

# Intégration Hybride en électronique de puissance



**GDR** Groupement  
de recherche

**SEEDS** Systèmes d'énergie électrique  
dans leurs dimensions sociétales

Activités des laboratoires membres du GT  
« Circuit imprimé en électronique de puissance

29 mars 2022

Présenté par Cyril BUTTAY et Mickaël PETIT, avec la  
contribution des membres du GT PCB

# Génèse et périmètre du Groupe de travail « PCB »

## L'intégration de puissance, pour quoi faire?

Les composants grand gap permettent un fort gain de performances MAIS sont limités par leur mise en œuvre (packaging, intégration)

L'intégration constitue la principale voie d'amélioration des performances [1– 4]

IGBT Si	MOS SiC	HeMT GaN
≈100 nH	≈10 nH	≈1 nH
Module	Module + connectique améliorée	Intégration système (PCB, etc.)

[1] Johann W. Kolar. What are the big challenges in power electronics? In Proceedings of CIPS, Nuremberg, 2014.

[2] Jacobus Daniel van Wyk and Fred C Lee. On a future for power electronics. IEEE JESTPE 1(2):59–72, 2013.

[3] Seán Cian Ó Mathúna, et al. Packaging and integration

technologies for future high-frequency power supplies. IEEE trans on industrial Electronics, 51(6):1305 – 1312, 2004.

[4] Sayan Seal and Homer Alan Mantooth. High performance silicon carbide power packaging—past trends, present practices, and future directions. Energies, 10(3), 2017.

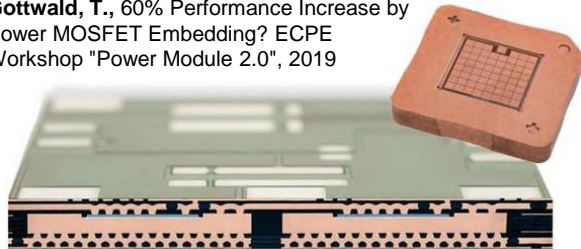
# Tendance en intégration de puissance – focus sur le PCB

## Tendances de fond:

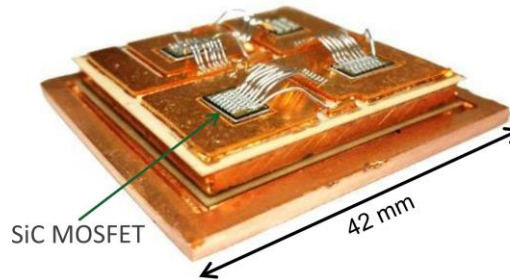
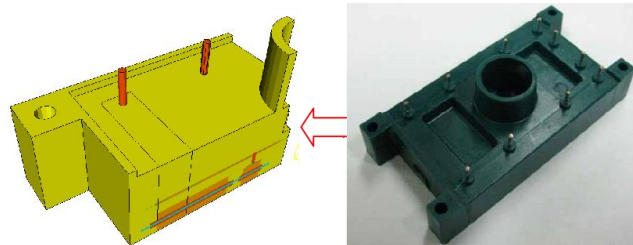
- Plus de cuivre
- Isolants plus fins, polymères pouvant remplacer la céramique
- CTE plus élevés
- Multicouches
- Interconnexion courtes

## Le PCB concentre tout cela!

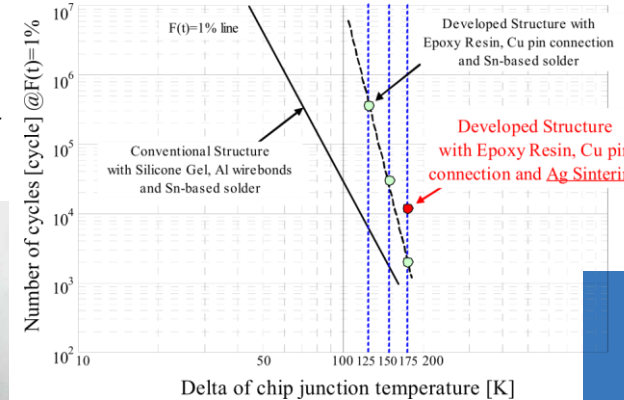
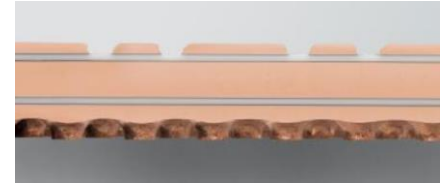
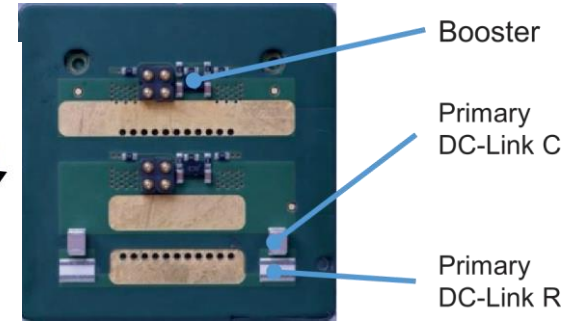
Gottwald, T., 60% Performance Increase by Power MOSFET Embedding? ECPE Workshop "Power Module 2.0", 2019



Horio, M et al., Ultra compact and high reliable SiC MOSFET power module with 200°C operating capability, ISPSD 2012

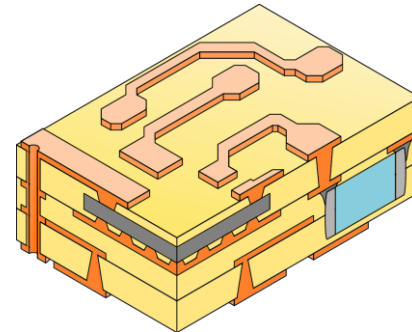
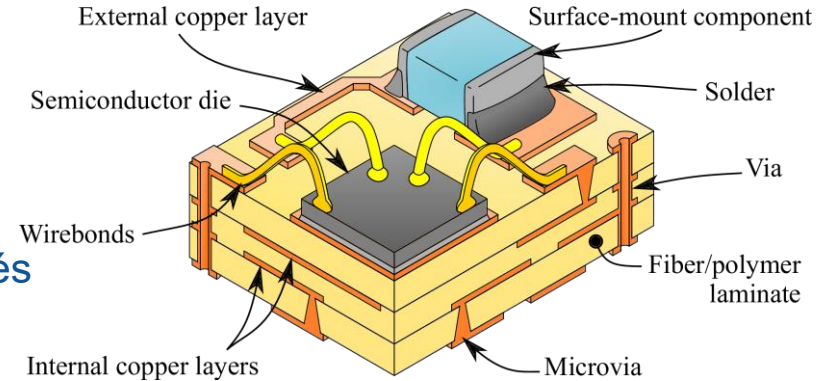


Marczok, C *et al.*, Low inductive SiC Mold Module with direct cooling PCIM Europe 2019  
 Welker, T *et al.*, Power System in Package based on Multilayer Ceramic Substrates, ECPE Workshop « Power module 2.0 », 2019



# Génèse du GT « Circuit imprimé en électronique de puissance »

- **Création d'un groupe de travail en 2015** pour permettre la discussion entre équipes travaillant sur l'intégration « PCB » (et notamment l'enfouissement)
- **2 réunions par an** (hors COVID!): bilan d'activités et échanges biblio (réunions couplées au GT Driver)
- **Ouvert aux académiques et ponctuellement aux industriels**
- **N'avait pas vocation à couvrir tout le périmètre d'ISP3D. Faut-il élargir ce périmètre à d'autres types d'élargissement?**



# Groupe de Travail Intégration Hybride

## Les laboratoires participants



# Intégration PCB / Packaging: Exemples d'équipements nécessaire

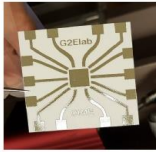
## découpe

- Scie Diamant-SiC : Discotom 20
- Laser fibre/Co2 : trotec Speedy 360 Flex
- Equipement de découpe Disco DAD321 (silicium et céramique)



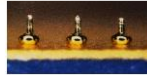
## Création de pistes

- Gravure Chimique double face : CIF
- Gravure sèche LPKF : LPKF Protomat
- Frittage de pistes sur alumine (pâte conductrice Ag)
- Gravure Laser de PCB et DBC (LPKF Protolaser ST)



## Métallisation – brasure - contact

- Banc de galvanoplastie: LPKF
- Machine de réparation ZEVAC
- Four à refusion CIF
- Bâti de métallisation
- Four de refusion sous vide Unitemp RSS110
- Équipement de wedge bonding, de ball bonding, de stud bump



## Positionnement de composants

- Pick an place PP6 (JFP) avec des capacités pour le report flip chip
- Equipement de report BGA (ERSA IR/PL 550) + les équipements classiques de montage CMS



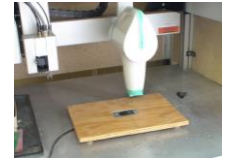
## Pressage

- Multipress : LPKF



## Inspection

- Inspection à Rayon X



Disponible à :

- Grenoble
- Saclay



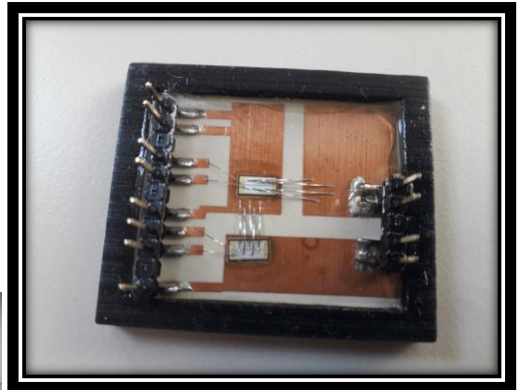
# Plateforme 3Dphi : exemple de techno et de réalisation



## Module SiC sur SMI



## Réalisation du boîtier



Gravure du substrat

Nettoyage plasma

Brasure des puces

encapsulation

Réalisation des connectiques : wire bonding



## Thématiques impactées par l'intégration PCB

### Technologie

- Procédé de fab.
- Reprise de contact

### Aspects technologiques

### Matériaux

- Diélectrique
- Magnétique

## Intégration PCB

### Contraintes d'usage

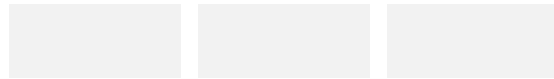
- CEM
- Gestion thermique
- Fiabilité

### Aspects conceptuels

### Design

- Règles de routage
- Utilisation des logiciels

# Activité des membres du Groupe de travail « PCB »



# Aspects Design



## Historique

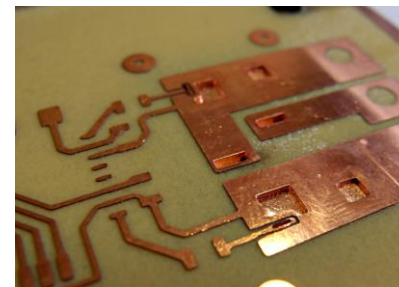
- Projet ANR ETHAER (collaboration Geeps sur l'intégration)
- 4 Thèses CIFRE Mitsubishi Electric R&D Europe depuis 2014

## Problématiques

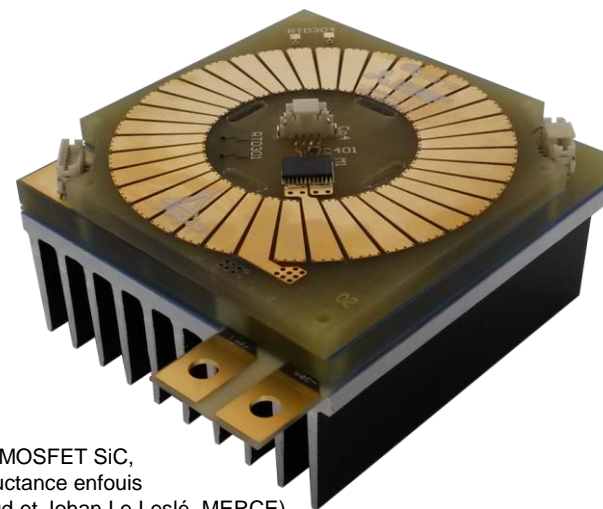
- Développer les méthodes de conception (génération automatique de modèles, validation automatique)
- Améliorer les performances par des développements technologiques (refroidissement intégré, pré-packaging de puces...)

## Résultats notables et perspectives

- Premier convertisseur « tout enfoui »
- Génération automatique de modèle électrique depuis la CAO
- Dépôt de projet ANR (pré-packaging et composants magnétiques) avec SATIE/Laplace/CIMULEC.



Cellule de commutation IGBT-diode réalisée à 3DPI  
(thèse Chenjiang Yu, projet ETHAER)



Cellule PFC 825W à MOSFET SiC,  
Puces, drivers et inductance enfouis  
(thèses Rémy Caillaud et Johan Le Leslé, MERCE)

# Contraintes d'usage

## Historique

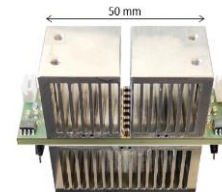
- Projets institutionnels (5 thèses) : Projet ANR CopperPack (en cours – Safran-SIMAP), projet ANR DESTINI (début mars 2022 – Ampère-SATIE-LAPLACE), projet Région (démarrage), différents projets de collaborations locales (Idex)
- 2 thèses CIFRE (Mitsubishi Electric R&D Europe, SAFRAN), Mise à disposition d'un personnel SAFRAN (plan de relance), 1 thèse VedecoM, 1 thèse IRT Nanoelec (SATIE), 1 thèse SATT Linksiium

## Problématiques principales

- Utilisation de la 3D et de la techno PCB pour la gestion des éléments parasites et une diminution de la génération de perturbations conduites et rayonnées
- Refroidissement double face avec une répartition des sources de chaleur dans le volume du dissipateur et par refroidissement direct (isolation par le fluide de refroidissement – air/liquide/diphase) pour augmenter la densité de puissance

## Résultats notables et perspectives

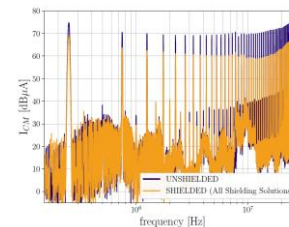
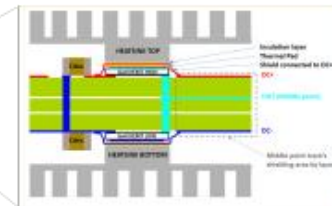
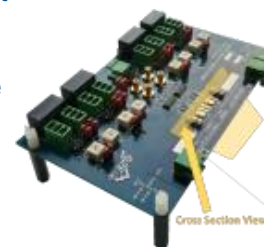
- Démonstrateur TAPIR à forte intégration et modulaire
- Blindage électromagnétique et filtre CEM dans le PCB de puissance



3 cellules avec puces enterrées



Démonstrateur TAPIR (thèse WF Bikinga)



PCoC à GaN IRT PowerGaN (thèse P Derkacz)

# Réduction des inductances structurelles

## Historique

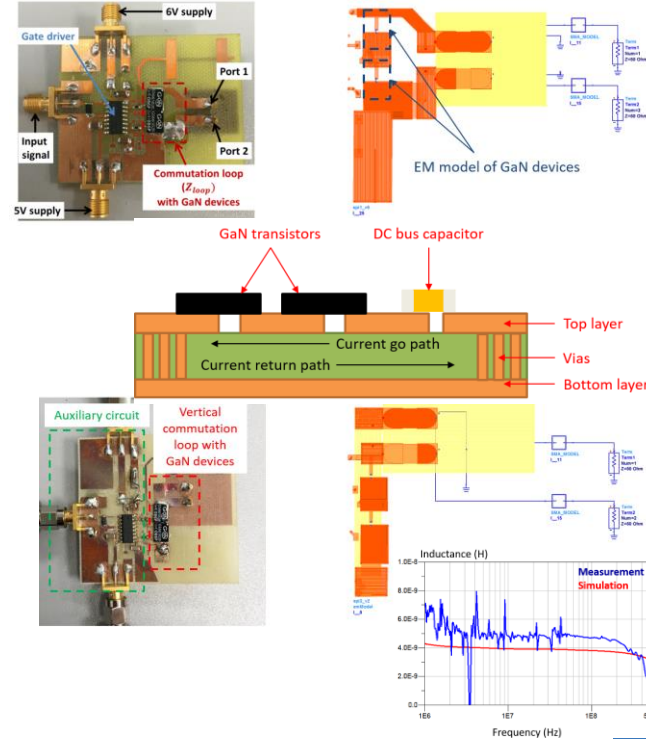
- Meilleure intégration des convertisseurs de puissance (CEM et grands gaps)
- Projet CPER-CE2I (Convertisseur d'Énergie Intégré Intelligent)
- 1 thèse modélisation des composants dans les convertisseurs HF (L. Pace 2016-2019)

## Problématiques

- Comment optimiser le routage du convertisseur pour un fonctionnement haute-fréquence ( $> 1$  MHz,  $> 1$  kW) ?
- Compromis entre inductances parasites (PCB) et thermique
- Quelles solutions performantes, intégrées et industrialisables ?

## Résultats notables et perspectives

- Modélisation haute-fréquence (paramètres S) des composants packagés et des éléments distribués (inductances, capacités) dans le PCB
- Méthode de conception de PCB des convertisseurs HF
- Impact sur la thermique des convertisseurs HF et méthodologie de compromis



L. Pace & al. Modeling of Commutation Loops Inductances in GaN-Based Power Converters Using S-Parameters and EM Simulations, Energies 2021, 14, 1495. <https://doi.org/10.3390/en14051495>





# Technologie : assemblage par frittage de cuivre épais

## Historique

Projet Région ASPEEC : solution alternative aux alliages de brasage dans les assemblages de puissance pour la conversion de l'énergie embarquée (début : 1/10/2010, fin : 30/09/2013)

Projet Région DARDAR: Design of Innovative Power Assembly using double face heat transfer cooling and based on silver sintering for aeronautics, automotive and railway transportation applications, (début: 1/10/2014, fin: 1/10/2017)

Thèse CIFRE VEDECOM (début: 01/10/2019, fin 31/09/2022)

## Problématiques

Développer des nouvelles architectures d'assemblage

Améliorer les performances électriques, thermique et la fiabilité des modules de conversion d'énergie

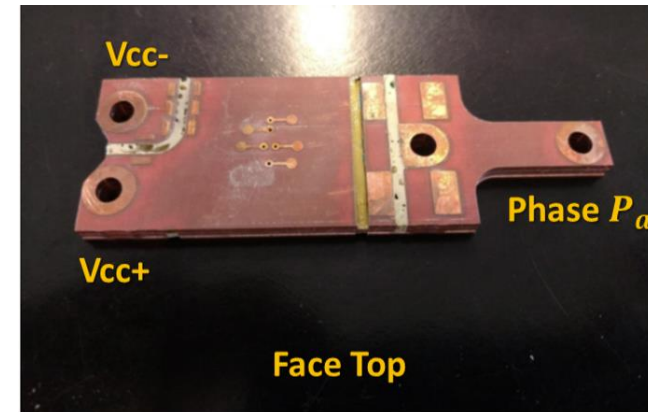
## Résultats Notables et perspectives

Réalisation d'un démonstrateur de module onduleur Triphasé à une seule étape de frittage

Enfouissement de composants de puissance 800V dans du cuivre épais



Deux démonstrateurs de module onduleur triphasé vertical double face (thèse Maxime Barrière)



# Technologie d'intéconnexion

## Historique

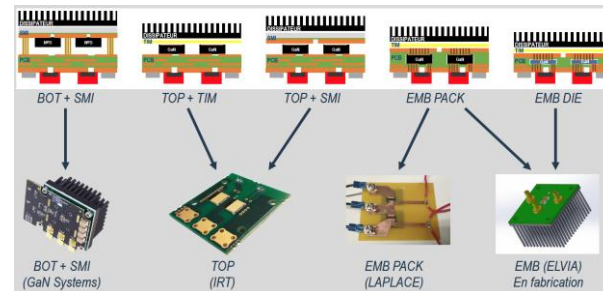
- Projet FEMINA et thèses autour des grands gaps (N.Videau, O. Goulard)
- Projet PGIP (RTRA - IRT) 2018-2019
- 1 Thèse CIFRE Mitsubishi Electric R&D Europe (B. Djuric 2017-2020)

## Problématiques

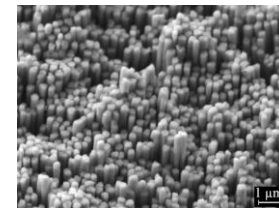
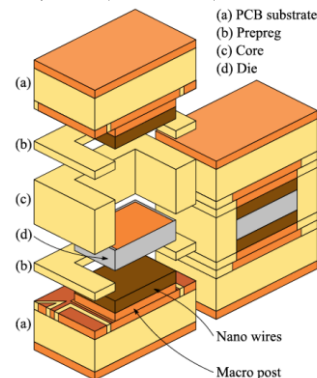
- Quelle interconnexion électrothermique fiable et performante pour les systèmes intégrés, quelles alternatives aux microvias ?
- Quels matériaux isolants autour des semi-conducteurs enfouis
- Quelles séquences technologiques adaptées aux contraintes

## Résultats notables et perspectives

- Une solution d'interconnexion électriquement performante ( $R < 50 \mu\Omega \text{cm}^2$ ), de nombreux degrés de liberté à explorer
- Une caractérisation thermique fine à conduire avec compréhension des mécanismes de vieillissement (thèse CIFRE en cours)
- De nouveaux isolants plus fiables et adaptés au packaging (thèse en cours)



Projet PGIP (IRT-LAPLACE)



SEM acquisition (x10,000) of the nano wires 40° tilted top view



Bojan Djuric, & al. Double Side Interconnection for Vertical Power Components Based on Macro and Nano Structured Copper Interfaces and Printed Circuit Board Technologies, MINAPAD 2019 May 22nd-23rd, Grenoble France

# Matériaux diélectriques

## Historique

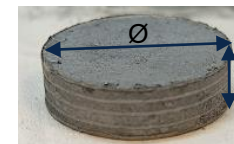
- Chaire partenariale senior (ENIT, UPPA, CIRIMAT, SAFRAN, DEEPConcept) – depuis septembre 2020

## Problématiques

- Développer des méthodes de conception pour des céramiques multifonctionnelles : élaborer une céramique à gradient de propriété
  - Capacitive, Thermique, Tenue diélectrique, Tenue mécanique
- Améliorer les forme d'ondes en commutation, par l'intégration de fonctions dans des modules de puissance à base de substrats céramiques

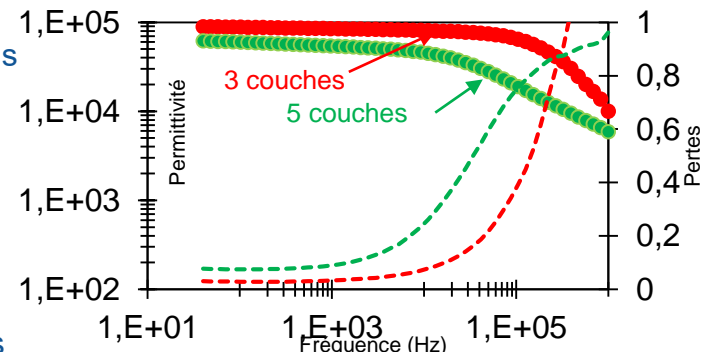
## Résultats notables et perspectives

- Première étape : optimisation de la synthèse de poudre céramique et du procédé de mise en forme pour l'obtention de céramiques à permittivité colossale
- Deuxième étape : cofrittage multicéramique-métal en conservant les propriétés électriques recherchées (adaptation des contraintes et des propriétés)
- En cours : élaboration d'une forme complexe pour mise en œuvre (brevet en cours)



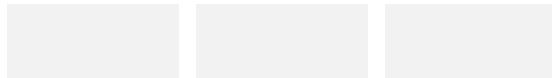
Ø : de 8mm à 15 mm  
e : de 2 à 4 mm

Illustration d'un assemblage sandwich, cofritté multicéramique métal, (thèse de Romain Raison - UPPA LGP CIRIMAT)



$\epsilon_r$ ,  $\tan(\delta)$  d'assemblage sandwich multicéramiques métal (thèse de Romain Raison - UPPA LGP CIRIMAT)

# Perspectives



## Perspectives de recherche

- **Analyse du cycle de vie**
  - Conflit entre intégration, réparabilité ou recyclage / récupération des métaux (G2ELAB)
  - Utilisation de matériaux à faible impact environnemental
- **Prototypage virtuel et CAO**
  - Coût élevé du prototypage
  - Accès difficile pour les mesures
  - Besoin de vrai prototype virtuel
- **Prise en compte des problématiques industrielles**
  - Importance de la *Supply chain*
  - Transferts technologiques lents
- Evolution de procédés établis (PCB) plutôt que nouvelle techno
- **Besoin en nouveaux Matériaux**
- **Lien avec l'intégration « ultime »**
  - Puce et driver sur même puce
  - A prendre en compte sur le design PCB
  - Définir le périmètre d'application de l'intégration hybride, monolithique, les technos de packaging avancé type fan-out...
- **Liens avec la Fiabilité => intégration des aspects fiabilité dès la conception**

Merci pour votre attention



**GDR** Groupement  
de recherche

**SEEDS** Systèmes d'énergie électrique  
dans leurs dimensions sociétales

---

<https://seeds.cnrs.fr/>

[www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)