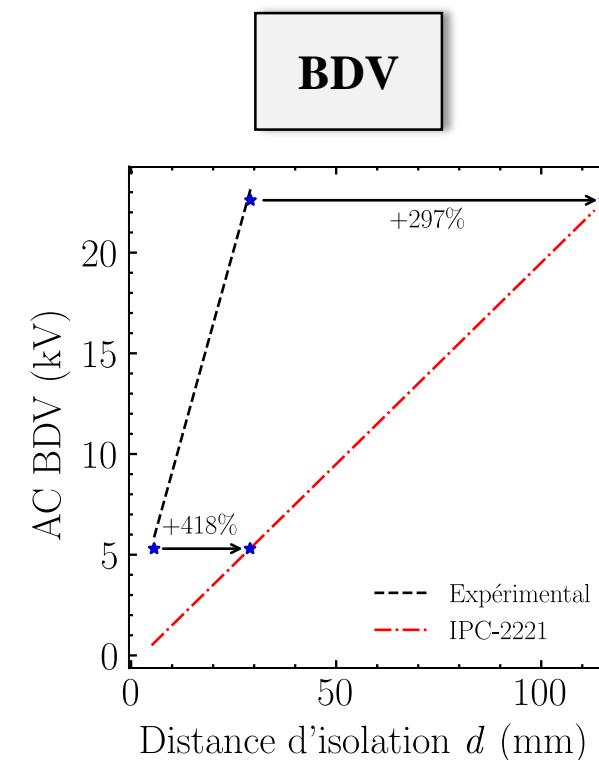


PCB ✓

Tension au travers du PCB ✗



▪ Évaluation de la distance de contournement d
sur **BDV** et **PDIV**



- Lorsque la distance de contournement \uparrow :
 - BDV \uparrow
 - PDIV évolue peu
- Norme IPC-2221A \rightarrow nette marge de sécurité sur BDV

ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

POSSIBLE STRATÉGIE D'ISOLATION – MODIFICATION GÉOMÉTRIQUE DU PCB



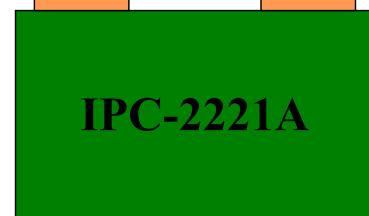
Norme IPC-2221A



« Si la tension $\uparrow \rightarrow$ la
distance d'isolation \uparrow »



1,2 kV *6 mm* 0 kV

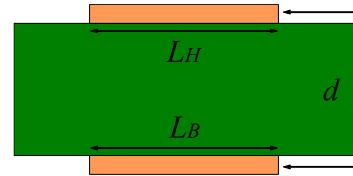
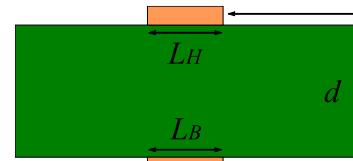


Norme IPC-2221A

PCB



Tension au travers du PCB

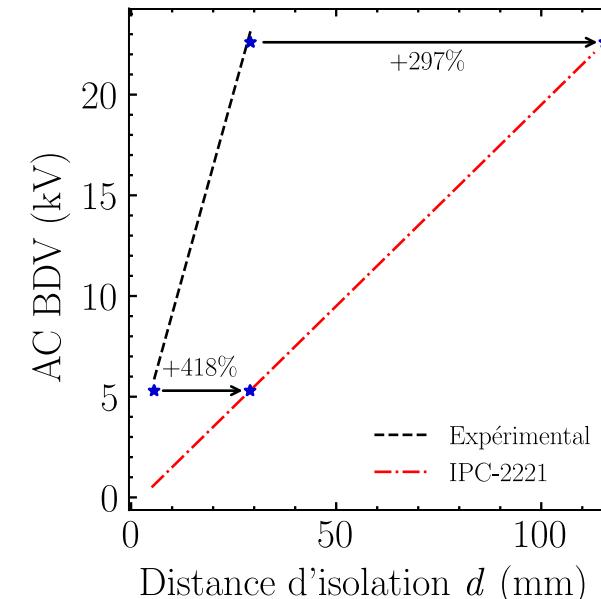


- Évaluation de la distance de contournement d sur BDV et PDIV

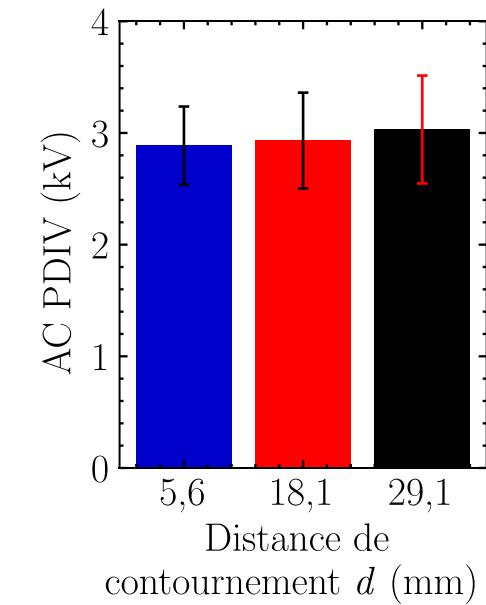


Une modification géométrique du PCB influence le claquage MAIS pas les DPs (PDIV)

BDV



PDIV



- Lorsque la distance de contournement \uparrow :
 - BDV \uparrow
 - PDIV évolue peu
- Norme IPC-2221A \rightarrow nette marge de sécurité sur BDV

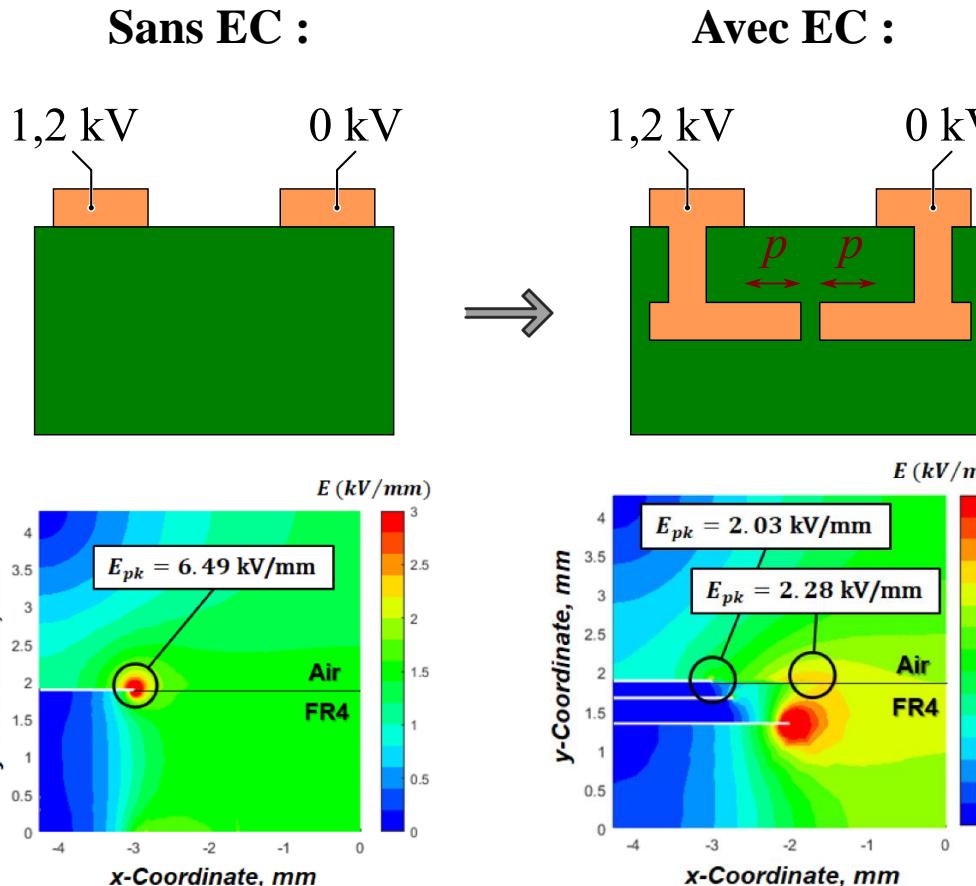
ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

POSSIBLE STRATÉGIE D'ISOLATION – CONCEPT D'EC



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

ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

POSSIBLE STRATÉGIE D'ISOLATION – CONCEPT D'EC



Concept d'électrode de champ (EC) [1]

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



Concept d'EC

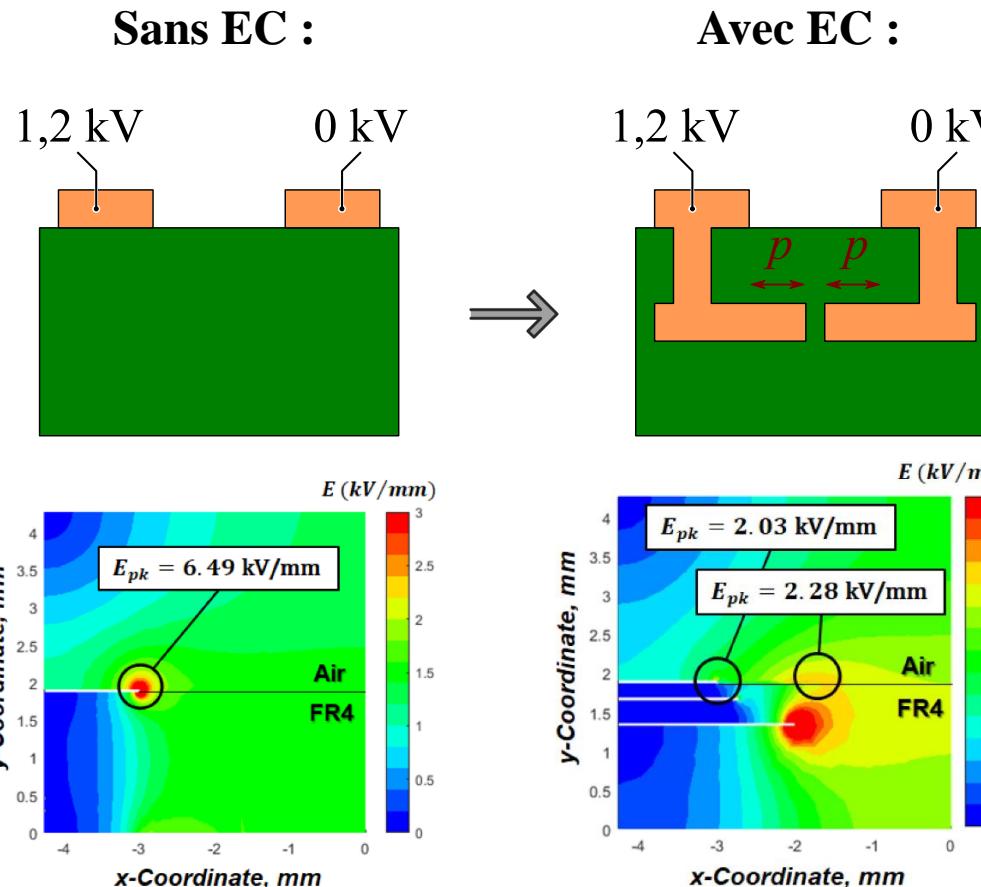
PCB



Tension au travers du PCB



■ Évaluation de la prolongation d'équipotentielle p sur PDIV



- Champ électrique maximum au PT

- Atténuation du champ électrique au PT

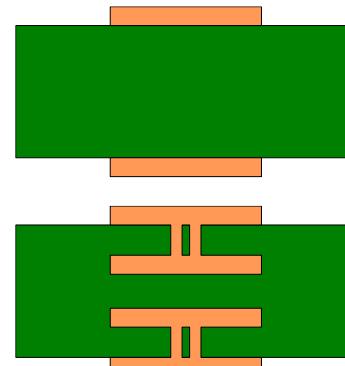
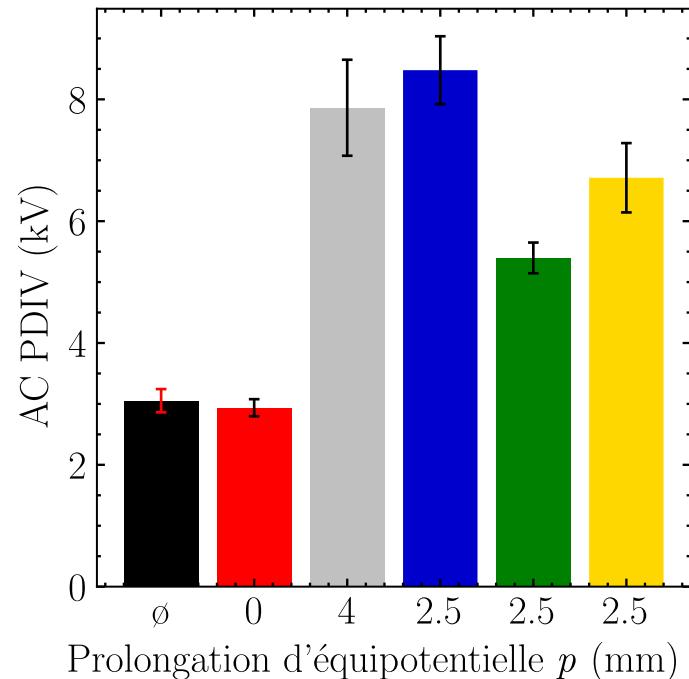
✓ Effet des ECs sur le champ électrique au PT

ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

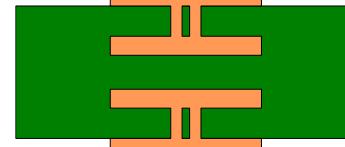
CONCEPT D'EC – RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DP



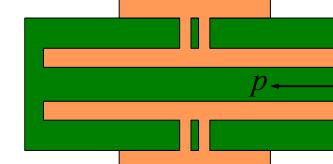
Évaluation de la prolongation d'équipotentielle p sur PDIV



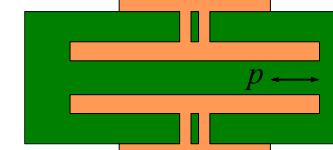
Sans EC



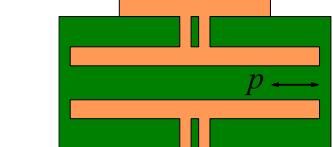
$p = 0 \text{ mm}$



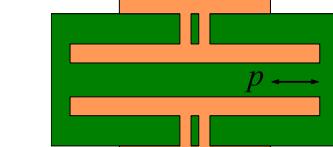
$p = 4 \text{ mm}$



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



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



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

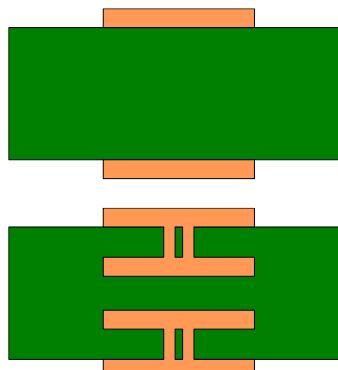
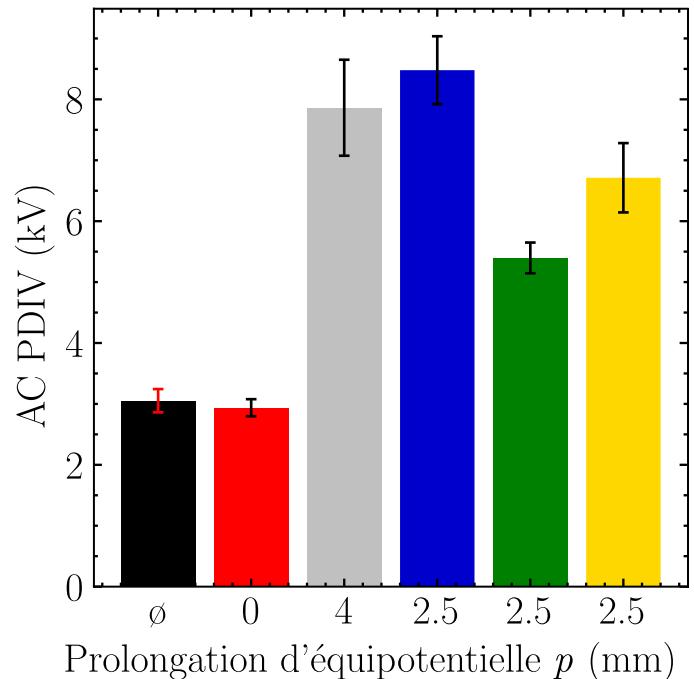
- Si $p = 0 \text{ mm} \rightarrow \text{PDIV varie très peu}$
- Si $p > 0 \text{ mm} \rightarrow \text{PDIV} \nearrow$
- Si $p = \text{cst} \rightarrow \text{PDIV} \searrow$

ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

CONCEPT D'EC – RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DP

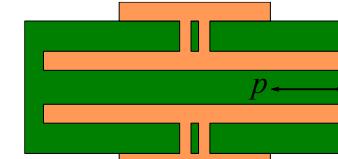


Évaluation de la prolongation d'équipotentielle p sur PDIV

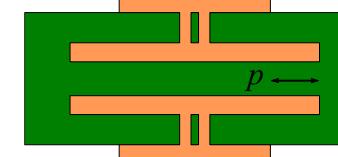


Sans EC

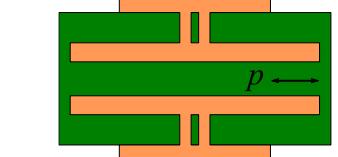
$p = 0 \text{ mm}$



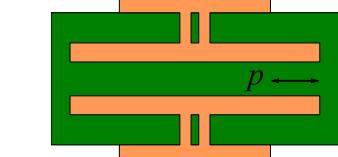
$p = 4 \text{ mm}$



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



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

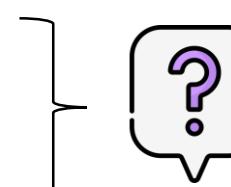


$p = 2,5 \text{ mm}$

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

Influence des ECs sur le PDIV

Diminution du PDIV pour un même design d'électrode



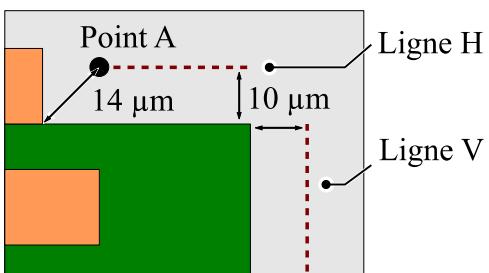
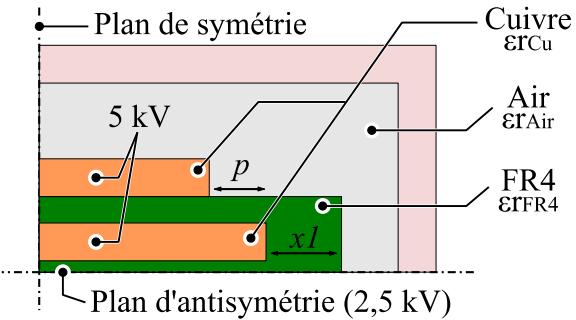
Comment se comporte le champ électrique ?

ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

CONCEPT D'EC – SIMULATION NUMÉRIQUE



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 :

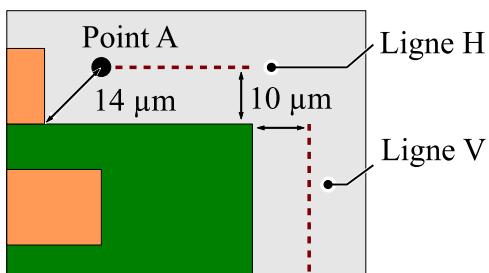
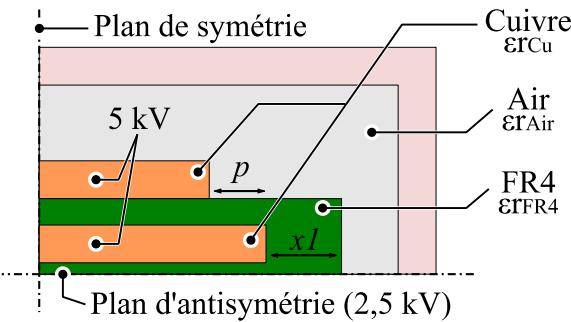
- PT du PCB (**Point A**)
- Surface horizontale du PCB (**Ligne H**)
- Surface verticale du PCB (**Ligne V**)

ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

CONCEPT D'EC – SIMULATION NUMÉRIQUE



Géométrie simulée



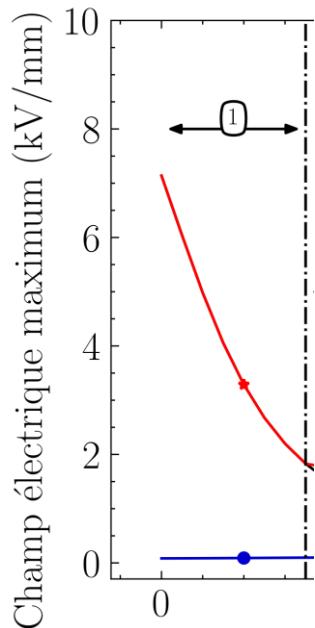
Zones d'observation du champ électrique :

- 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



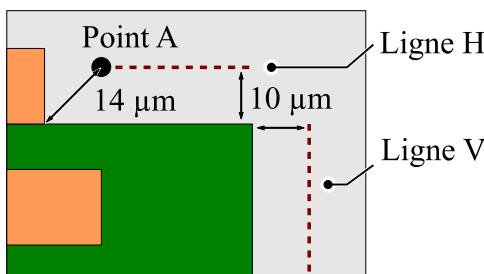
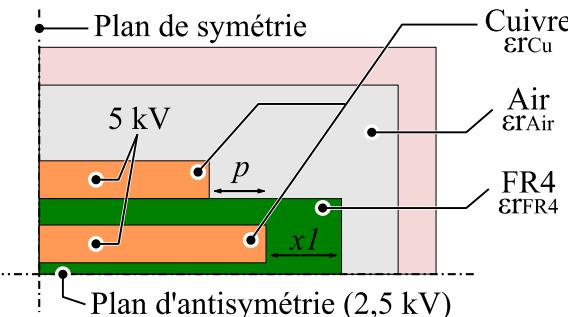
Zone d'évaluation

- Point A
- Ligne H
- Ligne V

ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

CONCEPT D'EC – SIMULATION NUMÉRIQUE

Géométrie simulée

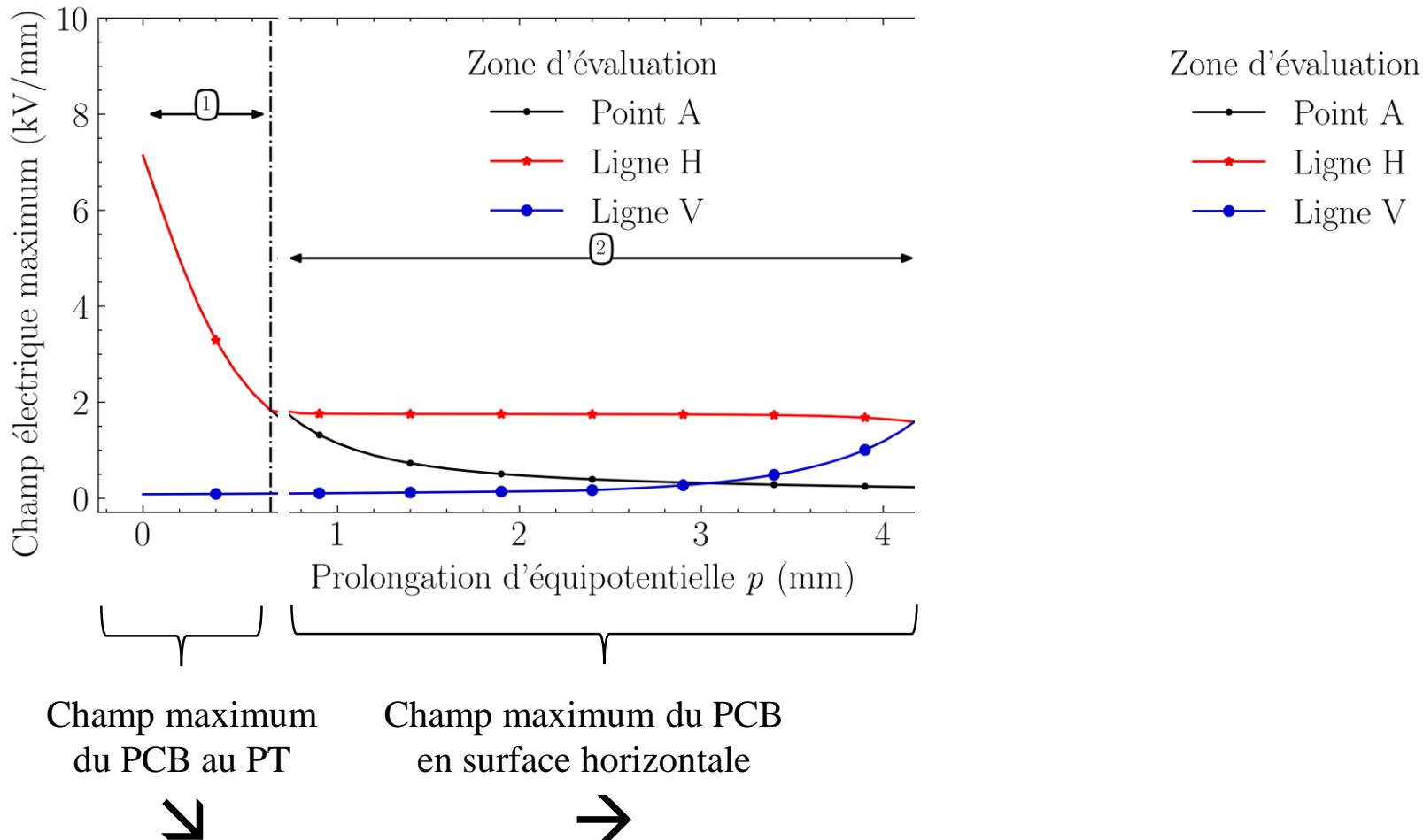


Zones d'observation du champ électrique :

- 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

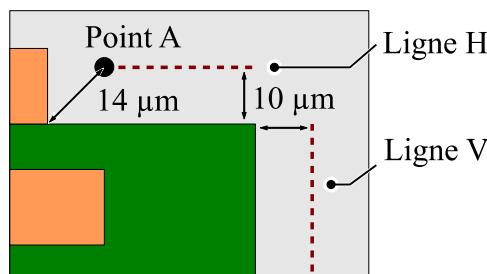
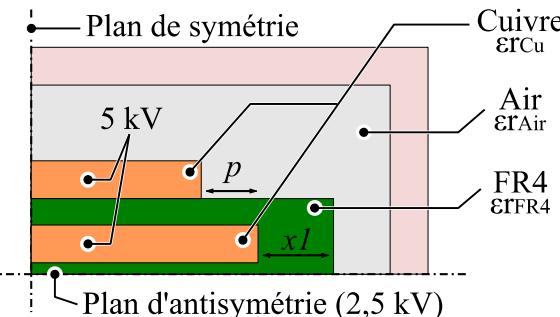
- $0 \leq p \leq 4,9 \text{ mm}$ | $l_{PCB} = 10 \text{ mm}$



ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

CONCEPT D'EC – SIMULATION NUMÉRIQUE

Géométrie simulée

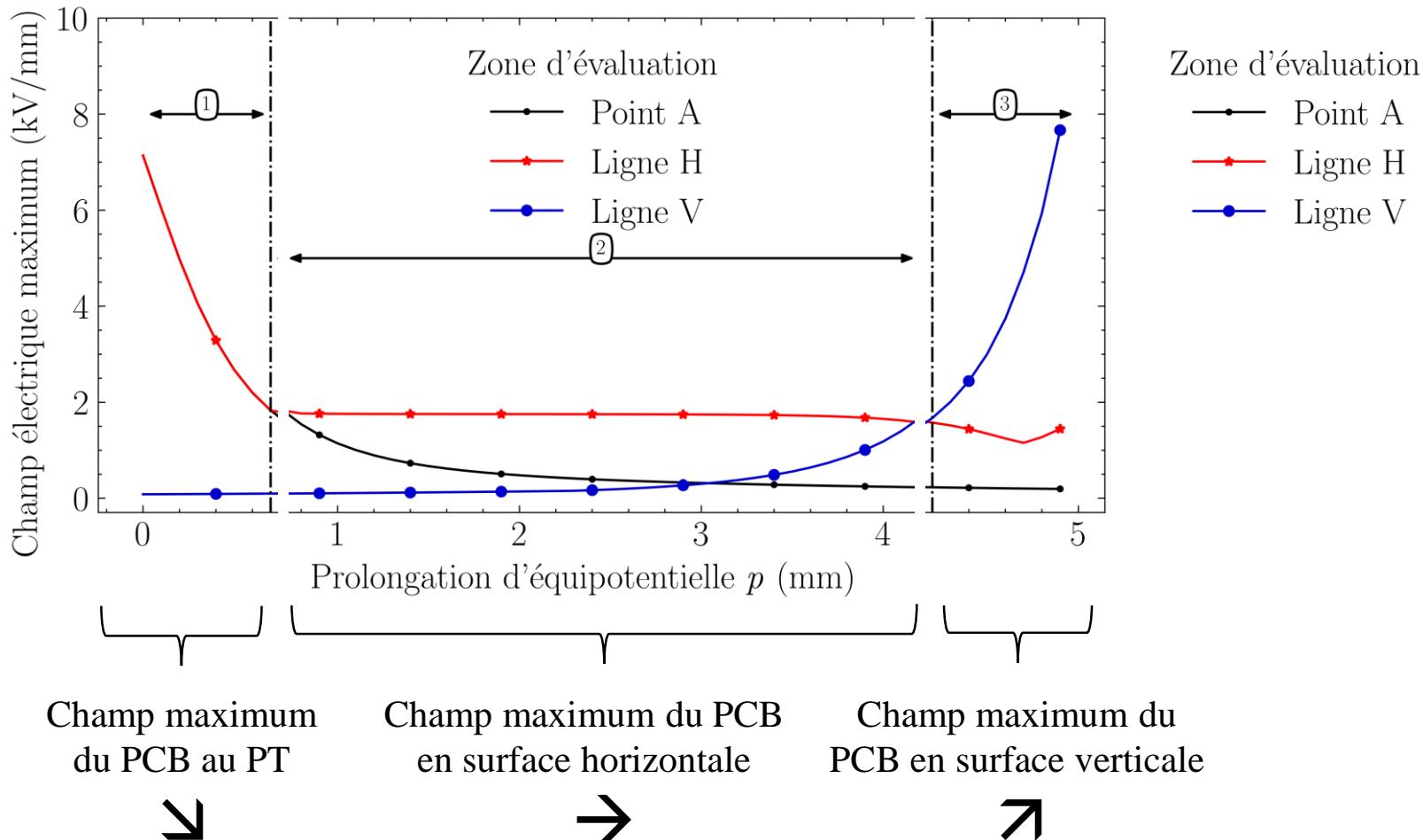


Zones d'observation du champ électrique :

- 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

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

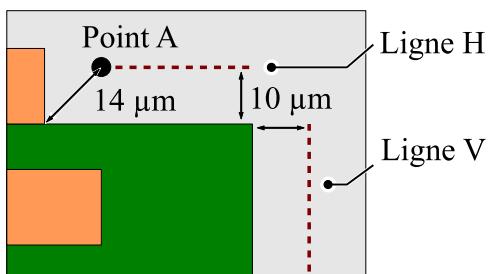
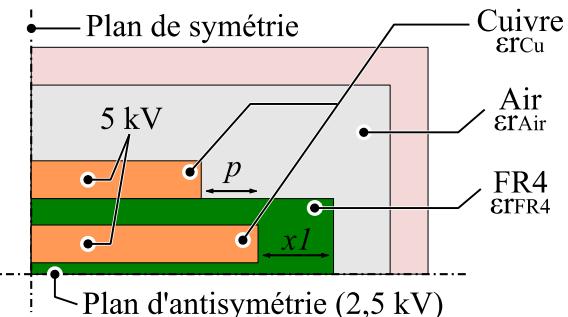


ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

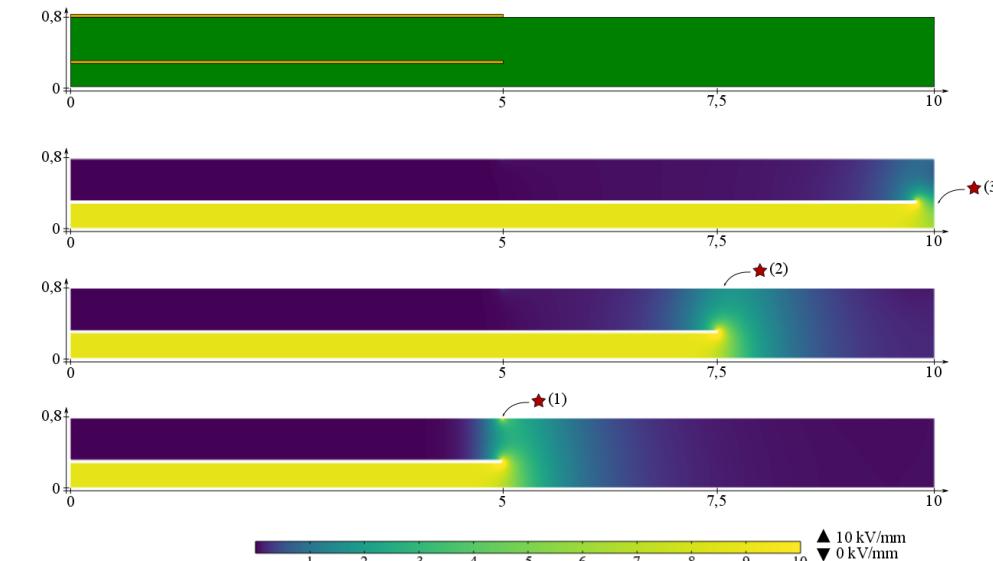
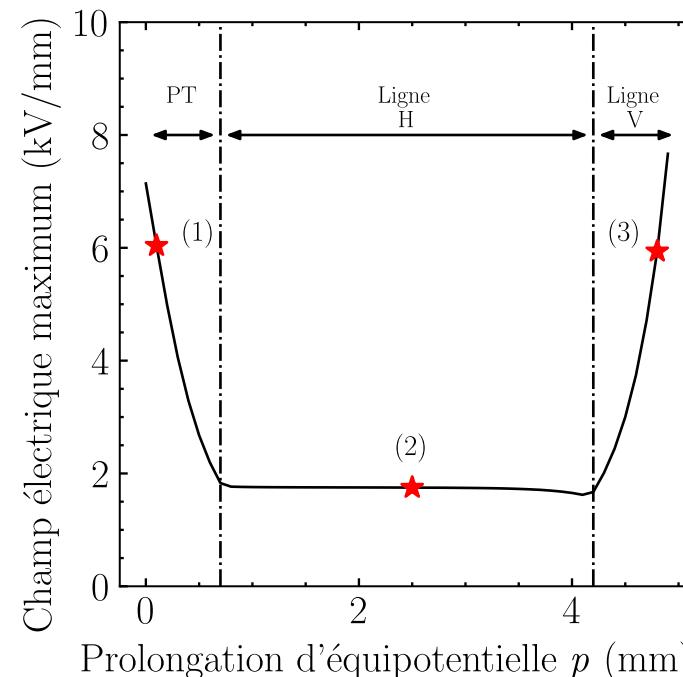
CONCEPT D'EC – SIMULATION NUMÉRIQUE SUPPLÉMENTAIRE



Géométrie simulée



Tendances observées



Zones d'observation du champ électrique :

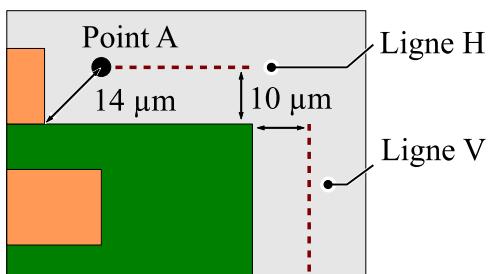
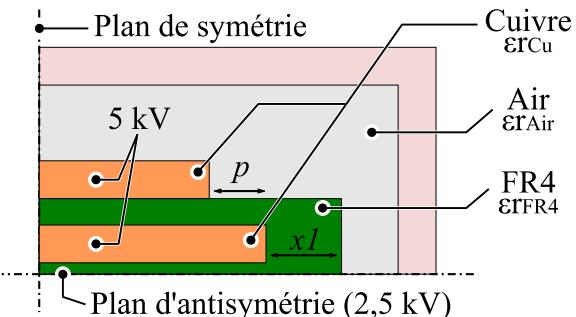
- PT du PCB (**Point A**)
- Surface horizontale du PCB (**Ligne H**)
- Surface verticale du PCB (**Ligne V**)

ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

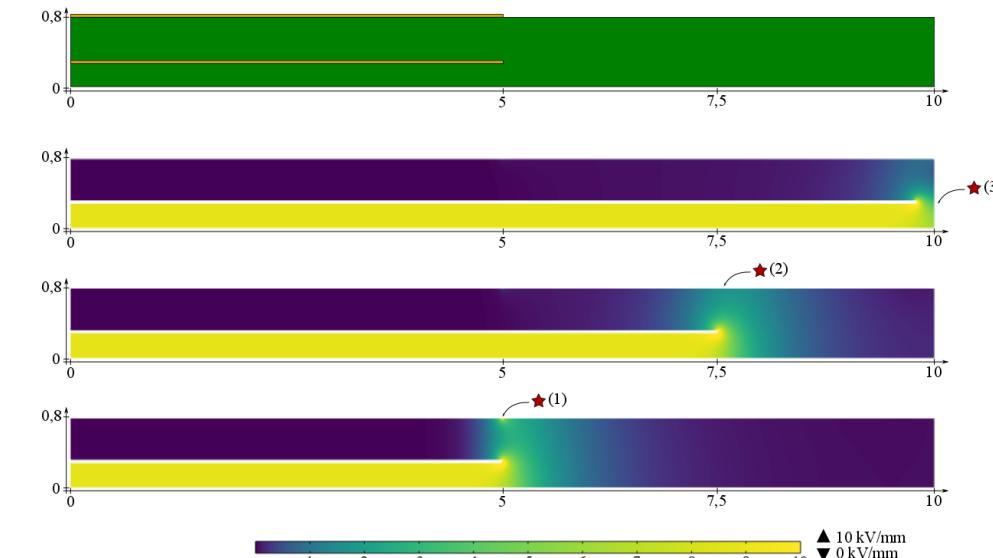
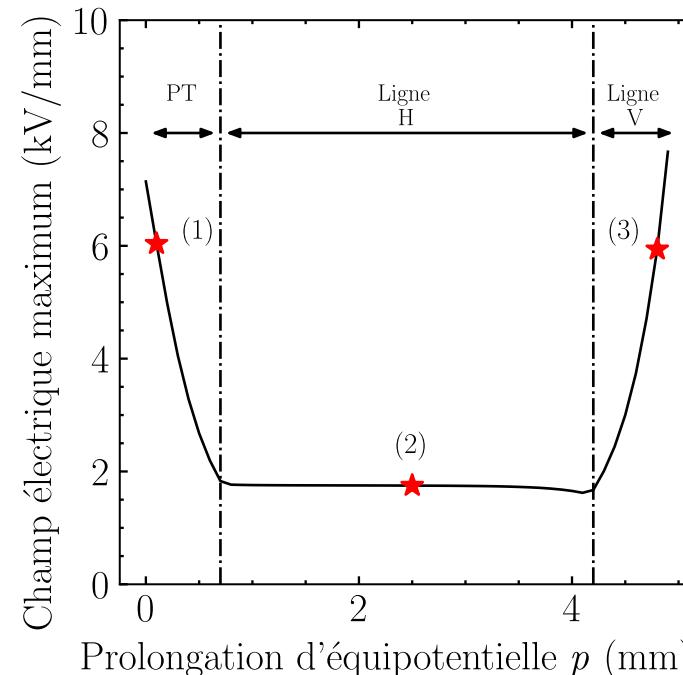
CONCEPT D'EC – SIMULATION NUMÉRIQUE SUPPLÉMENTAIRE



Géométrie simulée



Tendances observées



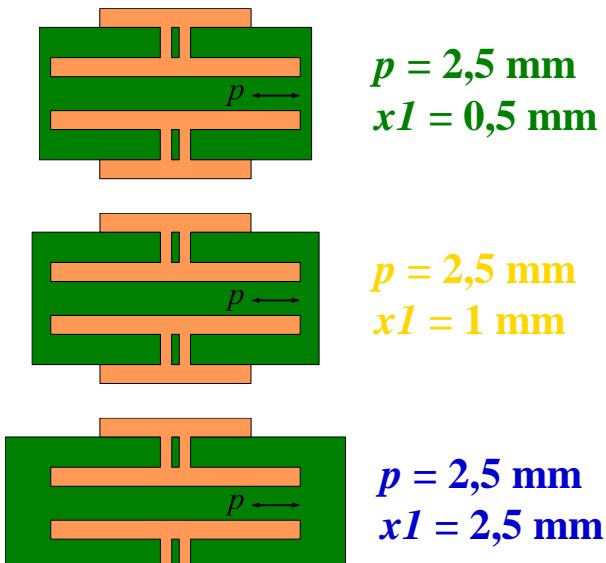
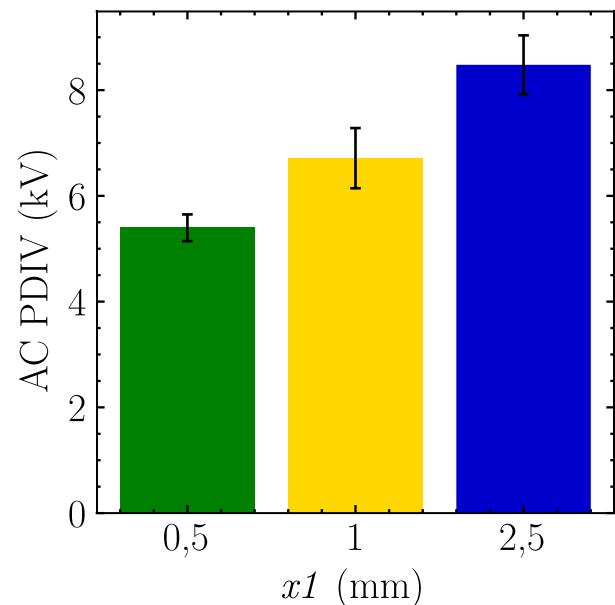
- **Changement du lieu de renforcement pour le champ électrique**
- **Pour minimiser le champ électrique → adaptation entre p et x1 pour le design des ECs**

ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

CONCEPT D'EC – RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DP

PDIV

Évaluation de la bordure du PCB x1 sur PDIV



- Si $x1 \leq p = \text{cst} \rightarrow \text{PDIV} \downarrow$
- 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

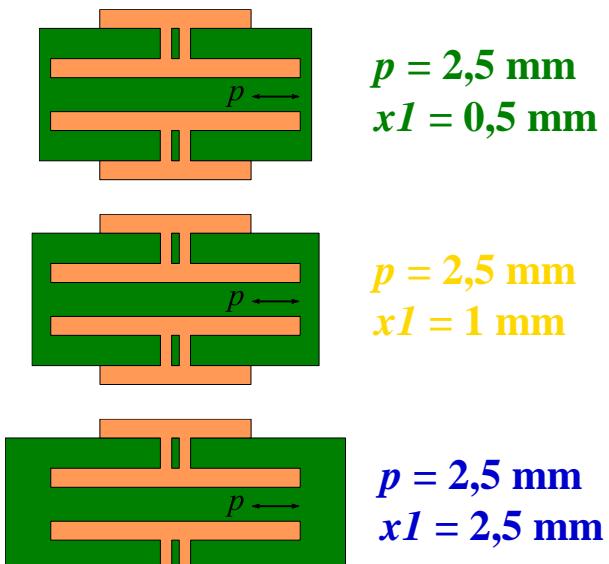
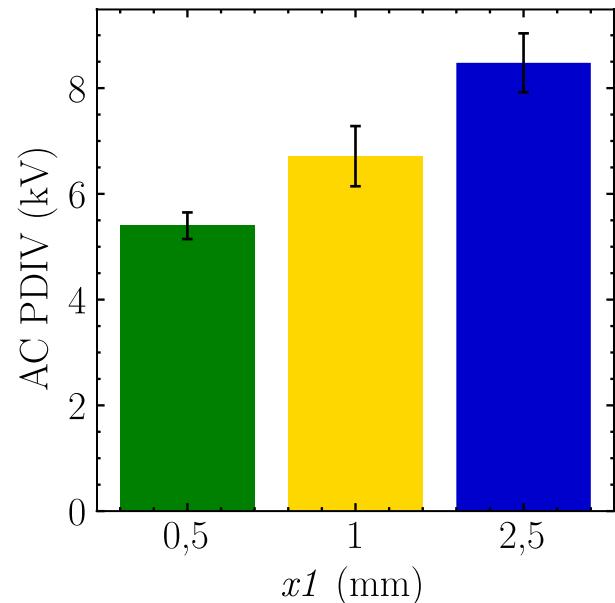
ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

CONCEPT D'EC – RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DP



PDIV

Évaluation de la bordure du PCB x1 sur PDIV



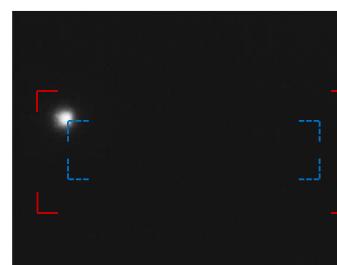
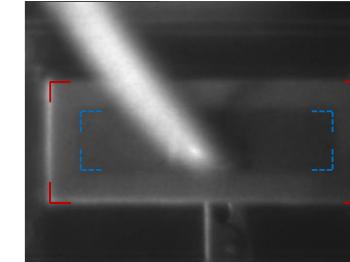
- Si $x1 \leq p = \text{cst} \rightarrow \text{PDIV} \leq$
- Adaptation entre p et $x1 \rightarrow$ PDIV maximisé (design I)

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

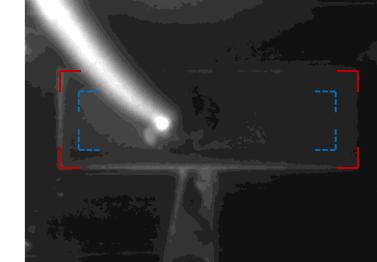
Lieu des DPs

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

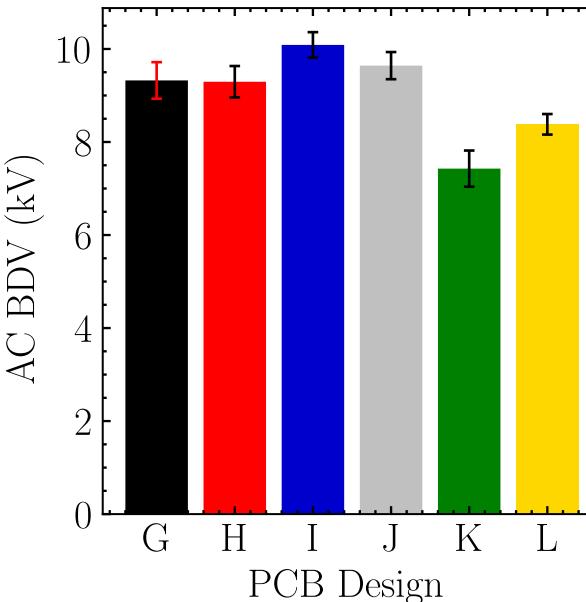
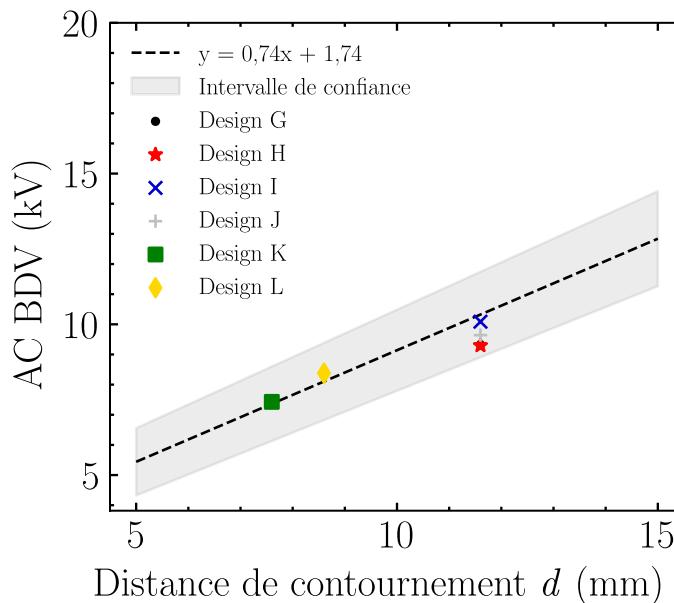
Changement de zone pour le renforcement du champ

ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

CONCEPT D'EC – RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX BDV

BDV

Évaluation de la prolongation d'équipotentielle p et de la bordure du PCB x1 sur BDV



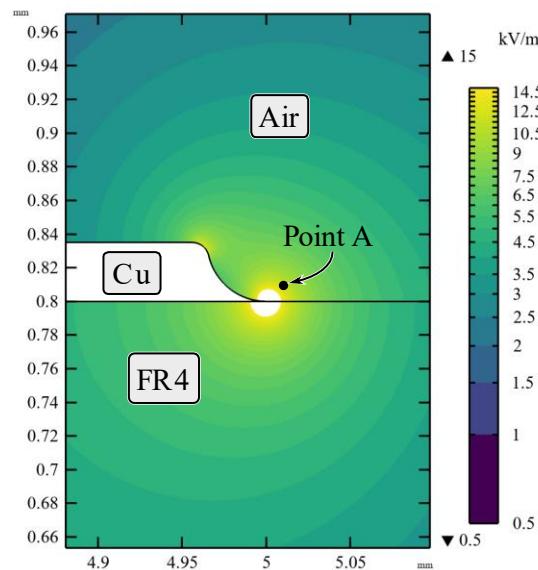
Design	I	J	L
PDIV (kV)	8,5	7,9	6,7
BDV (kV)	10,1	9,6	8,4

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

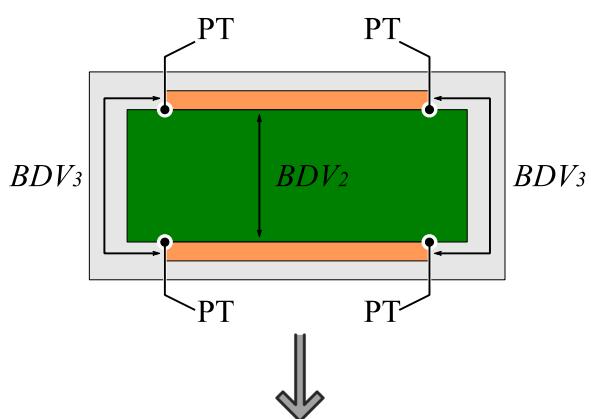
- } ✓ **Malgré les ECs, le claquage dépend de la distance de contournement**
- ✓ **Réduction du champ électrique \rightarrow critère d'initiation DP = initiation claquage**

ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

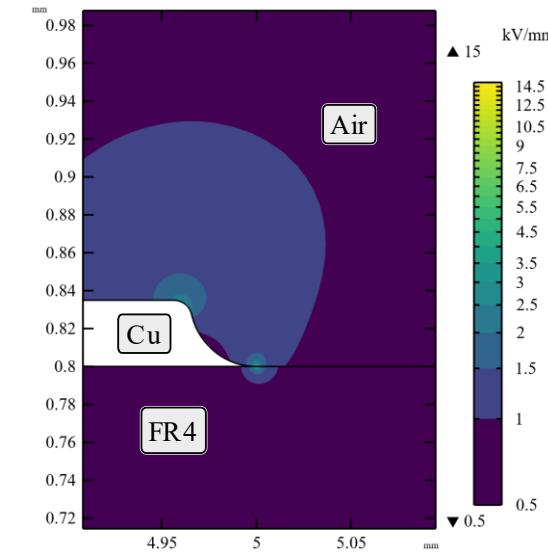
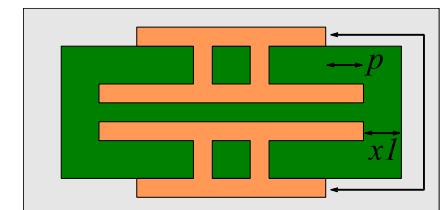
CONCLUSION DE L'ÉTUDE DES STRATÉGIES D'ISOLATION



Problématique initiale



Stratégies d'isolation



- ☒ **Claquages**
- ☒ **Décharges Partielles**

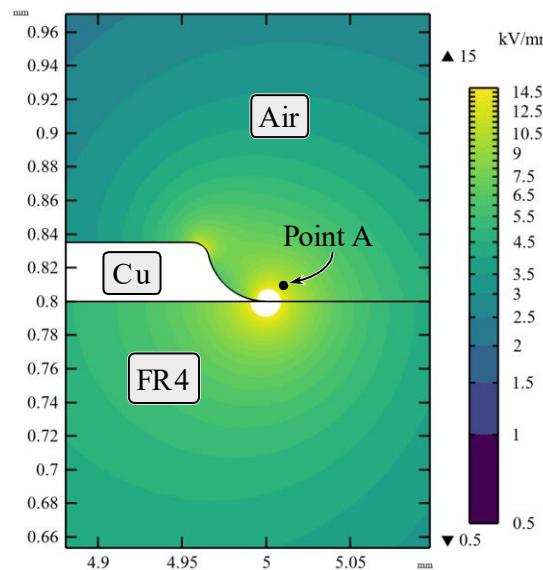


- ☒ Utilisation de l'air comme gaz isolant
- ☒ Présence de PTs

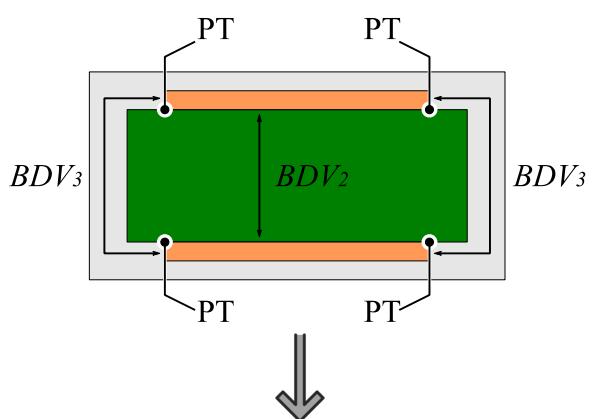
- ☑ Gestion du claquage avec la distance de contournement d
- ☑ Gestion des DPs avec le concept d'électrode de champ (p et $x1$)

ISOLATION ÉLECTRIQUE DU PACKAGING

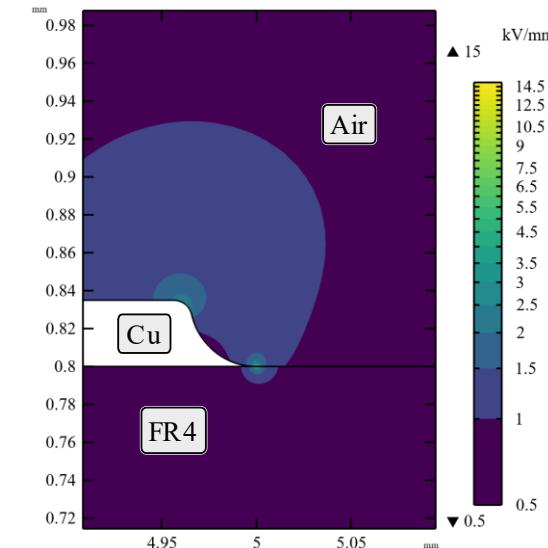
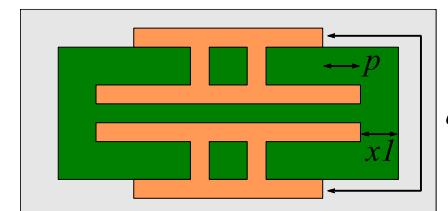
CONCLUSION DE L'ÉTUDE DES STRATÉGIES D'ISOLATION



Problématique initiale



Stratégies d'isolation



- Claquages
- Décharges Partielles



- Utilisation de l'air comme gaz isolant
- Présence de PTs

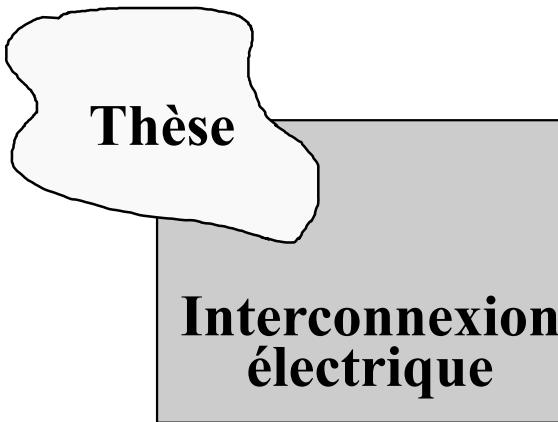
- Gestion du claquage avec la distance de contournement d
- Gestion des DPs avec le concept d'électrode de champ (p et $x1$)



- Proposition de stratégies d'isolation adaptées au contexte de démontabilité
- Possible gestion du champ électrique en surface du PCB dès la phase de conception du PCB



- Étude adaptée à d'autres contextes



1

Solution de packaging modulaire, démontable et performante

2

Isolation électrique de la solution de packaging

3

Interconnexions électriques modulaires et démontables

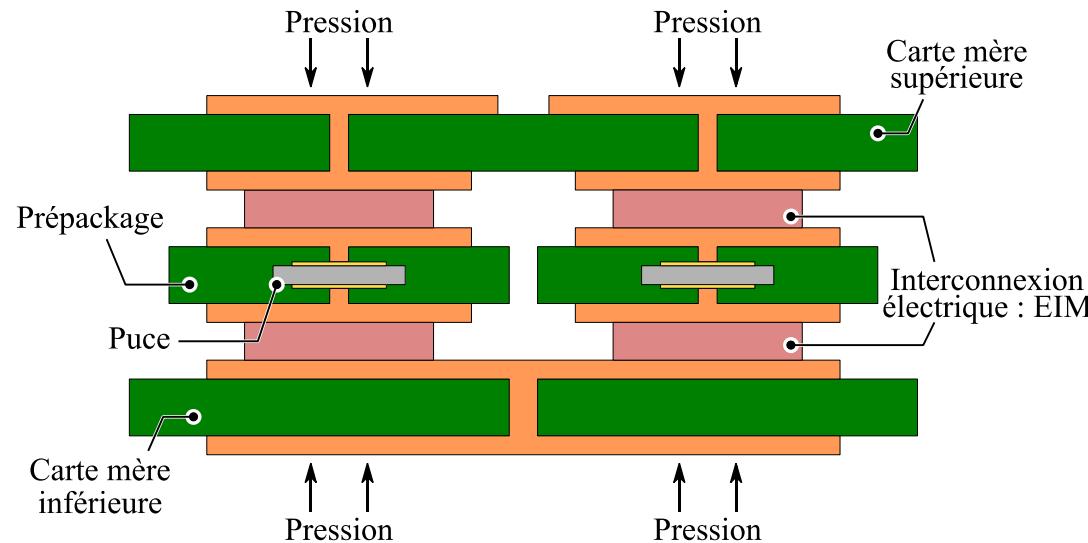
4

Conclusion et Perspectives

Assemblage de puissance

Constitué de :

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

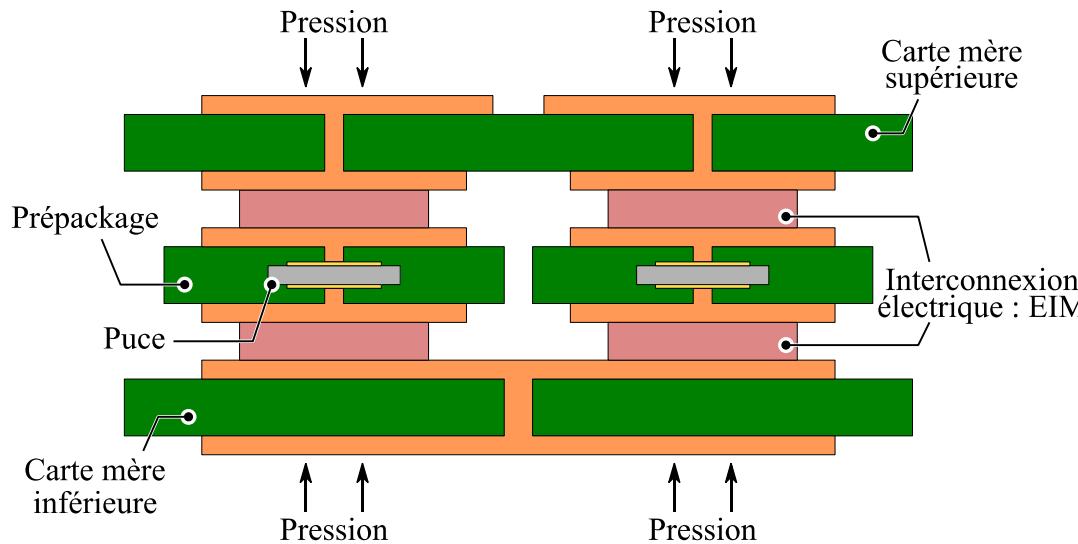


Quelle solution d'interconnexion électrique utiliser afin de mettre en œuvre un assemblage de puissance modulaire et démontable ?

INTERCONNEXIONS MODULAIRES ET DÉMONTABLES

INTRODUCTION & PRINCIPALES PROBLÉMATIQUES

Assemblage de puissance



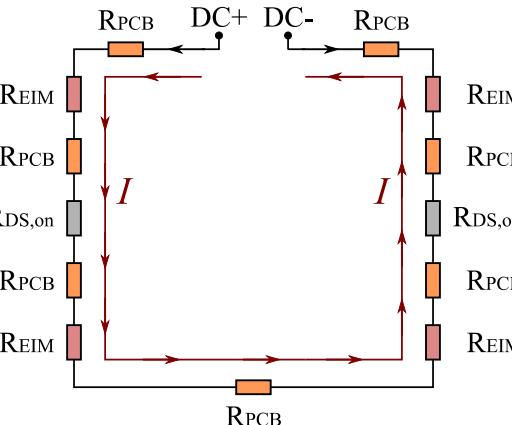
Constitué de :

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

Critères électriques



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



Puces SiC :

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

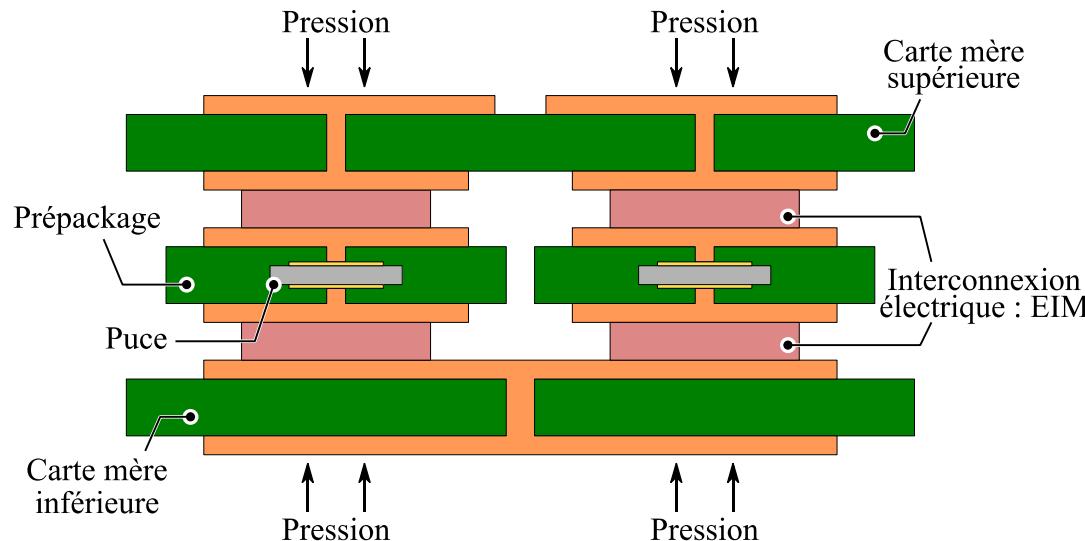
INTERCONNEXIONS MODULAIRES ET DÉMONTABLES

TRODUCTION & PRINCIPALES PROBLÉMATIQUES

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

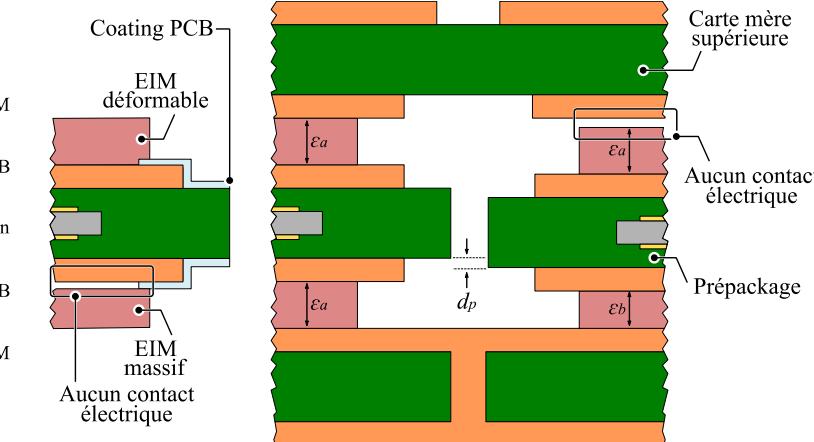
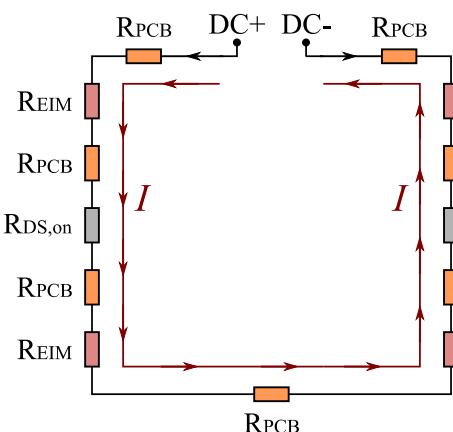


- Conduction du courant de puissance
 - Résistance de l'interconnexion limitée
→ $R_{EIM} \ll R_{DS, on}$

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 μm)

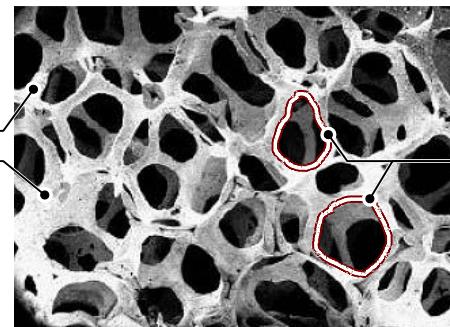


Utilisation d'un matériau déformable

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 »

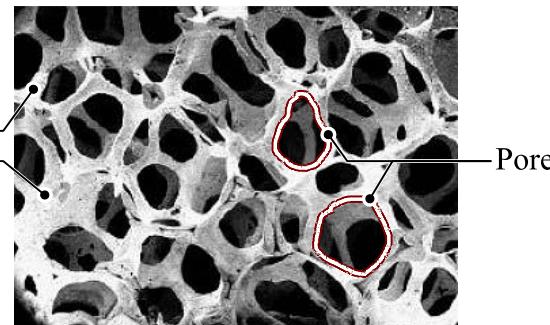


Utilisation d'un matériau déformable

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

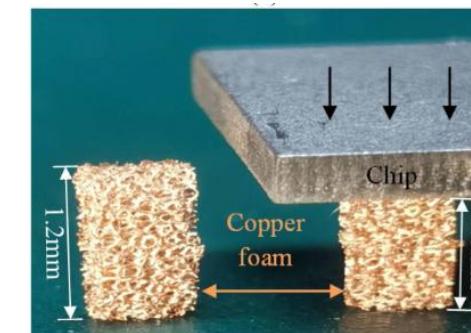
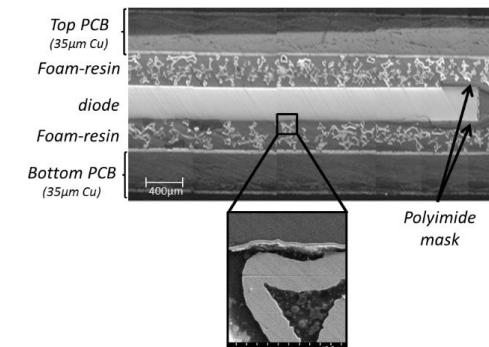
■ Les mousses métalliques :

- 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 »

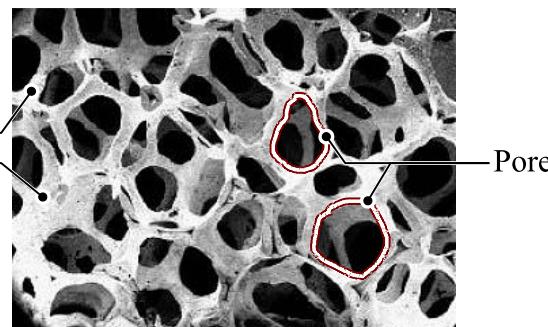
[3] R. Yao et al., « A Double-Sided Cooling approach of Discrete SiC MOSFET Device Based on Press-Pack Package »

Utilisation d'un matériau déformable

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

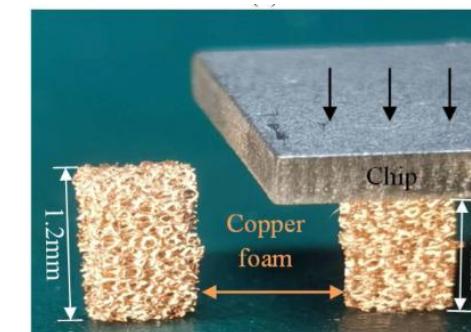
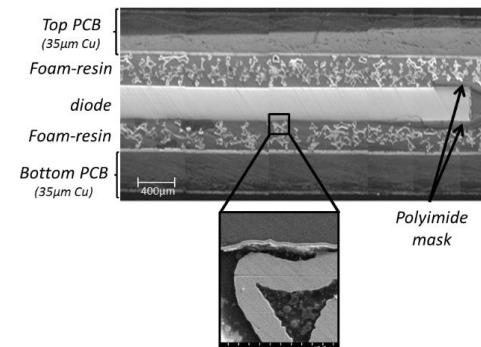
■ Les mousses métalliques :

- 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 »

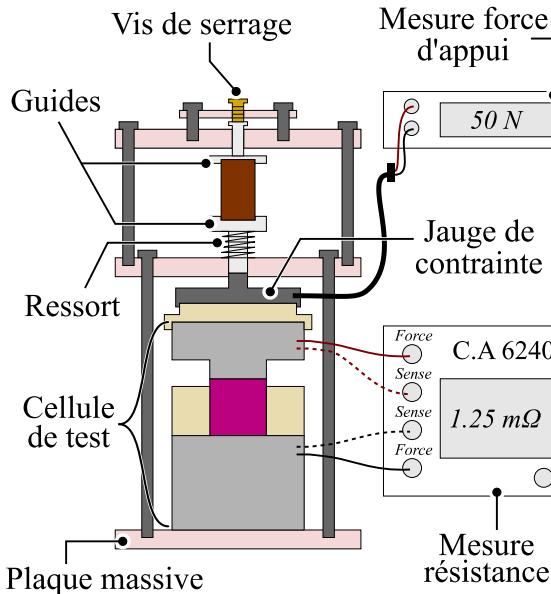
[3] R. Yao et al., « A Double-Sided Cooling approach of Discrete SiC MOSFET Device Based on Press-Pack Package »

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



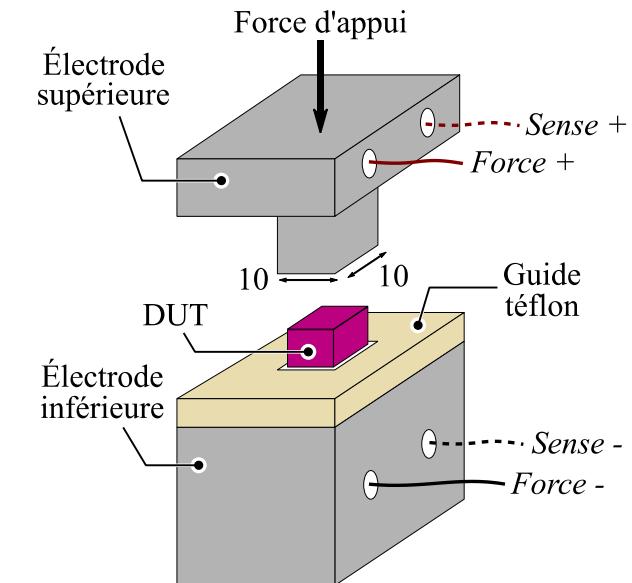
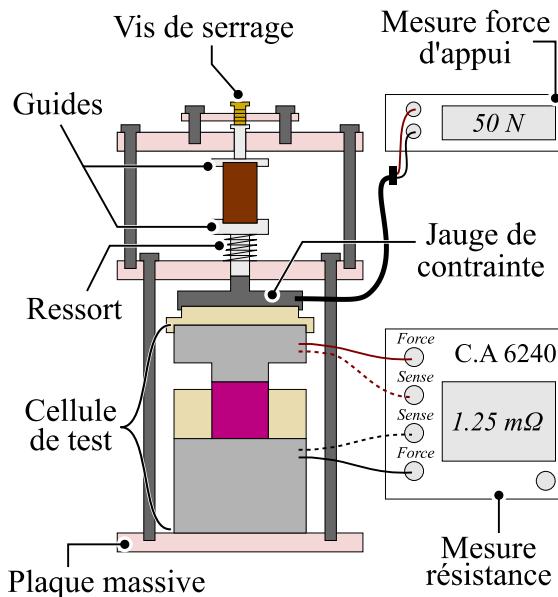
- Système de mise en pression
- Jauge de contrainte
- Micro-ohmmètre
- Cellule de test

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 :

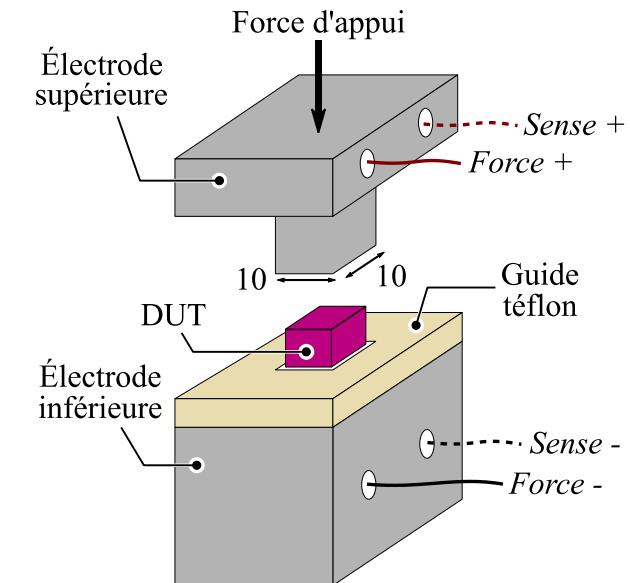
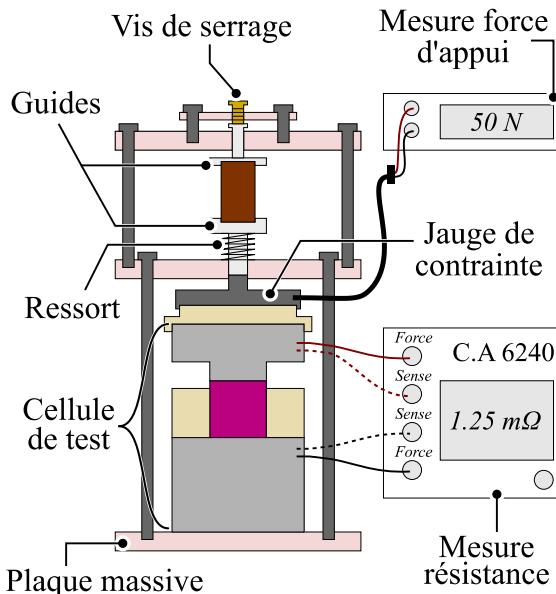
$$\begin{cases} R_{TOT} = \frac{V_{TOT}}{I_R} = R_{électrodes} + R_{EIM} \\ R_{EIM} = R_A + 2 \cdot R_C \end{cases}$$

- R_{EIM} → résistance totale du DUT
- R_A → résistance en volume du DUT
- R_C → 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

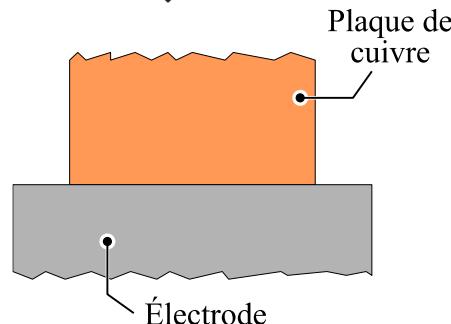


- Système de mise en pression
- Jauge de contrainte
- Micro-ohmmètre
- Cellule de test

- 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

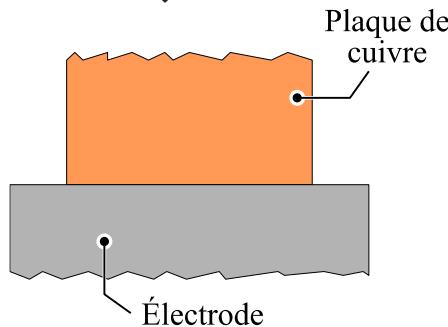
- Faible résistance
- Démontable
- Très faiblement déformable

INTERCONNEXIONS MODULAIRES ET DÉMONTABLES

MESURE DE R EN FONCTION DE F – RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX



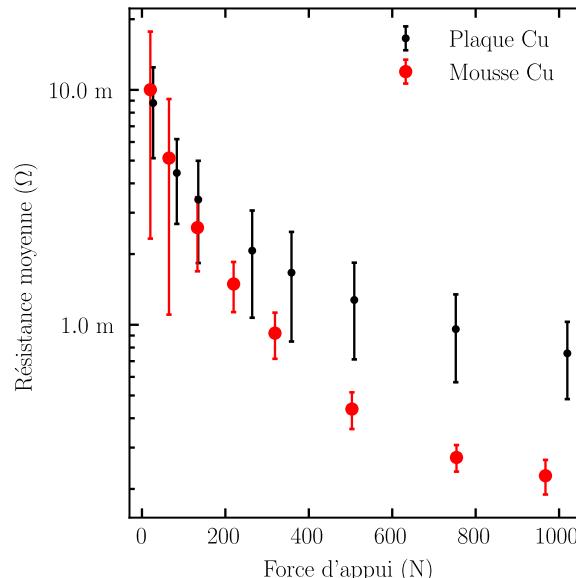
Intérêt des propriétés de déformation pour la résistance électrique ?



- **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



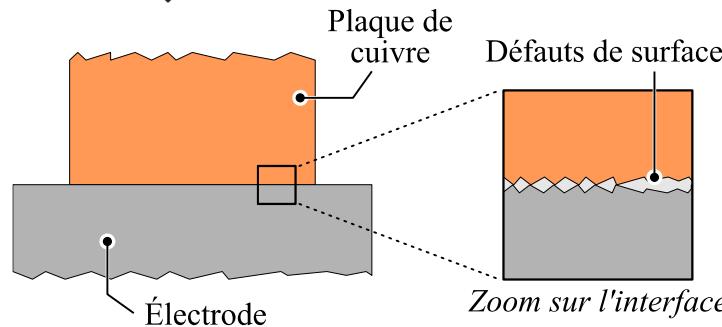
- Si $F \uparrow \rightarrow R_{EIM} \downarrow$ fortement



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



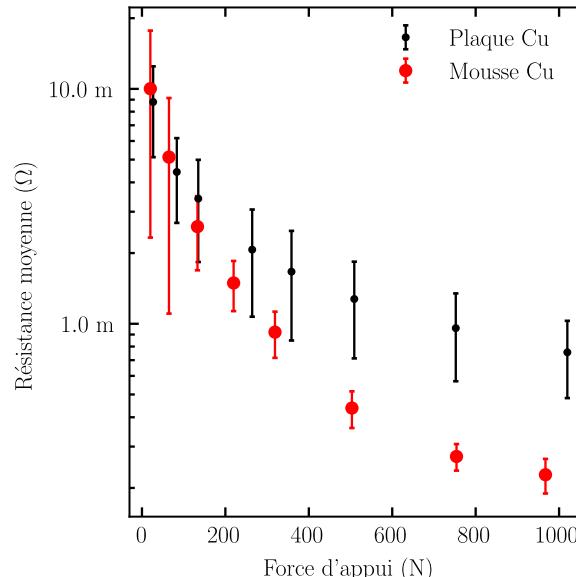
Intérêt des propriétés de déformation pour la résistance électrique ?



- **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 $F \uparrow \rightarrow R_{EIM} \downarrow$ fortement



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

Plaque Cu

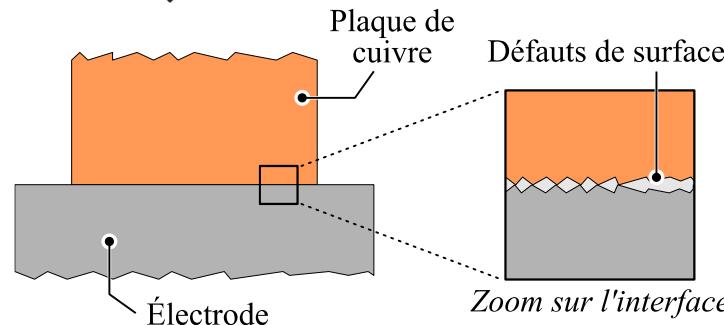
- ✓ **Sous l'effet de F, la ductilité des matériaux permet de corriger les défauts de surface/planéité → R_C améliorées**

INTERCONNEXIONS MODULAIRES ET DÉMONTABLES

MESURE DE R EN FONCTION DE F – RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX



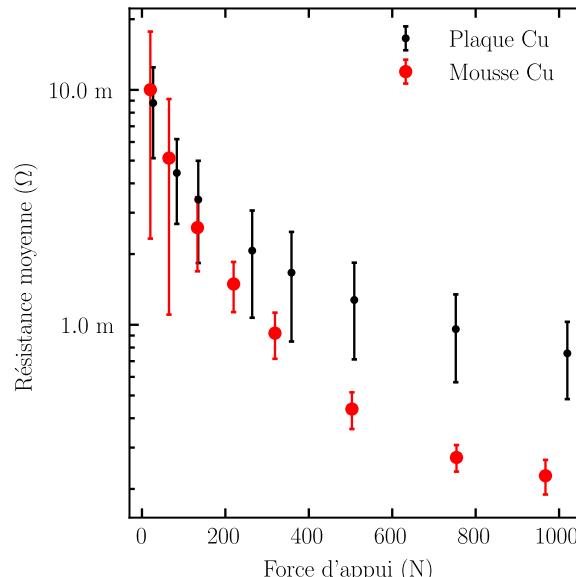
Intérêt des propriétés de déformation pour la résistance électrique ?



- **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 $F \uparrow \rightarrow R_{EIM} \downarrow$ fortement



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

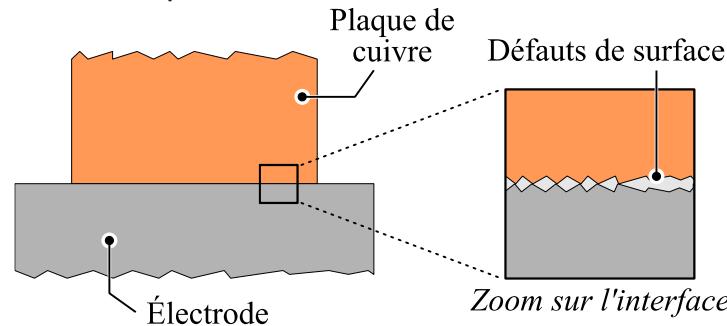
- Plaque Cu**
 - Sous l'effet de F , la ductilité des matériaux permet de **corriger les défauts de surface/planéité** → **R_C améliorées**
- Mousse Cu**
 - Régime de décroissance complexe à expliquer
 - Forte décroissance de R_{EIM} à faible F**
 - Déformation** de la mousse

INTERCONNEXIONS MODULAIRES ET DÉMONTABLES

MESURE DE R EN FONCTION DE F – RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX



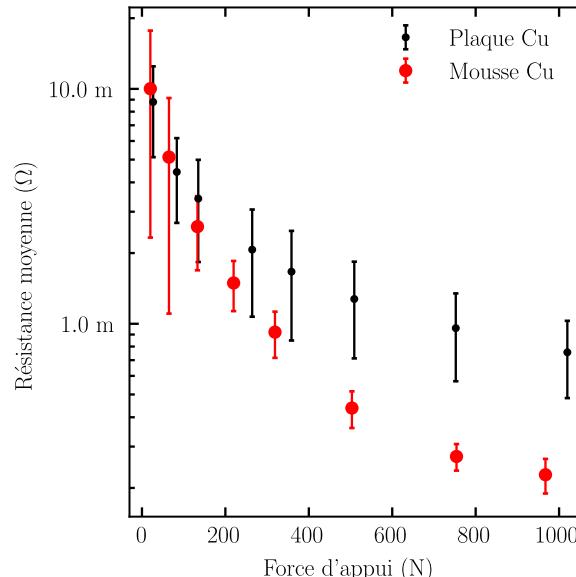
Intérêt des propriétés de déformation pour la résistance électrique ?



- **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 $F \uparrow \rightarrow R_{EIM} \downarrow$ 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



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

INTERCONNEXIONS MODULAIRES ET DÉMONTABLES

MESURE DE R EN FONCTION DE F – RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX



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



Matériaux caractérisés :

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



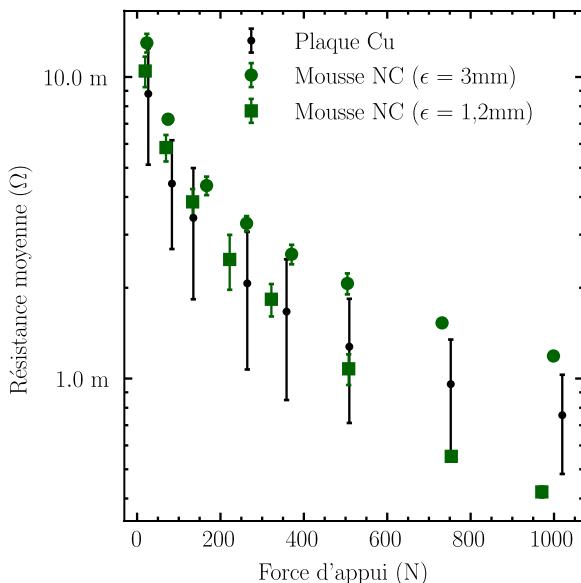
Influence de la nature du matériau métallique
sur la résistance électrique des mousses ?



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
- $F_{\max} \rightarrow -45\%$



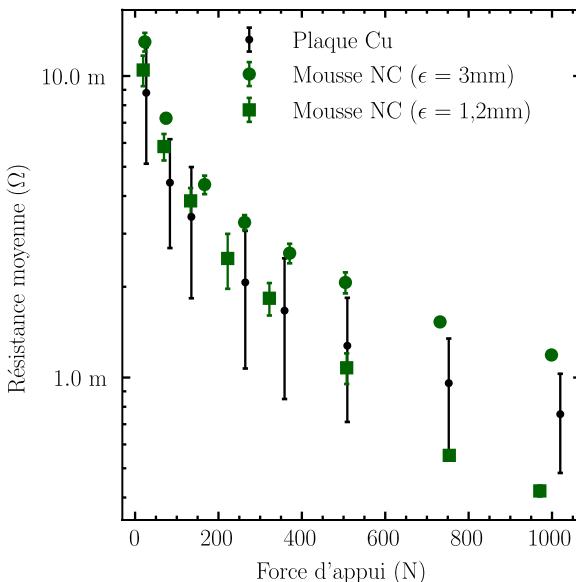
Influence de la nature du matériau métallique
sur la résistance électrique des mousses ?



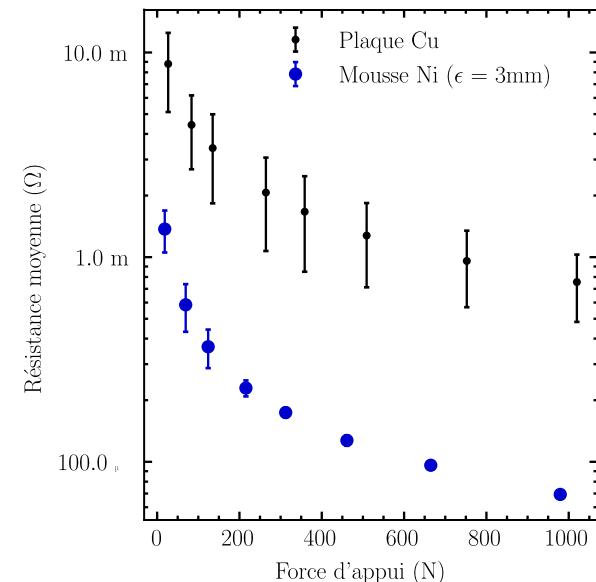
Matériaux caractérisés :

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

Mousse NC



Mousse Ni



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

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



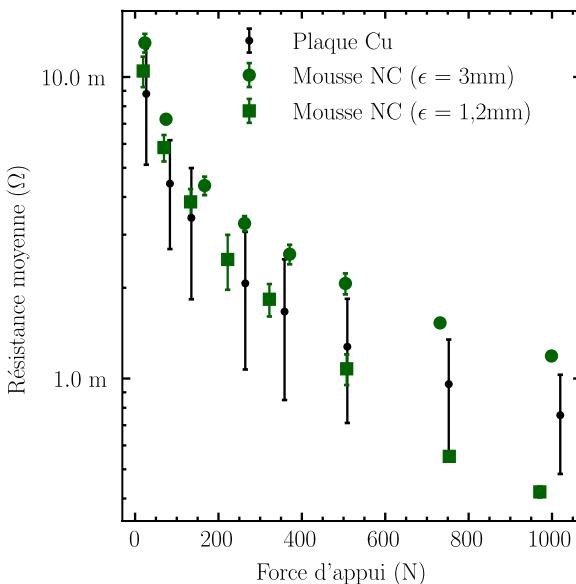
Influence de la nature du matériau métallique
sur la résistance électrique des mousses ?



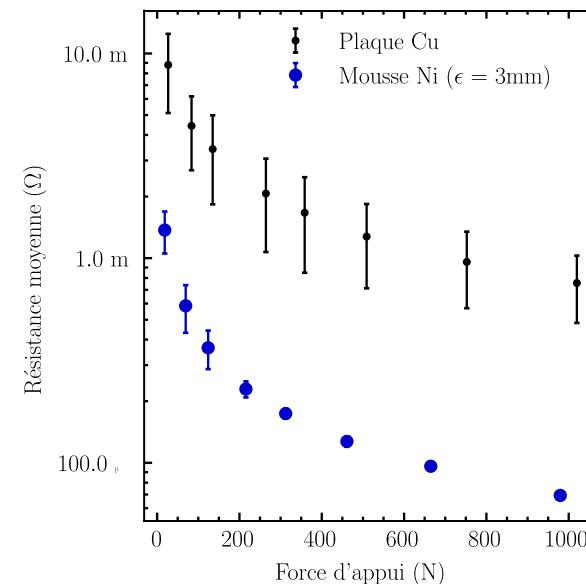
Matériaux caractérisés :

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

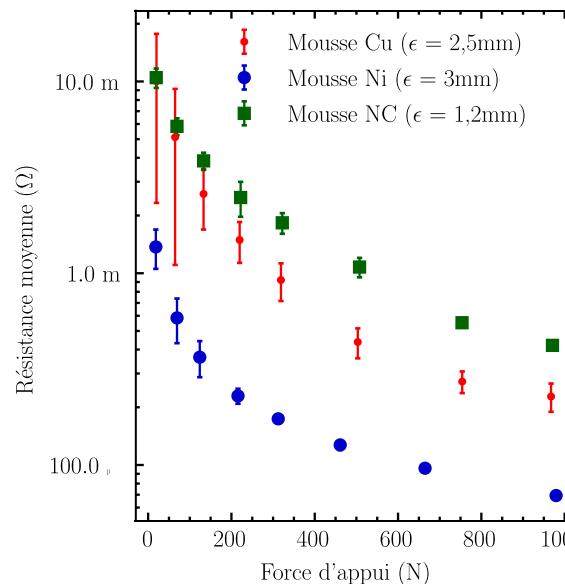
Mousse NC



Mousse Ni



Comparaison



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

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

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

INTERCONNEXIONS MODULAIRES ET DÉMONTABLES

MESURE DE R EN FONCTION DE F – RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX



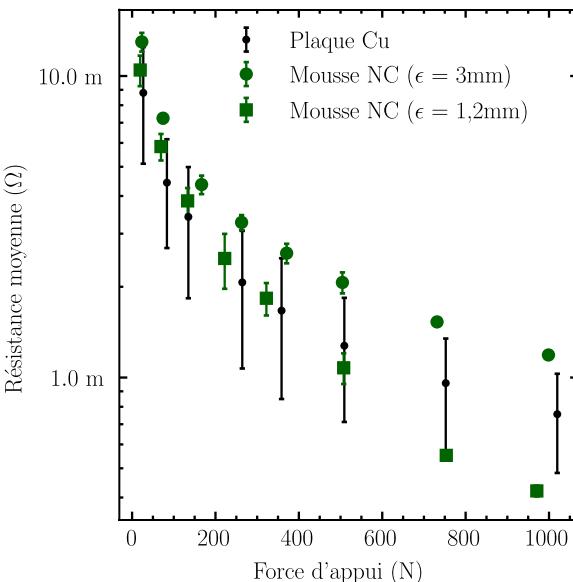
La Région
Auvergne-Rhône-Alpes



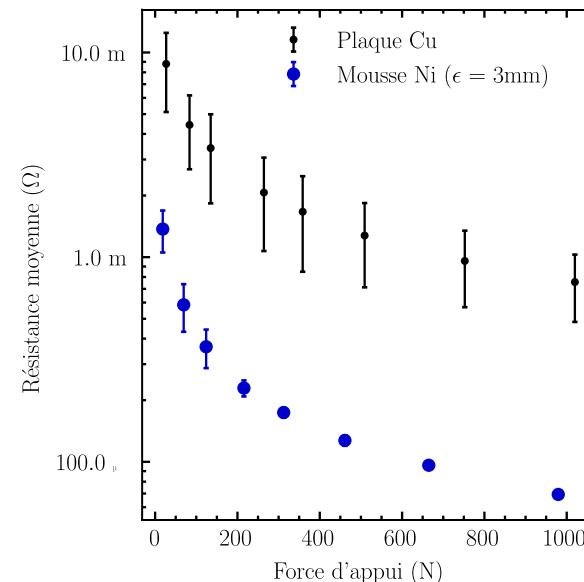
Influence de la nature du matériau métallique
sur la résistance électrique des mousses ?



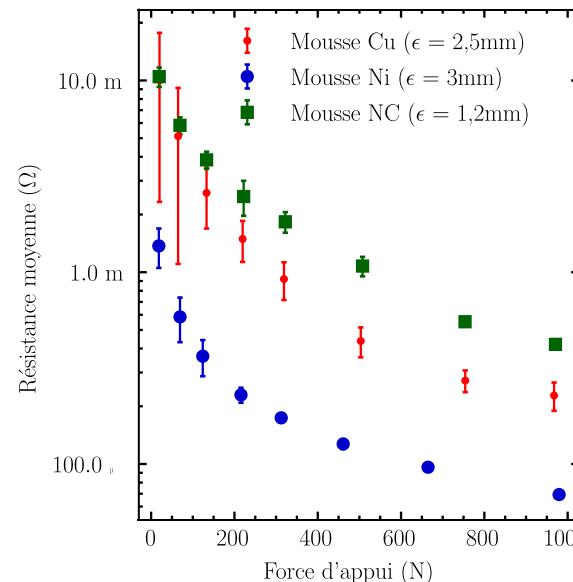
Mousse NC



Mousse Ni



Comparaison



Matériaux caractérisés :

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



**Influence de l'épaisseur
pour la mousse de NC**

**Possibles meilleures
propriétés électriques
pour la mousse de Ni**

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

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

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

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 $F \uparrow \rightarrow R_{EIM} \downarrow$ fortement
- Interconnexions déformables meilleures que massives

	Épaisseur (mm)	Pression (MPa)	R_{EIM} ($\mu\Omega \cdot \text{cm}^2$)
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 $F \uparrow \rightarrow R_{EIM} \downarrow$ fortement
- ✓ Interconnexions déformables meilleures que massives

	Épaisseur (mm)	Pression (MPa)	R_{EIM} ($\mu\Omega \cdot \text{cm}^2$)
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)	\emptyset	\emptyset	5000

Critères électriques



- Conduction du courant de puissance
- Résistance de l'interconnexion limitée

Critères mécaniques



- EIM déformable
- Sans liaison mécanique permanente

INTERCONNEXIONS MODULAIRES ET DÉMONTABLES

CONCLUSION



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 $F \uparrow \rightarrow R_{EIM} \downarrow$ fortement
- ✓ Interconnexions déformables meilleures que massives

	Épaisseur (mm)	Pression (MPa)	R_{EIM} ($\mu\Omega \cdot \text{cm}^2$)
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 m Ω 5x5 mm 2)	\emptyset	\emptyset	5000
---	-------------	-------------	------

Contact sec (cuivre – aluminium)	\emptyset	10	180
Fils de bonding (x10 5x5 mm 2)	\emptyset	\emptyset	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

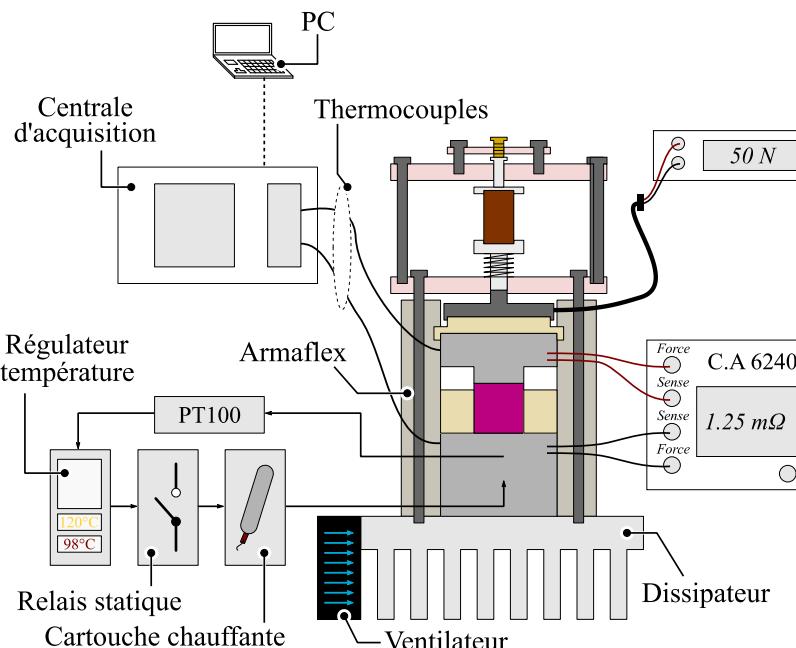


Manuscrit



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

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



INTERCONNEXIONS MODULAIRES ET DÉMONTABLES

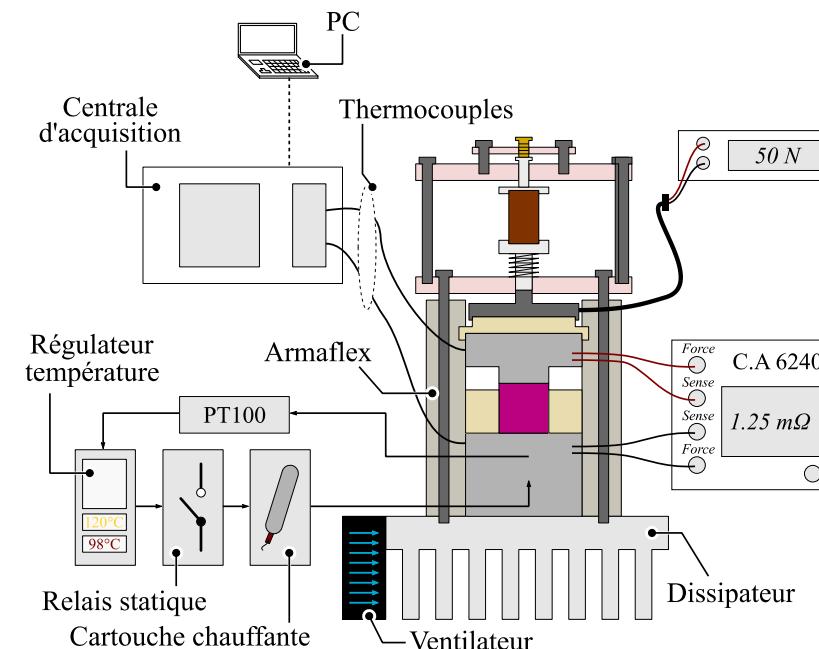
CONCLUSION

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

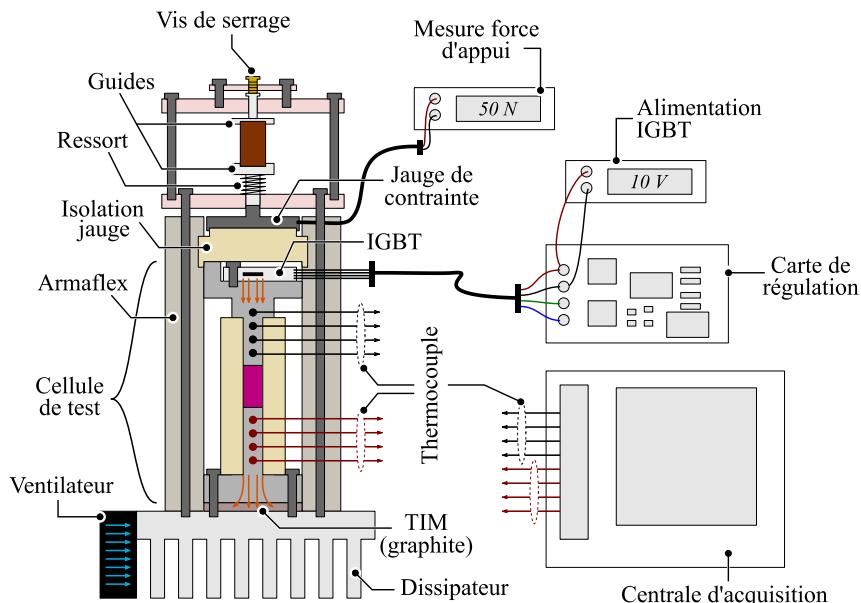


Manuscrit



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

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



INTERCONNEXIONS MODULAIRES ET DÉMONTABLES

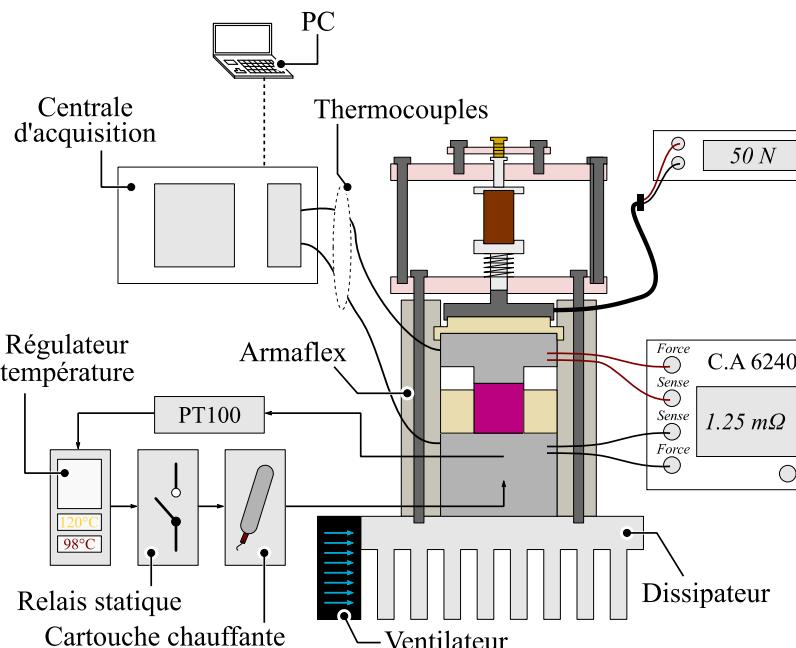
CONCLUSION

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

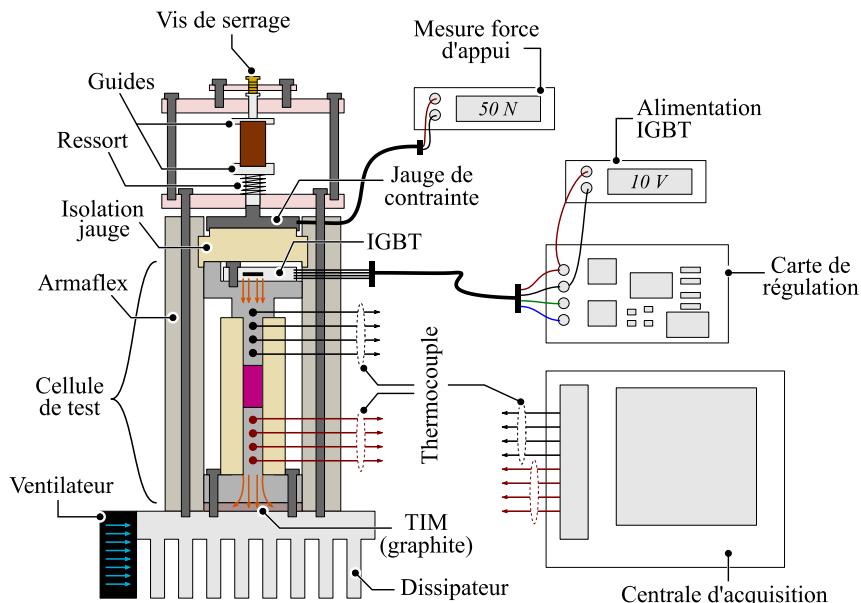


Manuscrit



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

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

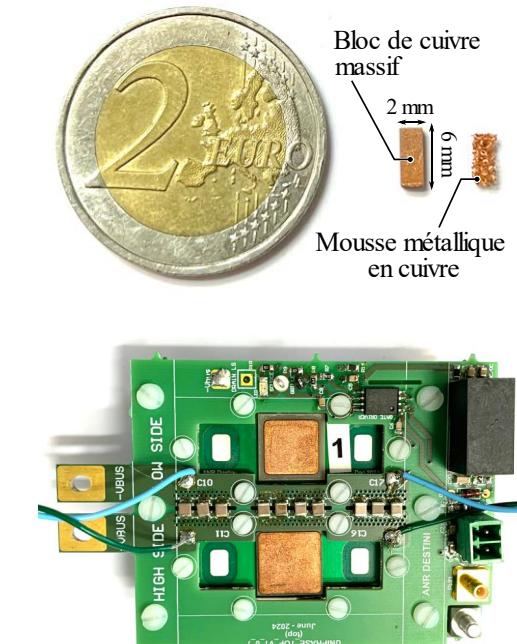


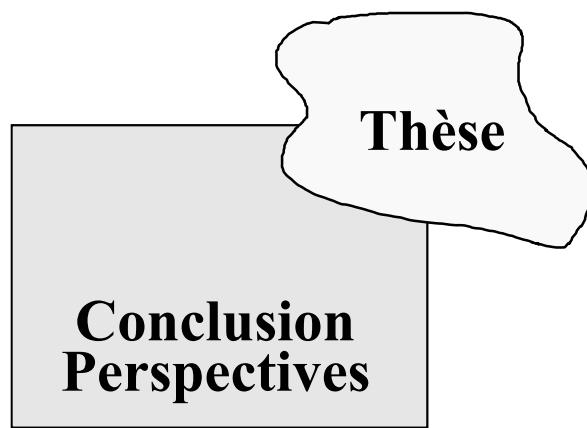
Manuscrit



Tests en conditions réelles

- Tests de mousses métalliques dans un assemblage de puissance





1 Solution de packaging modulaire, démontable et performante

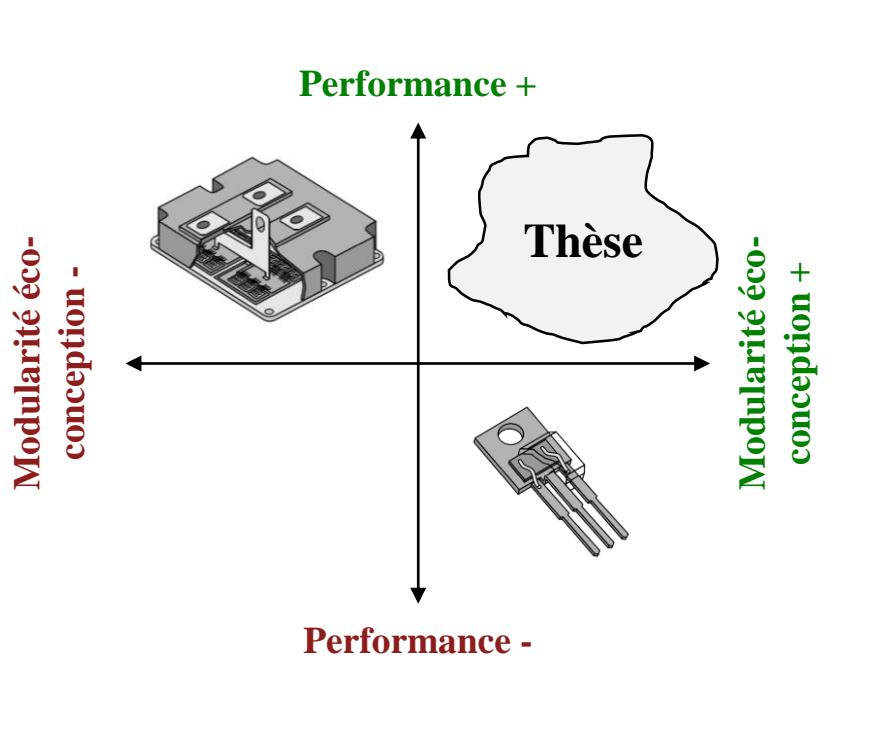
2 Isolation électrique de la solution de packaging

3 Interconnexions électriques modulaires et démontables

4 Conclusion et Perspectives

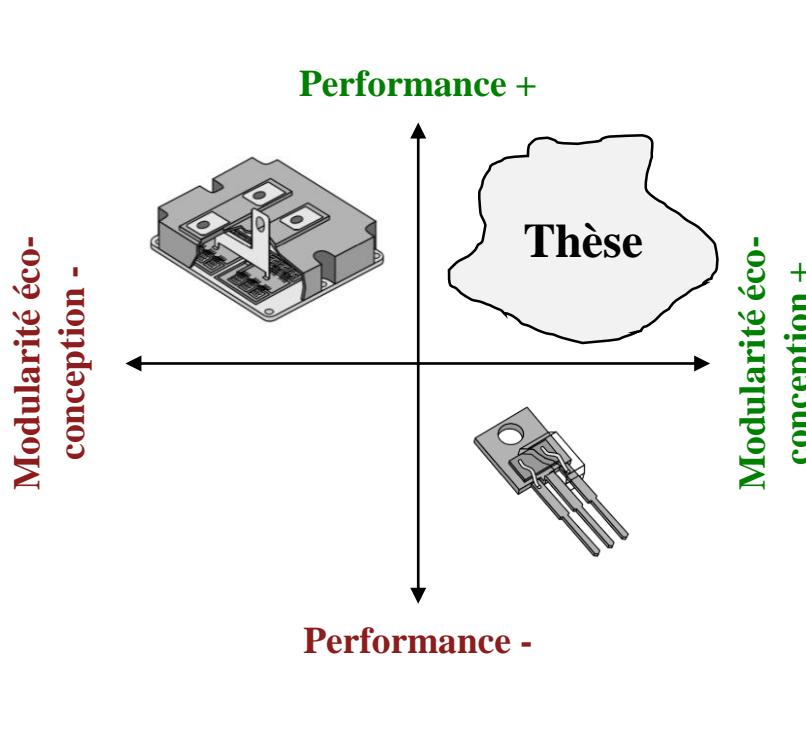


Comment assurer la mise en œuvre des **composants SiC** dans un contexte de **modularité et démontabilité**, tout en assurant des **performances satisfaisantes** pour l'EP ?





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 ?

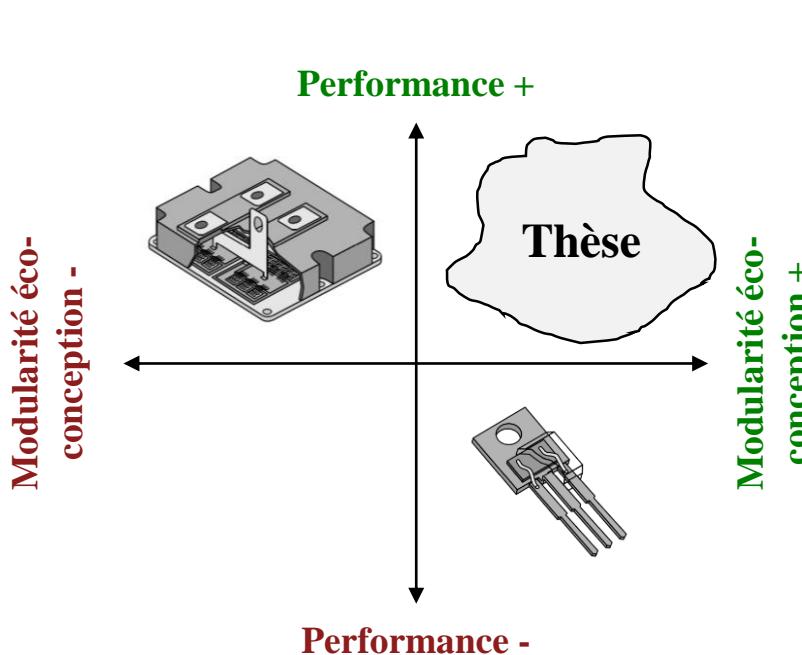


Packaging modulaire pour l'éco-conception

- 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

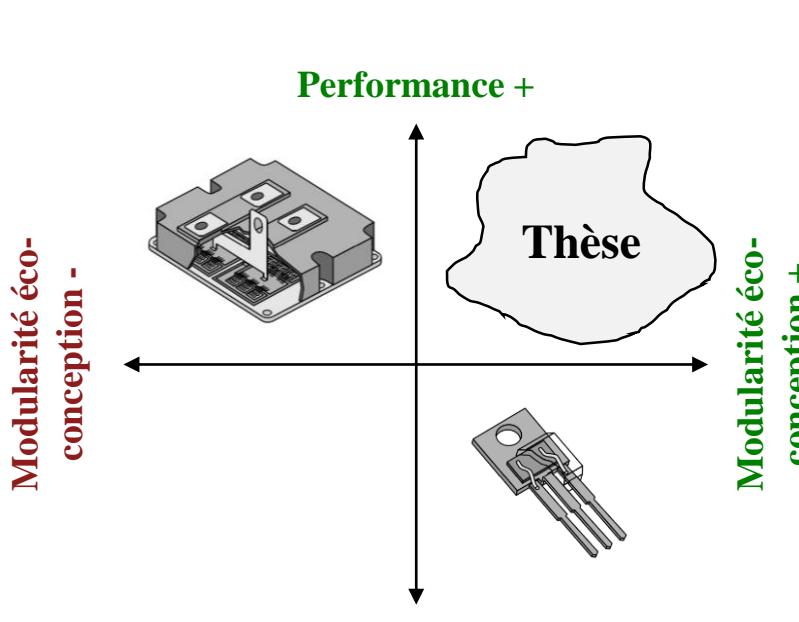
- Intégration d'une puce SiC au sein d'un prépackage
- Assemblage de prépackages
- ✓ **Performances électriques** $\rightarrow L_S = 3 \text{ nH} \rightarrow 1 \text{ nH}$ semble possible (intégration PCB)

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**



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

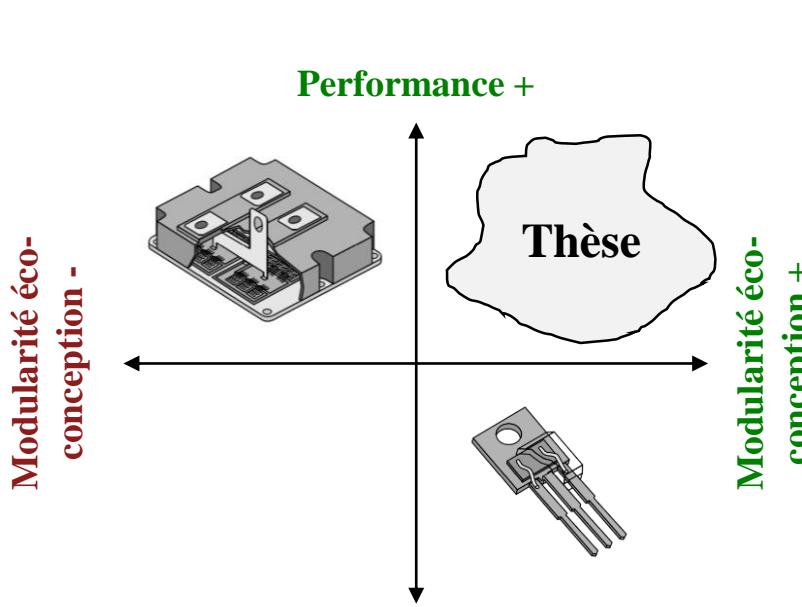
- Gestion du champ électrique en surface du PCB
- Stratégies : design géométrique et topologie du PCB
- ✓ **Effet des stratégies d'isolation sur le champ électrique**

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 ?



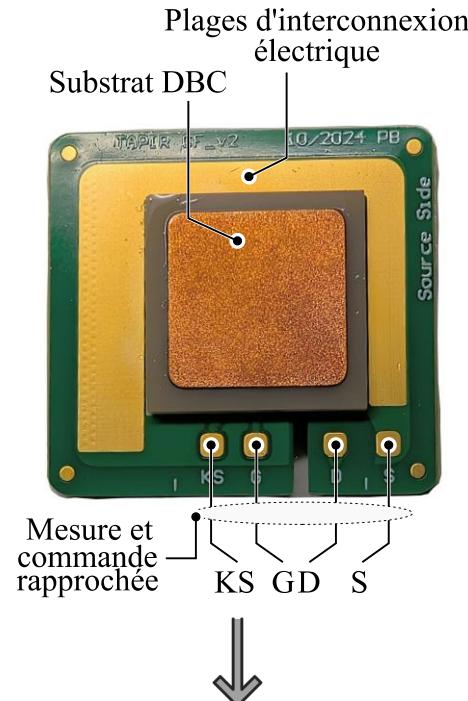
- Packaging modulaire pour l'éco-conception**
 - Intégration d'une puce SiC au sein d'un prépackage
 - Assemblage de prépackages
 - Performances électriques $\rightarrow L_S = 3 \text{ nH} \rightarrow 1 \text{ nH}$ semble possible (intégration PCB)**
- Isolation électrique**
 - Gestion du champ électrique 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**



- 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

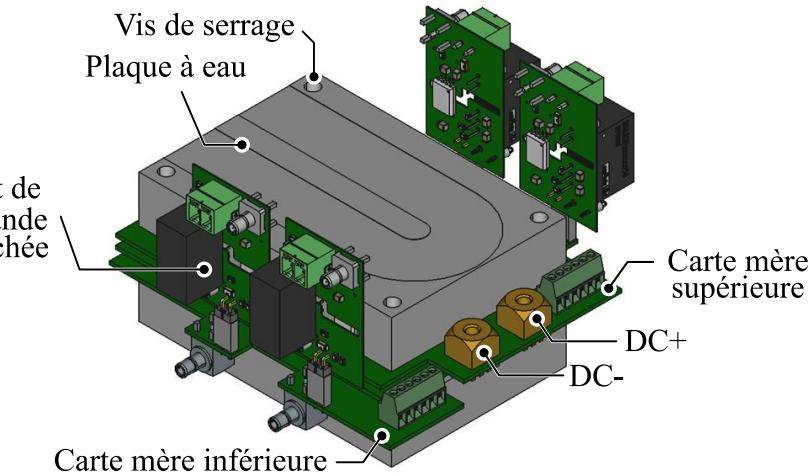
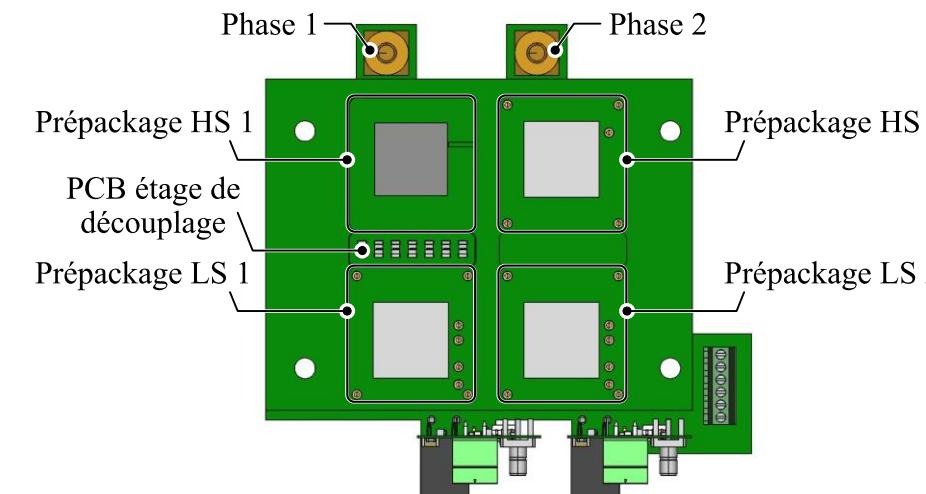
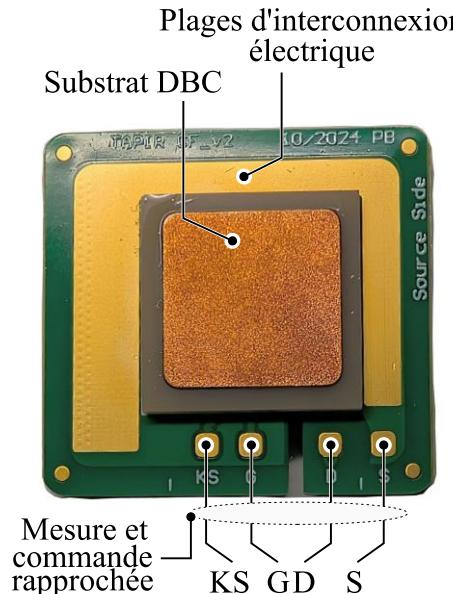
Étude des performances thermiques de l'assemblage de puissance



- Réalisation d'un second prépackage

Packaging modulaire pour l'éco-conception

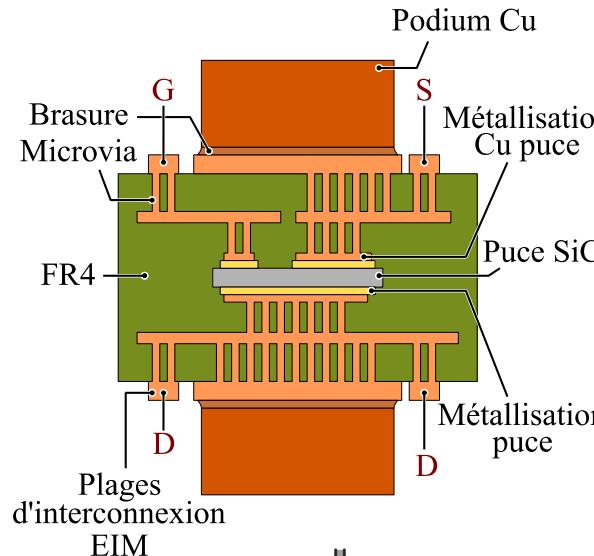
☒ Étude des performances thermiques de l'assemblage de puissance



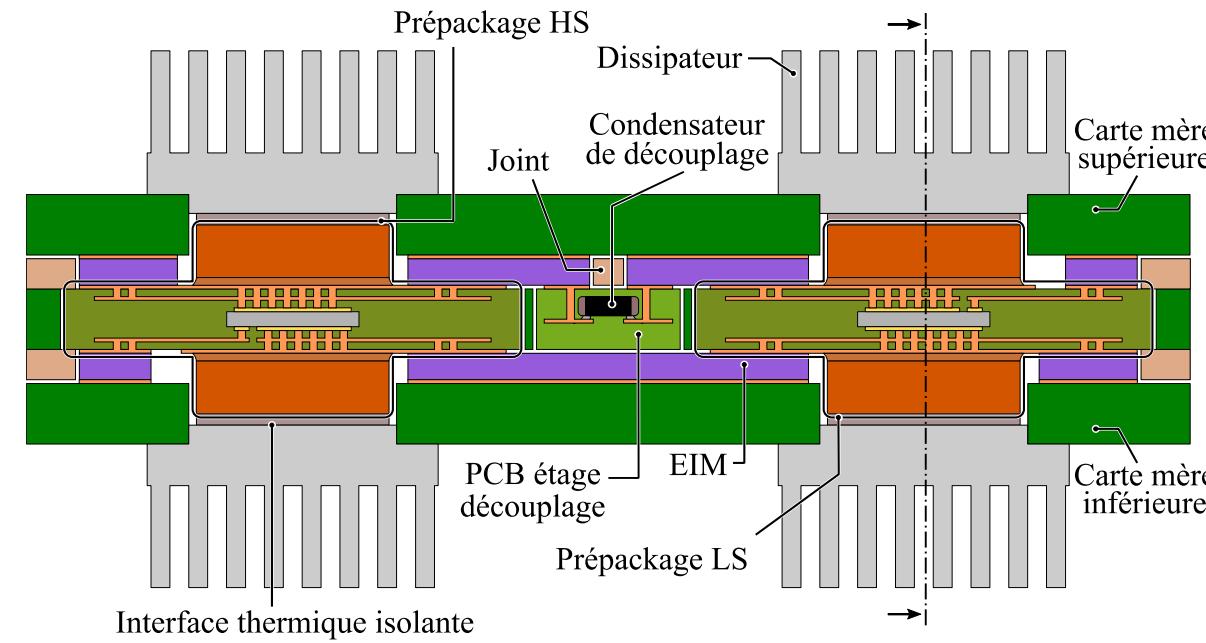
- Réalisation d'un second prépackage
- Assemblage de 2 cellules de commutation au travers de plaques à eau
- Caractérisation électrique (L_s) et thermique (R_{th})
- Démonstration de la modularité

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})



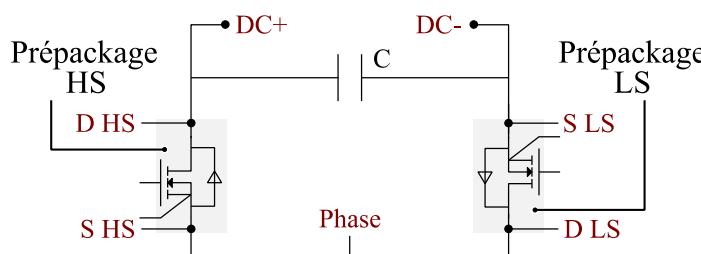
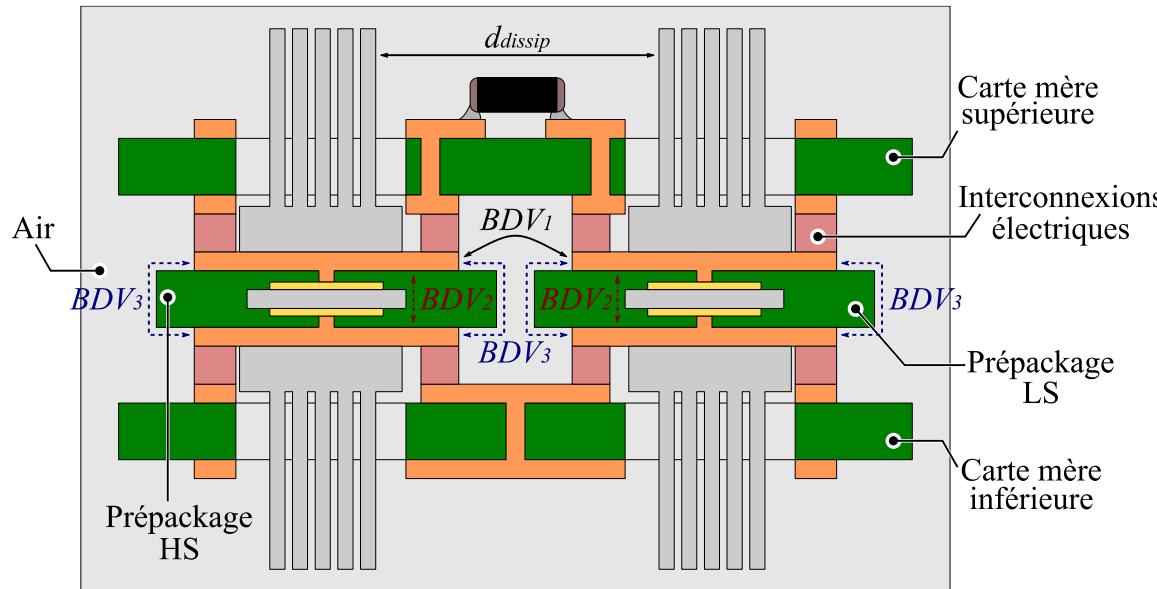
- Intégration de l'étage de découplage dans un PCB dédié pouvant être désassemblé

PERSPECTIVES

ISOLATION ÉLECTRIQUE

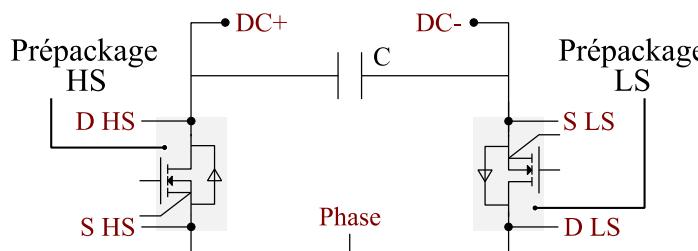
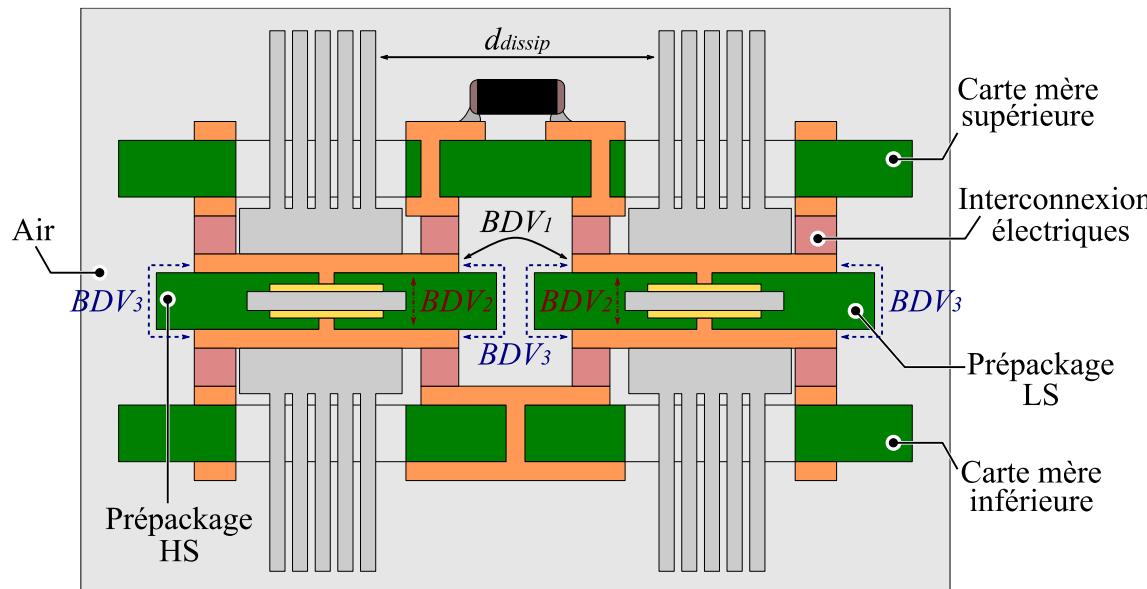
Isolation électrique

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



Isolation électrique

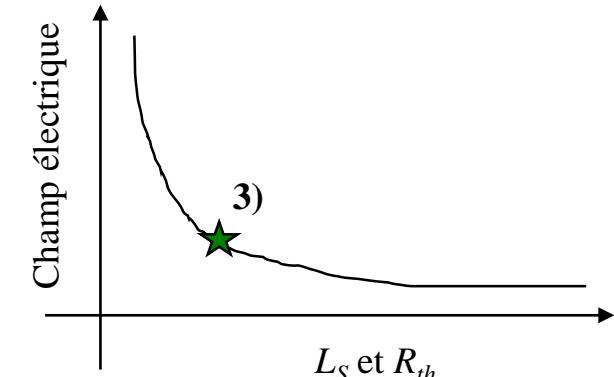
☒ Étude centrée sur une partie de l'assemblage de puissance



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

3) Optimum

- Champ électrique
- Maille de commutation
- Refroidissement



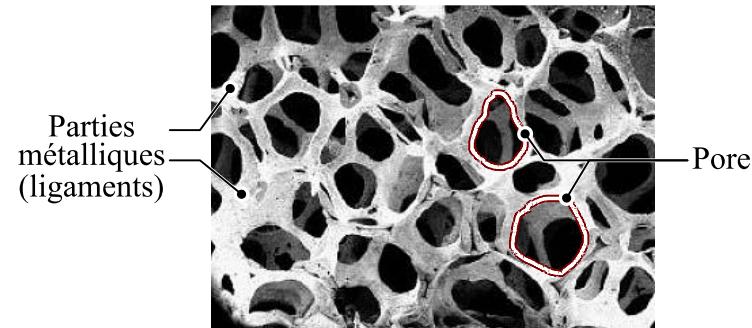
- Étude en simulation numérique d'un assemblage complet
- Étude d'autres stratégies d'isolation (coating, barrière matérielle, etc)

Interconnexions électriques

☒ Aucune connaissance des propriétés physiques des matériaux poreux

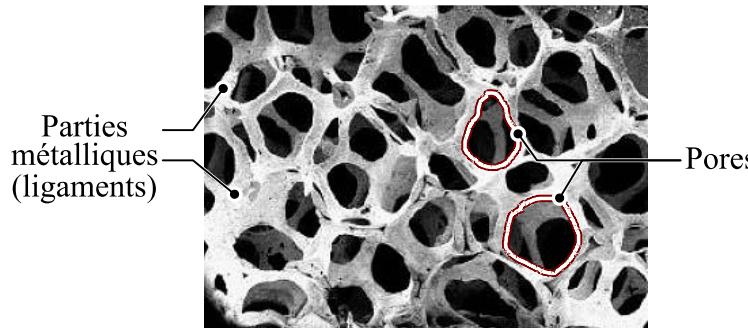


- Caractérisations supplémentaires sur le plan matériau :
 - Conductivité électrique équivalente
 - Conductivité thermique équivalente
 - Surface de contact
 - Mesure in-situ de l'épaisseur



Interconnexions électriques

☒ Aucune connaissance des propriétés physiques des matériaux poreux

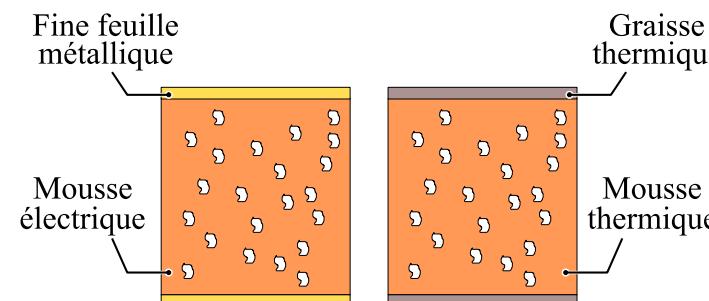


- Caractérisations supplémentaires sur le plan matériau :
 - Conductivité électrique équivalente
 - Conductivité thermique équivalente
 - Surface de contact
 - Mesure in-situ de l'épaisseur

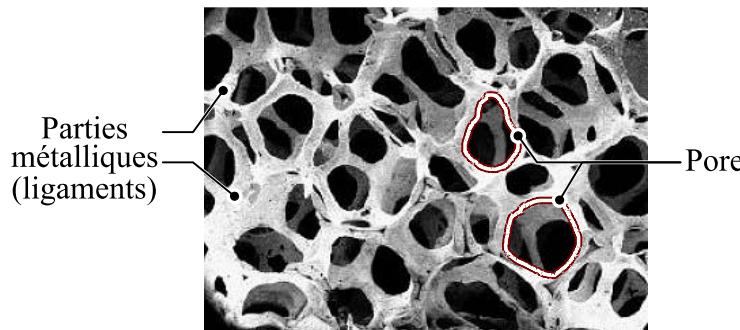
☒ Forte influence des résistances de contact



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



Interconnexions électriques

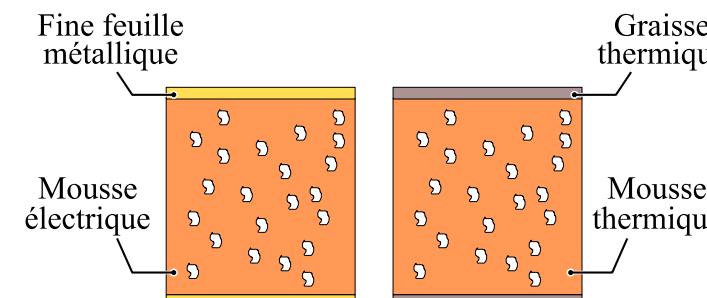


☒ Aucune connaissance des propriétés physiques des matériaux poreux

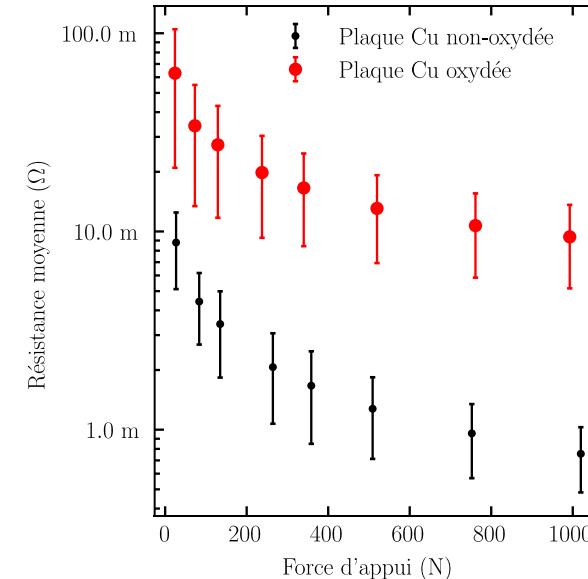
- Caractérisations supplémentaires sur le plan matériau :
 - Conductivité électrique équivalente
 - Conductivité thermique équivalente
 - Surface de contact
 - Mesure in-situ de l'épaisseur

☒ 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^{1,2}

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, Grenoble, France

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

Sous la direction de Yvan AVENAS¹ et le co-encadrement de Éric VAGNON²

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

**MERCI POUR
VOTRE ATTENTION**

