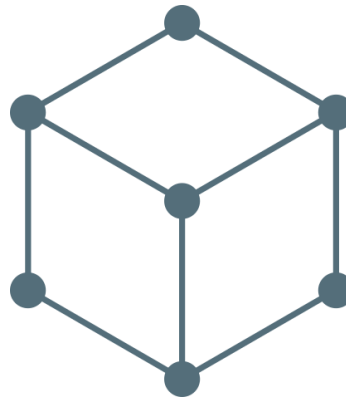


SIMBA

Next-Gen Power Electronics Simulation Software

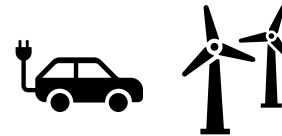


Guillaume Fontès,

Maître de Conférences INPT / Laplace

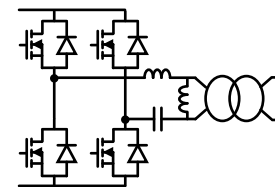
Consultant Powersys

SIMBA - Logiciel de Simulation en Electronique de Puissance



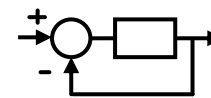
Versatile Applications

EV & energy systems...



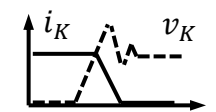
Converter Design

Power quality & efficiency...



Control Design

Continuous, discrete systems...



Detailed Simulation

Detailed transients, EMI...



Points forts

1



Solveur : rapidité + robustesse



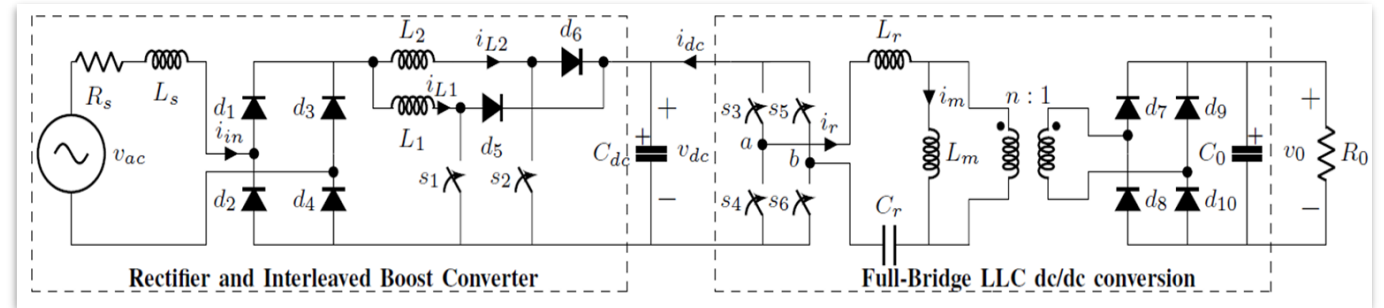
1



Solveur : rapidité + robustesse

► Objectifs :

- Précision
- Rapidité
- Génération de données
- Moteur de calcul



	SIMBA	Other power electronics tool
Relative error (max L2 Norm)	0.0501%	---
Simulation time	8 seconds	58 seconds
Calculation points	1,988,464	3,759,001

- Achieved similar accuracy in less than 15 % of the calculation time by a competitor tool



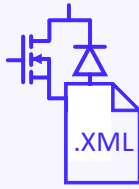
Points forts

1

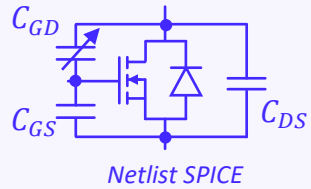


Solveur : rapidité + robustesse

2



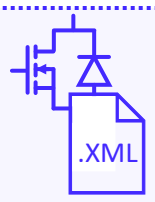
ou



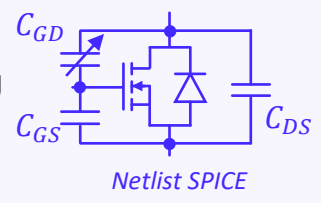
Simulation « système » ou niveau composant



2

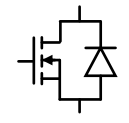


ou



Simulation « système » ou niveau composant

Different modèles d'interrupteurs
semiconducteurs

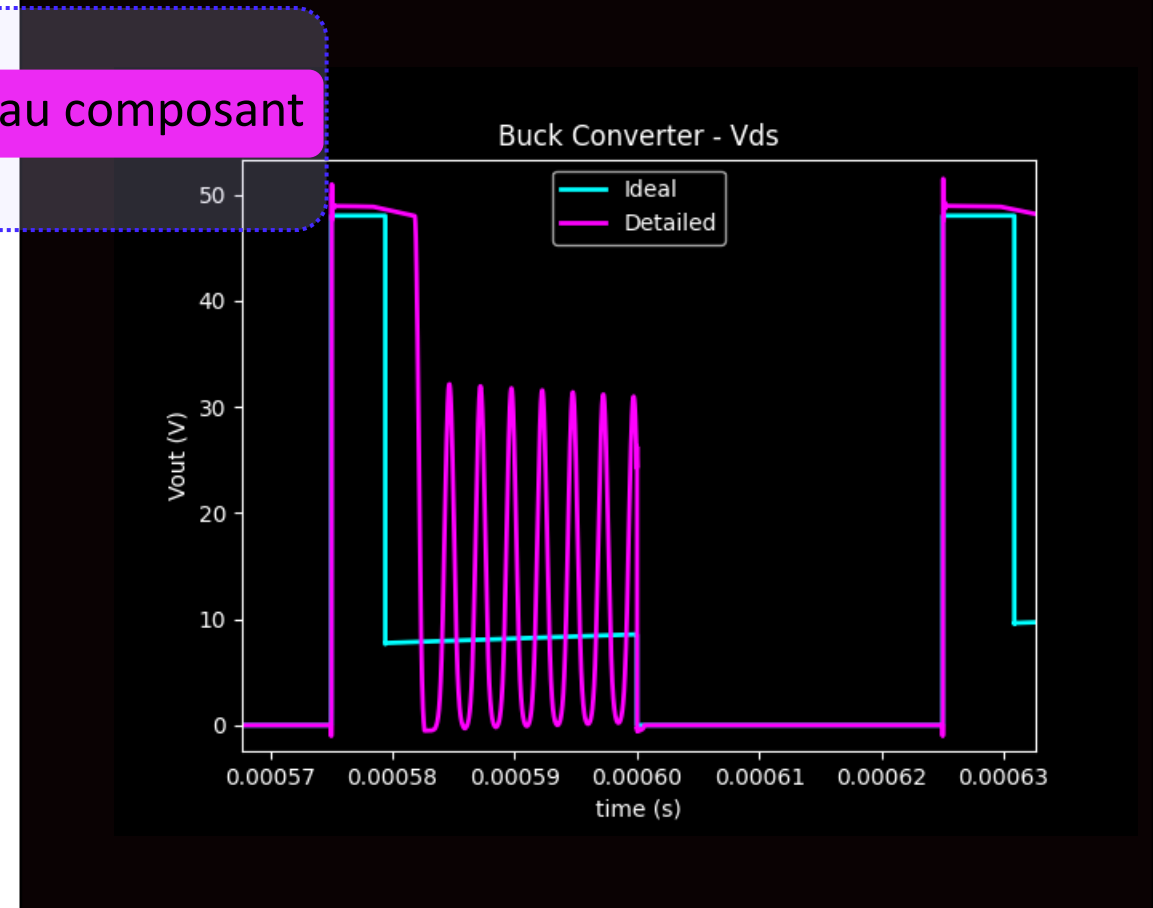
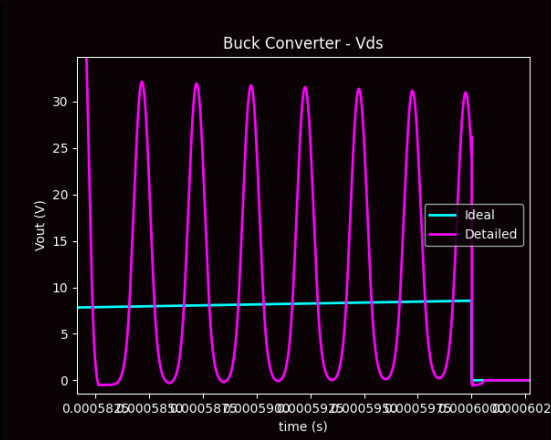
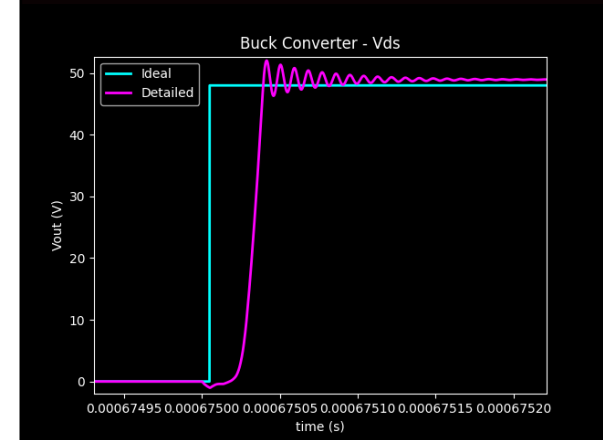
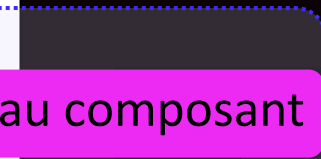


Modèles idéaux + Description thermique

Modèles détaillés

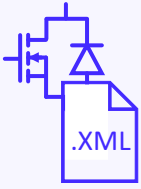
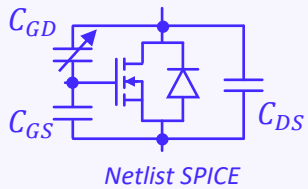
Niveau "système"

Niveau "commutation"

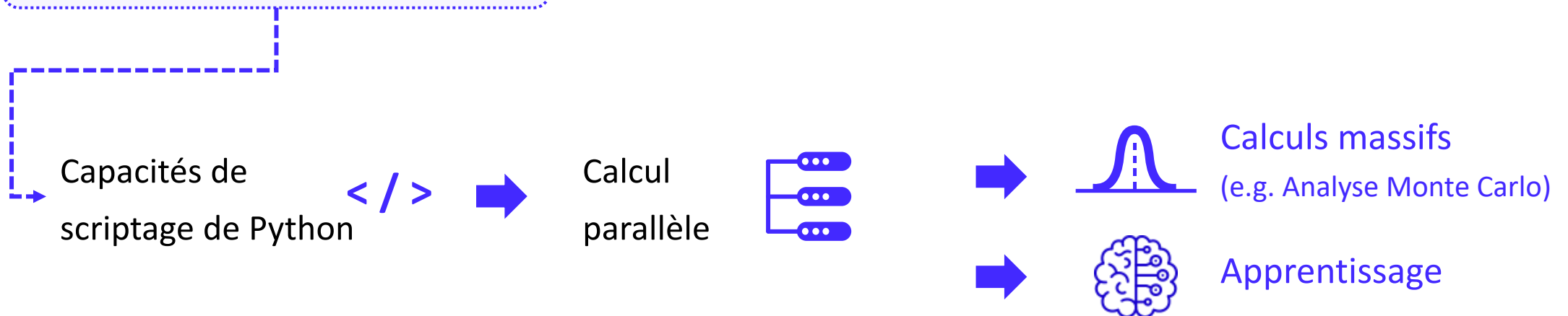


Points forts

1  Solveur : rapidité + robustesse

2  ou  Simulation « système » ou niveau composant

3  Module Python natif



3



Module Python natif

</>

```
if __name__ == "__main__": # Called only in main thread.
```

```
manager = multiprocessing.Manager()
```

```
result_dict = manager.dict()
```

```
i=0
```

```
jobs=[]
```

```
lock = manager.Lock()
```

```
pool_args = []
```

```
# Prepare arguments
```

```
for L in LN_RANGE:
```

```
for Q in Q_RANGE:
```

```
Lr = (Q*RO_RATED_PRI)/(2*np.pi*F_RES)
```

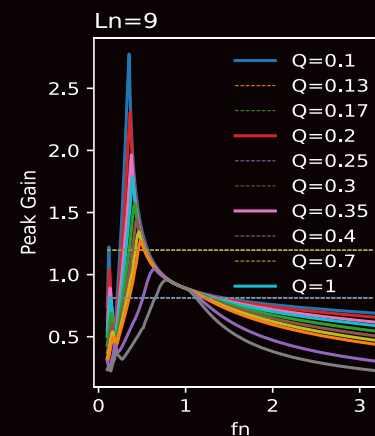
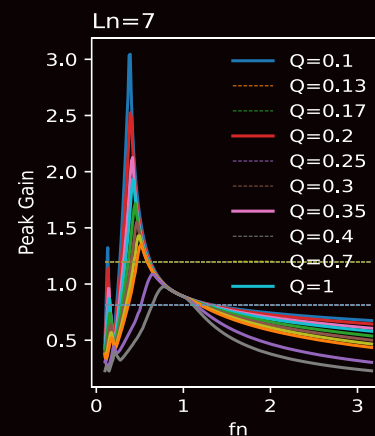
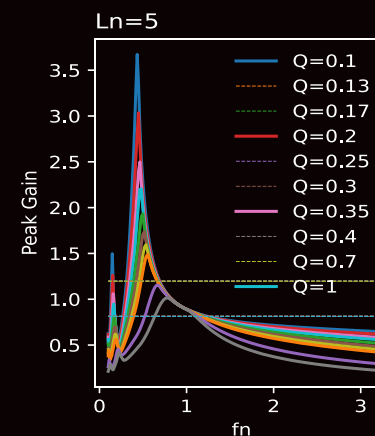
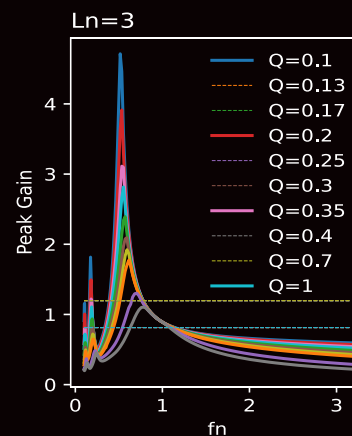
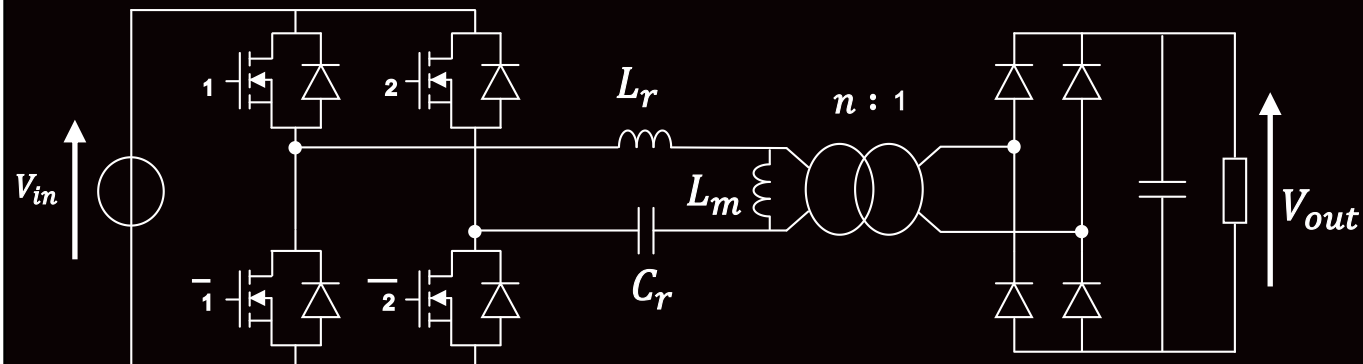
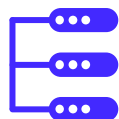
```
Cr = 1/(2*np.pi*F_RES*Q*RO_RATED_PRI)
```

```
Lm = L*Lr
```

```
for fin in FIN_RANGE:
```

```
pool_args.append((Lr, Cr, Lm, fin, i, result_dict, lock)):
```

```
i=i+1
```





Module Python natif

► Large collection d'exemples (<https://github.com/aesim-tech/simba-python-examples>)

► Tutorials... Desktop Application Examples... Python Library Examples...

Info

#	Link	Title	Topology	Application	Topic #1	Topic #2	Topic #3
01		Run Simulation	DC-DC	Basics			
02		Parameter Sweep	DC-DC	Basics			
03		Create Circuit	DC-DC	Basics			
43		Efficiency map of a motor drive inverter (including JMAG-RT model)	DC-AC	Motor Drives	JMAG	Thermal	Parallel Computing
44		Modulation Strategies of a Motor Drive Inverter (including JMAG-RT model)	DC-AC	Motor Drives	JMAG	Thermal	Control
45		Enable and use the compress scopes feature		Basics			
46		Loss Evaluation in a Dual Active Bridge (DAB) Converter	DC-DC	Power Supplies	Thermal	Magnetics	



3



Module Python natif

► « Simba Assistant » (*Fine-Tuning GPT-o3*)



Fine-Tuning

=



+



Alternative ?



RAG (Ollama...)



Lisibilité du circuit construit



« Circuit Builder »

```
1  from aesim.simba import Design, CircuitBuilder
2
3
4  # -----
5  # 1) Design & Transient analysis
6  # -----
7  design = Design()
8  design.Name = "DC-DC Interleaved Buck Chopper (CircuitBuilder)"
9  ta = design.TransientAnalysis
10 ta.TimeStep = 1e-9
11 ta.EndTime = 5e-4
12
13 # -----
14 # 2) Place ALL devices with CircuitBuilder
15 # -----
16 b = CircuitBuilder(design.Circuit)
17 b.StartZone("Power") # Zones to keep Power and Control apart
18
19 # Power source and local grounds (mirroring the original multiple grounds)
20 DC1 = b.AddDevice("DC Voltage Source"); DC1.Name = "DC1"; DC1.Voltage = 24
```



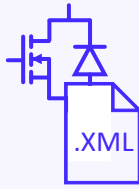
Points forts

1

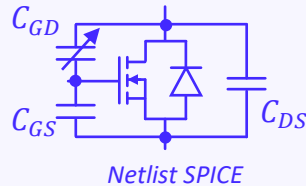


Solveur : rapidité + robustesse

2



ou



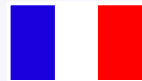
Simulation « système » ou niveau composant

3



Module Python natif

4



Logiciel Français + support local & réactif

5



Volonté de créer un fort Partenariat avec le monde académique

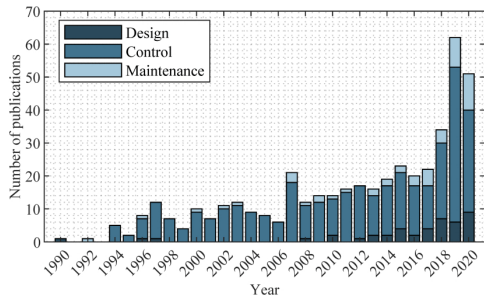
IA pour le design en électronique de puissance

Journées de clôture PowerAlps

Pauline Kergus

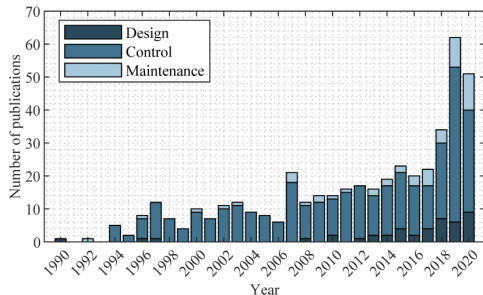
10 Septembre 2025

Utilisation de l'IA en EP



An Overview of Artificial Intelligence Applications for Power Electronics, S. Zhao, F. Blaabjerg and H. Wang, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021

Utilisation de l'IA en EP

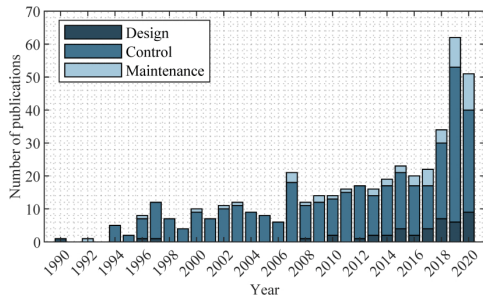


Design

- ▶ Obj = Gain de temps
- ▶ Modèles de substitution
- ▶ Méta-heuristiques

An Overview of Artificial Intelligence Applications for Power Electronics, S. Zhao, F. Blaabjerg and H. Wang, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021

Utilisation de l'IA en EP



Design

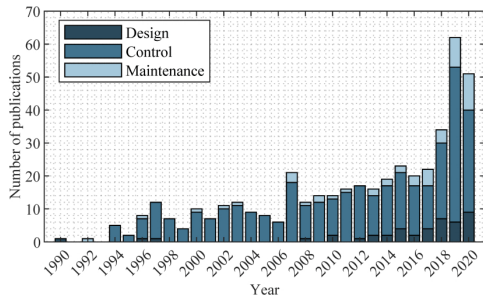
- ▶ Obj = Gain de temps
- ▶ Modèles de substitution
- ▶ Méta-heuristiques

Commande

- ▶ Obj = Simplifier le design
- ▶ Logique floue
- ▶ Réseaux de neurones, RL

An Overview of Artificial Intelligence Applications for Power Electronics, S. Zhao, F. Blaabjerg and H. Wang, IEEE Transactions on Power Electronics, 2021

Utilisation de l'IA en EP



Design

- ▶ Obj = Gain de temps
- ▶ Modèles de substitution
- ▶ Méta-heuristiques

Commande

- ▶ Obj = Simplifier le design
- ▶ Logique floue
- ▶ Réseaux de neurones, RL

Maintenance

- ▶ Obj = Modèles sur mesure
- ▶ Modèles (régression)
- ▶ Décision (classification)

An Overview of Artificial Intelligence Applications for Power Electronics, S. Zhao, F. Blaabjerg and H. Wang, IEEE Transactions on Power Electronics, 2021

Utilisation de l'IA en EP

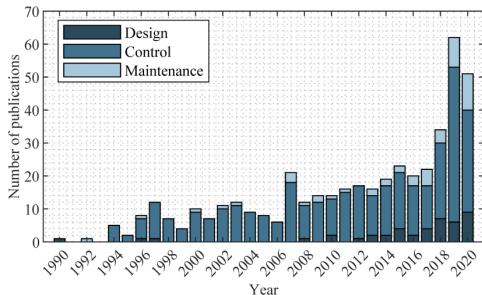


TABLE VI
REQUIREMENTS OF AI FOR EXEMPLARY APPLICATIONS IN DESIGN,
CONTROL, AND MAINTENANCE

Requirements	Heatsink design (Design)	Intelligent controller (Control)	RUL prediction (Maintenance)
Computation Effort	+++	++	++
Algorithm Speed	+	+++	++
Accuracy	++	+++	+++
Dataset requirement	+	+	+++
Interpretability	+	+++	+++

High: +++, moderate: ++, low: +.

Design

- ▶ Obj = Gain de temps
- ▶ Modèles de substitution
- ▶ Méta-heuristiques

Commande

- ▶ Obj = Simplifier le design
- ▶ Logique floue
- ▶ Réseaux de neurones, RL

Maintenance

- ▶ Obj = Modèles sur mesure
- ▶ Modèles (régression)
- ▶ Décision (classification)

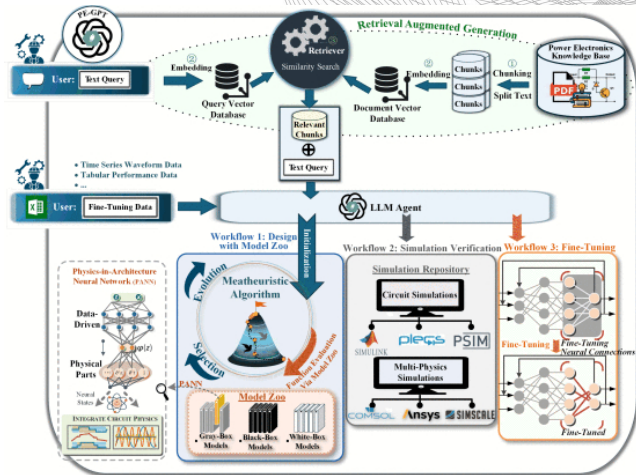
An Overview of Artificial Intelligence Applications for Power Electronics, S. Zhao, F. Blaabjerg and H. Wang, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021

Focus sur PE-GPT

Design automatisé de convertisseurs en 2 niveaux :

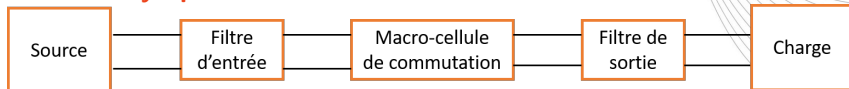
- Hétérogénéité des données et des tâches à effectuer
- ▶ Un LLM (GPT4) + RAG pour la formalisation du cahier des charges
- ▶ Des workflows complémentaires
 - ▶ Design
 - ▶ Simulation
 - ▶ Fine tuning à partir de données

PE-GPT: A New Paradigm for Power Electronics Design, F. Lin et al., IEEE Transactions on Industrial Electronics, April 2025



Vers un design automatisé

► Calcul analytique



Avantages :

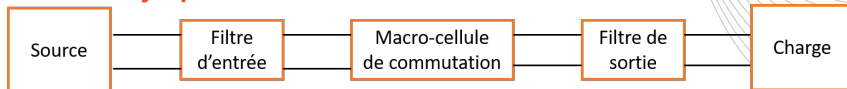
- Modularité / variété d'architectures
- Simulation incluse

Limitations :

- En régime permanent et en BO
- Temps de calcul

Vers un design automatisé

► Calcul analytique



Avantages :

- Modularité / variété d'architectures
- Simulation incluse

Limitations :

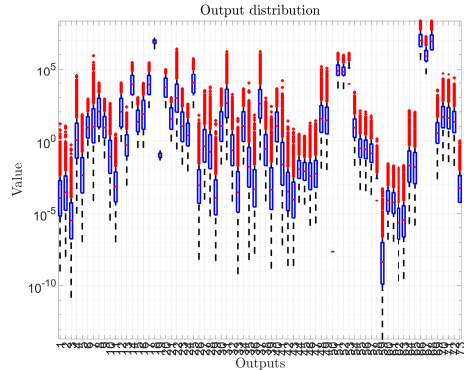
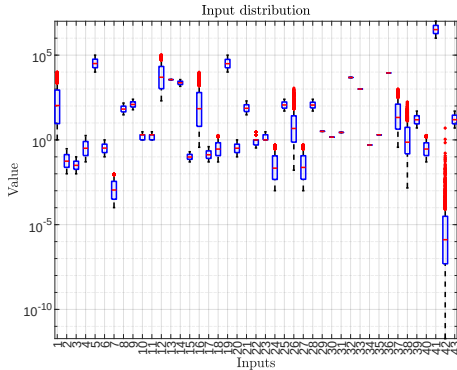
- En régime permanent et en BO
- Temps de calcul

► Modèle de design



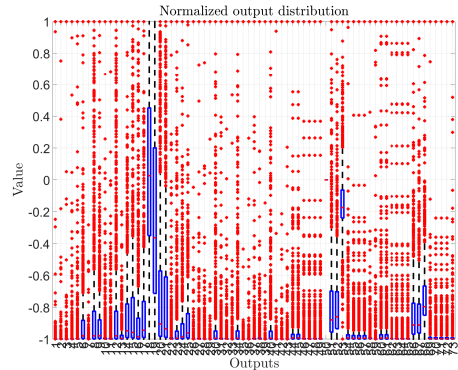
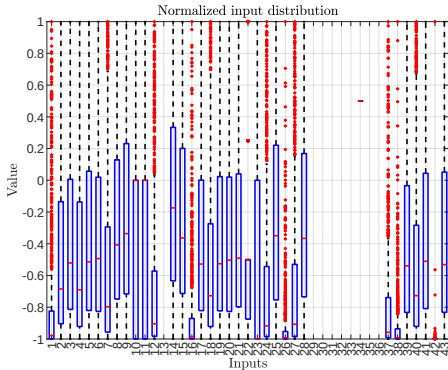
Construction d'une base de donnée

- ▶ Génération de 1000 designs aléatoires
 - ▶ 43 entrées : spécifications + *design drivers* (DC-DC uniquement)
 - ▶ 73 sorties : valeurs des paramètres correspondants récupérés sur PLECS

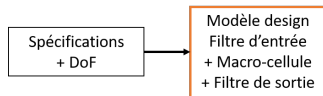


Construction d'une base de donnée

- ▶ Génération de 1000 designs aléatoires
 - ▶ 43 entrées : spécifications + *design drivers* (DC-DC uniquement)
 - ▶ 73 sorties : valeurs des paramètres correspondants récupérés sur PLECS

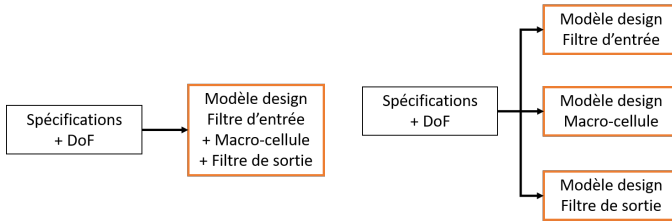


Structure du modèle de design



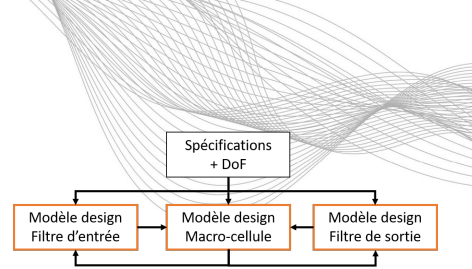
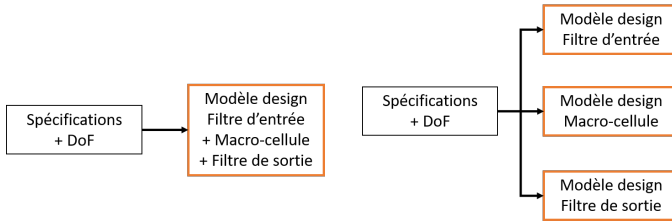
- ▶ Pas de modularité

Structure du modèle de design



- ▶ Pas de modularité
- ▶ Modularité préservée
- ▶ Pas de connexions entre les différents éléments

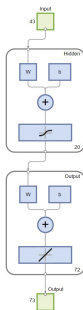
Structure du modèle de design



- ▶ Pas de modularité
- ▶ Modularité préservée
- ▶ Pas de connexions entre les différents éléments
- ▶ Réseaux de neurones interconnectés : boucle algébrique très complexe!!
- ▶ Ou version itérative (problèmes de convergence et de temps de calcul)

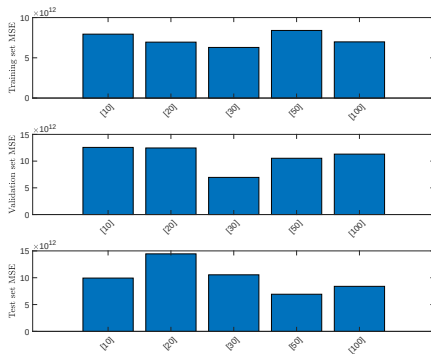
Premiers résultats

Modèle de design global



Une couche (*hidden layer*):

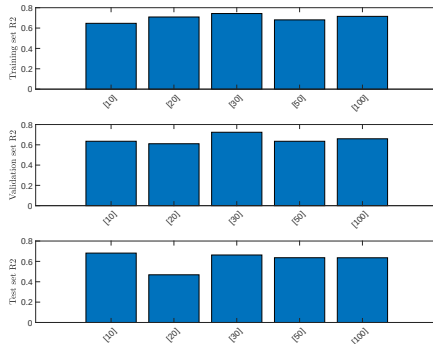
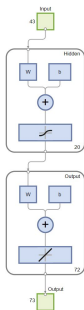
- ▶ Tansig (fct d'activation)
- ▶ 10, 20, 30, 50, 100 neurones



$$\text{MSE} = \frac{1}{Nn_y} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_y} (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2$$

Premiers résultats

Modèle de design global



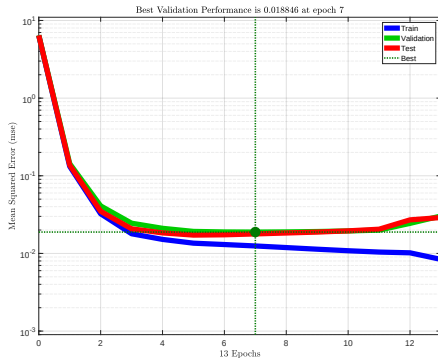
Une couche (*hidden layer*):

- ▶ Tansig (fct d'activation)
- ▶ 10, 20, 30, 50, 100 neurones

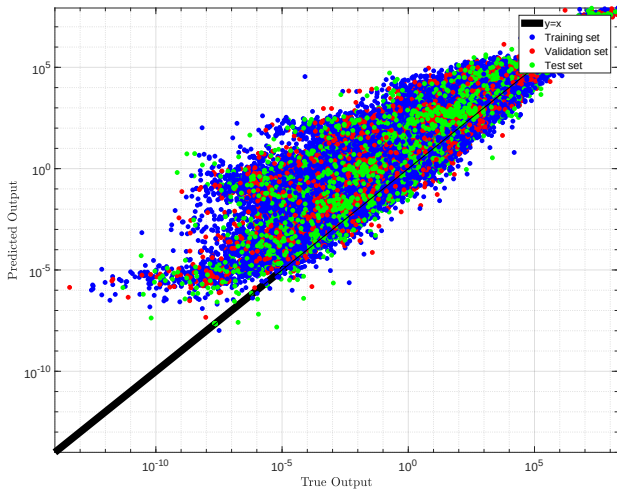
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_y} (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_y} (y_{ij} - \bar{y}_j)^2}$$

Entraînement du modèle global de design

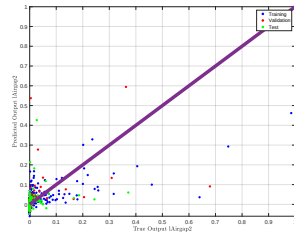
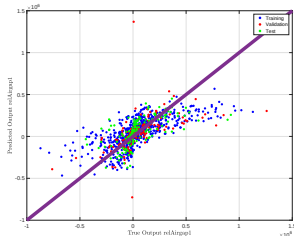
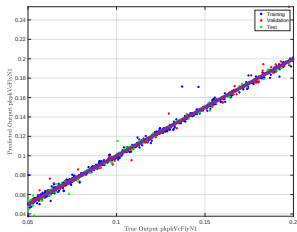
- ▶ Focus sur le réseau 1 couche 30 neurones
- ▶ Arrêt au bout de 13 epochs (9 minutes)



Performances du modèle global de design



Performances du modèle global de design



Et avec un modèle plus complexe?

Couches		1 layer					2 layers		
Neurones		10	20	30	50	100	10	20	30
MSE	train	7.94e12	6.95e12	6.29e12	8.40e12	6.98e12	1.56e13	7.37e12	8.19e12
	val	1.26e13	1.25e13	6.95e12	1.05e13	1.13e13	1.06e13	1.14e13	1.10e13
	test	9.94e12	1.44e13	1.05e13	6.92e12	8.39e12	1.66e13	5.63e12	8.22e12
R2	train	0.65	0.71	0.74	0.68	0.71	0.41	0.70	0.67
	val	0.64	0.61	0.72	0.63	0.66	0.47	0.67	0.63
	test	0.68	0.47	0.66	0.64	0.64	0.39	0.72	0.64

Et avec un modèle plus complexe?

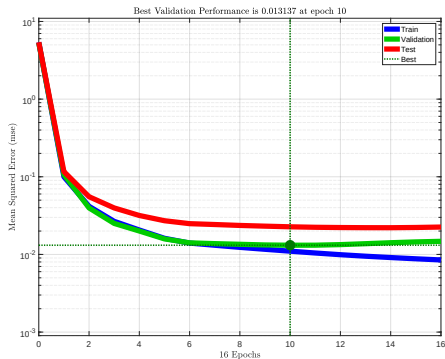
Couches		1 layer					2 layers		
Neurones		10	20	30	50	100	10	20	30
MSE	train	7.94e12	6.95e12	6.29e12	8.40e12	6.98e12	1.56e13	7.37e12	8.19e12
	val	1.26e13	1.25e13	6.95e12	1.05e13	1.13e13	1.06e13	1.14e13	1.10e13
	test	9.94e12	1.44e13	1.05e13	6.92e12	8.39e12	1.66e13	5.63e12	8.22e12
R2	train	0.65	0.71	0.74	0.68	0.71	0.41	0.70	0.67
	val	0.64	0.61	0.72	0.63	0.66	0.47	0.67	0.63
	test	0.68	0.47	0.66	0.64	0.64	0.39	0.72	0.64

$$\text{MSE} = \frac{1}{Nn_y} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_y} (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2$$

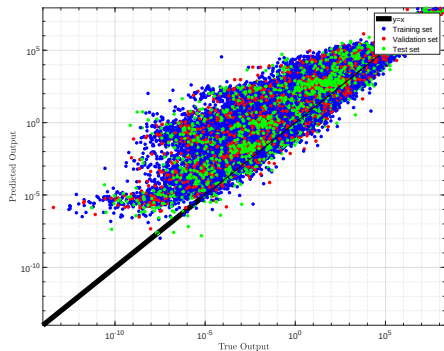
- ▶ Entraînement sur les entrées-sorties normalisées
- ▶ Performances calculées sur les prédictions dénormalisées!

Entraînement du modèle global de design

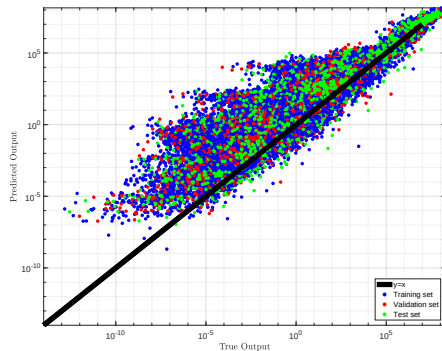
- ▶ Focus sur le réseau 2 couches de 30 neurones
- ▶ Arrêt au bout de 16 epochs (10 minutes)



Performances du modèle global de design



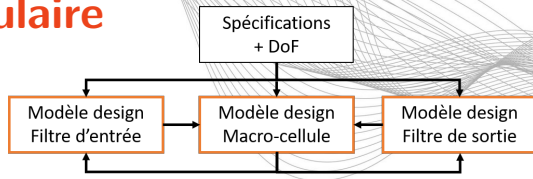
1 couche à 30 neurones



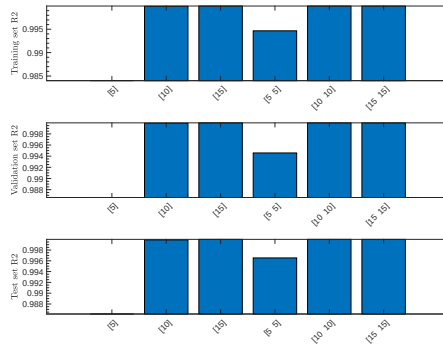
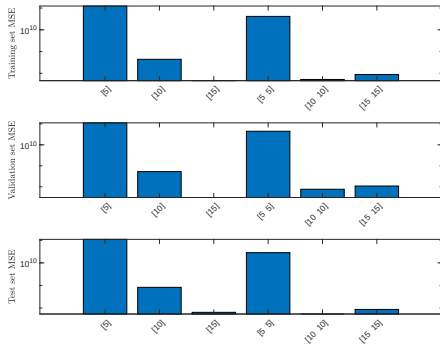
2 couches à 20 neurones

Vers une modélisation modulaire

Exemple de la macro-cellule

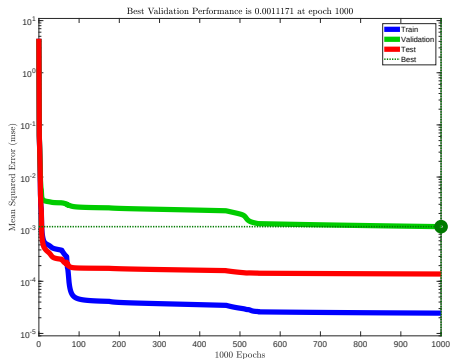


► 12 entrées et 8 sorties



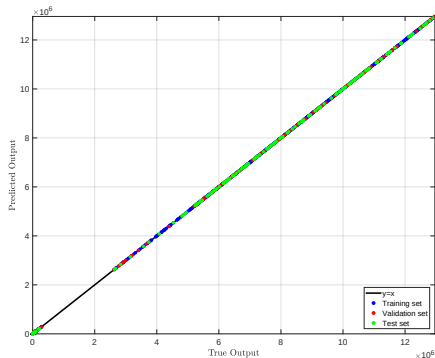
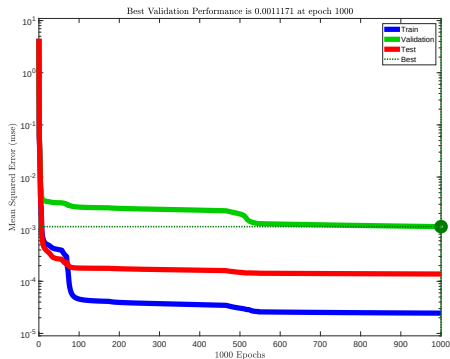
Entraînement du modèle de design de la macro-cellule

- ▶ Focus sur le réseau 1 couche 15 neurones
- ▶ Stop à 1000 epochs après 45,7 secondes seconds



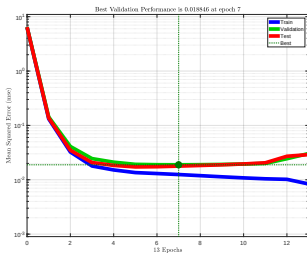
Entraînement du modèle de design de la macro-cellule

- ▶ Focus sur le réseau 1 couche 15 neurones
- ▶ Stop à 1000 epochs après 45,7 secondes seconds

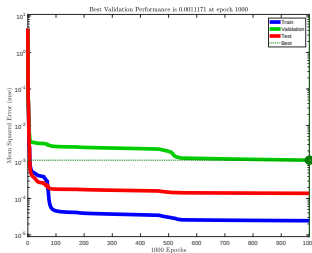


Discussions

- ▶ Optimisation des hyperparamètres
- ▶ Tester la capacité de généralisation au delà de la base de données
- ▶ Autres structures à explorer pour le modèle de design
 - ▶ Autres types de réseaux de neurones ou utilisation d'arbres de régression (gradient boosting)
 - ▶ Explorer la voie des 3 modèles indépendants
 - ▶ Intégrer de la physique



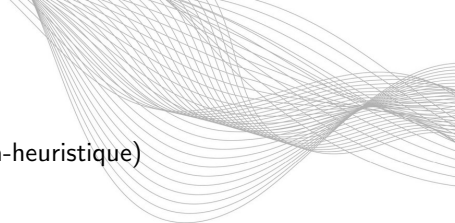
Entraînement du modèle de design global



Entraînement du modèle de design de
macro-cellule ~~Laplace~~

Discussions

- ▶ Modèle à intégrer dans une boucle d'optimisation (méta-heuristique)



Discussions

- ▶ Modèle à intégrer dans une boucle d'optimisation (méta-heuristique)
- ▶ Utiliser des méthodes de quantification d'incertitudes

Discussions

- ▶ Modèle à intégrer dans une boucle d'optimisation (méta-heuristique)
- ▶ Utiliser des méthodes de quantification d'incertitudes
- ▶ Inclure le type de commande en entrée et ses paramètres en sortie

Discussions

- ▶ Modèle à intégrer dans une boucle d'optimisation (méta-heuristique)
- ▶ Utiliser des méthodes de quantification d'incertitudes
- ▶ Inclure le type de commande en entrée et ses paramètres en sortie
- ▶ Est ce que l'apprentissage permet vraiment d'aller plus vite?
 - ▶ Formaliser et utiliser la résolution analytique sans PLECS
 - ▶ Interpolation pour le modèle de design

Discussions

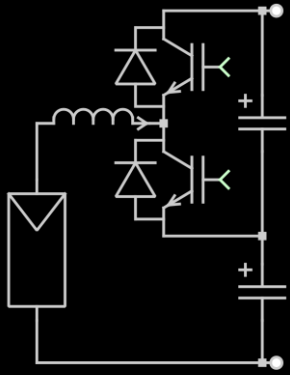
- ▶ Modèle à intégrer dans une boucle d'optimisation (méta-heuristique)
- ▶ Utiliser des méthodes de quantification d'incertitudes
- ▶ Inclure le type de commande en entrée et ses paramètres en sortie
- ▶ Est ce que l'apprentissage permet vraiment d'aller plus vite?
 - ▶ Formaliser et utiliser la résolution analytique sans PLECS
 - ▶ Interpolation pour le modèle de design

IAPUCA : IA pour l'électronique de **PU**issance et la **C**ommande
Associée

Groupe de travail : T. Meynard, G. Fontes, P. Kergus, R. Ruelland,
M. Fadel, G. LeGoff, A. Picot, J. Regnier, A. Llor, G. Gateau, F.
Messine, D. Bonnafeous, E. Monmasson



shutterstock.com · 1031749363



AI for PE

Power Alps Closing Conference Sep. 2025

Thierry MEYNARD 

AI for Power Electronics

Thierry MEYNARD, Pauline KERGUS, Guillaume FONTES

Today's PreDesign Tool

An automated predesign tool

Inputs

- User defines input and output voltages and currents
- Per-unit design drivers (can be customized but default values give a reasonable design)

Outputs

- Topology (nS, nP)
- Values of components (L,C)
- Steady-state values and initial conditions
- Size, weight, losses and temperature of components

How ?

- Resolution by propagation of harmonic constraints
(direct steady state determination, control design skipped)
- Guided by 'Design drivers': per unit figures corresponding to standard choice
(can be adjusted to generate other possible designs or used as optimization parameters)

Complexity levels

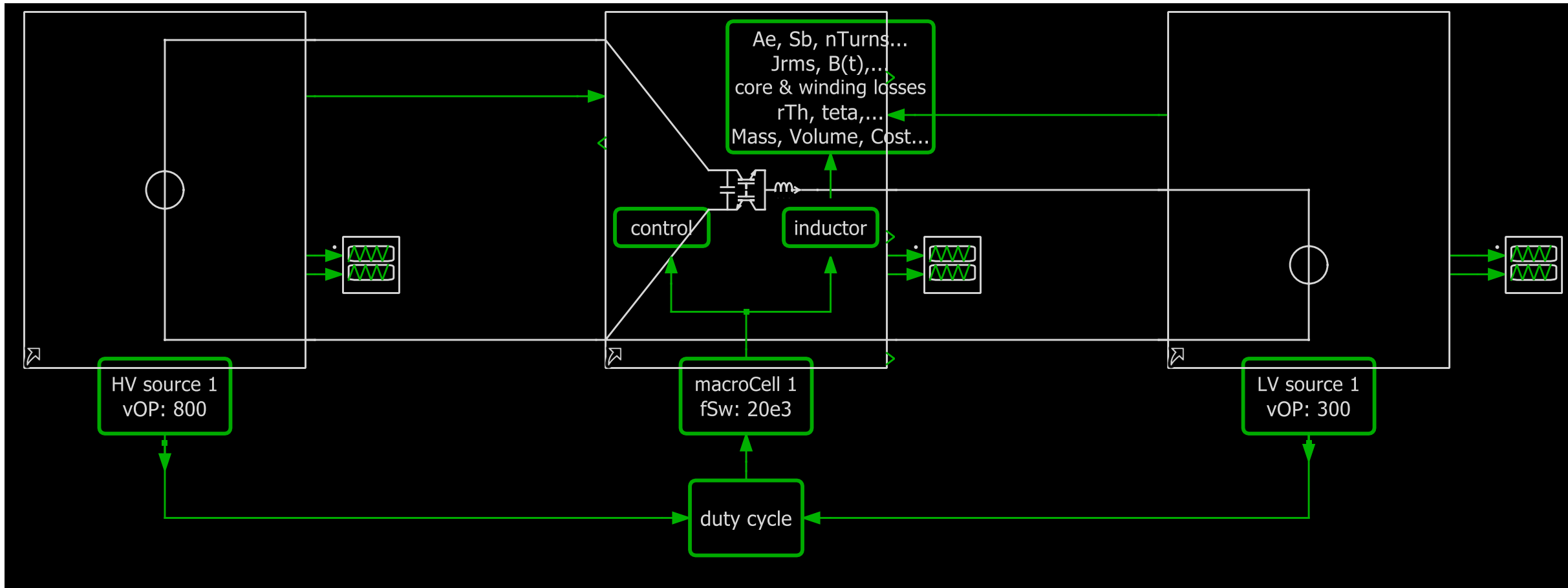
Level 1 : only continuous parameters, device & fsw imposed, design for V&I only

Level 2 : only continuous parameters, device & fsw imposed, design for V,I,W(losses),kg, m³

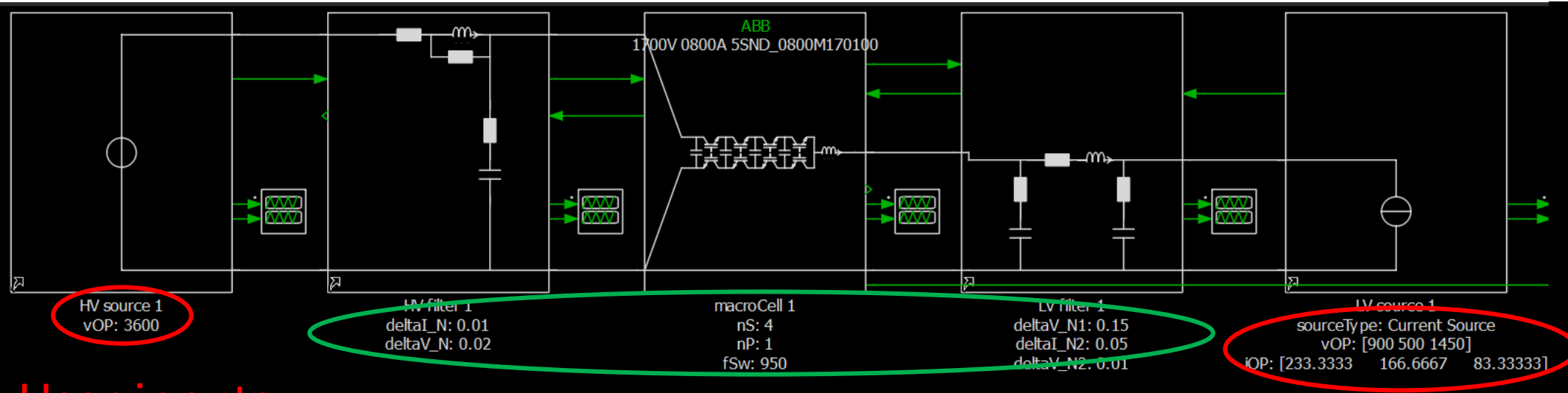
Level 3 : discrete and 'categorical' parameters, device imposed, design for f_{sw} , V,I,W(losses), θ ,kg, m³

Level 4 : EMC?...

Principle

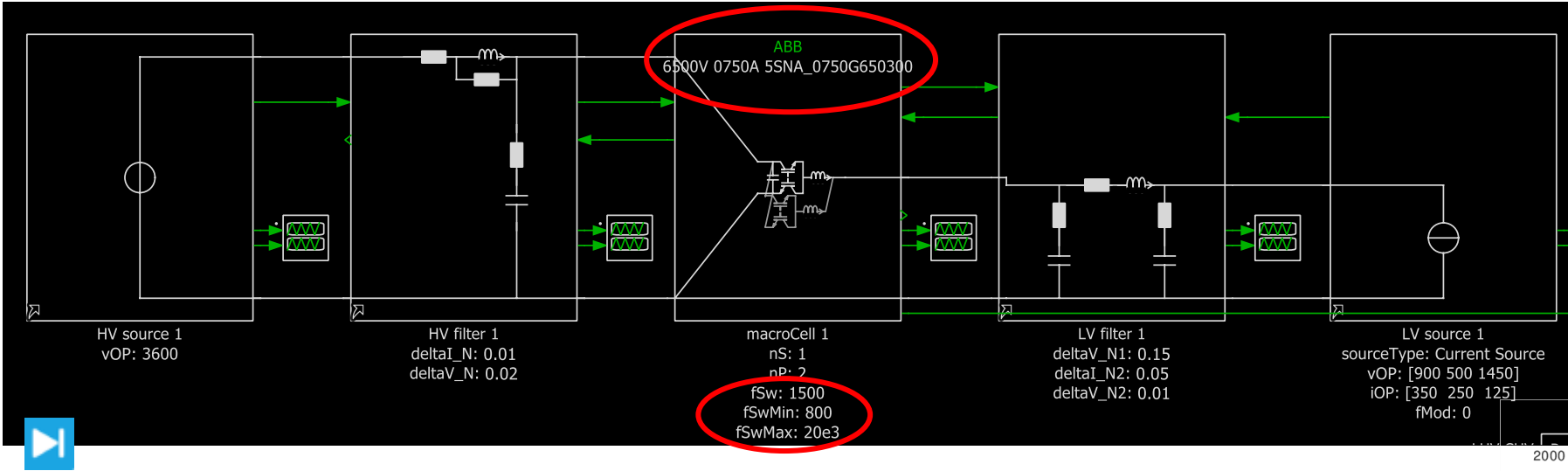


A typical example

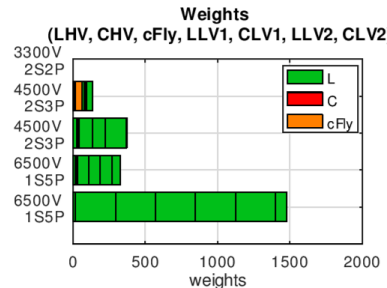
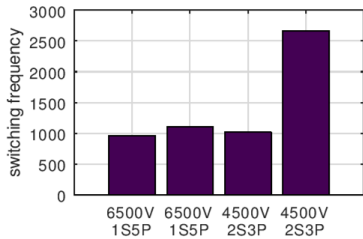
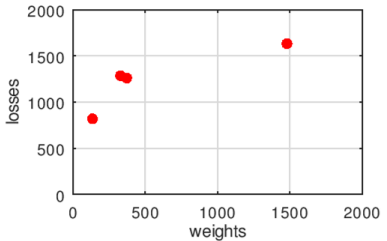
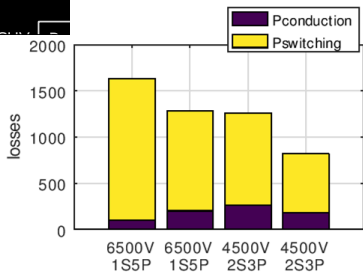


User inputs
Design drivers

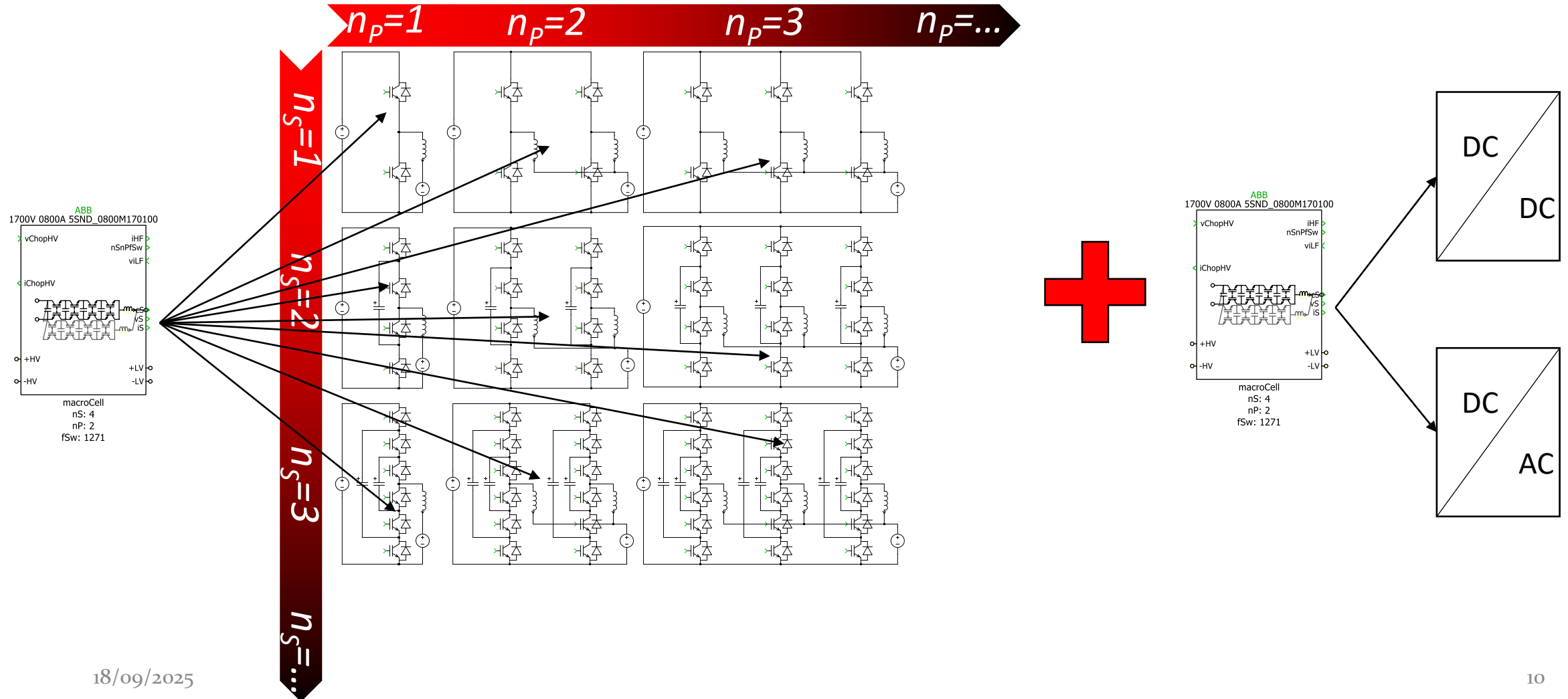
Automatic determination of n_S , n_P & f_{sw}



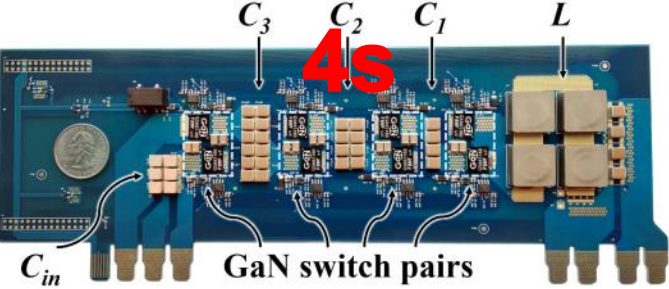
nS	nP	fSwMaxTh	fSw0	pCondT	E_per_F	weightLHV	weightCHV	weightTcFly	weight1LLV1	weightCLV1	weight1LLV2	weightCLV2	fSw	pSwT
1	3	866	65	115	1.7622	18.7693	2.5825	0	209.8491	0.090427	96.3642	0.19368	800	1409
2	2	1082	206	201	0.97886	23.6365	5.8105	9.2969	78.2373	0.81385	130.6123	0.29053	800	783
2	2	1782	231	151	0.65638	23.6365	5.8105	9.2969	78.2373	0.81385	130.6123	0.29053	800	525
4	1	1477	936	279	0.29812	33.5858	19.5724	29.451	20.4473	0.81385	68.271	0.12233	950	283



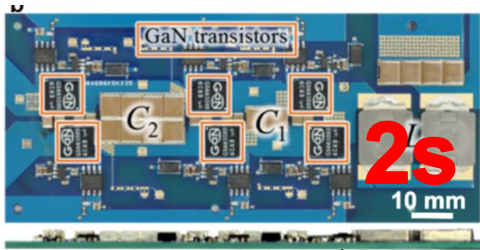
Topologies described



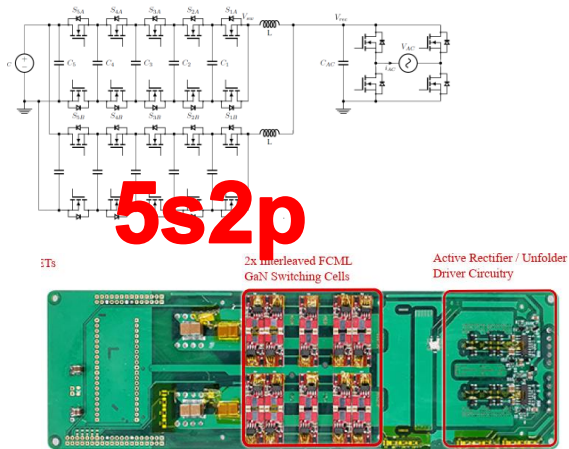
Design Optimization of a 1500 V GaN-Based Solar Inverter
Using Flying Capacitor Multi-Level Converter Stages



Annotated photograph of the experimental 5-level FCML prototype. Switch pairs are outlined in white.



Water immersion cooling
of high power density electronics



An Interleaved 6-Level GaN Bidirectional
Converter for Level II Electric Vehicle Charging

18/09/2025

Multi-Ratio Operation of Flying Capacitor
Multilevel Converters At and Above Resonance

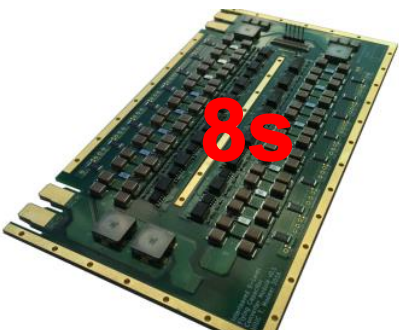
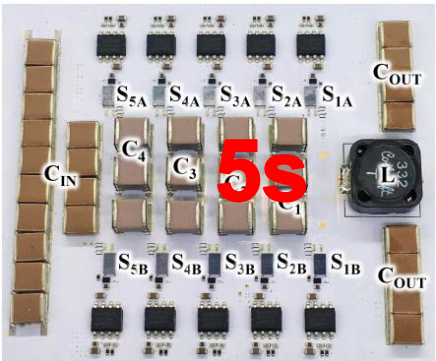
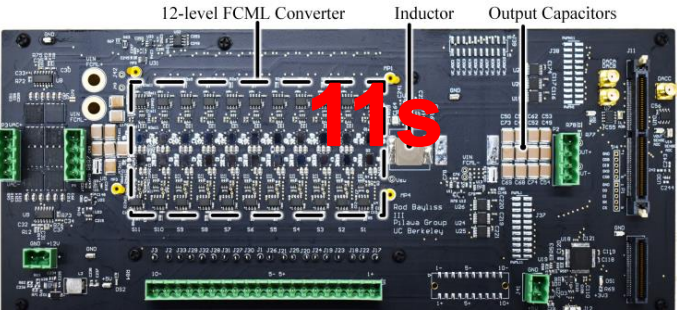


Fig. 13: Photog
totype showing
lower left and c



A High-Bandwidth Parallel Active Balancing
Controller for Current-Controlled Flying Capacitor
Multilevel Converters

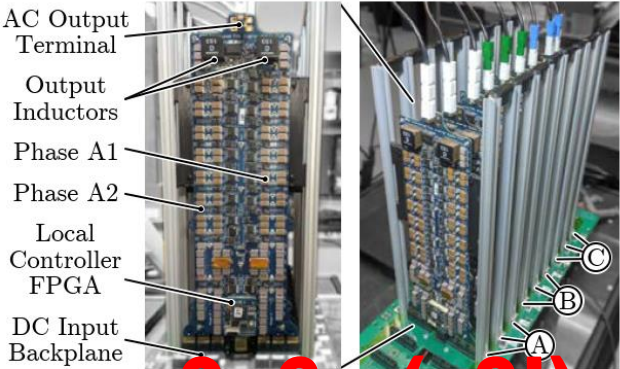
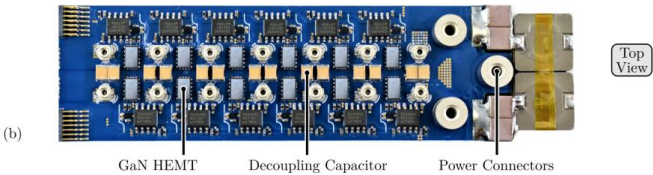
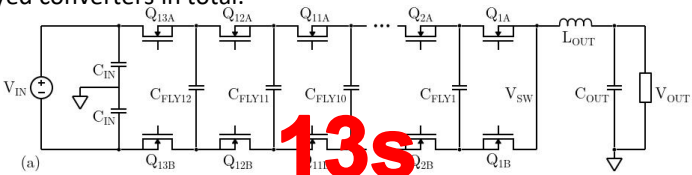
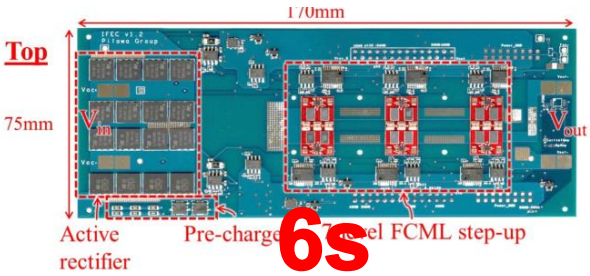


Fig. 10: Hardware photo of both dual-inverter module
ILM, on left) and three-phase, 10-level converter array (right).

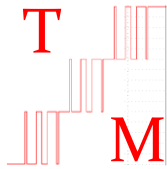
This configuration corresponds to six par-
alleled ($P = 6$), 10-level ($N = 10$) FCML inverters per phase-
leg, or 18 arrayed converters in total.



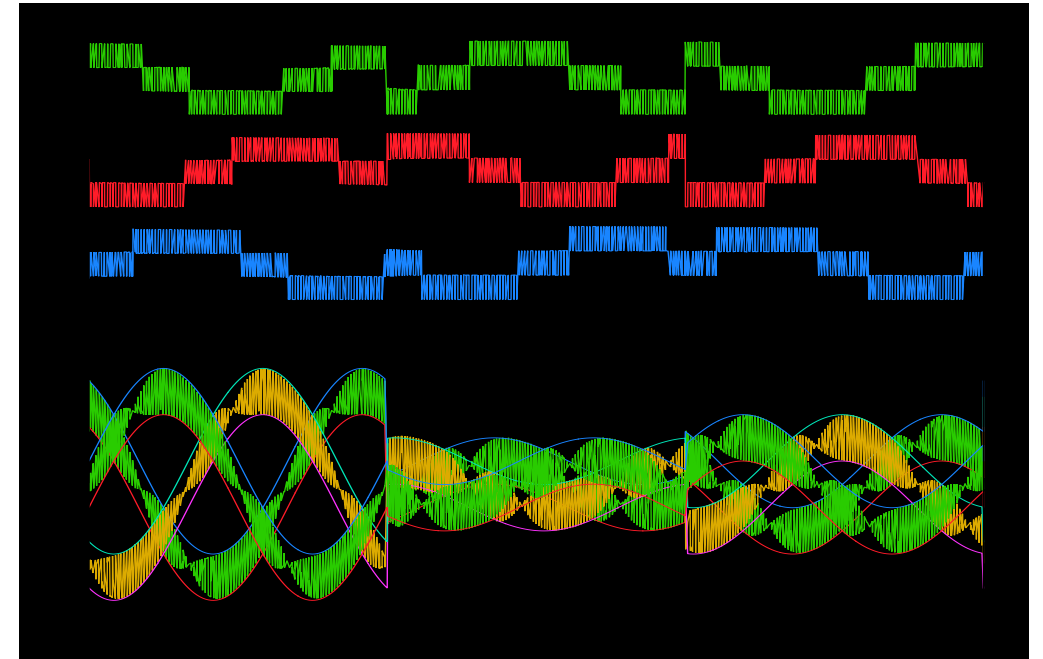
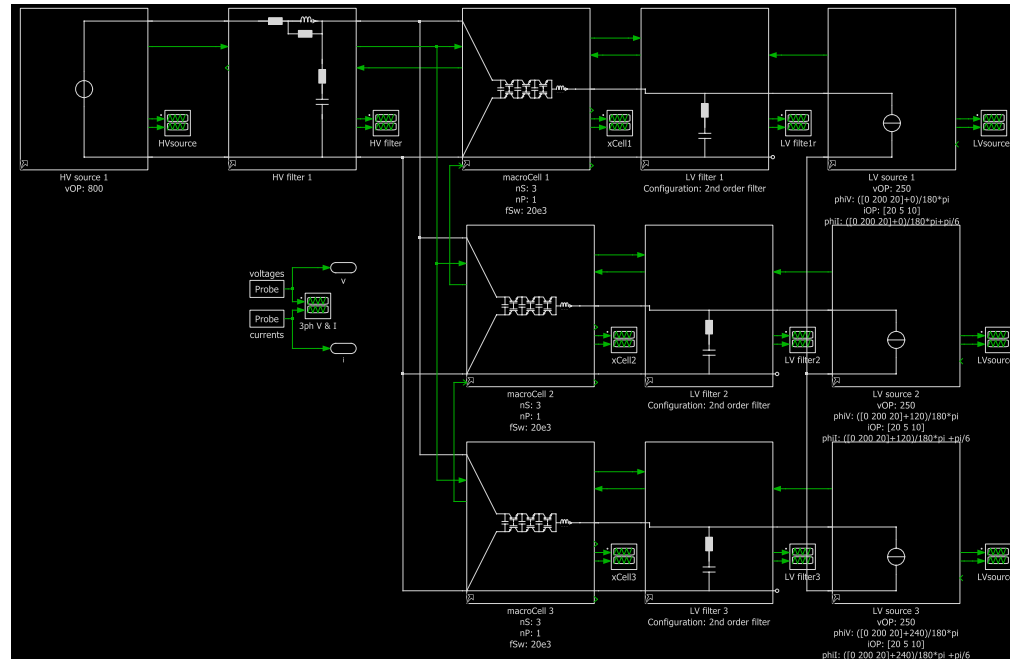
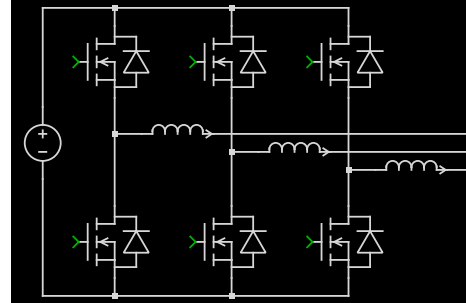
A 14-level FCML Inverter for Electric Vehicles with Optimal
Capacitors Achieving 175 kW/kg and 380 kW/L Power Density



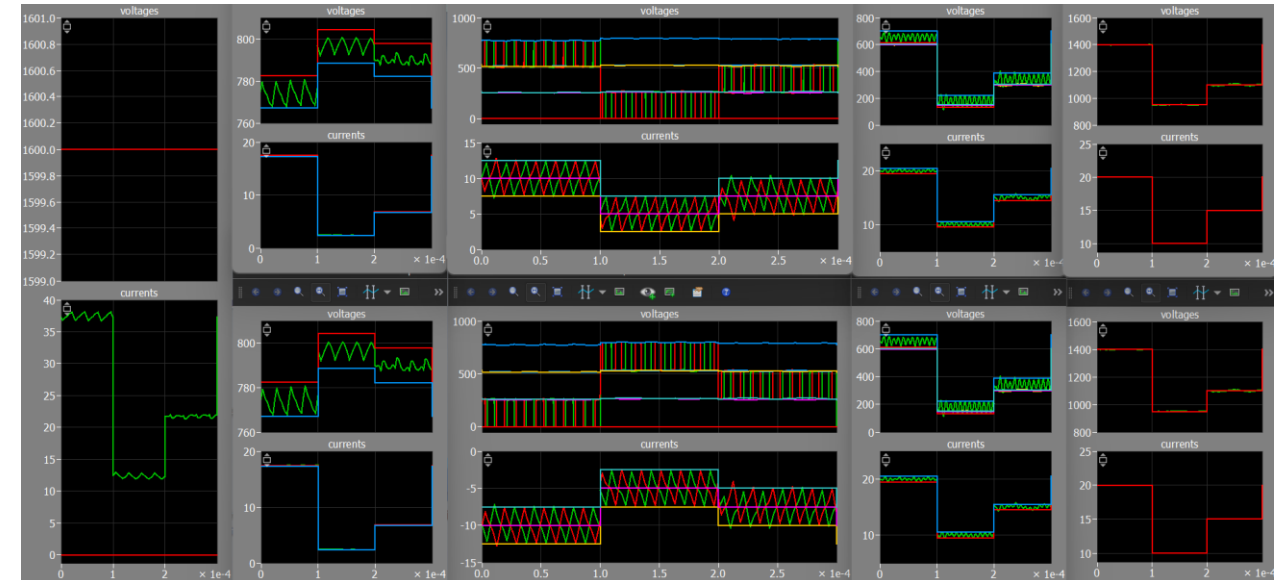
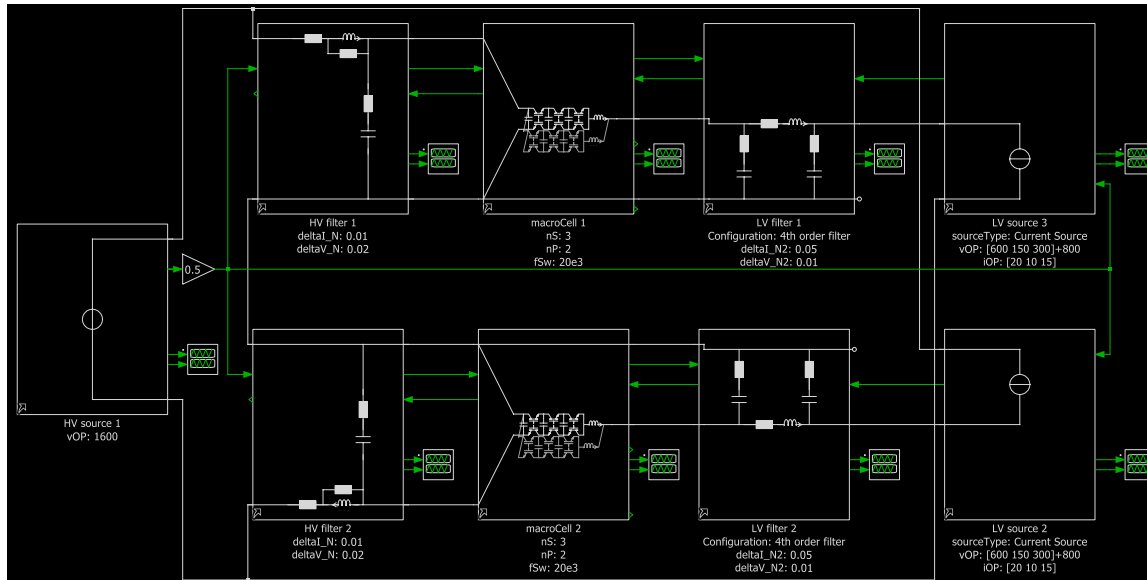
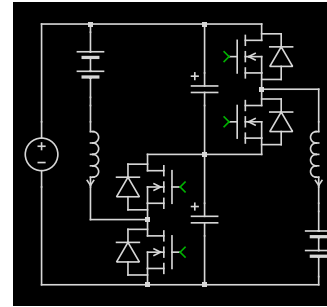
Design and Implementation of a 1.3 kW, 7-Level
Flying Capacitor Multilevel AC-DC Converter with
Power Factor Correction



Other architectures : 3-phase VSI

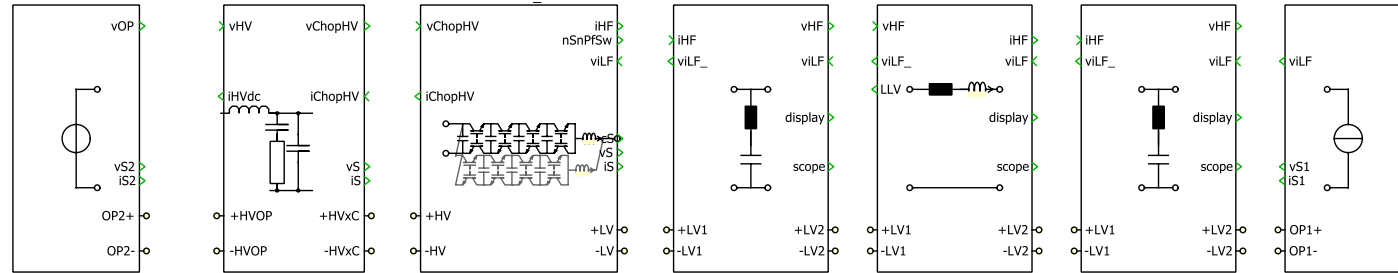


Advanced architectures : partial power



From PLECS to an open frame for design

What's needed?



Graphic interface including:

Power conversion rules to avoid wrong architecture (compatibility of connected sources, step-down nature of the commutation c

Object Oriented Programming block models:

Describing the behaviour induced by the constraints applied to its terminals, they generate an algebraic loop describing the system

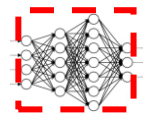
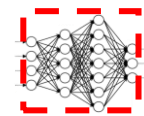
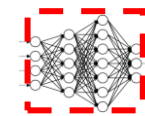
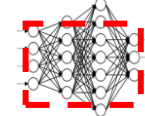
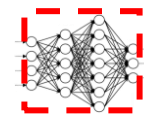
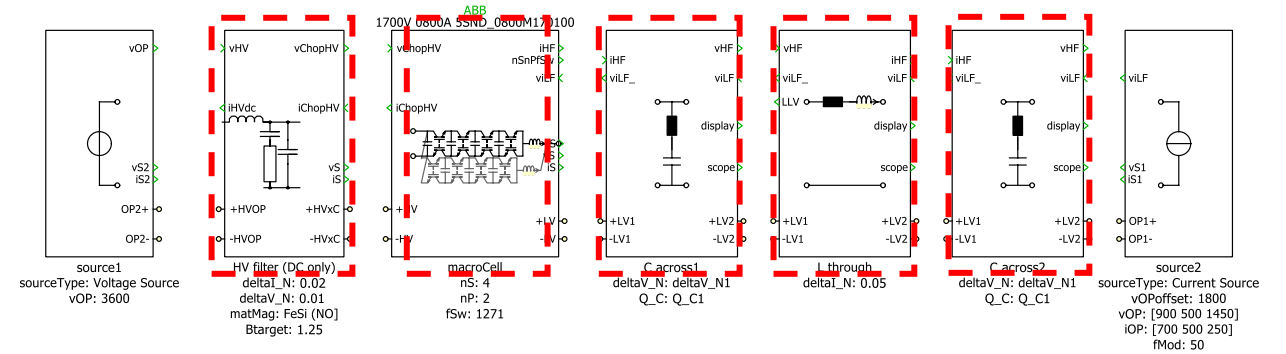
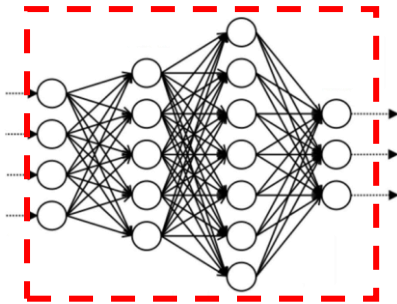
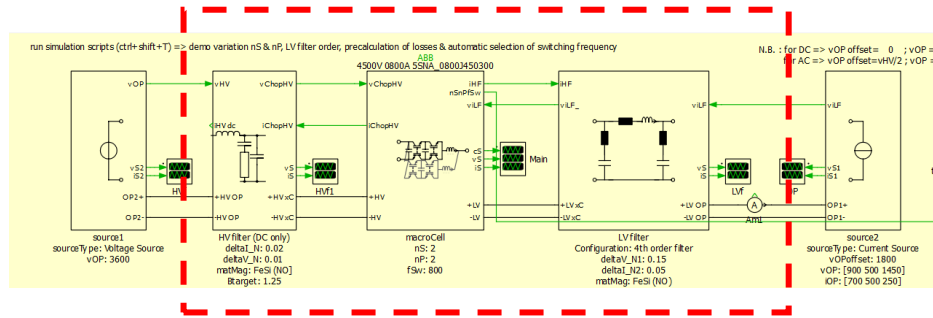
Algebraic loop solver:

An optimization routine taking the remainder of these equation to zero

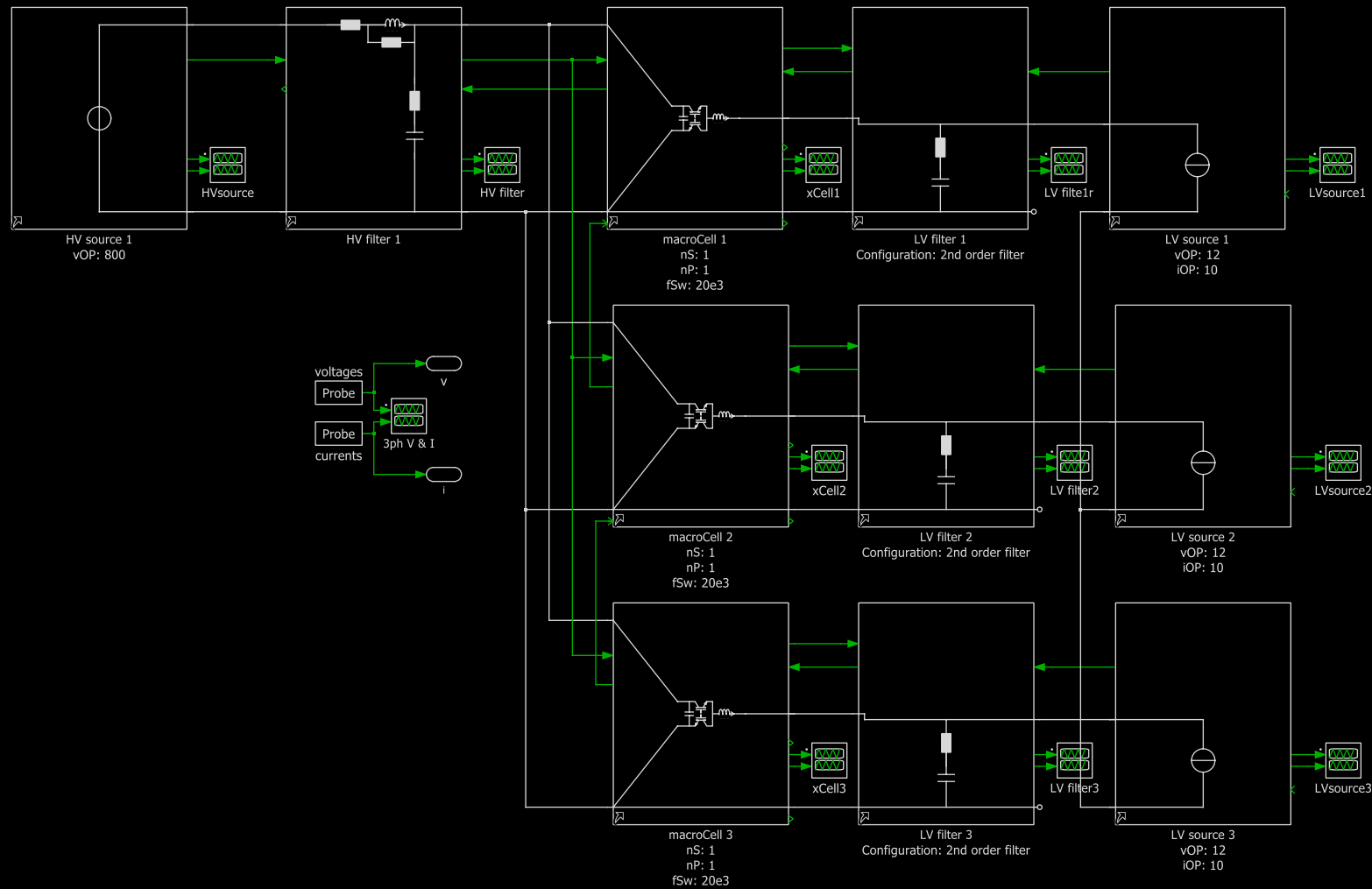
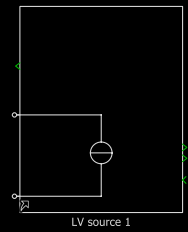
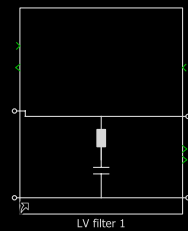
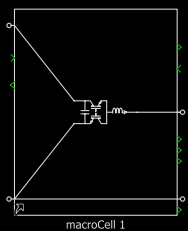
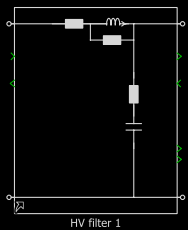
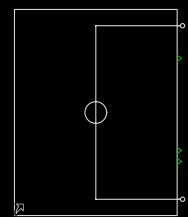
Pluggable models :

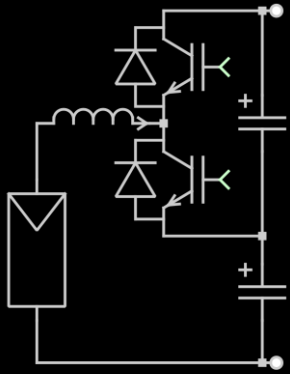
Harmonics of voltage and current are components design inputs: models of different complexity/accuracy can be proposed

PINN : Full or @ Block level ?



- Smaller NN
- Flexibility



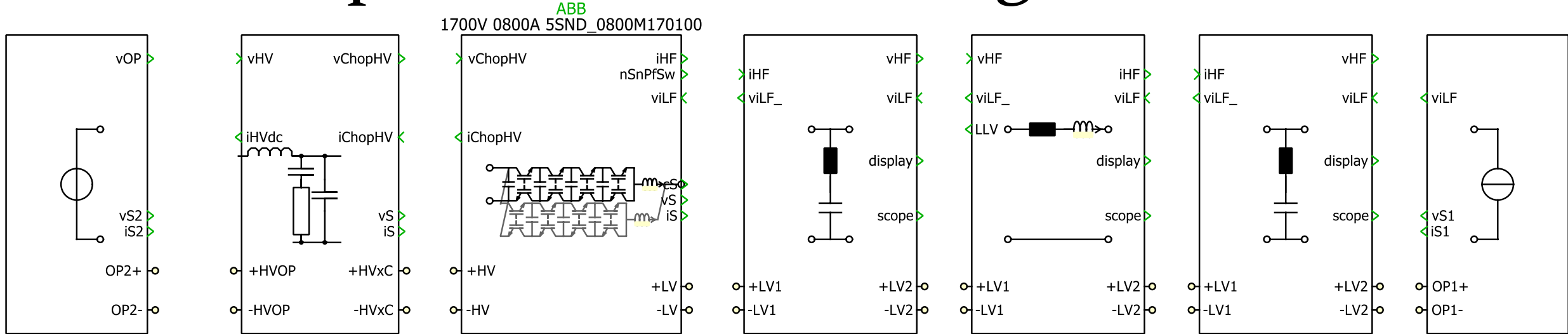


AI for PE

June 2025

Thierry MEYNARD 

Other options for block design



Ripple-based
design
?
Spectrum-based
design

Conduction/switching
balance
?
Maximize f_{sw} ?
Minimize SC cost ?

Ripple-based
design
?
Spectrum-based
design

?
Area product
 R_{DC} , steinmetz
?
'Forest & Sullivan'?
Tim & Andrija GP

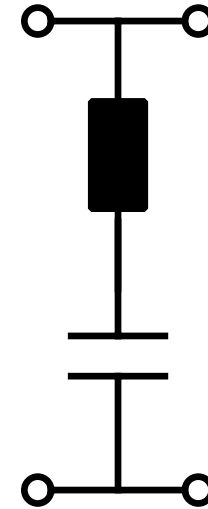
Other options for component design



Area product
 R_{DC} , Steinmetz

?

'Forest & Sullivan'?
 Tim & Andrija GP



Stretchable capacitor

?

Database scroll



@Pixabay



Circularité des EEE: état des lieux et enjeux de la recherche

CHARBUILLET Carole

10 Septembre 2025

Power Alps- Journées de Clôture du CDP électronique de puissance

Circularité et EEE: mythe ou réalité?



Economie circulaire
comme la solution?

Le retour de matières
secondaires dans l'économie
globale est de 6,9 % en 2024

Circle Economy. (2025). The circularity gap report 2025

Niveau de circularité des EEE?

Circularity and EEE: the European organisation



Déchets Electriques et Electroniques (DEEE)
Responsabilité Elargie du Producteur (REP)
Réglementation Européenne (2002 rev 2019)
Gestion par des éco-organismes

ex.:La filière française

Petits équipements et Petits équipements informatiques (catégories 5 et 6)

RÉPARTITION DU POIDS DES MATÉRIAUX
DANS LA COMPOSITION D'UN SMARTPHONE



PROPORTION DES MÉTAUX

80 à 85 % de métaux
ferreux et non ferreux :
cuivre, aluminium, zinc,
étain, chrome, nickel...

0,5 % de métaux
précieux : or, argent,
platine, palladium...

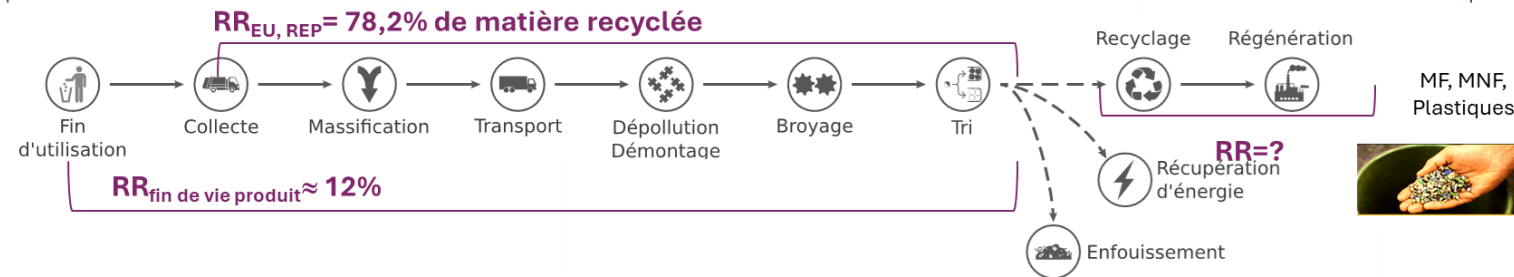
0,1 % de terres rares et
métaux spéciaux : europium,
yttrium, terbium, gallium,
tungstène, indium, tantale...

15 à 20 % d'autres
substances : magnésium,
carbone, cobalt, lithium...

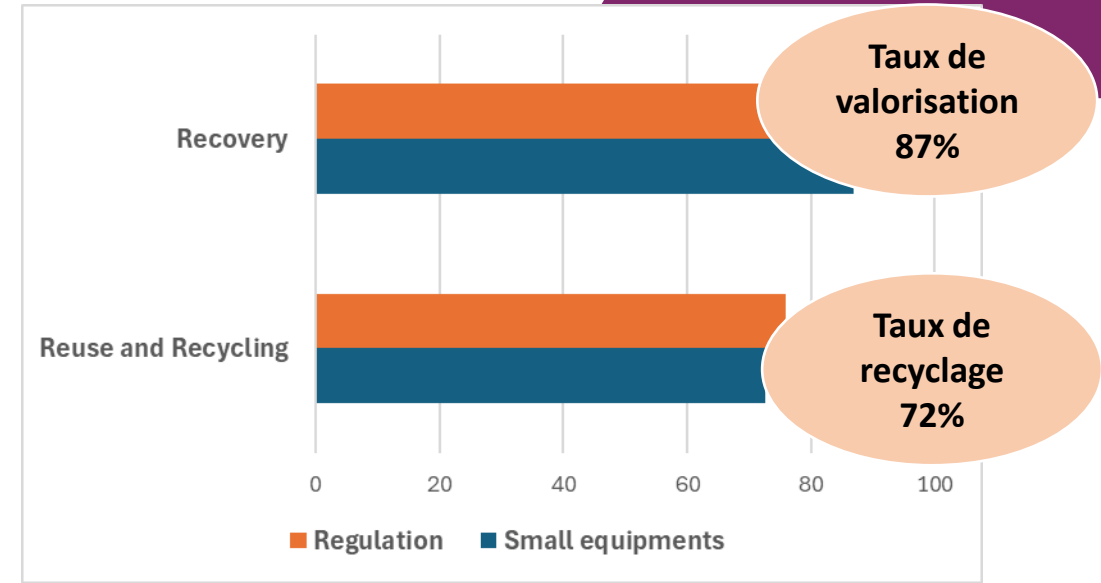
Source: Oeko-Institut, EcoInfo et Sénat



Taux de circularité matière= 1%, métaux précieux et critiques



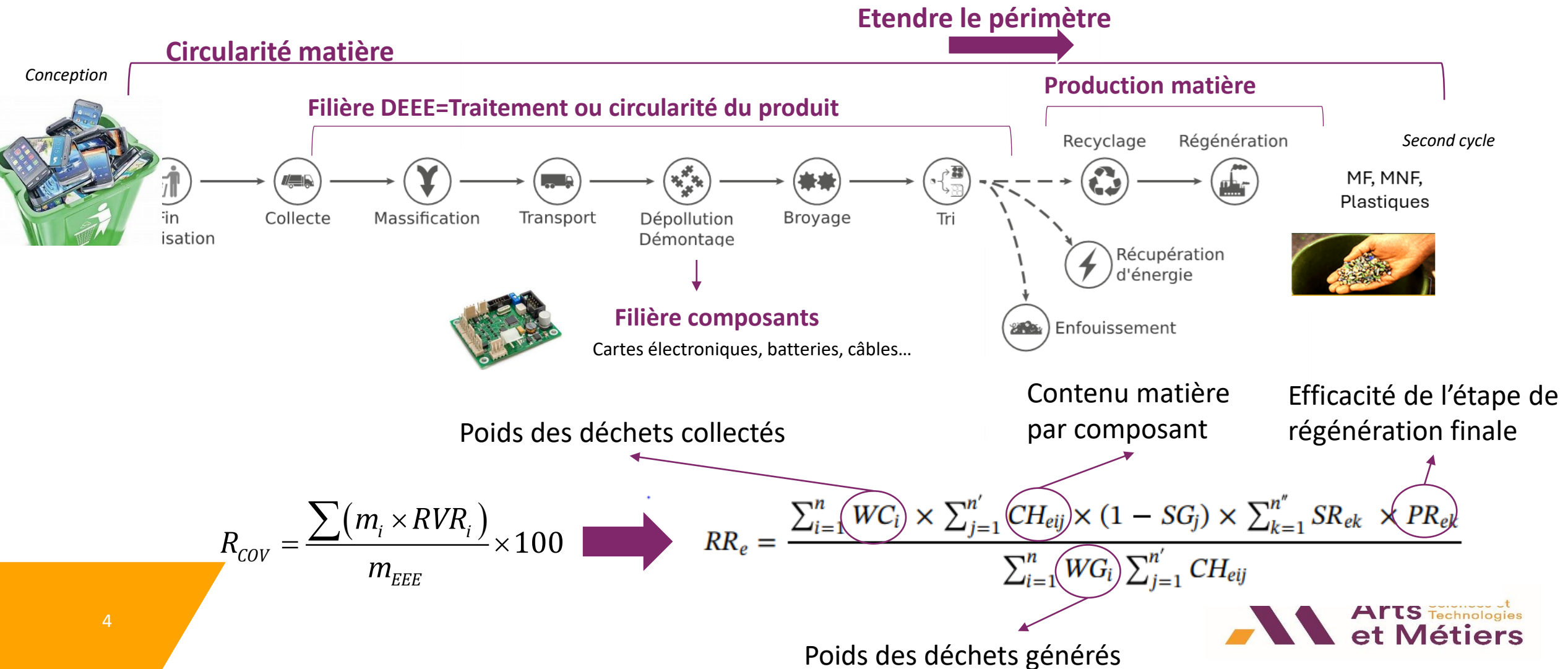
R. Horta Arduin et al.- Influence of scope definition in recycling rate calculation for European e-waste extended producer responsibility - Waste Management, 84 (2019)



(ADEME 2022- Rapport annuel EEE- Données 2021
mis en ligne 10/2023)

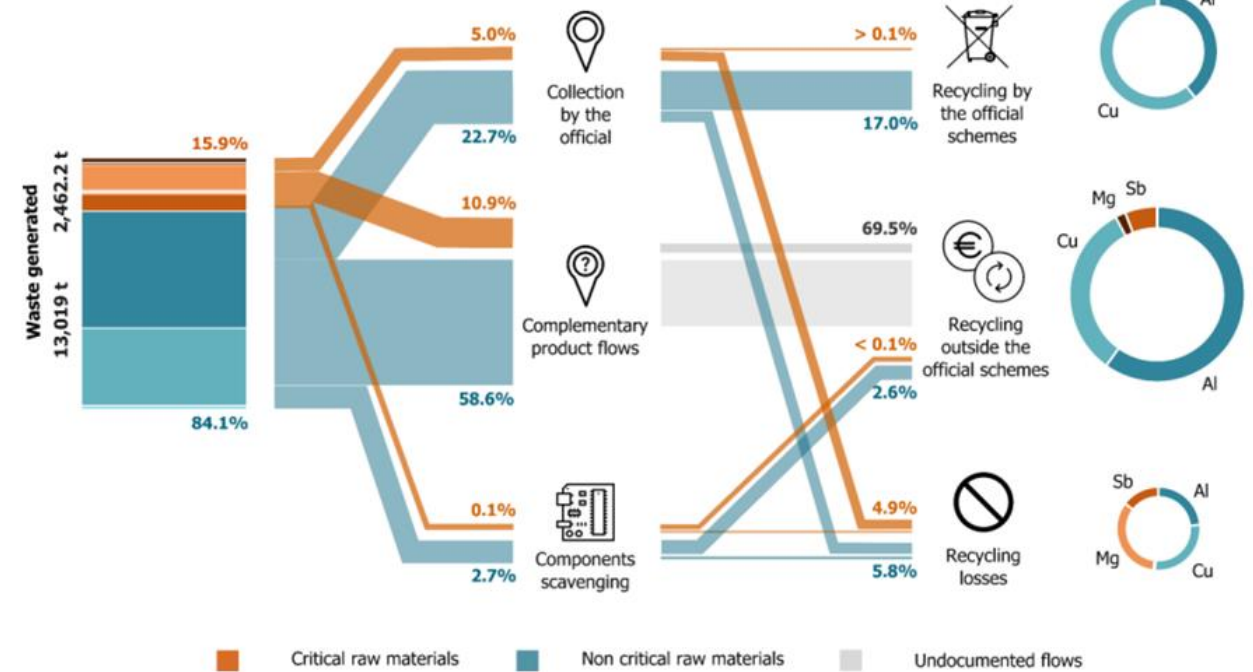
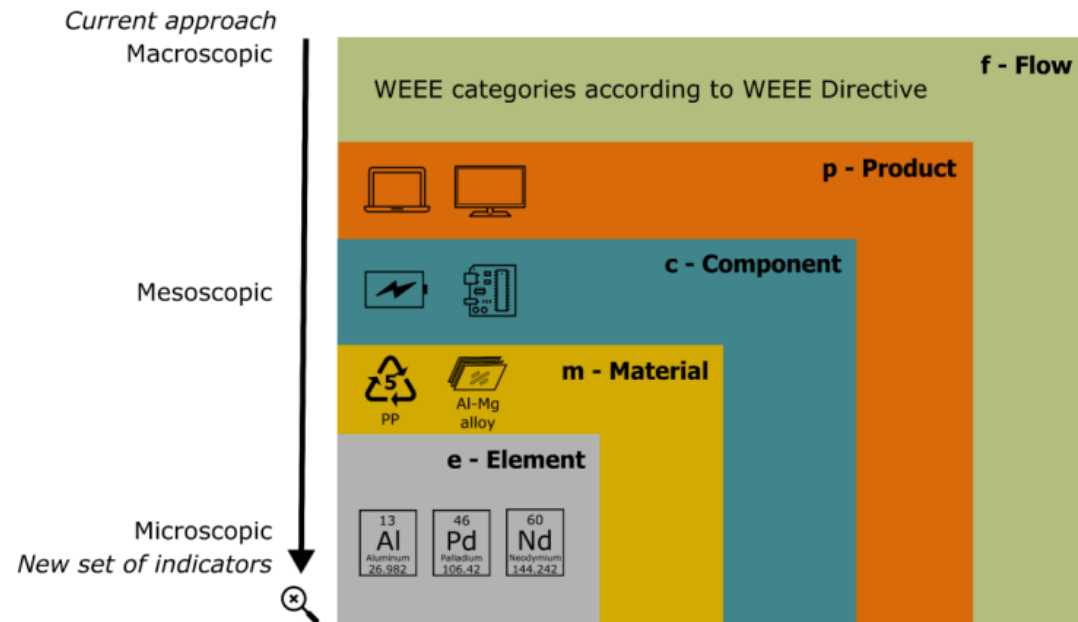
Pourquoi cette différence?

Premier enjeu= le calcul du taux de recyclage



Pourquoi cette différence?

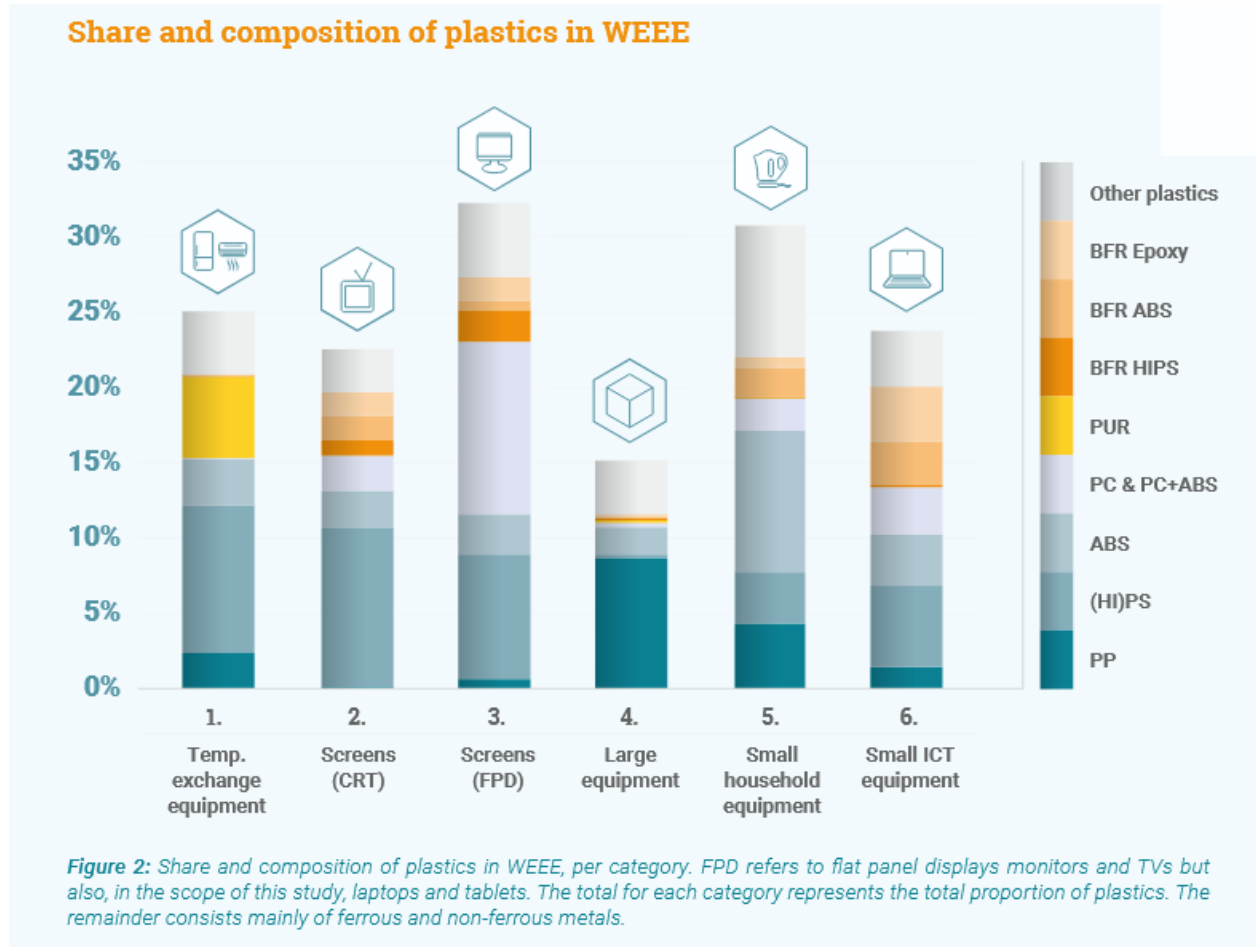
Second enjeu=le périmètre de calcul-Recyclage vs Circularité



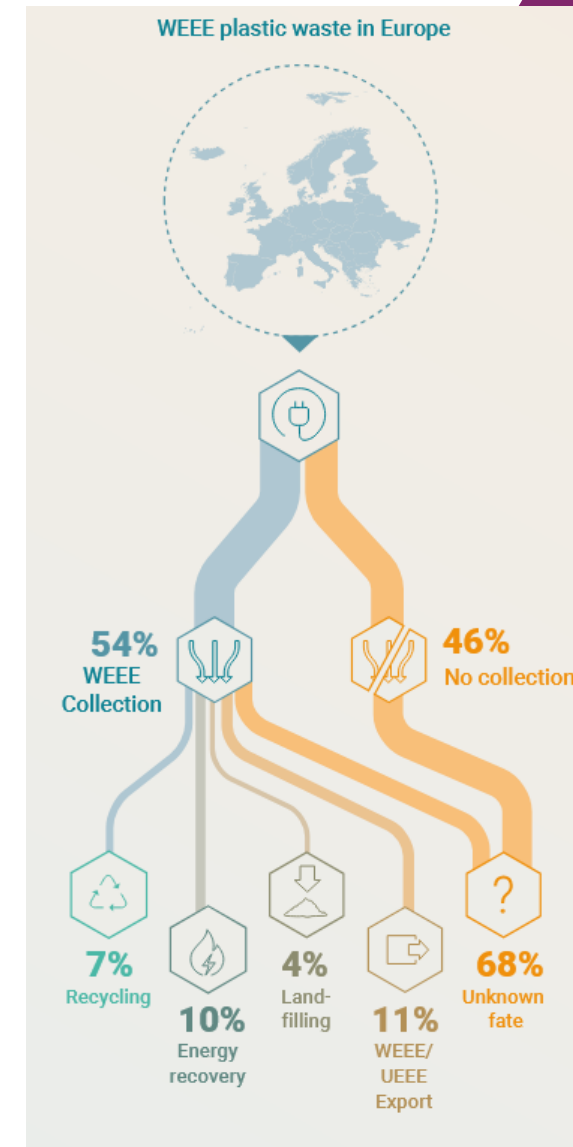
La filière de recyclage des écrans- d'un taux de recyclage produit de 55% à un taux de circularité matière de 17%. (Travaux de Thèse Rachel Horta Arduin)

Pourquoi le taux de circularité est-il si faible?

Premier enjeu= produit complexe et multi-matériaux



(A.Haarman, S.Fedato, A.Holt. Brominated Flame Retardants and the Circular Economy of WEEE Plastics State of Play- BSEF, dss+, 2023)



Une grande variété de matériaux
Besoin de considérer les matériaux plastiques pour la
circularité des EEE (recyclage, conception pour la circularité....)

Pourquoi le taux de circularité est-il si faible?

Second enjeu=Limites physiques, chimiques et environnementales

Manque de connaissance sur les performances des filières et leurs limites

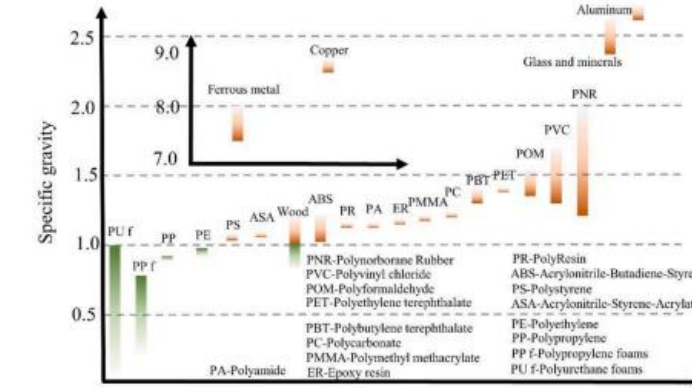
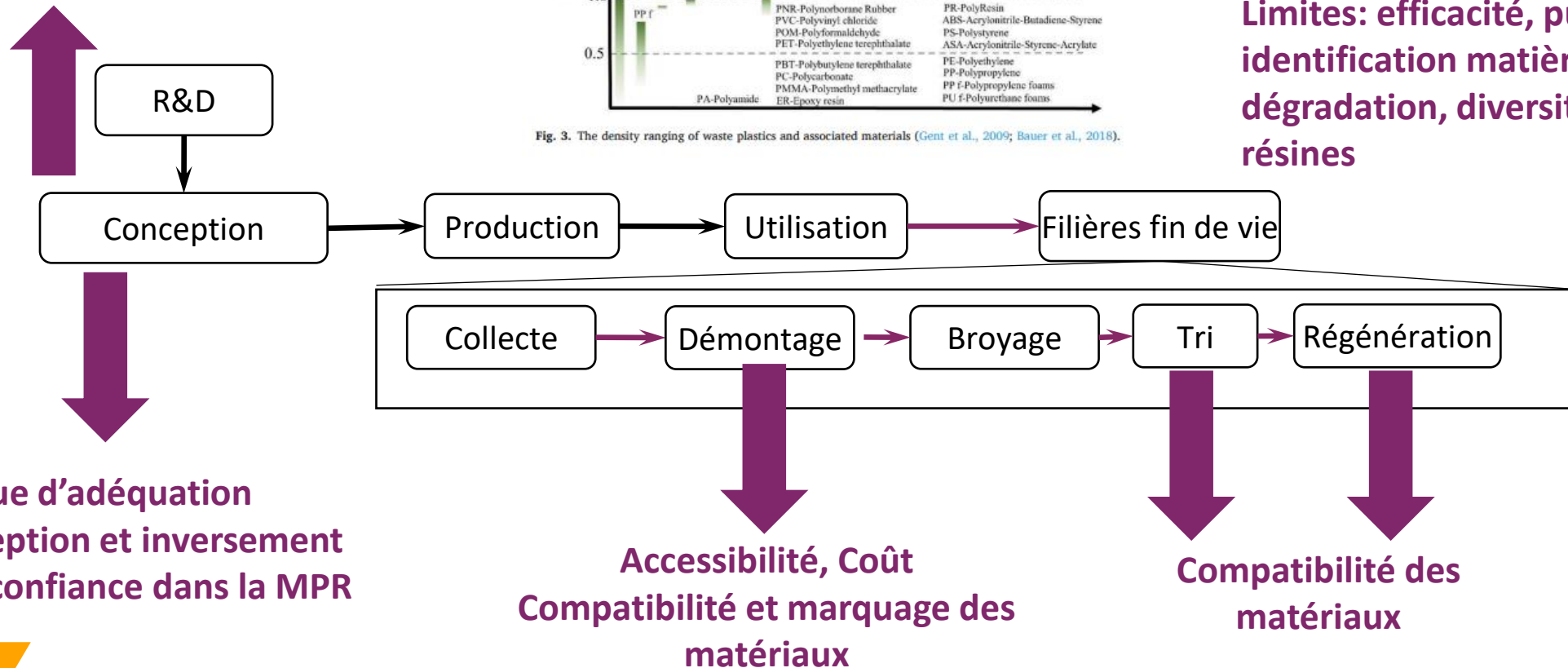


Fig. 3. The density ranging of waste plastics and associated materials (Gent et al., 2009; Bauer et al., 2018).

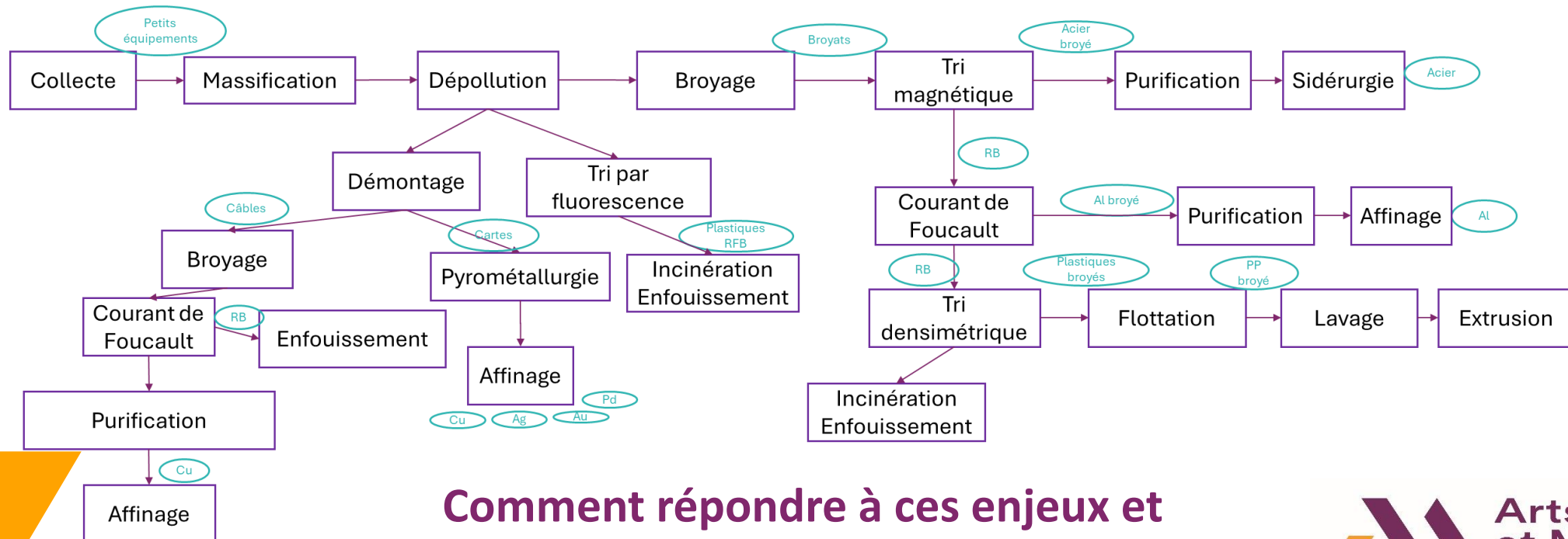
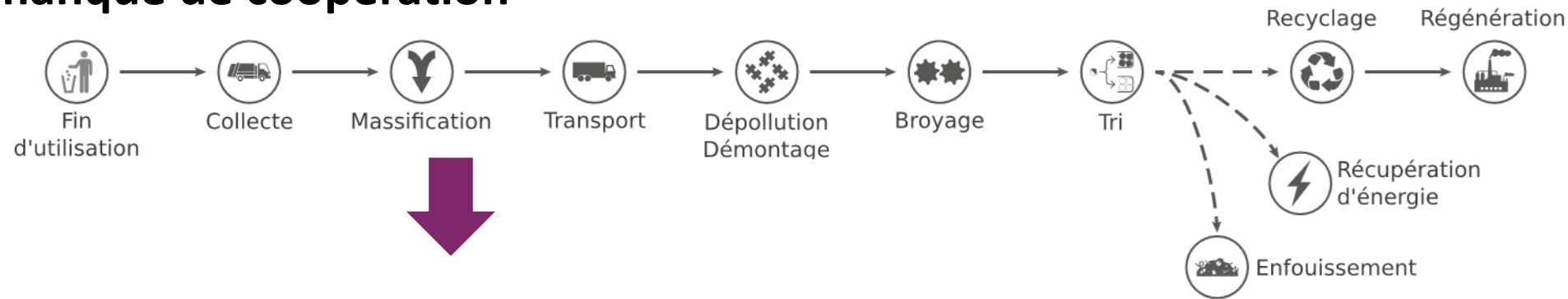
Nombreuses techniques de tri
Majoritaire: densimétrique, flottation
Limites: efficacité, pureté, identification matières, dégradation, diversité des résines

Manque d'adéquation
filière/conception et inversement
Manque de confiance dans la MPR

En France, taux de recyclage des MP des EEE env. 12%
(ADEME +Plastics Europe + SRP)

Pourquoi le taux de circularité est-il si faible?

Troisième enjeu= une méconnaissance de la complexité de la filière et un manque de coopération



Comment répondre à ces enjeux et améliorer la circularité des EEE?



La Chaire

Recherche

Enseignement

Documentation et
Valorisation

La chaire Mine Urbaines

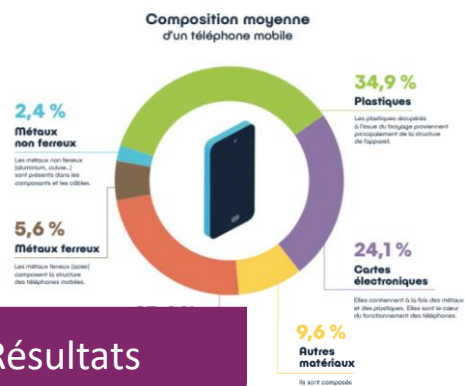
Solutions pour améliorer la circualrité des EEE

Contexte: pourquoi la chaire Mines Urbaines?

Contribuer à la mise en place d'une économie circulaire pour les DEEE

Objectifs

- ▶ Développer l'économie circulaire des EEE
- ▶ Intégrer les enjeux de circularité (matière, environnement, filières) dès la conception
- ▶ Favoriser les échanges entre producteurs et opérateurs



Résultats attendus

- ▶ Outils utilisables par les opérateurs
- ▶ Développement de solutions de traitement efficaces
- ▶ Indicateurs de conception permettant une réelle circularité sur le premier cycle et le second cycle



Axe métaux stratégiques



Axe polymères:

- Economie circulaire et intégration des MPR
- Mieux recycler
- Conception pour une stratégie 5R centrée réemploi et réutilisation



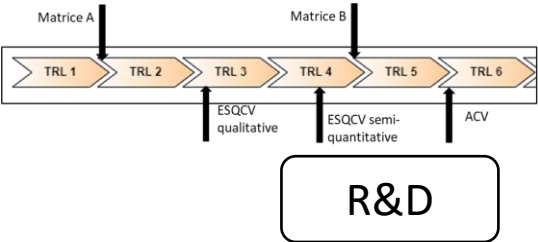
Axe comportements et changement



Les outils développés pour les acteurs de la chaine de valeur (2019-2024)

Des outils pour une plus grande collaboration pour plus de circularité

Outil Bas TRL

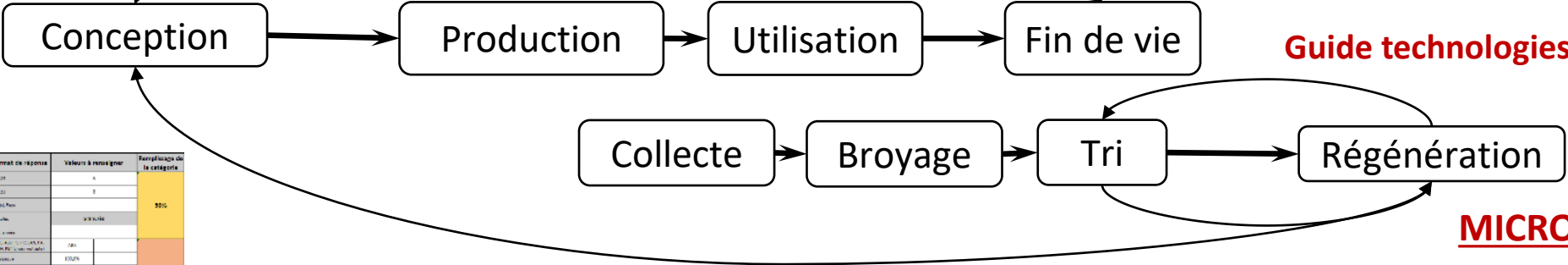


Matrice d'aide au choix pour une prise en compte de la circularité en conception

Indices	Indice de récupérabilité des matériaux I_{recup}					Indice de réintégrabilité des matériaux I_{reint}		
	Recommandations d'écoconception orientées sur l'architecture du produit		Recommandations liées à la filière des matières plastiques recyclées			Recommandations liées au choix des matériaux		
	Indicateurs d'écoconception							
Catégorie de recommandation associée	Démontabilité du produit D	Séparabilité des matériaux S	Disponibilité du traitement D_t	Recyclabilité des matériaux R_{mat}	Disponibilité du matériau D_m	Pureté du matériau T_p	Impact environnemental I_{env}	Traçabilité du matériau T_{rec}



ecosystem
Arts et Métiers
Chaire
Métiers d'avenir

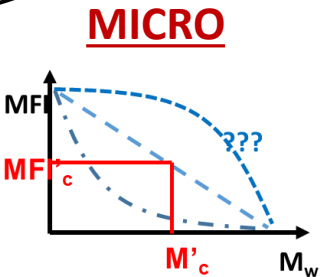


Guide technologies de tri

Catégorie de paramètres	Paramètres	Format de réponse	Valeurs à renseigner	Pourcentage de la catégorie
Caractéristiques du produit	Longueur	mm	1	30%
	Largeur	mm	2	
	Épaisseur	mm	3	
	Poids	g	4	
Composition	Matériau	Plastique	5	20%
	Forme	Rectangulaire	6	
	État	Intact	7	
	Provenance	Industriel	8	
Propriétés techniques	Résistance	MPa	9	30%
	Densité	g/cm³	10	
	Température de fusion	°C	11	
	Viscosité	Pa.s	12	

Fiche MPR

Indice de dégradation Process d'upgrading des MPR



MICRO

Des outils de communication créés en collaboration avec les acteurs

Guide de technologies de tri (28 fiches)

Besoin: : Identifier les manques technologiques et accompagner l'aide à la prise de décision pour le choix des technologies à développer

Ateliers réalisés entre producteurs et opérateurs

Guide disponible sur le site ecosystem

00 Nom du procédé de tri		
Famille	Famille de procédé (voie sèche, humide, optique...) et type de séparation	
Type	Type d'analyse et de reconnaissance	
Niveau de développement	Niveau de maturité de la technologie. Précision du TR : Technology Readiness Level ou niveau de maturité technologique	
Description de la technologie	Présentation synthétique du procédé	
Caractéristiques techniques	Rendement	Degré de pureté du matériau ciblé en sortie de procédé
	Capacité	Débit moyen du procédé
	Nature de l'entrant	Cahier des charges requis pour la fraction entrant dans le procédé afin que le tri soit optimal
	Plastiques obtenus	Typologie de plastiques qu'il est possible d'obtenir en sortie
Données environnementales	Impact environnemental du procédé	
Forces	Avantages / Bénéfices de la technologie vis-à-vis du tri des plastiques de DEEE	
Faiblesses	Freins identifiés de la technologie vis-à-vis du tri des plastiques de DEEE	

(Bernard, 2023)

Fiche Matière recyclée (76 paramètres)

Objectif: Faciliter les échanges d'informations sur les caractéristiques d'une MPR

Ateliers de travail avec des régénérateurs (10 participants), plasturgistes et producteurs d'EEE (15 participants)

Catégories de paramètres	Paramètre	Format de réponse	Valeurs à renseigner			Remplissage de la catégorie
Description du produit	Nom commercial	ABC123	A			50%
	Référence commerciale	ABC123	B			
	Site(s) de production	Ville(s), Pays				
	Forme	Granulés	Granulés			
	Date première commercialisation	Mois, année				
Composition	Résine	PP, PE, ABS, PS, PC, SAN, PA, PMMA, PET (choix multiple)	ABS			28%
		% massique	100,0%			
	Impuretés polymériques	PP, PE, ABS, PS, PC, SAN, PA, PMMA, PET (choix multiple)				
		% massique				
	Niveau de filtration avant granulation	max X (50 à 300 microns)				
	Charges et renfort	Nature				
		Pourcentage massique				
	Autres additifs	-Nature :Anti-UV, anti-oxydants, plastifiants, solvants...				
		-% massique				

Fiche en open access

Intégration de la filière en conception

Matrice d'aide au choix pour une prise en compte de la circularité des matières plastiques des EEE

Indices	Indice de récupérabilité des matériaux $I_{récap}$			
Catégorie de recommandation associée	Recommandations d'écoconception orientées sur l'architecture du produit		Recommandations liées à la filière des matières plastiques recyclées	
Indicateurs d'écoconception	Démontabilité du produit D	Séparabilité des matériaux S	Disponibilité du traitement D_t	Recyclabilité des matériaux R_{mat}

Indice de récupérabilité (Extrait)	
Indicateurs X_i	Sous indicateurs
Séparabilité des matériaux S	Contamination
Disponibilité des infrastructures D_t	Disponibilité des infrastructures de démantèlement
	Disponibilité des infrastructures de régénération
Recyclabilité R_{mat}	Taux de recyclage théorique
	Diversité des matériaux
	Taux de collecte

Possibilité de réintégrer des MPR dans un nouveau cycle

Vision systémique de la circularité pour une aide au choix dès la conception

Indice de réintégrabilité (extrait)		
Indicateurs X_i	Sous-indicateurs	
Disponibilité des matériaux D_m	Volume de matériau dans le gisement	
	Volume de production	
Pureté des matériaux T_p	Proportion de résine principale	
	Taux de contaminants	Taux de contaminants polymériques
		Taux de contaminants particuliers
		Teneur en additifs, charges et renforts
Impact environnemental I_{env}	Criticité de la matière première	



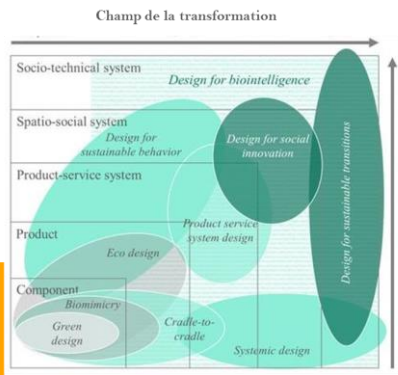
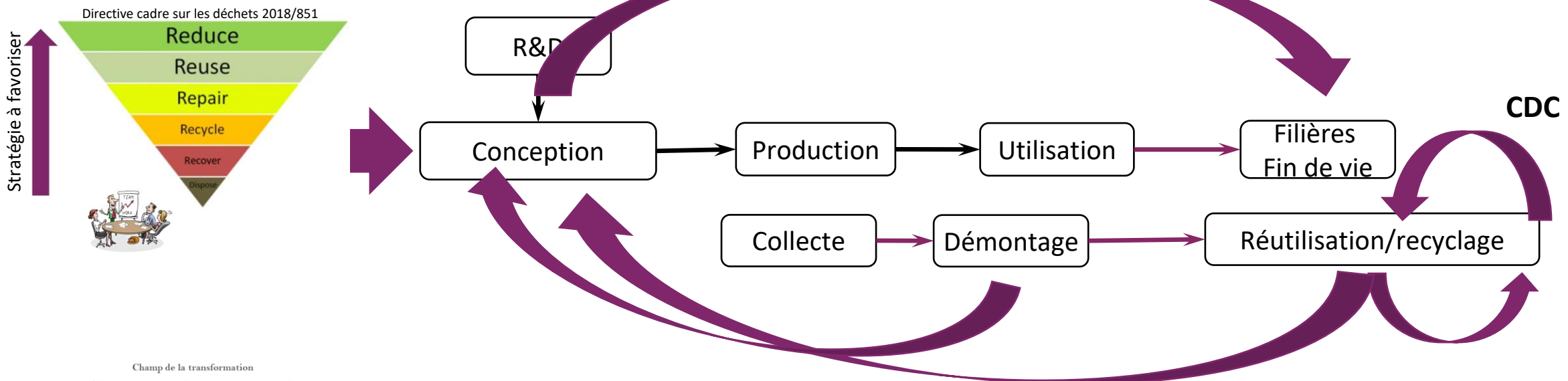
Et la suite?

—

Les nouveaux enjeux pour le développement des stratégies circulaires

Mise en place d'outils qui ont favorisé les échanges et la coopération entre acteurs
Coopération essentielle pour la mise en œuvre de la circularité
Connaissance des organisations pour la circularité

Conception pour l'économie circulaire



Mais

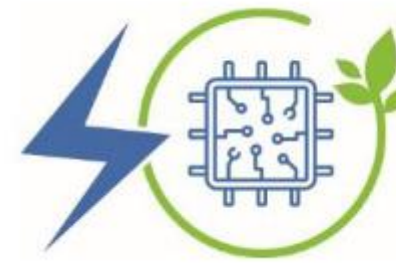
- La définition du niveau de circularité des matières plastiques et des EEE
- La prise en compte du nombre de boucles en intégrant une vision prospective

Perspectives

- Développement d'outils et méthodes pour aider au choix de stratégies circulaires soutenables pour les matériaux stratégiques



**Merci pour votre
attention
Questions?**



Challenges and barriers toward sustainable power electronics

Author : Jean-Christophe Crébier CNRS/G2Elab
Collective work from the CEPPS working group at SEEDS/CNRS

Context

Where are we and where we are going ?

Scenarios of decarbonization/electrification

Greenhouse gas emissions in the period 2015-2050*

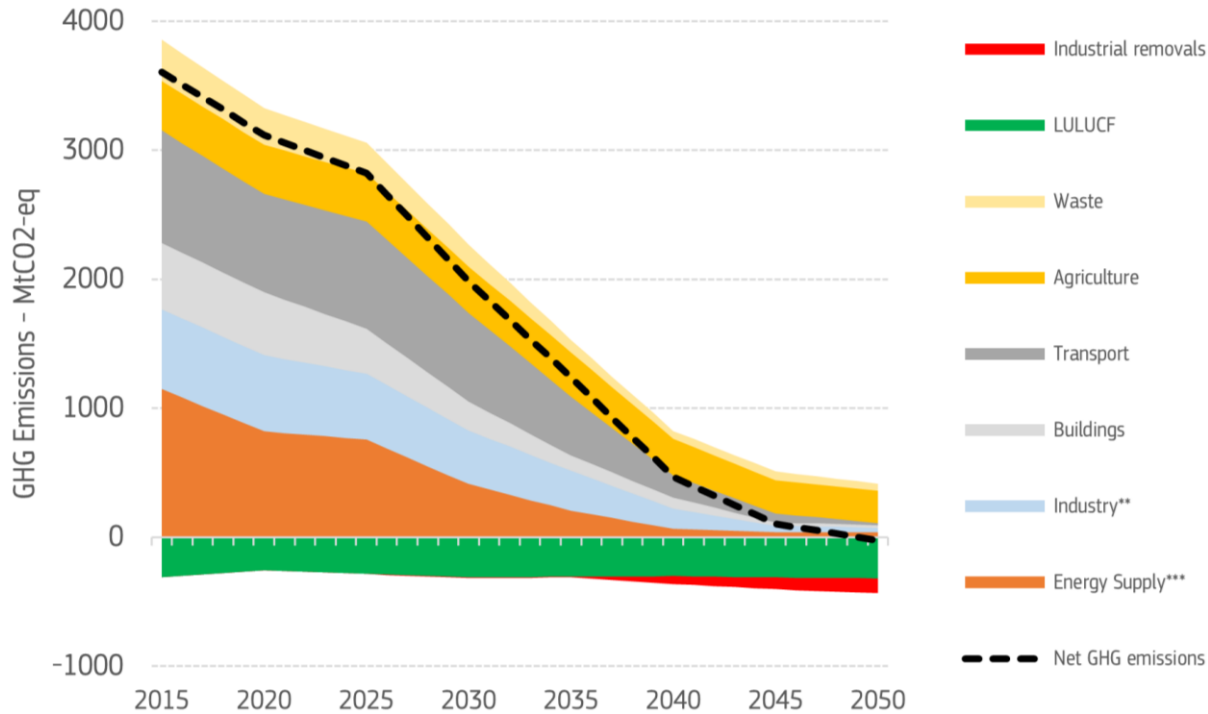


Fig.1 : Net zero GHG emissions scenario

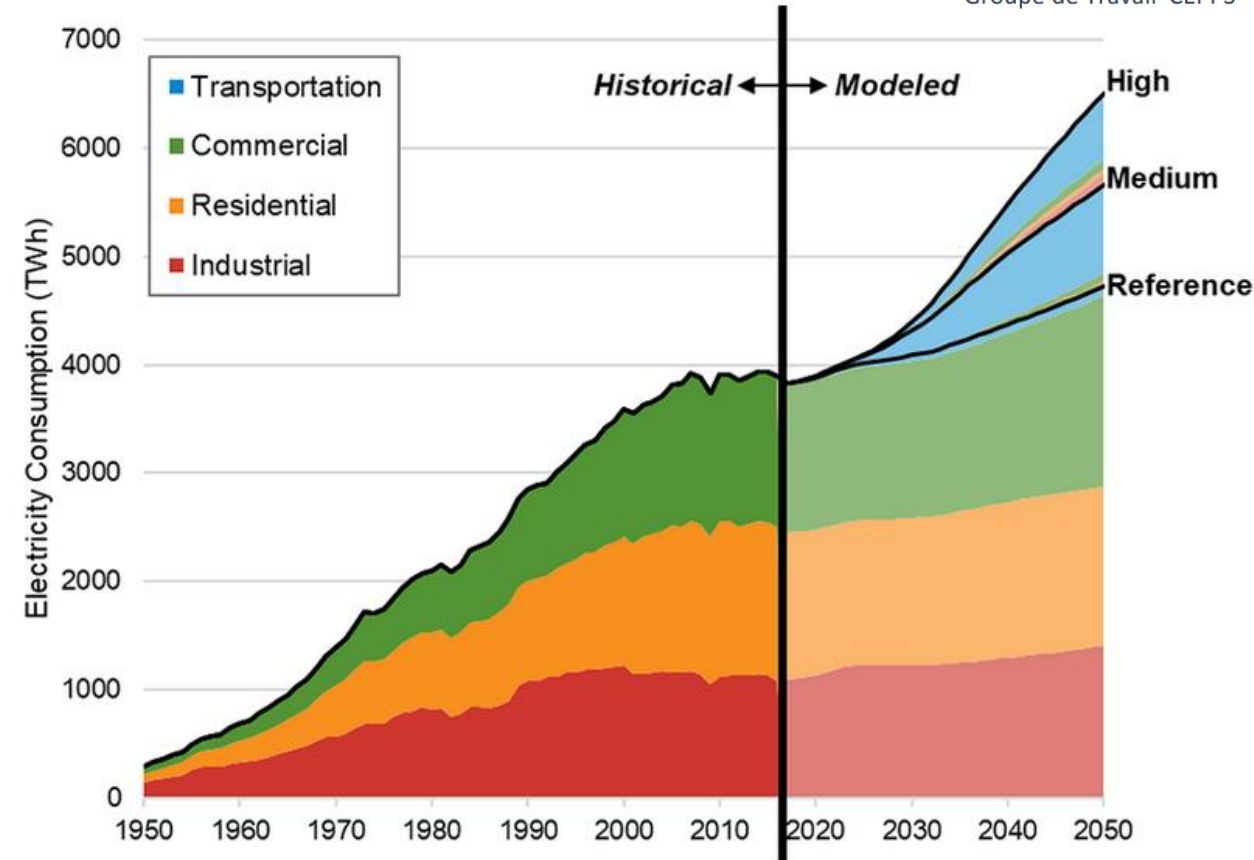
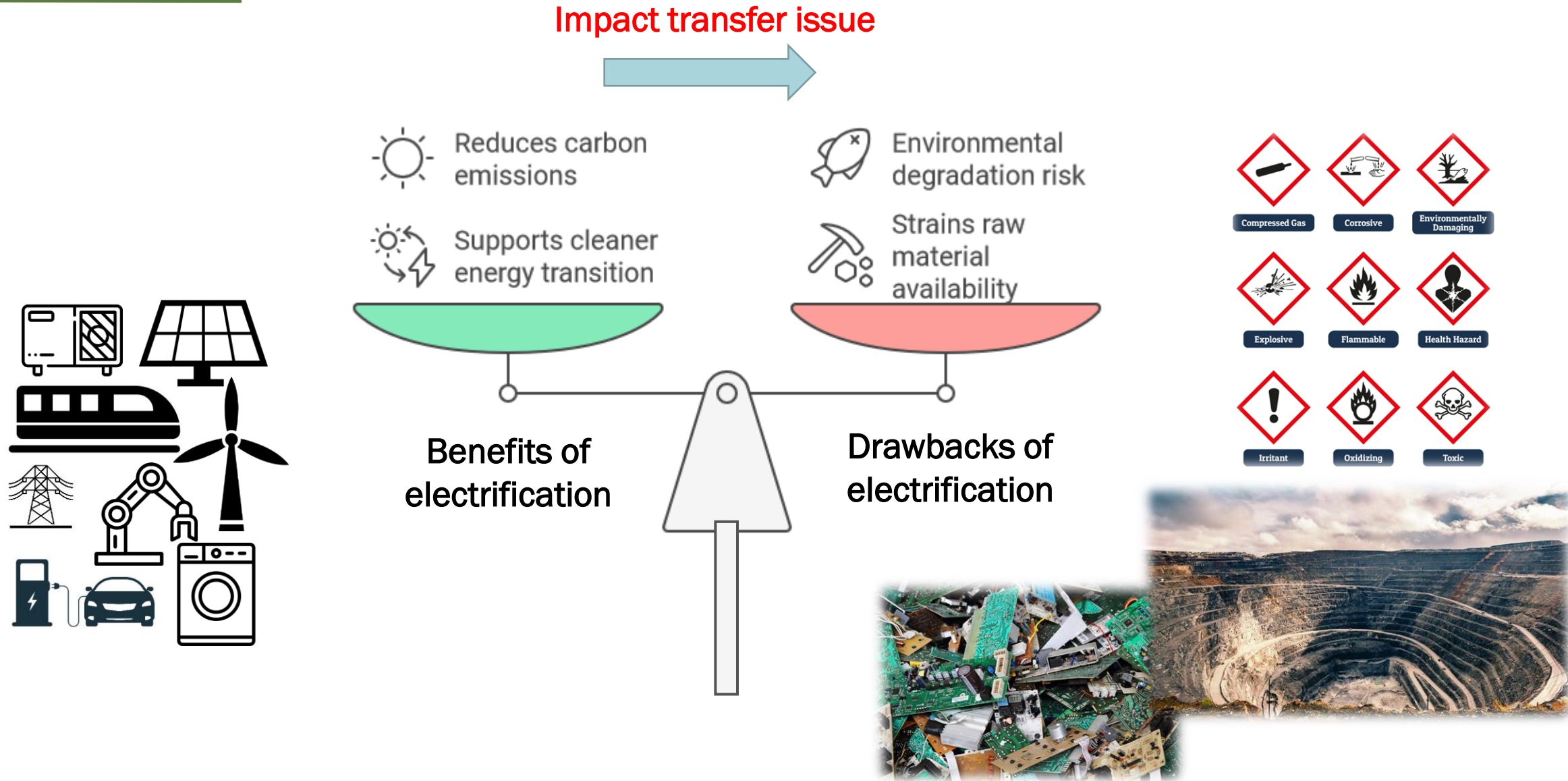


Fig.2 : Energy consumption of electricity in different fields

Sustainability dilemma in elect. engineering

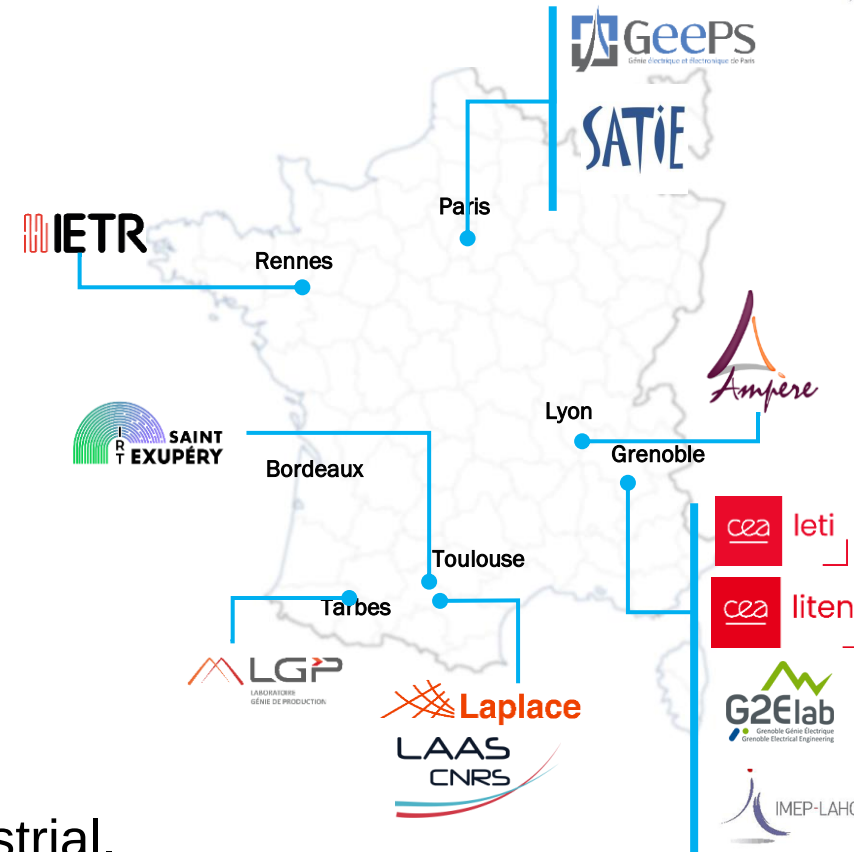


Introduction of CEPPS

More Sustainable Power Electronics Converters (MSPEC)

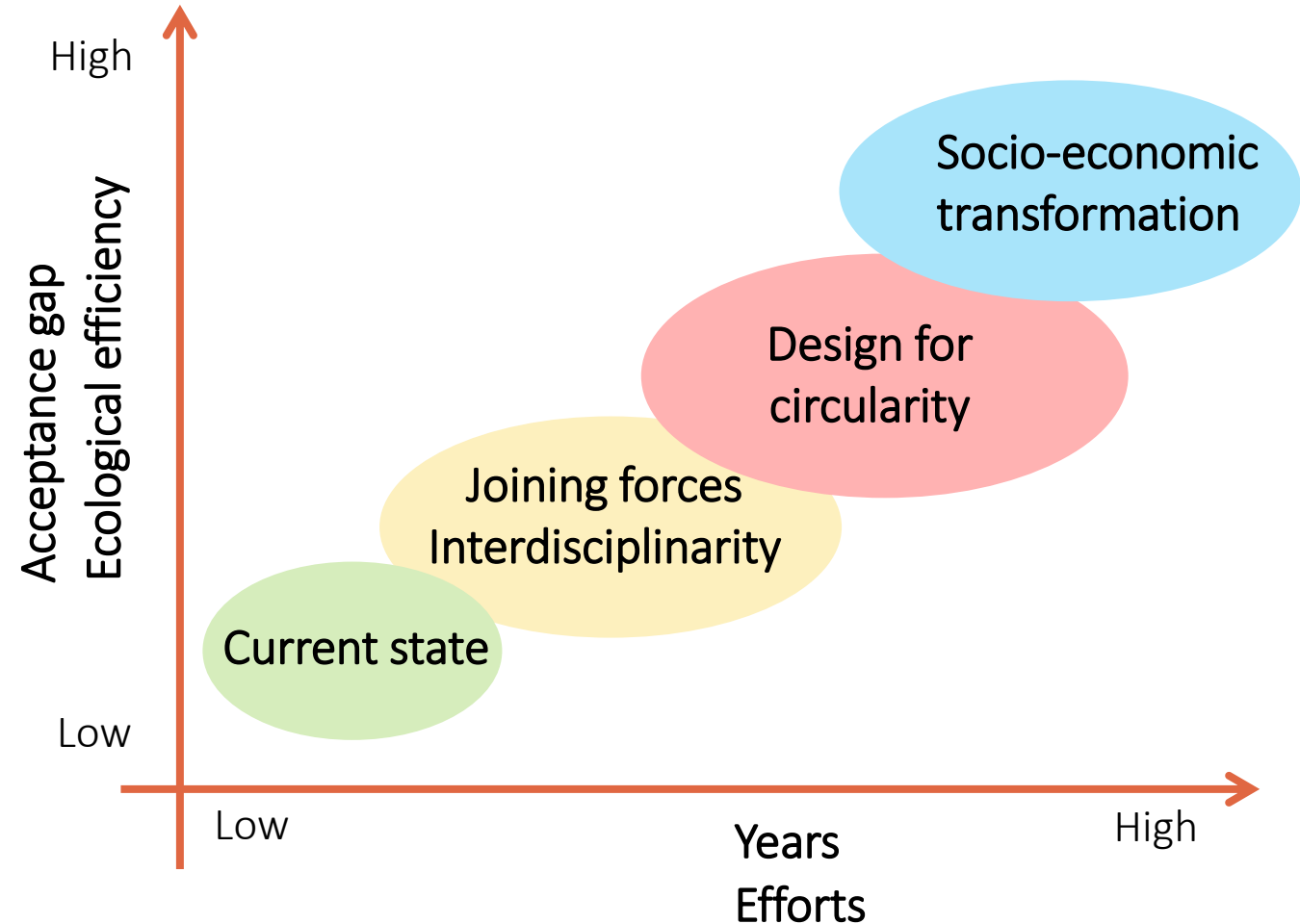
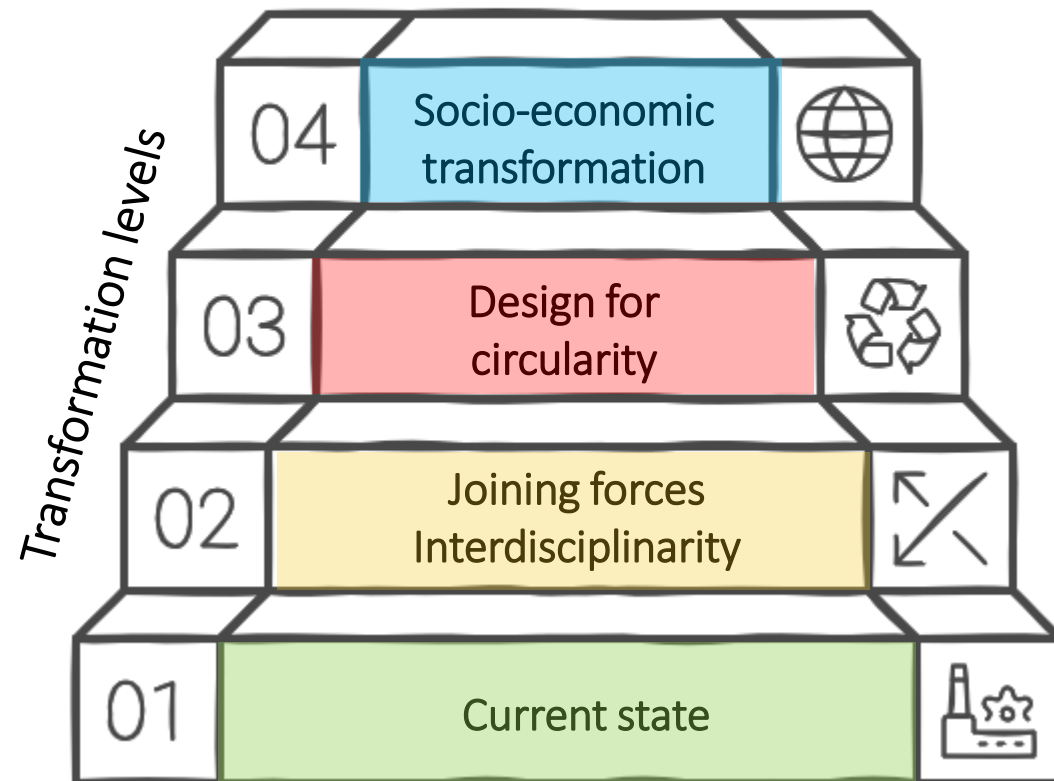


- **Community building:** Establish a framework for collaboration between/among academic and industrial.
- **Awareness and Education:** Develop training/educational materials and events.
- **Roadmap and Innovation:** Create a roadmap to guide technological decisions and establish coming up challenges.



The road for sustainability in PE

Progression Towards Sustainable Power Electronics



LEVEL 1:

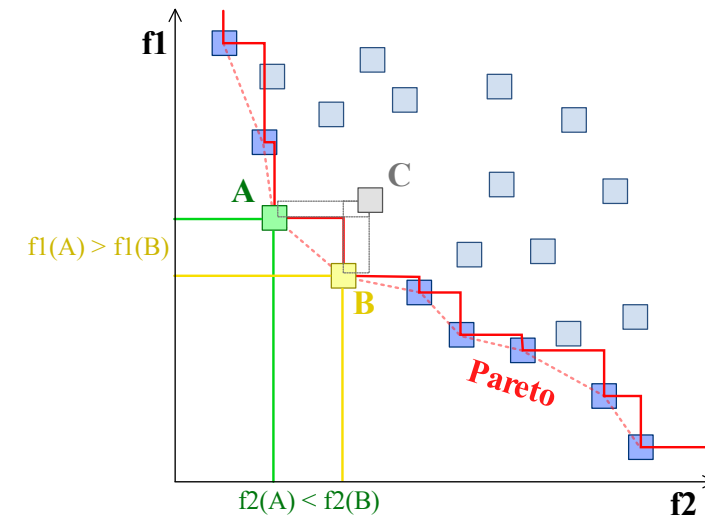
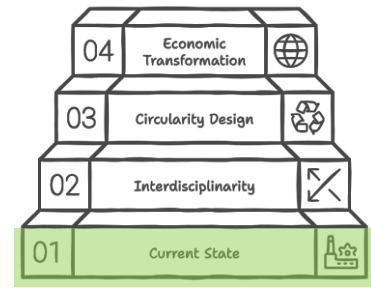
Current state (awareness)

Criteria	Level
Efforts	Low
Acceptability gap (within the field)	Low
Transformation factor	Low
Temporality	Now

Level 1: Awareness

Today framework

- ❑ Traditional knowledge / objectives of power electronics engineers
- ❑ Convinced to save the planet with electrification
- ❑ No interest/knowledge about EoL and WEEE.



Current state of power electronics

Power electronics DNA

Efficiency 
>90% efficiency
Energy loss reduction

Size/Weight 
Compact design
Light weight

Reliability 
Cooling system
Heat dissipation



 **Output Regulation**
Stable current/voltage
 $\pm 1-5\%$ tolerance

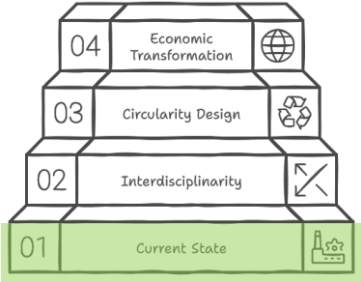
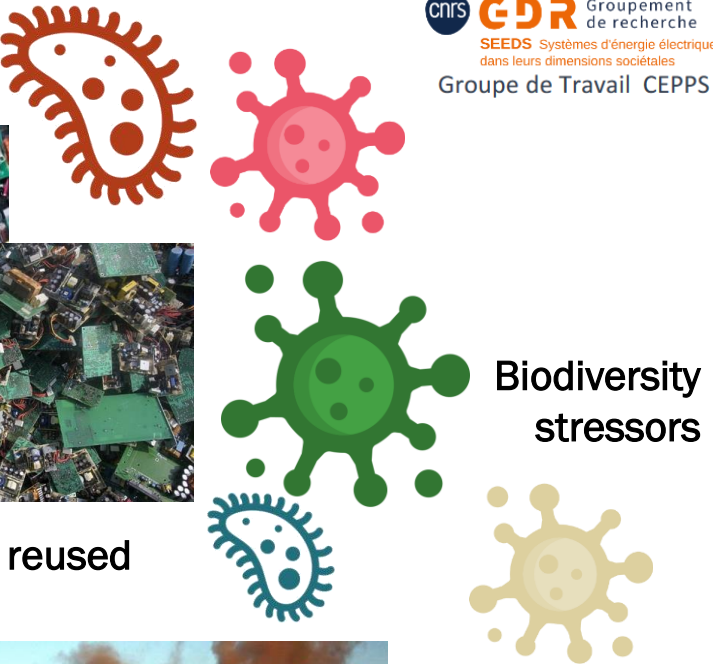
 **Cost**
Cost effectiveness
Performance-budget balance

WEEE “parasitic” (uncontrollable) spread

Few % recycled



Even fewer % reused

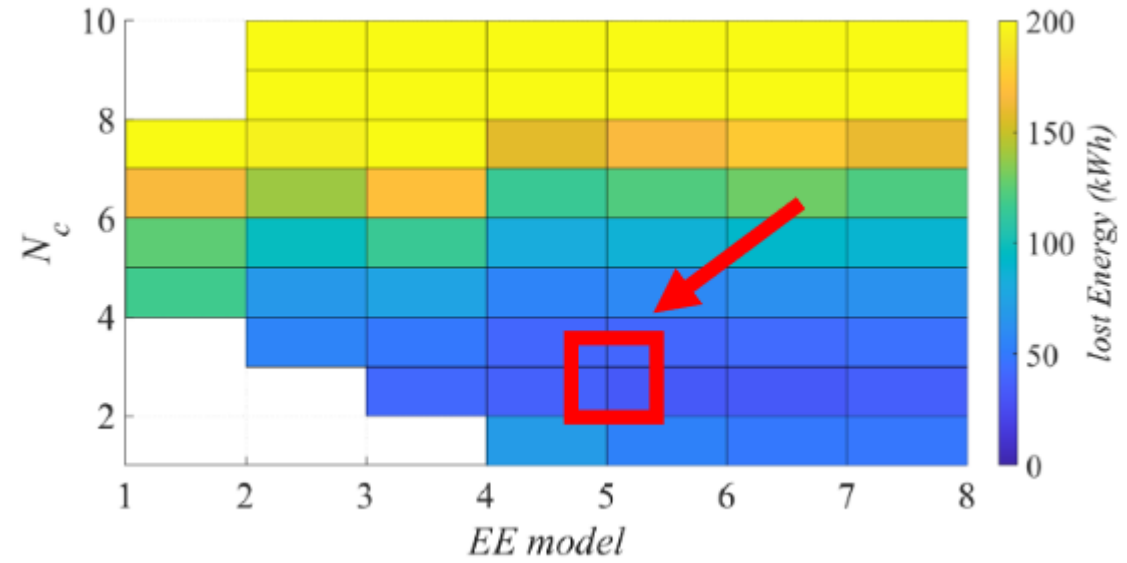
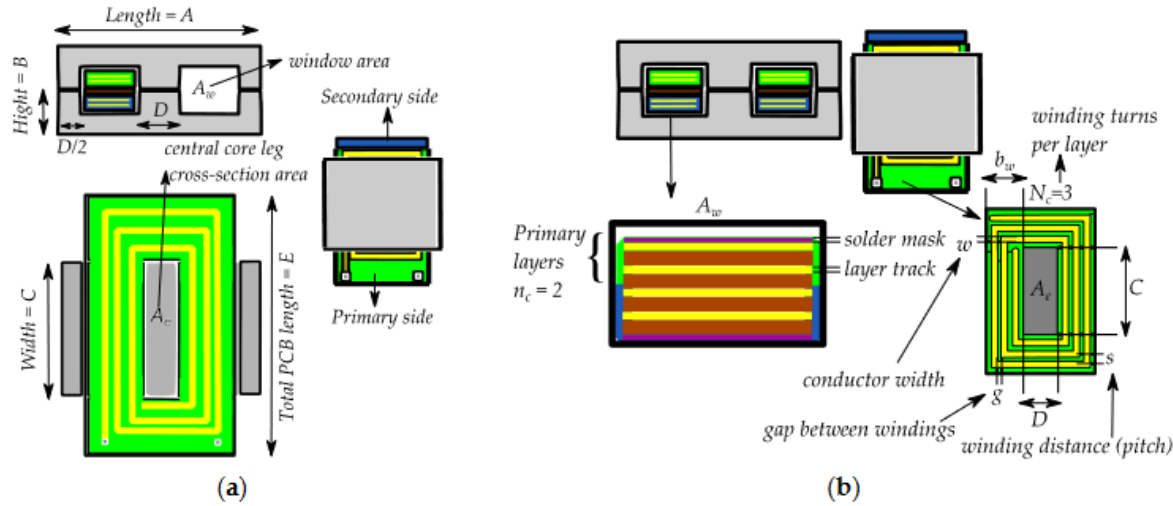
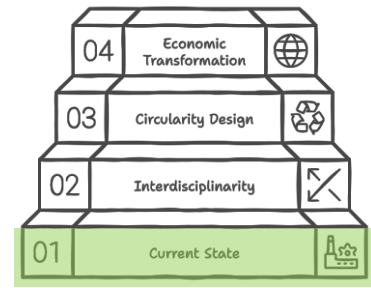


 **PowerAlps**
Université Grenoble Alpes

 **GDR** Groupement de recherche
SEEDS Systèmes d'énergie électrique dans leurs dimensions sociétales
Groupe de Travail CEPPS

Multiple pollution and material depletion

Example 1: the limits of planar transformer eco-sizing !



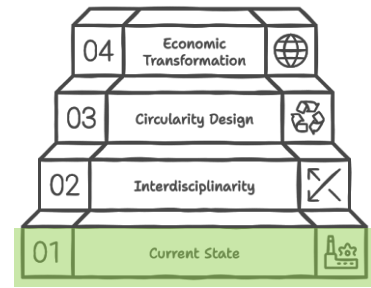
Optimization based on the embedded energy use and loss during the whole life cycle in a 20V 150kHz DAB application

From **E58/11/28** to **E38/10/28** !!!



Insignificant improvement

Level 1: Awareness and data acquisition



Challenges

- ☐ Exposing the **gaps/dilemma** in current practices
- ☐ **Awareness** of traditional limitations
- ☐ Perceived contribution of engineers



Questionnaire sur les DEEE
Summer school, forte demande et intérêt

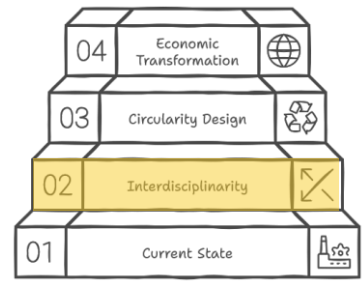
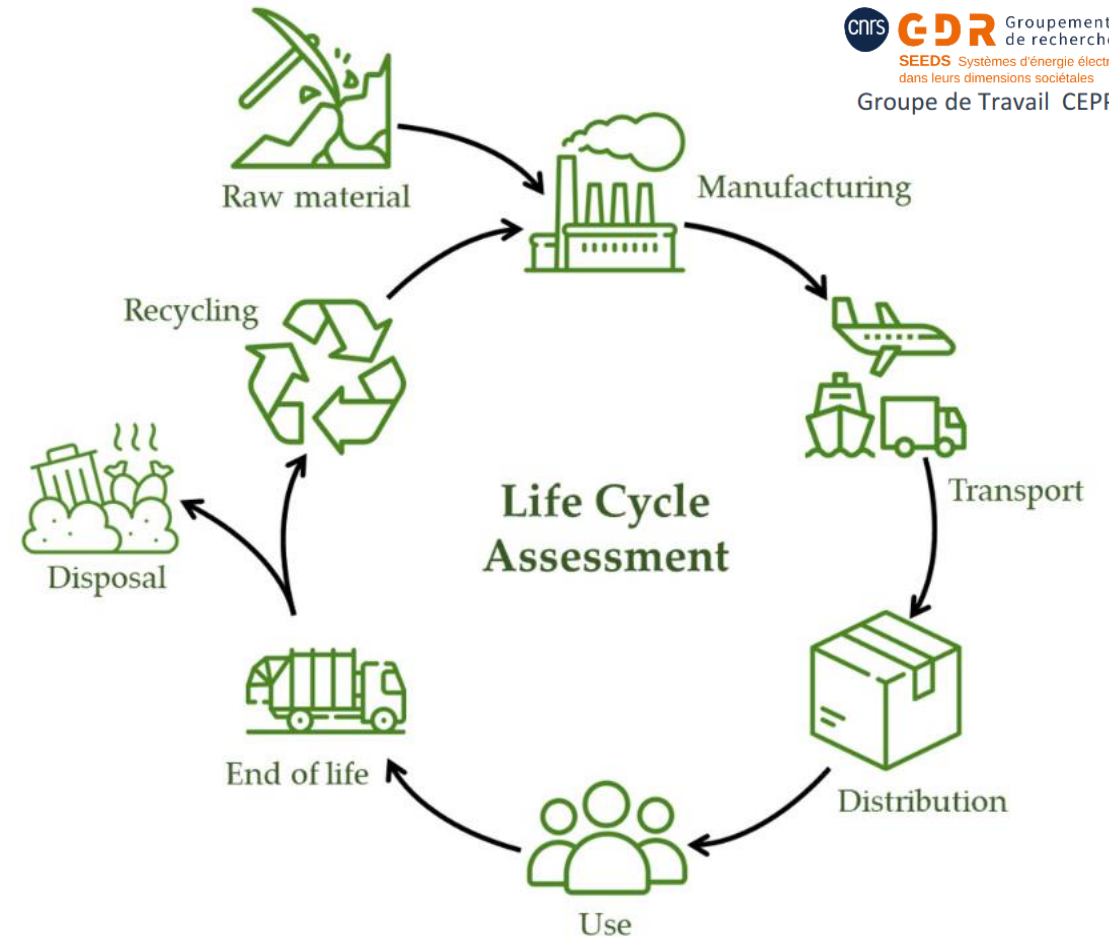
LEVEL 2: Joining our forces (Interdisciplinarity)

Criteria	Level
Efforts	Medium
Acceptability gap (within the field)	Medium
Transformation factor	Medium
Temporality	ASAP (0-5 years)

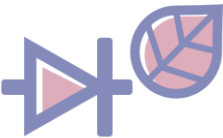
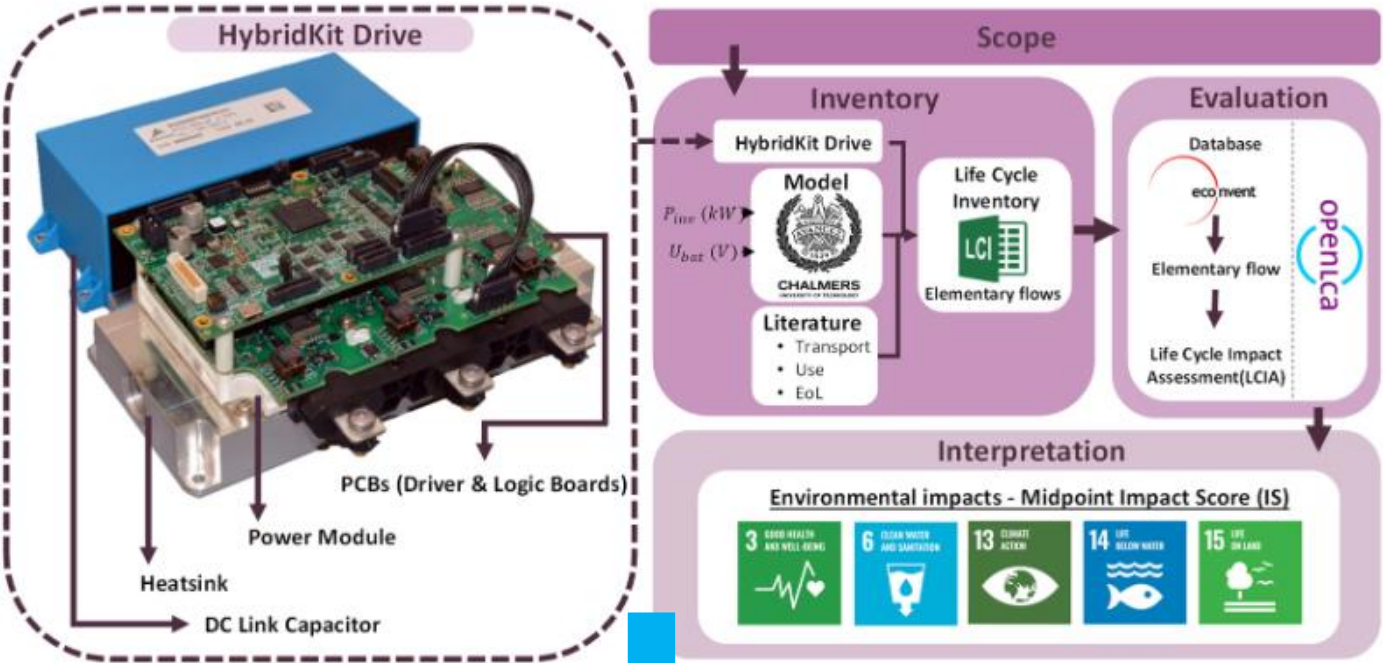
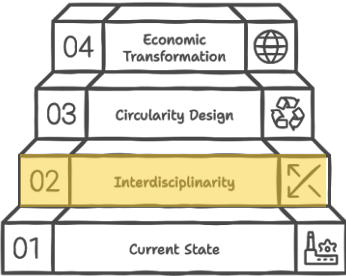
Level 2: Interdisciplinarity

Framework

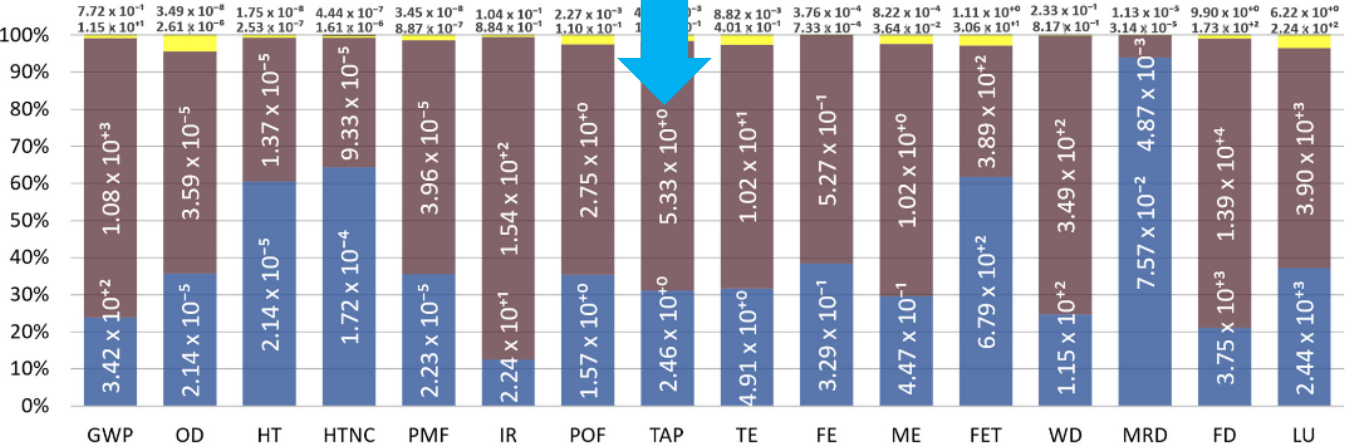
- ❑ Emphasizes integrating **new knowledge and criteria across the full value chain.**
- ❑ Introduce a **comprehensive sector assessment** in PE design flow : data, tools, methods, indicators.
- ❑ Eco-Optimization/sizing on the **whole life cycle and for several environmental impacts**



Example 1: Life Cycle Assessment of a 150 kW Electronic Power Inverter



Power Electronics Life Cycle Assessment

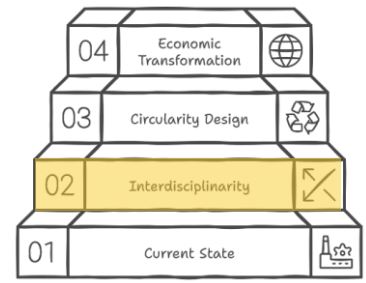


□ Emergence of adapted frameworks

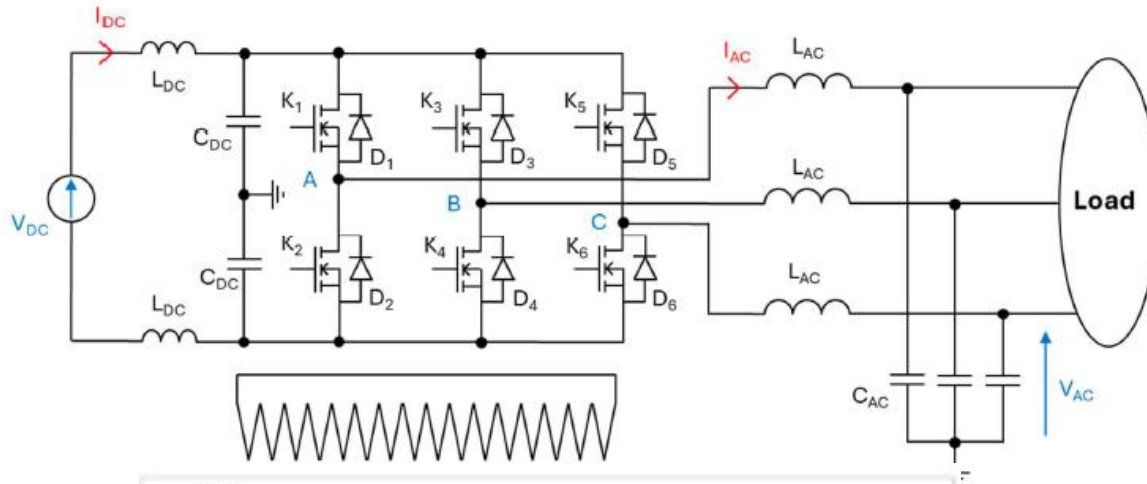


Baudais, B.; Ben Ahmed, H.; Jodin, G.; Degrenne, N.; Lefebvre, S. Life Cycle Assessment of a 150 kW Electronic Power Inverter. *Energies* 2023, 16, 2192. <https://doi.org/10.3390/en16052192>

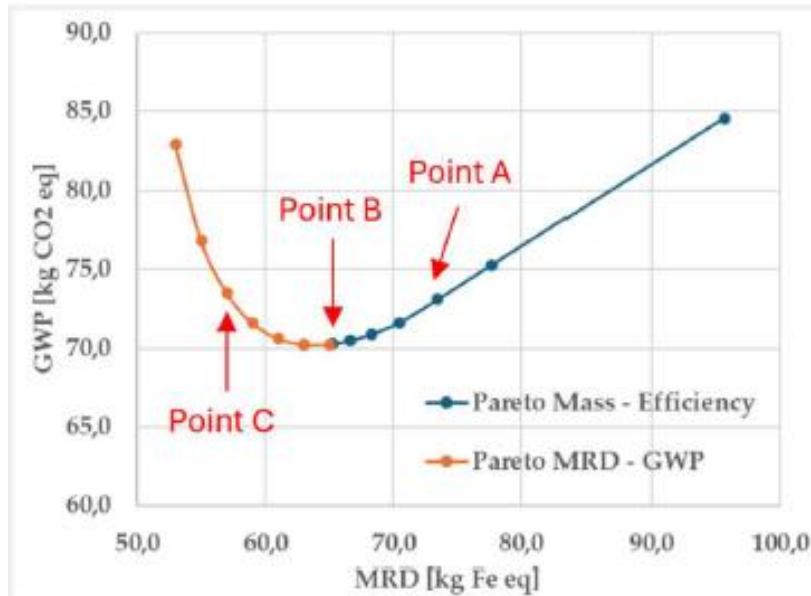
Example 2: Sustainability indicators integration into PE optimization



Voltage Source Inverter for UPS application

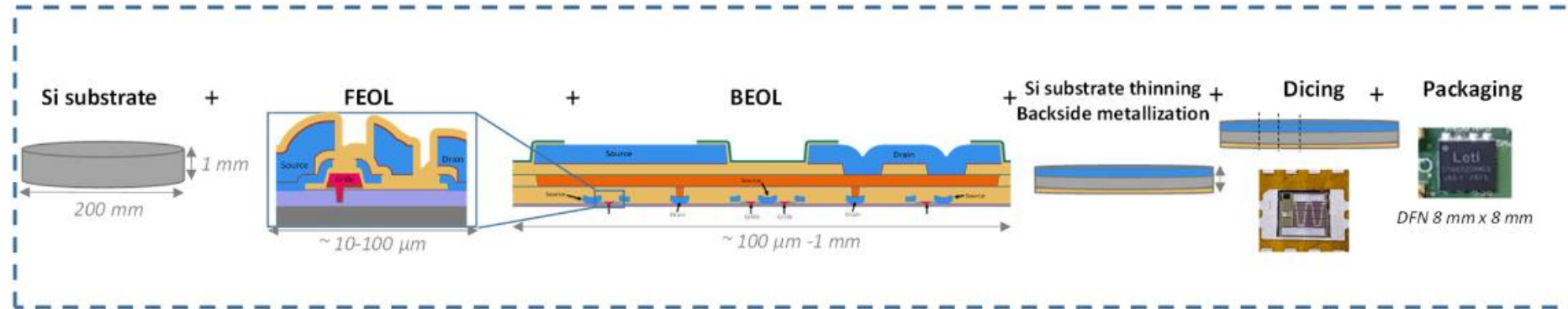
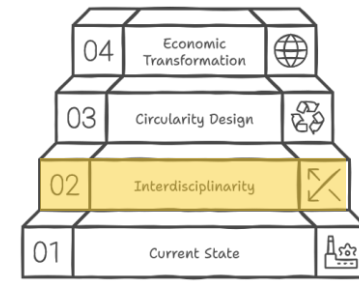


- integrating sustainability indicators like GWP and MRD into power converter design.
- Combines optimization algorithms with environmental metrics.



- Long use time minimizes environmental impact.
- For short use, reducing copper in inductors improves MRD.

Example 2: LCA of GaN Power Semiconductor Device



INPUT

OUTPUT

Energy (electricity and natural gas)
Softened water, Process cooling water

Clean Room

Manufacturing tool

Process

Deionized water, clean dry air, N₂, O₂, He, Ar, vacuum

Abatement systems: Electricity, Gaz, O₂, softened water
Liquid and gas chemicals, metals
Deionized water
Electricity
Clean dry air, service N₂
Si monitor wafers

FC air emissions with/without abatement
Water emissions

Top-down approach: Data allocated from global clean room consumption

Bottom-up approach: Data collected for each process

Bottom-up when available // otherwise Top-down

Not taken into account



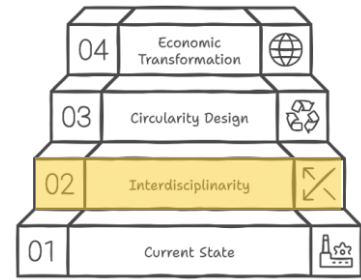
- ❑ First detailed cradle-to-gate life cycle assessment for GaN/Si power devices
- ❑ Recommendations: improving gas abatement, recovering/replacing gold

Vauche, L.; Guillemaud, G.; Lopes Barbosa, J.-C.; Di Cioccio, L. Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment (LCA) of GaN Power Semiconductor Device. Sustainability 2024, 16, 901. <https://doi.org/10.3390/su16020901>

Level 2: Interdisciplinarity

Challenges

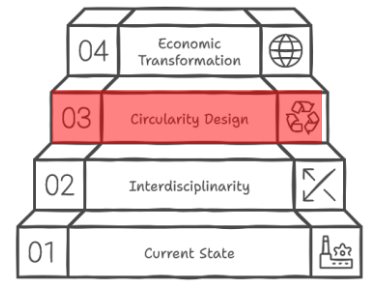
- ❑ Lack of accurate data from the value chain
- ❑ Complex/globalized value chain stakeholders
- ❑ Lack of tools and universal/unified methodologies for **LCA in PE**
- ❑ Integrating **End Of Life scenarios** in design constraints and **LCA**



LEVEL 3: Design for circularity

Criteria	Level
Efforts	High
Acceptability gap (within the field)	Medium
Transformation factor	Medium
Temporality	ASAP (5-10 years)

Level 3: Design for circularity

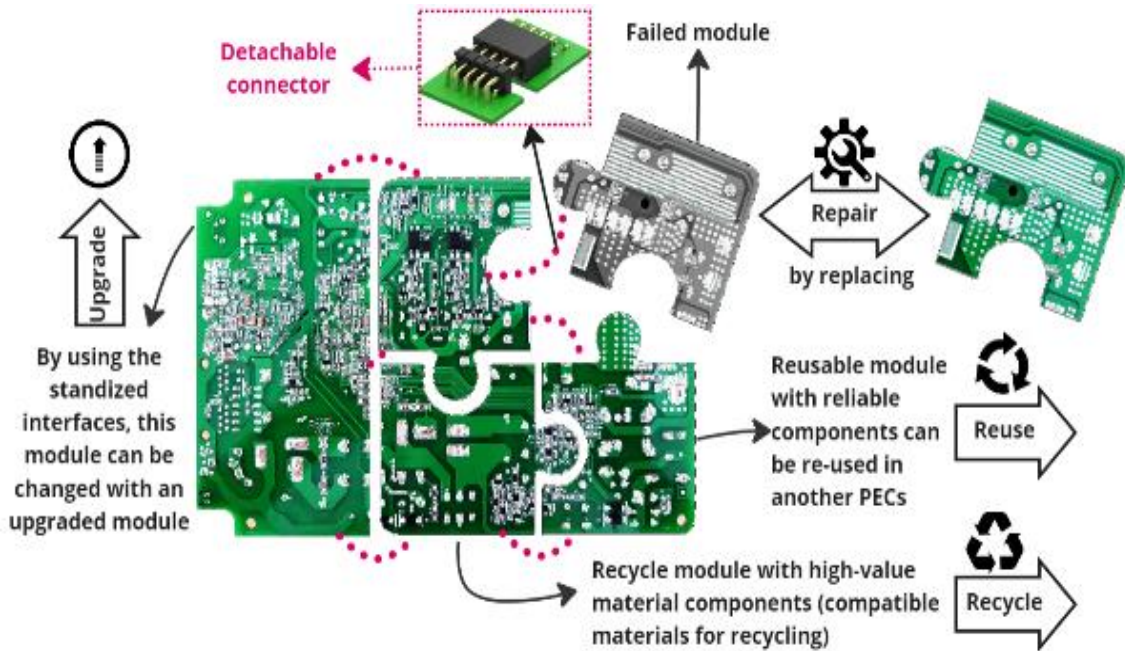


Framework

- ❑ Integrate **new environmental indicators and design rules** in early stage decision-making toward circularity.
- ❑ **Switch design practices and introduce new materials, architectures, topologies** for circularity
- ❑ **Include Economic and Social Sciences** to act on the value chain and introduce new products, services, and actors.
- ❑ Involve Power electronic engineer in the **End Of Life** of the converter

Example 1: Modular standardized (automated) design

- Power Converter Arrays
- Series parallel associations of
- standardized conversion cells

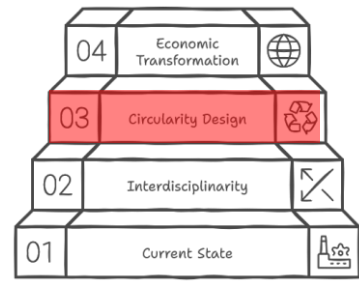


- Own tech
- One hardware, many functions / many applications



The power level you need

Source : LAAS/CNRS
<https://www.owntech.org/en/home-en/>



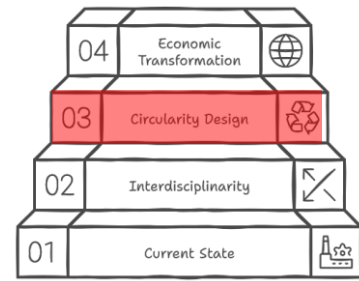
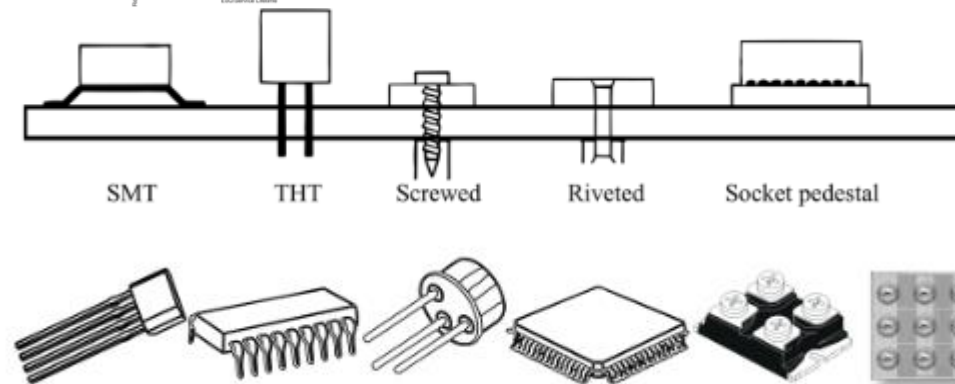
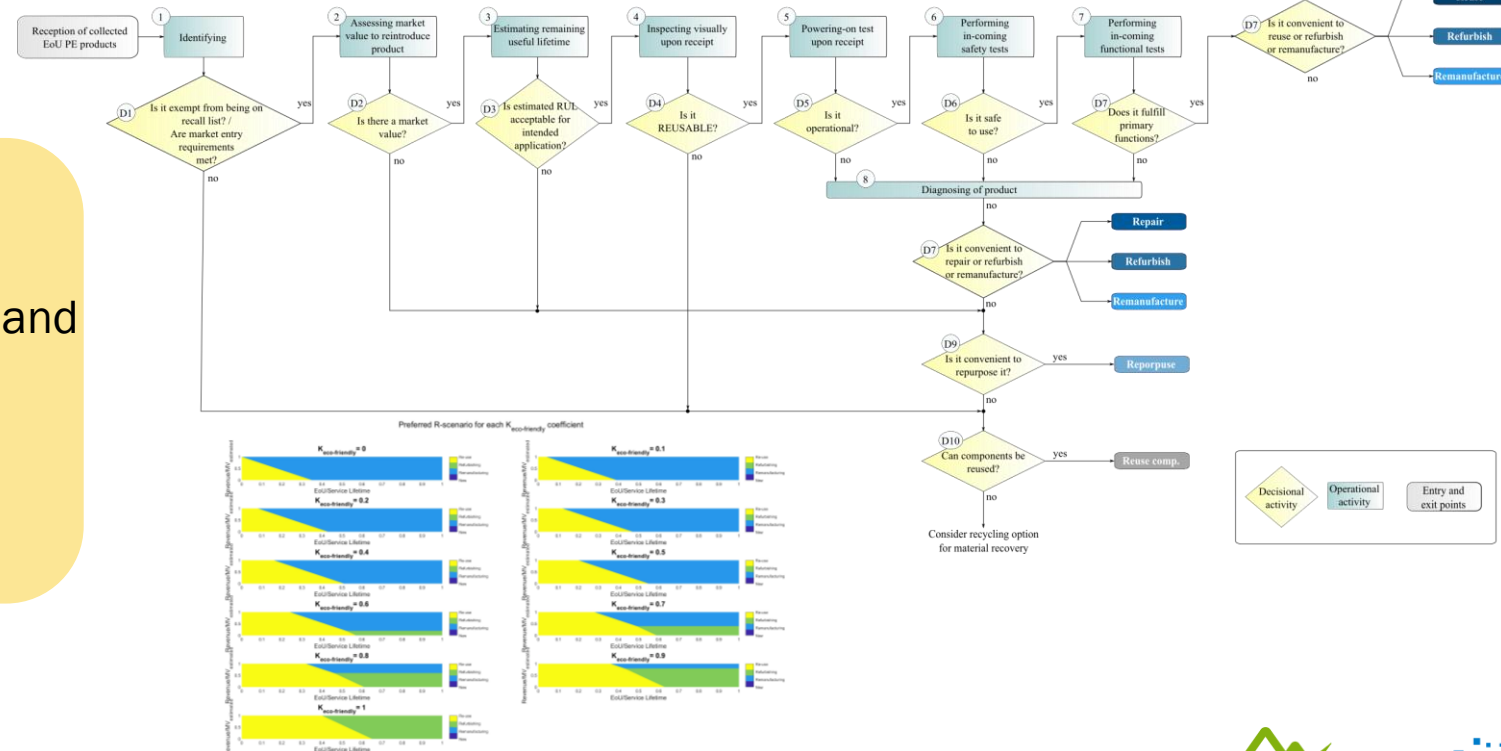
Example 2: Residual value and other Rs indicators

Residual value

- ❑ Used for warranty
- ❑ used for diagnosis and maintenance
- ❑ Allow the reuse of soem components

Disassembly indicator

- ❑ Scores the difficulty of disassembly
- ❑ used as a design criteria
- ❑ Used for maintenance

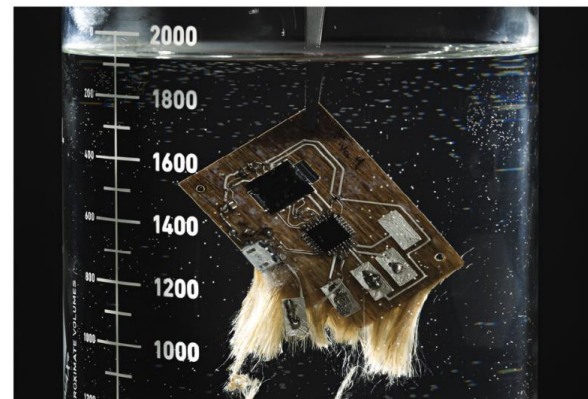
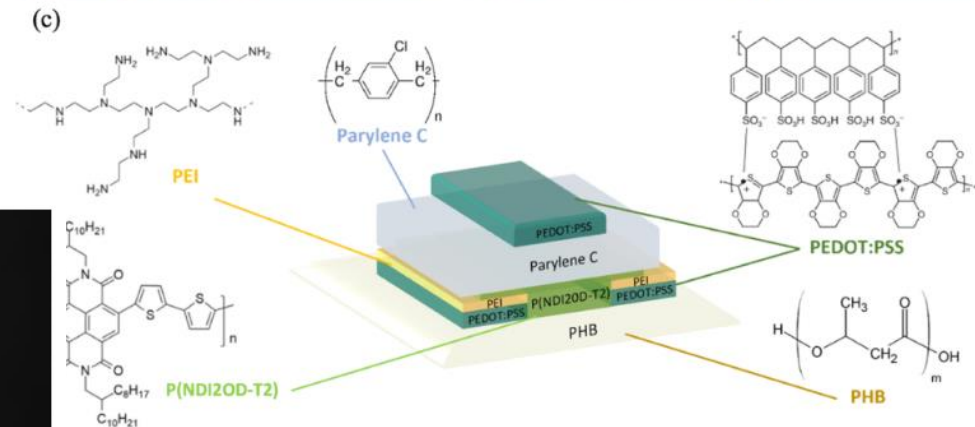
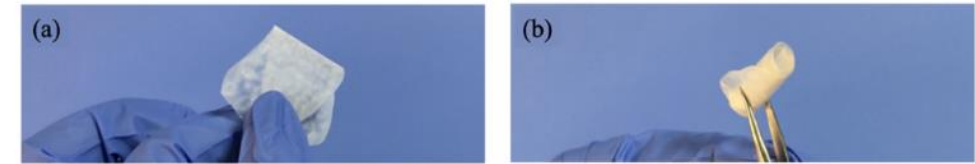
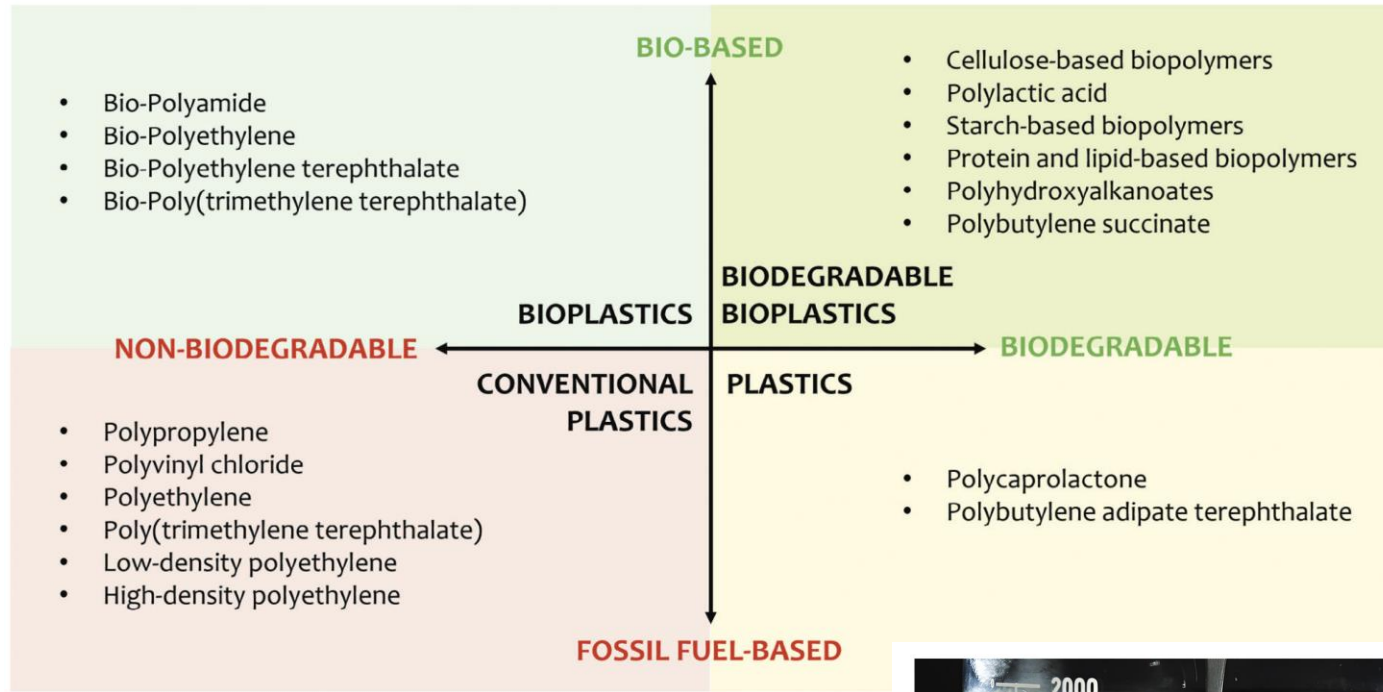
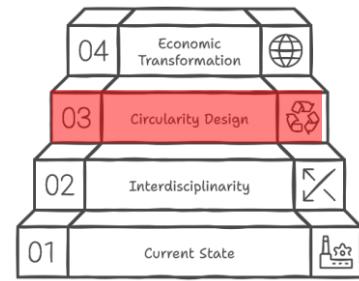


T. Turkbay Romano Li Fang, Thecle Alix, M. RIO, J. Mélot, F. Serrano, P. Lefranc, Y. Lembeye, N. Perry, J.-C. Crebier - Disassemblability Assessment of Power Electronic Converters for Improved Circularity-Sustainability - Vol. 16, n° 11, p.4712 - 2024

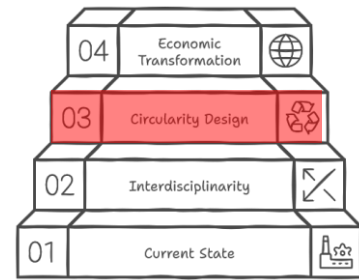
B. Rahmani, M. Rio, Y. Lembeye, J.-C. Crebier, Design for Reuse: residual value monitoring of power electronics' components, Procedia,

CIRP,2022,<https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.22>

Example 3: Bio-sourced substrate and transistors for power electronics



Level 3: Design for circularity



Challenges

- ☐ Question/arbitrate **performance quest versus end of life optimization**
- ☐ **Ecosystem building** for circular economy
- ☐ **Technical issues/development** related to diagnosis, dis/reassembly, standardization, modularity...
- ☐ **Absolute LCA** (with limits to keep) for actual/strong sustainability
- ☐ **Legal, logistic and mindset** (competitiveness, infinite growth,...) issues

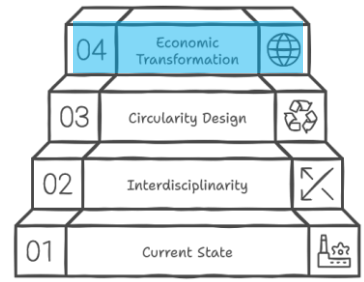
LEVEL 4: Socio-economic transformation

Criteria	Level
Efforts	High
Acceptability gap (within the field)	High
Transformation factor	High
Temporality	ASAP (>15 years)

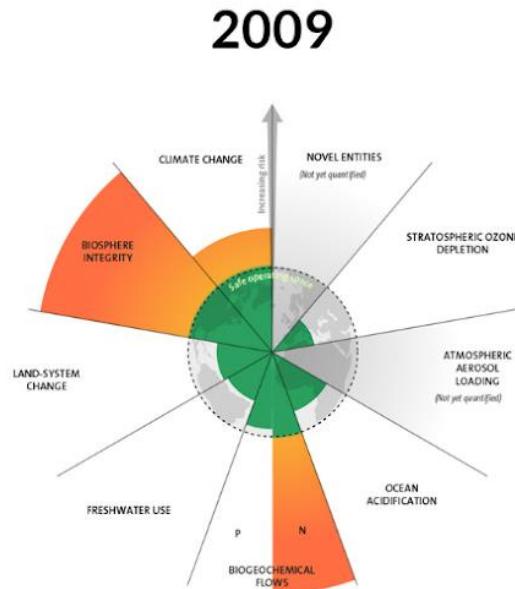
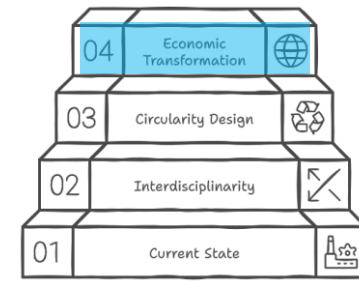
Level 4: Socio-economic transformation

Framework

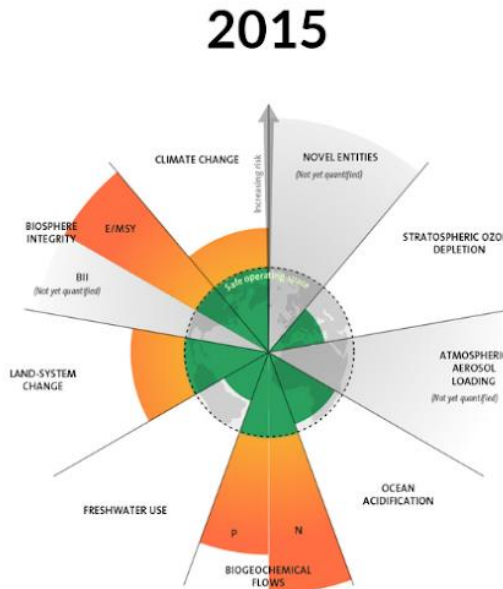
- ❑ **Planetary boundaries**, strong environmental impacts
- ❑ **Globalization**, and hard competition
- ❑ **Permanent growth**



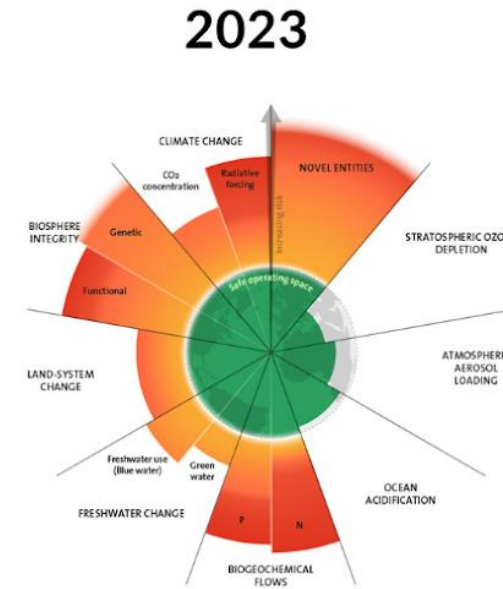
Level 4: Planetary boundaries



7 boundaries assessed,
3 crossed



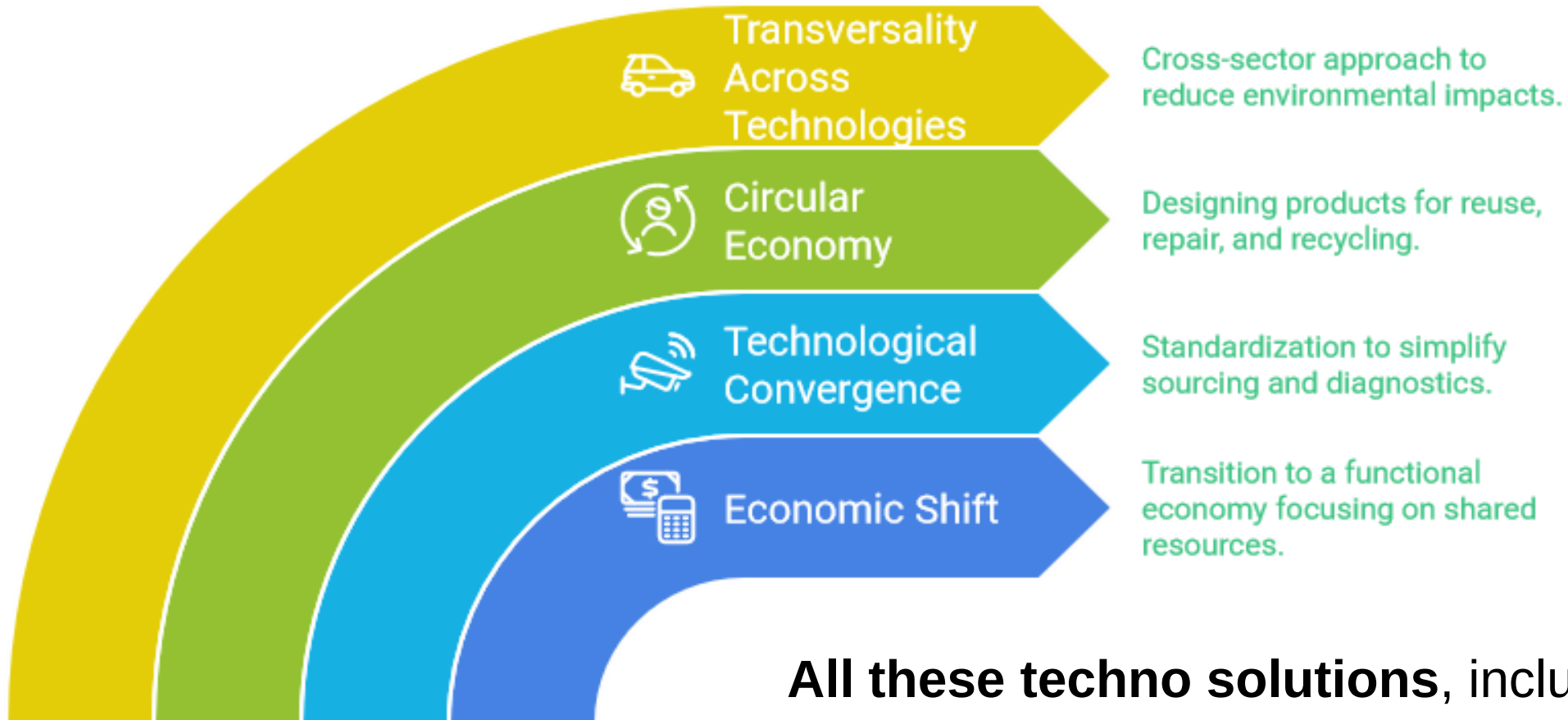
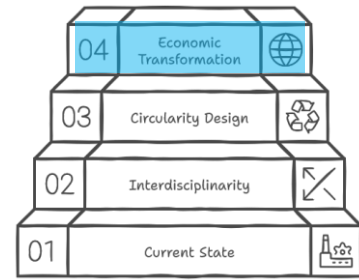
7 boundaries assessed,
4 crossed



9 boundaries assessed,
6 crossed

On est dans le rouge, à fond !
Mais on peut voir que interdire les HFC etc... peut nous maintenir dans les limites planétaires, c'est avant tout une question de choix

Level 4: Socio-economic transformation



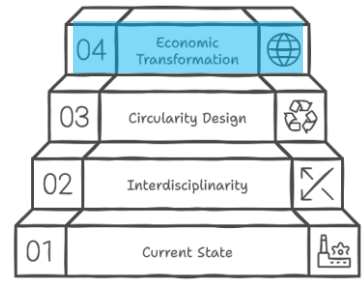
**More performance =
I can save more
I can use more**

**Circular + Recyclable =
No need to care,
I can buy more**

**Cheaper =
I can buy more**

All these techno solutions, including circular economy, high recycle rates, super eco-design approaches, are **good but not enough** due to multiple **rebound effects**

Level 4: Socio-economic transformation



Challenges

Réfléchir aux apports de l'IA
Quand stopper la quête de la perf

- ☐ **Stop foolish ourselves** with the techno solution optimism !
Performance quest mantra totally **incompatible with our planet limits** (leading to endless and multiple **rebound effects**)
- ☐ **Share widely that technical solutions/improvements won't be enough** to make technologies (and therefore power electronics) actually sustainable (into the planetary boundary limits)
- ☐ **Call for complementary, non technical sciences and solutions** to make our technical efforts do not end increasing the problems

Merci

Presentation slightly adapted by JC Crébier from the original GT CEPPS roadmap.

Thanks to all CEPPS members for contributing to define a roadmap toward more sustainable power electronics

Mailto:

Laurent Dupont: laurent.dupont@univ-eiffel.fr

Jean-Christophe Crébier: jean-christophe.crebier@g2elab.grenoble-inp.fr

Enjeux liés à la soutenabilité en recherche en électronique de puissance : une ethnographie



Ingénieur – Génie Mécanique
Master – Ingénierie et Management de
l'Environnement et du Développement Durable

L A N D A N G E R

Ingénieur R&D instrumentation chirurgicale



Ingénieur de recherche

SOMMAIRE

Attendus et questions de
recherche

Méthodologie

Résultats de l'étude

Vers une EP plus soutenable

Attendus et questions de recherche

Attendus et questions de recherche

Mission

WP1 Expertise: Addressing Sustainability in Power Electronics researchers and designers activities

Mission

Identifier les points de blocage et les leviers pour la prise en compte de la soutenabilité dans les activités de recherche en électronique de puissance



Utilisation de **méthodes ethnographiques**

Questions de recherche

1. De quelle manière la soutenabilité est-elle abordée par les chercheur.es (qu'iels s'en soient déjà saisi ou non) ?
2. Comment expliquer les différences d'interprétation et de prise en compte de la soutenabilité entre les chercheur.ses ?
3. De quelle manière le milieu de la recherche en électronique de puissance structure-t-il la prise en compte de la soutenabilité ?

Soutenabilité, proposition de définition

- Propriété **systemique**, pas d'un produit ou service isolé
- Préservation des conditions d'habitabilité de la biosphère pour les vivants
- Sans dépasser les limites planétaires
- Permettant l'accès à des conditions de vie décentes pour les générations présentes et futures
- Enjeux multiples et complexes (rétroactions)

Méthodologie

Ethnographie ?

Principes de l'ethnographie

Méthodes nées fin XIX^e - début XX^e siècle

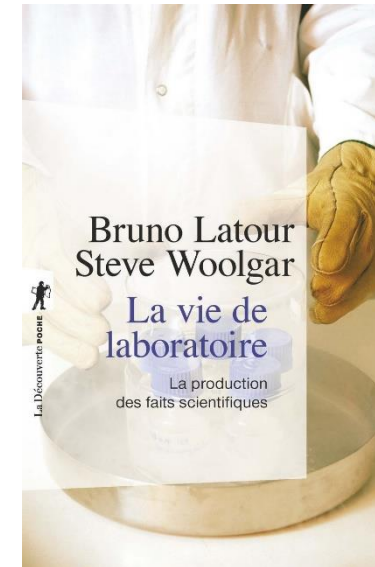
Aujourd'hui très utilisées

Caractéristiques

- Travail de terrain (**immersion**, longue durée)
- Données diverses
- Étude principalement **qualitative**
- Nombreuses références méthodologiques

Résultats :

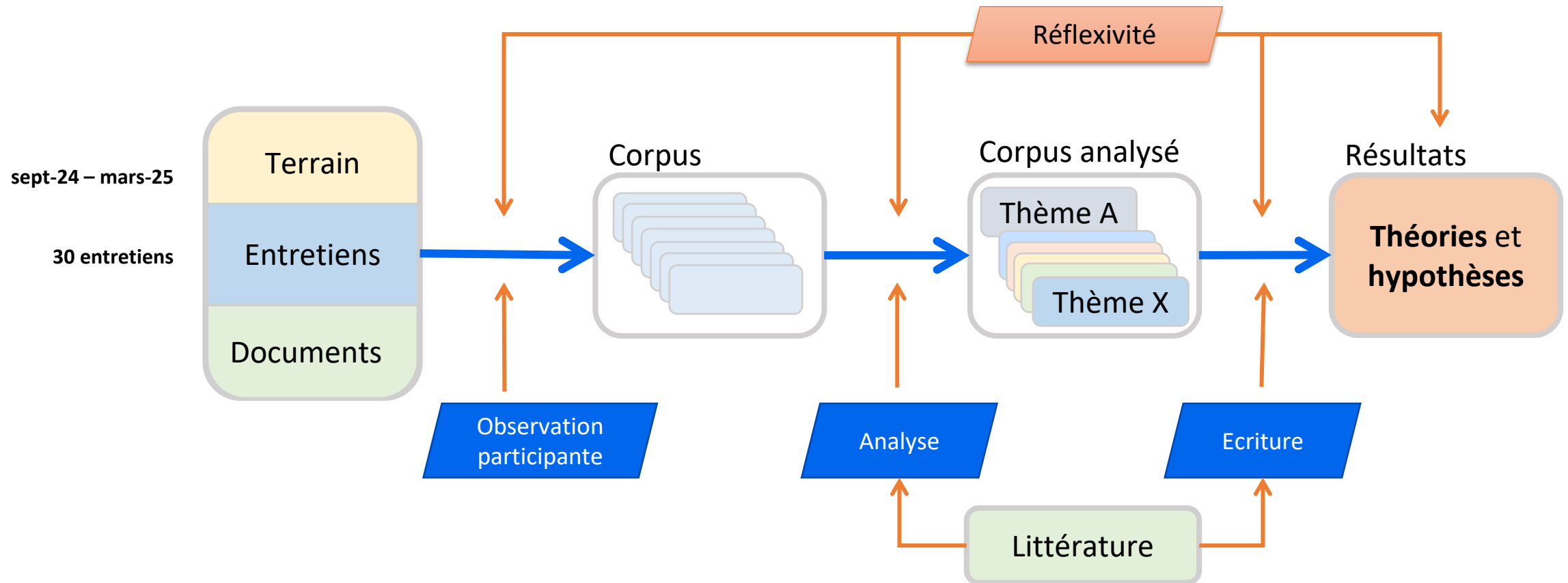
- Centrés sur un/plusieurs terrains
- Compréhension fine d'une situation/culture
- Production de théories



→ laboratoire de
neuroendocrinologie à San
Diego, 1979

→ « rendre compte de la
production de savoir
scientifique »

Démarche ethnographique



Résultats de l'étude

Prise de conscience des enjeux écologiques

Une prise de conscience plutôt récente

- Plutôt après 2018
- Crise sanitaire concomitante plutôt qu'un déclencheur

Raisons principales évoquées par les participants	Nombre d'occurrences
<i>Discussions avec les collègues, autres équipes, GdR, etc.</i>	10
<i>Temps de réflexion supplémentaire pendant COVID</i>	5
<i>Participation à un projet de recherche intégrant ces enjeux</i>	4
<i>Médiatisation générale de ces enjeux</i>	3
<i>Guerre en Ukraine</i>	1
<i>Questions de sens au travail</i>	1

Facteurs majoritaires

- Le cercle professionnel semble être fondamental
 - Collègues et cercles professionnels étendus
 - « Autrui significatifs » et figures de référence
- Crise sanitaire (ralentissement de la recherche)

Ambivalence de la soutenabilité dans les projets de recherche

- Opportunismes de financement
- Catalyseur de l'écologisation des chercheurs

Différentes visions des « enjeux » de la soutenabilité

Des visions contrastées et diverses, bien que certains enjeux soient prépondérants

- Les « enjeux » ne sont pas perçus **uniformément** au sein des chercheur.es rencontré.es

Codes liés aux visions de la soutenabilité	Nombre d'occurrences
<i>Stratégies d'économie circulaire</i>	87
<i>Impacts environnementaux</i>	73
<i>Accès aux ressources et souveraineté</i>	56
<i>Sobriété</i>	42
<i>Critiques du modèle économique actuel (capitalisme, mercantilisme, etc.)</i>	30
<i>Impacts sociaux et sociétaux</i>	24
<i>Durée de vie et fiabilité technique</i>	20
<i>Efficacité énergétique</i>	13
<i>Protection de la biodiversité</i>	6

Des visions diverses selon les personnes :

- Certaines mentionnent un plus grand nombre d'enjeux que d'autres
- Certains enjeux sont mentionnés par peu de personnes (ex : biodiversité)

Certains enjeux semblent prépondérants :

1. Soutenabilité en lien avec les stratégies 'R' d'économie circulaire
2. Soutenabilité en lien avec les impacts environnementaux ou les limites planétaires
3. Soutenabilité en lien avec l'accès aux ressources primaires ou la souveraineté matérielle

Une tension avec les enjeux dans la littérature EP [2] :

- Efficacité énergétique
- Éco-dimensionnement
- Écofiabilité
- Design for multiple use

[2] : L. Fang et al., 'Eco-design implementation in Power Electronics: a litterature review', in International Symposium on Advances Technologies in Electrical Systems (SATES 23), Arras, France, Mar. 2023. Accessed: Sep. 17, 2024. [Online]. Available: <https://hal.science/hal-04074109>

Briques technologiques

Briques technologiques

- Unités élémentaires développées selon des spécifications techniques
- Développées par les chercheurs
- Accumulées sous forme de « bibliothèque »
- Facilite le développement « à façon »

Risques

- Multiplication des références et topologies
- Limite les stratégies d'éco-conception et '4R'
- Limite la conception à la réponse à des datasheet
- Limite l'inclusion de nouvelles parties prenantes

Optimisation

Optimisation

- Méthode historique
- A permis d'importantes avancées techniques
- Sur tout ou partie du cycle de vie, mono ou multi-critères
- S'associe bien aux méthodes quantitatives de mesure d'impact

Risques

- Limite à des changements marginaux
- Cache les mécanismes systémiques à l'œuvre
- Peut accentuer lock-in, dépendance au sentier, effets rebonds, etc.
- Limite la prise en compte de facteurs qualitatifs

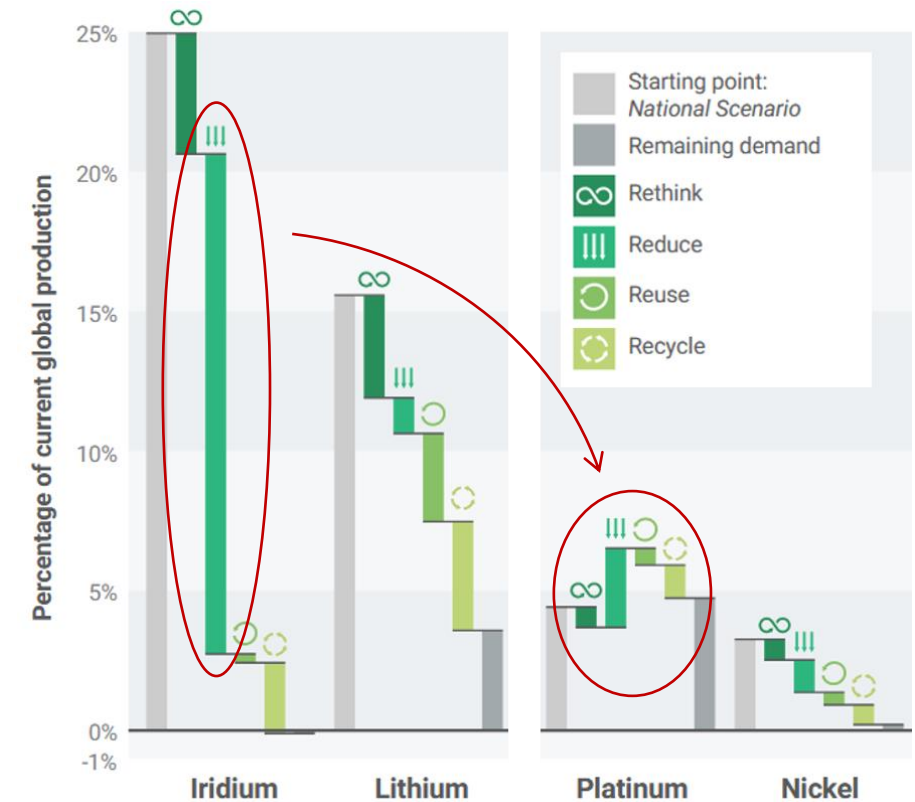
Vers une EP plus soutenable

Approfondir les rapports entre soutenabilité et économie circulaire

Economie circulaire

- Condition non suffisante à la soutenabilité
- Relation complexe entre EC et soutenabilité
- Concept ancien et traité par diverses « traditions » de pensée
- Stratégies 'R' interdépendantes et hiérarchisées
- Il faut considérer plusieurs stratégies 'R' **en cascade** [3]

Risques Effets systémiques inattendus (effets rebonds, etc.)



Effets potentiels des stratégies d'économie circulaire, Pays-Bas.
Adapté de [4]

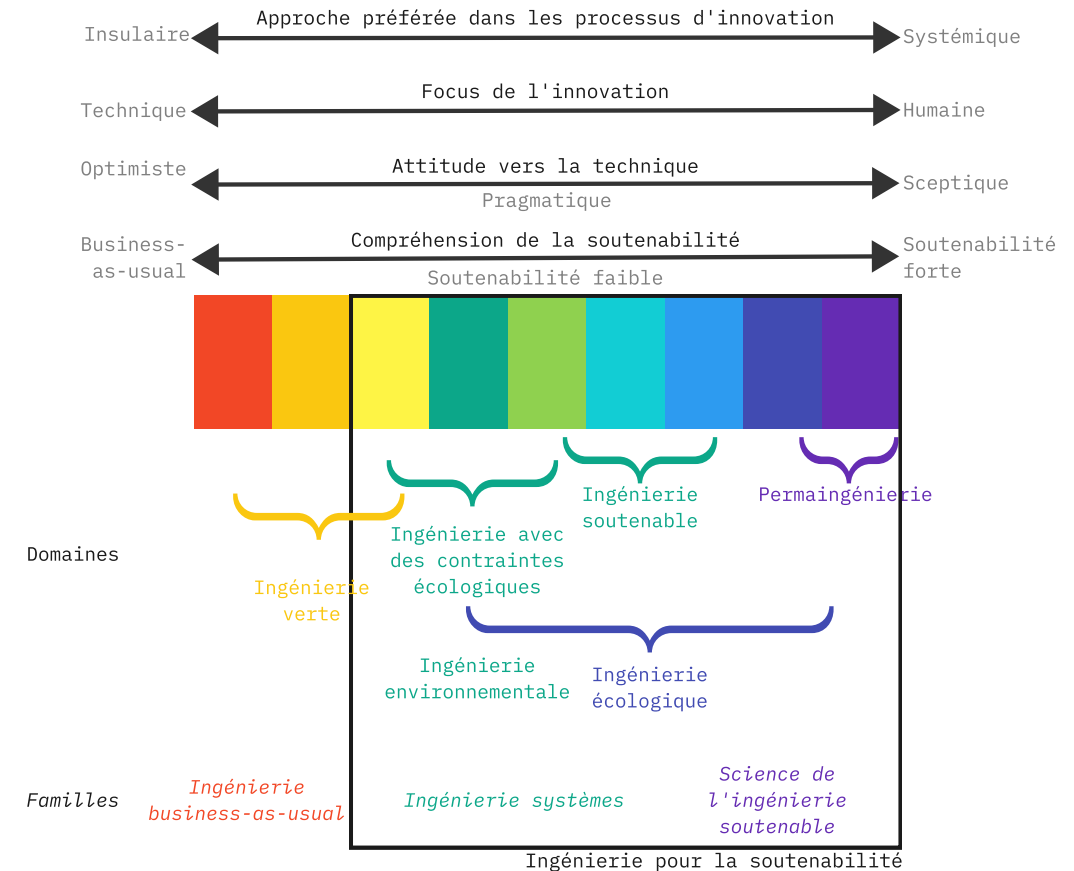
[3] : BRESSANELLI, Gianmarco, SACCANI, Nicola, PIGOSSO, Daniela C. A. et PERONA, Marco, 2020. Circular Economy in the WEEE industry: a systematic literature review and a research agenda. *Sustainable Production and Consumption*. 1 juillet 2020. Vol. 23, pp. 174-188. DOI 10.1016/j.spc.2020.05.007.

[4] : METABOLIC et POLARIS, Sustainability, 2021. Towards a circular energy transition. exploring solutions to mitigate surging demand for critical metals in the energy transition. [en ligne]. [Consulté le 20 décembre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.copper8.com/wp-content/uploads/2021/11/Towards-A-Circular-Energy-Transition.pdf>

Renouveler les pratiques de conception

- Compétences technologiques comme condition nécessaire mais non suffisante
- Dépasser les pratiques actuelles : briques technologiques et changements incrémentaux
- Posture réaliste sur la technologie
- Dès le début des projets :
 - Posture systémique
 - Différentes disciplines et parties prenantes
- Laisser les visions systémiques **nourrir** les visions techniques

→ Tendre vers la science de l'ingénierie soutenable



Catégories d'ingénierie pour la soutenabilité, repris de Grimal et al (2023) [5]

[5] : L. Grimal, I. Di Loreto, and N. Troussier, 'DEFINING PERMAENGINEERING: NEW PRACTICES FOR STRONG SUSTAINABLE CONTEXTS OF DESIGN', Proceedings of the Design Society, vol. 3, pp. 1167–1176, Jun. 2023, doi: 10.1017/pds.2023.117.

Vers une interdisciplinarité efficace

Interdisciplinarité, une alliance entre STI et SHS

- Chercheurs rencontrés plutôt optimistes sur le potentiel de cette alliance
- Des initiatives se construisent (PowerAlps, GT SHS/SPI « électrification massive ») mais restent rares 0,9% de sociologues dans les travaux sur l'énergie [6]

Risques	SHS pour « l'acceptabilité sociale » [7] Posture dominante des STI
---------	---

- Intégrer les disciplines dès le montage de projet et le co-construire
- La démarche de circulation des concepts entre disciplines est fédératrice [8]
- Prendre le temps de les faire circuler et d'animer la communauté
- Chercher des objets et concepts reliant, avant d'entamer un cahier des charges

Risques	Les briques technologiques ne sont pas ces objets
---------	---

[6] : SOVACOOOL, Benjamin K., 2014. What are we doing here? Analyzing fifteen years of energy scholarship and proposing a social science research agenda. Energy Research & Social Science. 1 mars 2014. Vol. 1, pp. 1-29. DOI 10.1016/j.erss.2014.02.003.

[7] : SONETTI, Giulia, ARROBBIO, Osman, LOMBARDI, Patrizia, LAMI, Isabella M. et MONACI, Sara, 2020. « “Only Social Scientists Laughed” »: Reflections on Social Sciences and Humanities Integration in European Energy Projects. Energy Research & Social Science. 1 mars 2020. Vol. 61, pp. 101342. DOI 10.1016/j.erss.2019.101342.

[8] : LOEVE, Sacha, DELDICQUE, Timothée et STEINER, Pierre, 2017. Eléments d'anthropologie des sciences humaines et sociales en univers technologique. . mai 2017. N° N°1, pp. 116.

De nouvelles méthodes pour la conception

L'enquête de terrain pour la conception

- Pour accéder aux milieux [6]
- Comme partie intégrante de la conception technologique [7]
- Aller au-delà des entretiens

Exemple : mieux comprendre des communautés énergétiques (Van Leeuwen and Singh, 2023) [8]



Reconception d'une balise
« homme-mort » [7]

[6] : TRICLOT, Mathieu (Dir.) et al., 2024. *Prendre soin des milieux* [en ligne]. Editions matériologiques. [Consulté le 20 décembre 2024]. Disponible à l'adresse : <https://hal.science/hal-04590726>

[7] : REY, Bénédicte, SIMONCINI, Nicolas et TRICLOT, Mathieu, 2021. « Les sciences humaines et sociales en recherche technologique : vers une démarche de conception fondée sur l'ethnographie », in Lamard P., Lequin Y. (éd.), *La démocratie technique en travail*, Presses de l'UTBM, 2021, pp. 187-205. In : . pp. 187-205. ISBN 979-10-91901-50-5.

[8] : VAN LEEUWEN, G. and SINGH, A. (2023), Local Frictions in the Energy Transition: Design Anthropology for the Emergence of Energy Communities. *Ethnographic Praxis in Industry Conference Proceedings*, 2023: 257-274. <https://doi.org/10.1111/epic.12167>

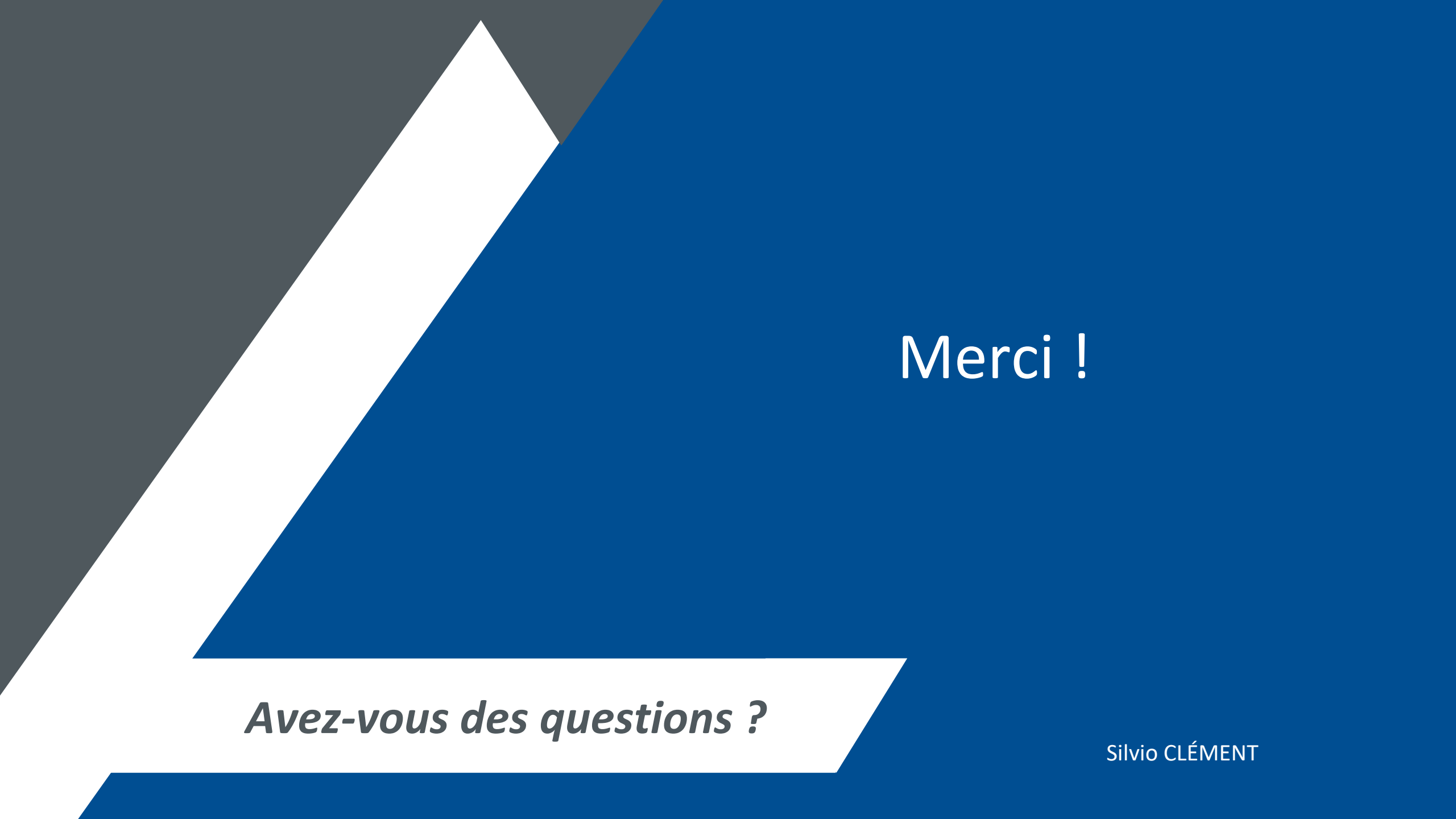
Conclusion

Analyse

- Une prise en compte...
 - Récente, nuancée et complexe des enjeux de soutenabilité
 - Différenciée entre les discours privés et les publications scientifiques
- Pratiques de recherche actuelles limitent cette prise en compte
 - Recherche techno-centrée
 - Une interdisciplinarité encore limitée

Leviers

- Multi-critères environnementaux, cascade de stratégies 'R' et vision systémique
- Ouverture aux critères non-quantitatifs (qualitatifs et normatifs)
- Renouveau des pratiques de recherche (questionner les besoins et fonctions)
- Dès la création des projets de recherche...
 - Une interdisciplinarité forte
 - Intégration de parties prenantes diverses



Merci !

Avez-vous des questions ?

Silvio CLÉMENT

Backup

Attendus et questions de recherche

Mission

WP1 Expertise: Addressing Sustainability in Power Electronics researchers and designers activities

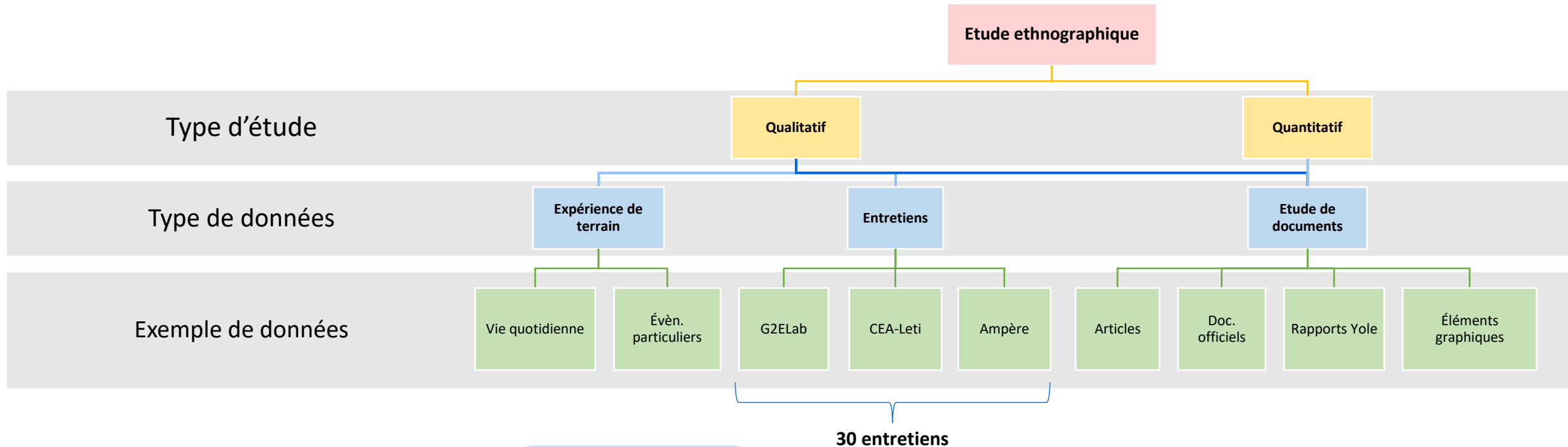
Problème identifié par PowerAlps :

- Prise en compte de la soutenabilité émergente
- Une amélioration de son intégration dans la recherche en EP nécessite une compréhension fine de la situation dans les laboratoires et dans l'état de l'art de la littérature



Utilisation de **méthodes ethnographiques**

Démarche ethnographique



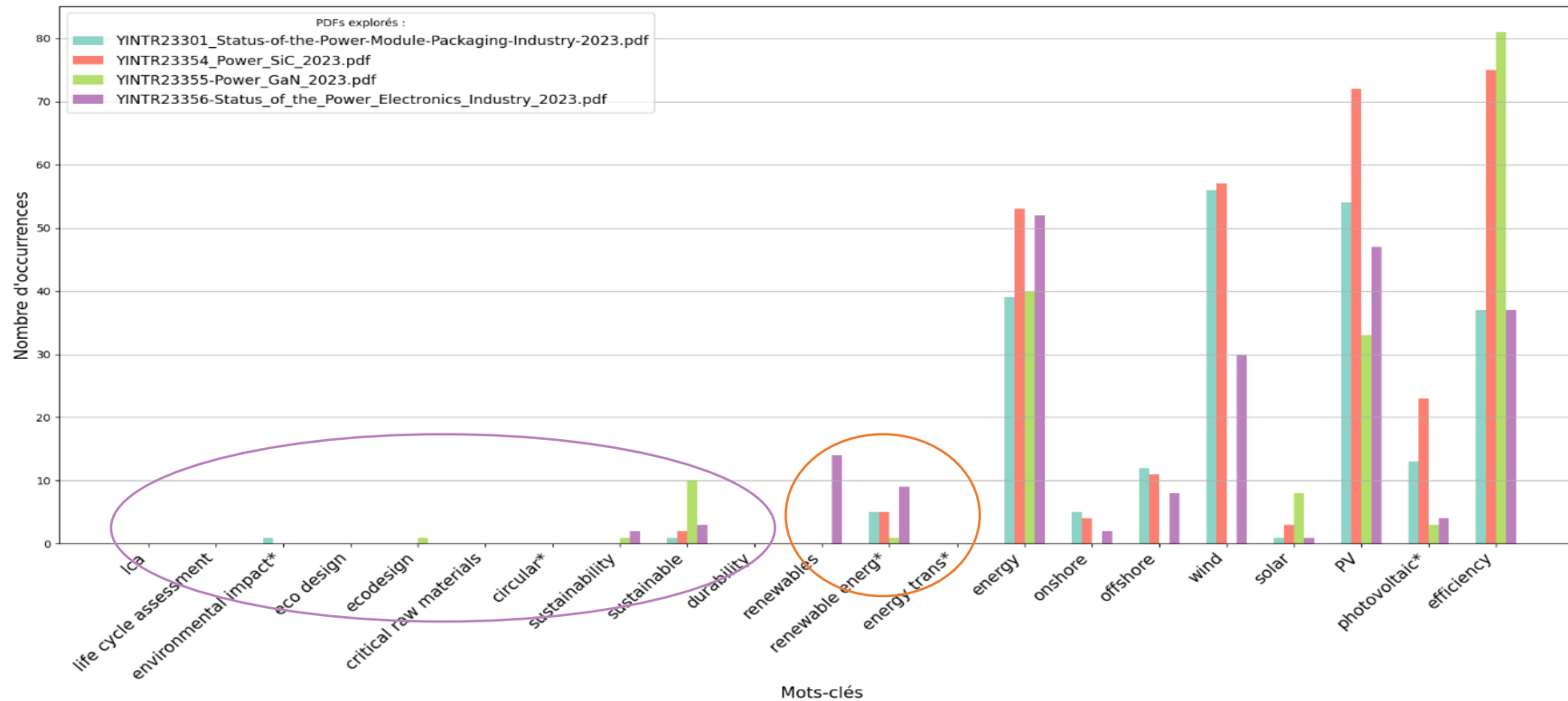
6 mois sur le terrain
(sept-2024 – mars-2025)

« Vivre **avec** et
comme les
participants »

- Décentrement
- Nouvelle culture

Informations précises et
contextualisées

Rapports du cabinet Yole



Sustainable -> « sustainable market »
= profitable pendant longtemps

Rapport « Status PE industry » : 3 mentions
« sustainable » dans le sens soutenabilité

Pas de présence de la transition énergétique
« Renewables » comme cadrage du marché global

Éco-conception, analyse d'impact et CRM ne semblent
pas encore être stratégiques pour l'industrie de l'EP

Vers un changement de paradigme en EP ?

De l'ajout de niveaux critères d'évaluation à la création de nouvelles communautés de recherche ?

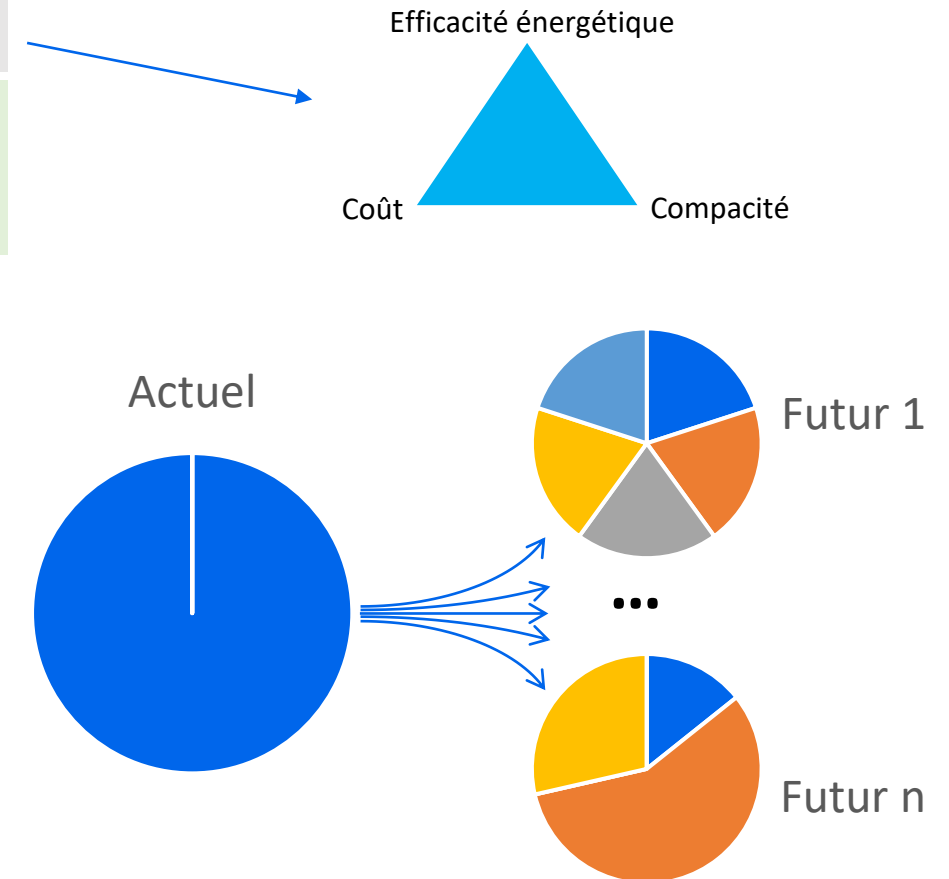
Un triptyque traditionnel remis en question

- Des critères historiques
- Nouveaux critères en émergence
- Méthodes de calcul en amélioration constante

La place de ces critères semble diviser les chercheurs en EP

- Plus ou moins d'importance accordée aux indicateurs historiques
- Plus ou moins de nouveaux indicateurs

- Critères traditionnels
- Impact envi.
- Utilité
- Circularité
- Impacts sociaux



- Début des années 1960 : premiers ouvrages de méthodologies sur la « réflexivité »[1]
- Prise en compte **consciente** de l'influence de l'anthropologue ou du chercheur sur le processus de recherche lui-même (collecte, interprétation, analyse des données, etc.)
 - Comment mes positions, mes croyances, affectent ma recherche ?
 - Comment ma présence et mes interactions affectent ma recherche ?
 - Comment ma recherche me transforme ?
 - Quels biais sont présents dans mes méthodes, comment cela affecte-t-il ma recherche ?
- ➔ Rendre **explicites** les choix méthodologiques et les implications éthiques
- ➔ Assurer la transparence et la rigueur de l'analyse.

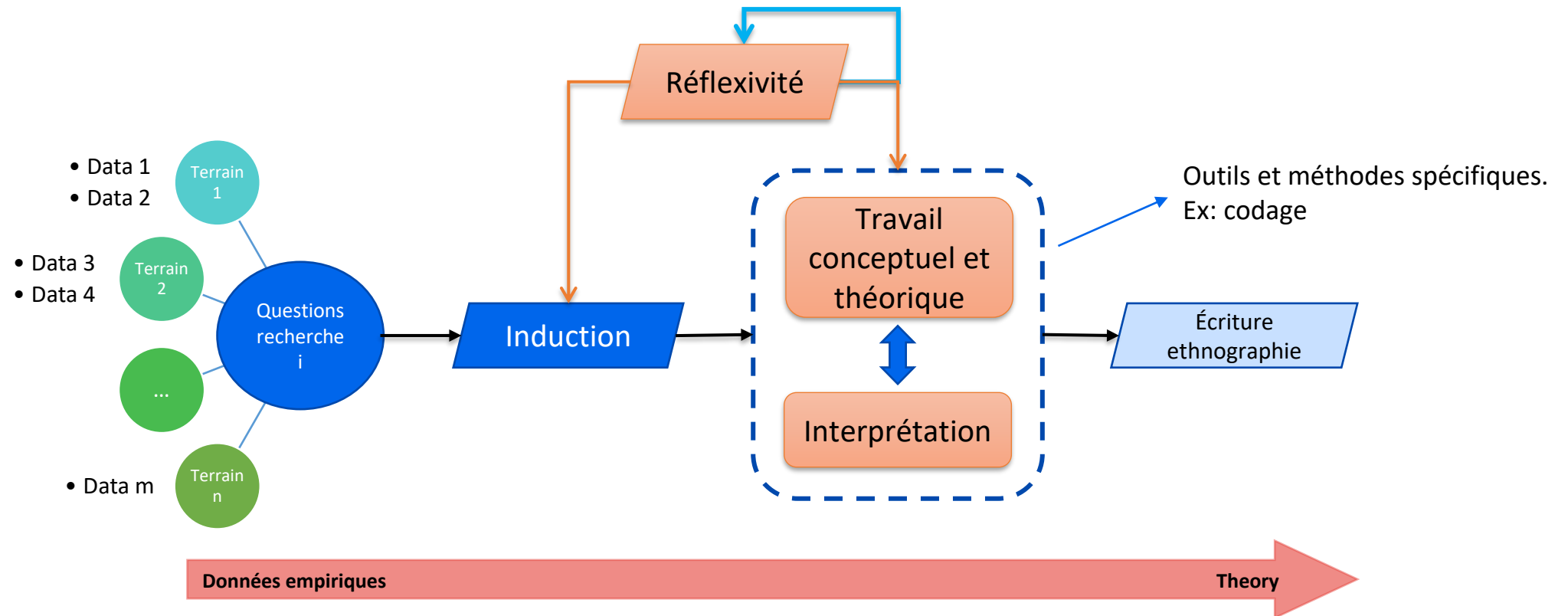
Pour aller plus loin :

- Courte introduction à la notion : « Réflexivité », Sandrine RIU [2]
- Sur l'utilisation des SHS par les sciences « dures » pour leur apporter un « supplément de réflexivité » [3]

[1] : Olivier de Sardan Jean-Pierre, 2000, « Le “je” méthodologique. Implication et explication dans l'enquête de terrain », *Revue française de sociologie*, vol. 41, n° 3, Jul. – Sept., p. 417-445
[2] : RUI, Sandrine, 2012. Réflexivité. *Sociologie* [en ligne]. 1 août 2012. [Consulté le 3 février 2025]. Disponible à l'adresse : <https://journals.openedition.org/sociologie/1584>
[3] : THOREAU, François et DESPRET, Vinciane, 2014. La réflexivité : De la vertu épistémologique aux versions mises en rapports, en passant par les incidents diplomatiques. *Revue d'anthropologie des connaissances*. 17 juin 2014. Vol. 82, n° 2, pp. 391-424. DOI [10.3917/rac.023.0391](https://doi.org/10.3917/rac.023.0391).

Processus d'objectivation

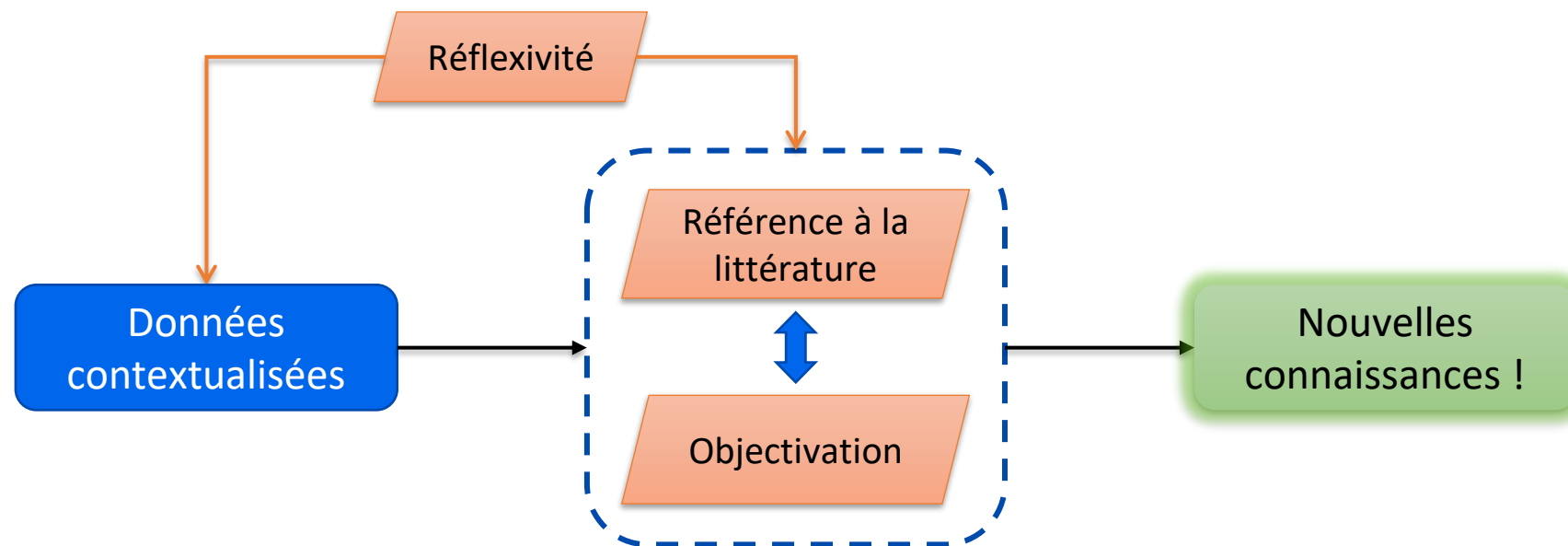
« Il faut également « **objectiver** » sa pratique plus que rechercher l'inaccessible objectivité. C'est par une approche réflexive sur les conditions d'utilisation des outils que l'on peut accéder à une meilleure connaissance des phénomènes sociaux, avec lucidité et discernement. » [1]



[1] Florence Maillochon, « Objectivation », Sociologie [En ligne], Les 100 mots de la sociologie, mis en ligne le 01 juillet 2015, consulté le 01 février 2025. URL : <http://journals.openedition.org/sociologie/3187>

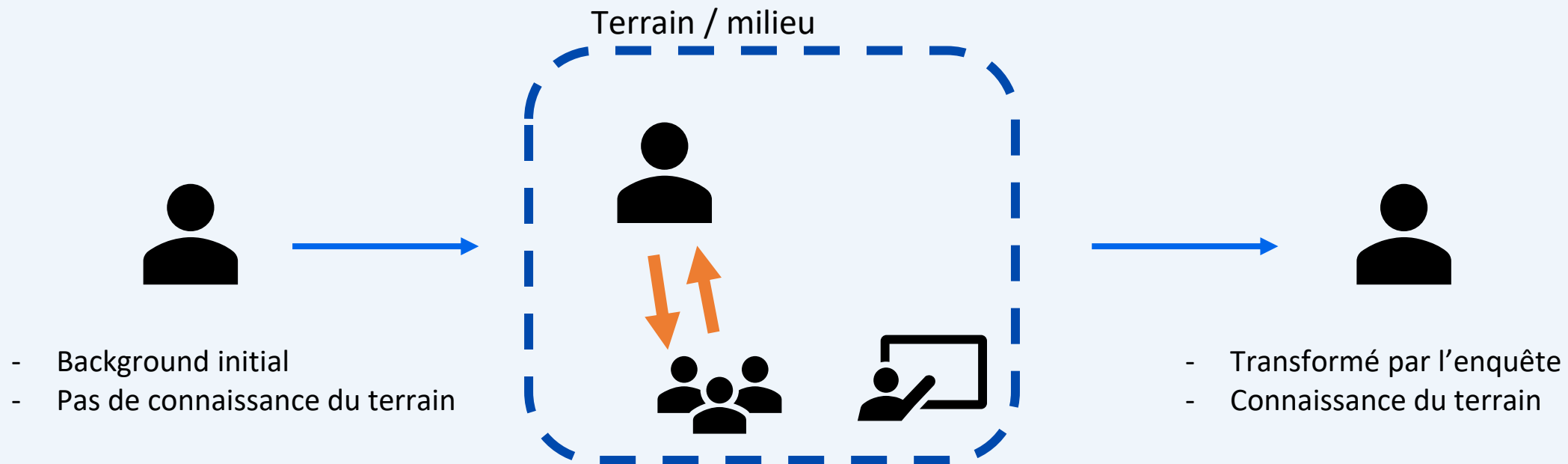
Y a-t-il besoin d'enquête ?

- Je fais cette étude pour dépasser la « sociologie de comptoir » ou « sociologie spontanée »
 - Tout le monde a (probablement) un avis sur les réponses à mes questions de recherche
 - Exigence scientifique d'y répondre de manière plus formelle



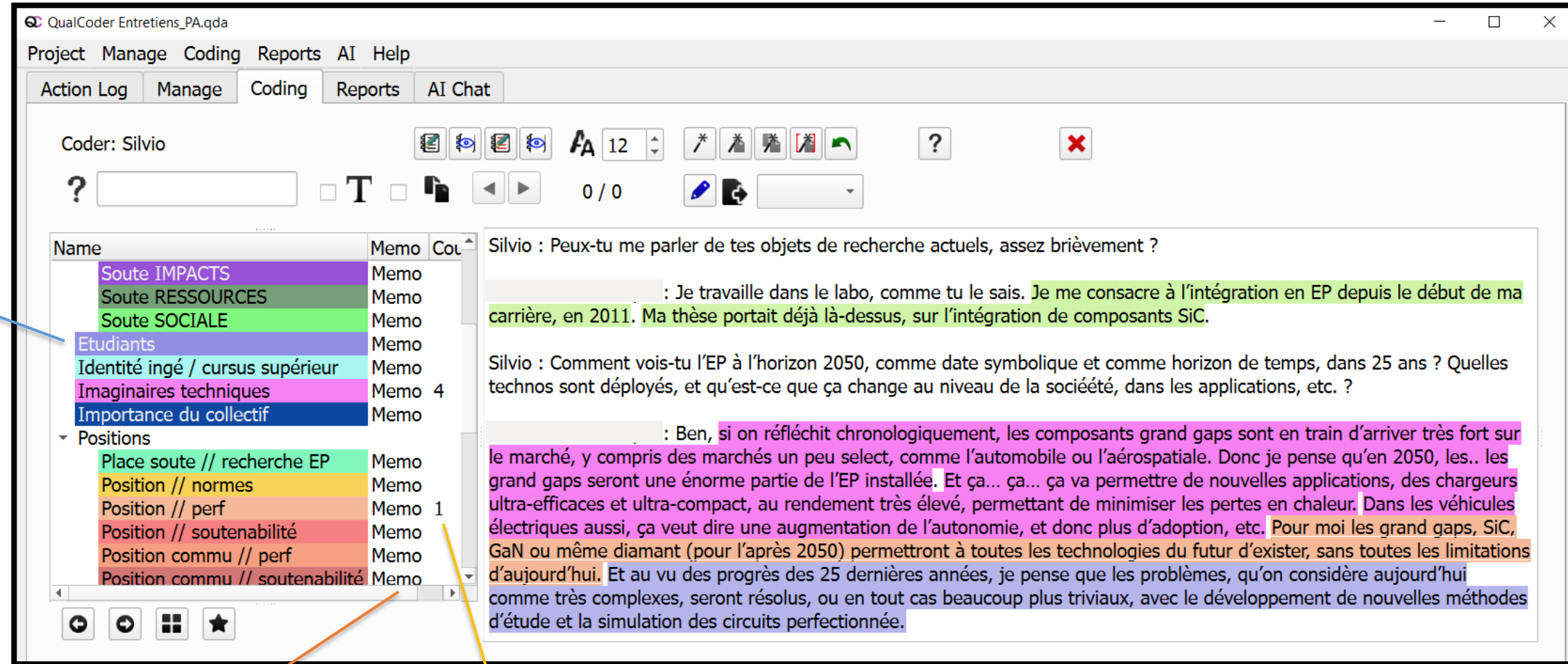
L'observation, méthode principale de récolte de données

- Support et source principale de données
 - On arrive avec nos certitudes, le terrain nous « bouscule »
 - Il s'agit de faire des recherches **avec**, et non **sur** les participants [1]
- De l'imprégnation et de la découverte !



[1] : Ingold, T. (2008b) « Bindings against Boundaries: Entanglements of Life in an Open World », Environment and Planning A, 40(8) : 1796-1810.

Codage des entretiens



QualCoder Entretiens_PA.qda

Project Manage Coding Reports AI Help

Action Log Manage Coding Reports AI Chat

Coder: Silvio

12

0 / 0

Name	Memo	Co
Soute IMPACTS	Memo	
Soute RESSOURCES	Memo	
Soute SOCIALE	Memo	
Etudiants	Memo	
Identité ingé / cursus supérieur	Memo	
Imaginaires techniques	Memo	4
Importance du collectif	Memo	
▼ Positions		
Place soute // recherche EP	Memo	
Position // normes	Memo	
Position // perf	Memo	1
Position // soutenabilité	Memo	
Position commu // perf	Memo	
Position commu // soutenabilité	Memo	

Silvio : Peux-tu me parler de tes objets de recherche actuels, assez brièvement ?

: Je travaille dans le labo, comme tu le sais. Je me consacre à l'intégration en EP depuis le début de ma carrière, en 2011. Ma thèse portait déjà là-dessus, sur l'intégration de composants SiC.

Silvio : Comment vois-tu l'EP à l'horizon 2050, comme date symbolique et comme horizon de temps, dans 25 ans ? Quelles technos sont déployées, et qu'est-ce que ça change au niveau de la société, dans les applications, etc. ?

: Ben, si on réfléchit chronologiquement, les composants grand gaps sont en train d'arriver très fort sur le marché, y compris des marchés un peu select, comme l'automobile ou l'aérospatiale. Donc je pense qu'en 2050, les.. les grand gaps seront une énorme partie de l'EP installée. Et ça... ça... ça va permettre de nouvelles applications, des chargeurs ultra-efficaces et ultra-compact, au rendement très élevé, permettant de minimiser les pertes en chaleur. Dans les véhicules électriques aussi, ça veut dire une augmentation de l'autonomie, et donc plus d'adoption, etc. Pour moi les grand gaps, SiC, GaN ou même diamant (pour l'après 2050) permettront à toutes les technologies du futur d'exister, sans toutes les limitations d'aujourd'hui. Et au vu des progrès des 25 dernières années, je pense que les problèmes, qu'on considère aujourd'hui comme très complexes, seront résolus, ou en tout cas beaucoup plus triviaux, avec le développement de nouvelles méthodes d'étude et la simulation des circuits perfectionnée.

« codes »

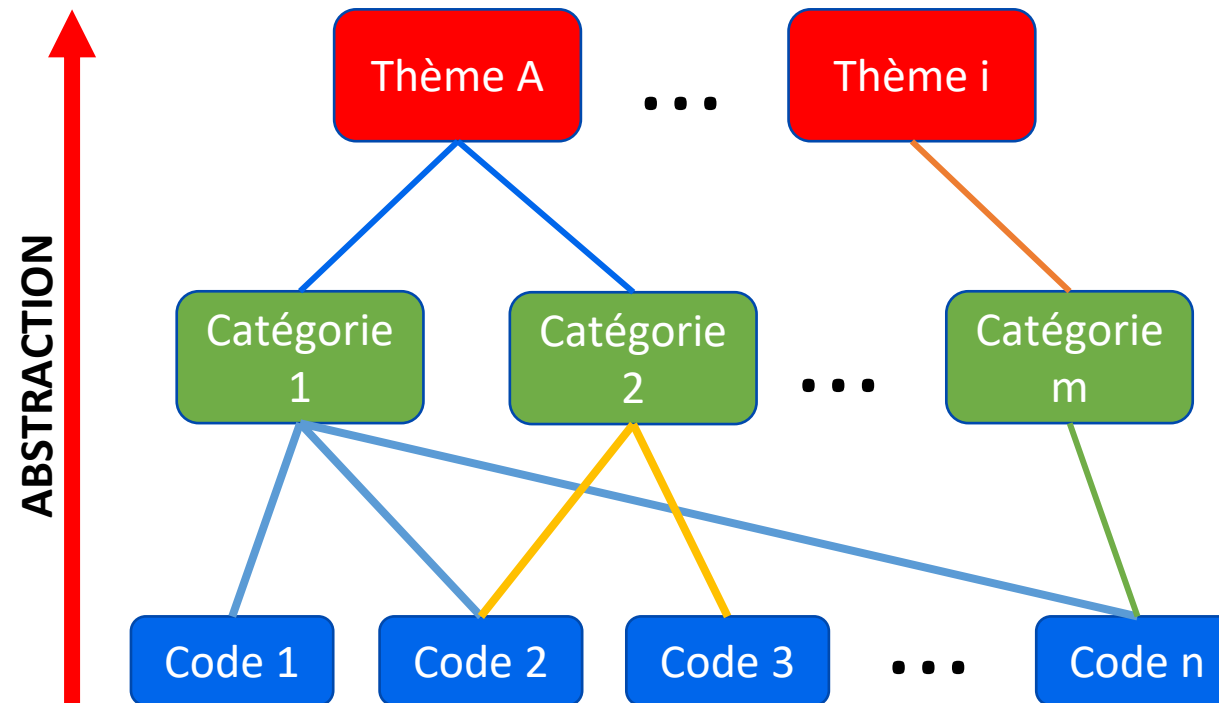
« définition » du code

nb. d'occurrence du code dans le texte

*Entretien fictif

L'émergence de thèmes

- Les codes permettent de réduire la complexité des transcriptions en unités analysables.
- L'analyse des codes conduit à l'émergence de **thèmes**.



Construction des codes

Codage inductif :

- Les codes « émergent » du matériau
- Beaucoup de fluctuations pendant le codage des premiers entretiens
 - Création de nouveaux codes
 - Suppression
 - Fusion
- Démarche itérative et bottom-up

Codage déductif :

- Les codes sont construits « a priori »
- On part d'une théorie, de questions de recherche,...
- Les codes ne changent pas pendant le codage
- Démarche top-down

En pratique : Approche mixte inductive-déductive

- Questions de recherche pré-établies
- Ouverture à la « bousculade » par le terrain

Retour sur le terrain et les entretiens

- Un **grand merci** pour la « bonne volonté » générale pour la participation ...
 - ... qui affecte parfois les entretiens 😊 (anticipation de ce que je voudrais entendre, « je ne suis pas pertinent pour ton enquête », etc.)

Quelques résultats **préliminaires** :

- Place de la soutenabilité
- Posture vis-à-vis de la soutenabilité
- Vers un changement de paradigme en EP ?



Des récits aux « imaginaires sociotechniques »

- L'électronique de puissance (comme toute activité humaine) est intégrée dans un **enchevêtrement** de récits
- Analyse en cours, avec une MCF en socio-linguistique (Claire HUGONNIER, laboratoire LIDILEM)

Différents niveaux de récits :

- Il existe des récits partagés largement (dominants)
- D'autres semblent plus spécifiques à des sous-ensembles de personnes

Imaginaires socio-techniques :

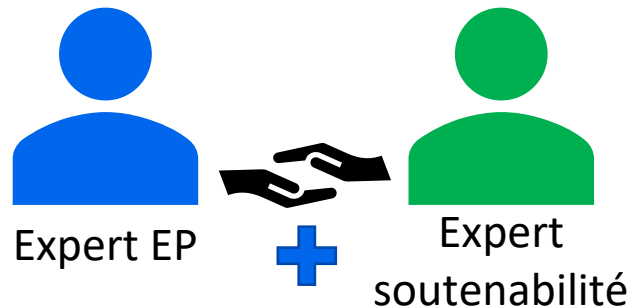
Projettent l'EP dans un certain futur

- Révélateur de certaines valeurs et croyances (dimensions **axiologique** et **normative**)
- Orientent la recherche et les financements (dimension **performative**)

Interdisciplinarité VS multidisciplinarité

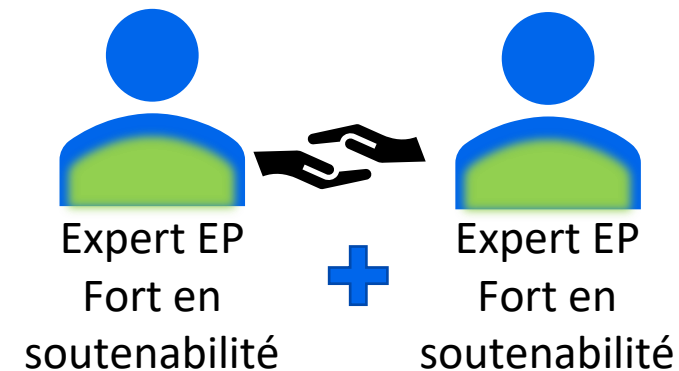
- Nombreuses postures sur la place de la soutenabilité en EP :

- Combinaison d'expertises



VS

« socle commun »



- Définitions multiples de l'interdisciplinarité / multidisciplinarité
 - Est-ce que « intégration + CEM » est interdisciplinarité ?
 - Comment ça se compare à EP + sociologie ? Réseaux électriques et géographie ?

Posture vis-à-vis de la soutenabilité

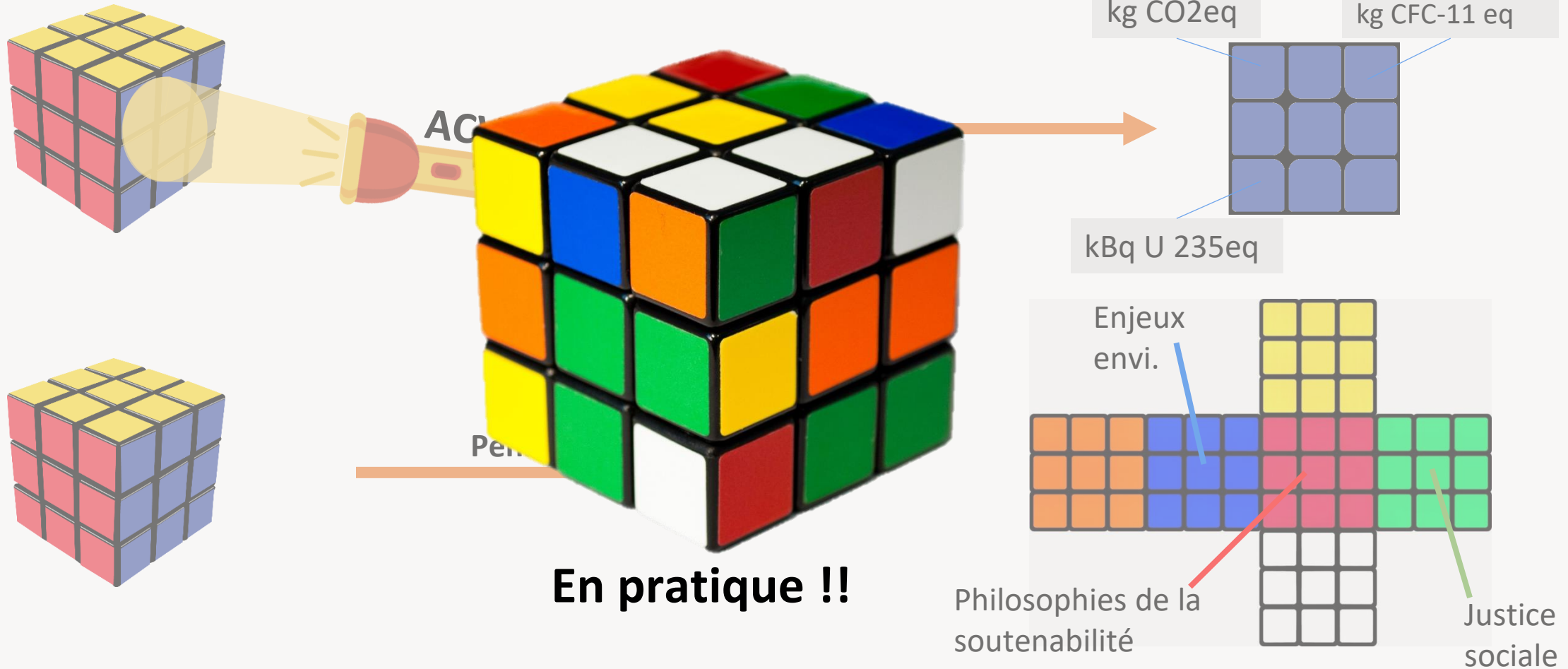
Une focalisation sur les méthodes quantitatives, en particulier l'ACV

- Liens forts entre ACV et soutenabilité -> Dans les discours, les articles, les colloques,...
- Problèmes :
 - Difficultés avec ACV « norme » deviennent difficulté à penser la soutenabilité
 - La soutenabilité est parfois mélangée avec les résultats d'une méthode ACV « norme »
 - Difficultés à aborder d'autres méthodes pertinentes

$$ACV \equiv Soutenabilité \Rightarrow \neg ACV \Rightarrow \neg Soutenabilité$$

La soutenabilité est multi-dimensionnelle !

Multi-dimensionnel > multi-critères environnementaux !





PowerAlps

Journées de clôture du CDP*
électronique de puissance

*Cross-disciplinary program



9-10 Septembre 2025
Centre congès Minattec
Grenoble



Exploitation des algorithmes de machine learning pour la prédiction de la durée de vie en EP

Mounira BOUARROUDJ

Directrice de recherche Université Gustave Eiffel

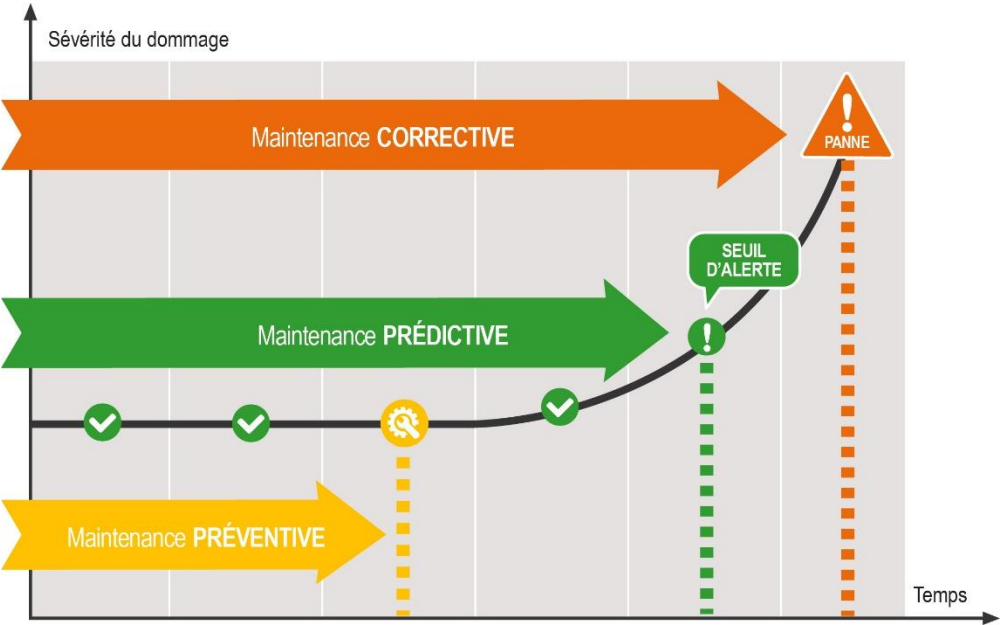


Plan de la Présentation

1. Pourquoi cherche-t-on à définir la durée de vie restante (RUL)?
2. Comment la RUL est-elle définie actuellement?
3. Exploration des algorithmes de machine learning
4. Conclusion

Pourquoi cherche-t-on à définir la durée de vie restante (RUL)?

- ❑ Rareté des matériaux stratégiques (cuivre, semi-conducteurs...)



La maintenance prédictive nécessite des modèles de durée de vie restante

- ❑ Avoir connaissance de l'état de santé d'un module et connaître la durée de vie utile restante en opération

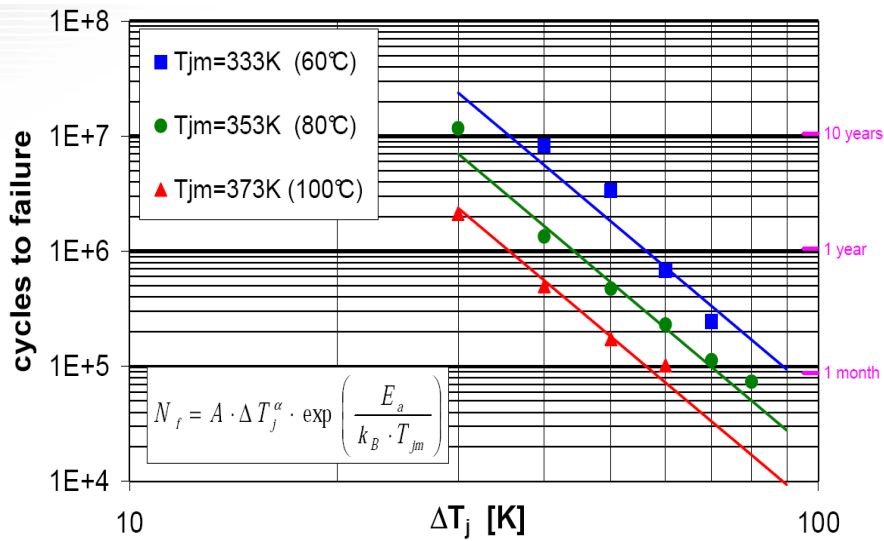
Plan de la Présentation

1. Pourquoi cherche-t-on à définir la durée de vie restante (RUL)?
2. **Comment la RUL est-elle définie actuellement?**
3. Exploration des algorithmes de machine learning
4. Conclusion

Comment prédit-on la durée de vie en EP actuellement?

❑ Modèles Empiriques

→ Modèles issus de tests de Power Cycling (variation cyclique de température par auto-échauffement) ou Thermal Cycling (variation cyclique de température imposée par l'environnement).



- T°C swing : ΔT_j
- The reference temperature :
 T_{jmin} ou $T_{jm} = (T_{jmax} + T_{jmin})/2$
- Heating time: t_{ON}
- Current (or current density): I_L (J_L)
- ...etc..

$$N_f = A \Delta T_j^{-\alpha} \quad (\text{Coffin-Manson})^{[1]}$$

$$N_f = A \Delta T_j^{-\alpha} \exp\left(\frac{E_A}{k T_{jm}}\right) \quad (\text{Coffin-Manson + Arrhenius})^{[2]}$$

$$N_f = K \cdot (\Delta T_j)^{\beta_1} \cdot e^{\frac{\beta_2}{T_j + 273}} \cdot t_{on}^{\beta_3} \cdot I^{\beta_4} \cdot V^{\beta_5} \cdot D^{\beta_6} \quad (\text{CIPS2008})^{[3]}$$

Très populaire (car très pratique)...
... Malgré des limitations évidentes :

- Pas de capacité de prédictions (*extrapolations interdites*)
- Valables uniquement dans les plages de paramètres testées (*généralement dans des conditions accélérées pour des raisons de durée des tests*)
- Valables uniquement pour les technologies testées
- Pas de distinction sur les mécanismes de dégradations

[1] S.S. Manson, "Thermal Stress Low-cycle Fatigue", McGraw-Hill, 1966

[2] M. Held et al., "Fast power cycling test of IGBT modules in traction application", Power Electronics and Drive Systems, 1997

[3] R. Bayerer et al., "Model for power cycling lifetime of IGBT modules - various factors influencing lifetime," CIPS, 2008.

Comment prédit-on la durée de vie en EP actuellement?

❑ Modèles basés sur la physique de la défaillance

→ Combinaison de résultats expérimentaux et de simulation EF

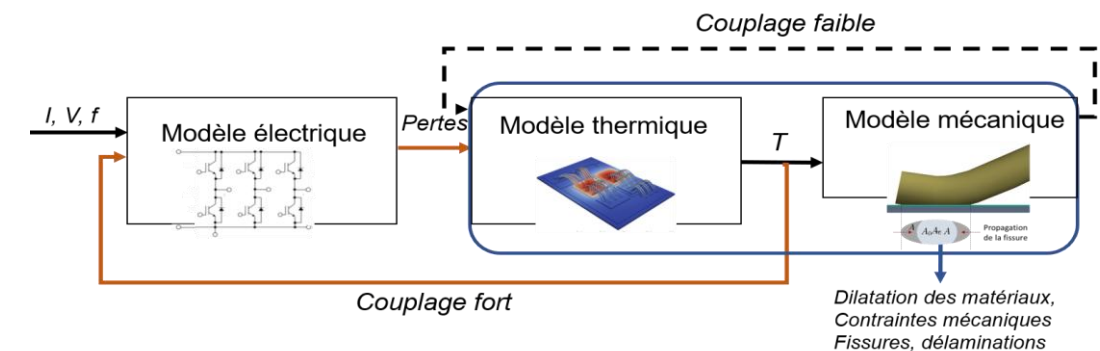
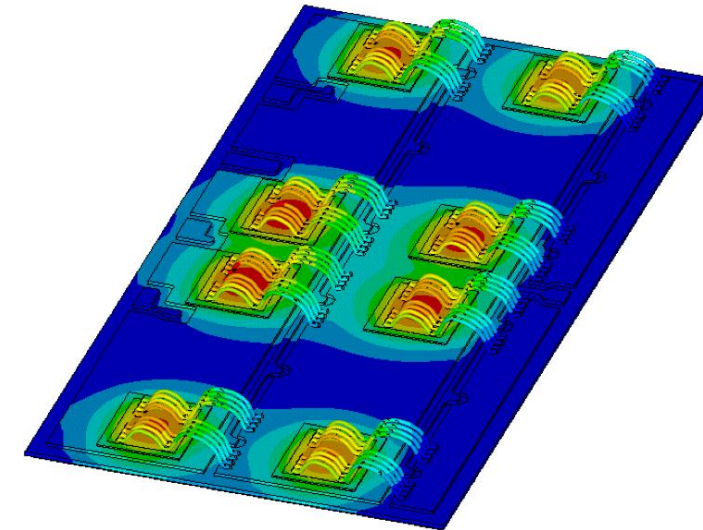


- Basé sur les contraintes ou les déformations
- Basé sur l'énergie (de déformations...)
- Basé sur l'endommagement

Bonne capacité de prédiction de durée vie....

... mais difficilement exploitable pour 3 raisons principales :

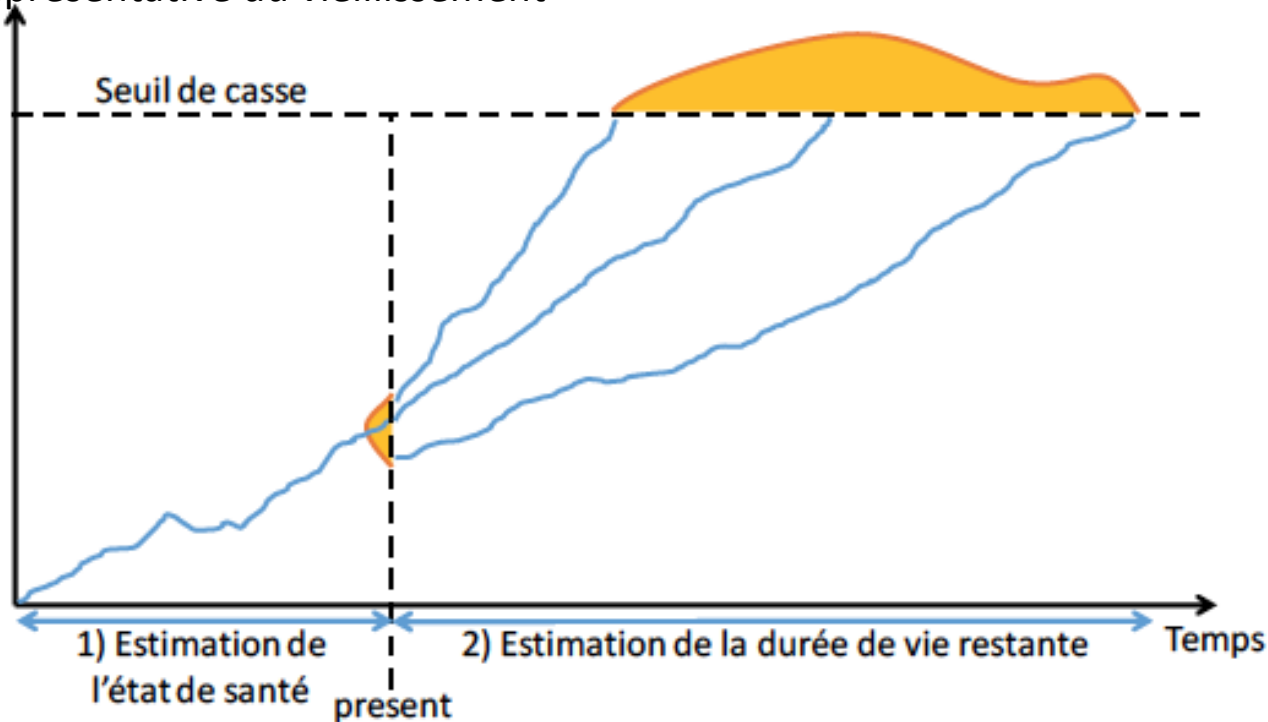
- Complexes à construire et à utiliser (*à construire pour chaque technologie*)
- Forte dépendance des paramètres : géométries, topologies et matériaux (*incertitudes et variabilités des paramètres*)
- Ils ne décrivent qu'un seul mécanisme à la fois (*l'interaction entre les mécanismes n'est pas prise en compte*)



Comment prédit-on la durée de vie en EP actuellement?

☐ Approches basées sur les paramètres précurseurs : Data-driven

Grandeur physique
représentative du vieillissement



Prédiction par :

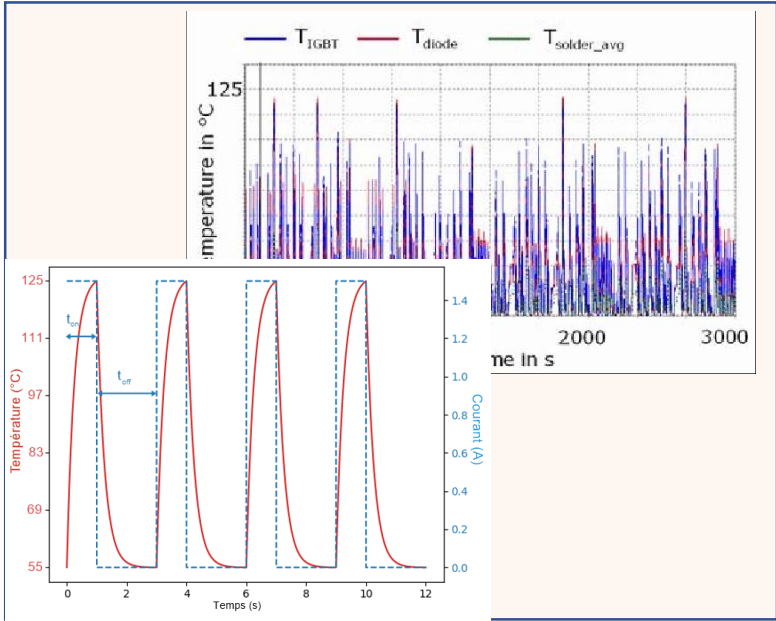
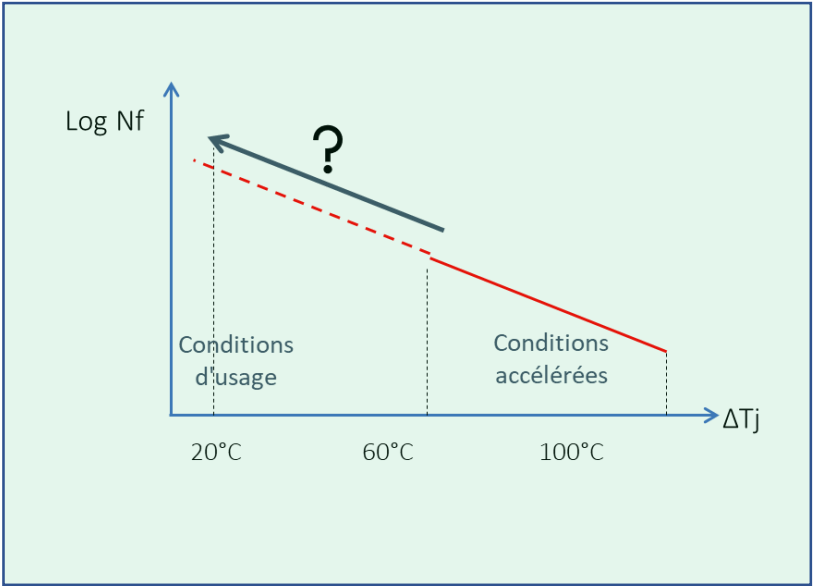
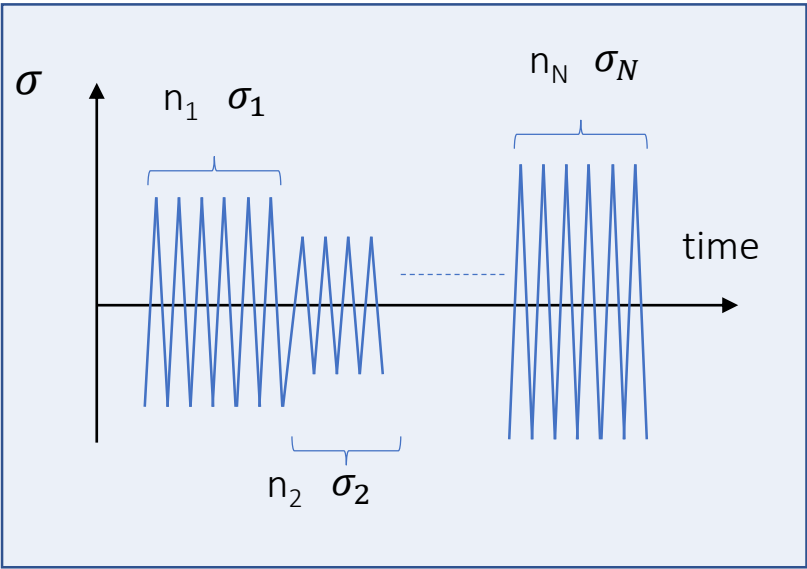
- Modèle physique → Trop complexe
- Modèle probabiliste → nécessite trop de données
- Modèle mixte → Capacité de prévision (*extrapolation*)
Combinaison d'avantages et d'inconvénients

- En prenant en compte des incertitudes
- Et donnant une marge de confiance

Comment prédit-on la durée de vie en EP actuellement?

Estimation de la durée de vie : Verrous scientifiques

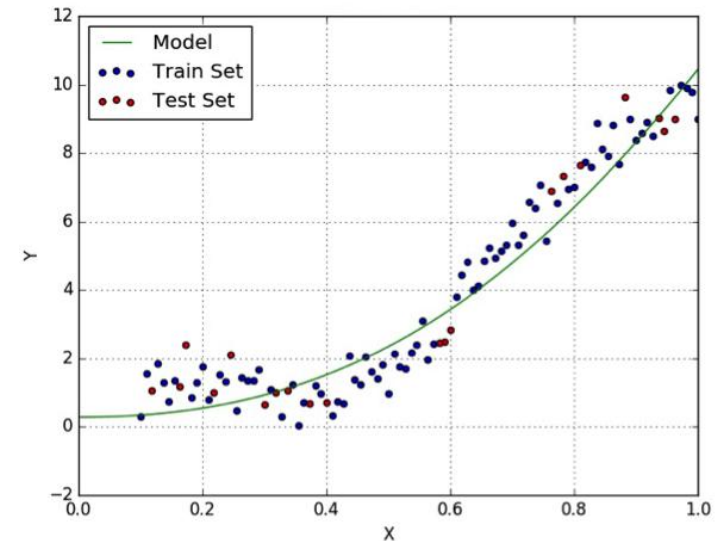
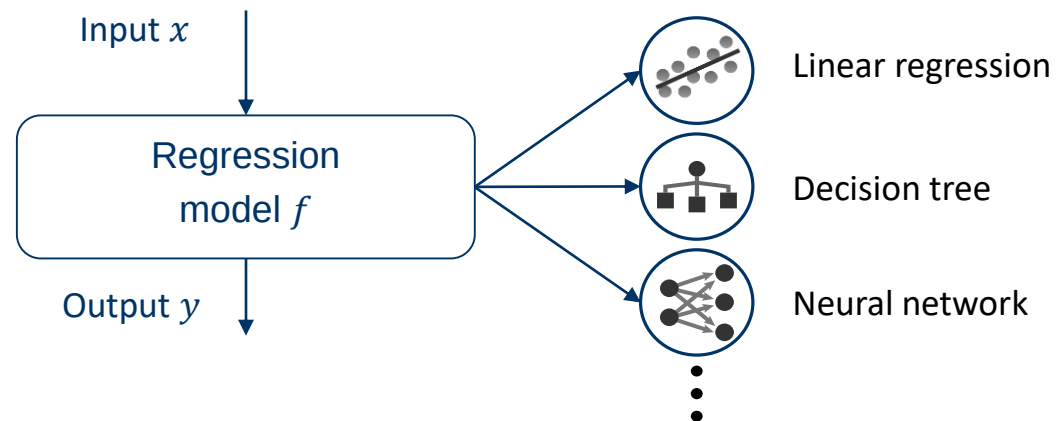
- Prise en compte de la variabilité et de l'interaction entre les conditions d'usage
- Extrapolation vers les conditions usuelles (faible amplitude de stress)
- Coûts et durées des tests expérimentaux



Complexité des modèles → Exploration de techniques innovantes

Plan de la Présentation

1. Pourquoi cherche-t-on à définir la durée de vie restante (RUL)?
2. Comment la RUL est-elle définie actuellement?
3. **Exploration des algorithmes de machine learning**
4. Conclusion



Objectif : Apprendre une fonction f qui prédit une sortie y à partir d'une entrée x

Comment : Utiliser les données d'entraînement (x_{train}, y_{train}) pour calibrer f et prédire les données invisibles $y_{test} = f(x_{test})$

Au lieu de spécifier des équations basées sur des lois physiques, il est laissé aux données de définir la relation fonctionnelle.

Rapidité de calcul

Algorithmes robustes

Capacité de modélisation

Interprétabilité : Modèles « boîte noire »

Dépendance aux données (quantité et qualité)

Choix du modèle adéquat pour la problématique

Thèse Mehdi GHRABLI: 2023-2026
SATIE¹-LMPS²



Mathématiques appliquées



Emanuel Aldea, SATIE
computer vision and machine
learning, image understanding,
cartography and 3D reconstruction



Mounira Bouarroudj, SATIE
Fiabilité des composants de puissance,
Modélisation multiphysique EF,
Vieillessement accéléré,

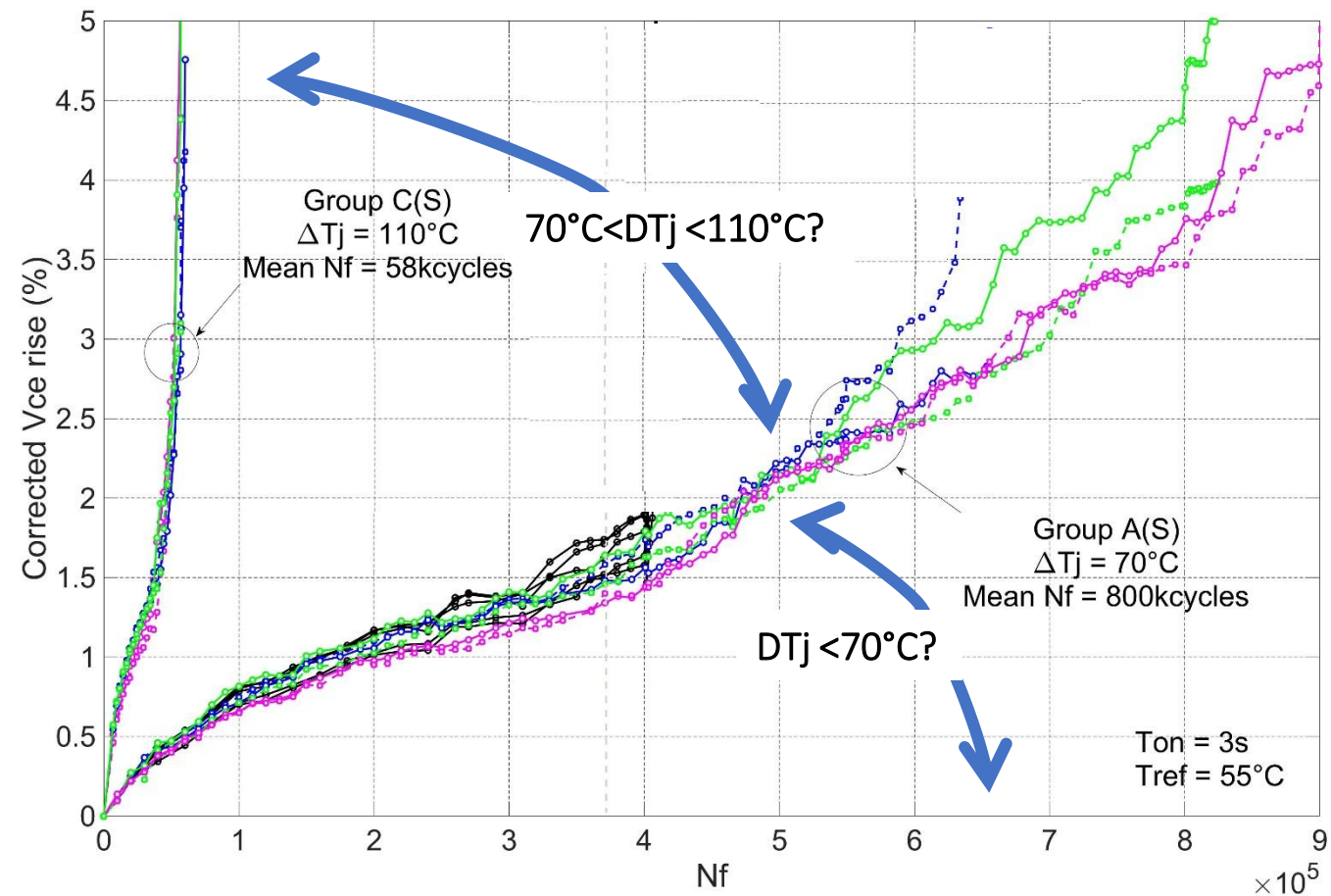


Ludovic CHAMOIN, LMPS
Réduction de modèle, enrichissement de
modèle par les données (jumeau hybride)
apprentissage guidé par la physique

SATIE¹ : Laboratoire des systèmes et applications des technologies de l'information et de l'énergie

LMPS² : Laboratoire de Mécanique Paris Saclay

Prédiction de la durée de vie en dehors des conditions de tests : Interpolation et extrapolation

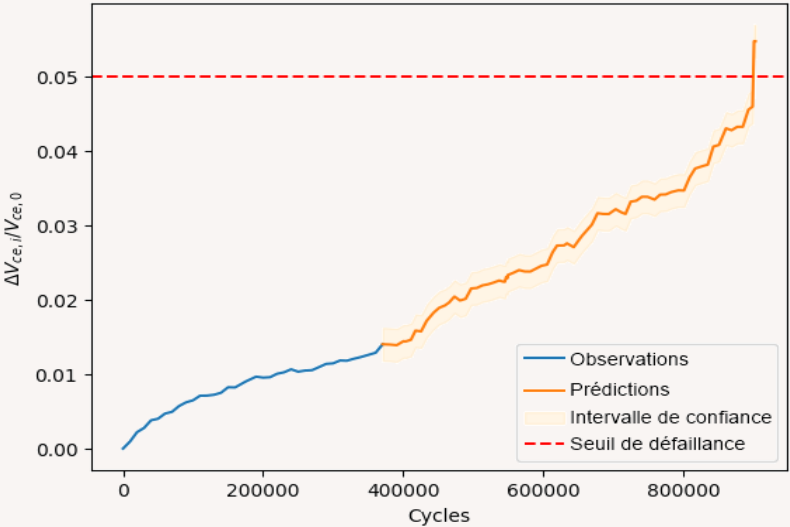


Khatir, Z., Tran, S.-H., Ibrahim, A., Lallemand, R., Degrenne, N.
Effect of load sequence interaction on bond-wire lifetime due to power cycling, Scientific Reports, 2021, 11(1), 5601

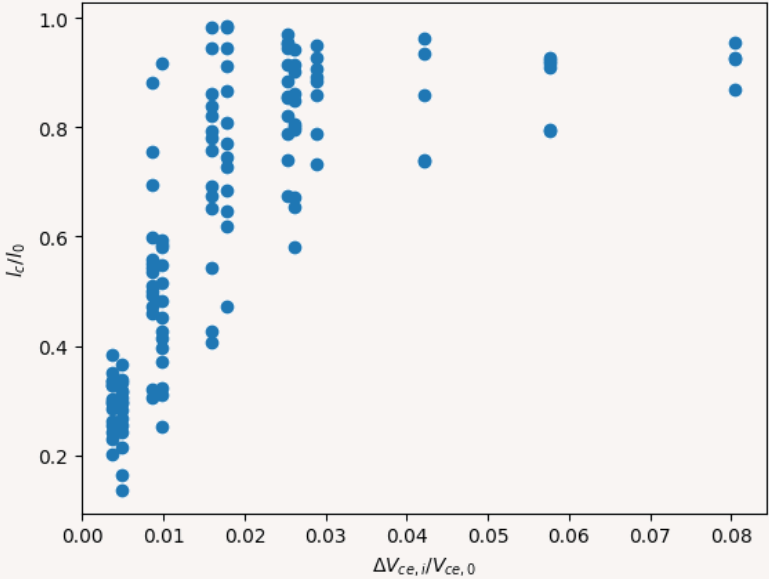
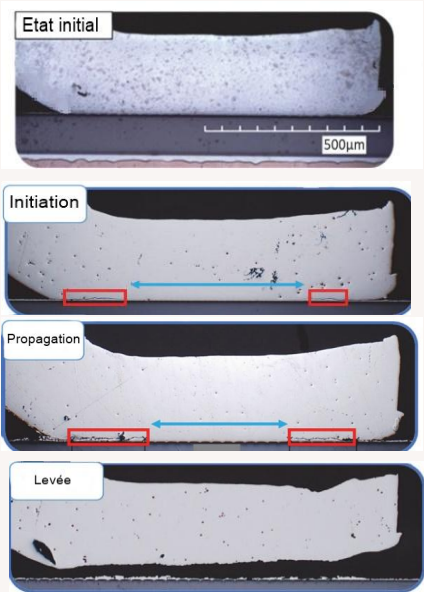
Approche « hybride » : mécanisme de levée de fil de bonding

Point de départ : Données expérimentales (Monitoring + Analyse destructive)

Indicateur: Evolution de V_{CE} (N)

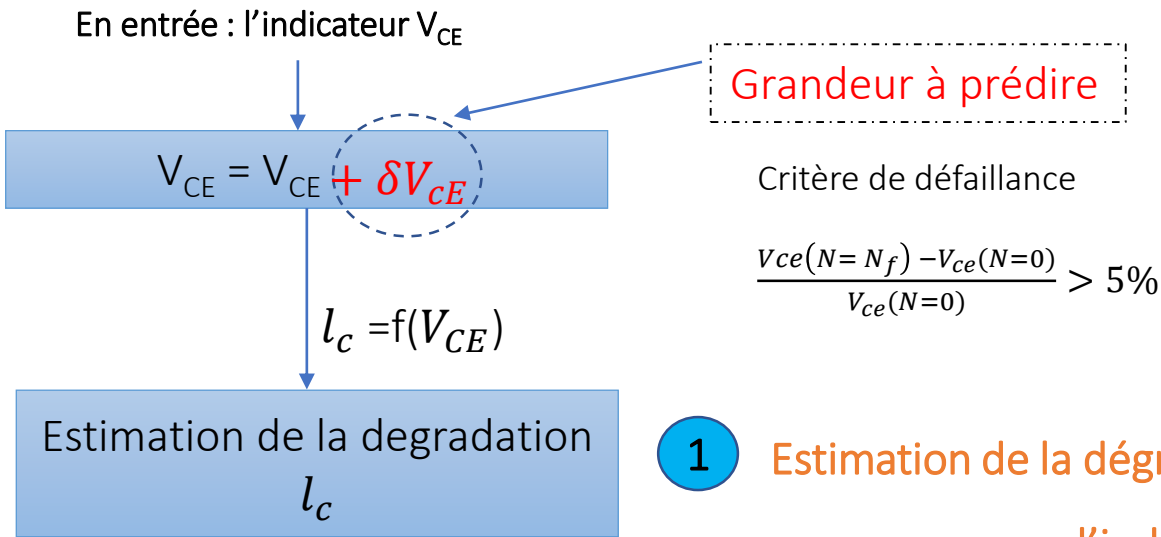


Dégradation : Evolution de $I_C(V_{CE})$

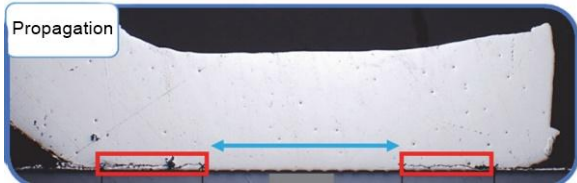


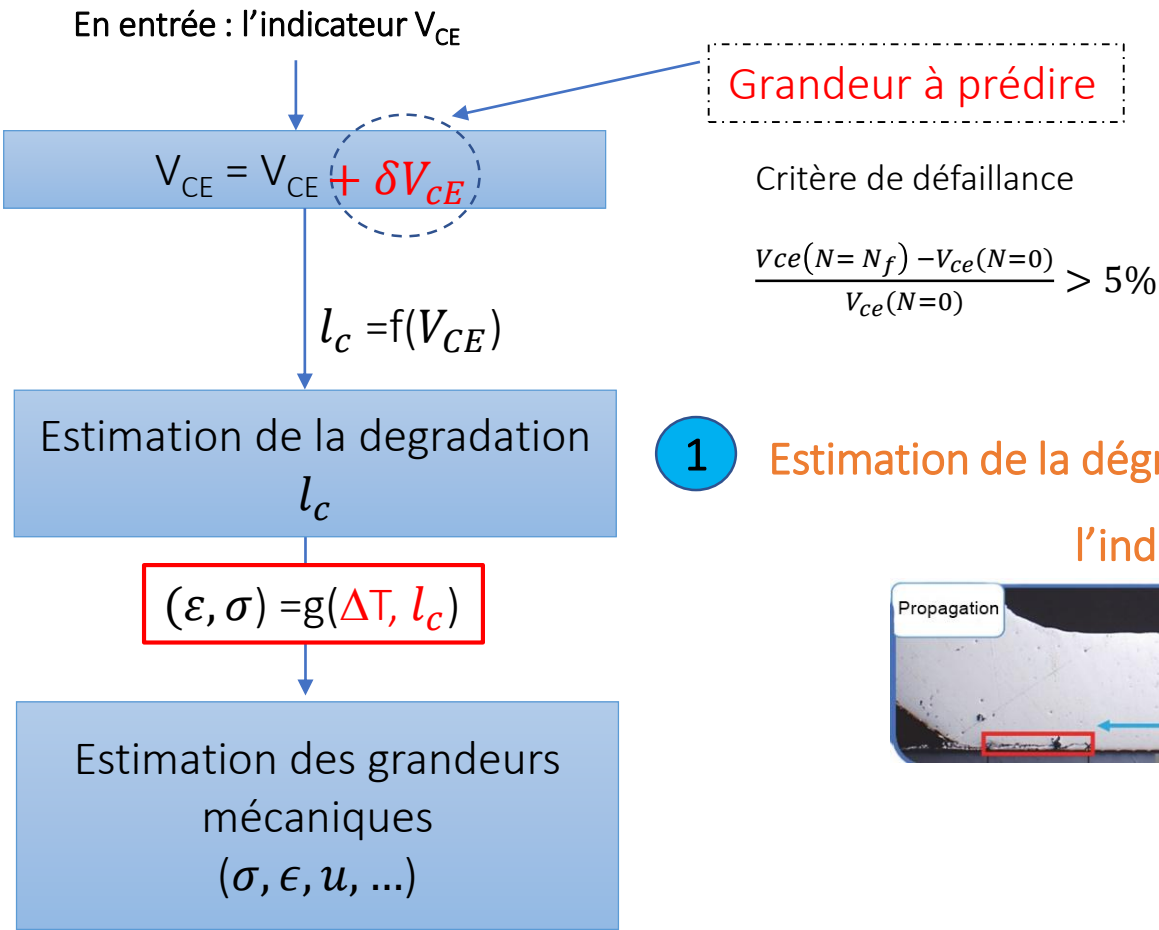
Tests de vieillissement accélérés : 3 campagnes de tests, ΔT paramètre stressueur : $\Delta T = 70^\circ\text{C}, 90^\circ\text{C}, 110^\circ\text{C}$

Thèse: N.Dornic, 2019

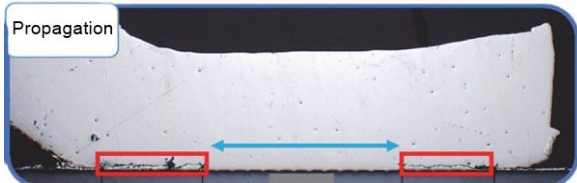


1 Estimation de la dégradation en fonction de l'indicateur





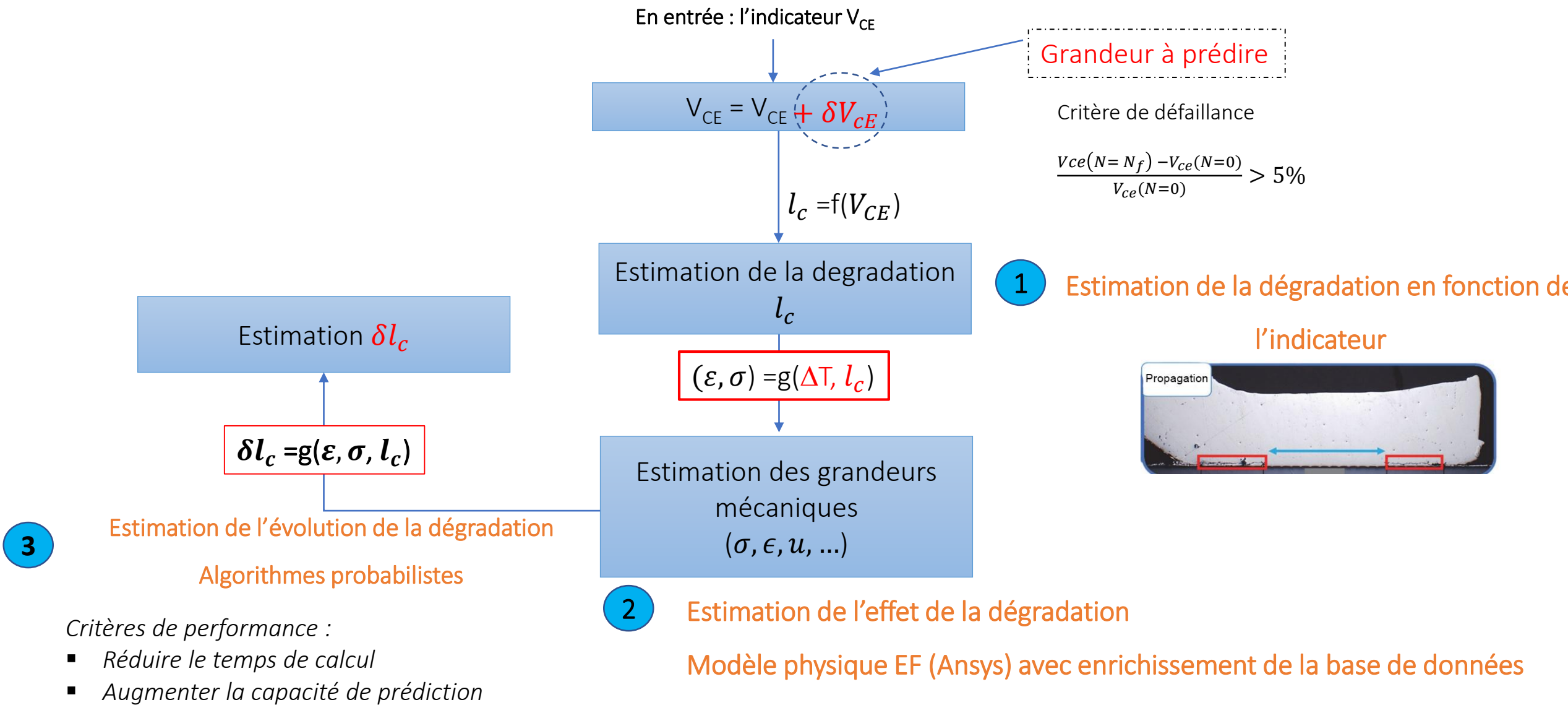
1 Estimation de la dégradation en fonction de l'indicateur



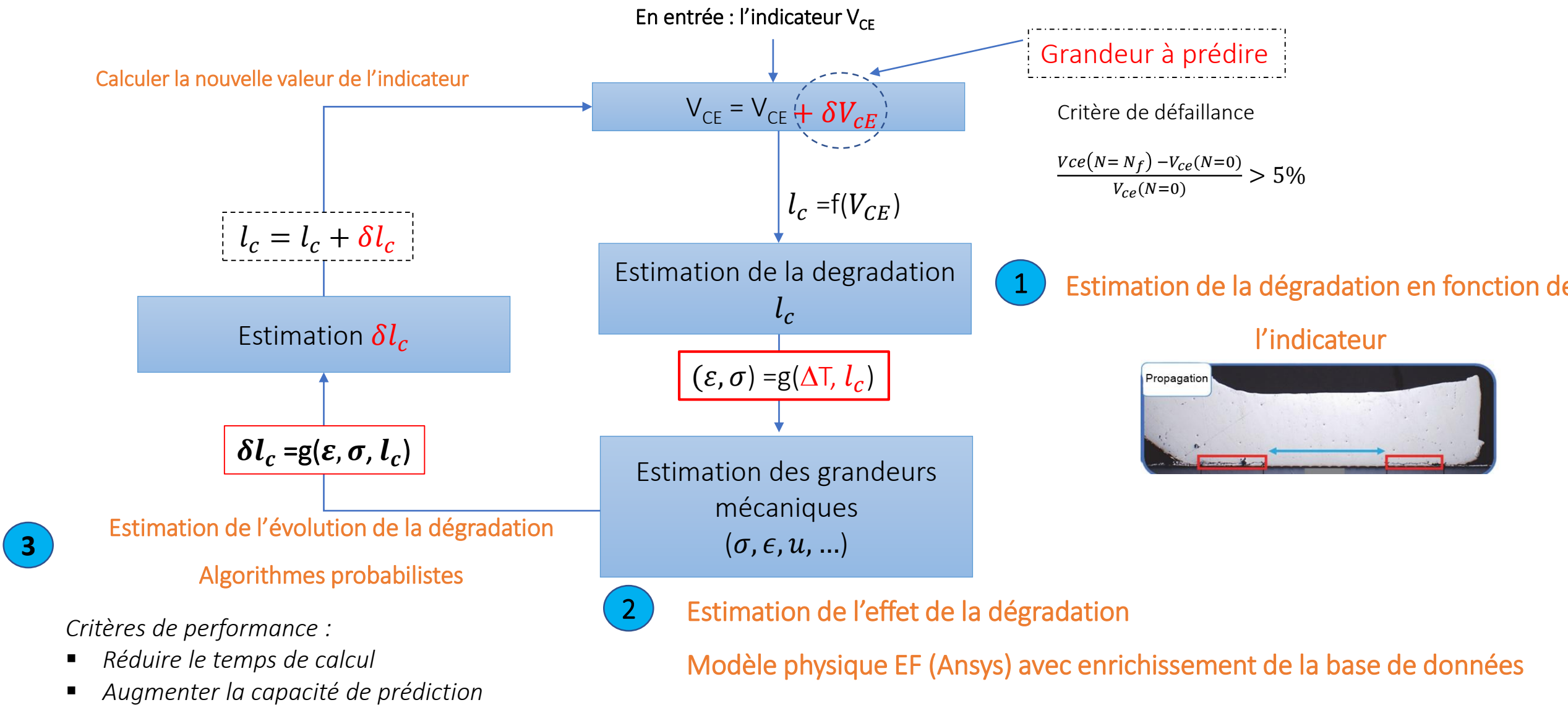
2 Estimation de l'effet de la dégradation

Modèle physique EF (Ansys) avec enrichissement de la base de données

Approche « hybride » : mécanisme de levée de fil de bonding

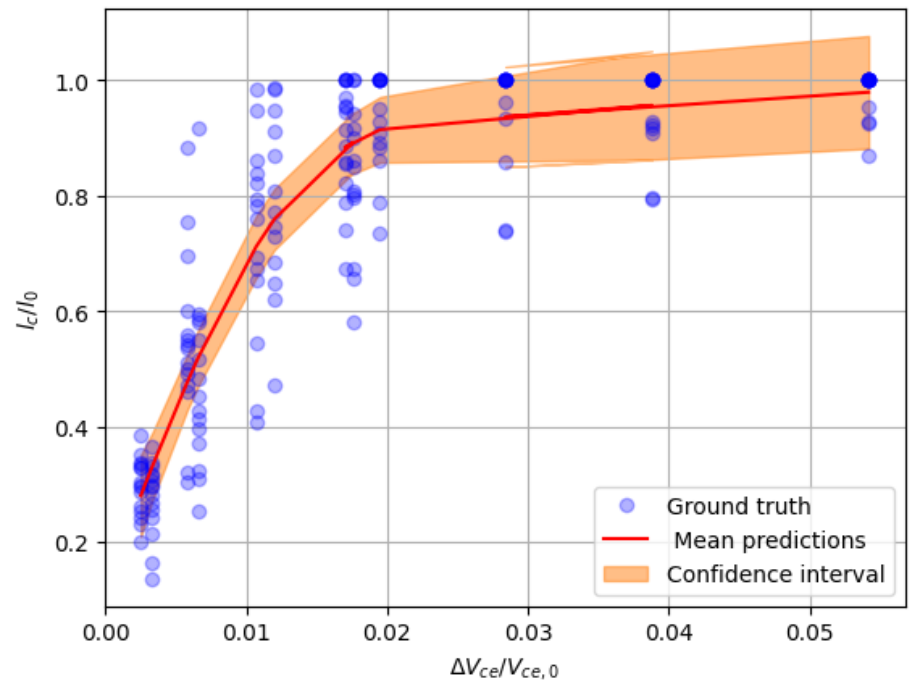
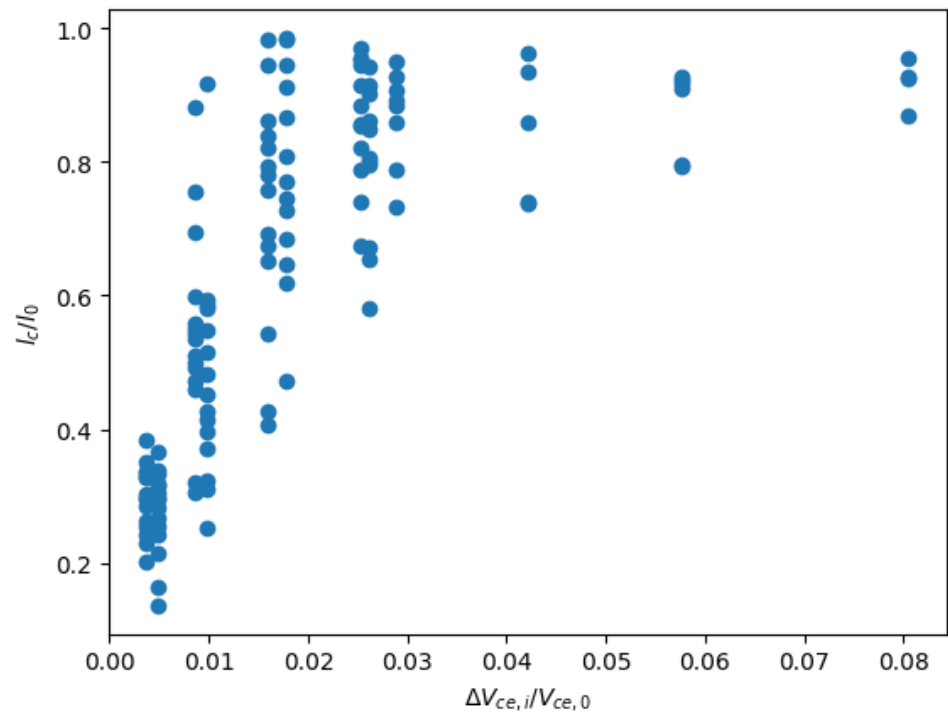


Approche « hybride » : mécanisme de levée de fil de bonding



Approche « hybride » : mécanisme de levée de fil de bonding

1 Estimation de la dégradation en fonction de l'indicateur : Relation $I_c \Leftrightarrow V_{ce}$

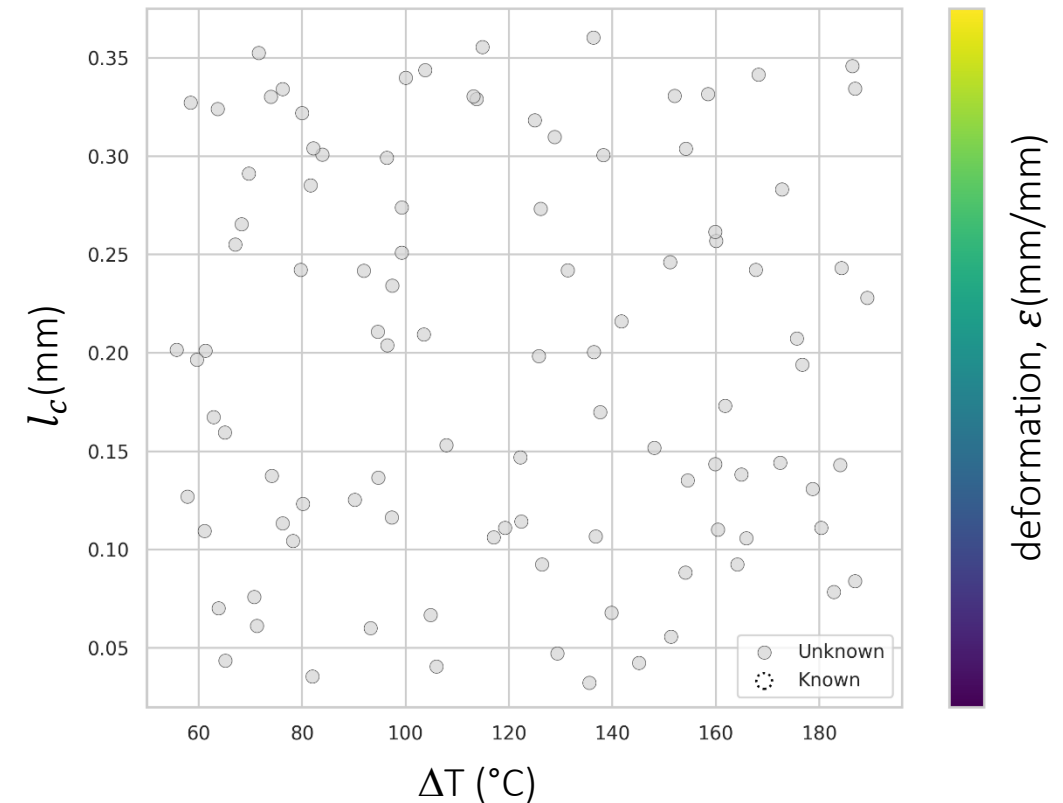


Nuage des points obtenus à l'aide des analyses destructives
→ Base de données limitée en raison du coût des tests

Possibilité de modéliser la relation à l'aide d'une régression exponentielle
Une approche probabiliste non paramétrique est préférée vu la variance et la taille de la base de données (processus gaussiens)

2 Estimation de l'effet de la dégradation $\delta l_c = g(\varepsilon, \Delta T, l_c)$

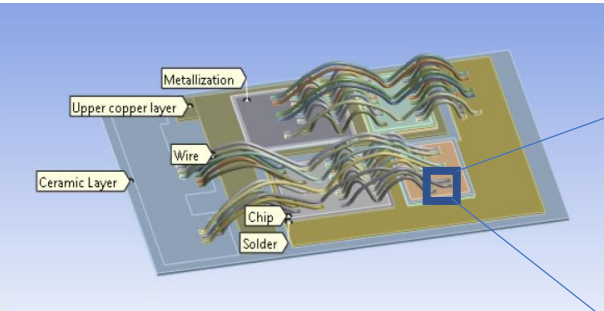
- Utilisation d'un modèle physique pour quelques points
- Interpolation par des algorithmes de machine learning pour enrichir la base de données (Métamodèle)



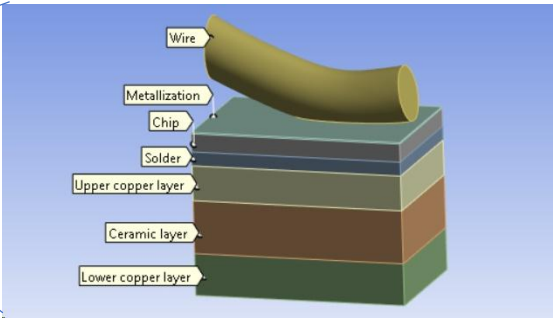
Approche « hybride » : mécanisme de levée de fil de bonding

2 Estimation de l'effet de la dégradation $\delta l_c = g(\epsilon, \Delta T, l_c)$

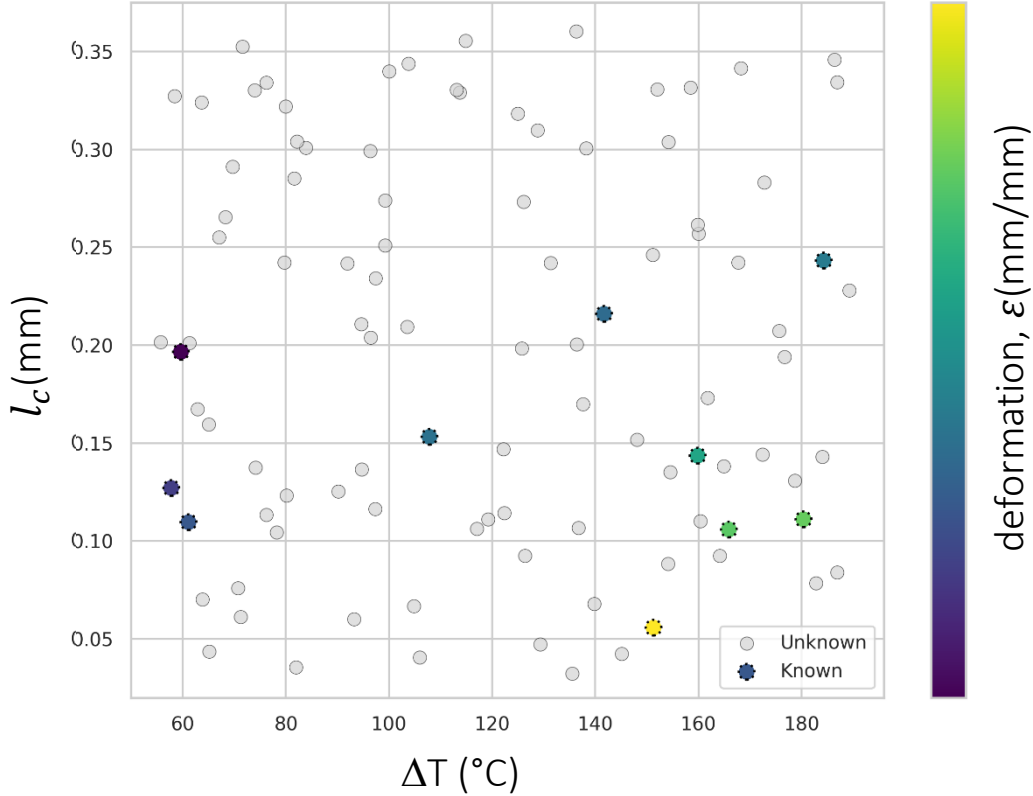
- Utilisation d'un modèle physique pour quelques points
- Interpolation par des algorithmes de machine learning pour enrichir la base de données (Métamodèle)



Modèle géométrique complet du module de puissance



Modèle géométrique localisé sur la zone d'intérêt

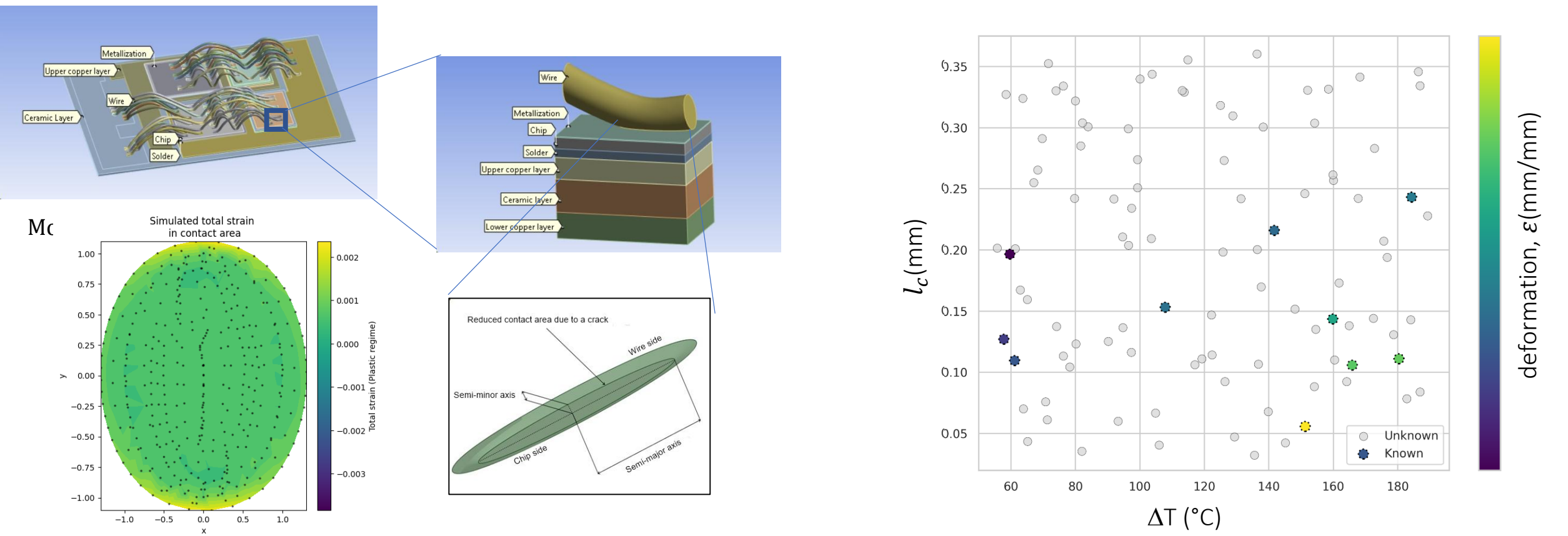


- En entrée: on fixe $(\Delta T, l_c)$
- Sortie : déformation ϵ , contraintes σ , déplacement
- ≈ 3 minutes per simulation

Approche « hybride » : mécanisme de levée de fil de bonding

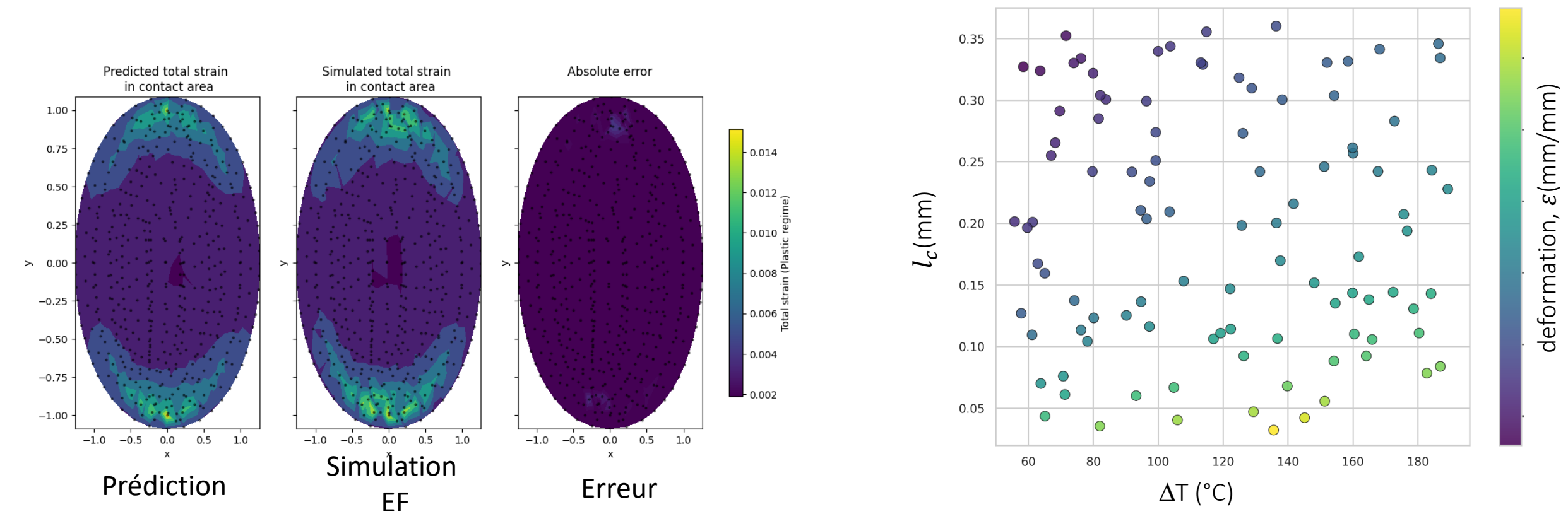
2 Estimation de l'effet de la dégradation $\delta l_c = g(\varepsilon, \Delta T, l_c)$

- Utilisation d'un modèle physique pour quelques points
- Interpolation par des algorithmes de machine learning pour enrichir la base de données (Métamodèle)

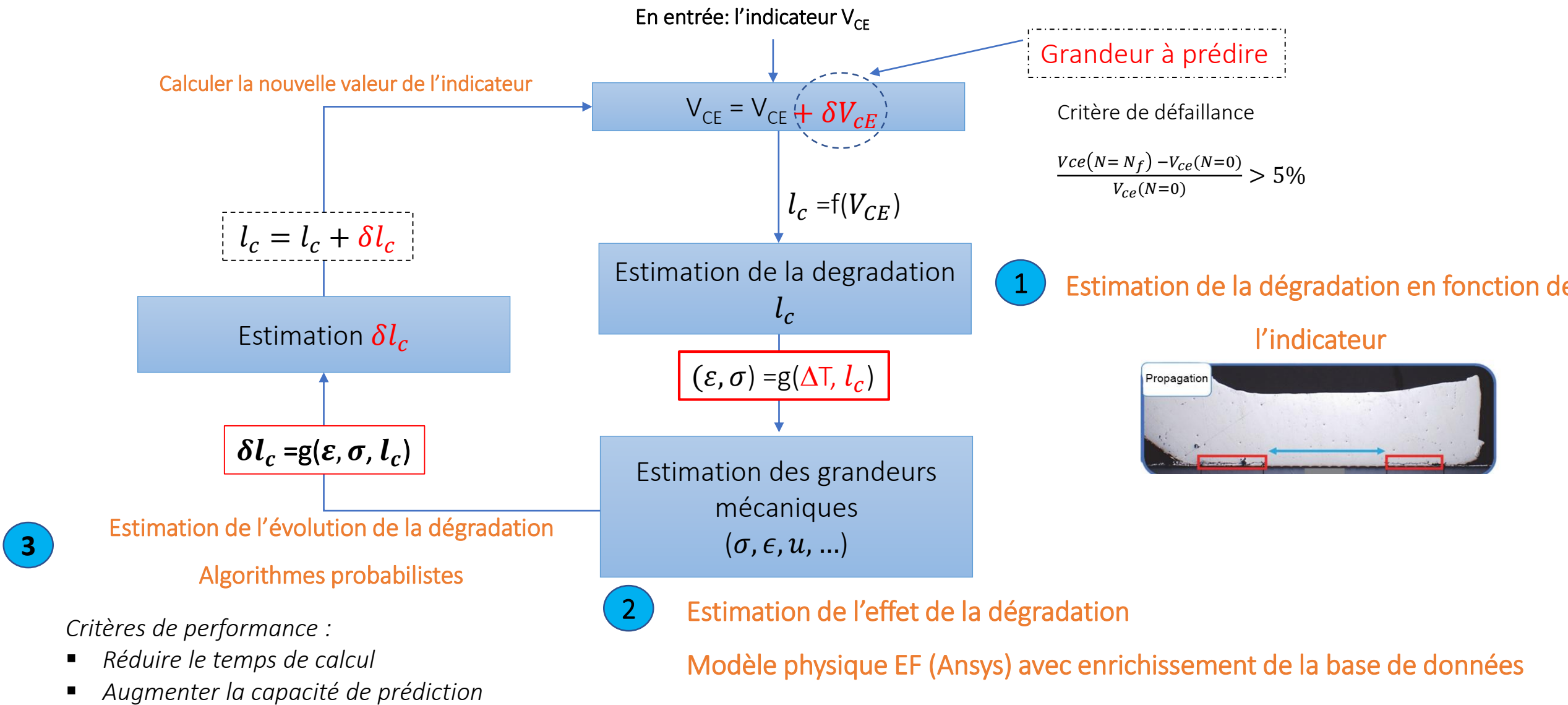


2 Estimation de l'effet de la dégradation $\delta l_c = g(\varepsilon, \Delta T, l_c)$

- Utilisation d'un modèle physique pour quelques points
- Interpolation par des algorithmes de machine learning pour enrichir la base de données (Métamodèle)
- Plusieurs algorithmes ont été testés : Support vector regression, K-Nearest neighbors, NN,...

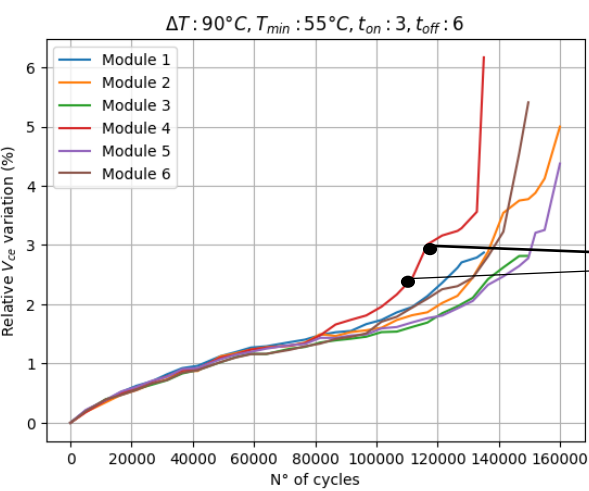


Approche « hybride » : mécanisme de levée de fil de bonding

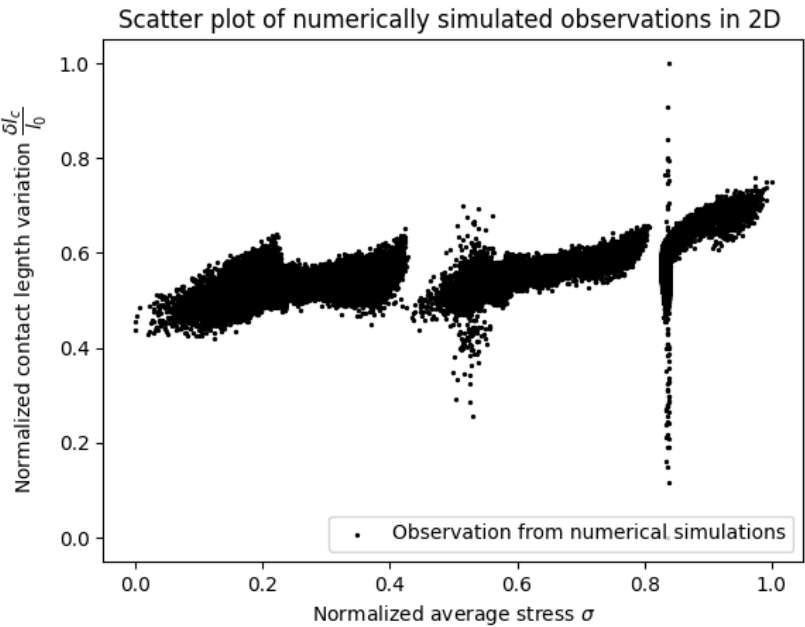


3 Estimation de l'évolution de la dégradation: Algorithmes probabilistes

Utilisation des la bases: enrichies par le métamodèle et expérimentales



- Etat initial l_c^1
- Etat final l_c^2
- Contraintes $(\Delta T, t_{on})$
- $\Leftrightarrow (\sigma, \epsilon, u, \dots)$



C'est sur cette nouvelle base de données que sont appliqués les algorithmes de ML (Ici Chaînes de Markov)

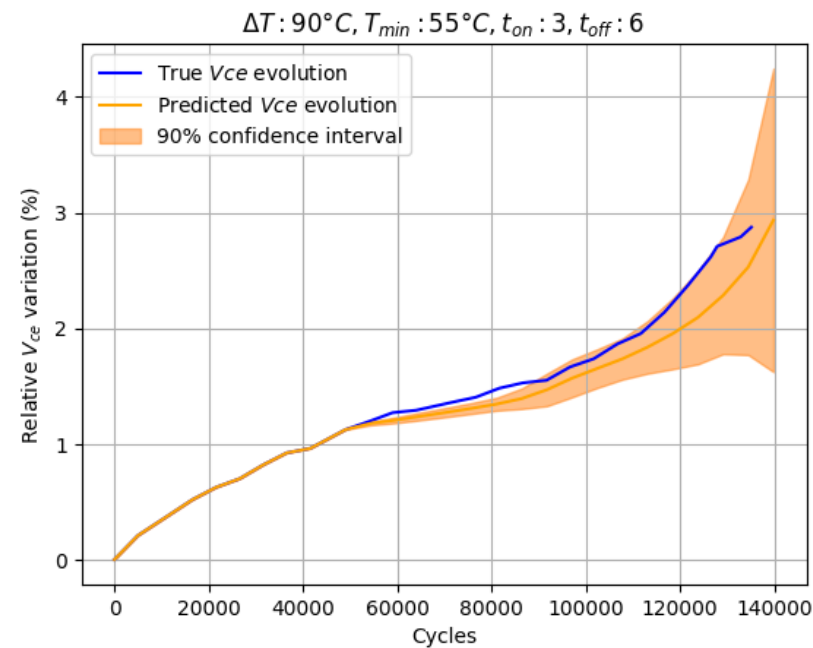
Base de données pour l'apprentissage

$$\delta l_c = g(\epsilon, \sigma, l_c) = g(\Delta T, V_{CE})$$

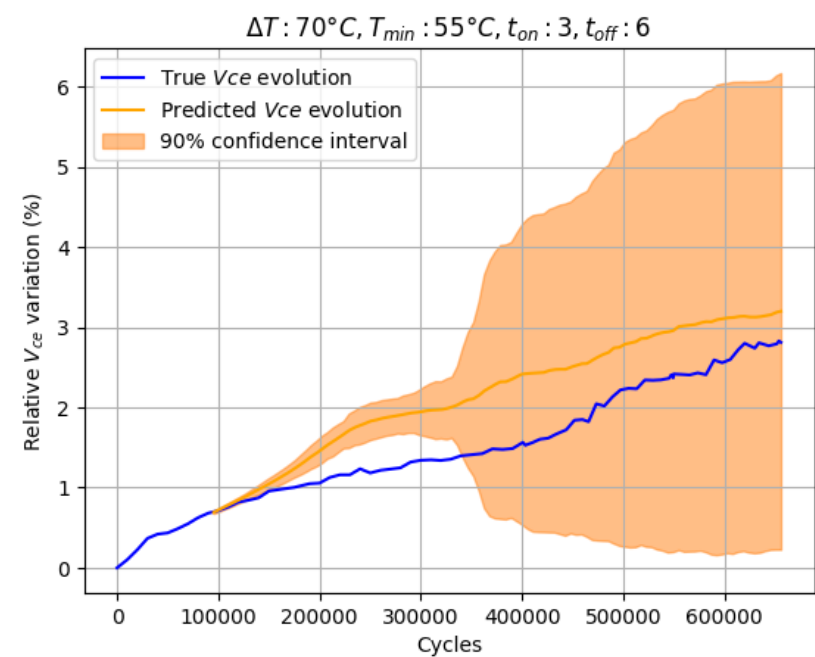
<https://github.com/MehdiGhrabli/PIMC4RUL>

Approche « hybride » : mécanisme de levée de fil de bonding

■ Résultats Interpolation: 12 tests de vieillissement utilisés (6 ayant $\Delta T = 70^{\circ}\text{C}$ et 6 ayant $\Delta T = 110^{\circ}\text{C}$)



Extrapolation: 12 tests de vieillissement utilisés (6 ayant $\Delta T = 90^{\circ}\text{C}$ et 6 ayant $\Delta T = 110^{\circ}\text{C}$)



ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	RBT (entre 0 et 1)	RMSBT (entre 0 et 1)
70 (extrapolation)	0,702	0,637
90 (interpolation)	0,802	0,802

L'interpolation donne des résultats plus précis

Conclusion

- Exploration de l'utilisation des méthodes ML en tant que modèles de substitution pour les simulations par éléments finis

→ Gain extraordinaire en temps de calcul (accélération de l'ordre 10^6 !) mais, les problèmes liés aux EF persistent: méconnaissance des propriétés des matériaux, lois d'évolutions en fonction du vieillissement,....

- Capacité de prédiction en utilisant les données expérimentales et les modèles physiques

→ Aller vers un jumeau numérique de la plateforme expérimentale de SATIE et à plus long terme prendre en compte la variabilité des contraintes, l'interaction entre les mécanismes,....

→ Objectif de l'ANR2025 POWER-TWIN



Publications:

[Physics-informed Markov chains for remaining useful life prediction of wire bonds in power electronic modules](#)

Published in *Microelectronics Reliability*, 2025

[Hybrid modeling for remaining useful life prediction in power module prognosis](#)

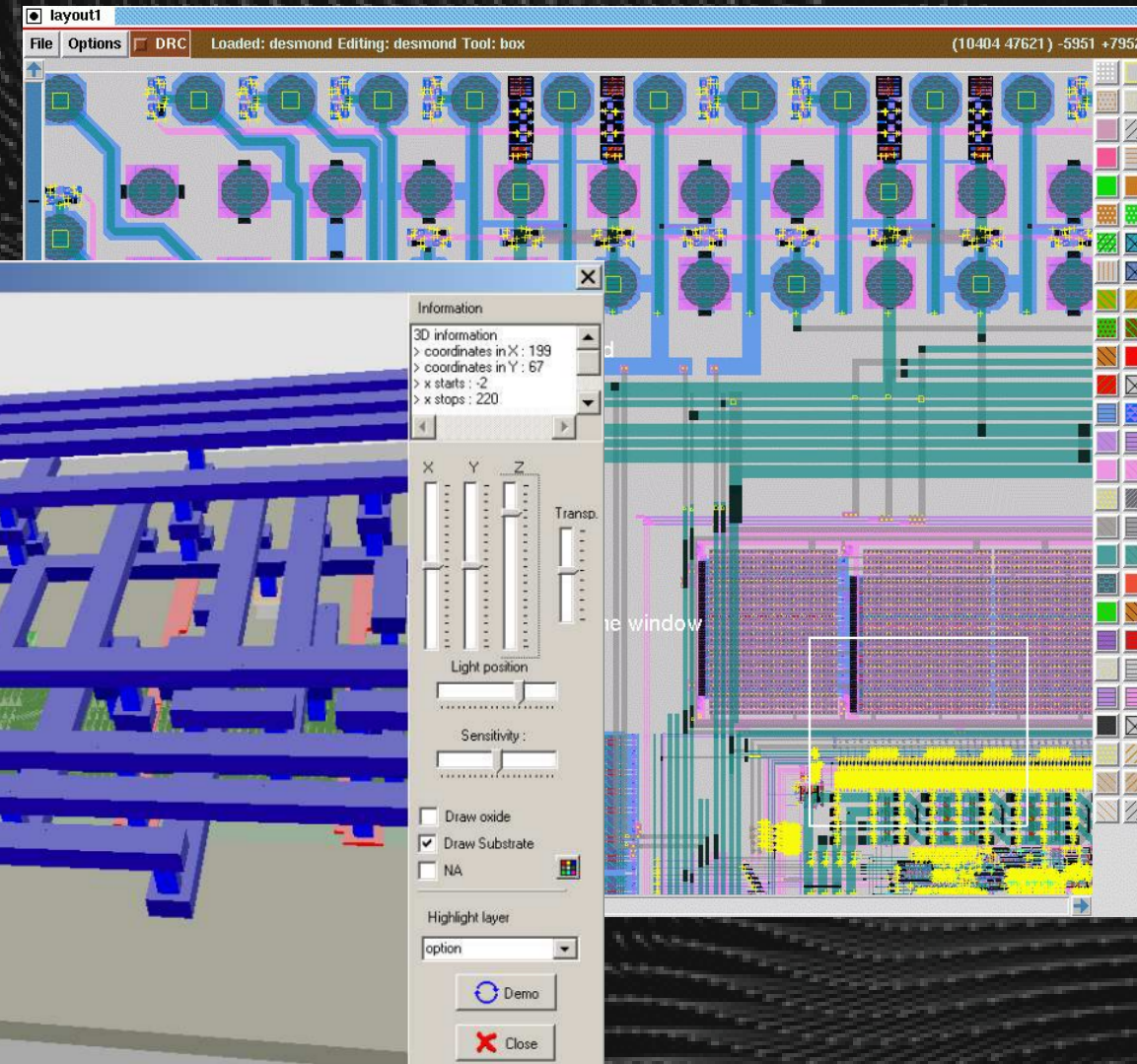
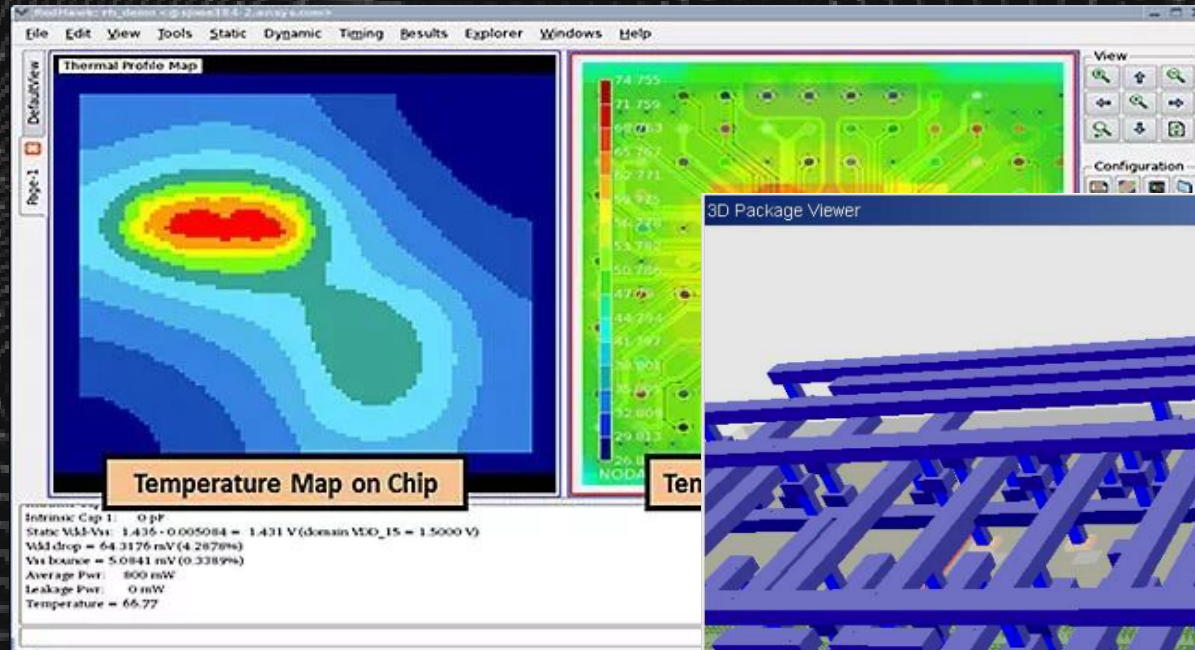
Published in *2024 25th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*, 2024

Merci de votre attention

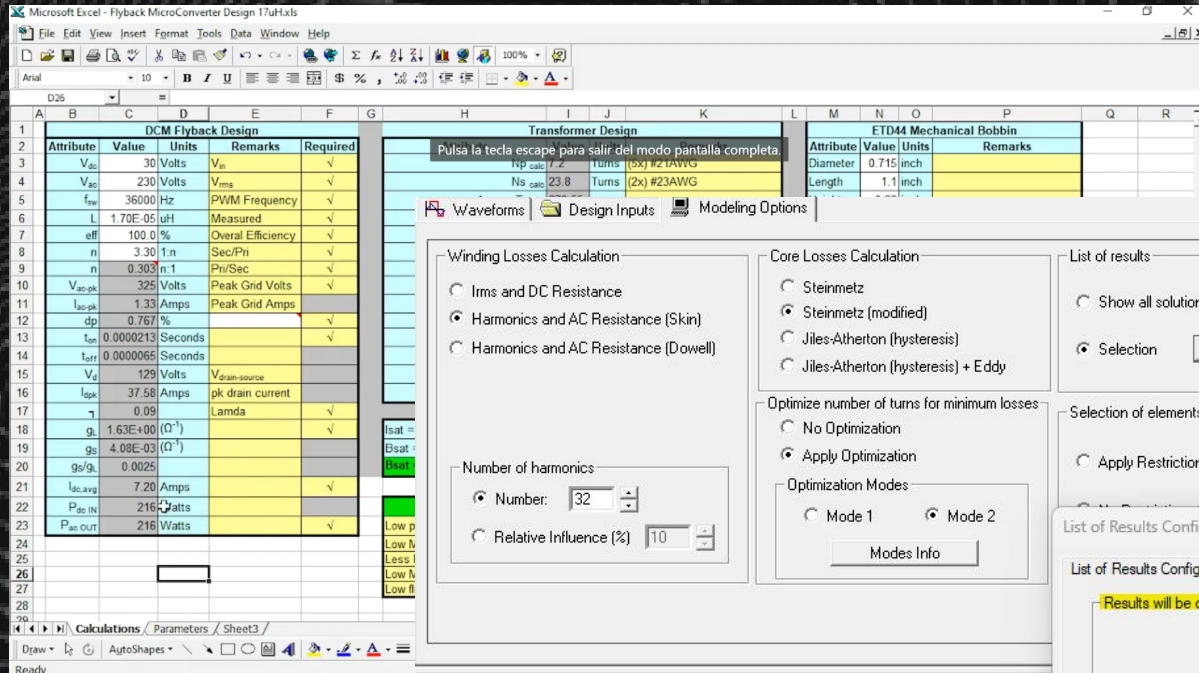
OpenMagnetics

**a Free Open-Source Platform for
Designing Magnetic Components
with Academia Knowledge**

Software for magnetics (not)



Software for magnetics



Insert Page Layout Formulas Data Review View Developer Help

Transformer Core Material Choices

OPERATING CONDITIONS

Operating Delta B	0.093	T	Core Area	0.66	cm ²
Core Excitation Frequency	150	kHz	Peak Flux at Max Duty	0.298	T
Duty Cycle D1 (Flux Rise)	0.427		Number of Turns	116	
Duty Cycle D2 (Flux Fall)	0.427		Core Volume	4.7	cm ³
Temperature	85	deg C			

TRANSFORMER CORE MATERIAL SELECTION

Magnetics ☒ F ☐ P ☐ R Ferrocube ☐ 3C90 ☐ 3F3 ☐ 3C96 TDK ☐ PC40 ☐ PC44 ☒ PC47 ☐ PC90 ☐ PC95

CHARACTERISTICS FOR SELECTED MATERIAL

Permeability	2500	Magnetizing Inductance	31.958	mH	Core Loss	0.328	W
--------------	------	------------------------	--------	----	-----------	-------	---

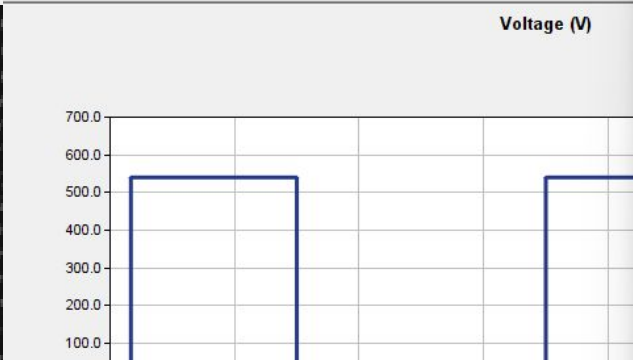
LTSPICE CORE LOSS MODEL

/voltage Exponent		Resistor RC1			
Inductor LC1	168.605921	H	913.06925	kΩ	
LC2	94.702457	H	RC2	3.077	MΩ
LC3	53.198616	H	RC3	10.371	MΩ
LC4	29.825092	H	RC4	34.887	MΩ
LC5	17.298219	H	RC5	121.405	MΩ
LC6	6.259619	H	RC6	263.593	MΩ
			RC7	2393.675	MΩ

LTSPICE Circuit Diagram:

VPWR is connected to a series of components: RC1, LC1, RC2, LC2, RC3, LC3, RC4, LC4, RC5, LC5, RC6, LC6, and finally RC7 to ground.

Help ☐ Enable LTspice Core Model ☒ Disable LTspice Core Model **OK**



List of Results Configuration

Results will be classified by

- ☒ Minimum Losses
- ☐ Minimum Temperature
- ☐ Minimum Volume
- ☐ Minimum Height
- ☐ Minimum Footprint

Number of solutions to be shown

Show the 10 best solutions

OK **Cancel** **Apply**

Current most advanced models

Core losses

Steinmetz's equation
Based on C. P. Steinmetz's work in 1890



Winding losses

Dowell's equation
Based on P. L. Dowell's work in 1966

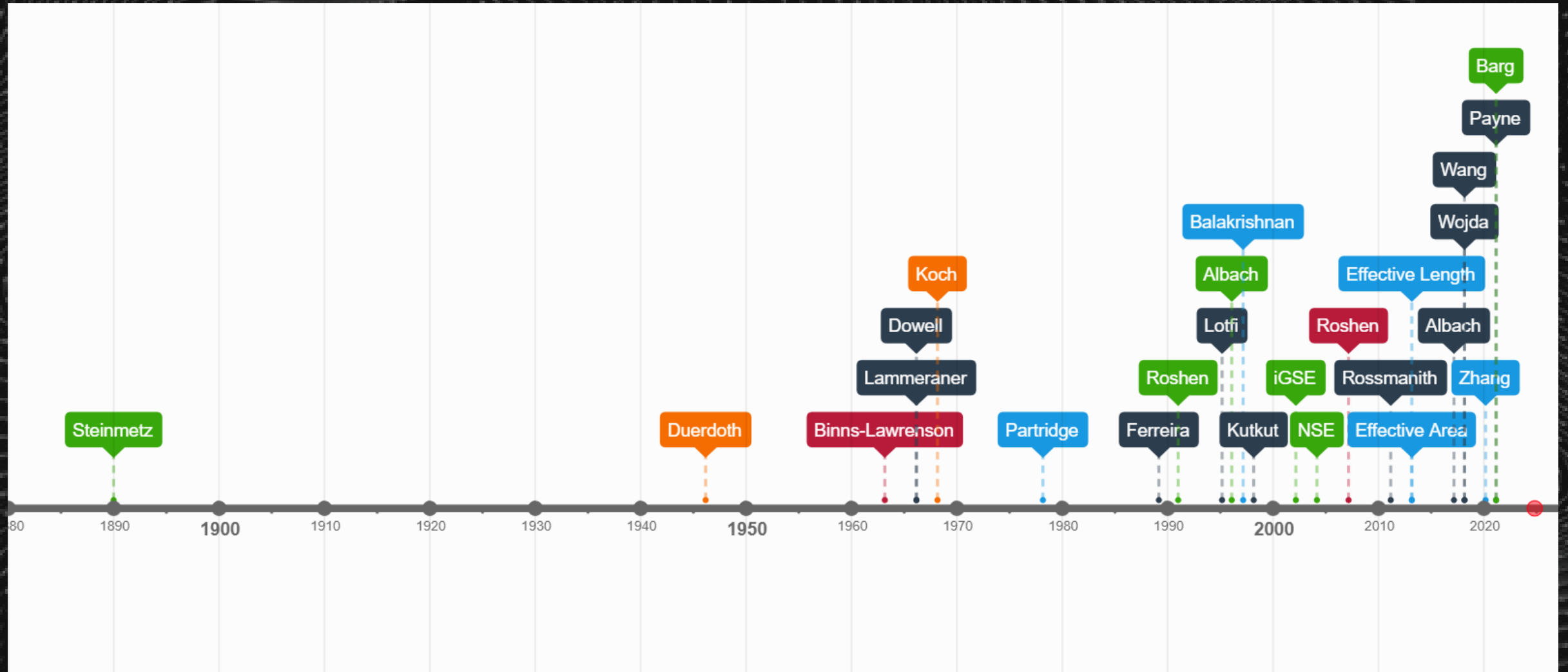
Effects of eddy currents in transformer windings

P. L. Dowell, B.Sc.(Eng.), Graduate I.E.E.

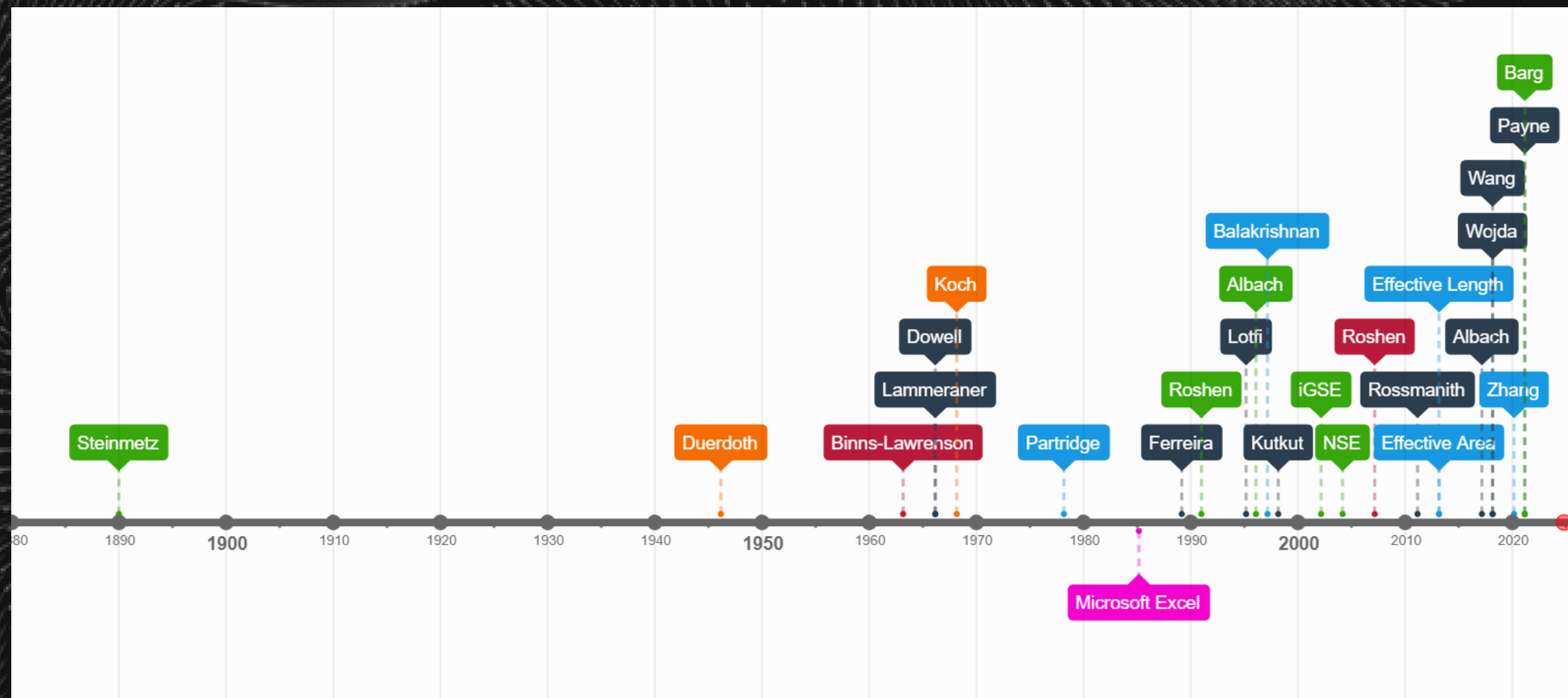
Though most people just use DC resistance to calculate winding losses...

Did power electronics modeling peak in the 60s?

Models timeline I



Models timeline II



The "Excel Threshold"

- The "Excel Threshold" is the point where a model cannot be any longer implemented in Excel and need proper programming skills
- This threshold is low for power engineers, as many are not versed in programming
- Examples **under** the threshold:

- Steinmetz equation for core losses:

$$P_v = k \cdot f^a \cdot B^b$$

- Dowell's equation for winding losses:

$$K = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = Re \{ \alpha \cdot h \cdot \coth(\alpha \cdot h) \} + \frac{m^2 - 1}{3} \cdot Re \left\{ 2 \cdot \alpha \cdot h \cdot \tanh \left(\frac{\alpha \cdot h}{2} \right) \right\}$$

- Partridge's equation for air gap reluctance:

$$\frac{1}{\bar{R}} = \frac{A}{\bar{l}_a} + \frac{P}{2} \log_e \frac{S}{\bar{l}_a}$$

- Examples **over** the threshold:

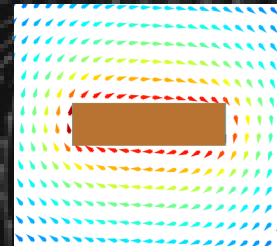
- iGSE method for core losses:

$$\overline{P_v} = \frac{k_i (\Delta B)^{\beta - \alpha}}{T} \sum_m \left| \frac{B_{m+1} - B_m}{t_{m+1} - t_m} \right|^\alpha (t_{m+1} - t_m)$$

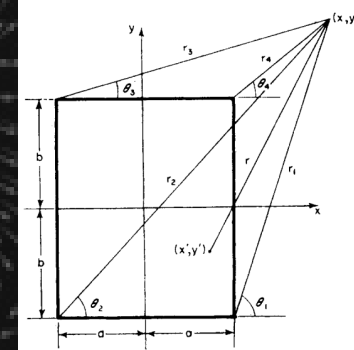
- Binn-Lawrenson equation for the magnetic field of rectangular conductors:

$$H_x = \frac{I}{8\pi ab} \left[\begin{aligned} &(y+b)(\theta_1 - \theta_2) - (y-b)(\theta_4 - \theta_3) \\ &+ (x+a) \log \frac{r_2}{r_3} - (x-a) \log \frac{r_1}{r_4} \end{aligned} \right],$$

$$H_y = -\frac{I}{8\pi ab} \left[\begin{aligned} &(x+a)(\theta_2 - \theta_3) - (x-a)(\theta_1 - \theta_4) \\ &+ (y+b) \log \frac{r_2}{r_1} - (y-b) \log \frac{r_3}{r_4} \end{aligned} \right].$$



$$k_1 = \frac{k}{(2\pi)^{\alpha-1} \int_0^{2\pi} |\cos \theta|^\alpha |\sin \theta|^{\beta-\alpha} d\theta}.$$



Current status

Industry

"This is how we do things"

"This has to be done for EOD, no time for testing new stuff"

"Just implement it quickly in **Excel** and we will correct in the prototyping phase"

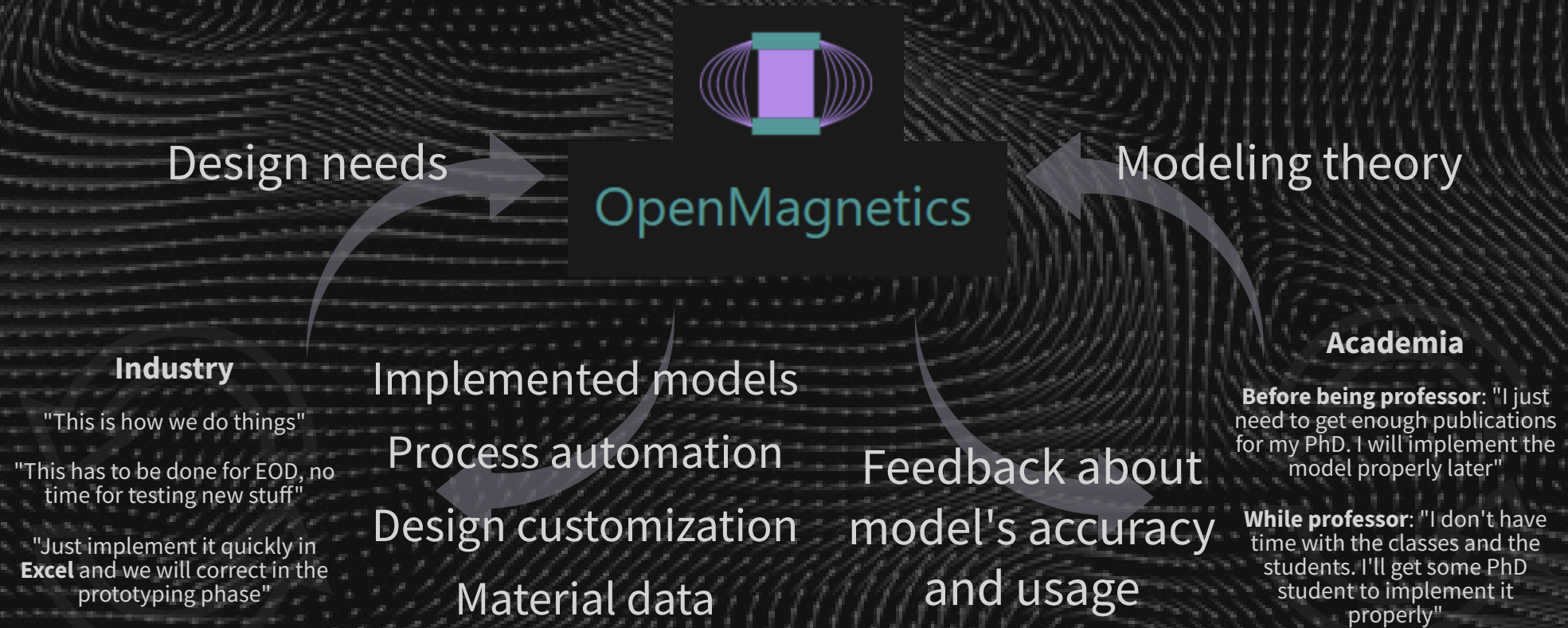
Little exchange of people and ideas

Academia

Before being professor: "I just need to get enough publications for my PhD. I will implement the model properly later"

While professor: "I don't have time with the classes and the students. I'll get some PhD student to implement it properly"

A bridge between Industry designers and Academia



The "OpenMagnetics Threshold"

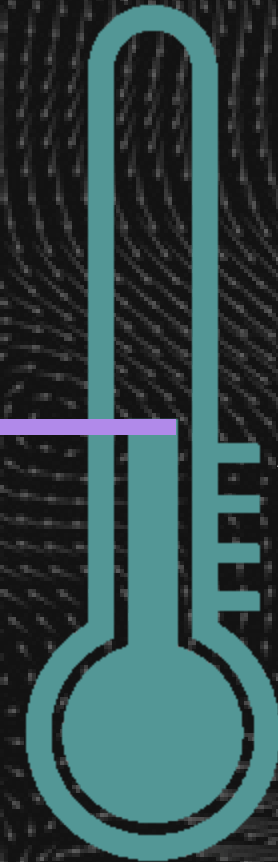


How to achieve the "OpenMagnetics Threshold"?

- Open-source and transparency, with public validation => **Trust**
- A common language, a data structure for magnetics => **Standardization**
- A powerful but simple Graphical Interface => **Low Learning Curve**
- Speed => **Promotes testing and trying different options**

OM Threshold

(A.K.A. Maximum cognitive load than a power engineer needs to use the tool)



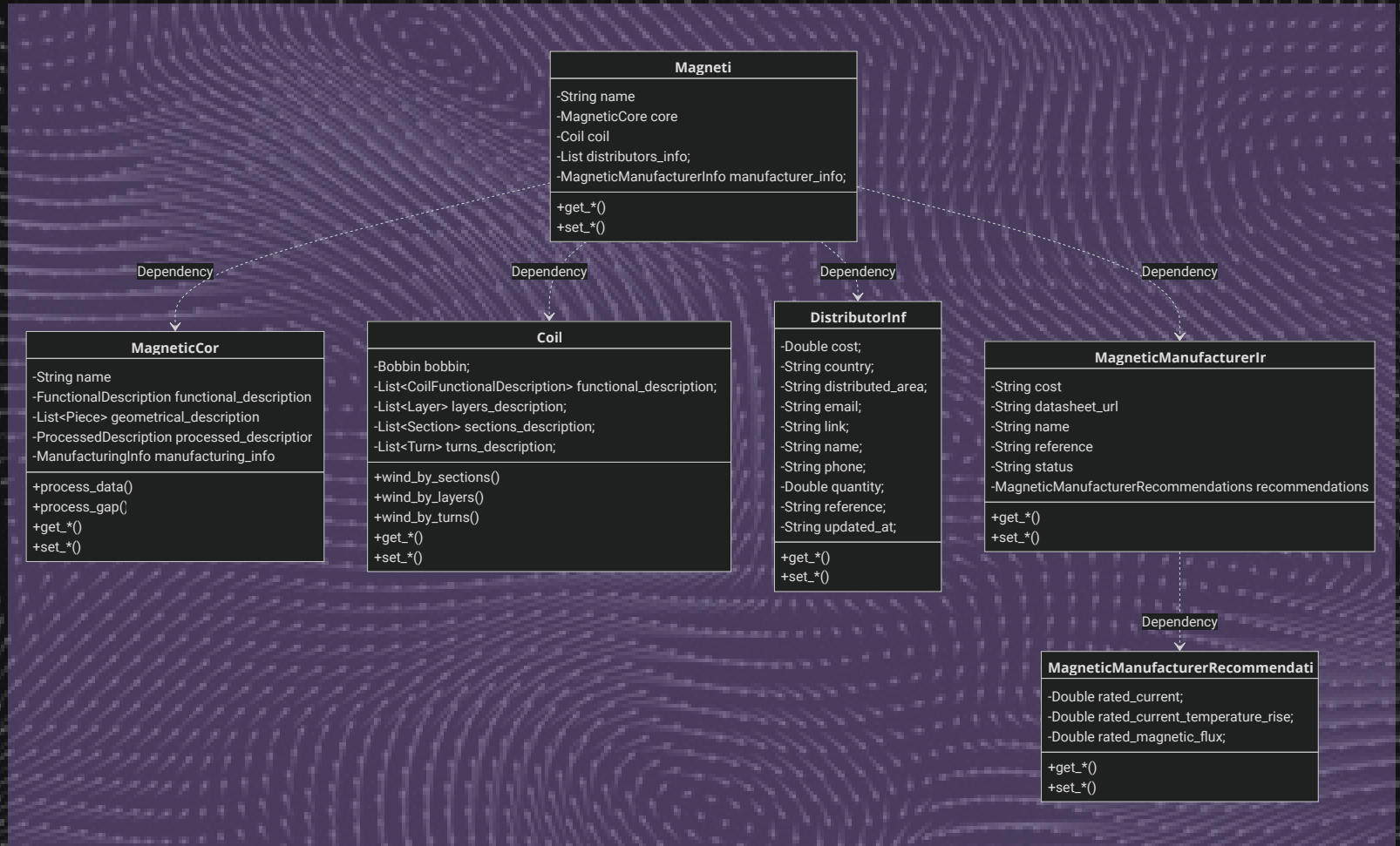
Albach
iGSE
Dowell
Steinmetz

Magnetic Agnostic Structure (MAS)

MAS is an open-source Hardware Description Language (HDL) designed to unambiguously describe any possible magnetic component, providing a digital format to exchange design information between designers, manufacturers and simulation software providers.

It is based on 9 principles:

1. Open
2. Unambiguous
3. Ruled
4. Scalable
5. Human readable
6. Machine readable
7. Efficiently stored
8. Versionable
9. Indirection

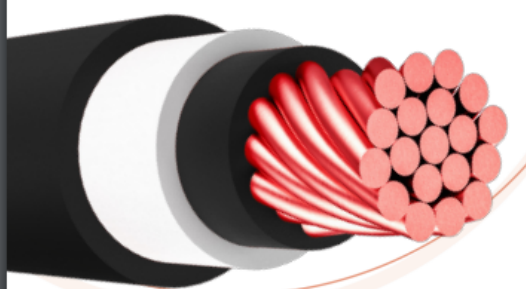


Magnetic Agnostic Structure (MAS) - Example I

INSULATED LITZ WIRES

Triple Insulated

Litz Wire
FEP INSULATION



Product Construction:

SIZE RANGE: Sizes listed are a small sample of the litz products offered. Contact the Sales Department.

CONDUCTOR: NEMA MW 79-C | NEMA MW 80-C

INSULATIONS: FEP

RATING: TEMPERATURE: 155°C | VOLTAGE: 1000 Vpk

APPLICATIONS: High frequency applications. See litz wire introduction page.

COMPLIANCES:
UL OBJT2 File No. E206198
UL/IEC 60950-1 (Ed. 2), Annex U
IEC 61010-1 (Ed. 3)
VDE License Nr. 6715: Class F

SYSTEM APPROVALS: UL 1446
• RXT-2 (Class F)
• TCA (Class F)
• Other systems available upon request

RoHS Compliant

TENSILE STRENGTH: 3000 psi

BREAKDOWN: Please request specification sheet

PART NUMBER	EQUIV. AWG	CORE O.D. (in)	CIR. MILS	NO. STRANDS	AWG OF STRANDS	NOMINAL O.D.(in)	SUGGESTED OPERATING FREQUENCY
TXXL350/38FXXX-2(MWXX)	13	0.1041	5600	350	38	0.1161	50-100 kHz
TXXL350/38FXXX-3(MWXX)	13	0.1041	5600	350	38	0.1221	50-100 kHz
TXXL825/44FXXX-2(MWXX)	15	0.0817	3300	825	44	0.0937	400-850 kHz
TXXL825/44FXXX-3(MWXX)	15	0.0817	3300	825	44	0.0997	400-850 kHz
TXXL120/38FXXX-2(MWXX)	18	0.0569	1920	120	38	0.0689	50-100 kHz
TXXL120/38FXXX-3(MWXX)	18	0.0569	1920	120	38	0.0749	50-100 kHz
TXXL550/44FXXX-2(MWXX)	17	0.0623	2200	550	44	0.0743	400-850 kHz
TXXL550/44FXXX-3(MWXX)	17	0.0623	2200	550	44	0.0803	400-850 kHz

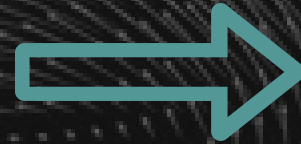
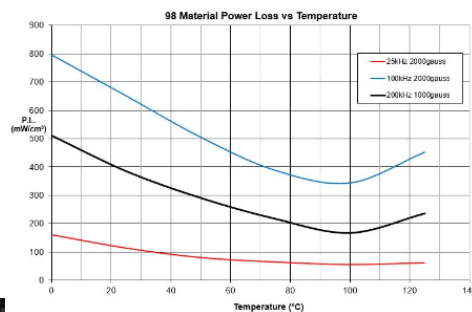
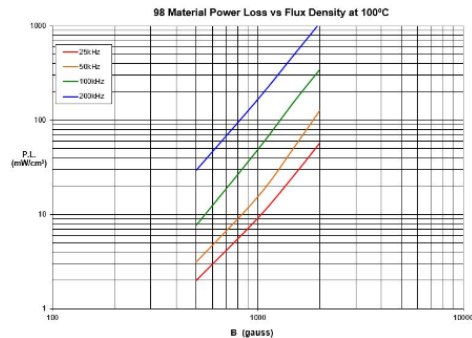
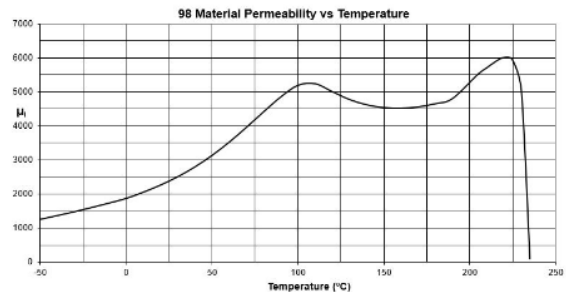
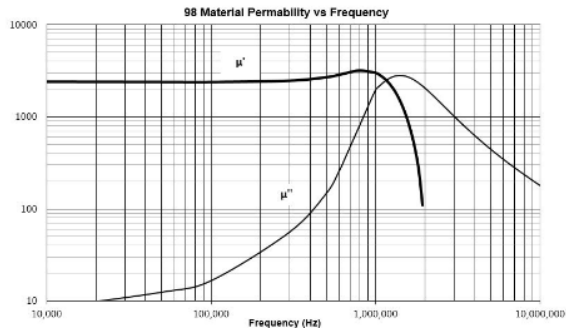


```
1 {
2   "name": "Litz TXXL350/38FXXX-2(MWXX)",
3   "type": "litz",
4   "manufacturerInfo": {
5     "name": "Rubadue"
6   },
7   "numberConductors": 350,
8   "standard": "NEMA MW 1000 C",
9   "outerDiameter": {
10     "nominal": 0.0029489399999999997
11   },
12   "coating": {
13     "type": "insulated",
14     "material": "FEP",
15     "numberLayers": 3,
16     "thicknessLayers": 0.0000508,
17     "temperatureRating": 155,
18     "breakdownVoltage": 9000
19   },
20   "strand": "Round 38.0 - Single Build"
21 }
```

Magnetic Agnostic Structure (MAS) - Example II

98 Material Characteristics

Property	Unit	Symbol	Value
Initial Permeability @ B < 10 gauss		μ_i	2400
Flux Density @ Field Strength	Gauss Oersted	B H	5000 5
Residual Flux Density	Gauss	B_r	2000
Coercive Force	Oersted	H_c	0.17
Loss Factor @ Frequency	10^{-6} MHz	$\tan \delta / \mu_i$	3 0.1
Temperature Coefficient of Initial Permeability (20 -70°C)	%/°C		1.5
Curie Temperature	°C	T_c	>215
Resistivity	Ohm-cm	ρ	200



```
{
  "type": "commercial",
  "name": "98",
  "family": "MnZn",
  "resistivity": [{"value": 2, "temperature": 25 } ],
  "coerciveForce": [
    {"magneticFluxDensity": 0, "magneticField": 6, "temperature": 100 },
    {"magneticFluxDensity": 0, "magneticField": 14, "temperature": 25 }
  ],
  "remanence": [
    {"magneticFluxDensity": 0.05, "magneticField": 0, "temperature": 100 },
    {"magneticFluxDensity": 0.2, "magneticField": 0, "temperature": 25 }
  ],
  "density": 4800,
  "curieTemperature": 215,
  "material": "ferrite",
  "manufacturerInfo": {"name": "Fair-rite",
    "datasheetUrl": "https://fair-rite.com/98-material-data-sheet/" },
  "permeability": {
  },
  "saturation": [{
  },
  ],
  "volumetricLosses": {
    "default": [
      {"method": "roshen" },
      {
        "method": "steinmetz",
        "ranges": [{
          "minimumFrequency": 25000,
          "maximumFrequency": 62500,
          "k": 3.928142411,
          "alpha": 1.595061218,
          "beta": 2.636535052,
          "ct2": 0.00001567942619,
          "ct1": 0.002908141711,
          "ct0": 0.2309448429
        },
        {
          "minimumFrequency": 62500,
          "maximumFrequency": 150000,
          "k": 7.145271691,
          "alpha": 1.475426256,
          "beta": 2.740567552,
          "ct2": 0.00002029839064,
          "ct1": 0.003684861713,
          "ct0": 0.3313087837
        }
      ]
    }
  ]
}
```

OpenMagnetics Database (OMDB)

It's an open-source database storing all the information about the parts needed to create magnetics.

Currently it has:

- 351Core Materials
- 960 Core Shapes
- 4304 Commercial Wires
- 10318 Commercial Cores
- 146 Commercial Bobbins

The screenshot shows the GitHub repository for OpenMagnetics / MAS. The left sidebar displays the file structure under the 'data' directory, listing various .ndjson files. The main area shows the commit history for the 'data' directory, with a table of commits including the file name, commit message, and date.

OpenMagnetics / MAS Public

Code Issues 4 Pull requests Actions Projects Security Insights

Files

main

Go to file

data

- advanced_core_materials.ndjson
- bobbins.ndjson
- core_materials.ndjson
- core_shapes.ndjson
- cores.ndjson
- cores_stock.ndjson
- insulation_materials.ndjson
- wire_materials.ndjson
- wires.ndjson

docs

samples

schemas

tests

MAS / data

AlfVII Error fixed in PC95 420a52f · 2 months ago History

Name	Last commit message	Last commit date
..		
advanced_core_materials.ndjson	Added DMR95 material	8 months ago
bobbins.ndjson	Added Swarm large bobbins	2 months ago
core_materials.ndjson	Error fixed in PC95	2 months ago
core_shapes.ndjson	Removed hole from RM /I	2 months ago
cores.ndjson	Add datasheets to core materials	2 months ago
cores_stock.ndjson	Fixed some shapes	2 months ago
insulation_materials.ndjson	Core database updated	5 months ago
wire_materials.ndjson	Added wire materials	last year
wires.ndjson	Added field needed for insulation automation	6 months ago

Full Magnetic in MAS

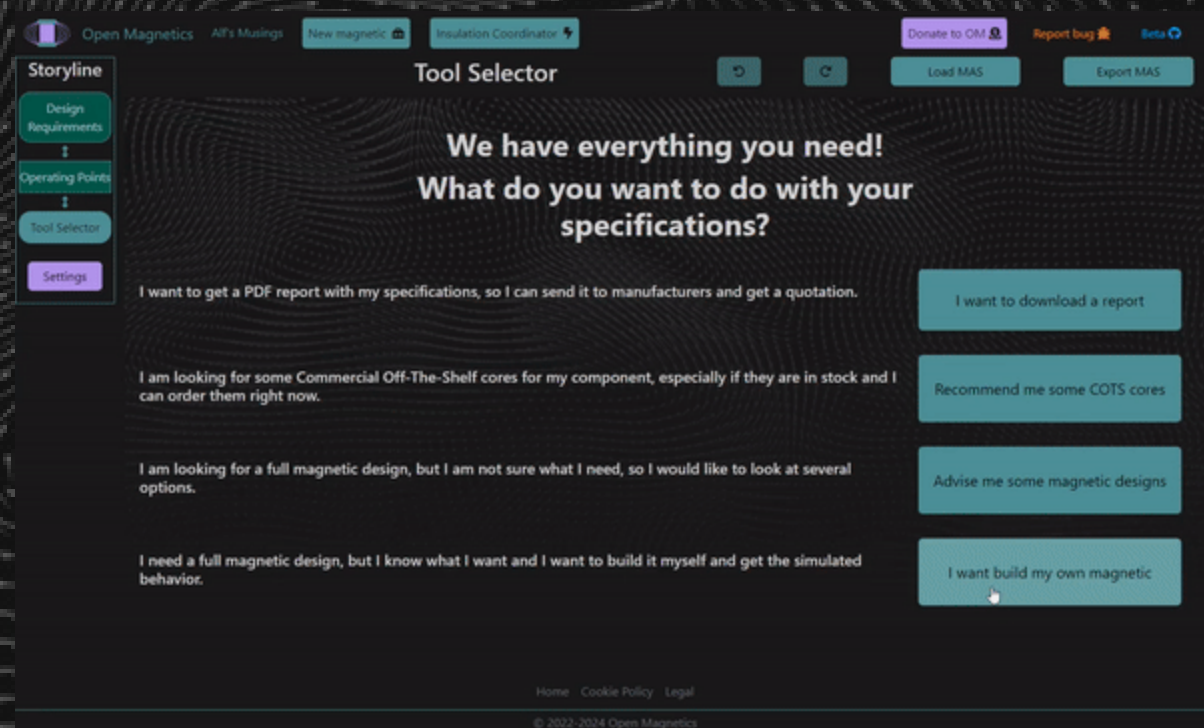
Fully defining a magnetic, without any ambiguity, and including all the information about materials and shape is arduous

```
1  "magnetic": {
2    "coil": {
3      "bobbin": "Dummy",
4      "functionalDescription": [
5        {
6          "isolationSide": "primary",
7          "name": "Primary",
8          "numberParallels": 1,
9          "numberTurns": 18,
10         "wire": "Round 9.0 - Triple Build"
11        },
12        {
13          "isolationSide": "secondary",
14          "name": "Secondary",
15          "numberParallels": 1,
16          "numberTurns": 6,
17          "wire": "Round 5.5 - Heavy Build"
18        }
19      ],
20    },
21    "core": {
22      "functionalDescription": {
23        "gapping": [
24          {
25            "length": 0.00029,
26            "type": "subtractive"
27          },
28          {
29            "type": "residual"
30          }
31        ],
32        "material": "3C95",
33        "numberStacks": 1,
34        "shape": "UR 37/26/18",
35        "type": "two-piece set",
36        "magneticCircuit": "open"
37      },
38    },
39    "manufacturerInfo": {
40      "name": "OpenMagnetics",
41      "reference": "My custom magnetic"
42    }
43  }
```



```
1  "magnetic": {
2    "coil": {
3      "bobbin": {
4        "processedDescription": {
5          "columnDepth": 0.00984723880815594,
6          "columnShape": "round",
7          "columnThickness": 0.0024972388081559403,
8          "columnWidth": 0.00984723880815594,
9          "coordinates": [
10            0,
11            0,
12            0
13          ],
14          "wallThickness": 0.0018443359374999985,
15          "windingWindows": [
16            {
17              "area": 0.0003410717315402637,
18              "coordinates": [
19                0.015548619404077969,
20                0,
21                0
22              ],
23              "height": 0.029911328125,
24              "sectionsAlignment": "inner or top",
25              "sectionsOrientation": "overlapping",
26              "shape": "rectangular",
27              "width": 0.011402761191844059
28            }
29          ]
30        }
31      },
32      "functionalDescription": [
33        {
34          "isolationSide": "primary",
35          "name": "Primary",
36          "numberParallels": 1,
37          "numberTurns": 18,
38          "wire": {
39            "coating": {
40              "breakdownVoltage": 7400,
41              "grade": 3,
42              "type": "enamelled"
43            },
44            "conductingArea": {
45              "nominal": 0.000006632558684592654
46            }
47          }
48        }
49      ]
50    }
51  }
```

Comfortable and easy-to-use GUI

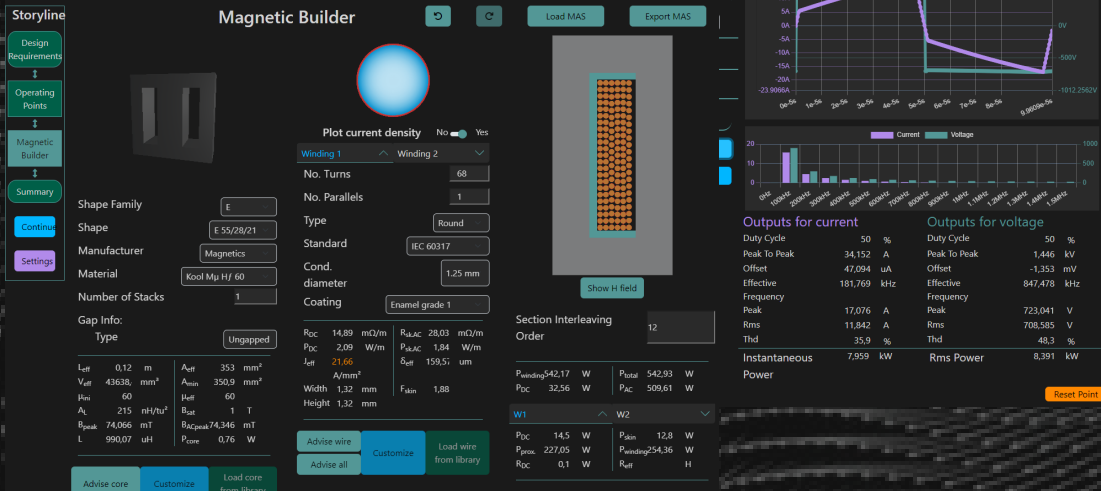
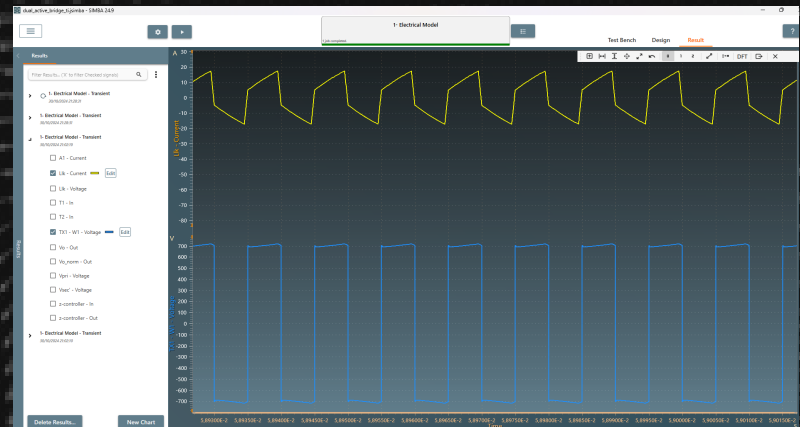
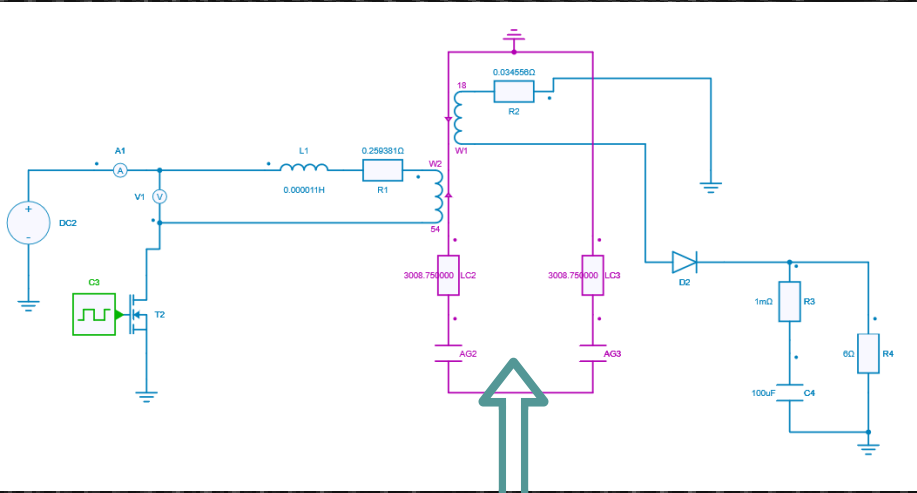
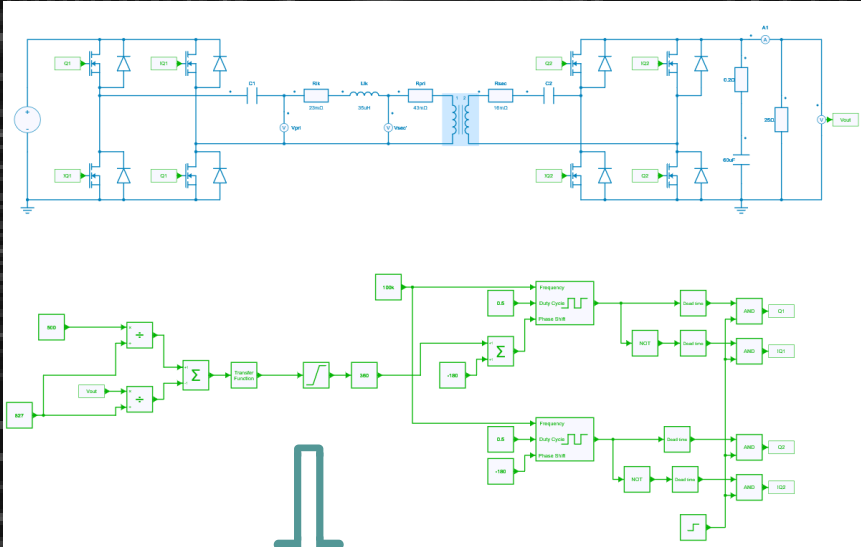


How to edit the winding, creating interleaving, and getting a simulation of the magnetic field inside the winding window

How to design a magnetic from scratch, requesting advise for core and wires, and changing the advised wire.

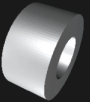


OM can be integrated with circuit simulators



And with Finite Elements Simulators

Previous tool



Shape
Material
Number of Stacks
Gap Info:
Type

T.20/10/10

3F46

1

Ungapped

L_{eff}	47.12 mm	A_{eff}	50 mm ²
V_{int}	2356.2 mm ³	A_{int}	50 mm ²
A_c	875	B_{sat}	0.45 T
B_{peak}	3.1 T	R_{Lpeak}	3.076 T
L	74.70 uH	P_{core}	25.29 kW

Advise core

Customize

Load core from library

Magnetic Builder



Plot current density
No Yes

W1

W2

No. Turns
No. Parallels
Type
Standard
Cond. diameter
Coating

8
2
Round
NEMA MW 1000 C
21 AWG
Enamel single build

R_{oc}	44.38 mQ/m	R_{ac}	51.34 mQ/m
P_{oc}	3.7 mW/m	P_{ac}	579.88 uW/m
J_{eff}	0.86 A/mm ²	S_{eff}	204.43 um
Width	757 um	F_{ac}	1.16
Height	757 um		

Windings Orientation
Section Alignment
Proportions
Section Interleaving
Primary section 0
Secondary section 0
Turns Alignment

Contiguous
Spread

W1 30 W2 70

12

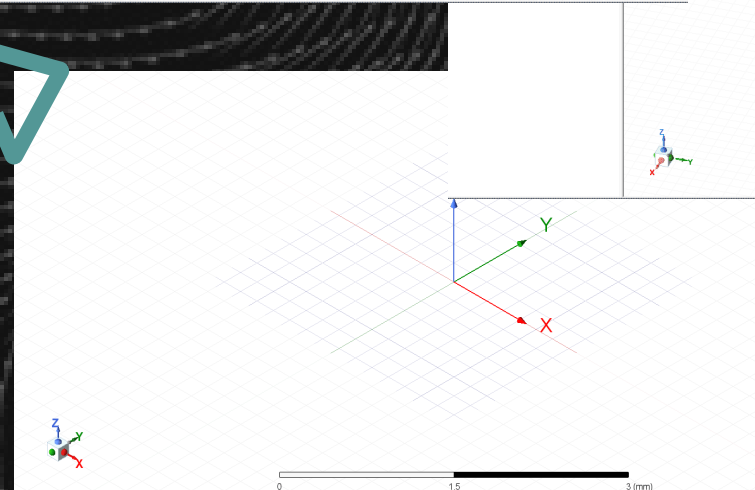
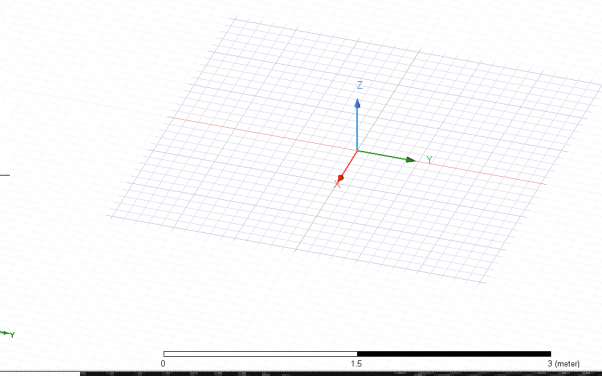
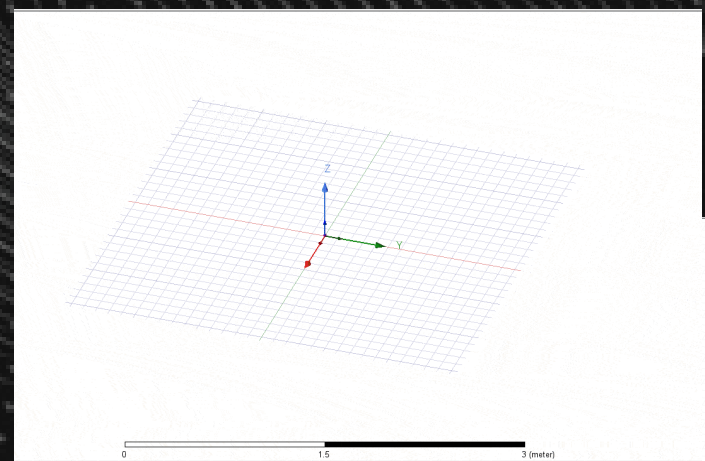
Centered

Advise wire

Customize

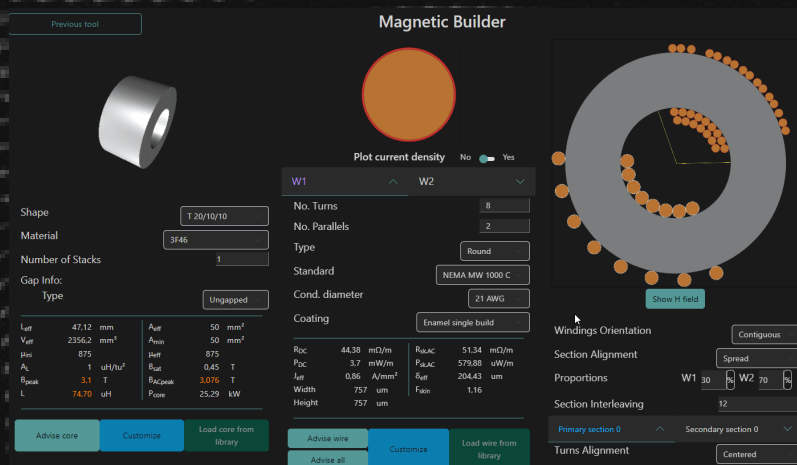
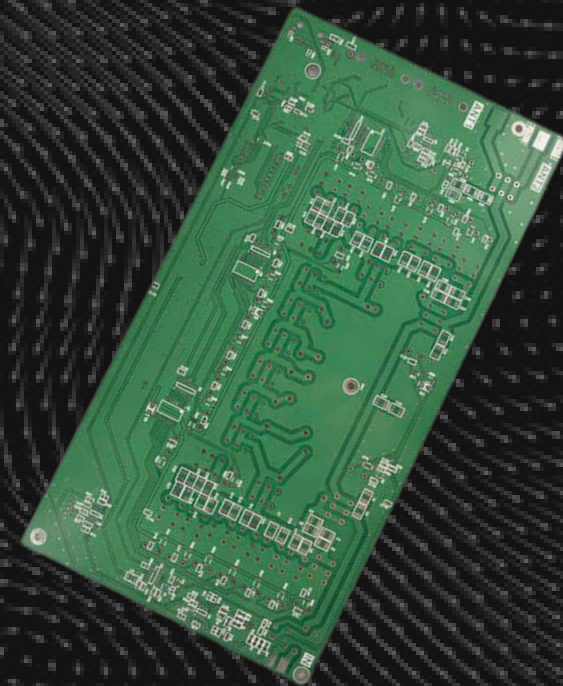
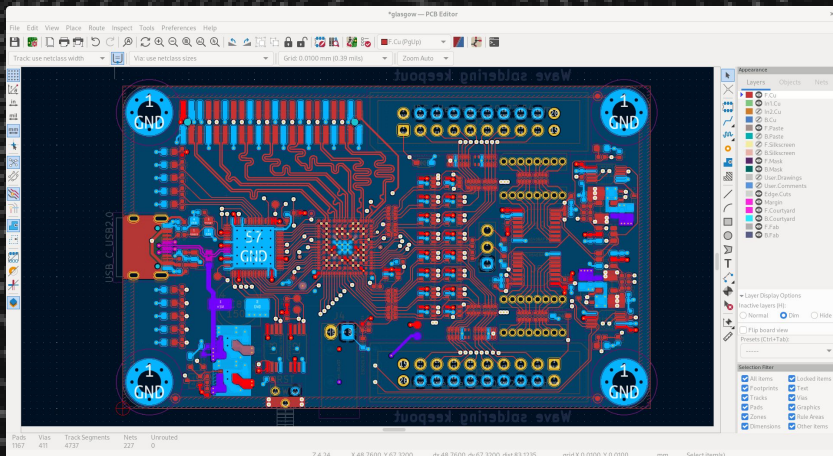
Load wire from library

Advise all

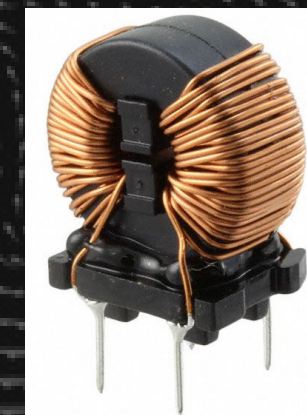


And with manufacturers!

Same way that you can order a PCB with a **gerber** or **ODB++** file



You can now order a magnetic with a **MAS** file



And with the PSMA!

Proposal: Have a new section in the Magnetics forum, with a simulation-free version of the tool, so anybody can use it to build their magnetics and use it with:

- CDX project
- Simba
- LtSpice
- Ansys
- OpenMagnetics
- Trafolo
- Ordering to manufacturers
- And more coming...

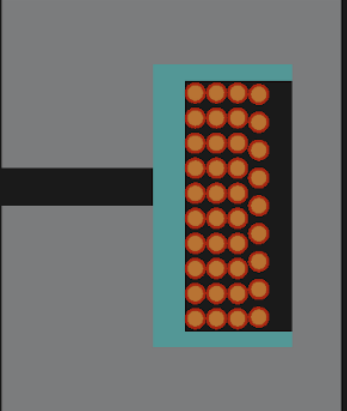
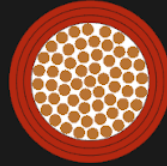
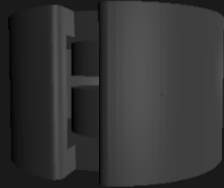
PSMA News Publications Resources Conferences Technical Forums Membership About PSMA
The multinational power electronics association Contact Log in

PSMA / Technical Forums / Magnetics / Workshop / Magnetics Forum

Magnetics Forum

Magnetics Info & Resources
for the Power Electronics Industry.

Introduction HF Task Force Magnetic Builder Resources Presentations Core Loss Studies Meeting Minutes Special Projects Workshop



Plot current density ☒ No ☐ Yes

No. Turns

No. Parallels

Type

Standard

Cond. diameter

Coating

No. Strands

Shape Family

Shape

Manufacturer

Material

Gap Info:

Type

Length

Section Interleaving Order

Turns Alignment

Windings Orientation

Section Alignment

Proportions W1

Top Margin

Bottom Margin

Questions?

Core losses

- 1991 - Roshen => "Ferrite Core Loss for Power Magnetic Components Design" and "A Practical, Accurate and Very General Core Loss Model for Nonsinusoidal Waveforms" by Waseem Roshen
- 1994 - Mulder => "Loss formulas for power ferrites and their use in transformer design" by S.A. Mulder
- 1996 - Albach => "Calculating Core Losses in Transformers for Arbitrary Magnetizing Currents A Comparison of Different Approaches" by Manfred Albach
- 2001 - MSE => "Calculation of Losses in Ferro- and Ferrimagnetic Materials Based on the Modified Steinmetz Equation" by Jürgen Reinert
- 2002 - iGSE => "Accurate Prediction of Ferrite Core Loss with Nonsinusoidal Waveforms Using Only Steinmetz Parameters" by Charles R. Sullivan
- 2004 - NSE => "Measurement and Loss Model of Ferrites with Non-sinusoidal Waveforms" by Alex Van den Bossche
- 2021 - Barg => "Core Loss Calculation of Symmetric Trapezoidal Magnetic Flux Density Waveform" by Sobhi Barg

Air gap reluctance

- 1978 - Partridge => Based on the method described in page 8-11 from "Transformer and Inductor Design Handbook Fourth Edition" by Colonel Wm. T. McLyman.
- 1997 - Balakrishnan => Based on "Air-gap reluctance and inductance calculations for magnetic circuits using a Schwarz-Christoffel transformation" by A. Balakrishnan.
- 2011 - Muehlethaler => Based on "A Novel Approach for 3D Air Gap Reluctance Calculations" by Jonas Mühlethaler.
- 2013 - Effective Area => Based on the method described in page 60 from "High-Frequency Magnetic Components, Second Edition" by Marian Kazimierczuk.
- 2013 - Effective Length => Based on the method described in page 60 from "High-Frequency Magnetic Components, Second Edition" by Marian Kazimierczuk.
- 2016 - Stenglein => Based on "The Reluctance of Large Air Gaps in Ferrite Cores" by Erika Stenglein.
- 2020 - Zhang => Based on "Improved Calculation Method for Inductance Value of the Air-Gap Inductor" by Xinsheng Zhang.

Stray capacitance

- 1946 - Duerdoth => Equivalent capacitances of transformer windings by W. T. Duerdoth
- 1968 - Koch => Berechnung der kapazität von spulen, insbesondere in schalenkernen by K. Koch
- 1997 - Massarini => Self-Capacitance of Inductors by Antonio Massarini
- 2017 - Albach => Induktivitäten in der Leistungselektronik: Spulen, Trafos und ihre parasitären Eigenschaften by Manfred Albach

Magnetic field

- 1963 - Binns-Lawrenson => Analysis and Computation of Electric and Magnetic Field Problems By Kenneth John Binns and P. J. Lawrenson
- 1966 - Lammeraner => Eddy currents by Jiří Lammeraner
- 2007 - Roshen => Fringing Field Formulas and Winding Loss Due to an Air Gap by Waseem A. Roshen
- 2017 - Albach => Induktivitäten in der Leistungselektronik: Spulen, Trafos und ihre parasitären Eigenschaften by Manfred Albach

Skin effect loss

- 1989 - Ferreira => A New Approach to Analyse Conduction Losses in High Frequency Magnetic Components by J.A. Ferreira
- 1995 - Lotfi => Two-Dimensional Skin Effect in Power Foils for High-Frequency Applications by Ashraf W. Lotfi
- 1998 - Kutkut => A Simple Technique to Evaluate Winding Losses Including Two-Dimensional Edge Effects by Nasser H. Kutkut
- 2021 - Payne => The Ac Resistance Of Rectangular Conductors by Alan Payne
- 2017 - Albach => Induktivitäten in der Leistungselektronik: Spulen, Trafos und ihre parasitären Eigenschaften by Manfred Albach
- 2018 - Wojda => Winding Resistance and Power Loss of Inductors With Litz and Solid-Round Wires by Rafal P. Wojda

Proximity effect loss

- 1966 - Lammeraner => Eddy currents by Jiří Lammeraner
- 1989 - Ferreira => A New Approach to Analyse Conduction Losses in High Frequency Magnetic Components by J.A. Ferreira
- 2011 - Rossmanith => Measurement and Characterization of High Frequency Losses in Nonideal Litz Wires by Hans Rossmanith
- 2017 - Albach => Induktivitäten in der Leistungselektronik: Spulen, Trafos und ihre parasitären Eigenschaften by Manfred Albach
- 2018 - Wang => Improved Analytical Calculation of High Frequency Winding Losses in Planar Inductors by Xiaohui Wang

Gestion thermique des composants SiC et GaN — Contraintes

PowerAlps



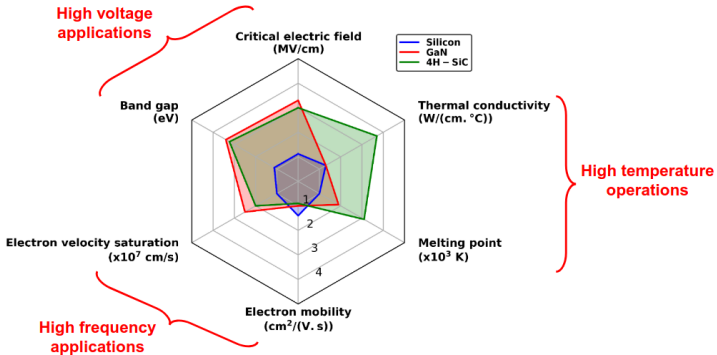
Cyril BUTTAY
Laboratoire Ampère, Lyon, France

Les composants WBG

Matériaux "grands gaps" (WBG)

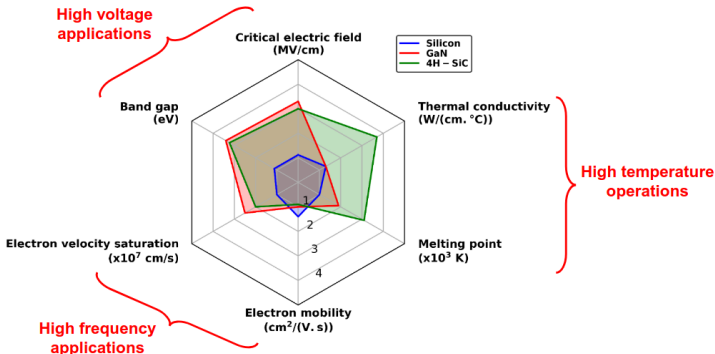
Confusion fréquente entre diverses propriétés des WBG et leurs effets

- Conductivité thermique
- Point de fusion
- Mobilité électronique
- Largeur de bande interdite



Source: Thèse F. Rigaud-Minet [1], d'après Levinshtein, Rumyantsev et al.

Matériaux "grands gaps" (WBG)



Confusion fréquente entre diverses propriétés des WBG et leurs effets

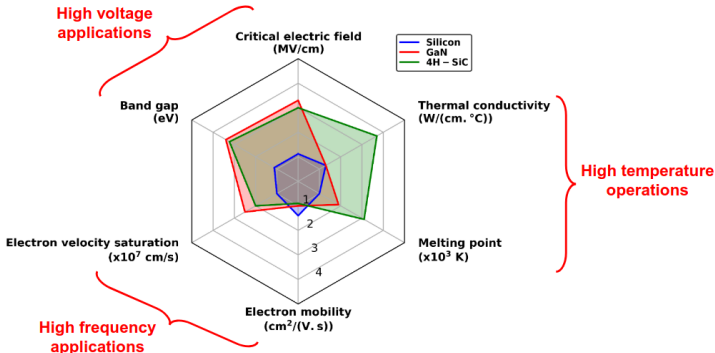
- Conductivité thermique
- Point de fusion
- Mobilité électronique
- Largeur de bande interdite

Conclusion classique:

flux de chaleur à dissiper plus élevé pour les WBG

Source: Thèse F. Rigaud-Minet [1], d'après Levinshtein, Rumyantsev et al.

Matériaux "grands gaps" (WBG)



Confusion fréquente entre diverses propriétés des WBG et leurs effets

- Conductivité thermique
- Point de fusion
- Mobilité électronique
- Largeur de bande interdite

Conclusion classique:

flux de chaleur à dissiper plus élevé pour les WBG

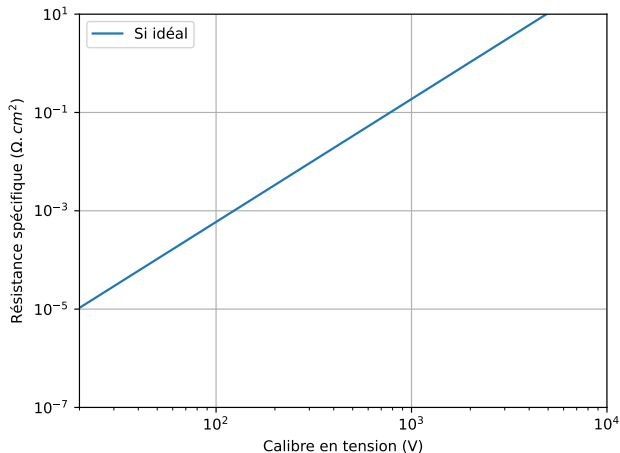
→ est-ce toujours vrai?

Source: Thèse F. Rigaud-Minet [1], d'après Levinshtein, Rumyantsev et al.

Résistance spécifique (composants unipolaires)



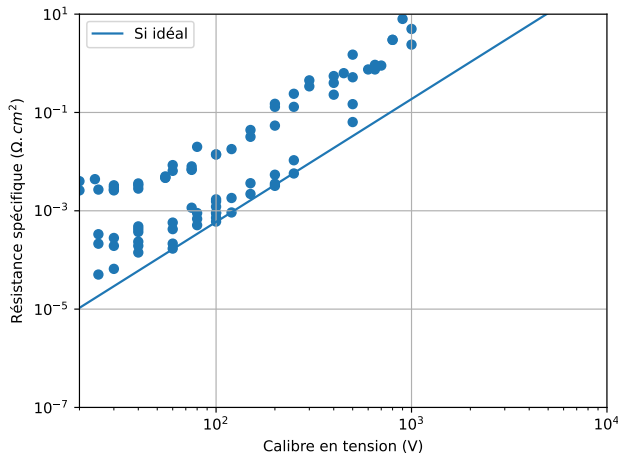
- Courbes “théoriques” basées sur la résistivité de la zone de *drift*
- Avantage clair des matériaux WBG
- **Mais** différence moins nette pour les composants réels (maturité et structure)



Résistance spécifique (composants unipolaires)



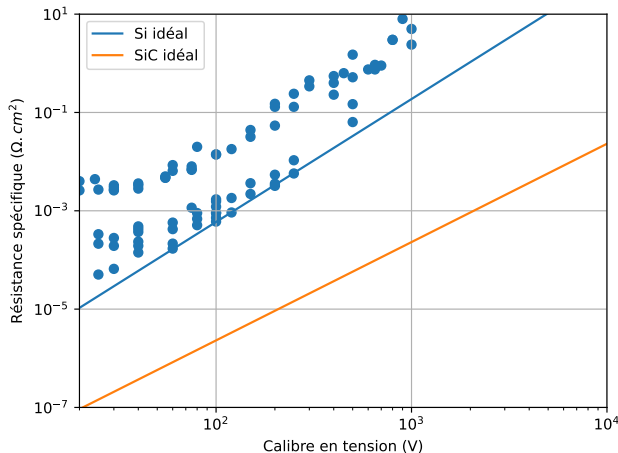
- Courbes “théoriques” basées sur la résistivité de la zone de *drift*
- Avantage clair des matériaux WBG
- **Mais** différence moins nette pour les composants réels (maturité et structure)



Résistance spécifique (composants unipolaires)



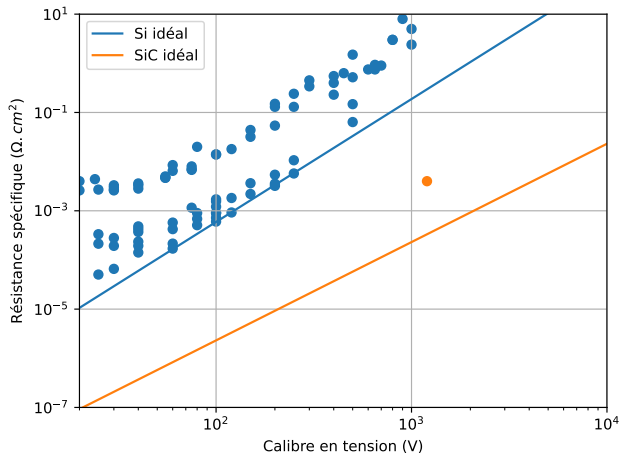
- Courbes “théoriques” basées sur la résistivité de la zone de *drift*
- Avantage clair des matériaux WBG
- **Mais** différence moins nette pour les composants réels (maturité et structure)



Résistance spécifique (composants unipolaires)



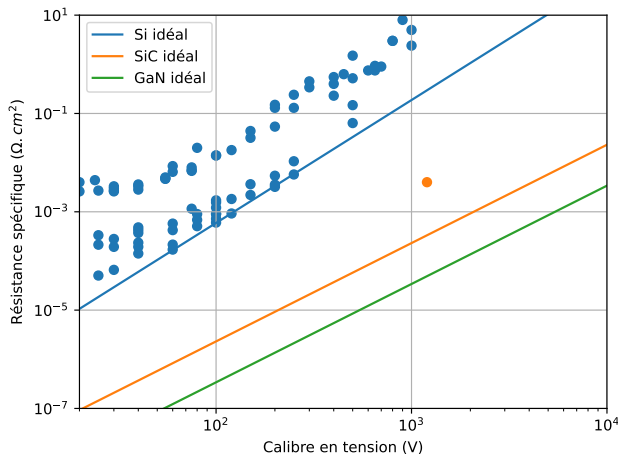
- Courbes “théoriques” basées sur la résistivité de la zone de *drift*
- Avantage clair des matériaux WBG
- **Mais** différence moins nette pour les composants réels (maturité et structure)



Résistance spécifique (composants unipolaires)



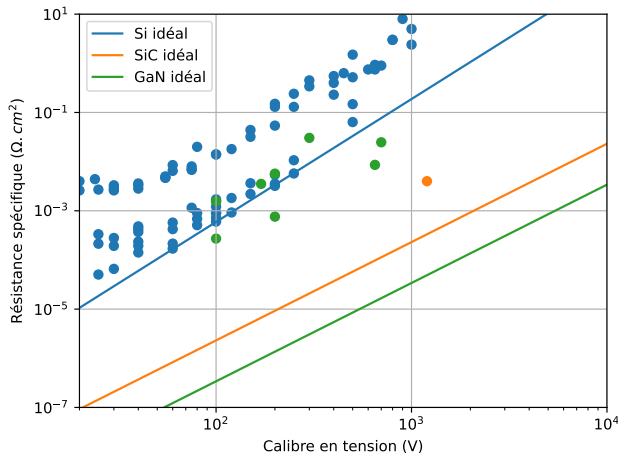
- Courbes “théoriques” basées sur la résistivité de la zone de *drift*
- Avantage clair des matériaux WBG
- **Mais** différence moins nette pour les composants réels (maturité et structure)



Résistance spécifique (composants unipolaires)



- Courbes “théoriques” basées sur la résistivité de la zone de *drift*
- Avantage clair des matériaux WBG
- **Mais** différence moins nette pour les composants réels (maturité et structure)

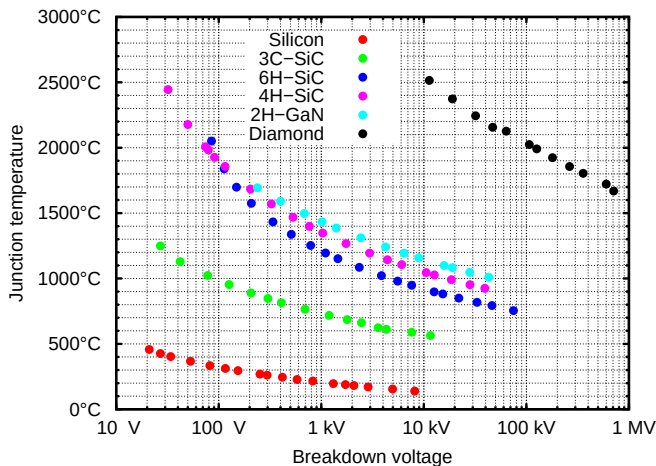


Source: courbes B. J. Baliga [2] et Thèse F. Rigaud-Minet [1], points MOSFETs Si: Julien Brunello, Jeremy Bourdon

Comportement en température

Limite supérieure en température:

- Les composants WBG peuvent fonctionner à T_J très élevées
- Mais T_{case} limité (150-175 → 200 °C)



Comportement en température

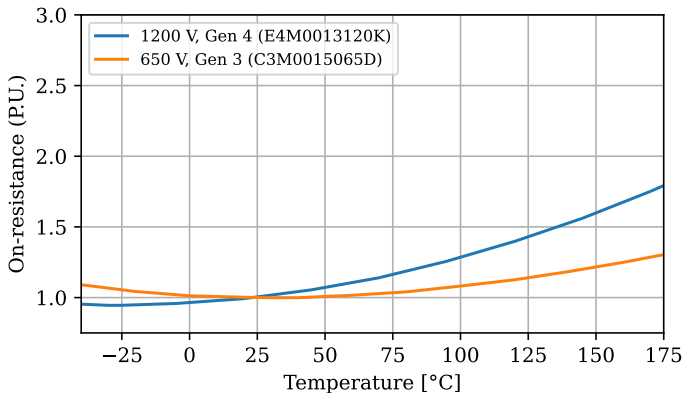


Limite supérieure en température:

- Les composants WBG peuvent fonctionner à T_J très élevées
- Mais T_{case} limité (150-175 → 200 °C)

En pratique, performance affectées par T_J

- Faiblement pour certains



Source: relevés tecplot sur datasheets des composants

Comportement en température

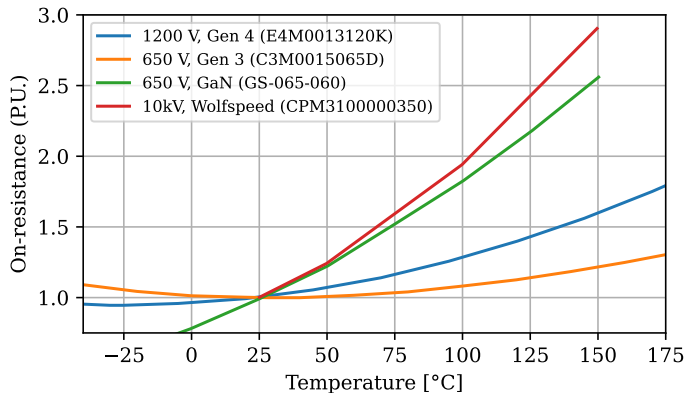


Limite supérieure en température:

- Les composants WBG peuvent fonctionner à T_J très élevées
- Mais T_{case} limité (150-175 → 200 °C)

En pratique, performance affectées par T_J

- Faiblement pour certains
- Beaucoup pour d'autres!



Source: relevés tecplot sur datasheets des composants

Comportement en température

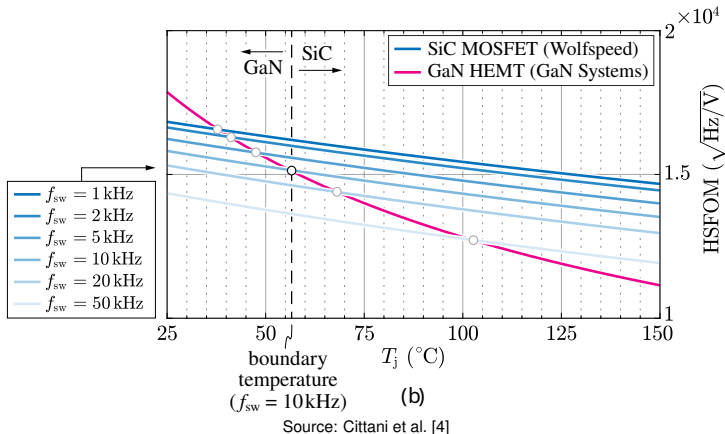
Limite supérieure en température:

- Les composants WBG peuvent fonctionner à T_J très élevées
- Mais T_{case} limité (150-175 → 200 °C)

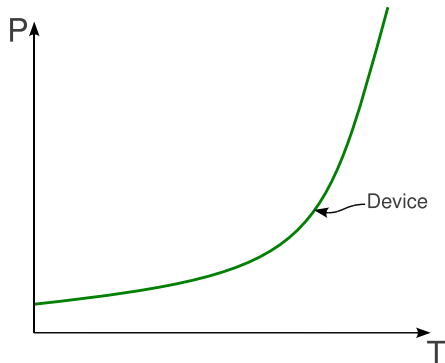
En pratique, performance affectées par T_J

- Faiblement pour certains
- Beaucoup pour d'autres!

À considérer dans les choix!



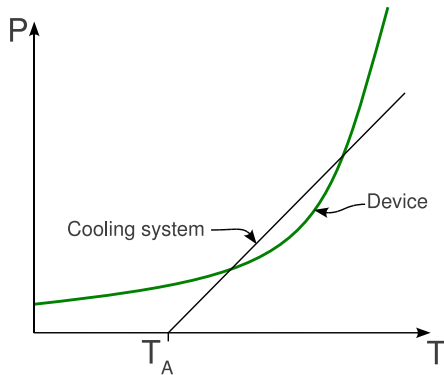
Comportement en température – Emballlement ^[5, 6]



Mécanique de l'emballement:

- La caractéristique du composant (conduction seule)

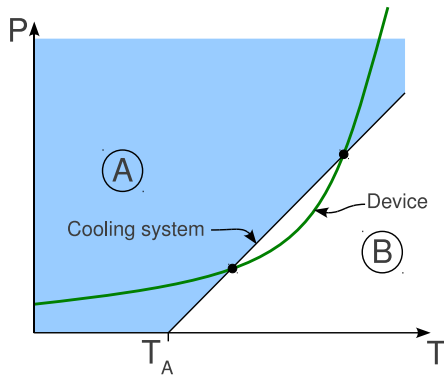
Comportement en température – Emballlement [5, 6]



Mécanique de l'emballement:

- La caractéristique du composant (conduction seule)
- Celle de son système de refroidissement

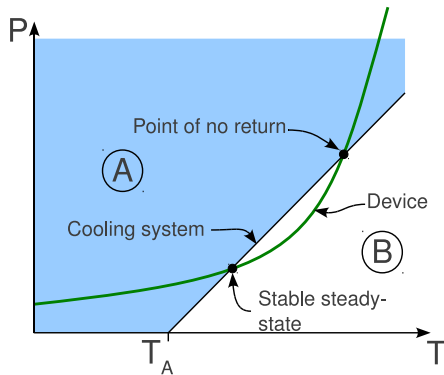
Comportement en température – Emballlement [5, 6]



Mécanique de l'emballement:

- La caractéristique du composant (conduction seule)
- Celle de son système de refroidissement

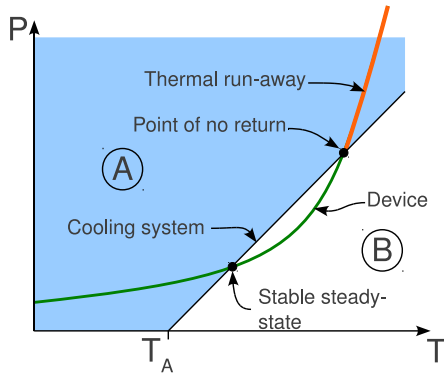
Comportement en température – Emballement [5, 6]



Mécanique de l'emballement:

- La caractéristique du composant (conduction seule)
- Celle de son système de refroidissement
- Deux points d'équilibre: un stable, un instable

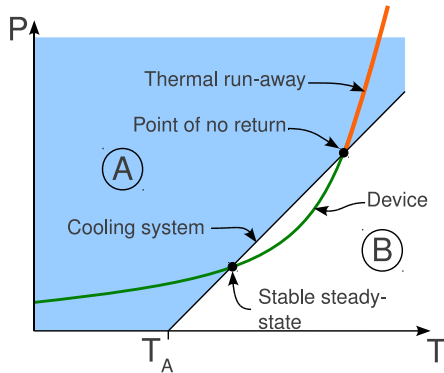
Comportement en température – Emballement [5, 6]



Mécanique de l'emballement:

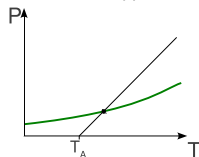
- La caractéristique du composant (conduction seule)
- Celle de son système de refroidissement
- Deux points d'équilibre: un stable, un instable
- Au delà du point instable: emballement

Comportement en température – Emballement [5, 6]



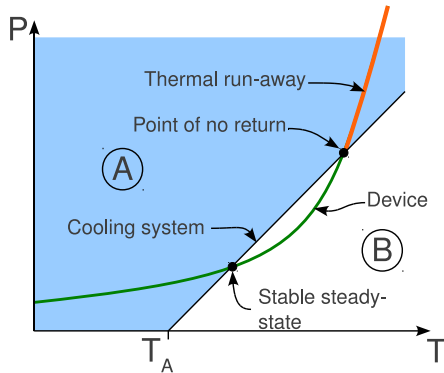
Mécanique de l'emballement:

- La caractéristique du composant (conduction seule)
- Celle de son système de refroidissement
- Deux points d'équilibre: un stable, un instable
- Au delà du point instable: emballement



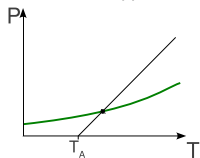
Toujours
stable

Comportement en température – Emballement [5, 6]

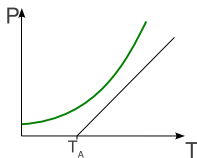


Mécanique de l'emballement:

- La caractéristique du composant (conduction seule)
- Celle de son système de refroidissement
- Deux points d'équilibre: un stable, un instable
- Au delà du point instable: emballement

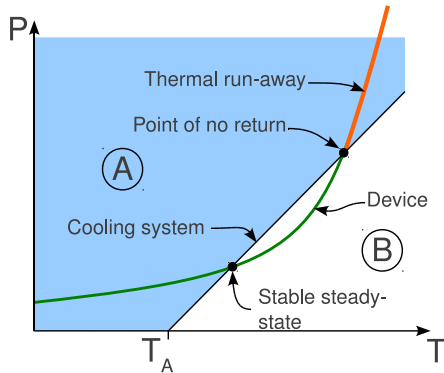


Toujours stable



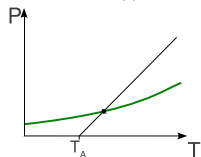
Jamais stable

Comportement en température – Emballement [5, 6]

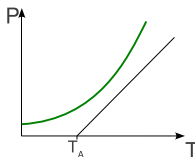


Mécanique de l'emballement:

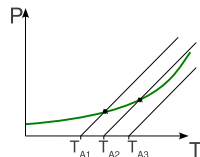
- La caractéristique du composant (conduction seule)
- Celle de son système de refroidissement
- Deux points d'équilibre: un stable, un instable
- Au delà du point instable: emballement



Toujours stable



Jamais stable



Effet de T_A

- Les composants WBG ont de très bonnes propriétés physiques

- Les composants WBG ont de très bonnes propriétés physiques
- Les performances pratiques peuvent être loin de la théorie
(les composants WBG restent intéressants, notamment en fréquence!)

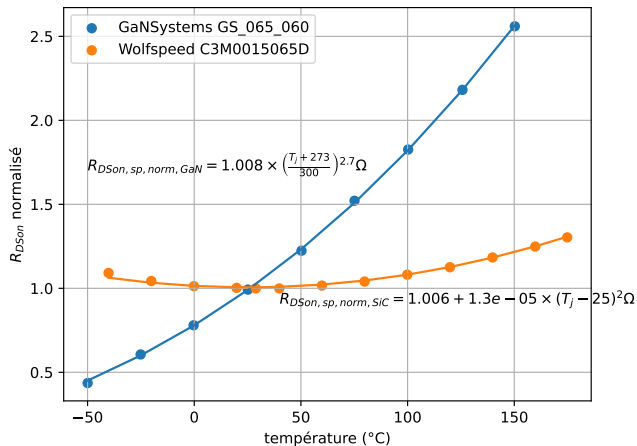
- Les composants WBG ont de très bonnes propriétés physiques
- Les performances pratiques peuvent être loin de la théorie
(les composants WBG restent intéressants, notamment en fréquence!)
- Leur température de fonctionnement reste limitée en pratique à $\leq 200^{\circ}\text{C}$

- Les composants WBG ont de très bonnes propriétés physiques
- Les performances pratiques peuvent être loin de la théorie
(les composants WBG restent intéressants, notamment en fréquence!)
- Leur température de fonctionnement reste limitée en pratique à $\leq 200^{\circ}\text{C}$
- L'évolution des pertes en conduction avec T_J varie très fortement entre composants

- Les composants WBG ont de très bonnes propriétés physiques
 - Les performances pratiques peuvent être loin de la théorie (les composants WBG restent intéressants, notamment en fréquence!)
 - Leur température de fonctionnement reste limitée en pratique à $\leq 200^{\circ}\text{C}$
 - L'évolution des pertes en conduction avec T_J varie très fortement entre composants
- ➔ **Quels sont donc les besoins de refroidissement des composants WBG?**

Densité de flux de chaleur et refroidissement

Comparaison de deux composants



2 composants 650 V:

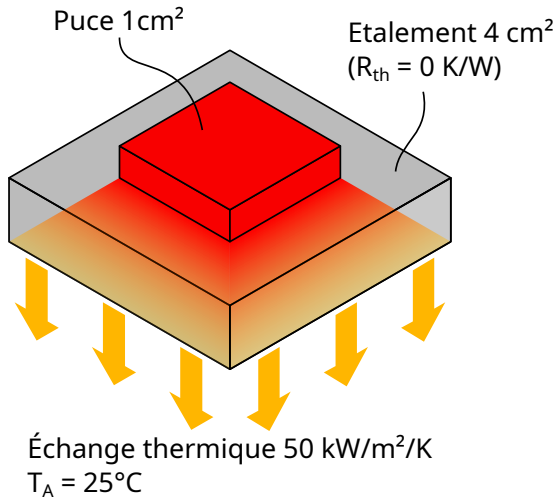
- 1 composant GaN,
 $R_{DS(on),sp} = 10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$
- 1 composant SiC,
 $R_{DS(on),sp} = 3 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$

Identification de la dépendance
 $R_{DS(on),sp}(T)$

Comparaison de deux composants – Suite

Calcul de R_{th} pour garder $T_J < T_{Jmax}$

- $R_{th} = 0.05 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$
(très bon refroidissement)

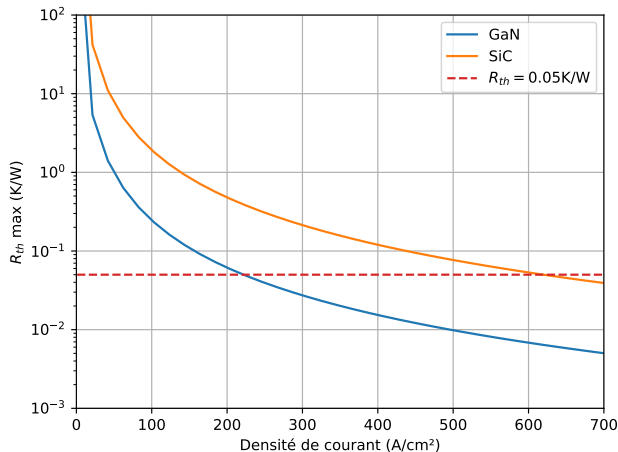


Comparaison de deux composants – Suite



Calcul de R_{th} pour garder $T_J < T_{Jmax}$

- $R_{th} = 0.05 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$
(très bon refroidissement)
- densité de courant max. triple
pour le SiC



Comparaison de deux composants – Suite

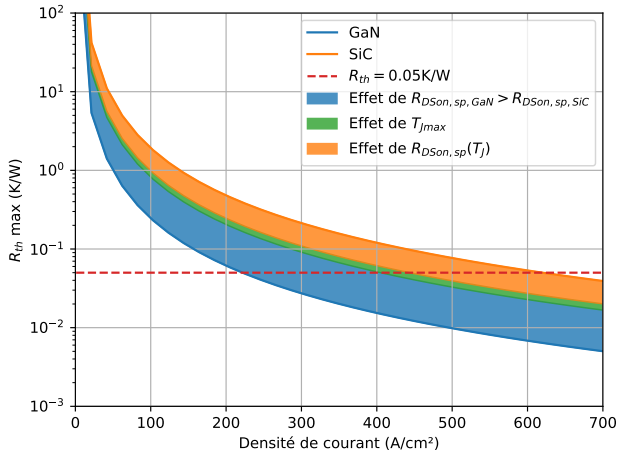


Calcul de R_{th} pour garder $T_J < T_{Jmax}$

- $R_{th} = 0.05 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$
(très bon refroidissement)
- densité de courant max. triple pour le SiC

3 éléments pénalisent le cas GaN:

- Plus forte résistance spécifique ($10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ vs $3 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$)
- Plus faible T_{Jmax} (150 vs 175 °C)
- Forte dépendance $R_{DSon,sp}(T_J)$



Comparaison de deux composants – Suite



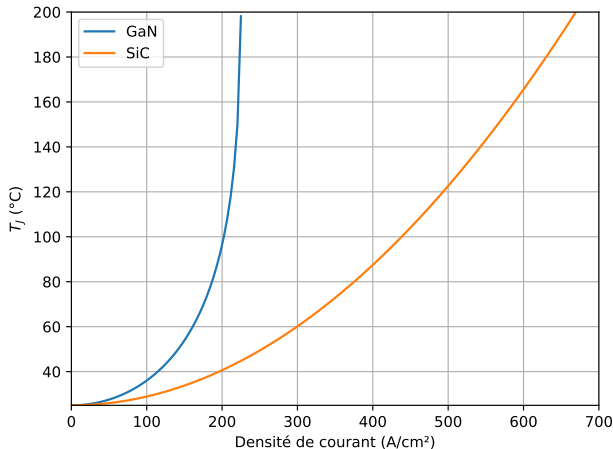
Calcul de R_{th} pour garder $T_J < T_{Jmax}$

- $R_{th} = 0.05 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$
(très bon refroidissement)
- densité de courant max. triple pour le SiC

3 éléments pénalisent le cas GaN:

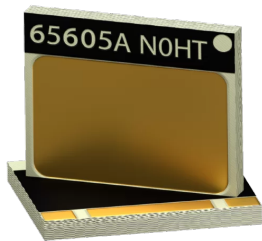
- Plus forte résistance spécifique ($10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ vs $3 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$)
- Plus faible T_{Jmax} (150 vs 175 °C)
- Forte dépendance $R_{DSon,sp}(T_J)$

Cas GaN proche de l'emballage à
 $J = 200 \text{ A} \cdot \text{cm}^2$, $T_J = 100 \text{ °C}$

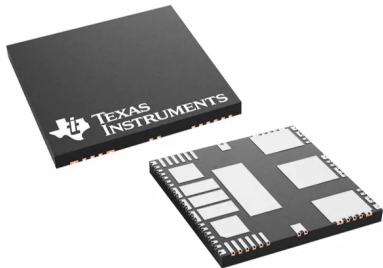


Conséquences sur les différents composants

Cas des composants GaN (HeMT)

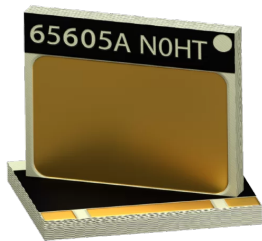


- Sont extrêmement rapides
 - Ont un faible V_{th} , ne supportent pas l'avalanche
 - Sont utilisés à F_{sw} élevé (MHz)
- **Forte influence des éléments circuit parasites**
- Besoin d'un packaging très compact



Source: [GanSystems](#) (haut) [Texas Instruments](#) (bas)

Cas des composants GaN (HeMT)



- Sont extrêmement rapides
- Ont un faible V_{th} , ne supportent pas l'avalanche
- Sont utilisés à F_{sw} élevé (MHz)
- **Forte influence des éléments circuit parasites**
 - Besoin d'un packaging très compact
- R_{DSon} très sensible à T_J
- Flux de chaleur comparable au Si ($2\text{--}300 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)
(à l'échelle de la puce, bien plus fort localement)
- Refroidissement limité
Composants latéraux, substrat Si, montage PCB

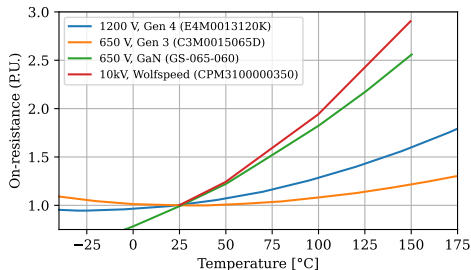
→ **Besoin d'un système de refroidissement compact**

Source: [GaNSystems](#) (haut) [Texas Instruments](#) (bas)

Cas des composants SiC haute tension (≥ 3.3 kV)



- R_{DSon} très sensible à la température (dominé par la résistance de drift)
- Coût des puces élevé (100s d'€)
- F_{sw} modérée (dizaine de kHz)
 - ➔ Les inductances parasites ne sont pas critiques (attention aux capas!)



Cas des composants SiC haute tension (≥ 3.3 kV)

- R_{DSon} très sensible à la température (dominé par la résistance de drift)
- Coût des puces élevé (100s d'€)
- F_{sw} modérée (dizaine de kHz)
 - Les inductances parasites ne sont pas critiques (attention aux capas!)
- taille du boîtier dictée par les distances d'isolement.
- Besoin d'une gestion thermique très performante
- **Problème principal: gérer simultanément isolation électrique et refroidissement.**

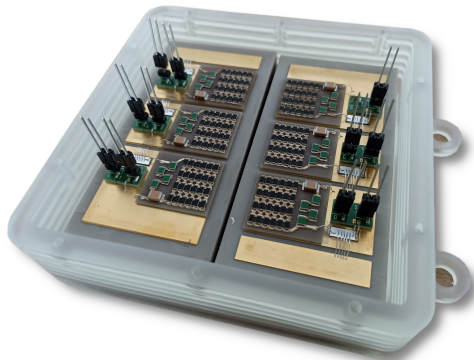


Photo: Projet ARCHIVE, SuperGrid Institute,
puces fonctionnant à $> 400 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$

Cas des composants SiC 650–1200 V



Les plus souples (thermiquement):

- Faible sensibilité à T_J
- ➔ Peuvent fonctionner efficacement à T_{Jmax} , avec des flux jusqu'à $1 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$
- Suivant la topologie, les parasites circuit peuvent avoir une influence limitée (ou pas!)
- L'inductance du circuit de grille est moins critique qu'avec le GaN

Cas des composants SiC 650–1200 V



Les plus souples (thermiquement):

- Faible sensibilité à T_J
- Peuvent fonctionner efficacement à T_{Jmax} , avec des flux jusqu'à $1 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$
- Suivant la topologie, les parasites circuit peuvent avoir une influence limitée (ou pas!)
- L'inductance du circuit de grille est moins critique qu'avec le GaN

Plus de solutions *packaging*:

- Modules
- IPM (modules avec drivers)
- Composants discrets
- Enfouissement PCB

Conclusion



- Les composants WBG ont des besoins spécifiques en *packaging* et refroidissement

Conclusion



- Les composants WBG ont des besoins spécifiques en *packaging* et refroidissement
- Faibles parasites circuits nécessaires (inductance **et** capacité)
 - Vrai pour le SiC, mais surtout pour le GaN (faible $C_{oss,iss,rss}$, faible immunité)

- Les composants WBG ont des besoins spécifiques en *packaging* et refroidissement
- Faibles parasites circuits nécessaires (inductance **et** capacité)
 - Vrai pour le SiC, mais surtout pour le GaN (faible $C_{oss,iss,rss}$, faible immunité)
- Les densités de puissance sont surtout fortes pour le SiC
 - En particulier pour les composants 650–1200 V plus stables thermiquement.
 - Pour les composants haute tension, dégradation des performances à fort T_J

- Les composants WBG ont des besoins spécifiques en *packaging* et refroidissement
- Faibles parasites circuits nécessaires (inductance **et** capacité)
 - Vrai pour le SiC, mais surtout pour le GaN (faible $C_{oss,iss,rss}$, faible immunité)
- Les densités de puissance sont surtout fortes pour le SiC
 - En particulier pour les composants 650–1200 V plus stables thermiquement.
 - Pour les composants haute tension, dégradation des performances à fort T_J
- Dans tous les cas, un refroidissement efficace est nécessaire
 - **GaN**: pour maintenir T_J faible à densité de flux de chaleur comparable au Si
 - **SiC 650 et 1200 V**: pour exploiter les puces au mieux (densité de flux $\leq 1000 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)
 - **SiC HT**: maintenir $T_J \leq 100^\circ\text{C}$, **et** exploiter les puces au mieux

- [1] F. Rigaud-Minet, *Experimental and simulation study of GaN device size limitations for high efficiency power converters*.
Theses, INSA de Lyon, Mar. 2023.
- [2] B. J. Baliga, *Fundamentals of power semiconductor devices*.
Springer Science & Business Media, 2010.
- [3] C. Raynaud, D. Tournier, H. Morel, and D. Planson, "Comparison of high voltage and high temperature performances of wide bandgap semiconductors for vertical power devices," *Diamond and Related Materials*, vol. 19, no. 1, pp. 1–6, 2010.
- [4] D. Cittanti, E. Vico, and I. R. Bojoi, "New fom-based performance evaluation of 600/650 v sic and gan semiconductors for next-generation ev drives," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 51693–51707, 2022.

- [5] C. Buttay, C. Raynaud, H. Morel, G. Civrac, M.-L. Locatelli, and F. Morel, “Thermal Stability of Silicon Carbide Power Diodes,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 59, no. 3, pp. 761–769, 2012.
- [6] C. Buttay, R. Ouaida, H. Morel, D. Bergogne, C. Raynaud, and F. Morel, “Thermal Stability of Silicon Carbide Power JFETs,” *IEEE transactions on Electron Devices*, vol. 60, pp. 4191–4198, Dec. 2013.

Merci pour votre attention

cyril.buttay@insa-lyon.fr



Université Claude Bernard



Lyon 1



Isolation électrique des modules de puissance

Marie-Laure LOCATELLI
Chargée de Recherche CNRS

PowerAlps – Journées de cloture du CDP Electronique de Puissance.
09-10 septembre 2025. Centre Minatec, Grenoble.

Sommaire

1. Evolutions des besoins en terme d'isolation des modules de puissance

- A. Système d'isolation du module de puissance isolé
- B. Nouveaux besoins, nouvelles contraintes

2. Le système d'isolation de la structure conventionnelle

- A. Le choix des matériaux
- B. Les limitations associées

3. Des voies de progrès explorées

- A. Focus sur les limitations sous fort champ électrique liées au gel silicone
- B. Voies d'amélioration pour la montée en tension
- C. Contraintes de soutenabilité

Sommaire

1. Evolutions des besoins en terme d'isolation des modules de puissance

- A. Système d'isolation du module de puissance isolé
- B. Nouveaux besoins, nouvelles contraintes

2. Le système d'isolation de la structure conventionnelle

- A. Le choix des matériaux
- B. Les limitations associées

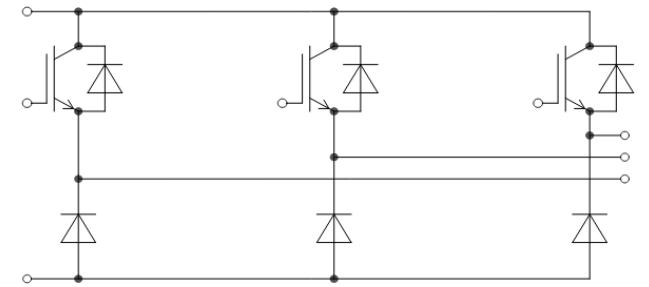
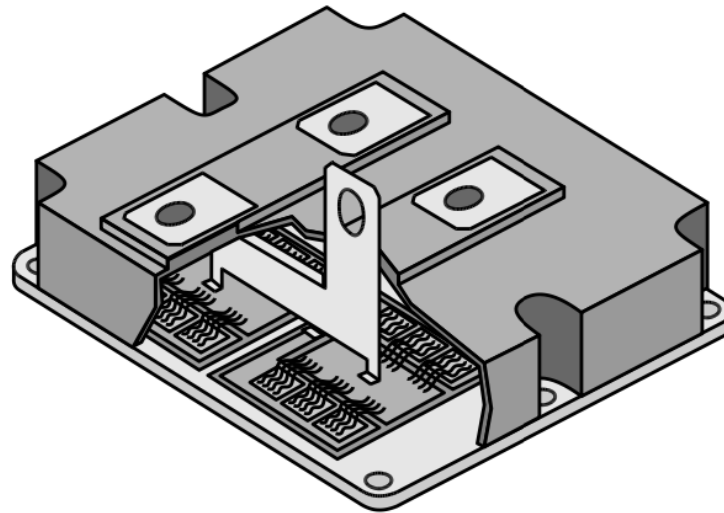
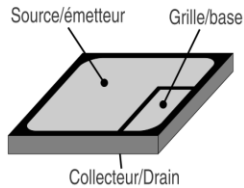
3. Des voies de progrès explorées

- A. Focus sur les limitations sous fort champ électrique liées au gel silicone
- B. Voies d'amélioration pour la montée en tension
- C. Contraintes de soutenabilité

Evolutions des besoins en terme d'isolation

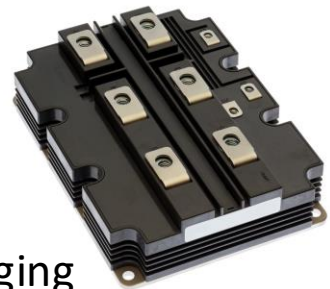
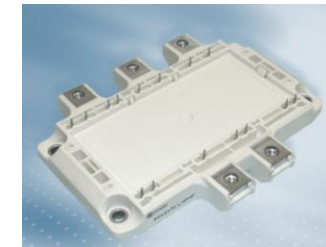
Module de puissance isolé : description

Assemblage de **plusieurs puces** assurant la fonction d'un seul interrupteur ou de plusieurs interrupteurs pour réaliser une partie ou la totalité de la fonction de conversion



Structure conventionnelle

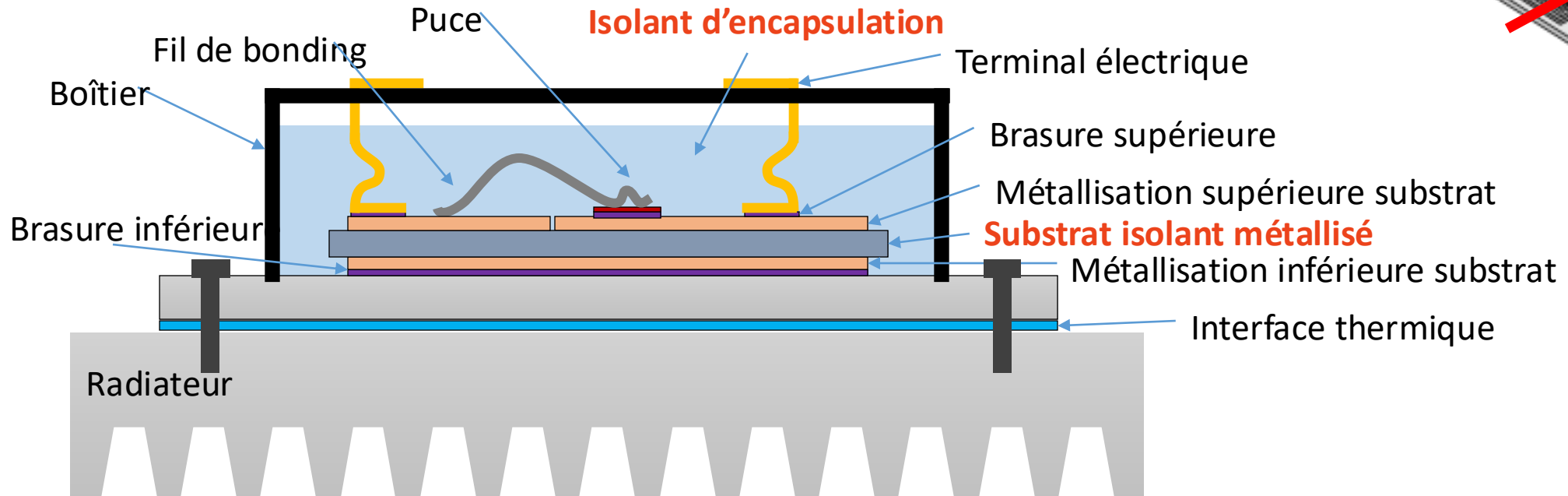
- ✓ Tensions : 600 V jusqu'à 6,5 kV
- ✓ Courants : 50 A jusqu'à 3,6 kA
- ✓ Dim. de qq cm de coté à 20 x 15 x 5 cm (A5)



Différents types de packaging selon les fabricants

Evolutions des besoins en terme d'isolation

Module de puissance isolé conventionnel : matériaux du système d'isolation



NB : Choix de chaque élément (matériau et géométrie) a un impact sur de nombreuses caractéristiques :

- > électriques, thermiques, thermo-mécaniques, chimiques ... couplées
- > pour des conditions d'usage (U, I, f, T), normes, réglementations, mise en œuvre, coûts, donnés !

Evolutions des besoins en terme d'isolation

Evolutions des besoins et conséquences sur le système d'isolation du module de puissance

Cahier des charges au niveau du système / module :

- 'Classiquement' :
*Puissance (U , I , dissipation thermique, T),
Rendement (faibles pertes),
Fiabilité, coûts ...*
- Plus récemment :
Compacité (poids, volume, U , f , densité de puissance)
- Depuis l'émergence des puces à semi-conducteur à grand gap :
Réduction des impédances parasites (dv/dt , di/dt , U , f)
- Plus récemment encore :
Soutenabilité

Contraintes sur le système d'isolation

Champs électriques élevés
(haute tension et réduction
des dimensions)

Dissipation thermique
Tenue en température

Durabilité,
recyclabilité,
...



Evolution des besoins en terme d'isolation

Revue récente de modules de puissance avec composants SiC haute tension

3,3 kV

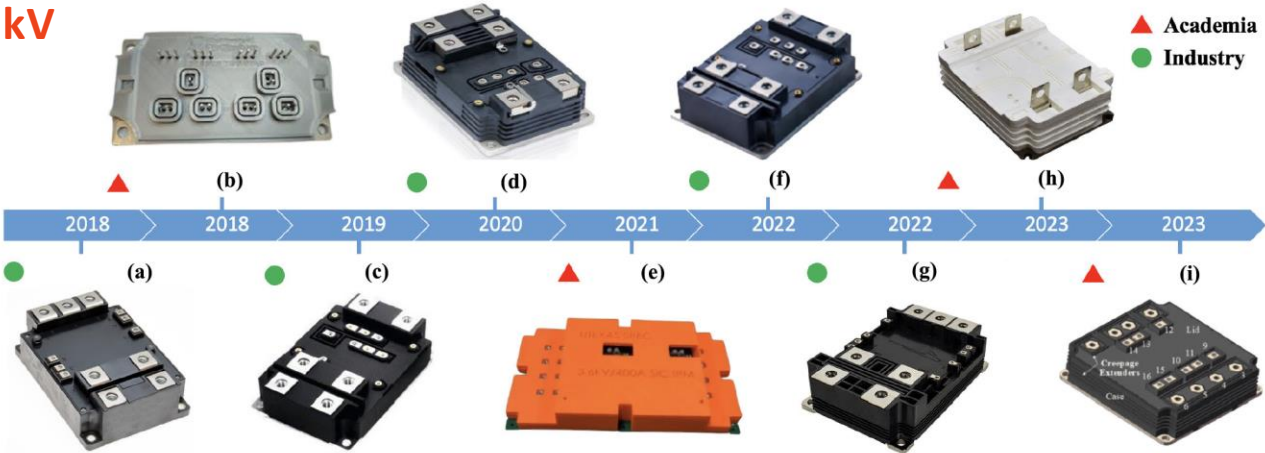


Fig. 1. 3.3-kV SiC modules from different affiliations (dimensions are not to scale, and the year listed refers to the publication time, which may not reflect the earliest availability of the module). (a) Mitsubishi LV100. (b) Hitachi nHPD². (c) U of Nottingham. (d) ABB LinPAK. (e) UT Austin. (f) Fuji HPnC. (g) Wolfspeed LM3. (h) Stony Brook XHP. (i) U of Arkansas.

6-7 kV

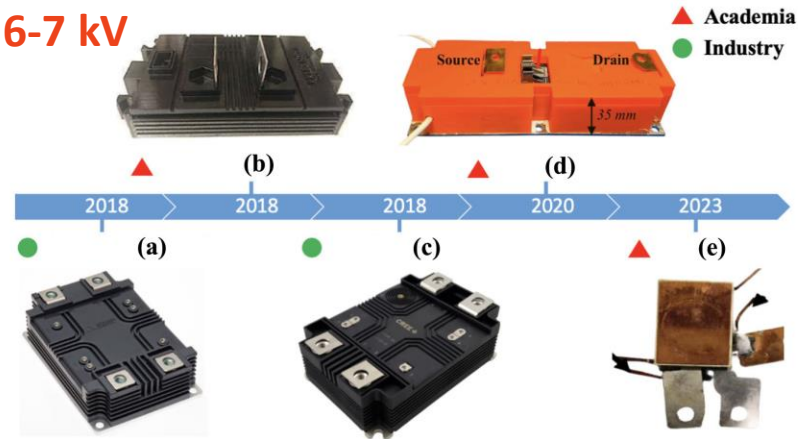
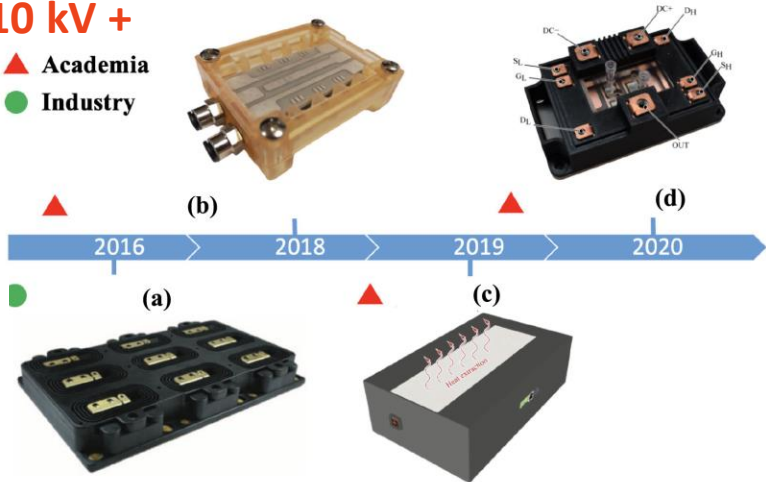


Fig. 8. 6-/6.5-/7-kV SiC modules from different institutions (dimensions are not to scale, and the year listed refers to the publication time, which may not reflect the earliest availability of the module). (a) Mitsubishi HV100. (b) NCSU SCPM E3. (c) Wolfspeed XHV-7. (d) UT Austin. (e) XJTU.

Li et al. *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY*, VOL. 14, NO. 12, DECEMBER 2024

Fig. 12. SiC modules of 10 kV and above from different institutions (dimensions are not to scale, and the year listed refers to the publication time, which may not reflect the earliest availability of the module). (a) Wolfspeed XHV-6. (b) U of Nottingham and Virginia Tech. (c) ETH Zürich. (d) Aalborg University.

10 kV +



Plus compacts
Inductance parasite faible
Capacité faible

Sommaire

1. Evolutions des besoins en terme d'isolation des modules de puissance

- A. Système d'isolation du module de puissance isolé
- B. Nouveaux besoins, nouvelles contraintes

2. Le système d'isolation de la structure conventionnelle

- A. Le choix des matériaux
- B. Les limitations associées

3. Des voies de progrès explorées

- A. Focus sur les limitations sous fort champ électrique liées au gel silicone
- B. Voies d'amélioration pour la montée en tension
- C. Contraintes de soutenabilité

Le système d'isolation de la structure conventionnelle

La fonction de substrat isolant métallisé

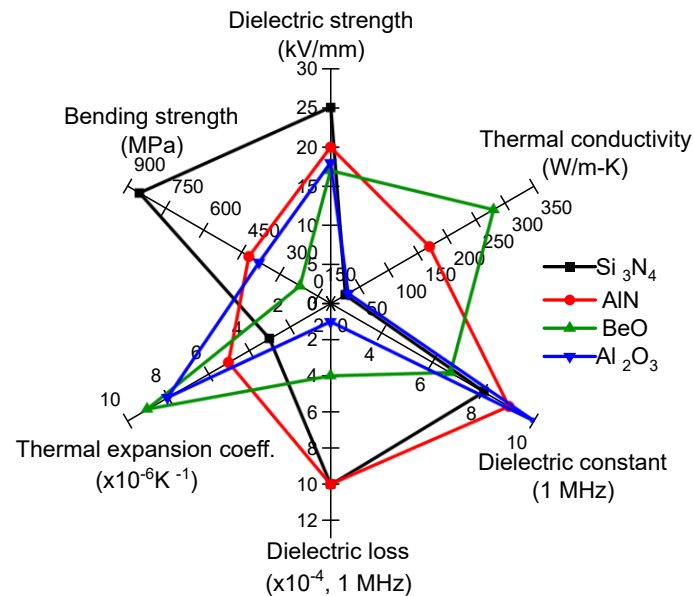
- **Rôles:**

Support mécanique, Interconnexion électrique et Isolation électrique
+ Transfert thermique

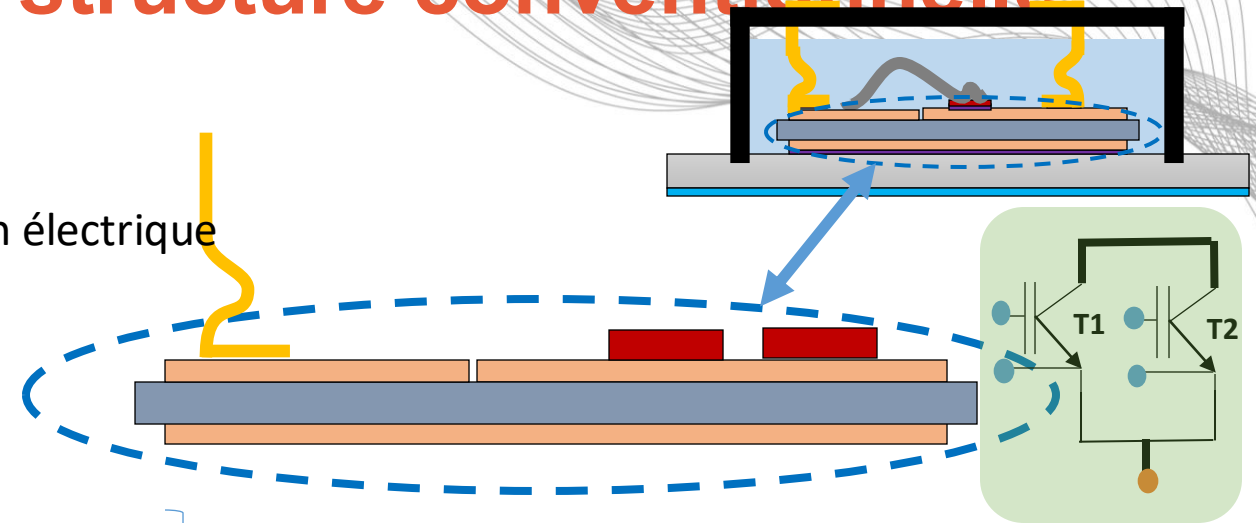
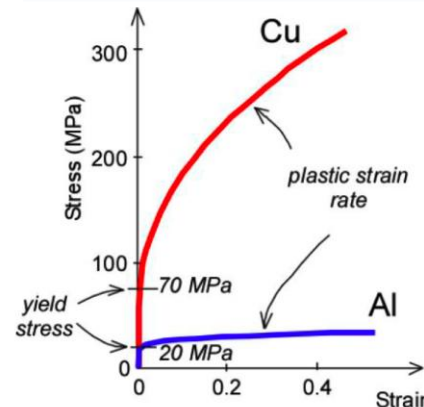
- **Matériaux choisis pour cet assemblage:**

- Conducteur -> métal : **Al, Cu**
- Isolant -> céramique : **Al_2O_3 , Si_3N_4 , AlN**

Autres propriétés importantes :



Matériau	CTE $\mu\text{m/m-K}$
Al_2O_3	6,7
AlN	4,2
Si_3N_4	2,8
Cu	16
Al	24



Al_2O_3	+ Faibles tension et puissance Bas coût
Si_3N_4	+ Haute température et + faible puissance
AlN	+ Haute tension et + forte puissance
Cu	Meilleur conducteur électrique et thermique
Al	+ Haute température pour Haute tension et forte puissance

Le système d'isolation de la structure conventionnelle

La fonction de substrat isolant métallisé

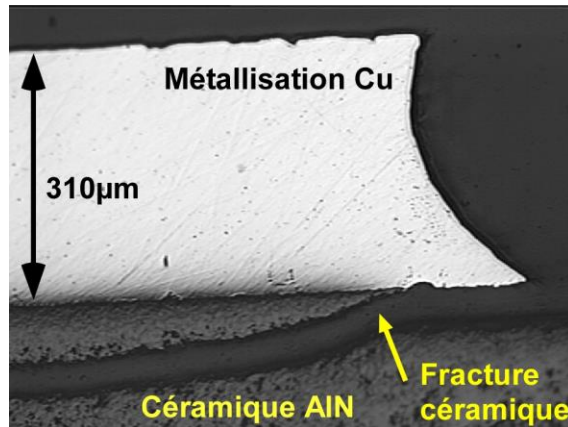
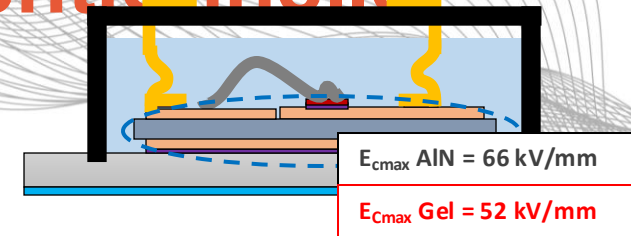
- **Contraintes - Limitations sur la fonction de conversion**

- ✓ Contraintes thermo-mécaniques :

- limitation dans le choix des géométries (métal, céramique)
 - limitation pour la montée en température (cyclage)

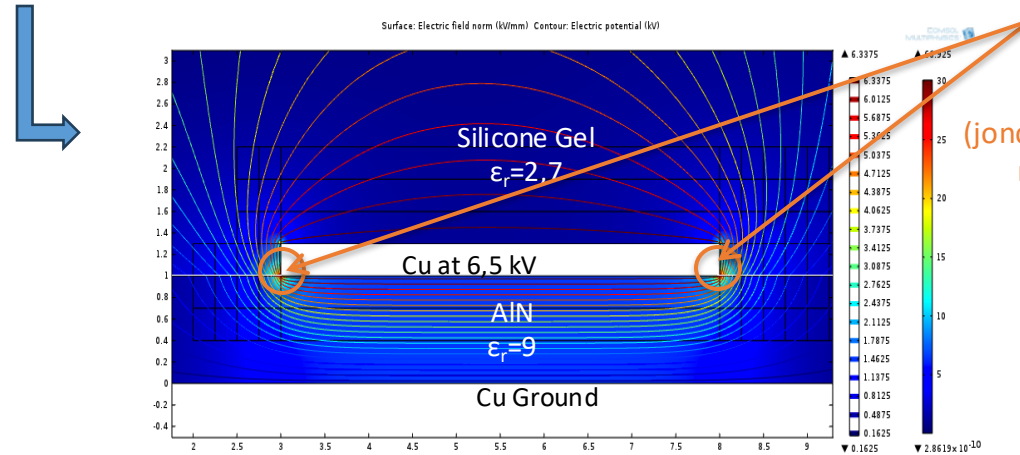
- ✓ Compromis thermique et électrique :

- limitation pour la montée en tension et en puissance



L. Dupont, thèse ENS Cachan, 2006.

Accumulation de la déformation amenant à la fissuration conchoïdale de la céramique après cyclage thermique



H. Hourdequin, thèse Univ. Paul Sabatier de Toulouse 2017

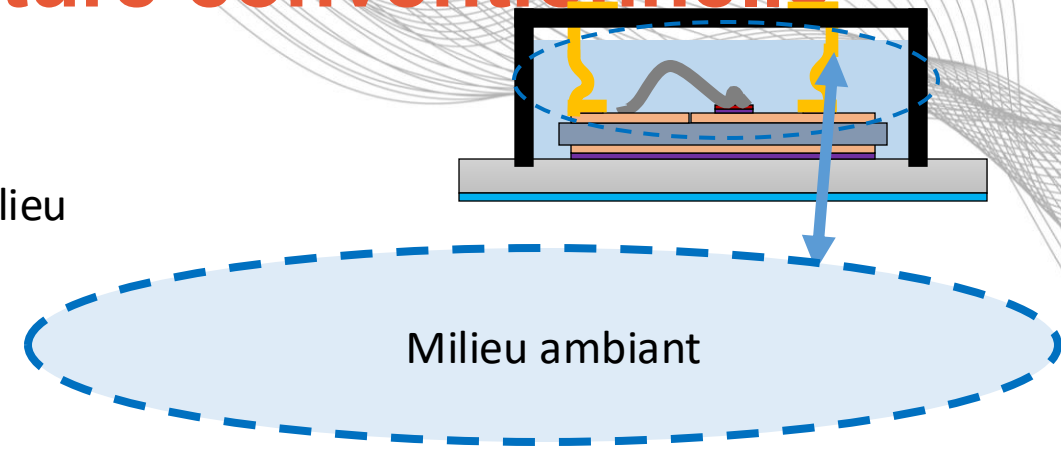
Renforcement du champ électrique aux points triples sous polarisation

Points triples
(jonction substrat céramique/piste
métallique/encapsulation)

Le système d'isolation de la structure conventionnelle

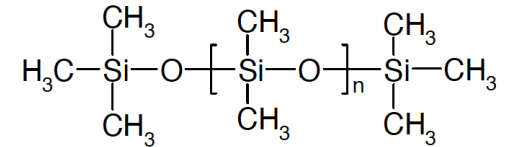
La fonction d'encapsulation

- **Rôles:**
 - Isolation électrique (contre décharges électriques dans le milieu ambiant)
 - Maintien et protection mécanique (contre vibrations)
 - Barrière chimique (humidité, contaminants, poussière)
- **Matériaux:**
 - Gels silicones ou résines époxydes



↳ Propriétés

Gels Silicone	Résines Epoxy
$T_g (< -100^{\circ}\text{C}) < \text{Tusage}$ État caoutchoutique	$\text{Tusage} < T_g (< 180^{\circ}\text{C})$ État vitreux
Souples (très)	Durs
CTE > 300 ppm	CTE > 20 ppm
Très faible module d'Young	Module d'Young élevé



-> Le gel silicone couramment retenu :

Bon isolant électrique : $E_{br} > 20 \text{ kV/mm (AC)}$, $\rho > 10^{13} \Omega.m$, $\epsilon \approx 3$
Bonne stabilité thermique et inertie chimique : ***Tusage max < 200 °C (air)***
Très grande souplesse (adaptée grand volume + liaisons par fils)
Matériau hydrophobe
Processabilité simple (faible viscosité, mouillabilité, adhésion)

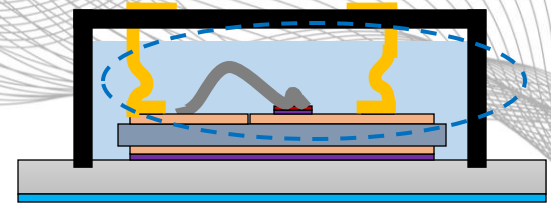
Ce sont des polymères inorganiques isolants électriques

=> **conductivité thermique très faible (< 0,2 K/m.s)**

Le système d'isolation de la structure conventionnelle

La fonction d'encapsulation

- Contraintes - Limitation sur la fonctionnalité du composant à température élevée



- ❑ Ne pas se fier à la **T_{max}** donnée dans les spécifications (pertes de masse à 5%)

- ❑ Les fournisseurs des meilleures références actuelles communiquent mieux sur les propriétés, en termes :

➤ D'accroissement de la dureté

Ex. de résultats après stockage à 250 °C **dans l'air**, sur substrat AlN DBC :

Gel phénylé (T_{max} = 260 °C spécifiée)



0 h



120 h



230 h

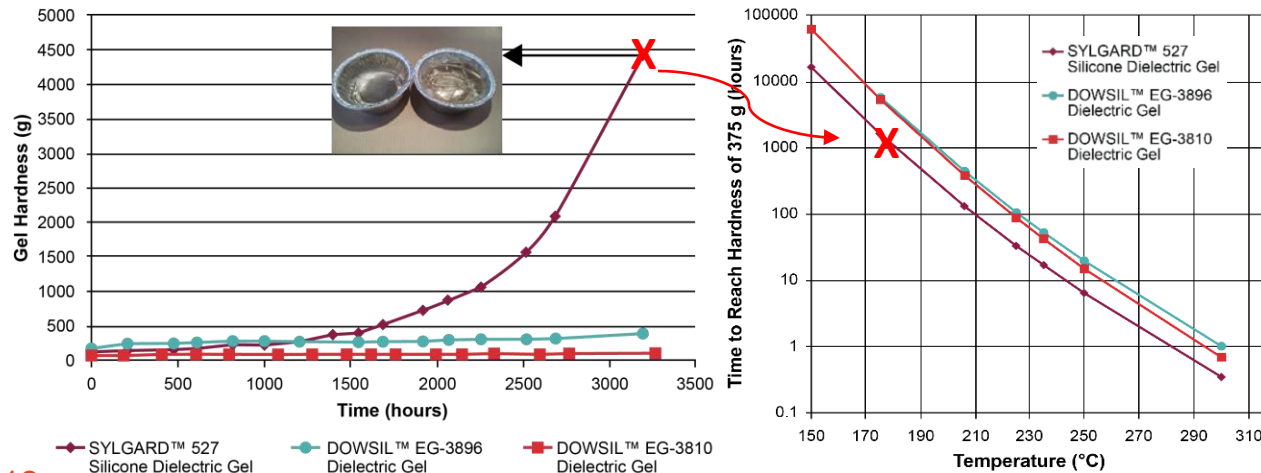


546 h

DOWSIL, 2019

Aging at 175°C

T < 200 °C



➤ De perte d'élasticité, Perte de masse

T < 225 °C

Thermal Properties

Silicone product	Elastic modulus [kPa]			Weight loss [wt.%]		
	0 h	180 °C 1,000 h	210 °C 1,000 h	100 °C 1,000 h	180 °C 1,000 h	210 °C 1,000 h
WACKER SilGel® 612	10	10	> 2,000	0.3	2.5	6.5
SEMICOSIL® 912	15	15	> 2,000	0.3	2	5.5
SEMICOSIL® 915 HT	100	103	105	0.3	1.5	4
SEMICOSIL® 920 LT	20	22	30	0.3	1.5	3.5

WACKER, 2024

Laplace

Sommaire

1. Evolutions des besoins en terme d'isolation des modules de puissance

- A. Système d'isolation du module de puissance isolé
- B. Nouveaux besoins, nouvelles contraintes

2. Le système d'isolation de la structure conventionnelle

- A. Le choix des matériaux
- B. Les limitations associées

3. Des voies de progrès explorées

- A. Focus sur les limitations sous fort champ électrique liées au gel silicone
- B. Voies d'amélioration pour la montée en tension
- C. Contraintes de soutenabilité

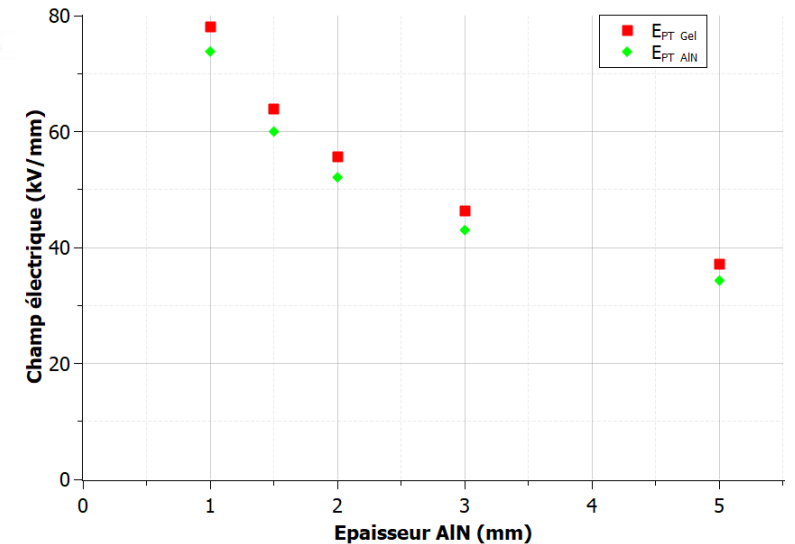
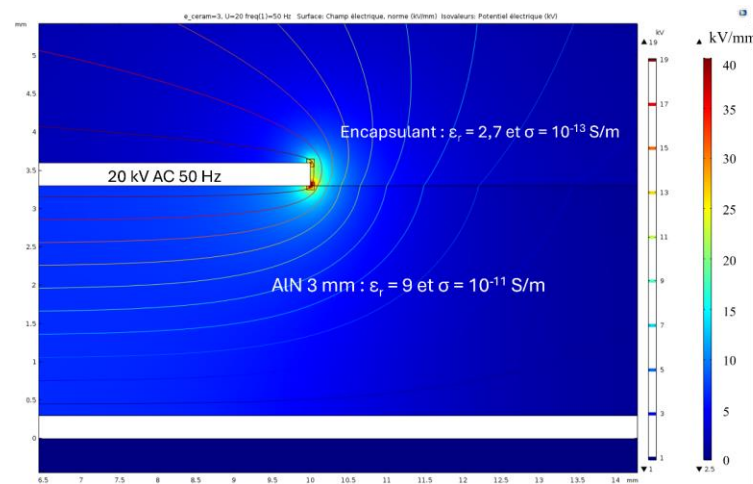
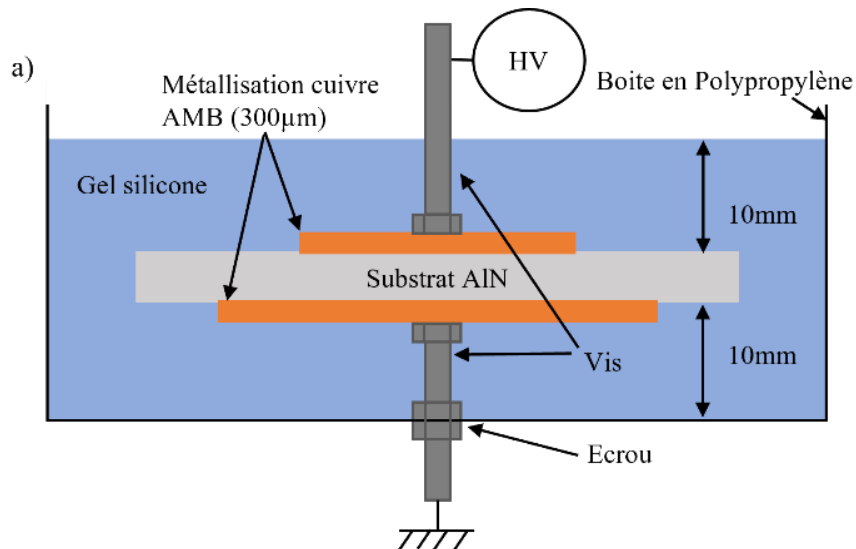
Voies de progrès : problématique du renforcement de champ

Mécanismes de limitation sous fort champ dans le cas du gel silicone

Illustration : cas du système [substrat AlN/Cu + gel silicone] – Objectif 20 kV

-> Etude de la limitation à haute tension en fonction de l'épaisseur du substrat AlN (de 1 à 3 mm)

(Menée dans le cadre du projet ANR ARCHIVE – 2019/2023 – Partenaires AMPERE/Laplace/Univ. Kempten /CeramTec - Thèse de J. Deltour, 2024)



J. Deltour, thèse Université Toulouse 2024

E_{max} au point triple croît lorsque la tension appliquée croît

=> Limitation de la montée en tension et la dissipation de puissance

Voies de progrès : problématique du renforcement de champ

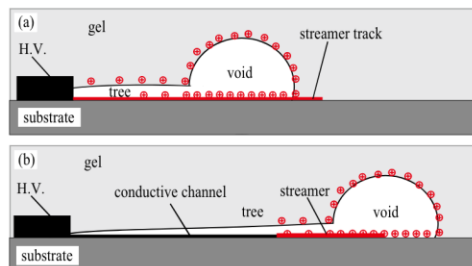
Mécanismes de limitation sous fort champ dans le cas du gel silicone

Observation de l'effet de l'augmentation de la tension appliquée au système :

A basse tension, E_{max} crée l'apparition de décharges partielles si V est au-delà d'un seuil de tension, appelé **TADP** (ou **PDIV**)

A plus haute tension, présence de décharges électriques, entraînant la formation d'une arborescence filamenteuse persistante (comme dans un solide), formées de bulles se rétractant dans le temps (comme dans un liquide).

Si la tension continue de croître, l'arborescence **se propage dans le gel** jusqu'au claquage à la tension **VBR** (par contournement en surface)

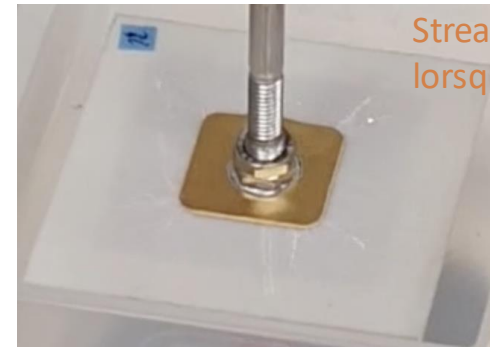


Sato et al., IEEE TDEI, 2016

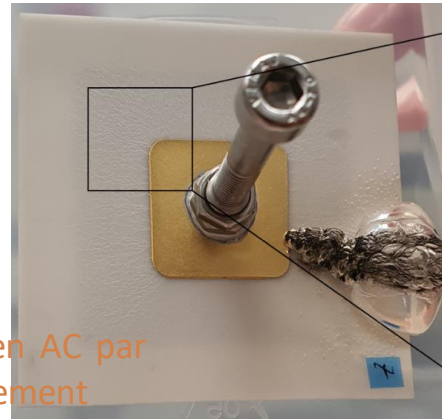
Propagation d'une décharge dans le gel en surface du substrat en AlN

Test de Vbr-AC – 2 kV/s

J. Deltour, thèse Université Toulouse 2024



Streamers visibles lorsque V-AC croît



Rupture en AC par contournement

Arborescence avec cavités visibles dans le gel silicone après la rupture en AC



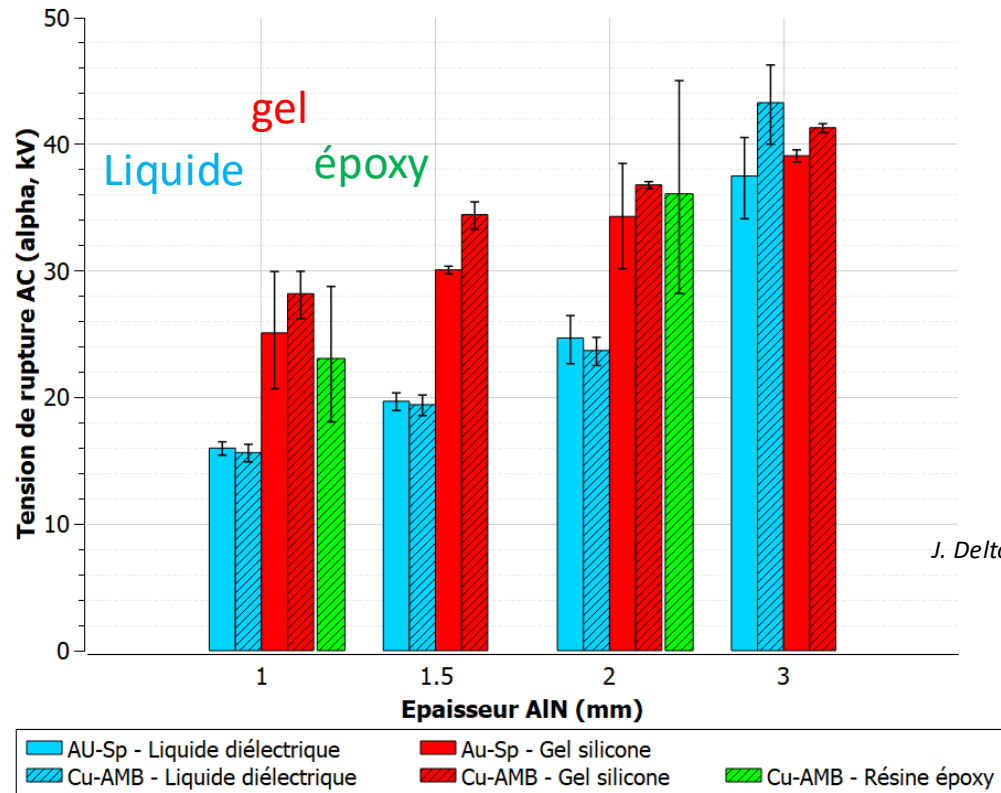
- Limitation par la **tension max d'isolation (VBR)** et par la tension de seuil **d'apparition de décharges partielles (PDIV)**

Voies de progrès : problématique du renforcement de champ

Mécanismes de limitation sous fort champ dans le cas du gel silicone

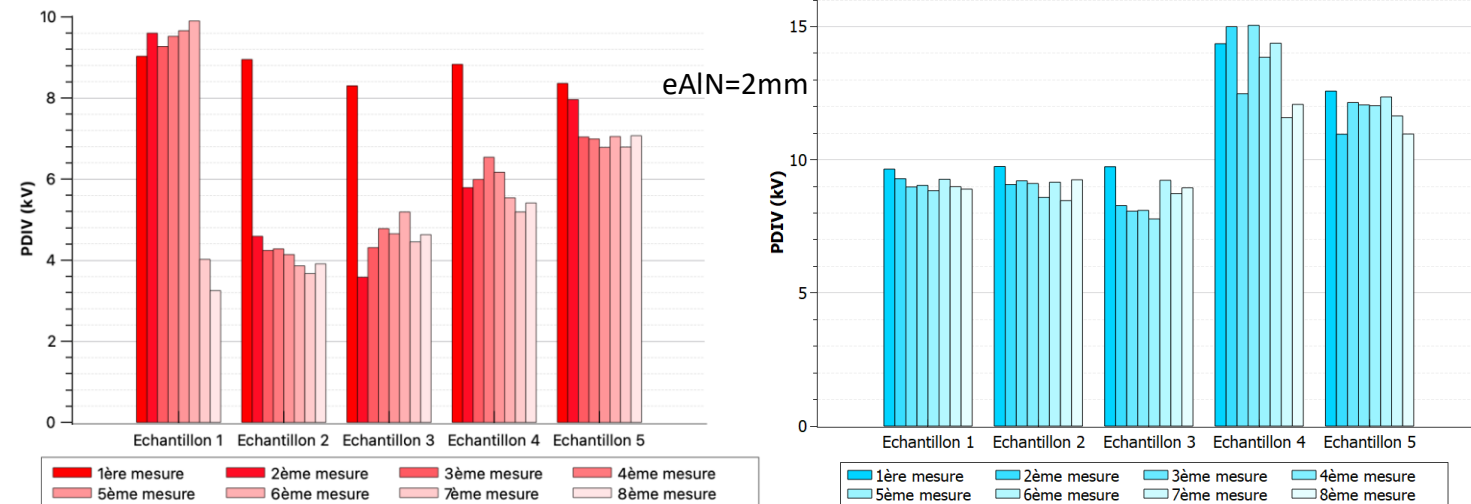
Ordres de grandeur des limitations des tensions de **rupture diélectrique** et de **seuil d'apparition de DP**

Vbr-AC sous rampe 2 kV/s (temps court)



J. Deltour, thèse Université Toulouse 2024

PDIV (charge > 10 pC) < 10 kV !



J. Deltour, thèse Université Toulouse 2024

- Limitation très sévère surtout en termes de PDIV sous tension AC
- Plus importante sous fort dv/dt et fréquence élevée dans le cas de tensions impulsionnelles.

- Intérêt de l'encapsulation par liquide pour la tenue en tension VBR-AC aux temps longs
- Pas de décharges observées durant le test VBR-AC dans le cas de la résine

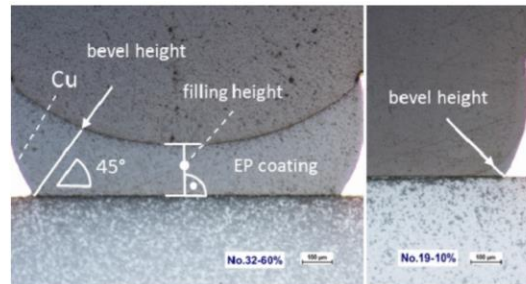
Voies de progrès : problématique du renforcement de champ

Pistes d'amélioration pour réduire les limitations en tension dues au champ élevé dans le gel silicone

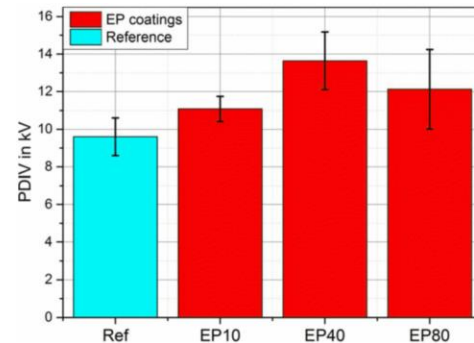
-> **Stratégie 1 : Utiliser des matériaux supportant un plus fort champ**

Solutions en complément du gel

- Dépôt de matériau en bord d'électrode (inter-électrode)
- > A base d'époxy ou de polyimide
- Réduit également le champ dans le gel si épaisseur suffisante



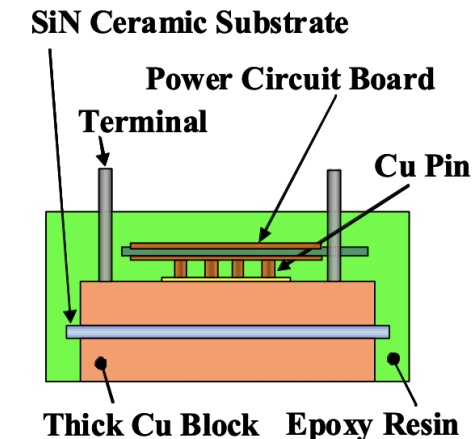
Waltrich et al. ICEP 2016



-> Probablement solutions déjà utilisées par certains fabricants

Solutions autres que les gels silicone

- Matériau dur (époxy)
- > impact sur les contraintes thermo-mécaniques
- => nécessité d'adaptation de l'assemblage



Horio et al., ISPSD 2012

NB : dans le cas de matériaux très résistants à fort champ et plus rigides, le matériau céramique peut devenir le « maillon faible » (pas de gradation de champ dans le substrat, contrainte couplée électro-mécanique)

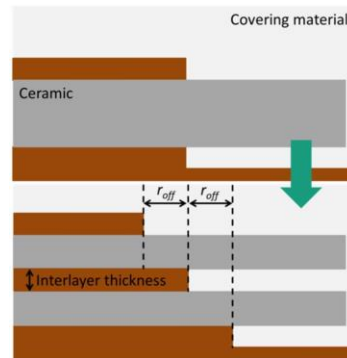
Voies de progrès : problématique du renforcement de champ

Pistes d'amélioration pour réduire les limitations dues au champ élevé dans le gel silicone

-> **Stratégie 2 : Réduire le champ max dans le système**

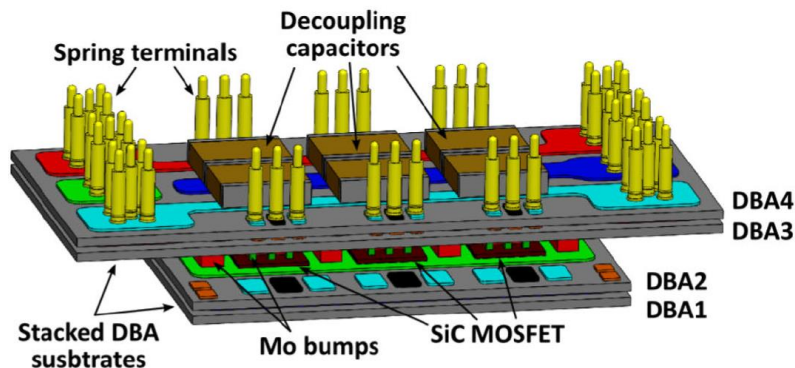
Solutions géométriques au niveau du substrat métallisé

- Alignement des bords de Métallisation
- Empilement de substrats avec métallisation intermédiaire au potentiel



C.F. Bayeret et al., 2016

Ex : mise en œuvre dans une structure de packaging de module 10 kV

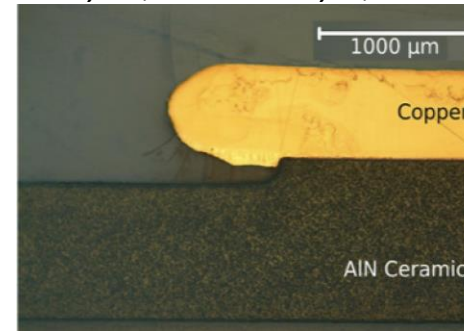


B. Mouawad et al. ISPS 2018

Exploration d'architectures nouvelles

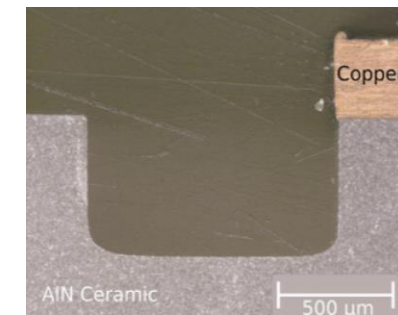
RoME

H. Reynes, thèse INSA Lyon, 2017



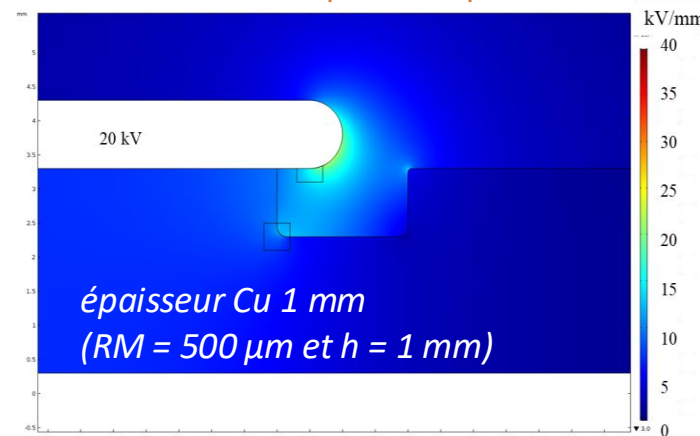
MESA

H. Hourdequin, thèse Univ. Toulouse, 2017

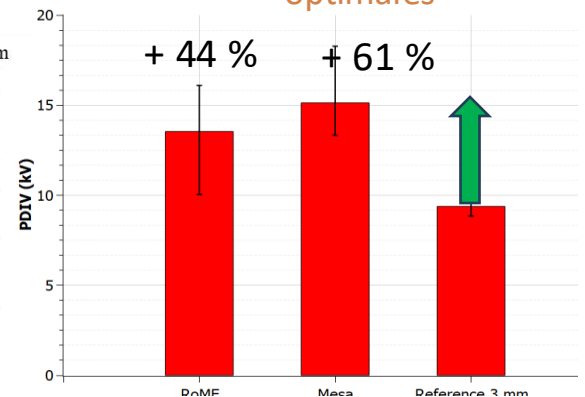


Amélioration du PDIV confirmée sur des géométries non optimales

Structure RoME optimisée pour 20 kV



J. Deltour, thèse Univ. Toulouse 2024



Voies de progrès : problématique du renforcement de champ

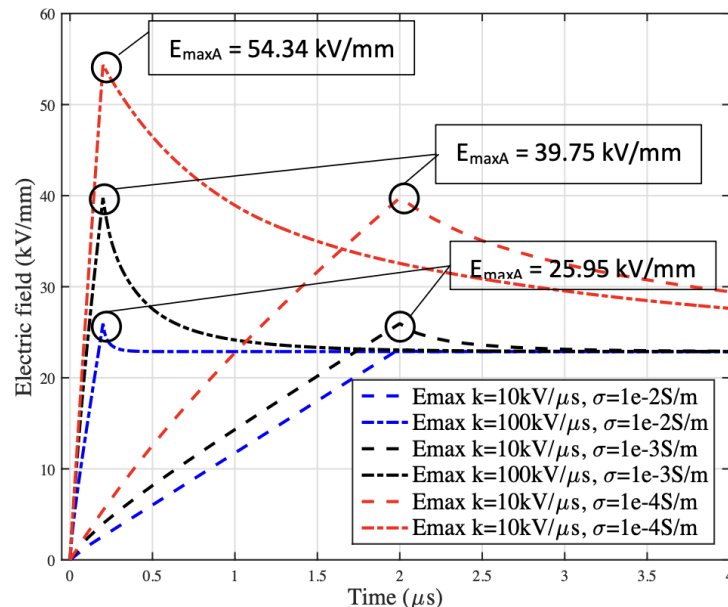
Pistes d'amélioration pour réduire les limitations dues au champ élevé dans le gel silicone

-> **Stratégie 2 : Réduire le champ max dans le système**

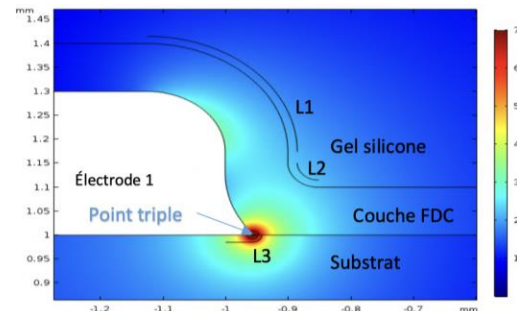
Solutions au niveau des propriétés des matériaux 'FGM' (Field Grading Materials')

✓ Dépôts de matériaux à conductivité σ ou permittivité ϵ **non linéaire en champ**

Intérêt de la non linéarité : conductivité très élevée nécessaire pour réduire le pic de champ E dans le cas de forts dv/dt

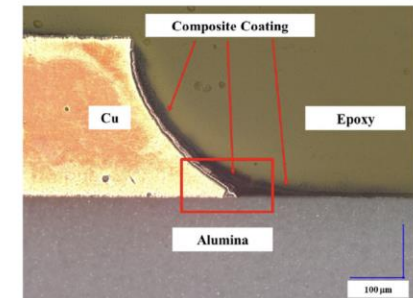


T. Zhou, thèse Univ. de Toulouse, 2022



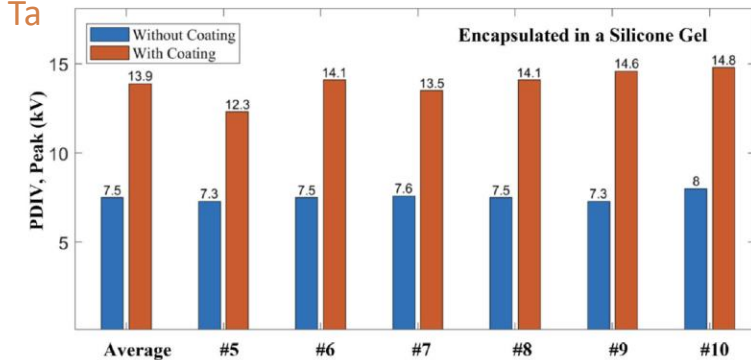
$$\sigma(E) = \sigma_0 \left(1 + \left(\frac{|E|}{E_b} \right)^{\alpha-1} \right)$$

Polymère nanocomposite FDC



(a)

Impact de 85 %
sur PDIV mesuré à
60 Hz et Ta



(b)

Z. Zhang et al. IEEE TPE 2022.

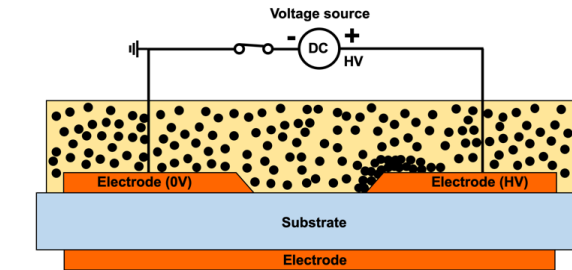
Voies de progrès : problématique du renforcement de champ

✓ Etude menée au Laplace de mise en œuvre de **couches FGM autostructurées par électrophorèse** – Epoxy chargée de particules semi-résistives ou à forte permittivité

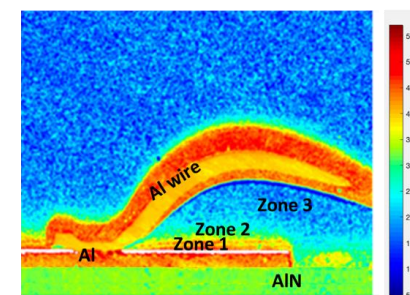
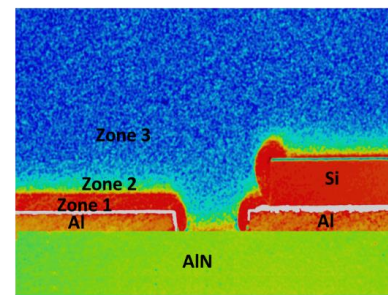
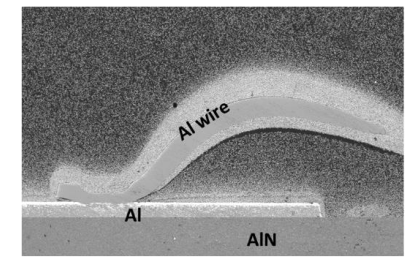
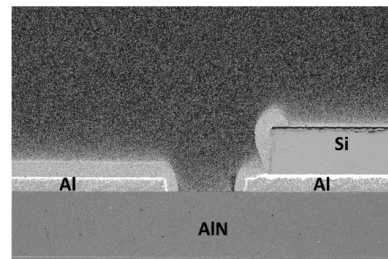
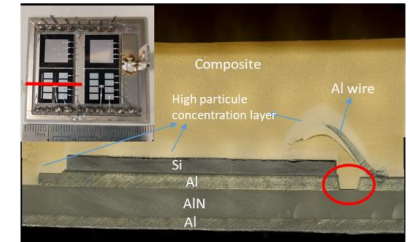
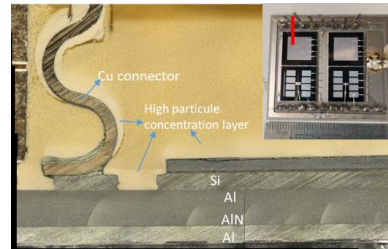


Démonstration d'applicabilité au sein d'un module de puissance complet

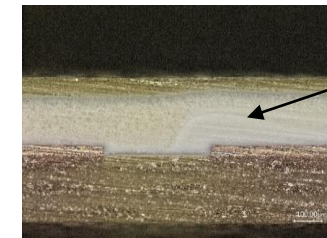
Etude du transfert aux puces intégrées dans un PCB



Auto-structuration of SrTiO_3 layer around triple point

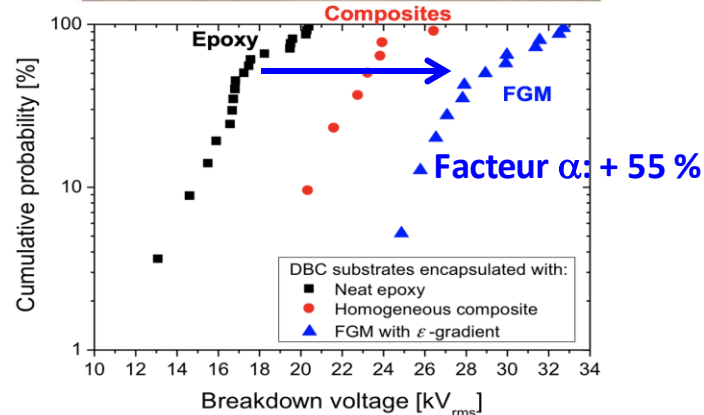


Permittivity self-adaptation around bounding and die edge

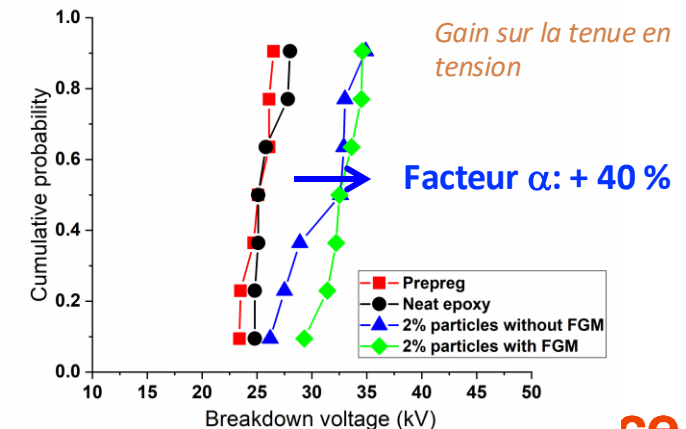


Faisabilité du procédé sur échantillon Prepreg FR4 seul

A. Escriva, thèse Univ. Toulouse (en cours)



Tension de claquage de Substrats AlN DCB encapsulés
(époxy pur, composite époxy/ SrTiO_3 homogène, composite FGM)
Thèse L. Lévêque 2017 - Diahmet et al, IEEE TDEI, 2020



Post-doc T. Le, 2021

Voies de progrès : vers plus de soutenabilité

Diverses fonctions plus soutenables à assurer en Electronique de Puissance ...

Concernant le système d'isolation des modules :

Quelle alternative aux gels et résines époxy et plus généralement aux matériaux issus de la chimie du pétrole ?

- Quel polymère présente un impact environnemental plus faible ?
- Quel polymère faciliterait la récupération des métaux principale valeur en fin de vie ?
- Quels nouveaux critères de performances à considérer ?

→ Etude menée au Laplace sur **l'apport des vitrimères**, nouvel alinéa au cahier des charges du **système d'isolation !**

Voies de progrès : vers plus de soutenabilité

Définition d'un vitrimère

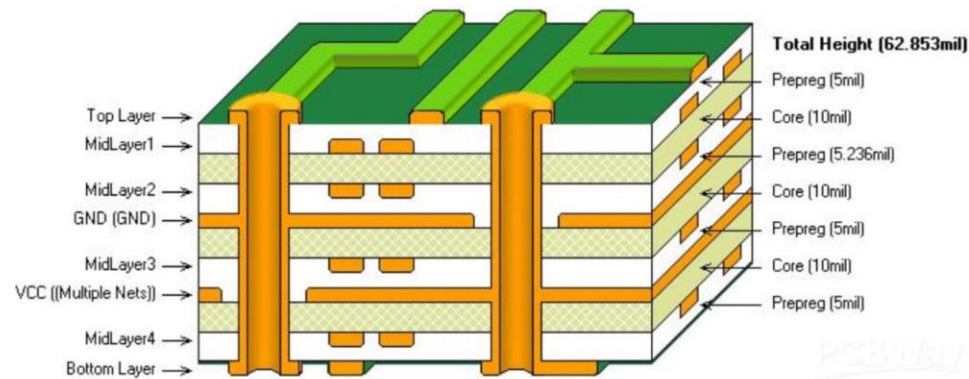
- Il s'agit d'un nouveau type de polymère découvert en 2011 par **Ludwik Leibler** du Laboratoire matière molle et chimie de l'EPCSI de Paris,
- il peut « se situer » entre les matériaux thermodurcissables et les matériaux thermoplastiques permettant de corriger certaines de leurs limites,
- il présente des propriétés **viscoelastiques qui rappellent celles du verre**,
- il présente une réticulation dynamique dite **réversible**
- il présente des liaisons covalentes dynamiques qui peuvent se connecter et se déconnecter à l'infini (pas de perte de matière lors de la réaction),
- il présente enfin de nouvelles fonctions d'usages intéressantes de :
 - > **Mémoire de forme, « auto » réparabilité, recyclage, bio sourçabilité, résistance à la chaleur et aux solvants, adhésion, démontabilité...**

Voies de progrès : vers plus de soutenabilité

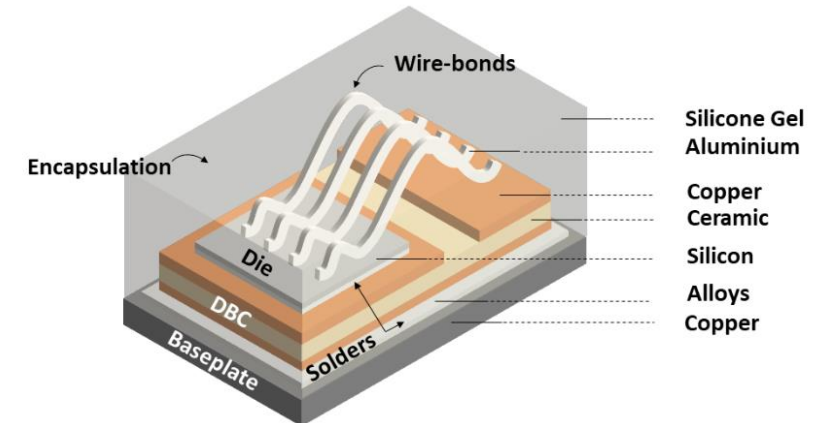
Premiers travaux au Laplace

Travaux initiés dans le cadre de la thèse de Baptiste ARATI 2023 en collaboration avec l'entreprise MERCE.

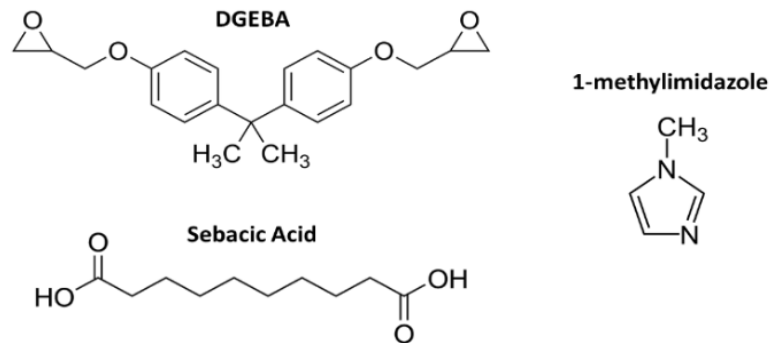
L'idée est **d'identifier** des vitrimères plus **soutenables**, les **mettre en œuvre** et les **caractériser** en vue d'assurer des fonctions pour les **applications substrats PCB et isolation de modules de puissance**.



Application « PCB »



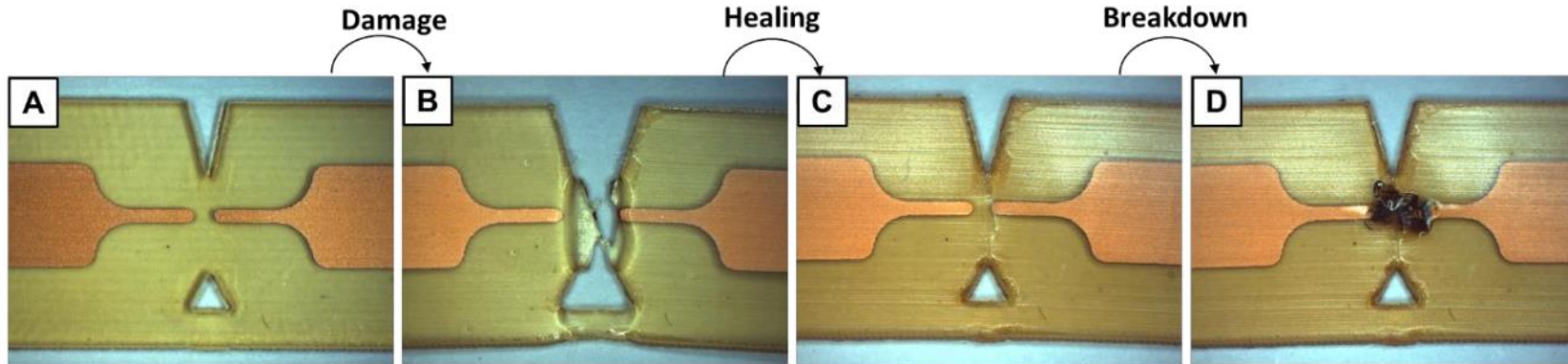
Application Module de puissance conventionnel



<- Une chimie de départ « simple » introduisant progressivement des matériaux bio-sourcés

Voies de progrès : vers plus de soutenabilité

Tests: rupture mécanique, réparation, rupture diélectrique

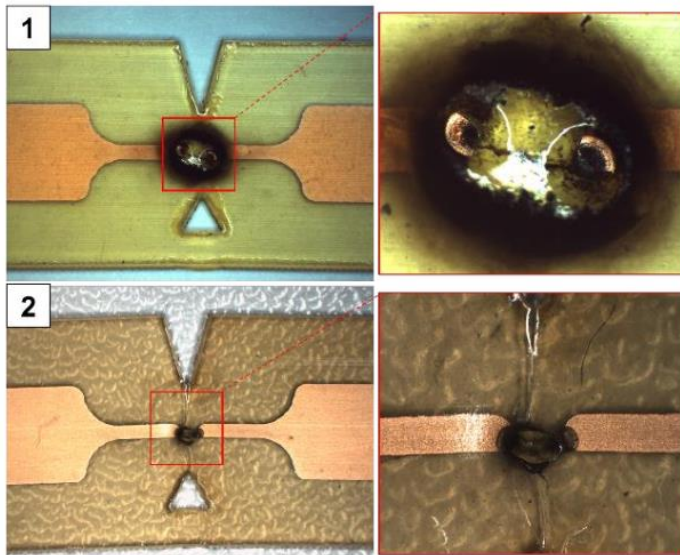


A: Sain

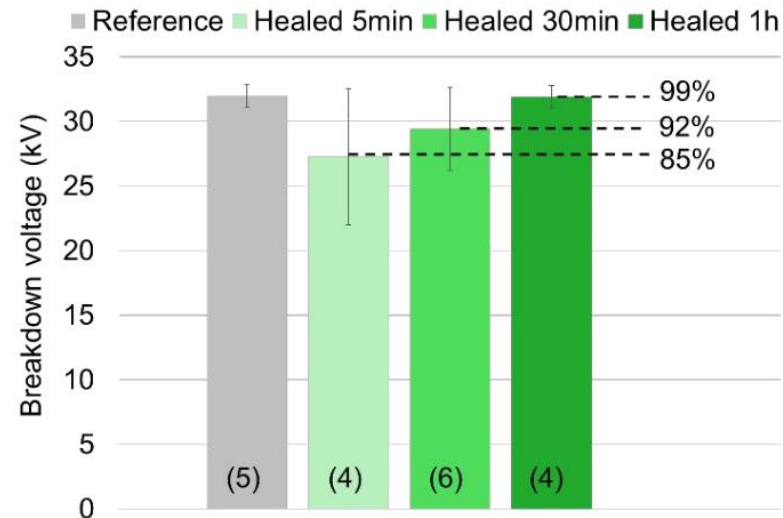
B: rupture mécanique

C: réparation

D: rupture diélectrique



1: sans réparation 2 : avec réparation



Le taux de recouvrement de la rupture électrique après réparation de la rupture mécanique est proche de 99%.

Conclusion

Les nouveaux besoins applicatifs en EP (re)mettent le sujet de l'isolation électrique **au cœur des problématiques majeures à résoudre dans le domaine de l'électronique de puissance**, dans toute la gamme de tension (quelques 100 V à quelques 10 kV).

Fortes évolutions en termes :

- de structures de packaging (ex. structures à refroidissement double face, compacité, enfouissement des puces dans PCB, ou composants UWBG),
 - de nouveaux diélectriques plus performants et/ou plus soutenables, ou matériaux recyclés ...
- > **Changement des compromis** électriques, thermiques, mécaniques, chimiques, dont dépendent le comportement et la durabilité d'un packaging. Nécessité d'une vision globale.

Nécessité de définir des protocoles d'essais et d'analyses des données pertinents pour mettre en évidence les bons mécanismes physiques aux bonnes échelles.

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

UNIVERSITÉ DE TOULOUSE
Bât. 3R3, 118 route de Narbonne
31062 Toulouse Cedex 9

+33 (0)5 61 55 67 97
sec-ups@laplace.univ-tlse.fr

ENSEEIH
2 Rue Camichel,
31071 Toulouse Cedex 7

+33 (0)5 34 32 23 91
sec-n7@laplace.univ-tlse.fr



Gestion thermique des composants SiC et GaN — Technologies

Constat

Nécessité d'avoir un très bon refroidissement pour les utiliser de manière optimale !

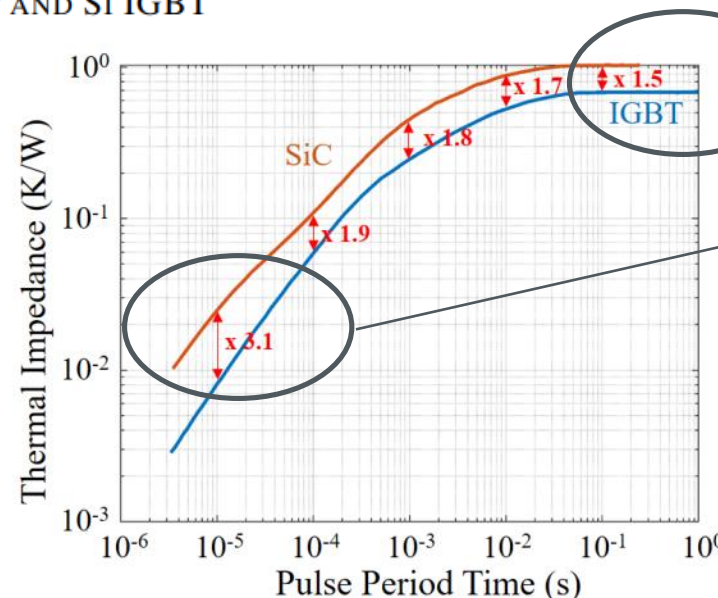
Contrainte : leur surface est plus petite que celle des composants Si (IRT Saint Exupéry, ICAM)

Type	Part Number	Breakdown voltage	I_{DS}	PKG	Dimensions
SiC	AIMW120 R080M1	1200V	33A	TO-247	$3 \times 3 \text{ mm}^2$
IGBT	IKW15N 120H3	1200V	30A	TO-247	$4.2 \times 4.3 \text{ mm}^2$

Surface
x 2

Températures moyennes plus élevées

TABLE I
CHARACTERISTIC OF SiC MOSFET AND Si IGBT



Rth plus forte

Moins d'inertie thermique

Variations de températures plus élevées pendant le fonctionnement

[1] A. Marie, B. Cougo, L. Renaudie, T. K. Koladoun and J. -P. Fradin, "Precise 3D modelling of SiC die temperature oscillation for lifetime prediction of power modules used in DC/AC power converters," 2024 30th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), Toulouse, France, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/THERMINIC62015.2024.10732697.



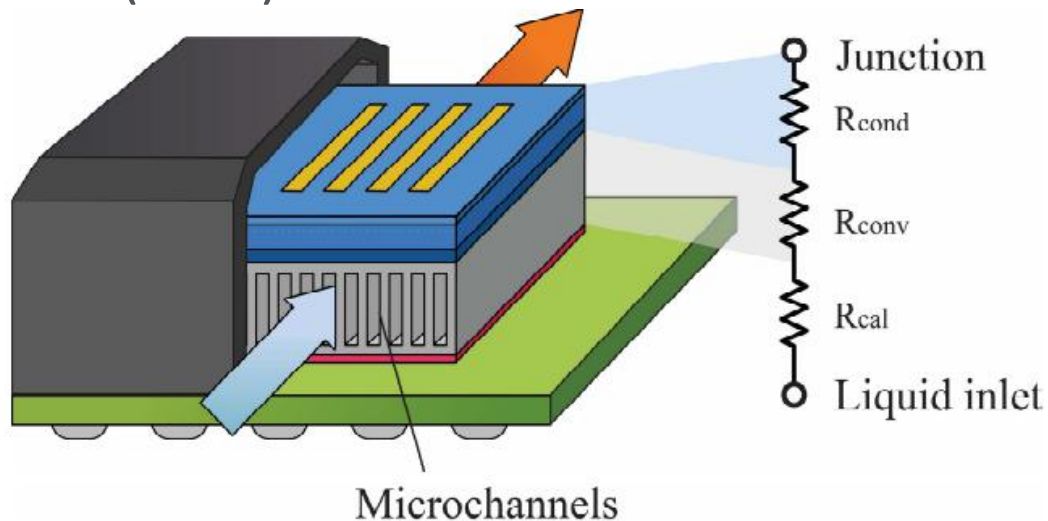
Deux solutions généralement recherchées au niveau du packaging :

- intégrer des matériaux de forte conductivité thermique (spreader)
- intégrer une solution de refroidissement performante au plus proche de la puce.

Deux solutions généralement recherchées au niveau du packaging :

- intégrer des matériaux de forte conductivité thermique (spreader)
- intégrer une solution de refroidissement performante au plus proche de la puce.

Exemple : Intégration d'un refroidissement liquide au plus proche du composant dans GaN sur Si (EPFL)



Coefficient d'échange équivalent à la surface :
 $88.10^3 \text{ W/m}^2/\text{K} \rightarrow 100.10^3 \text{ W/m}^2/\text{K}$

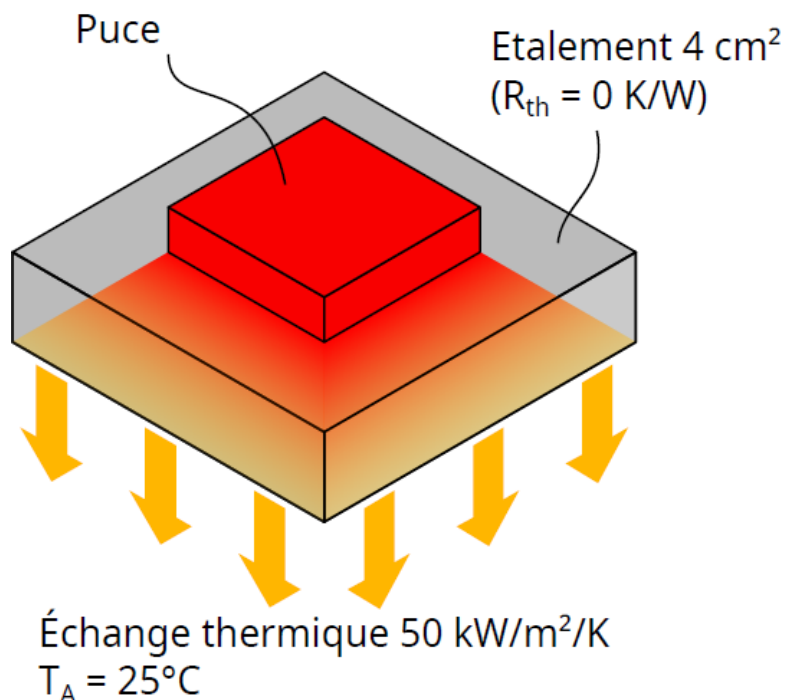
Soit une R_{th} de :

- $0,1 \text{ K/W}$ pour une puce de 1 cm^2
- $0,4 \text{ K/W}$ pour une puce de $5\text{mm} \times 5\text{mm}$

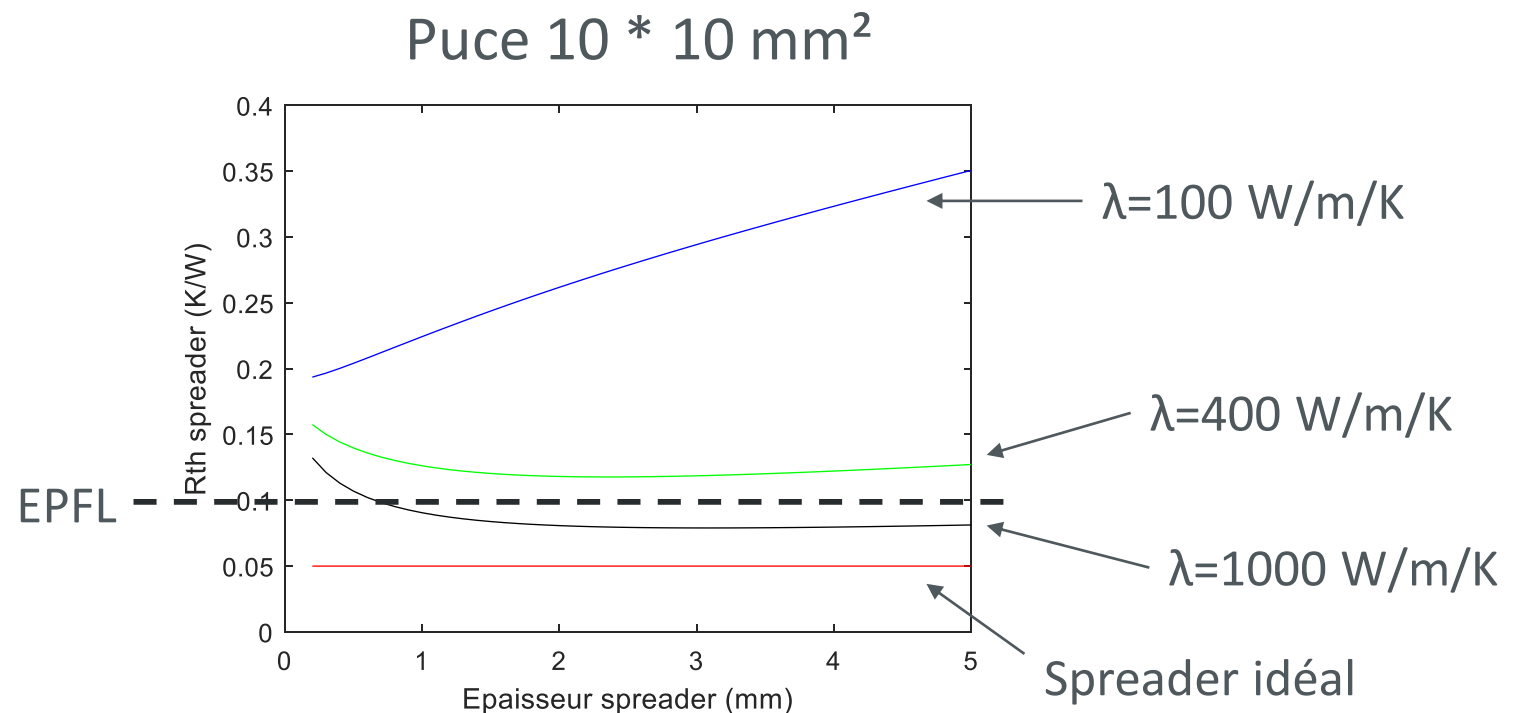
[2] R. v. Erp, G. Kampitsis, L. Nela, R. S. Ardebili and E. Matioli, "Embedded Microchannel Cooling for High Power-Density GaN-on-Si Power Integrated Circuits," 2020 19th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), Orlando, FL, USA, 2020, pp. 53-59, doi: 10.1109/ITherm45881.2020.9190356.

- Deux solutions généralement recherchées au niveau du packaging :
- intégrer des matériaux de forte conductivité thermique (spreader)
 - intégrer une solution de refroidissement performante au plus proche de la puce.

Utilisation d'un spreader sous la puce :

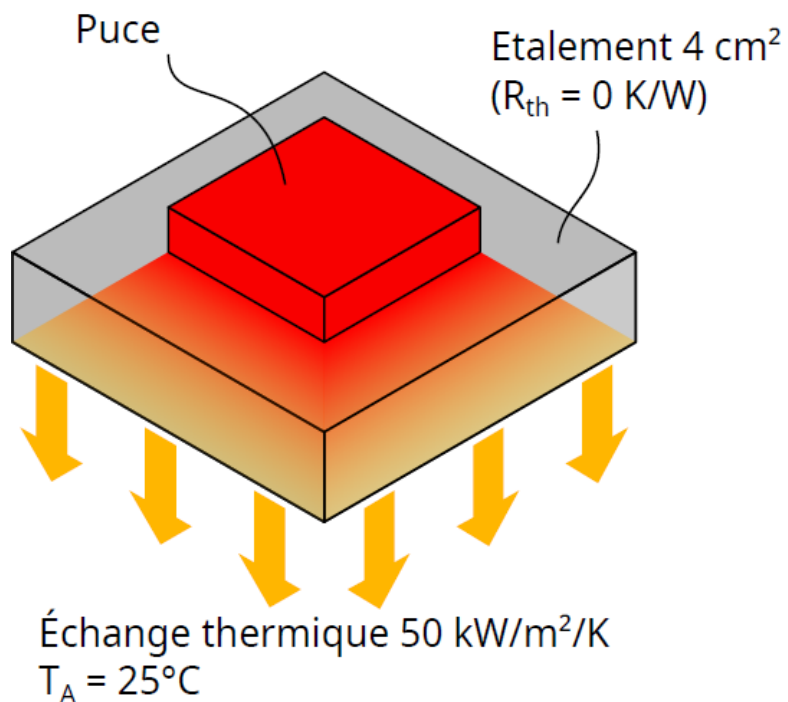


Spreader idéal : R_{th}=0,05 K/W

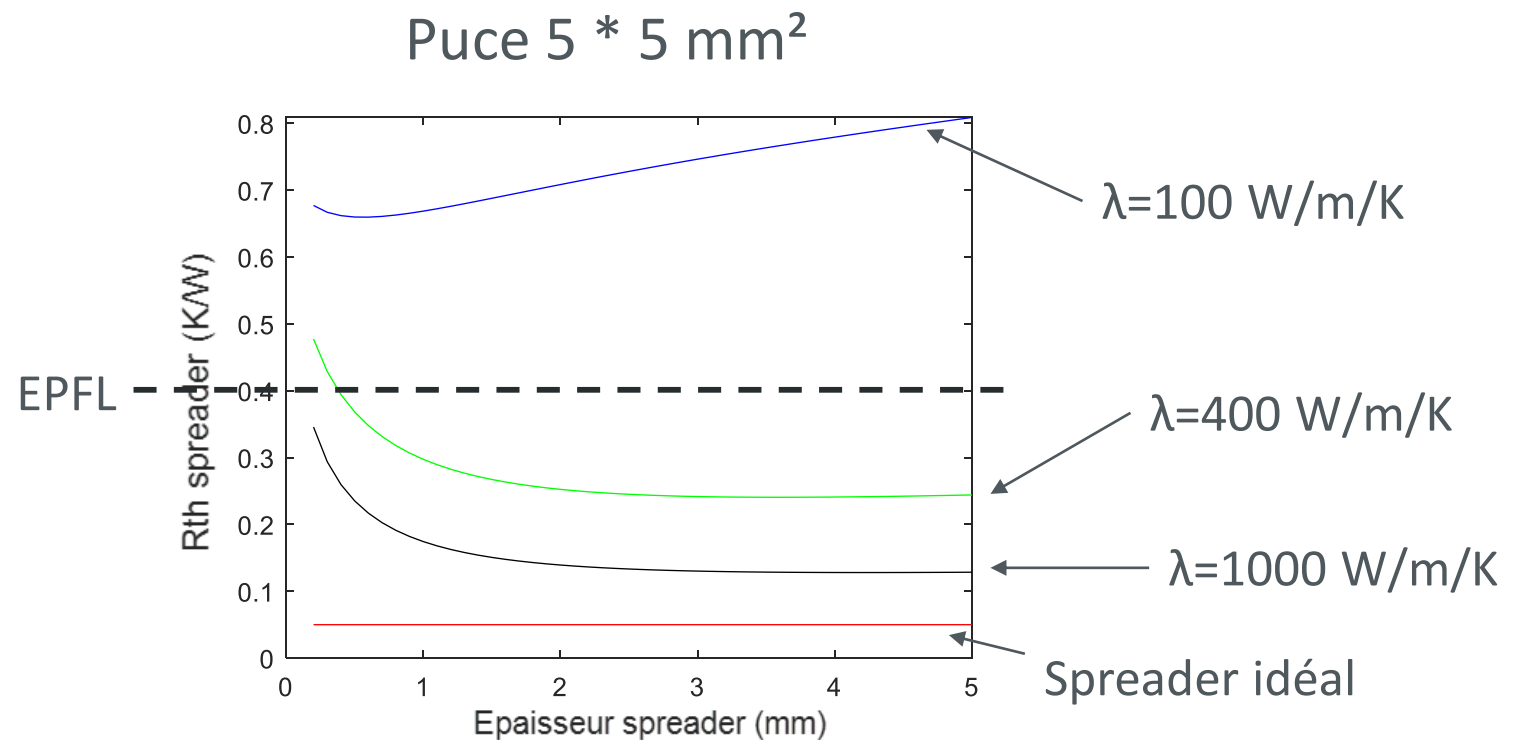


- Deux solutions généralement recherchées au niveau du packaging :
- intégrer des matériaux de forte conductivité thermique (spreader)
 - intégrer une solution de refroidissement performante au plus proche de la puce.

Utilisation d'un spreader sous la puce :



Spreader idéal : R_{th}=0,05 K/W



Conclusion :

- la mise en place d'un spreader est intéressante notamment pour les petites tailles de puce (cas de WBG) – **il permet également d'augmenter la capacité thermique**
- vouloir refroidir au plus proche de la puce est discutable

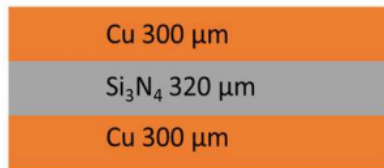


Aperçu de solutions basées sur des spreaders cuivre
Autres solutions étudiées dans la littérature

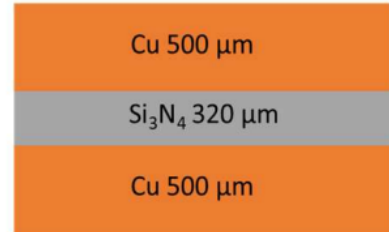
Spreaders cuivre

Modification du substrat (SAFRAN, G2Elab)

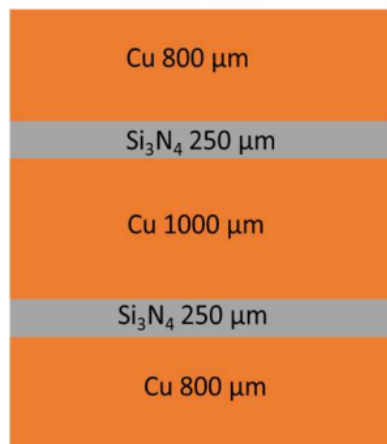
AMB 300



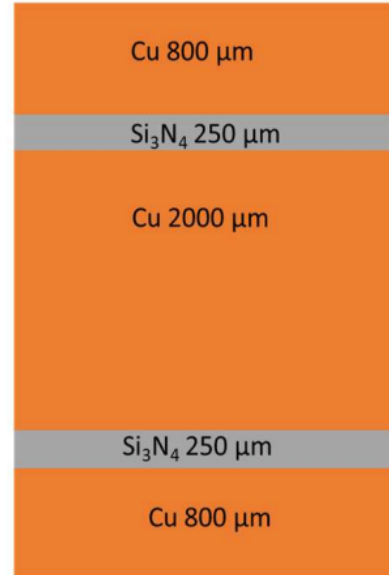
AMB 500



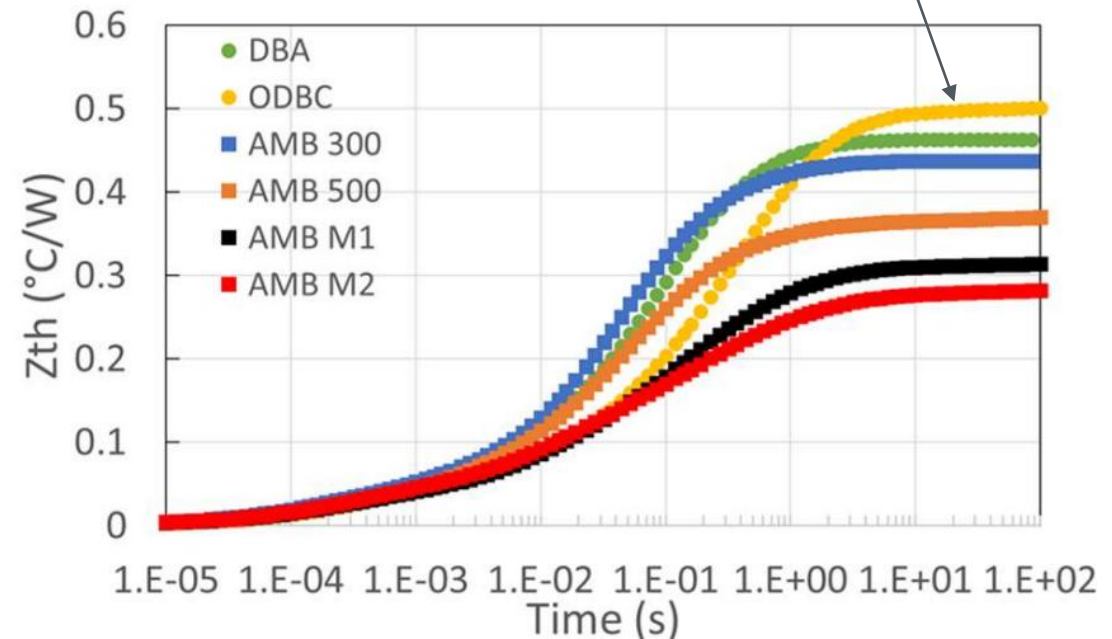
AMB M1



AMB M2

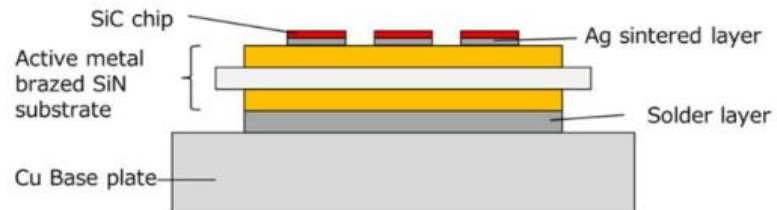
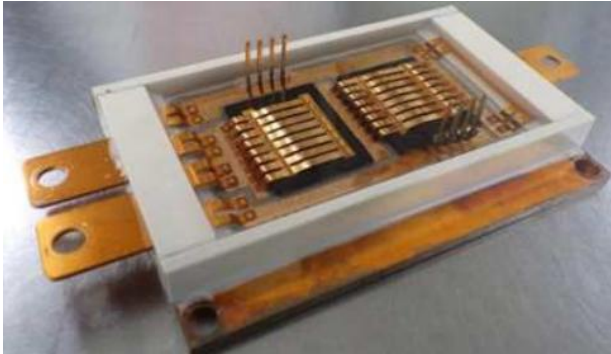


Isolant organique : 70 μm Temprion (DuPont)
Cuivre > 1 mm

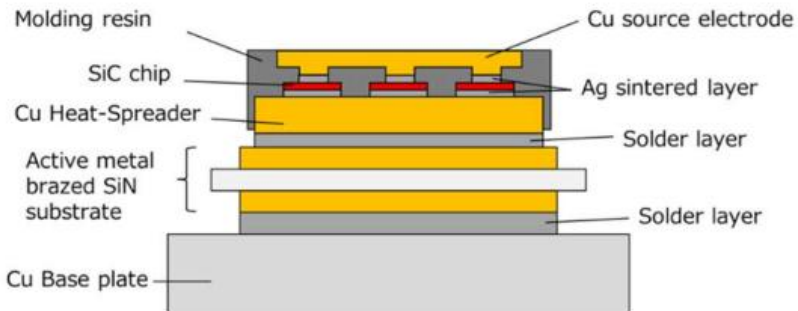


Spreaders cuivre

Ajout de cuivre sous les puces (Mitsubishi)



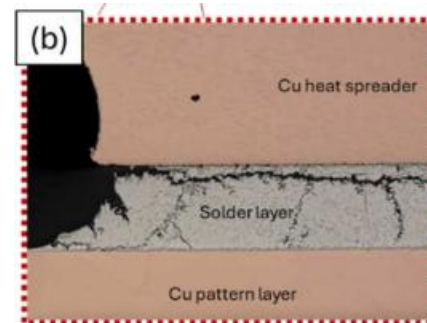
(a) cross-sectional diagram (conventional module)



(b) cross-sectional diagram (subassembly module)

TABLE II. SIMULATION RESULT LIST

	<i>Conventional module</i>	<i>Subassembly module</i>
Thermal Resistance [K/W]	0.118	0.109
Total Heat Generation [W]	938	1011 (7.7% larger)
T_{jmax} [°C]	175	175



CTE du cuivre élevé → potentiels problèmes de fiabilité

[4] Y. Nakata, Y. Sato, S. Uegaki, J. Fujita, A. Furukawa and M. Tarutani, "A New Subassembly Concept for Enhanced Heat Dissipation and Reliability of Power Module," 2025 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Atlanta, GA, USA, 2025, pp. 1383-1387, doi: 10.1109/APEC48143.2025.10977529.

Spreaders cuivre

Modification du substrat (U. Chemnitz)

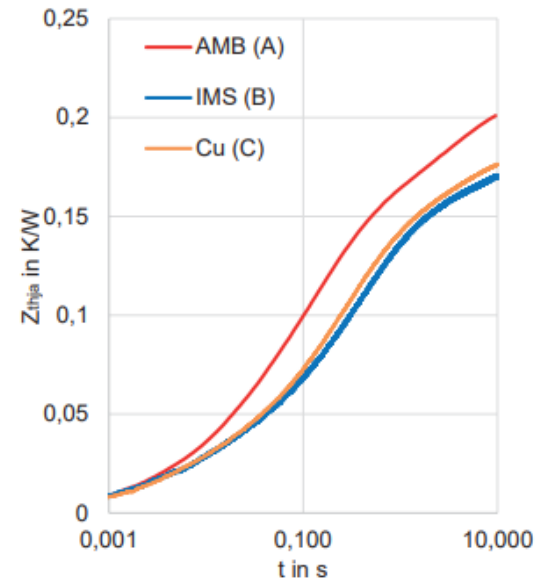
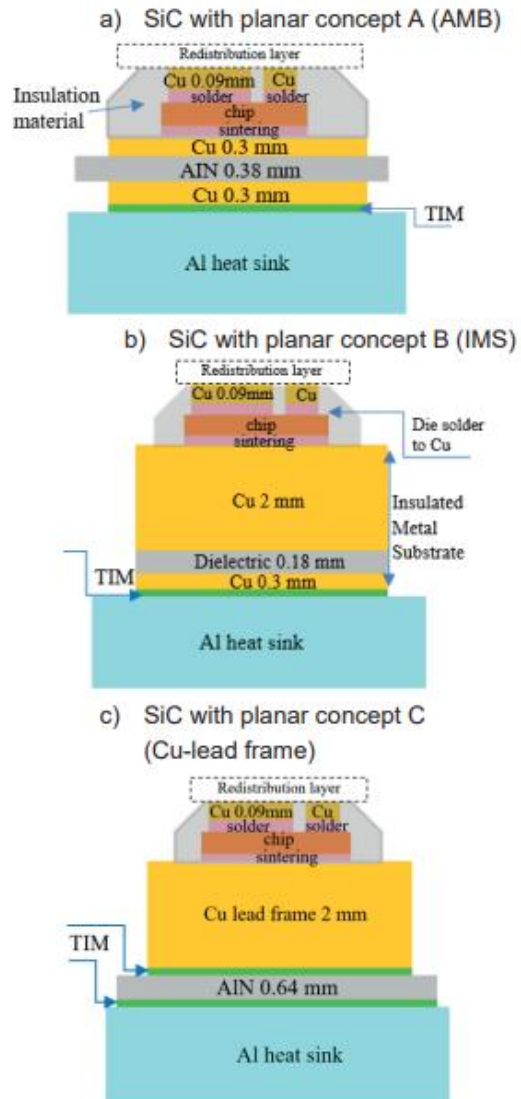
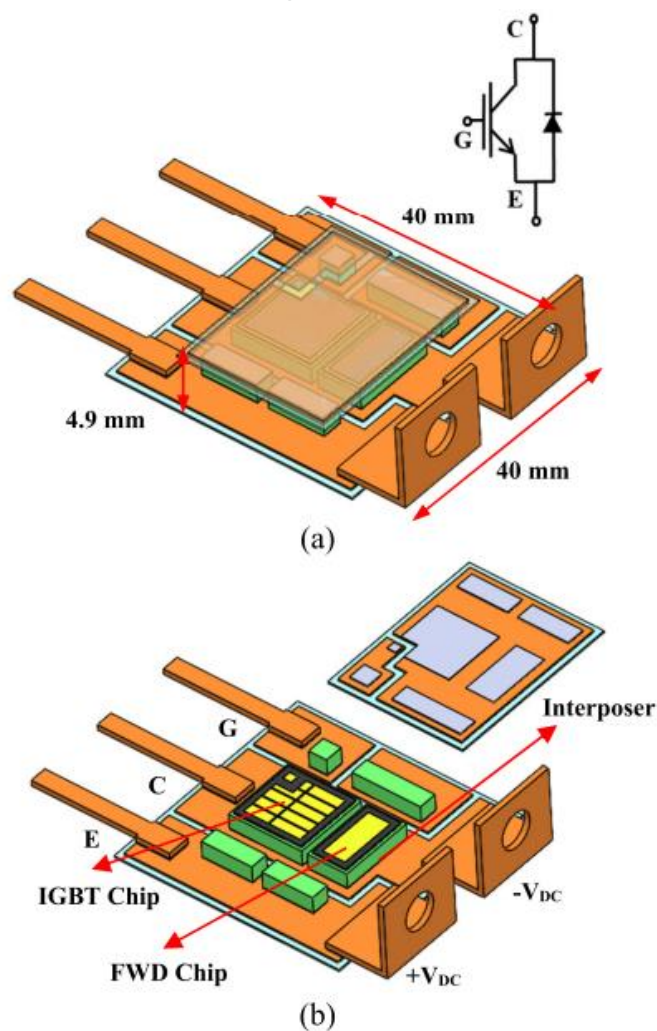


Fig. 3: Thermal impedance measurement results of a half-bridge with four chips in parallel. Test condition: $t_{on}/t_{off} = 10$ s, power density: 220 W/cm^2 , chip size: 0.25 cm^2 .

[5] Y. Ye *et al.*, "Thermal Behavior of SiC MOSFET with Planar Packaging Technology," *PCIM Europe 2024; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Nürnberg, Germany, 2024, pp. 2821-2825, doi: 10.30420/566262400.

Spreaders cuivre

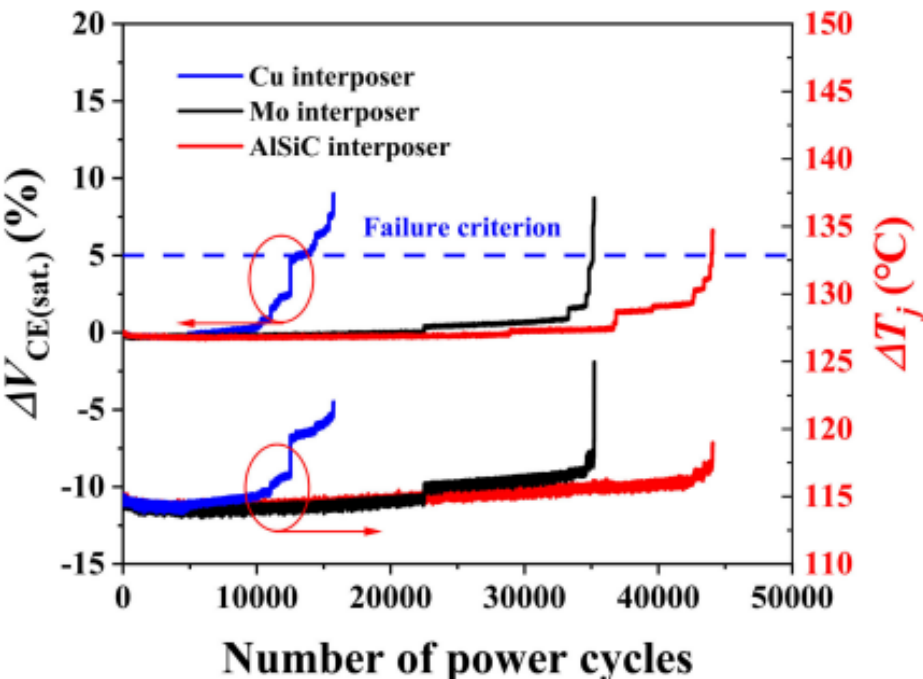
Module de puissance (U. Changsha)



[6] G. Sun, C. Peng, J. Wen, H. Liu, W. Zhu and L. Wang, "Improvement Heat Dissipation of Flip Chip Double-Sided Cooling IGBT Module Using AlSiC-Interposer Technology," in *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 14, no. 11, pp. 1968-1977, Nov. 2024, doi: 10.1109/TCPMT.2024.3469160.

TABLE V
THERMAL RESISTANCE COMPARISON OF FCDSC MODULE WITH CU INTERPOSER, MO INTERPOSER, AND ALSiC INTERPOSER

Rth_jc (°C/W)	Top-sided cooling	Bottom-sided cooling	Double-sided cooling
Cu	0.0842	0.1198	0.0495
Mo	0.0977	0.1987	0.0655
AlSiC	0.0903	0.1556	0.0571





Conclusion

L'introduction de spreaders Cu sous la puce permet de diminuer la R_{th} et d'augmenter la C_{th} mais :

- cela nécessite de l'espace
- les performances pourraient encore être améliorées avec des matériaux à forte conductivité thermique
- importantes contraintes thermo-mécaniques à cause de la forte épaisseur de cuivre → impact possible sur la durée de vie

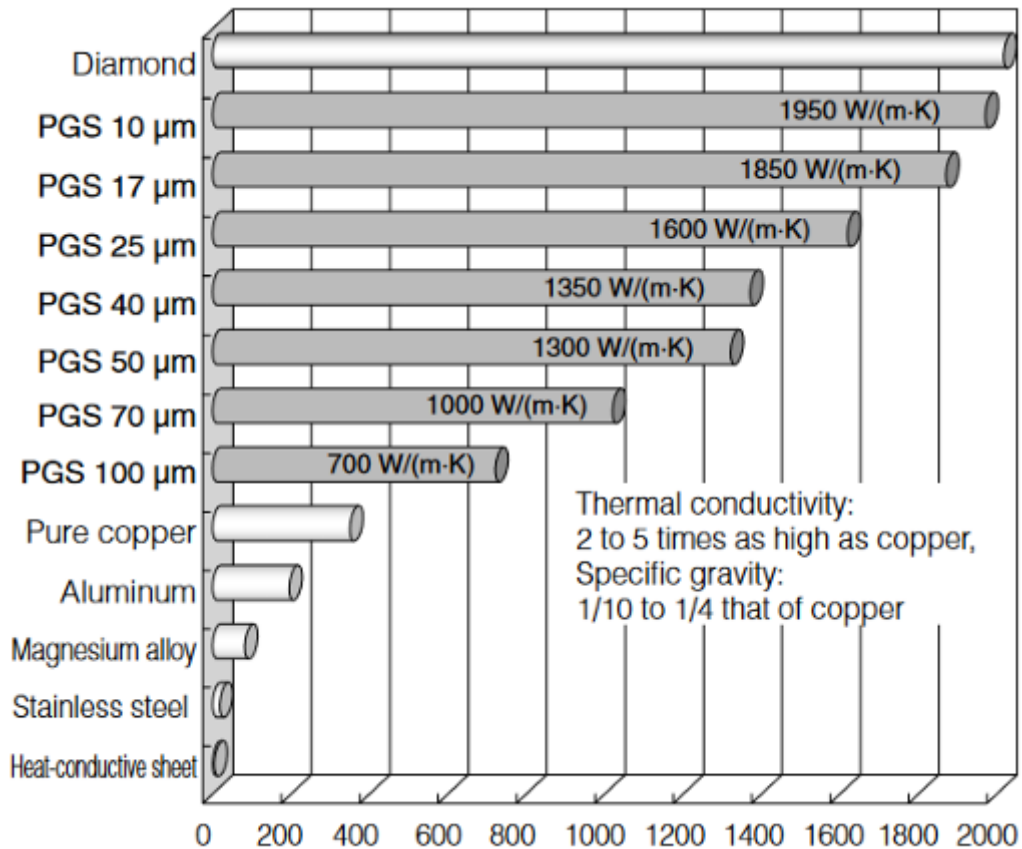
La littérature présente différentes familles de solutions :

- les matériaux à base de graphite, (graphene)
- les composites avec du diamant
- (les vapor chambers)

Spreaders à base de graphite

Exemple des PGS (pyrolytic graphite sheets - Panasonic)

www.eu.industrial.panasonic.com.



Comportement très non isotrope

Conductivité thermique perpendiculaire au plan :
15 W/m/K + conductivité qui diminue avec
l'épaisseur → mise en œuvre délicate pour avoir
des performances supérieures au Cu

Spreaders à base de graphite

Exemple d'utilisation – intégration PCB – MERCE/Ampère

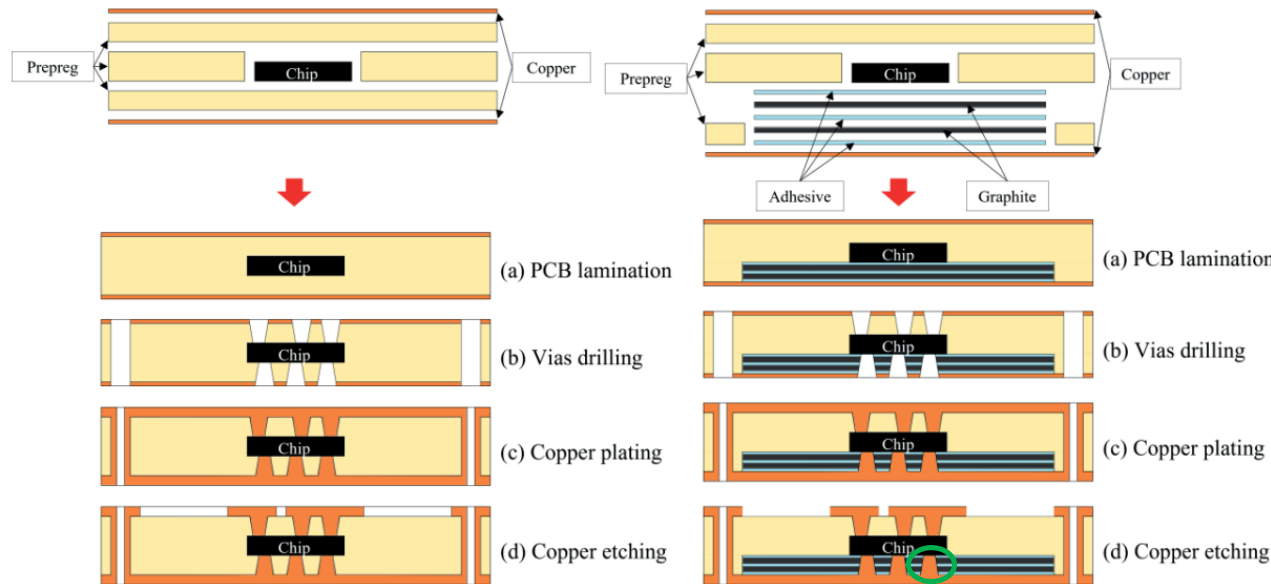
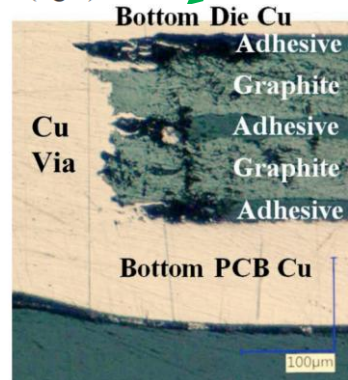


Figure 2: PCB manufacturing process of a classical stack (left) compared to PCB stack with embedded graphite heat spreaders (right).

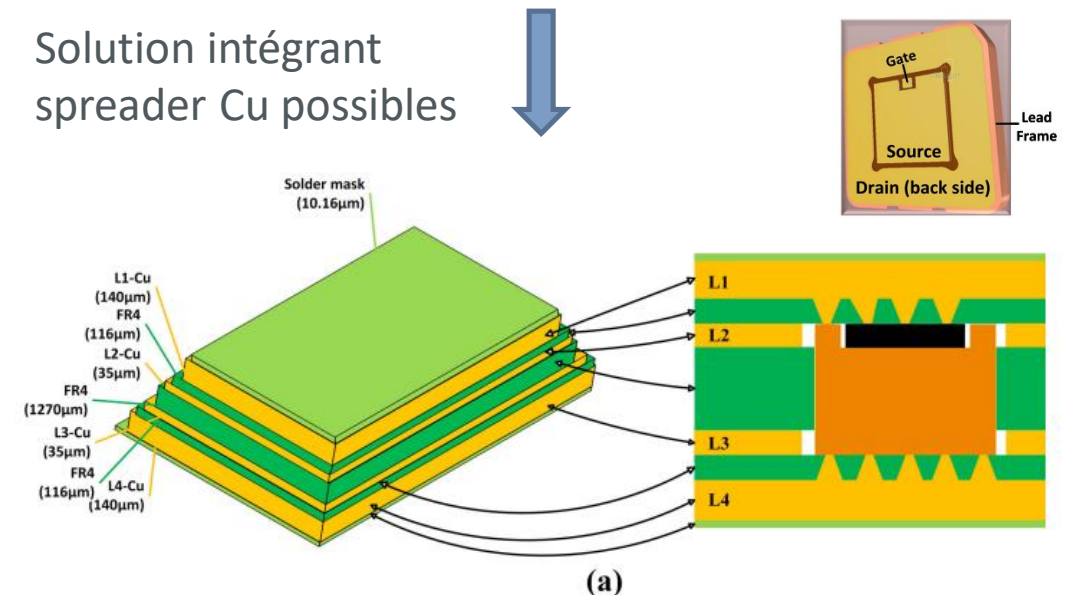
[7] Ahmed Sabry Eltaher Ahmed, High-performance cooling of power semiconductor devices embedded in a printed circuit board, these INSA de Lyon, 2024



Surface de graphite : 20 mm*30 mm (épaisseur PCB 0,8 mm)

Moins performant qu'un boîtier T0247 avec les mêmes conditions de refroidissement.

Solution intégrant spreader Cu possibles

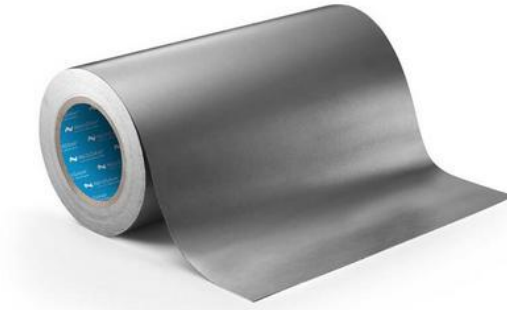


[8] S. Aziz Khan, F. Zhou, M. Wang, D. Le and S. Chaturvedi, "Bare-Die Embedding Technique for Highly Integrated Power Electronics for Small Mobility," in *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 613-622, March 2025, doi: 10.1109/TCPMT.2025.3530398.

Spreaders à base de graphite/graphène

eGraf® SpreaderShield™ Heat Spreaders

- Natural Graphite
 - A variety of in-plane thermal conductivity options from 350 to 600 W/m·K and through-plane thermal conductivity from 2.8 to 4.1 W/m·K
 - A broad range of thicknesses from 0.040mm to 0.94mm



<https://www.neograf.com/products/thermal-management-solutions/egraf-spreadershield/>

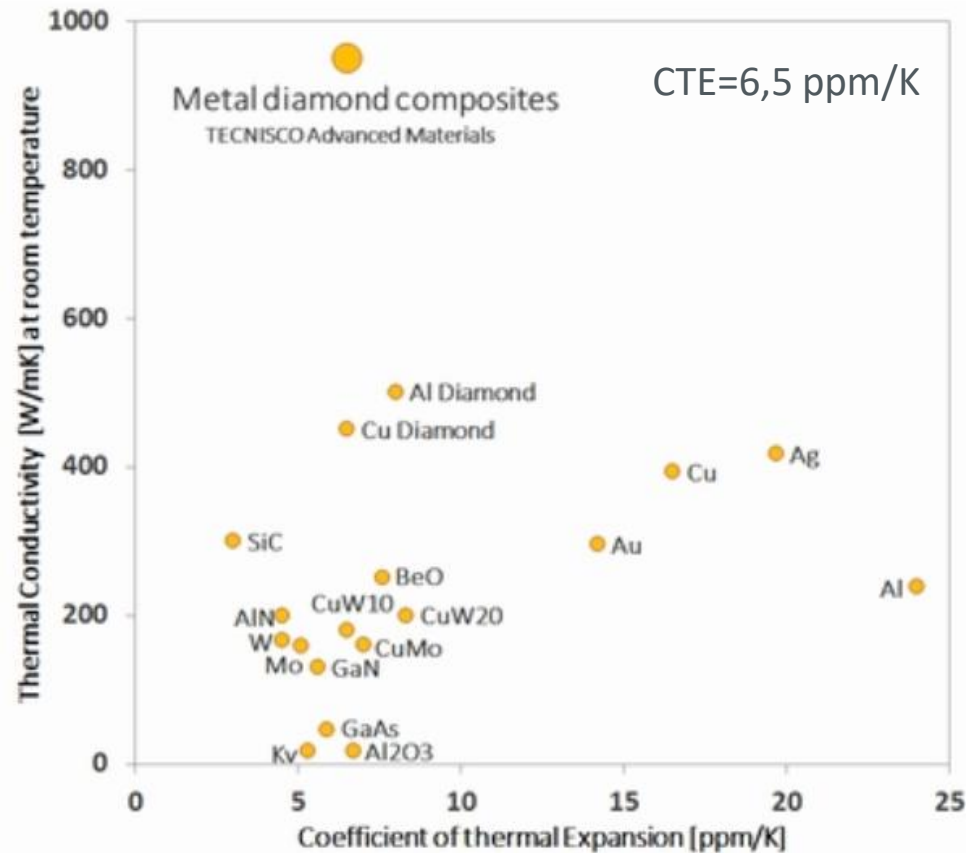
ACOOOL COPPER PRODUCTS



Cu + graphène
<https://amazingcool.cyberbiz.co/en>

Spreaders à base de composites avec du diamant

Dans la littérature: AlD [8], CuD [9], AgD



https://www.tecnisco.com/en/en_product/en_metal/en_metal_diamond_composites.html

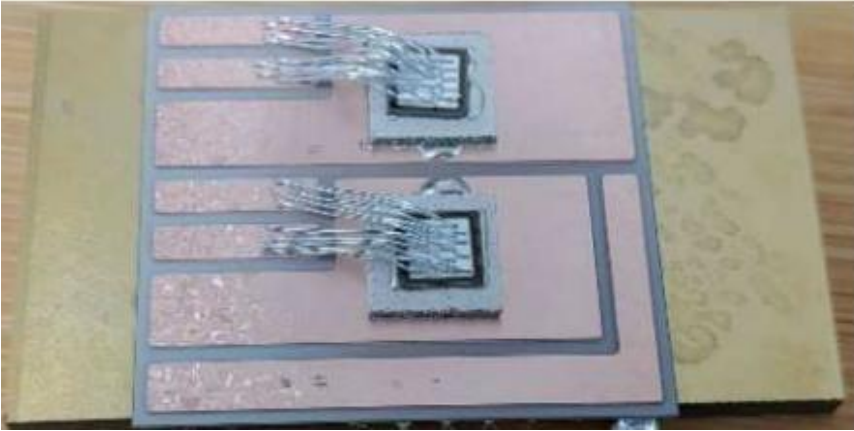


[9] Haizhu Li, Zihan Ju, Qiang Li, Xuemei Chen, Design and optimization of diamond-aluminum thermal spreading substrate for thermal management in high-power electronic devices, Applied Thermal Engineering, Volume 265, 2025, 125662, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125662>.

[10] M. Sakai, S. Teraji and T. Hamano, "Cu/Diamond Composite Heat Spreader for Thermal Management of Advanced Electronic Devices," 2025 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC), Nagano, Japan, 2025, pp. 237-238, doi: 10.23919/ICEP-IAAC64884.2025.11002981.

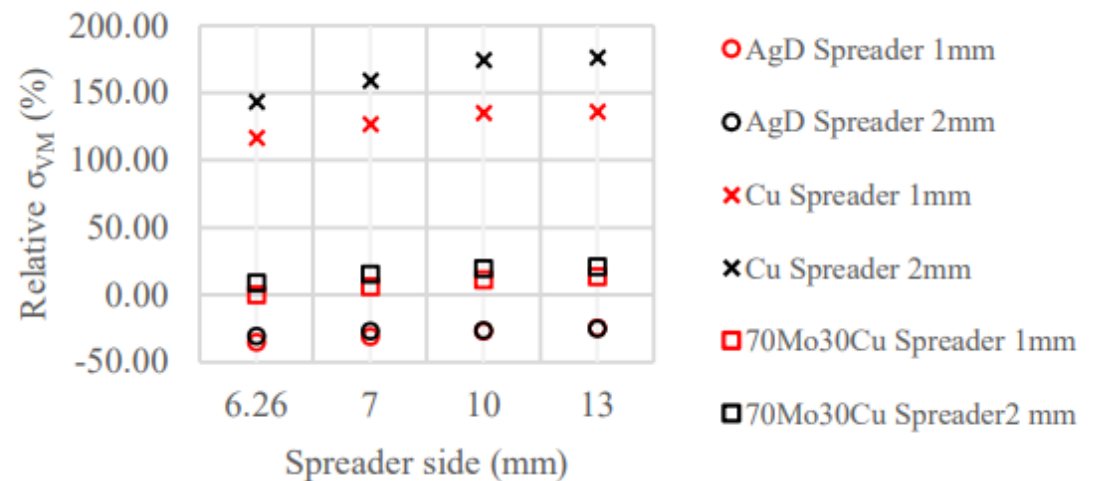
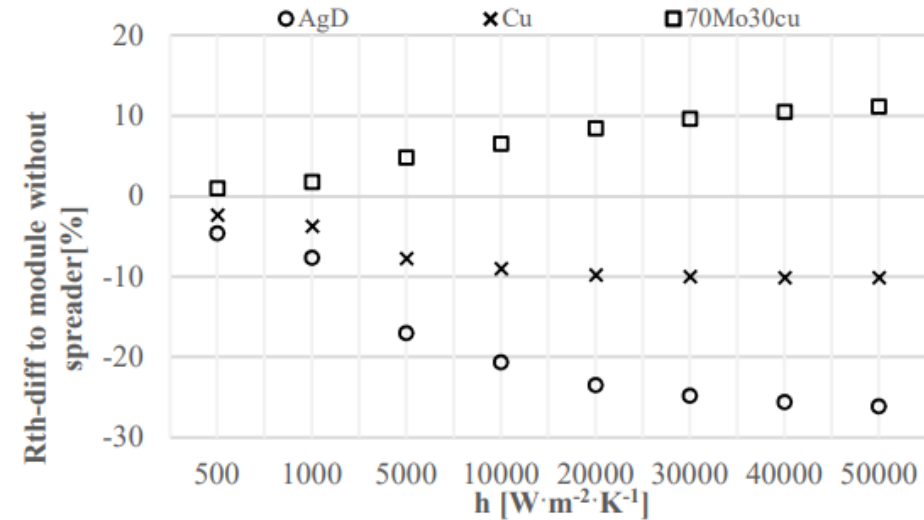
Spreaders à base de composites avec du diamant

Utilisation de l'AgD sous la puce (SAFRAN/G2Elab)



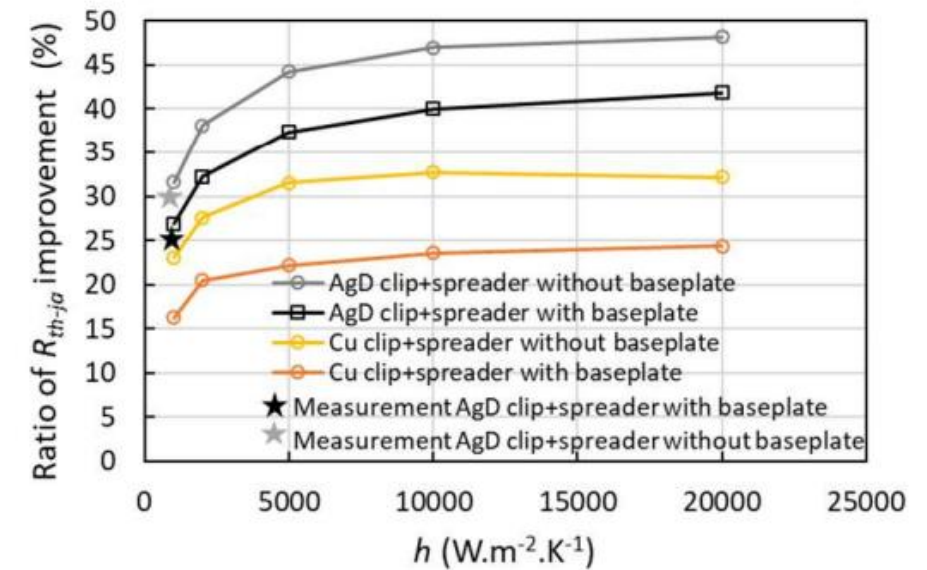
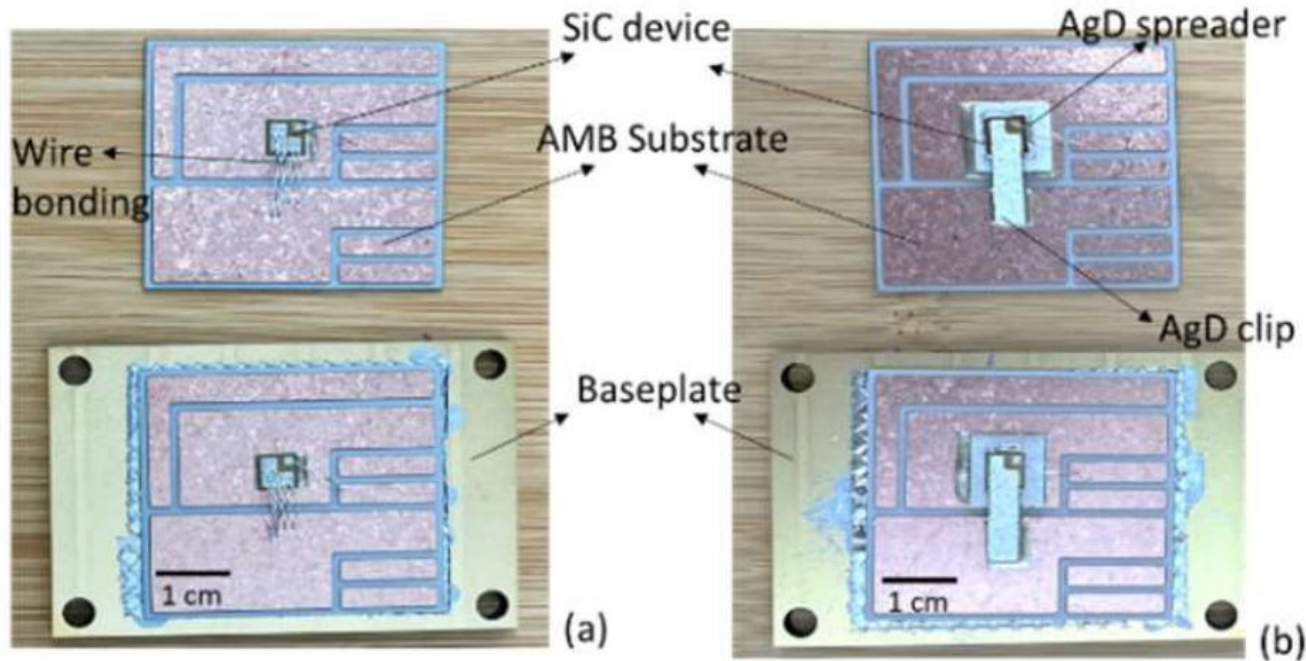
[11] A. C. Ramoneda, Y. Avenas, R. Khazaka, C. Gautier and T. Youssef, "Thermal and thermo-mechanical behavior of internal silver-diamond heat spreaders for power electronic modules," *2024 30th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)*, Toulouse, France, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/THERMINIC62015.2024.10732535.

Spreader 10 mm * 10 mm * 1 mm



Spreaders à base de composites avec du diamant

Utilisation de l'AgD sous la puce + clip (SAFRAN/G2Elab)

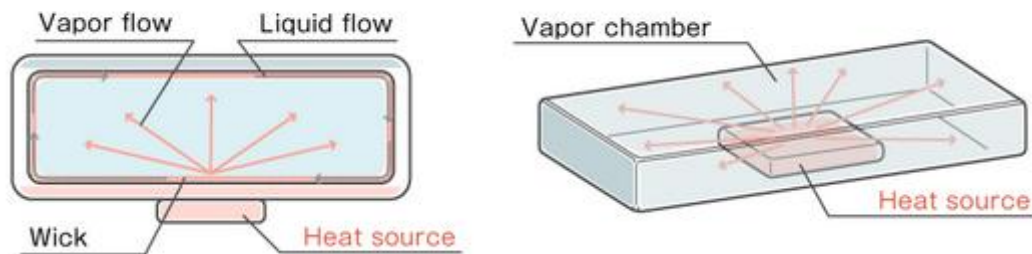


[12] R. Khazaka et al., "Power Devices Sandwiched Between Silver-Diamond Parts for High Performance Module," 2025 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC), Nagano, Japan, 2025, pp. 239-240, doi: 10.23919/ICEP-IAAC64884.2025.11003017.

Vapor chambers

Principe

Vapor Chamber Cross Section



<https://thermal.fujikura.jp>

Conductivité thermique éq. de l'espace vapeur > 10000 W/m/K

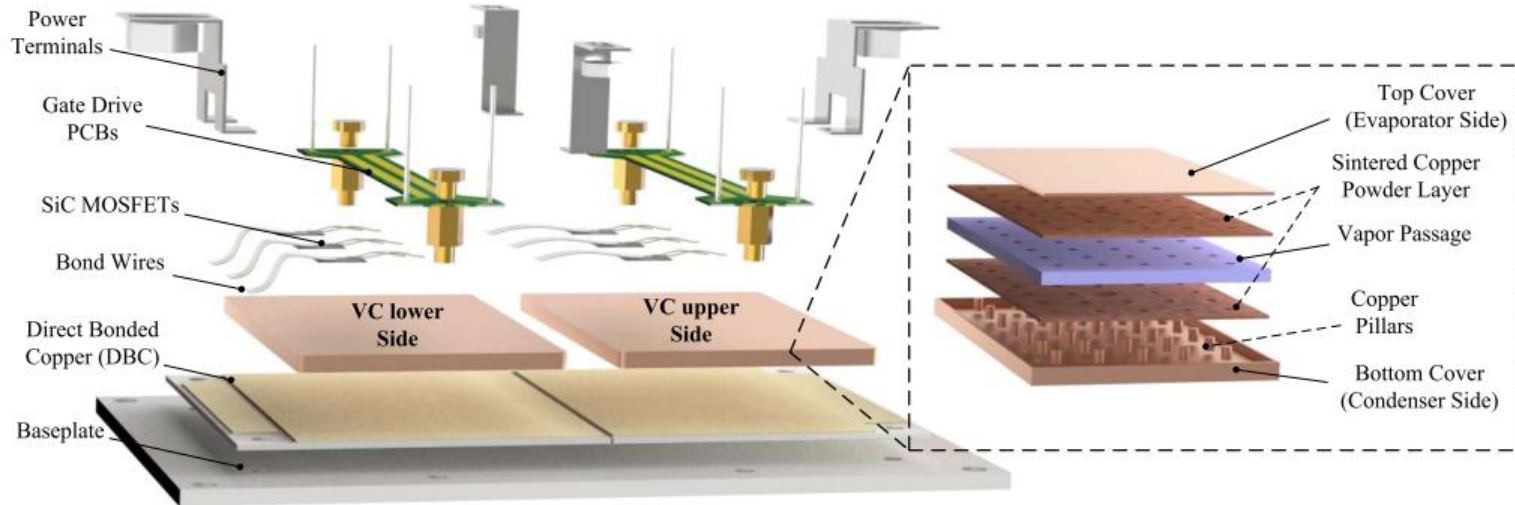
Nécessite un design précis pour chaque application même si solutions sur étagère existent

Référence fabricant		Quantité disponible ?		Prix	
				Prix par quantité	
 	TGVC-106-70-25.5-01 VAPOUR CHAMBER 106X70MM COPPER <i>t-Global Technology</i>	27 En stock		1 : 65,16000 € En vrac	
	VC-106-70-3 STANDARD VAPOR CHAMBER 106X70X3M <i>Wakefield-Vette</i>	236 En stock		1 : 50,64000 € Boîte	
	VC-106-82-3 STANDARD VAPOR CHAMBER 106X82X3M <i>Wakefield-Vette</i>	189 En stock		1 : 63,50000 € Boîte	
	VC-1131-8175-517 STANDARD VAPOR CHAMBER 113.1X81. <i>Wakefield-Vette</i>	5 En stock		1 : 50,64000 € Boîte	

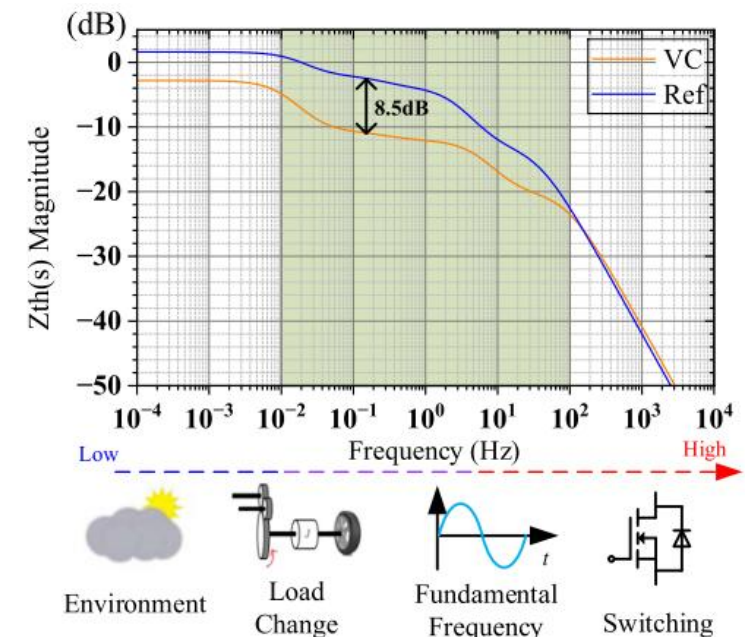
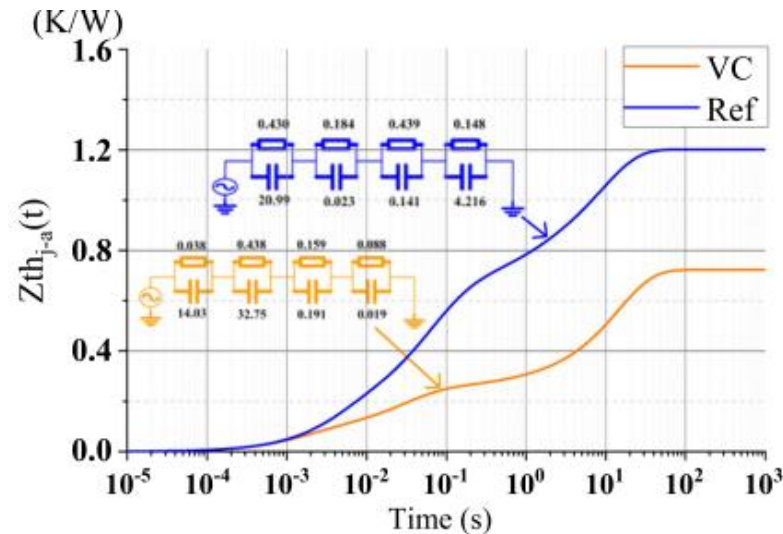
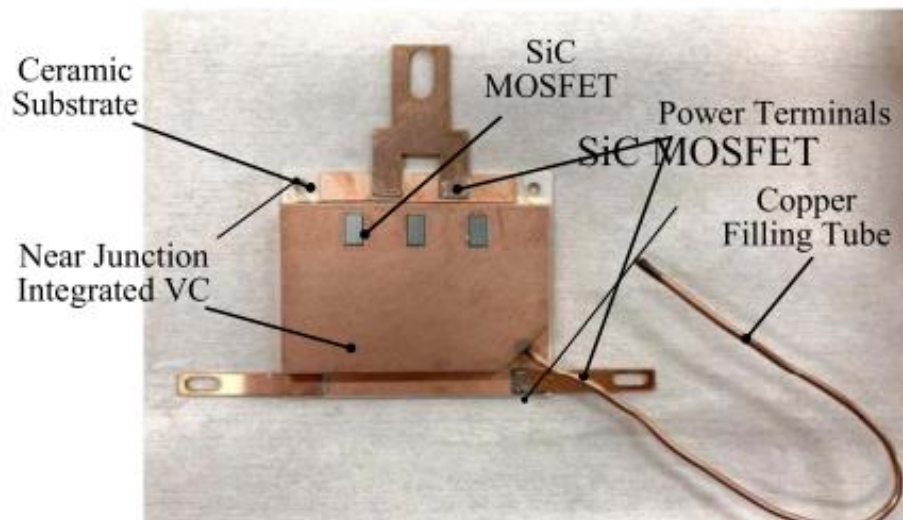
<https://www.digikey.fr>

Vapor chambers

Intégration sous les composants semi-conducteurs (U Cambridge, Jiaotong...)



[13] W. Mu *et al.*, "Near Junction Integration of Vapor Chamber for Transient Thermal Performance Improvements of SiC Power Module," in *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 6, pp. 286-299, 2025, doi: 10.1109/OJPEL.2024.3524492.





Conclusion

Aucune solution de spreader idéale :

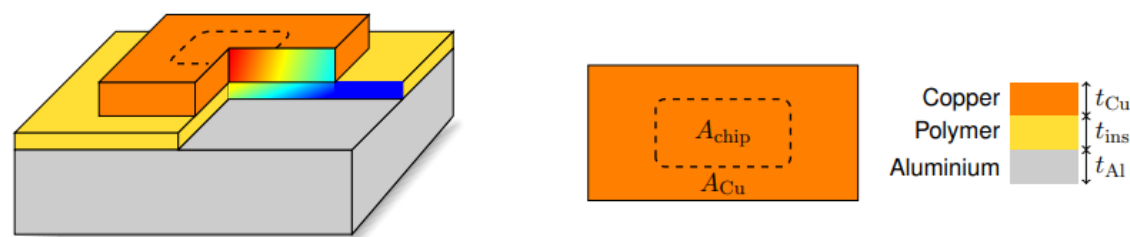
- Cu : conductivité limitée et possibles problèmes de fiabilité,
- Solutions de graphite : problème de la forte anisotropie de conductivité thermique, nécessite un design pour chaque application et une forte surface de spreader,
- AgD : coût, difficile à processor
- Vapor chamber : nécessite un design pour chaque application et une forte surface de spreader

Augmentation de la surface → l'utilisation d'un spreader peut avoir des conséquences sur le comportement électrique des composants commutant rapidement

Conclusion

GaN nécessite une miniaturisation pour limiter les inductances parasites, les capacités parasites.

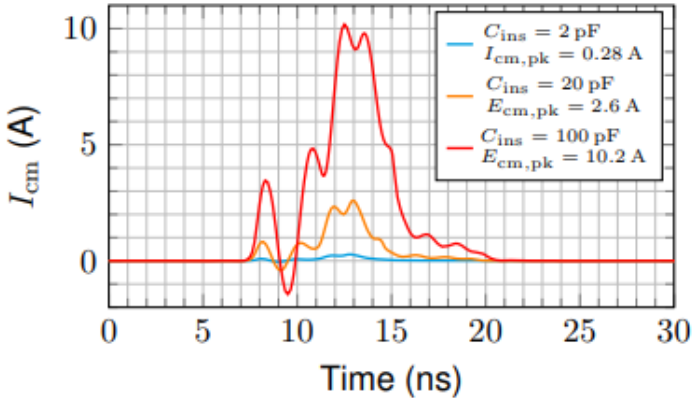
Exemple : impact du spreader sur la capacité parasite isolant (TU Eindhoven)



Tab. 2: Heat spreader measurement results

Material	t_{Cu} [mm]	t_{ins} [mm]	A_{Cu} [mm ²]	$\frac{A_{Cu}}{A_{chip}}$	R_{th} [$\frac{K}{W}$]	C_{ins} [pF]	$\frac{1}{RC}$ [$\frac{W}{pFK}$]	$\frac{\kappa}{\epsilon_0 \epsilon_r}$ [$\frac{W}{pFK}$]
Tclad	1	0.07	33	1.74	2.1	29	0.0164	0.018
Tclad	1	0.07	110	5.79	0.9	92	0.012	0.018
AlN	0.3	1	19	1	0.19	2.5	2.1	2.21

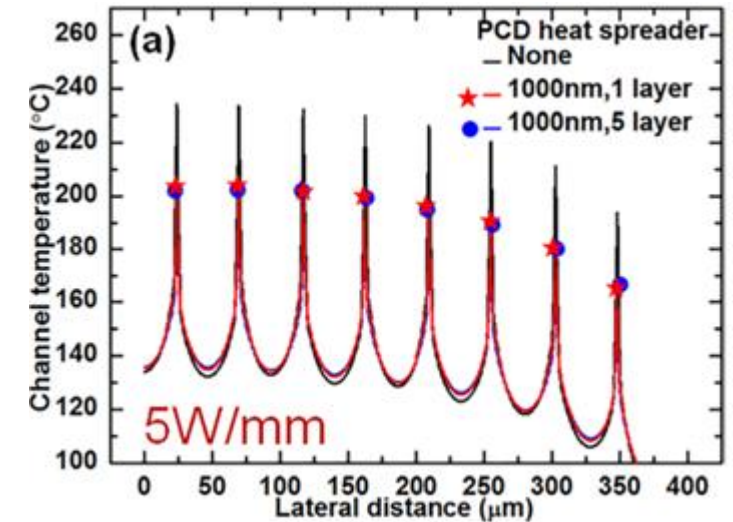
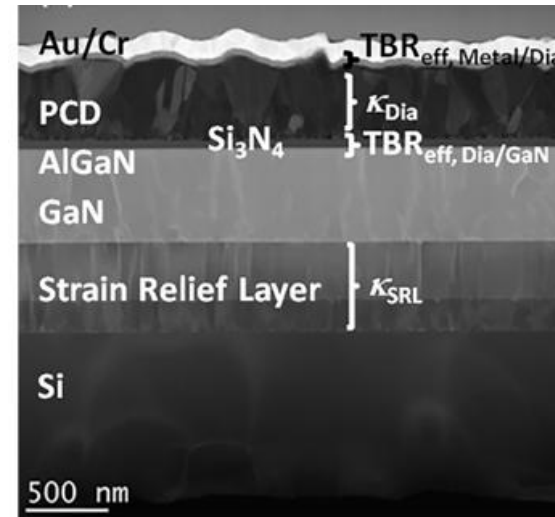
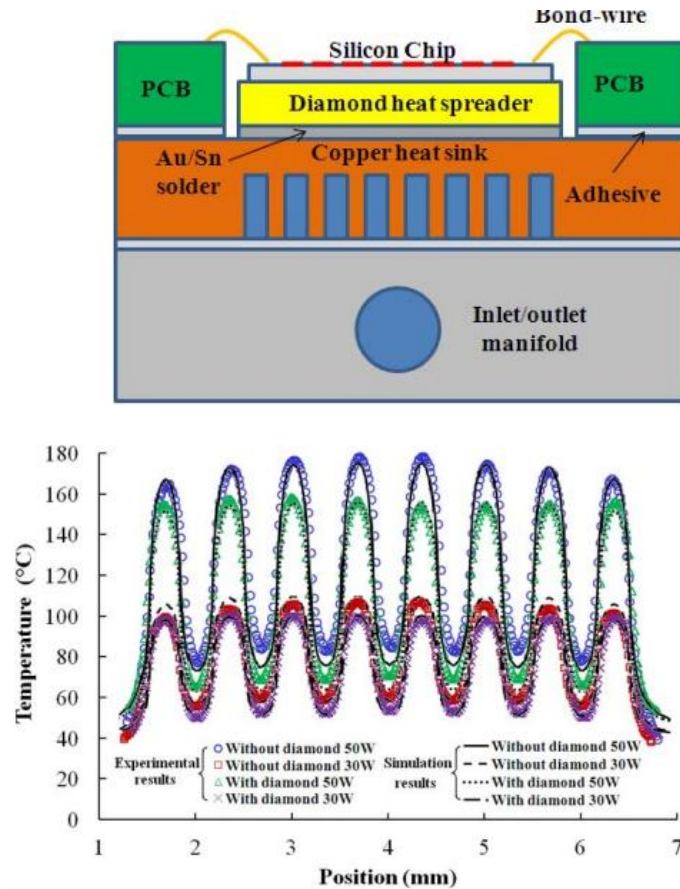
[14] P. Weiler, B. Vermulst, M. Roes and K. Wijnands, "Design Limitations of Heat Spreaders for Gallium Nitride Power Modules," *PCIM Europe digital days 2020; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Germany, 2020, pp. 1-7.



Il faut donc favoriser les matériaux à forte conductivité thermique.

Conclusion

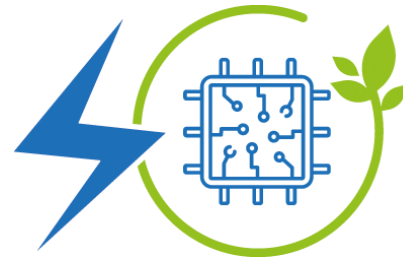
Remarque : dans le cas du GaN, le spreader est souvent envisagé au plus proche de la puce pour diminuer les points chauds : sous la puce [15] ou sur la puce [16]



[16] Yan Zhou, Rajesh Ramaneti, Julian Anaya, Svetlana Korneychuk, Joff Derluyn, Huarui Sun, James Pomeroy, Johan Verbeeck, Ken Haenen, Martin Kuball; Thermal characterization of polycrystalline diamond thin film heat spreaders grown on GaN HEMTs. *Appl. Phys. Lett.* 24 July 2017; 111 (4): 041901. <https://doi-org.sid2nomade-1.grenet.fr/10.1063/1.4995407>



Contact : Yvan.Avenas@g2elab.grenoble-inp.fr



PowerAlps

Université Grenoble Alpes

Paralleling Standardised Very High Frequency DC-DC Power Converters

JUGOO Ansley- **Ph.D Student**

LEMBEYE Yves- **Director**

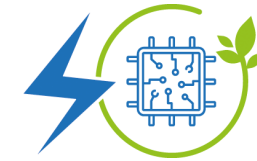
ALLARD Bruno- **Co-Director**

CARCOUET Sébastien- **Supervisor**

SALOMEZ Florentin- **Supervisor**



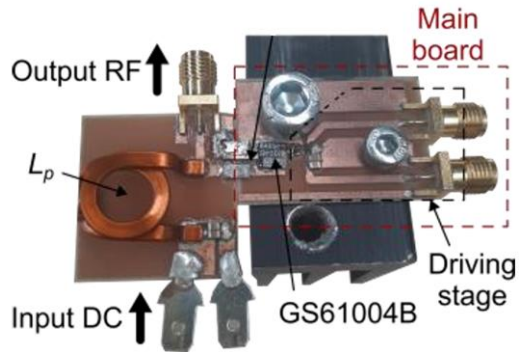
VHF Power Conversion in France:



PowerAlps
Université Grenoble Alpes

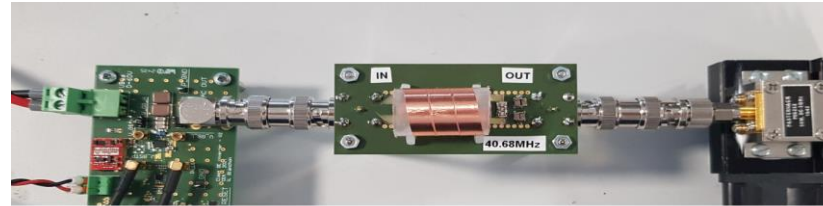
Matthieu BELEY:

Class E inverter 40,68MHz[1]



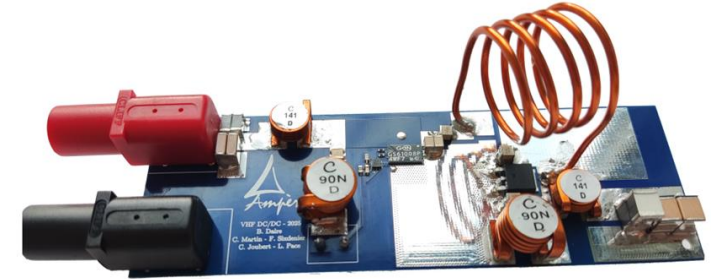
Vincent BLANCHON:

Class DE inverter- 40,68MHz[2]



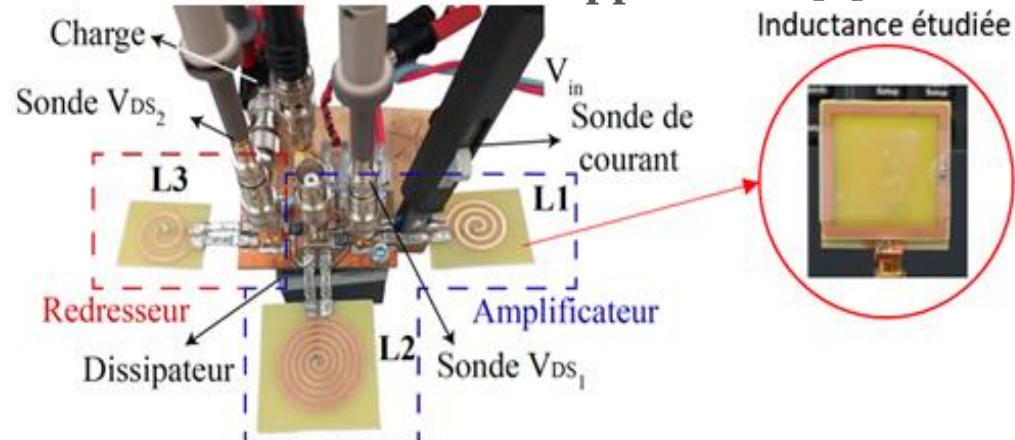
Baptiste DAIRE:

Class ϕ_2 DC-DC converter-15MHz[3]



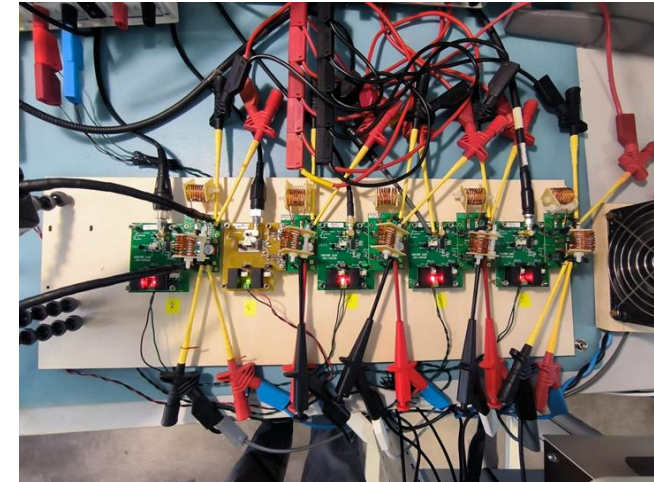
Felipe FREITAS:

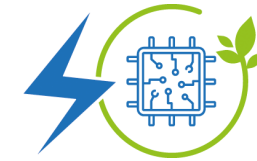
MetaMaterial for VHF applications[4]



Ansley JUGOO:

Parallel Class E2 DC-DC converter- 10MHz[5]

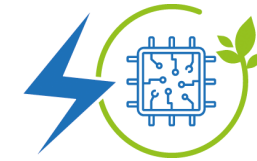




Presentation Content:

- ❖ Research Context Reminder
- ❖ Thesis targets v/s attainments
- ❖ Research Perspectives
- ❖ Conclusion

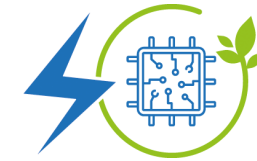
Research Context Reminder:



PowerAlps
Université Grenoble Alpes

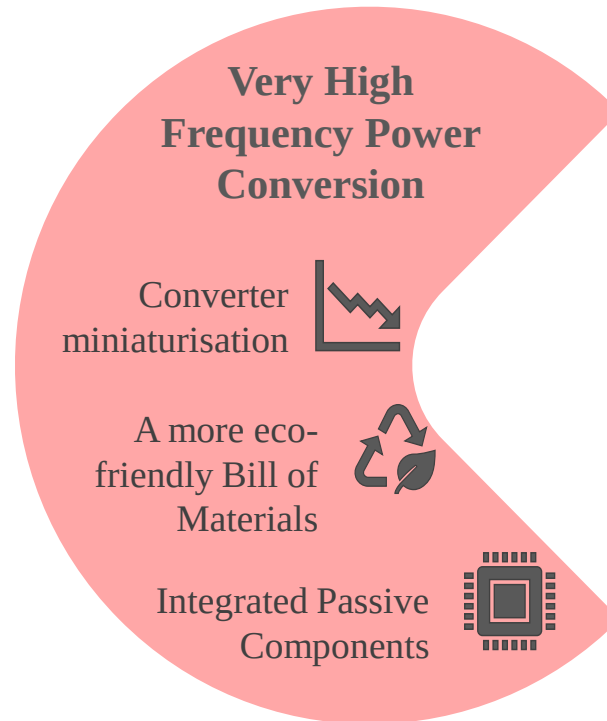
Concept: The main objective is to be able to build a network of **Standardized Very High Frequency** DC-DC Converters that may address a wide range of applications (Wide range of network output Power).

Research Context Reminder:

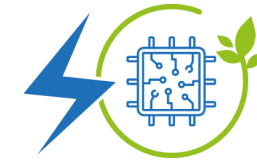


PowerAlps
Université Grenoble Alpes

Concept: The main objective is to be able to build a network of **Standardized Very High Frequency** DC-DC Converters that may address a wide range of applications (Wide range of network output Power).

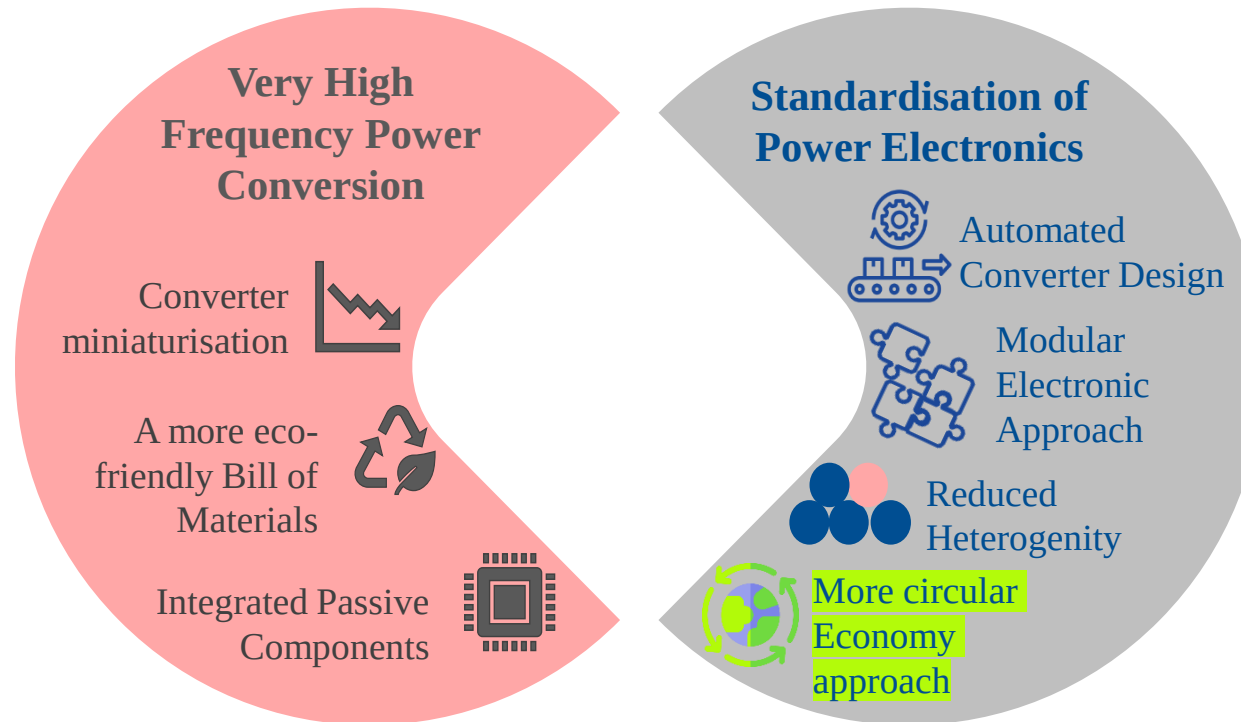


Research Context Reminder:

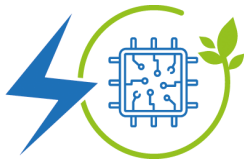


PowerAlps
Université Grenoble Alpes

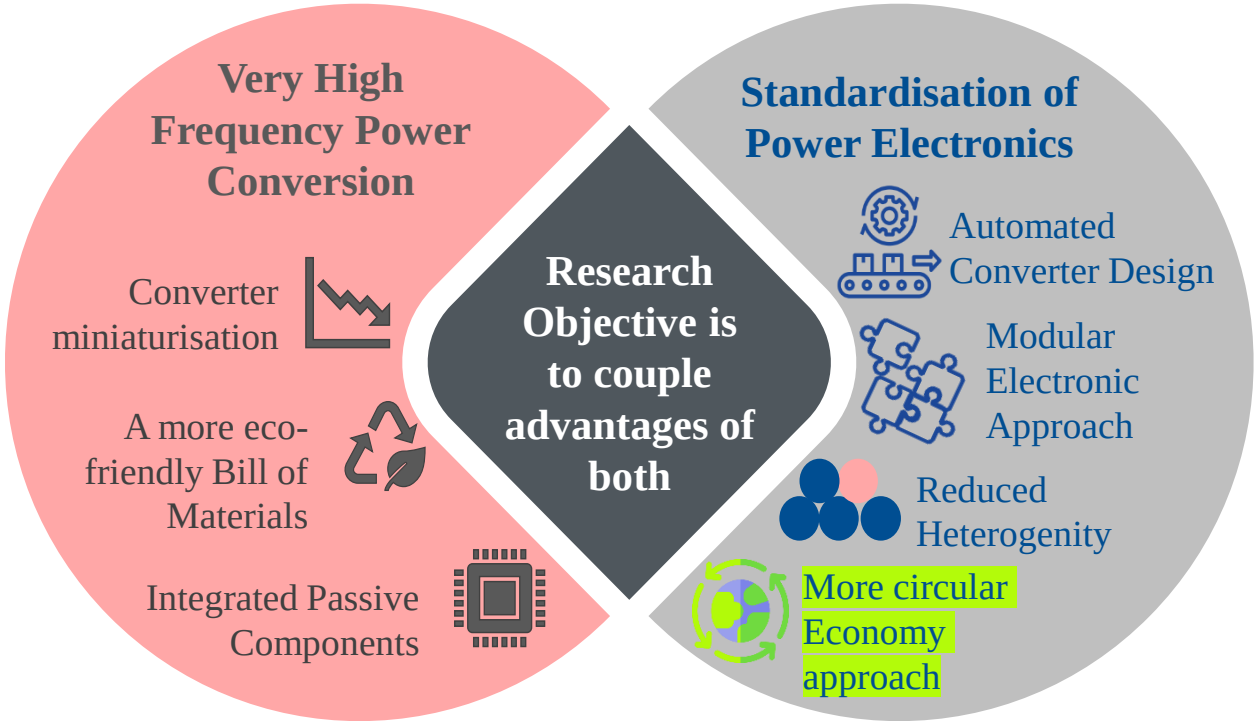
Concept: The main objective is to be able to build a network of **Standardized Very High Frequency DC-DC Converters** that may address a wide range of applications (Wide range of network output Power).



Research Context Reminder:

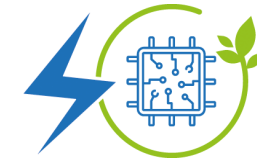


Concept: The main objective is to be able to build a network of **Standardized Very High Frequency DC-DC Converters** that may address a wide range of applications (Wide range of network output Power).



Objectives Set for 2nd year during 1st year:

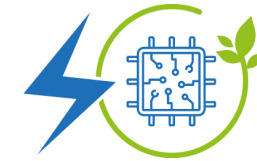
- ❖ Extended Literature Review
- ❖ Topologies comparison
- ❖ Prototype Implementation
- ❖ Paralleling Investigation
- ❖ Publication



PowerAlps
Université Grenoble Alpes

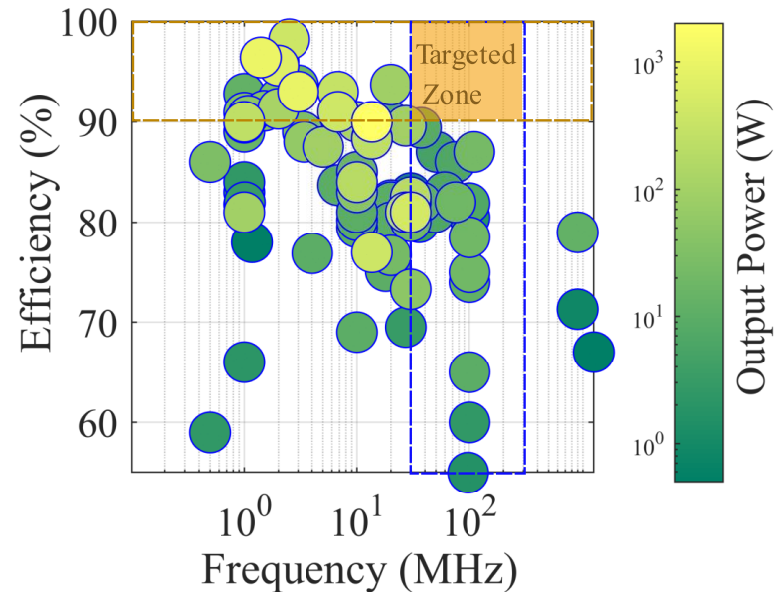
Objectives Set for 2nd year during 1st year:

- ❖ Extended Literature Review
- ❖ Topologies comparison
- ❖ Prototype Implementation
- ❖ Paralleling Investigation
- ❖ Publication



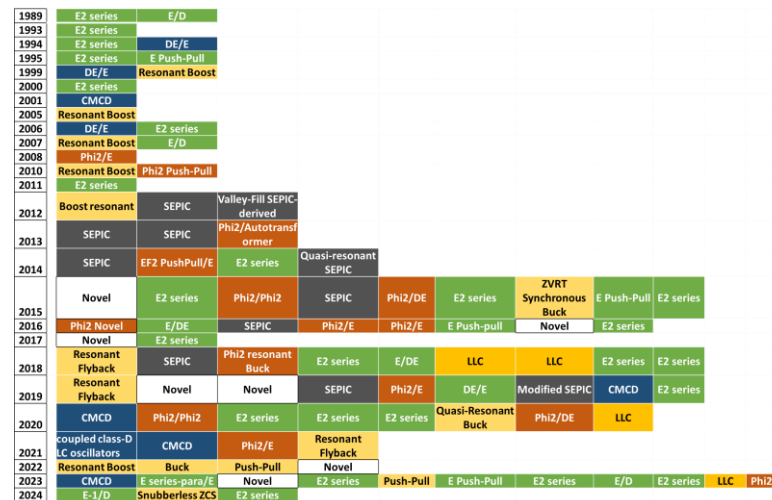
PowerAlps
Université Grenoble Alpes

Analysis of 97 Articles for
DC-DC Resonant Converters



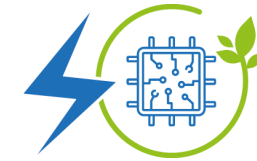
PowerAlps
Université Grenoble Alpes

- ## Conclusion



Objectives Set for 2nd year during 1st year:

- ❖ Extended Literature Review
- ❖ Topologies comparison
- ❖ Prototype Implementation
- ❖ Paralleling Investigation
- ❖ Publication



PowerAlps
Université Grenoble Alpes

04 Number of Resonant Tank: 1,2,3,4?



12 remaining
topologies out of 35

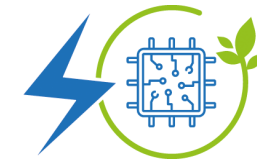
03 Switch Position: Low side or High side?

02 Switching Mode: ZVS or ZCS?

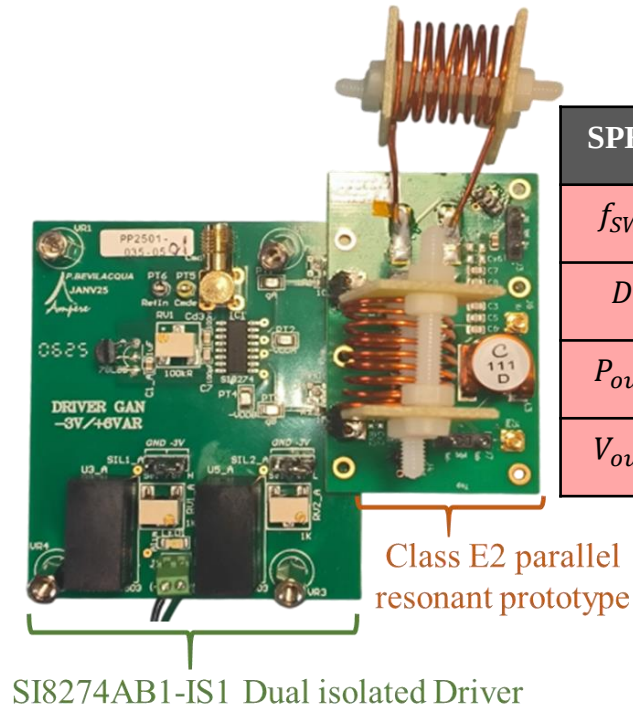
01 Load Independent: Constant Current or Voltage?

Objectives Set for 2nd year during 1st year:

- ❖ Extended Literature Review
- ❖ Topologies comparison
- ❖ Prototype Implementation
- ❖ Paralleling Investigation
- ❖ Publication



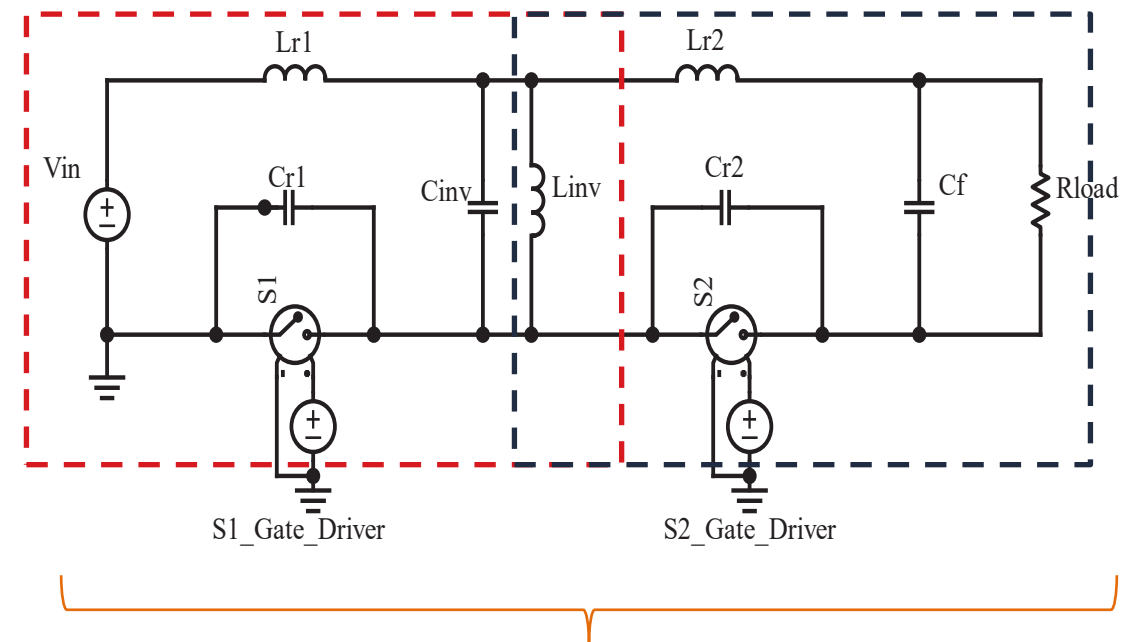
PowerAlps
Université Grenoble Alpes



SPECIFICATIONS	
f_{sw}	10 MHz
D	0,5
P_{out}	10W
V_{out}	20V

Parallel resonant inverter

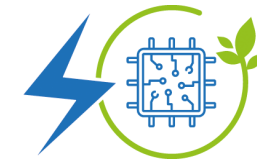
Synchronous Rectifier



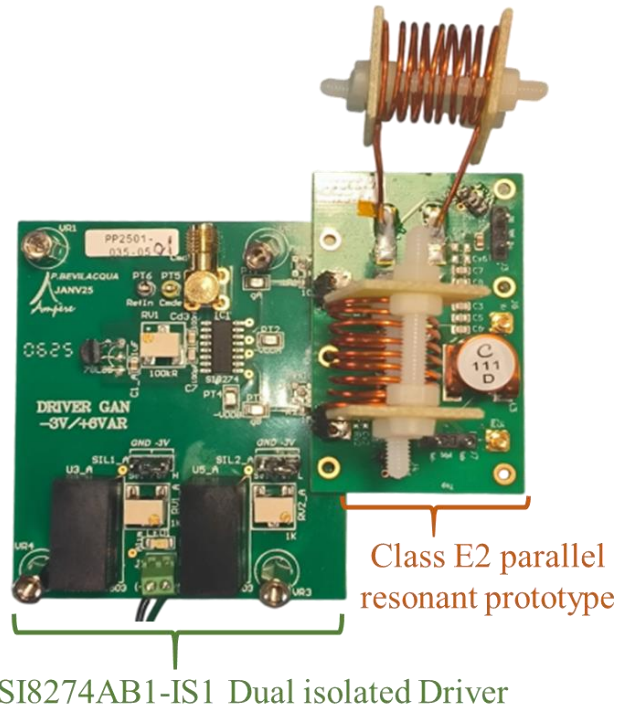
Class E2 DC-DC Parallel Resonant Converter

Objectives Set for 2nd year during 1st year:

- ❖ Extended Literature Review
- ❖ Topologies comparison
- ❖ Prototype Implementation
- ❖ Paralleling Investigation
- ❖ Publication



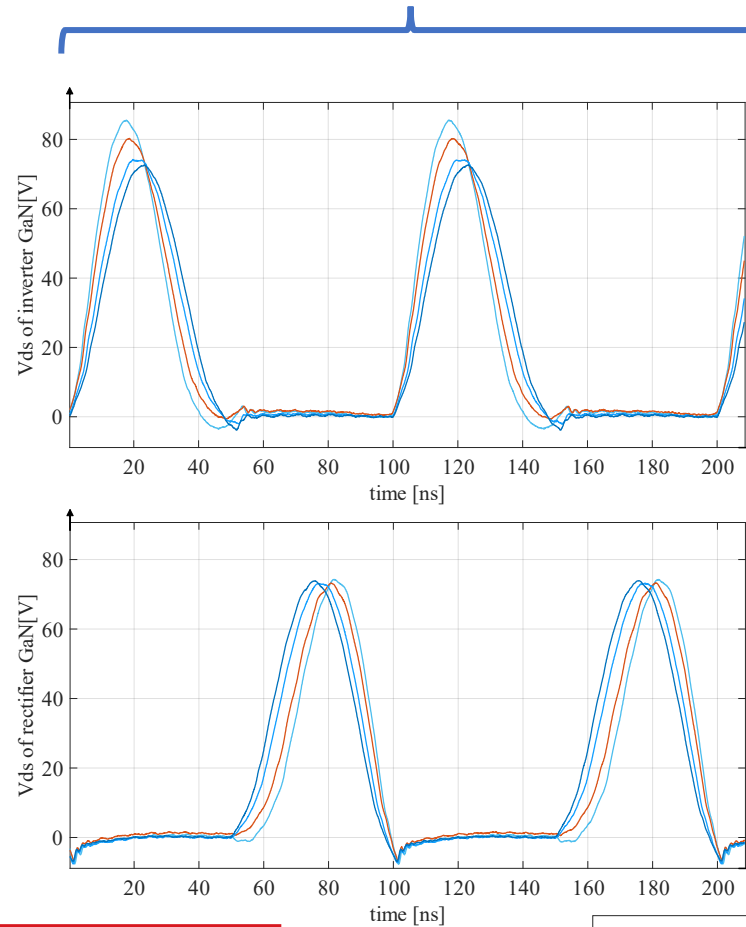
PowerAlps
Université Grenoble Alpes



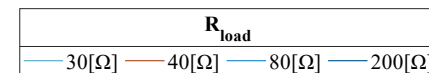
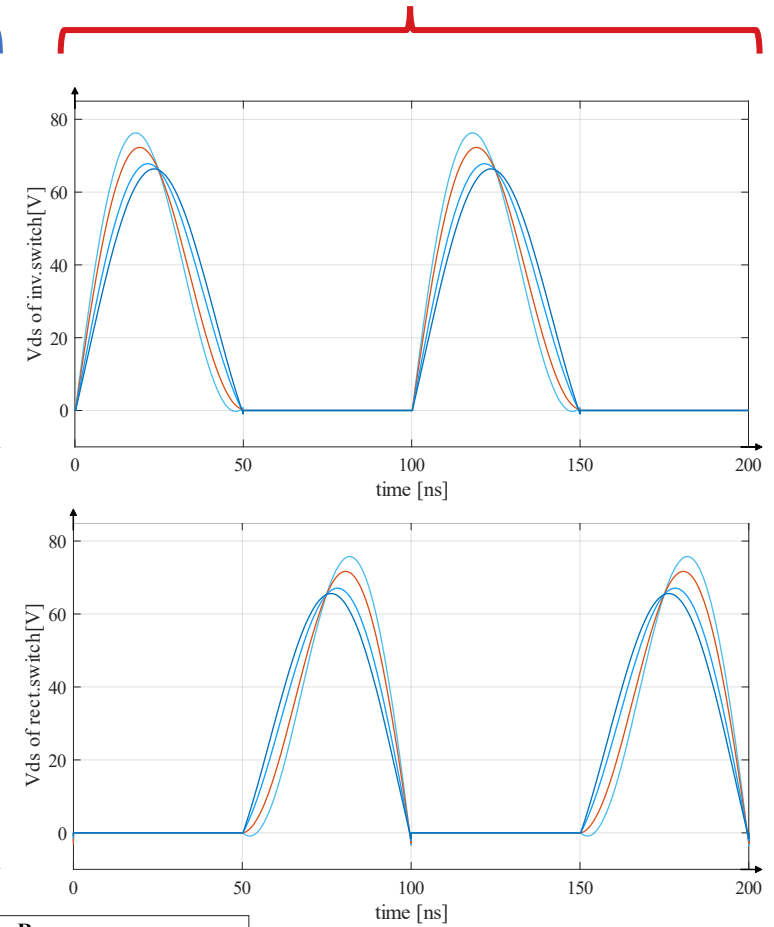
Class E2 parallel resonant prototype

SI8274AB1-IS1 Dual isolated Driver

Experimental

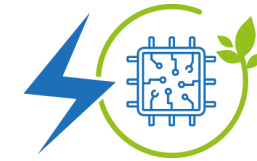


Simulation



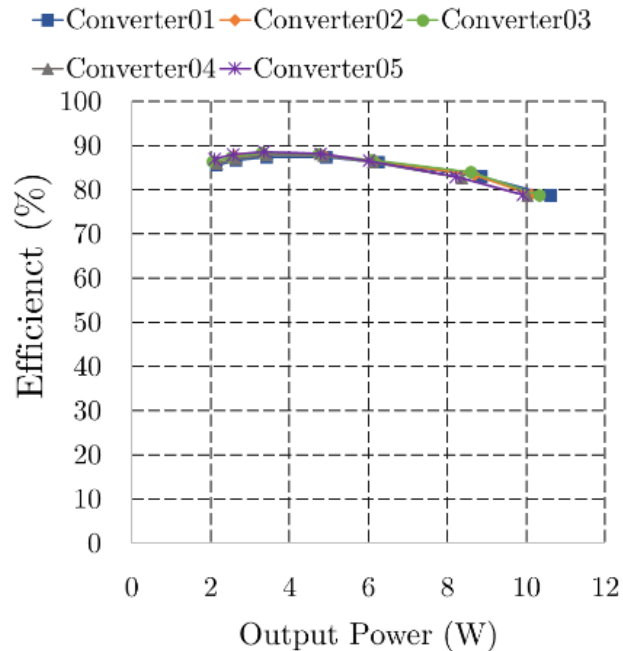
Objectives Set for 2nd year during 1st year:

- ❖ Extended Literature Review
- ❖ Topologies comparison
- ❖ Prototype Implementation
- ❖ Paralleling Investigation
- ❖ Publication

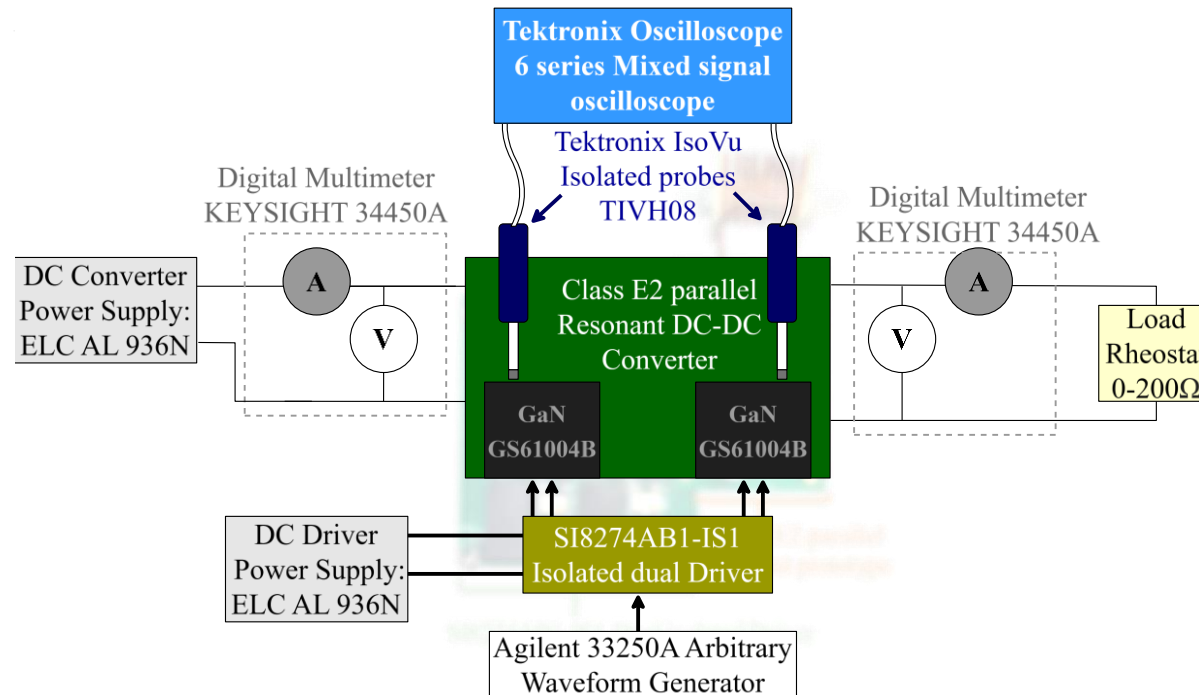


PowerAlps
Université Grenoble Alpes

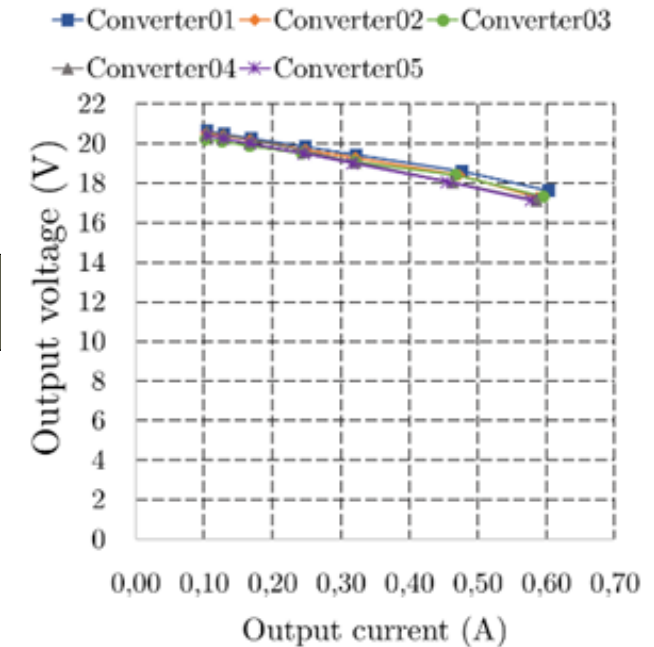
EFFICIENCY V/S OUTPUT
POWER OF 5 CONVERTERS



IMPLEMENTED TESTBENCH

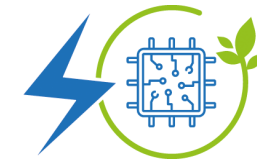


V/I CHARACTERISTICS OF
5 CONVERTERS



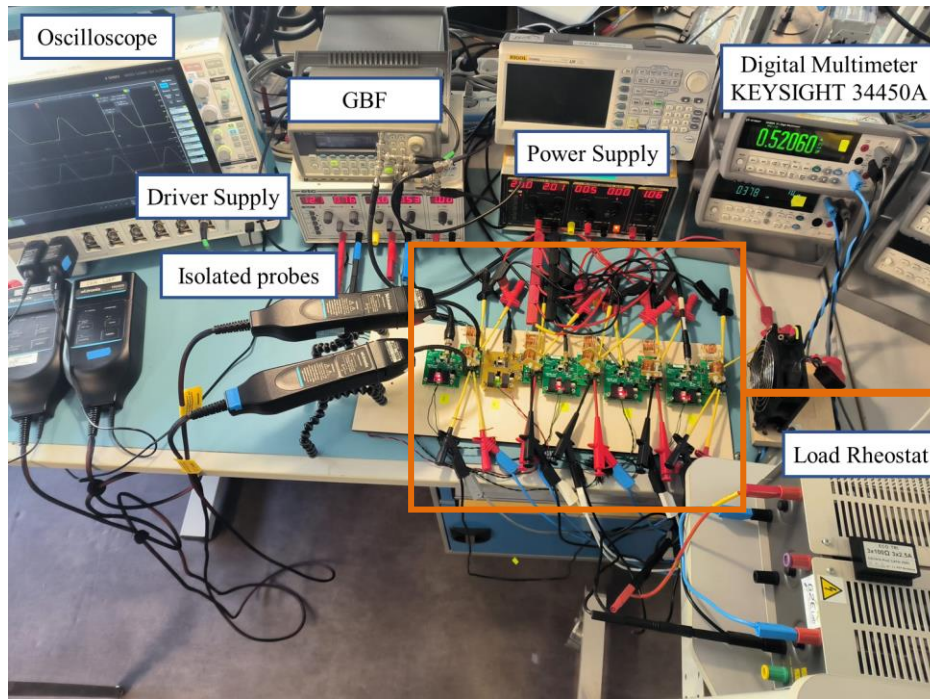
Objectives Set for 2nd year during 1st year:

- ❖ Extended Literature Review
- ❖ Topologies comparison
- ❖ Prototype Implementation
- ❖ Paralleling Investigation
- ❖ Publication

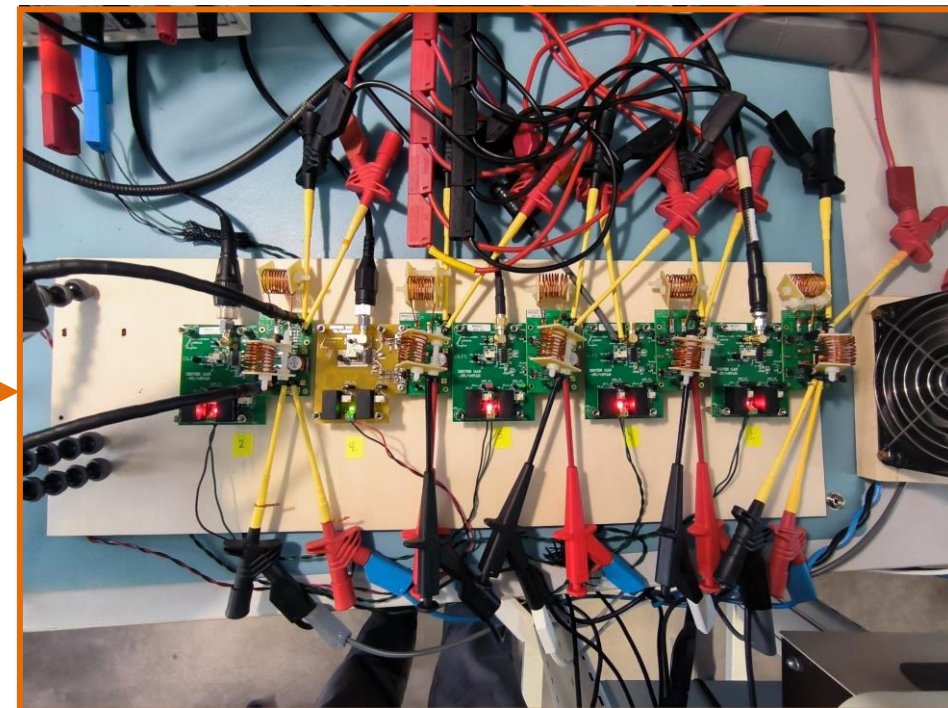


PowerAlps
Université Grenoble Alpes

TESTBENCH FOR PARALLELING ANALYSIS

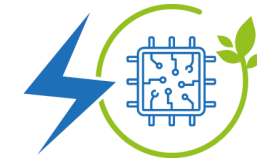


5 PARALLEL CONVERTERS



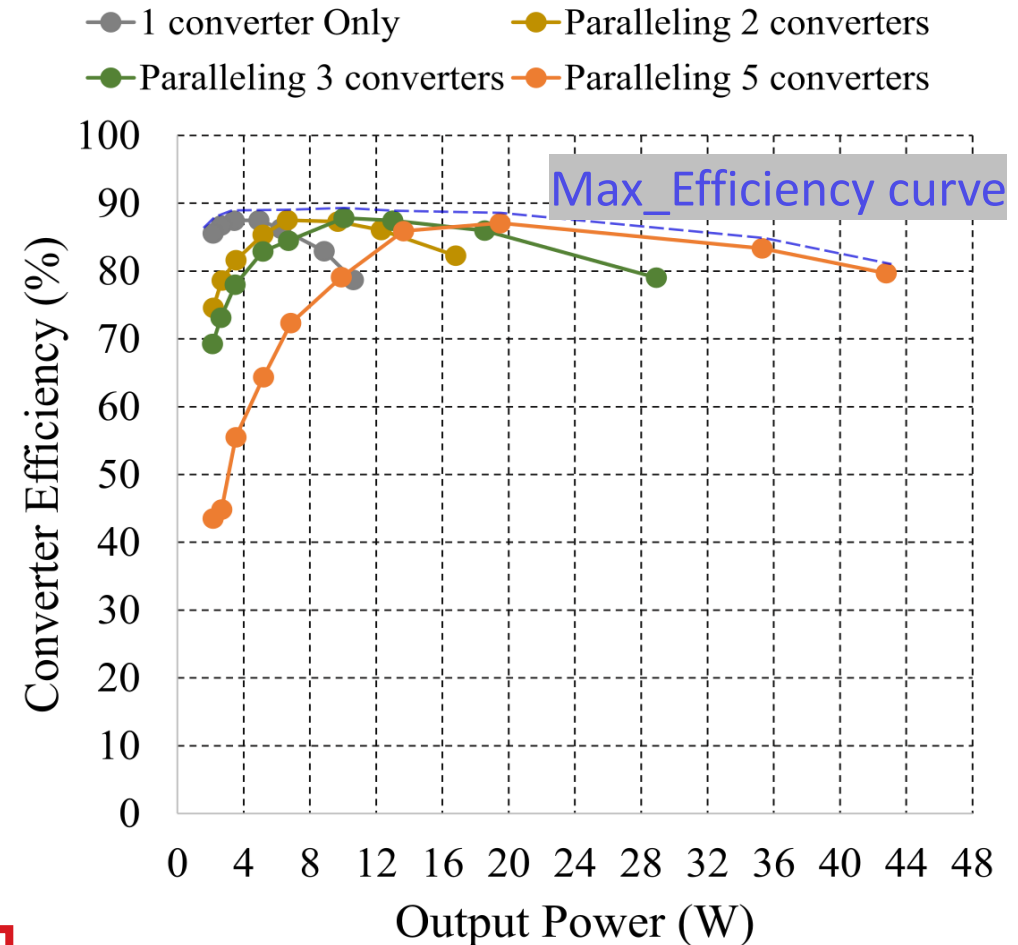
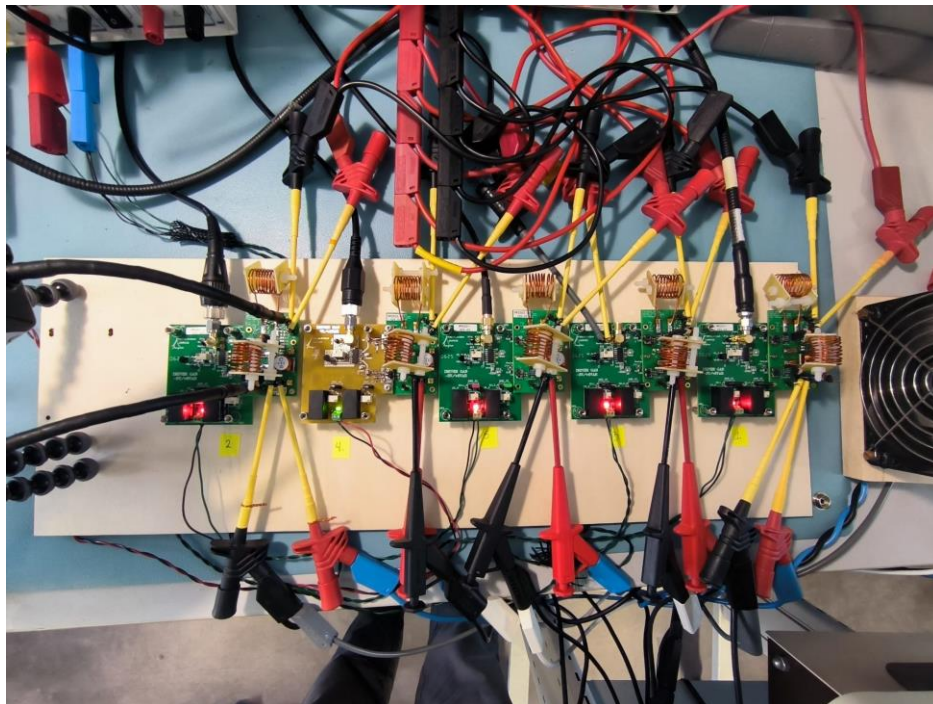
Objectives Set for 2nd year during 1st year:

- ❖ Extended Literature Review
- ❖ Topologies comparison
- ❖ Prototype Implementation
- ❖ Paralleling Investigation
- ❖ Publication



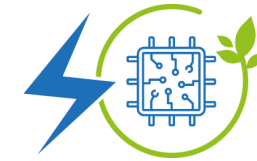
PowerAlps
Université Grenoble Alpes

5 PARALLEL CONVERTERS



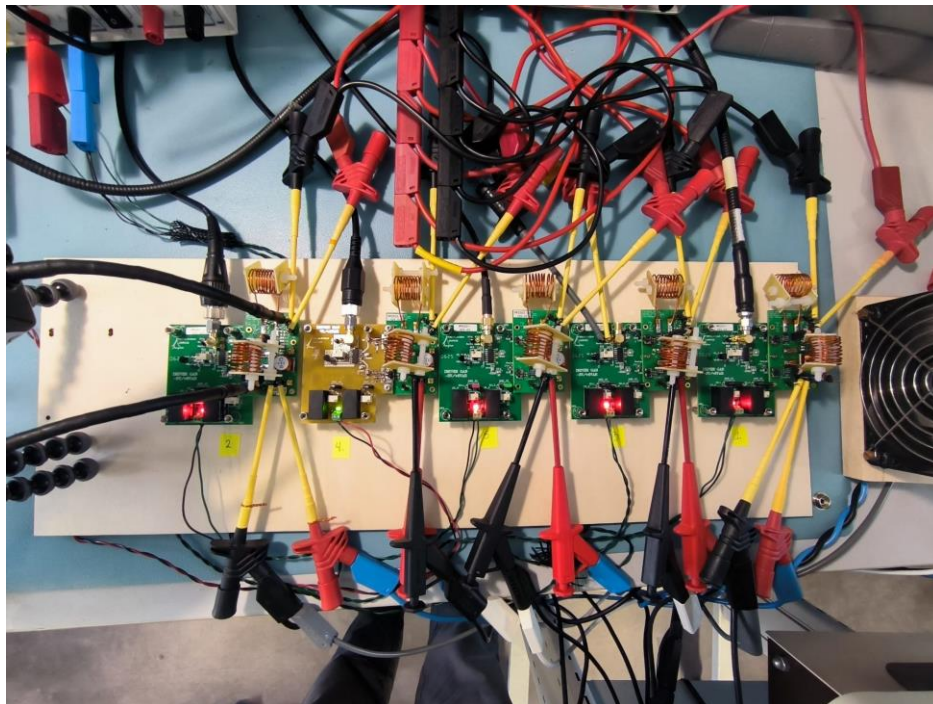
Objectives Set for 2nd year during 1st year:

- ❖ Extended Literature Review
- ❖ Topologies comparison
- ❖ Prototype Implementation
- ❖ Paralleling Investigation
- ❖ Publication



PowerAlps
Université Grenoble Alpes

5 PARALLEL CONVERTERS

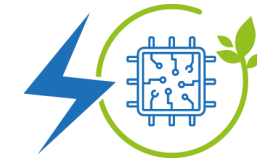


EXPERIMENTAL COMPARISON FOR DIFFERENT
PARALLELING CONFIGURATION

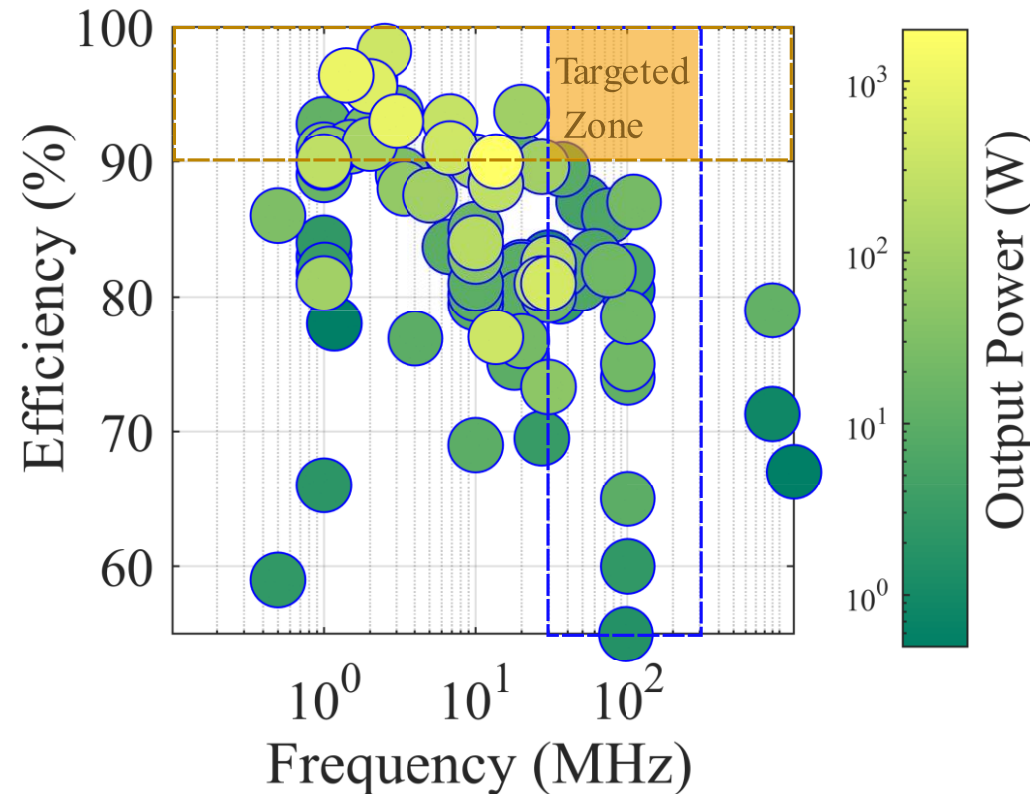
No. Of parallel converters	Above 80% load range, Pmin- Pmax (W)			Peak Efficiency (%)	Peak output voltage, Vpeak (V)	Equivalent series resistance Rser (Ω)
1	2	-	10	87.50	21.325	5.36
2	3	-	17.5	88.00	21.215	2.99
3	4	-	28	87.83	20.9	1.97
5	10	-	43	87.07	20.88	1.29

Objectives Set for 2nd year during 1st year:

- ❖ Extended Literature Review
- ❖ Topologies comparison
- ❖ Prototype Implementation
- ❖ Paralleling Investigation
- ❖ Publication

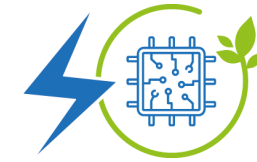


PowerAlps
Université Grenoble Alpes

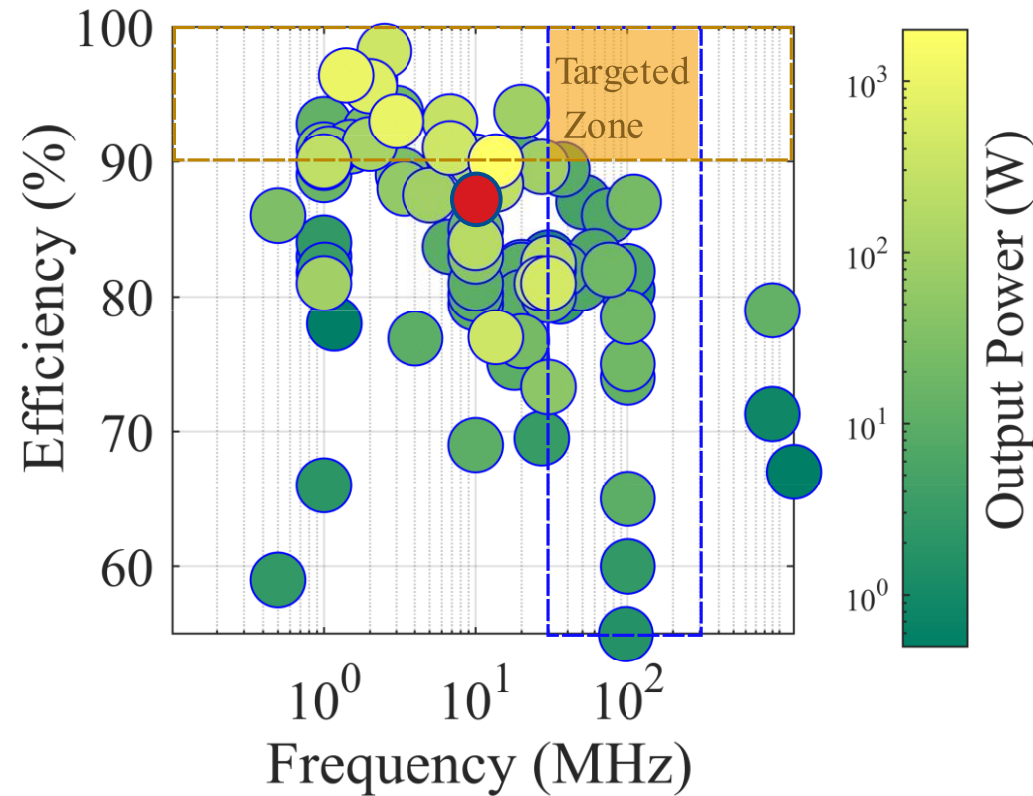


Objectives Set for 2nd year during 1st year:

- ❖ Extended Literature Review
- ❖ Topologies comparison
- ❖ Prototype Implementation
- ❖ Paralleling Investigation
- ❖ Publication

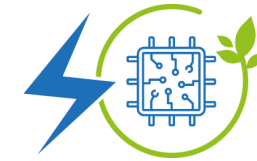


PowerAlps
Université Grenoble Alpes



Objectives Set for 2nd year during 1st year:

- ❖ Extended Literature Review
- ❖ Topologies comparison
- ❖ Prototype Implementation
- ❖ Paralleling Investigation
- ❖ Publication



PowerAlps
Université Grenoble Alpes

Objectives Set for 2nd year during 1st year:

- ❖ Extended Literature Review
- ❖ Topologies comparison
- ❖ Prototype Implementation
- ❖ Paralleling Investigation
- ❖ Publication



PowerAlps
Université Grenoble Alpes

Identification of Best Candidate Topology for Paralleling Standardised VHF DC-DC Power Converters

Antsley Jago
G2Elab, UMR5269
Unit: Grenoble-Alpes, CNRS, Grenoble INP
Grenoble, France
antsley.jago@grenoble-inp.fr

Florentin Salomez
G2Elab, UMR5269
Unit: Grenoble-Alpes, CNRS, Grenoble INP
Grenoble, France
florentin.salomez@grenoble-inp.fr

Sébastien Carcouet
CEA LETI, D2TS
Unit: Grenoble-Alpes, CEA, Leti-Lyon, F-38000 Grenoble, France
sebastien.carcouet@cea.fr

Bruno Allard
Ampere, UMR5005
Unit: Lyon, INSA Lyon, Unit Lyon 1, Ecole Centrale Lyon, CNRS
Villurbanne, France
bruno.allard@cea.fr

Yves Lembey
G2Elab, UMR5269
Unit: Grenoble-Alpes, CNRS, Grenoble INP
Grenoble, France
Yves.Lembey@grenoble-inp.fr

Abstract—This paper describes the ongoing research towards identifying a best candidate topology of Very High Frequency power converter with the goal of paralleling standard cells. Such an association of similar elementary converters requires fast independence. A benchmarking highlights a Class E2 resonant DC-DC converter. The paper details the selection and identify equipment needs for testing the candidate topology as well as a parallel association.

Index Terms—VHF, Converter, DC-DC, Paralleling, Class E

1. INTRODUCTION

Very high frequency power conversion was first introduced in 1950 with the development of the first Class D switching mode power amplifier. Since then, many studies have been conducted toward implementation of Very High Frequency (VHF) power conversion concept to power converters. It is true that a drastic increase in switching frequency imply numerous advantages in terms of increased power density, use of air core inductors and integration of passive components [1]. This is because the amount of energy circulating through the passive components are of smaller amount. This allows for the use of smaller size passive components [2]. Nevertheless, increasing switching frequency implies practical disadvantages such as high switching losses, core losses and complex dead-time implementation. Back in time, when Nathan, O. Sokol introduced the first single switch class E power amplifier [3]. This was a breakthrough as this topology could support soft-switching characteristics also known as Zero-Voltage Switching (ZVS). Still at that time, semiconductor technologies were not adequate for high switching frequency as their parasitic components were too high and with too slow rise-time. But when GaN technology was commercialised in 2004 [4], this has renewed the interest in high frequency power conversion. Figure 1 shows the institutions which have contributed in VHF

power conversion during the past 10 years. The countries that are the most involved in VHF power conversion are Denmark, USA, China and Japan. The typical targeted applications by these work is mainly related to wireless power transfer (WPT) [5], LED driver [6], Plasma generation [7] and Power tracking system [8].

Fig. 1: WorldMap of VHF Actors during the past 10 years (2014-2024)

Power converters with switching frequency of 13.56MHz proposed in [9] and [10] was able to provide an output power of 20W and 14W respectively. Still few researches have been done with regards to high power application of VHF Power converters. This is due to the fact that physical constraints, limited GaN MOSFETs voltage and current rating and gate drivers performance do not allow for high power application of VHF Power conversion. Therefore, the application has renewed the interest in high frequency power conversion. Figure 1 shows the institutions which have contributed in VHF

Contributions à la conversion d'énergie électrique à très haute fréquence

Mathieu BELEY¹, **Vincent BLANCHON²**, **Baptiste DAIRE³**, **Felipe FREITAS³**, **Antsley JAGO⁴**, **Loïc LOTT⁵**, **PACÉ⁶**, **Florentin SALOMEZ⁷**

¹ Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, Ampère, UMR5005, 69130 Ecully, France
² Unit: Grenoble-Alpes, CEA, Leti-Lyon, F-38000 Grenoble, France
³ Unit: Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2Elab, 38000 Grenoble, France

RESUME — Ce travail présente de manière générale les enjeux et verrous liés à la conversion de puissance à très haute fréquence de découpage (HFVDF), avec un résumé des différents contributions de G2Elab, du CEA et d'Ampère sur cette thématique de recherche. Ces travaux portent sur l'étude des topologies d'onduleurs dans la bande VHF en introduisant des méthodes de dimensionnement simplifiées garantissant l'augmentation de leurs performances. La robustesse et la modularité des convertisseurs DC-DC VHF sont abordées au travers d'une méthode de dimensionnement et de la mise en parallèle de convertisseurs : robuste et optimisée. Une optimisation des inductances à air dans une volume contraint, ainsi que l'utilisation de antennes, sont des solutions innovantes pour améliorer la densité de puissance, sont proposées.

Mots-clés — Conversion VHF, ZVS/ZCS, convertisseur résonant, DC-DC, composants GaN, inductances à air, metamatériaux

1. INTRODUCTION

La montée en fréquence des convertisseurs d'électronique de puissance est un axe de recherche activement étudié pour répondre à la demande de systèmes énergétiques compacts. Par ailleurs, l'augmentation de la fréquence de découpage conduit inévitablement à des pertes plus élevées, notamment dans les semi-conducteurs et les composants magnétiques.

Afin de pallier ces difficultés, l'électronique de puissance à haute (HF : 3-30 MHz) et très haute fréquence (VHF : 30-300 MHz) de découpage vise à augmenter de haut rendements de conversion en exploitant des topologies résonantes inspirées des classes d'amplificateurs radiofréquences, et s'affranchissant ainsi des matrices magnétiques et des pertes par conduction inhérentes à leur fonctionnement [1]. Aujourd'hui, cette thématique de recherche fait face à de nombreux défis en terme de conception du fait notamment de la sensibilité accrue des topologies VHF aux éléments parasites et aux variations de charge (changement de points de fonctionnement) [2].

Dans ce contexte, cet article présente les points et les pratiques des travaux de recherche s'inscrivant dans le groupe de travail VHF du CDP PowerAlps [L01] regroupant le G2Elab, le CEA Leti (Grenoble) et le laboratoire Ampère (Lyon). En premier lieu, les méthodes de conception de convertisseurs sont présentées au travers de principes de dimensionnement des topologies, de fonctionnalisation des éléments parasites, de règles de sélection des composants

passifs et de l'utilisation de metamatériaux. Dans un second temps, les piliers de travail autour de la robustesse des structures aux variations de charge et de la modularité des convertisseurs sont exposés dans un but d'extension des champs d'applications dans le domaine de la conversion d'énergie électrique.

2. TENDANCE POUR LA CONVERSION DC-DC

Dès lors que la fréquence de fonctionnement d'un convertisseur augmente vers la bande VHF, les topologies opérant en commutation dure deviennent complexes à mettre en œuvre du fait des pertes par commutation qui affectent fortement le rendement. A ce jour, les topologies fonctionnant en commutation douce présentent de fortes puissances avec des rendements atteignant 90-95 % [A5]. Les topologies VHF sont ainsi constituées autour de circuits résonants mettant en forme la tension aux bornes des interrupteurs dans le but de faire commutation l'interrupteur lorsque la tension à ses bornes, et/ou lorsque le courant le traversant, s'annule. Cela permet, en pratique, de minimiser les pertes par commutation. On parle alors de ZVS (Zero Voltage Switching) et de ZCS (Zero Current Switching). La Figure 1 démontre les articles traitant des convertisseurs HFVDF DC-DC adoptant des modes de fonctionnement en commutation douce et illustre l'intérêt croissant de la commutation douce ces topologies.

Fig. 1: Répartition des 97 articles analysés (de 1980-2024) sur les convertisseurs HFVDF DC-DC résonants

L'analyse bibliographique des convertisseurs DC-DC HFVDF proposée en Figure 2 met en évidence les difficultés à atteindre de fortes puissances avec des hauts rendements dans la bande VHF. Malgré cela, dans un objectif de montée en densité de puissance, il y a un intérêt à développer des

Experimental Verification of load-independence characteristics of a Class E2 parallel resonant DC-DC Converter

Antsley Jago
G2Elab, UMR5269
Unit: Grenoble-Alpes, CNRS, Grenoble INP
Grenoble, France
antsley.jago@grenoble-inp.fr

Florentin Salomez
G2Elab, UMR5269
Unit: Grenoble-Alpes, CNRS, Grenoble INP
Grenoble, France
florentin.salomez@grenoble-inp.fr

Sébastien Carcouet
CEA LETI, D2TS
Unit: Grenoble-Alpes, CEA, Leti-Lyon, F-38000 Grenoble, France
sebastien.carcouet@cea.fr

Bruno Allard
G2Elab, UMR5005
Unit: Lyon, INSA Lyon, Unit Lyon 1, Ecole Centrale Lyon, CNRS
Villurbanne, France
bruno.allard@cea.fr

Yves Lembey
G2Elab, UMR5269
Unit: Grenoble-Alpes, CNRS, Grenoble INP
Grenoble, France
Yves.Lembey@grenoble-inp.fr

Abstract—In order to investigate the paralleling of VHF power converters, this paper describes the implementation of Class E2 parallel resonant DC-DC converters, which is a suitable converter topology for this analysis as it can maintain ZVS over a wide load range. Consequently, an 8W output power prototype with 80% efficiency and switching frequency of 10MHz was characterized and demonstrated a good correlation with simulation. Furthermore, in order to investigate the topology component tolerance robustness, 2 more converters were characterized. Performance comparison of all the converters lead to the conclusion that this topology can be a good candidate for paralleling VHF converters as it exhibits power source behavior at the output.

Keywords—HFVDF, Class E, DC-DC, parallel, converter

1. INTRODUCTION

High Frequency/Very high frequency (HF/VHF) power conversion takes its roots from RF electronics domain, where the first switching amplifier was proposed around 1950. Alleged Alec Reeves is often credited for having set the basis for the switching amplifier in his patent "Electric Signal System" in 1942 [1]. Thus far, VHF power conversion has been investigated as it introduces new opportunities to power electronic systems. For example, so far in the power electronics domain, the main objectives have been weight, loss, cost and volume optimization of power converters [2]. Since passive components are mainly responsible for the weight and volume of the power converters, increasing the switching frequency is a good strategy to increase the power density of the power converters as it allows for the implementation of smaller size passive components [4]. Considering this, a drastic increase in switching frequencies up to the VHF frequency band of 30-300MHz, allow for new pathways such as replacing conventional ferrite-core inductors and electrochemical capacitors by air-core inductors and ceramic capacitors respectively which can lead to a reduced heterogeneity of the power converters in terms of bill of materials.

Hence, when considering high switching frequencies, topologies that adopt soft-switching operation are often preferred to hard-switching ones to limit the switching losses. As a result, resonant topologies that operate under Zero Voltage Switching (ZVS) or Zero-Current Switching (ZCS) conditions are often considered. Still, the application field

range of these types of converters is often limited to the fact that most topologies adopt a single operating point where both ZVS and zero derivative switching voltage (ZDVS) are satisfied. Moreover, high-power level at high switching frequencies imply a more complex implementation [5].

Consequently, paralleling HF/VHF power converters coupled with the advantages brought by standardization, as shown in fig. 1, offers an approach that could extend the application range of VHF power conversion. Nevertheless, paralleling VHF power converters requires that the unit component cell exhibit characteristics such as maintaining ZVS over a wide load range and having a robustness against current component tolerances. This is attributed to the fact that converters experience component tolerances differently and operate under marginally distinct conditions, potentially leading to unbalanced load sharing.

Fig. 1: Research objective to couple advantages of both modulation in power electronics and VHF power conversion

Following a non-exhaustive VHF topologies inventory, 35 different topologies have been identified, among which 12 of them could exhibit load-independent characteristics. Among these topologies, the Class E2 parallel resonant DC-DC converter seems to be a suitable candidate for the study due to its ability to maintain ZVS over a wide range of load variation.

Consequently, section II depicts the design and simulation of the Class E2 parallel resonant converter. Experimental validations considering multiple implemented converters are then exposed in section III. This analysis explores a non-pure voltage source output behaviour of the converters. Finally, section IV discusses the results obtained and related perspectives before concluding in section V.

Open-Loop Paralleling of Class E2 resonant DC-DC Converters

Antsley Jago
G2Elab, UMR5269
Unit: Grenoble-Alpes, CNRS, Grenoble INP
Grenoble, France
antsley.jago@grenoble-inp.fr

Florentin Salomez
G2Elab, UMR5269
Unit: Grenoble-Alpes, CNRS, Grenoble INP
Grenoble, France
florentin.salomez@grenoble-inp.fr

Sébastien Carcouet
CEA LETI, D2TS
Unit: Grenoble-Alpes, CEA, Leti-Lyon, F-38000 Grenoble, France
sebastien.carcouet@cea.fr

Bruno Allard
G2Elab, UMR5005
Unit: Lyon, INSA Lyon, Unit Lyon 1, Ecole Centrale Lyon, CNRS
Villurbanne, France
bruno.allard@cea.fr

Yves Lembey
G2Elab, UMR5269
Unit: Grenoble-Alpes, CNRS, Grenoble INP
Grenoble, France
Yves.Lembey@grenoble-inp.fr

Abstract—This paper describes the implementation of Class E2 parallel resonant DC-DC converters for the investigation of paralleling of VHF power converters. The former converter topology is suitable for the experiment as it can maintain ZVS over a wide load range naturally in open-loop. Consequently, several 8W output power elementary prototypes were gathered under 80% efficiency and switching frequency of 10MHz. Subsequently, multiple paralleling configurations are investigated experimentally which allowed the construction of a predictive model for antenar parallel converter configurations.

Keywords—HFVDF, Class E, DC-DC, parallel, converter

1. INTRODUCTION

Since 1970, development trends in power density of converters have been oriented towards higher switching frequencies [1]. This is because with increased switching frequency, the energy stored throughout each cycle in passive components is lowered, leading to smaller need in capacitances and inductances which predominantly contribute to the weight and volume of power converters. Consequently, increasing the switching frequency up to the Very High Frequency (VHF) band of 30-300MHz, opens path for new opportunities. This is due to the fact that with smaller inductances and capacitances, conventional magnetic-core inductors and electrochemical capacitors are replaced by air-core inductors (magnetic-core free) and ceramic capacitors (smaller volume, weight and extended lifespan) respectively [2]. Nevertheless, the application field of VHF power converters remains constrained by their design and implementation complexity. This is because switching losses may excessively increase with increased switching frequency.

Consequently, converters operating under hard-switching conditions suffer from a trade-off between either high power or high efficiency [3]. As a result, resonant topologies are preferred since they can operate under soft-switching conditions such as Zero-Voltage-Switching (ZVS) or Zero-Current-Switching (ZCS) which substantially limit switching losses. However, these topologies are generally limited to their single operating point where ZVS or ZCS is satisfied and their sensitivity against component tolerances. In other words, the actual Power Efficiency-Frequency trend is not a pure voltage source output behaviour of the converters. Finally, section IV discusses the results obtained and related perspectives before concluding in section V.

achieved. Our approach to address this limitation is the paralleling of VHF power converters.

Though a promising solution, paralleling VHF converters has received little attention for DC-DC applications. So far, proposed research contributions considering multiple VHF power converters have either proposed interleaved structures of SEPIC and E converters [6,7], novel control strategy for paralleling conventional converters [8] or neutralization of rectifier stage over several Class E inverters [9]. Still, the underlying limitation of paralleling converters remains the single operating point and sensitivity to component tolerances. Consequently, through a topological diversity analysis of VHF DC-DC resonant power converters [10], the Class E2 parallel resonant DC-DC converter was identified as a suitable topology for this investigation due to its ability of maintaining soft-switching characteristics over a wide load range naturally without converter regulation [11,12].

Fig. 1: Output Power Efficiency-Switching frequency trend of designed DC-DC resonant converter

Consequently, Section II outlines the design, implementation and characterisation of several Class E2 parallel resonant DC-DC converters in view of analysing their sensitivity against component tolerances. In other words, the actual Power Efficiency-Frequency trend is not a pure voltage source output behaviour of the converters. Finally, section IV discusses the results obtained and related perspectives before concluding in section V.

IECON 2024

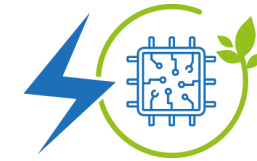
SGE 2025

ECCE Europe 2025

IECON 2025

Objectives for 3rd year:

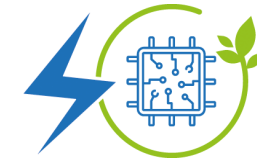
- ❖ E2 Parallel prototype V2
- ❖ Nottingham University Collab
- ❖ Life Cycle Analysis of VHF Converters
- ❖ EMI Characterisation



PowerAlps
Université Grenoble Alpes

Objectives for 3rd year:

- ❖ E2 Parallel prototype V2
- ❖ Nottingham University Collab
- ❖ Life Cycle Analysis of VHF Converters
- ❖ EMI Characterisation

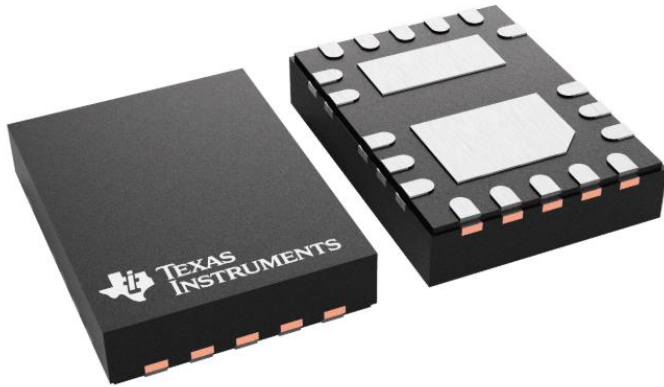


PowerAlps
Université Grenoble Alpes

Objectives for 3rd year:

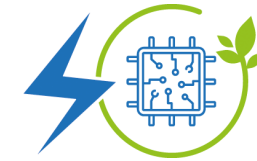
- ❖ E2 Parallel prototype V2
- ❖ Nottingham University Collab
- ❖ Life Cycle Analysis of VHF Converters
- ❖ EMI Characterisation

LMG1210 HALFBRIDGE
GaN DRIVER



SPECIFICATIONS:

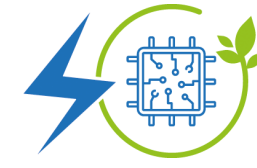
- Up to 50-MHz operation;
- 3.4-ns high-side to low-side matching;
- 5V Gate drive voltage regardless of supply voltage



PowerAlps
Université Grenoble Alpes

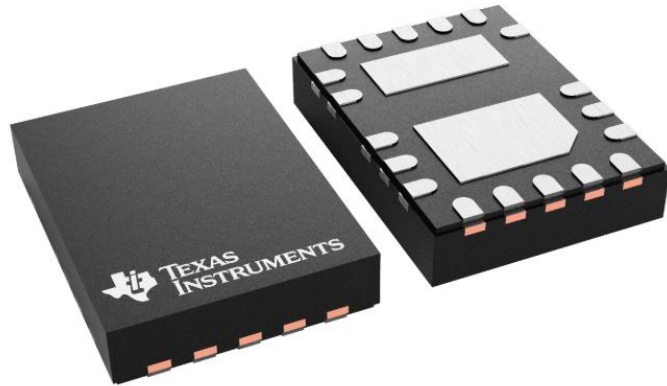
Objectives for 3rd year:

- ❖ E2 Parallel prototype V2
- ❖ Nottingham University Collab
- ❖ Life Cycle Analysis of VHF Converters
- ❖ EMI Characterisation

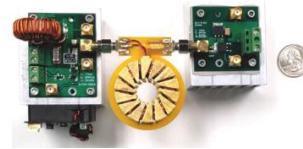


PowerAlps
Université Grenoble Alpes

LMG1210 HALFBRIDGE
GaN DRIVER



AIR CORE ISOLATION
TRANSFORMER



Nested



Stacked



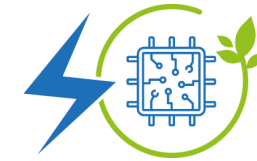
Interleaved

SPECIFICATIONS:

- Up to 50-MHz operation;
- 3.4-ns high-side to low-side matching;
- 5V Gate drive voltage regardless of supply voltage

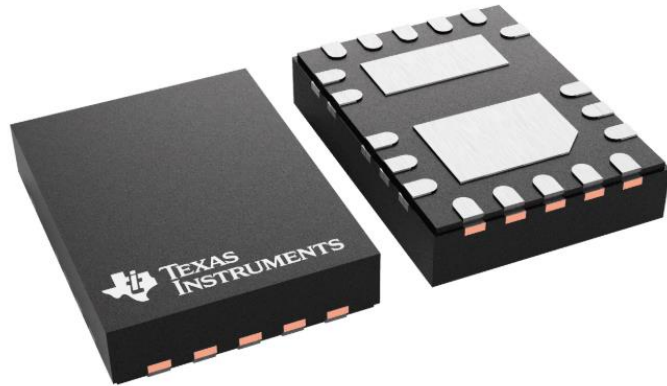
Objectives for 3rd year:

- ❖ E2 Parallel prototype V2
- ❖ Nottingham University Collab
- ❖ Life Cycle Analysis of VHF Converters
- ❖ EMI Characterisation

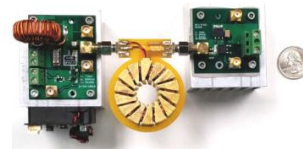


PowerAlps
Université Grenoble Alpes

LMG1210 HALFBRIDGE
GaN DRIVER



AIR CORE ISOLATION
TRANSFORMER



Nested

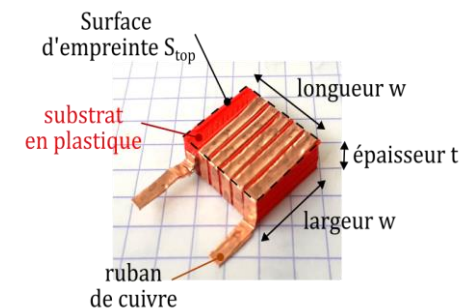
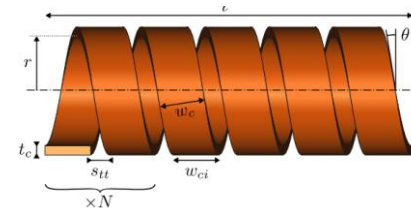


Stacked



Interleaved

OPTIMISED AIR-CORE
INDUCTORS

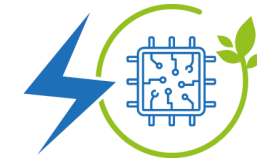


SPECIFICATIONS:

- Up to 50-MHz operation;
- 3.4-ns high-side to low-side matching;
- 5V Gate drive voltage regardless of supply voltage

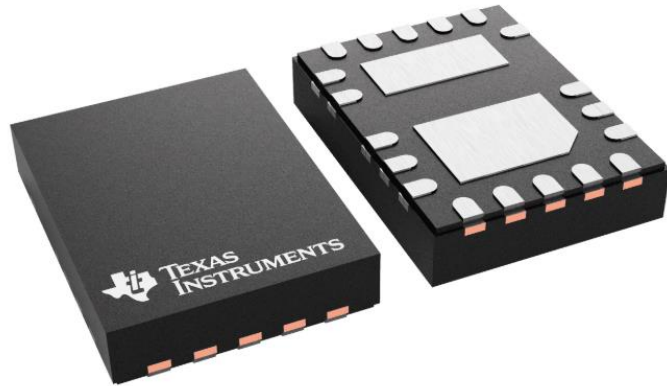
Objectives for 3rd year:

- ❖ E2 Parallel prototype V2
- ❖ Nottingham University Collab
- ❖ Life Cycle Analysis of VHF Converters
- ❖ EMI Characterisation

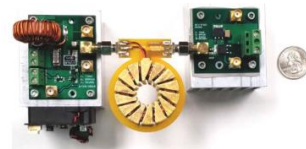


PowerAlps
Université Grenoble Alpes

LMG1210 HALFBRIDGE
GaN DRIVER



AIR CORE ISOLATION
TRANSFORMER



Nested

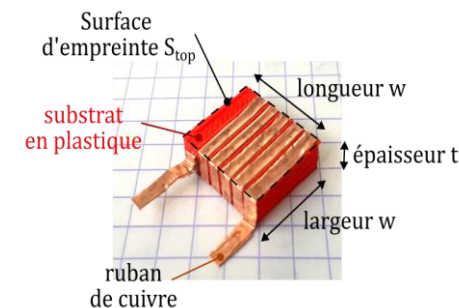
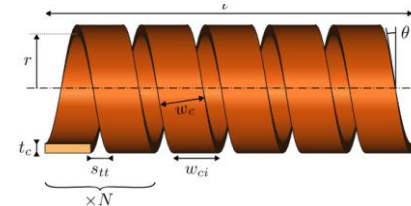


Stacked

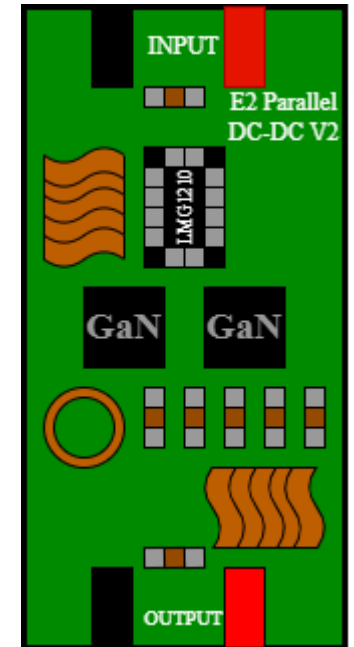


Interleaved

OPTIMISED AIR-CORE
INDUCTORS



CONVERTER PCB
REDESIGN



SPECIFICATIONS:

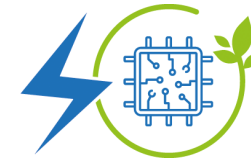
- Up to 50-MHz operation;
- 3.4-ns high-side to low-side matching;
- 5V Gate drive voltage regardless of supply voltage

Objectives for 3rd year:

- ❖ E2 Parallel prototype V2
- ❖ Nottingham University Collab
- ❖ Life Cycle Analysis of VHF Converters
- ❖ EMI Characterisation



The University of
Nottingham



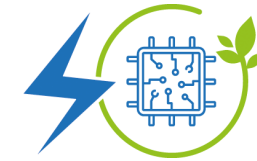
PowerAlps
Université Grenoble Alpes

Objectives for 3rd year:

- ❖ E2 Parallel prototype V2
- ❖ Nottingham University Collab
- ❖ Life Cycle Analysis of VHF Converters
- ❖ EMI Characterisation



The University of
Nottingham



PowerAlps
Université Grenoble Alpes

CONVERTER CONTROL IMPLEMENTATION

Collaborator: Dr. LI Ying

Project:

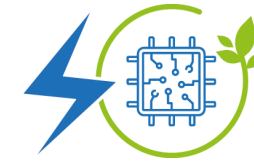
1. ON-OFF Control of Class E2 Parallel resonant converter;
2. Interconnected converter monitoring system.

Objectives for 3rd year:

- ❖ E2 Parallel prototype V2
- ❖ Nottingham University Collab
- ❖ Life Cycle Analysis of VHF Converters
- ❖ EMI Characterisation



The University of
Nottingham



PowerAlps
Université Grenoble Alpes

CONVERTER CONTROL IMPLEMENTATION

Collaborator: Dr. LI Ying

Project:

1. ON-OFF Control of Class E2 Parallel resonant converter;
2. Interconnected converter monitoring system.

LOSSES BREAKDOWN

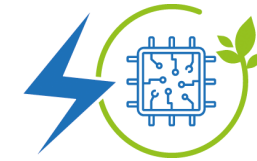
Collaborator: Dr. LI Ke, Dr. LU Xuyang

Project:

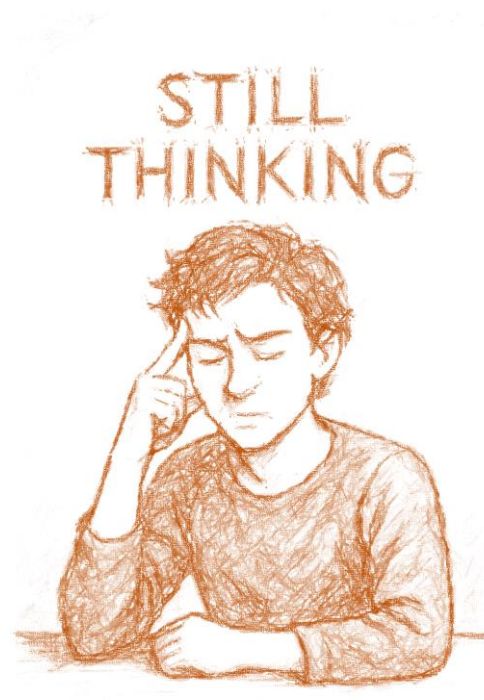
1. Investigation of losses distribution of the Class E2 Parallel resonant converter;
2. Dynamic $R_{ds}(ON)$ measurement;
3. Hysteresis of C_{oss} modelling;
4. LMG1210 Driver Implementation.

Objectives for 3rd year:

- ❖ E2 Parallel prototype V2
- ❖ Nottingham University Collab
- ❖ Life Cycle Analysis of VHF Converters
- ❖ EMI Characterisation

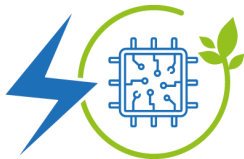


PowerAlps
Université Grenoble Alpes

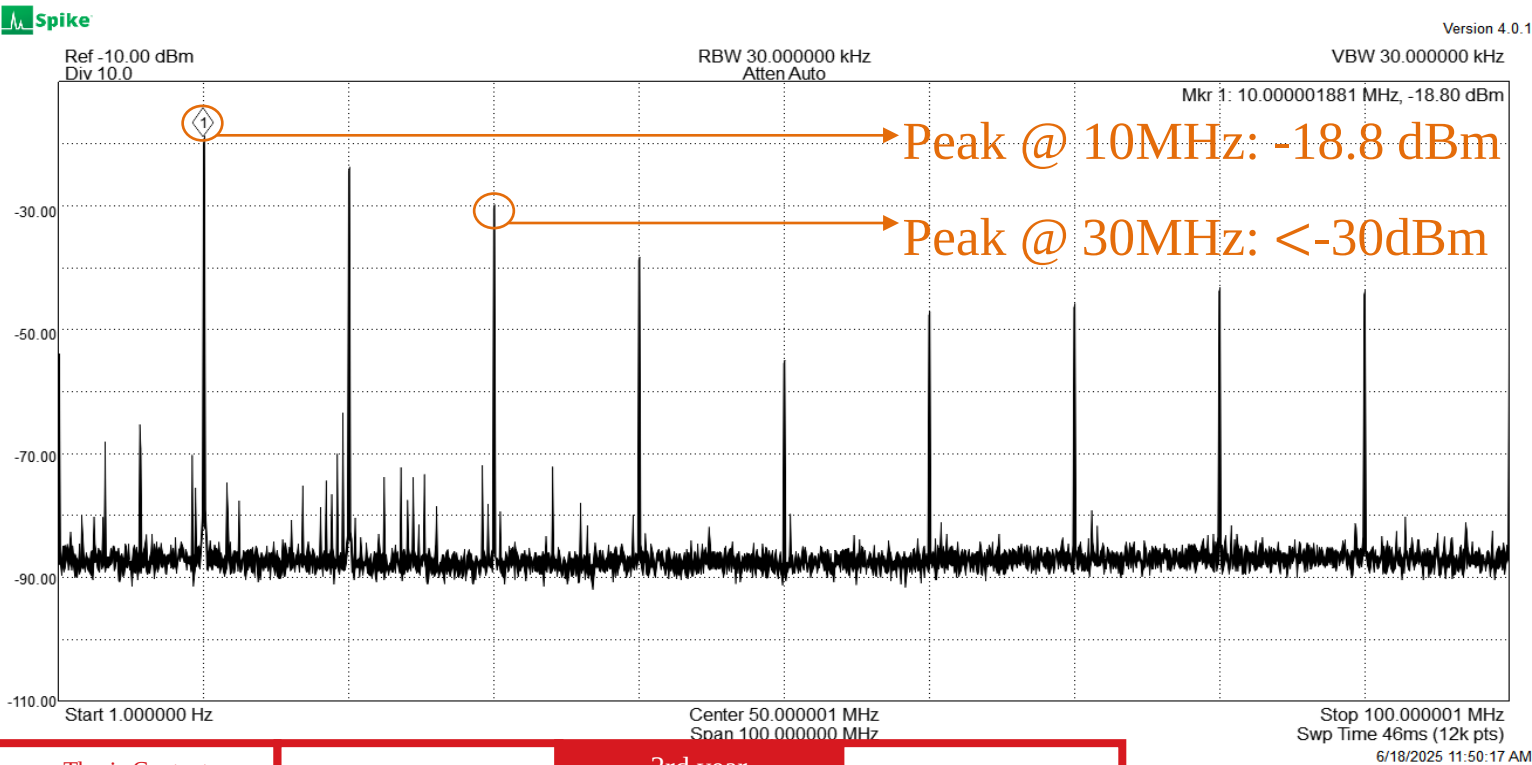


Objectives for 3rd year:

- ❖ E2 Parallel prototype V2
- ❖ Nottingham University Collab
- ❖ Life Cycle Analysis of VHF Converters
- ❖ EMI Characterisation



Radiated Emission Measurement



Specification	Frequency Limits (MHz)		Radiated Emissions Limit for Class A (Industrial Equipment) dB(μV/meter) @ 10 meters	Radiated Emissions Limit for Class B (Unrestricted Use) dB(μV/meter) @ 3 meters
	Lower	Upper		
FCC (CFR) Title 47, Part 15, Subpart B	30	88	39.1	40.0
	88	216	43.5	43.5
	216	960	46.4	46.0
	960	1000	49.5	54.0
Bellcore NWT-TR-001089	.01	.024	88.6	139
	.024	.80	56.2 - 20log (f)	87.6 - 20log (f)
	.80	1.59	58.2	108.7
Electric Field Strength	1.59	4.77	66.2 - 40log (f)	—
	4.77	88	39.1	—
	1.59	20.17	—	97.6 - 40log (f)
	20.17	88	—	40.0
	88	216	43.5	43.5
	216	960	46.4	46.0
	960	10000	49.5	54.0
CISPR 22	30	230	40	30*
Electric Field Strength	230	1000	47	37*
VDE 0871	.01	1	—	171.5 - 20log (f)
Magnetic Field Strength	1	30	—	94.1 - 7.1log (f)
VDE 0871	30	470	—	34*
Electric Field	470	1000	—	40*

Conclusion

Conversion d'énergie aux fréquences VHF : enjeux, avancements et perspectives à Ampère

Baptiste DAIRE, Matthieu BELEY, Felipe FREITAS, Loris PACE, Christian MARTIN, Bruno ALLARD



PowerAlps
Université Grenoble Alpes

Conversion d'énergie aux fréquences VHF : enjeux, avancements et perspectives à Ampère

- 3 thèses actuellement encadrées à Ampère
- Pas de travaux antérieurs sur la thématique à Ampère

Axes de travail :

Étude de topologies de convertisseurs VHF :

- Méthodes de dimensionnement
- Robustesse aux variations de charges
- Régulation/contrôle



Conception, caractérisation, modélisation de composants passifs avancés :

- Bobines à air sur substrat et impression 3D
- Utilisation de métamatériaux
- Utilisation de matériaux piézoélectriques

Étude de topologies

Méthodes de dimensionnement, robustesse aux variations de charges

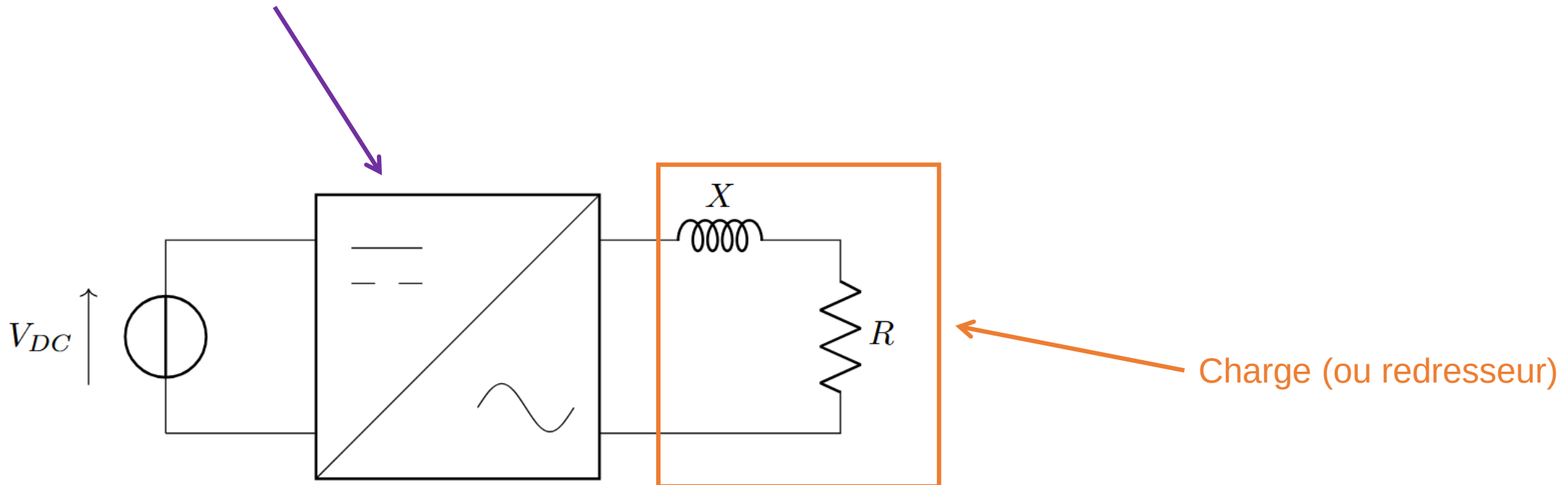
Étude de topologies

Onduleur résonnant qui fonctionne dans la bande 30-300 MHz :

- 1 interrupteur
- ZVS et/ou ZCS

Problématiques adressées :

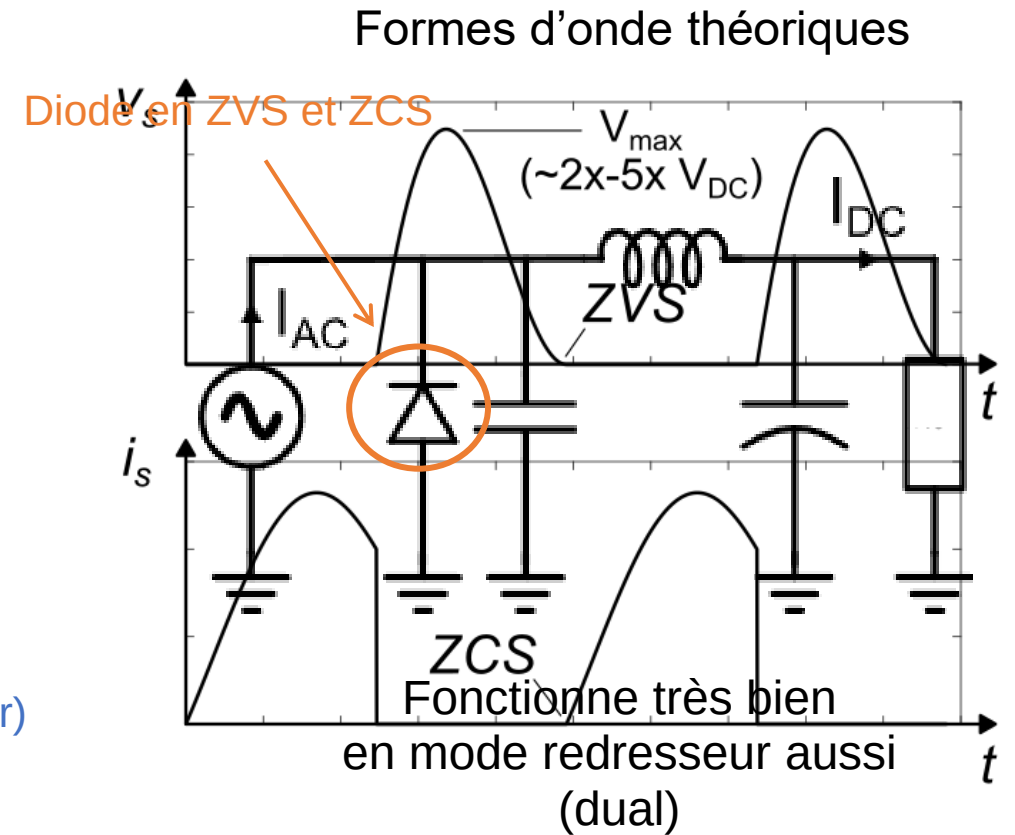
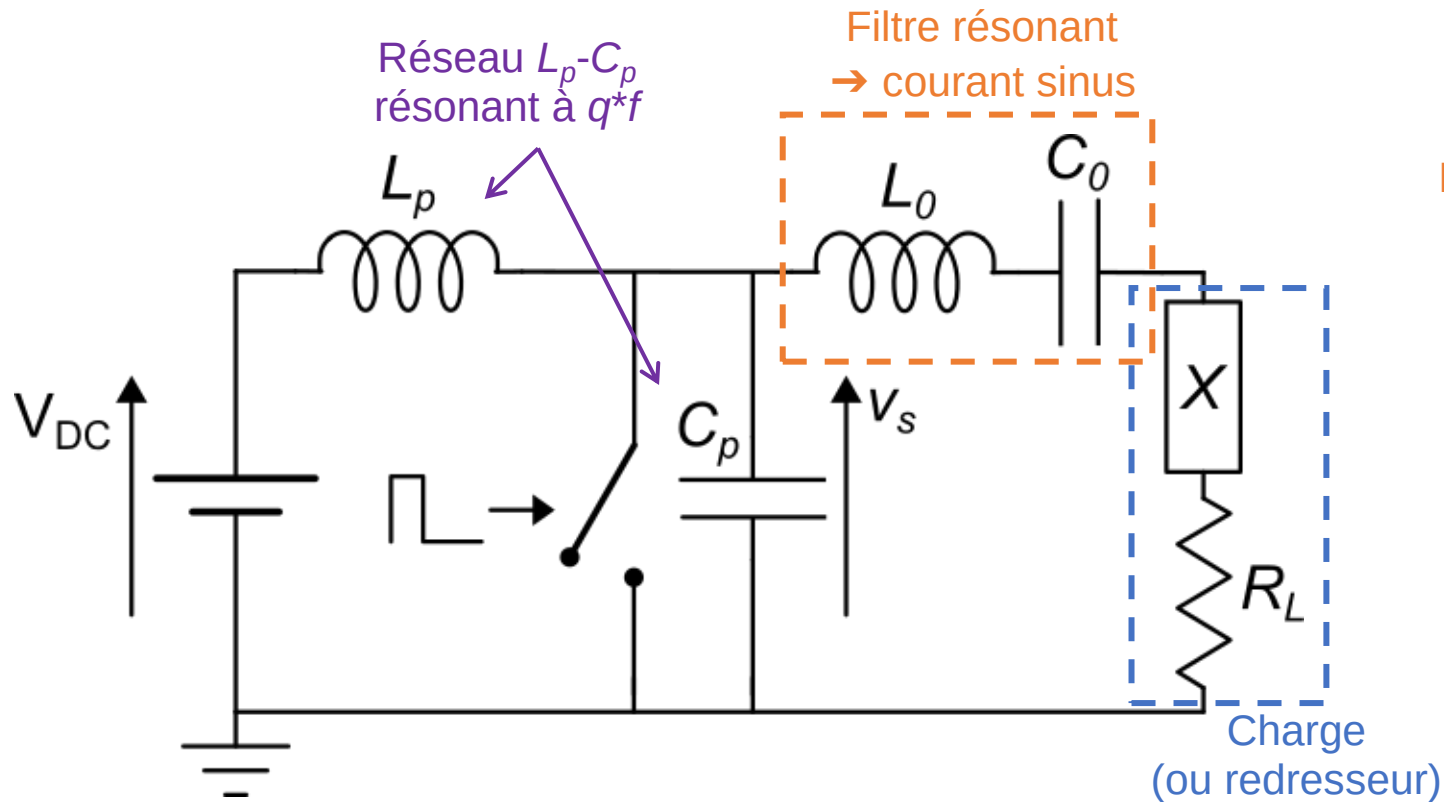
- On comprend relativement mal les topologies DC/AC VHF
 - **Comment dimensionner les topologies VHF ?**
- Si la charge varie : perte du ZVS/ZCS
 - **Comment maintenir le ZVS/ZCS sur une large gamme de charge ?**



Étude de topologies

Onduleur de classe E

- Historiquement, ampli RF développé pour de hauts rendements
- Aujourd'hui une brique de base des convertisseurs VHF



- + Haut rendement (commutations douces)
- + Simplicité / nombre de composants

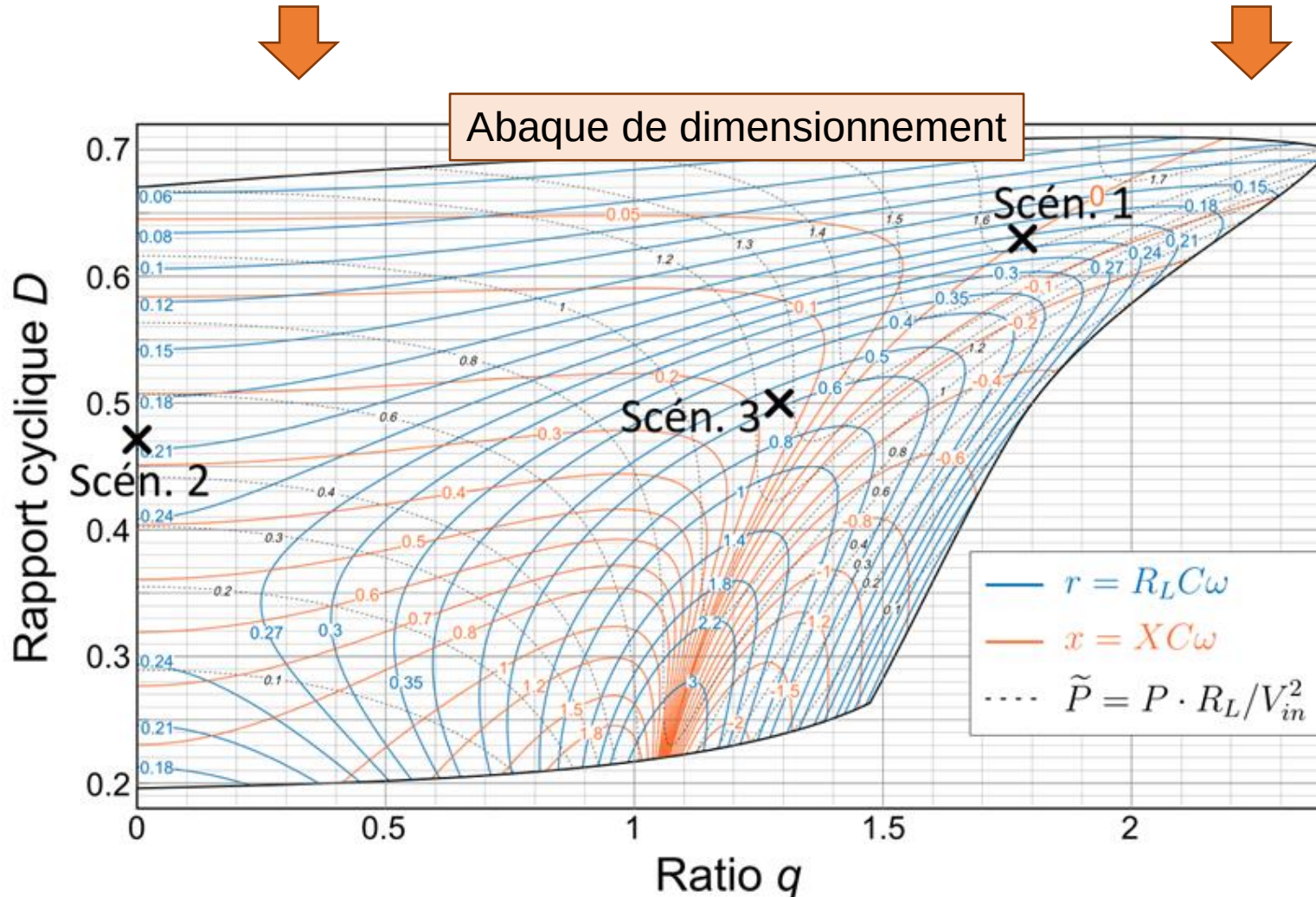
- Contrainte en tension
- Dépendance au point de fonctionnement

Étude de topologies (travaux de thèse Matthieu Beley)



Description 100 % analytique de la topologie possible, mais lourde

Procédure de dimensionnement basée sur la recherche graphique de point(s) de dimensionnement



Même cahier des charges
(fréquence, charge, puissance)



Plusieurs scénarios identifiés

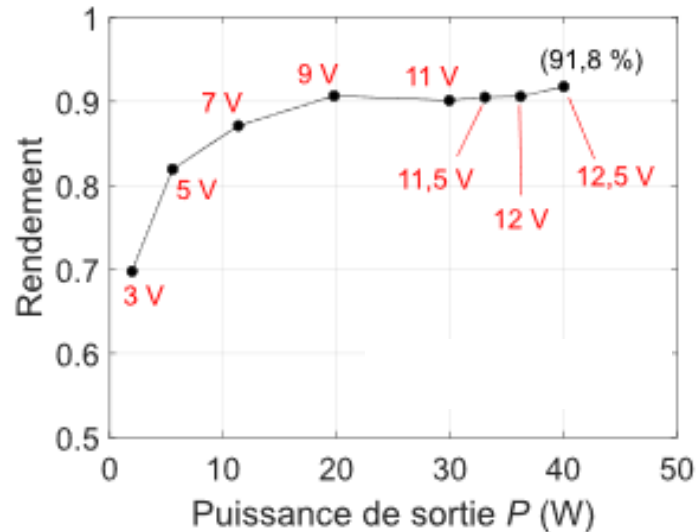
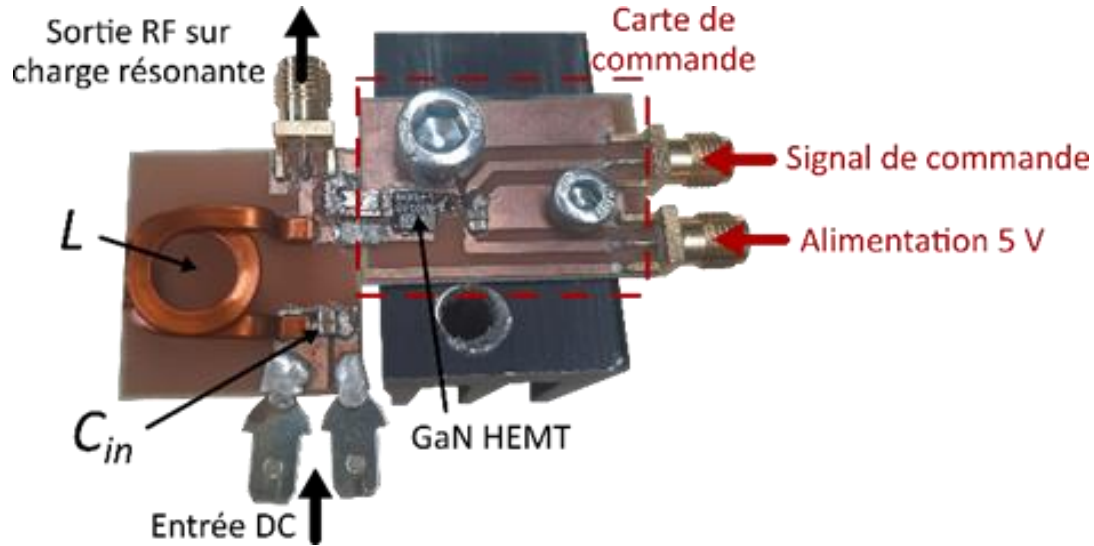


Comparaison des performances

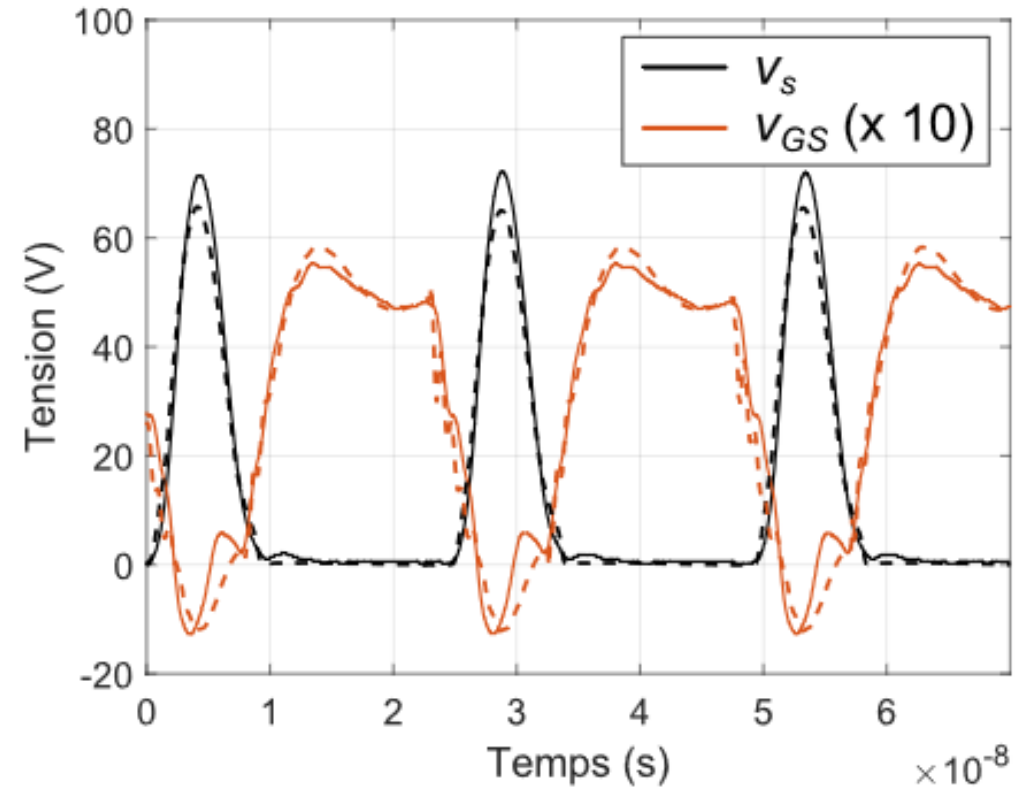
- Existe-il un point optimal ?
- Quel scénario garantit le plus haut rendement ? Le plus faible nombre de composants ? etc.

Étude de topologies (travaux de thèse Matthieu Beley)

Résultats expérimentaux (exemple du Scénario 1)



$f = 40.68 \text{ MHz}$
 $P = 50 \text{ W}$
 $V_{in} = 12 \text{ V}$
GaN HEMT
(100V, 38A, 16m Ω)



— Mesure
- - - Modèle

Incluant

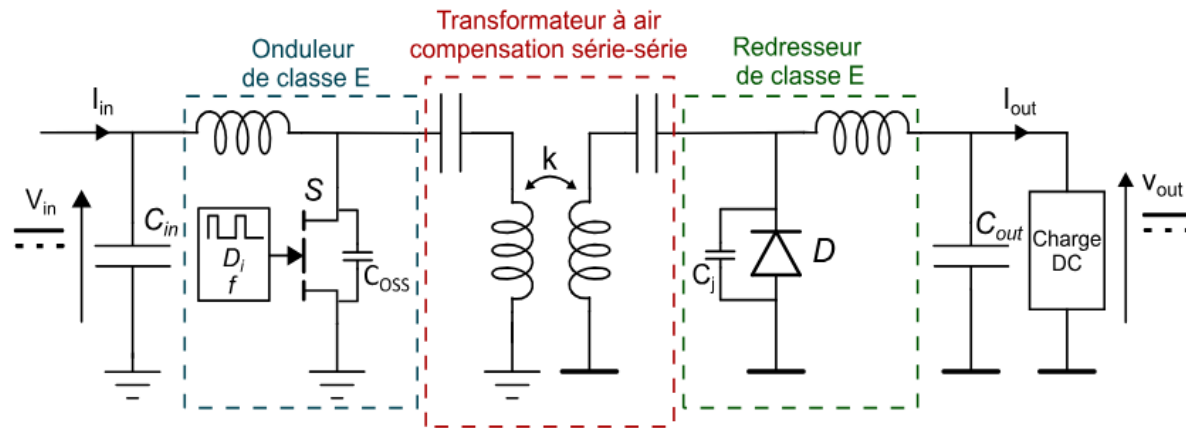
- ✓ Modèle EM du PCB
- ✓ Caractérisation HF des composants

Étude de topologies (travaux de thèse Matthieu Beley)

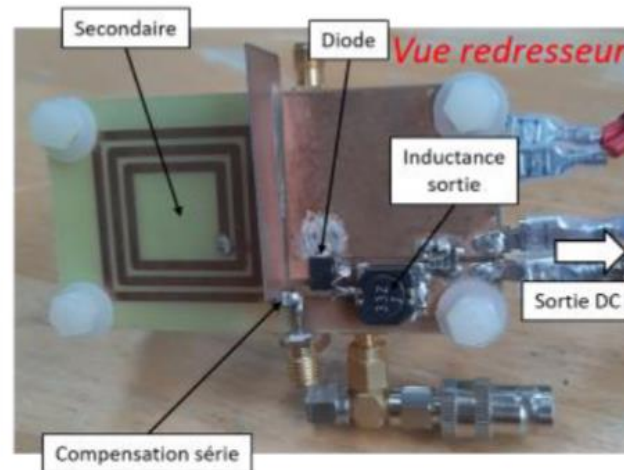
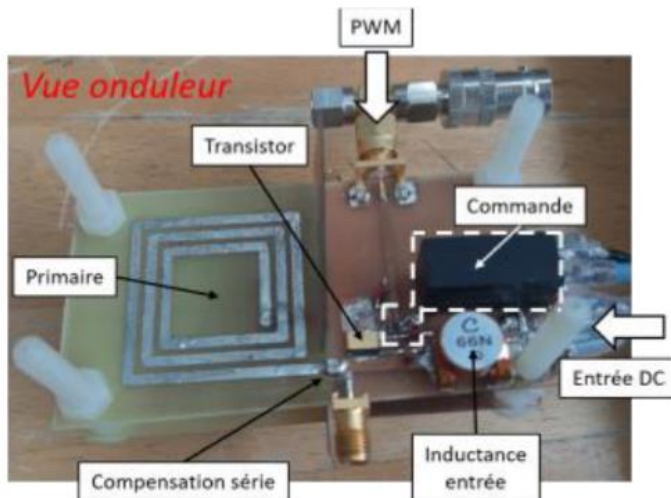
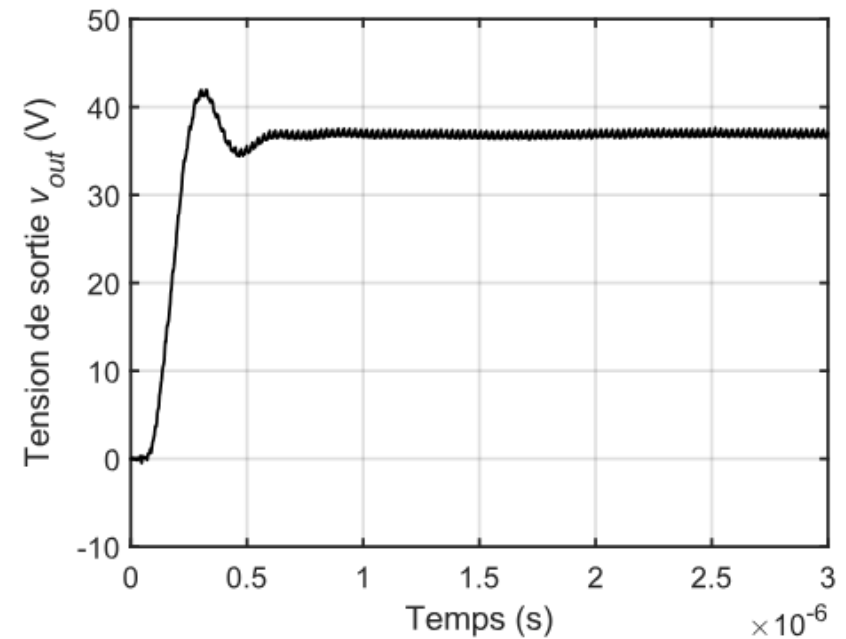


Adapter (légèrement) cette méthode de dimensionnement aux convertisseurs DC-DC

Classe E^2 , $f = 40.68 \text{ MHz}$; $V_{in} = 48 \text{ V}$; $V_{out} = 36,5 \text{ V}$; $I_{out} = 1,5 \text{ A}$; Isolation galvanique (transformateur à air)



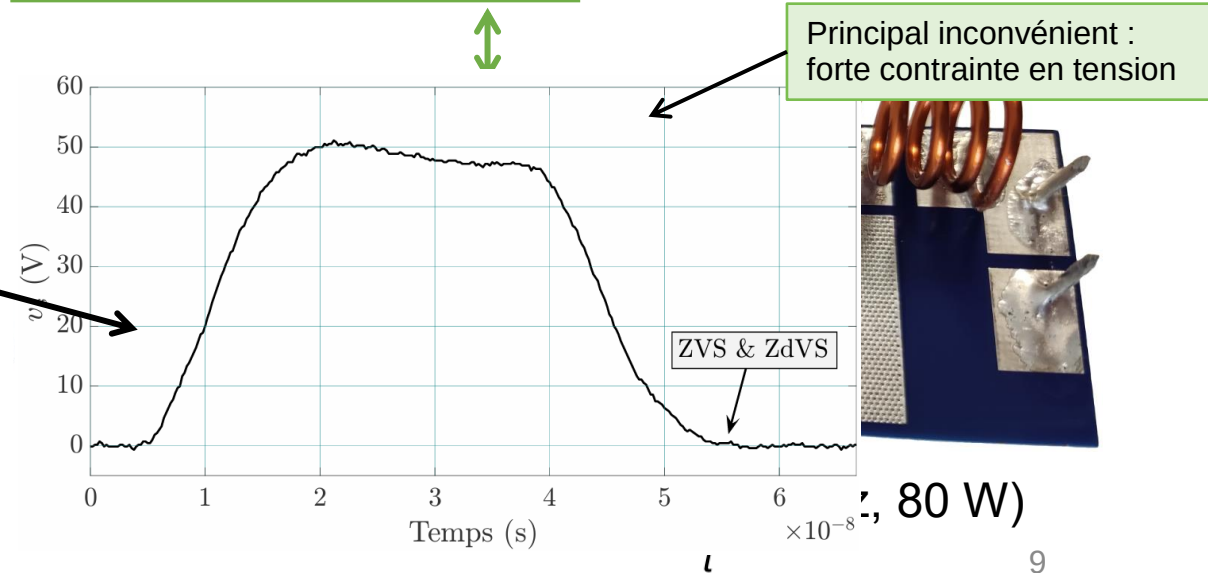
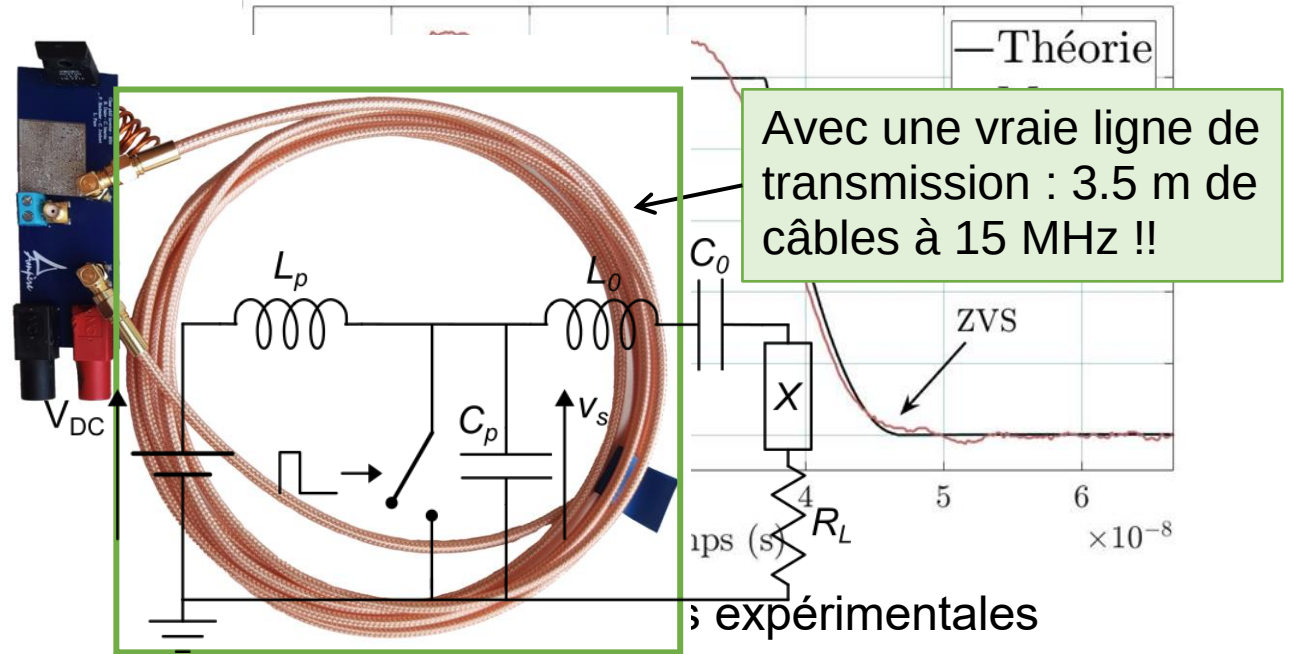
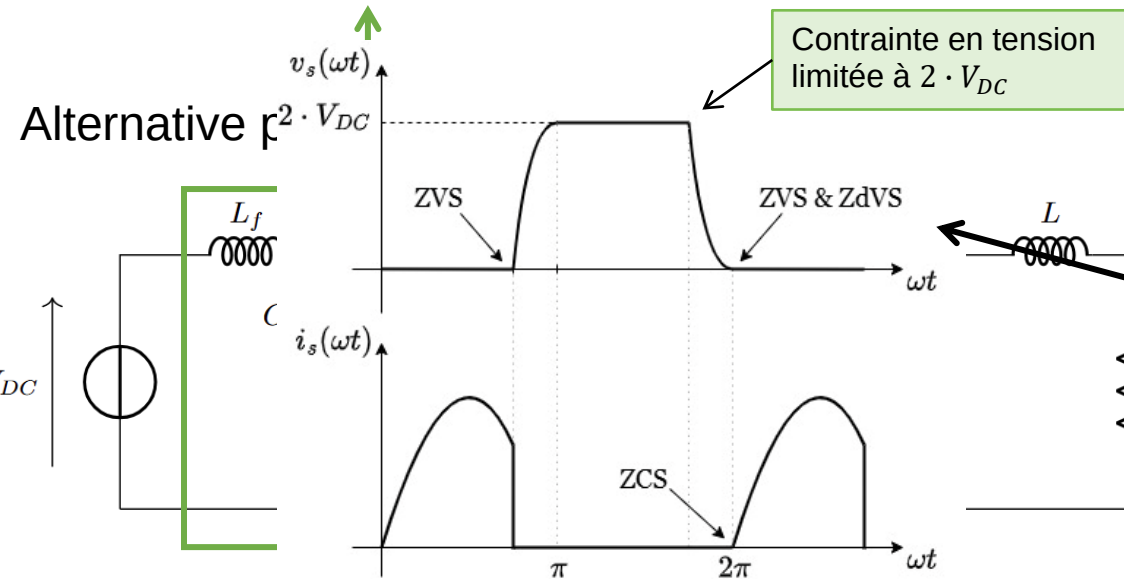
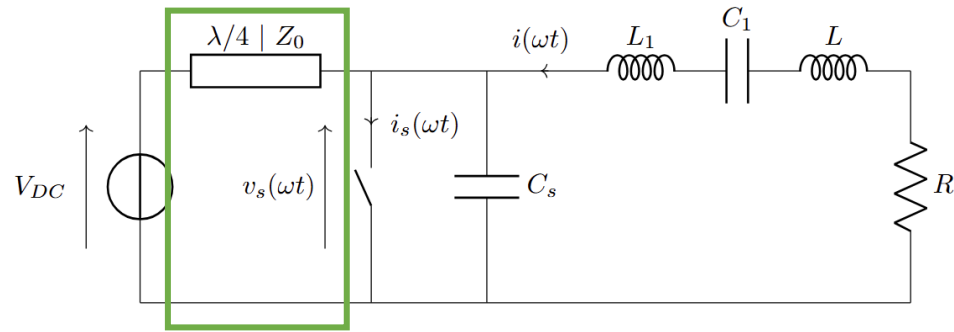
→ Perspectives pour la conversion DC-DC VHF modulaire



Étude de topologies (travaux de thèse Baptiste Daire)

DC-AC Classe EF

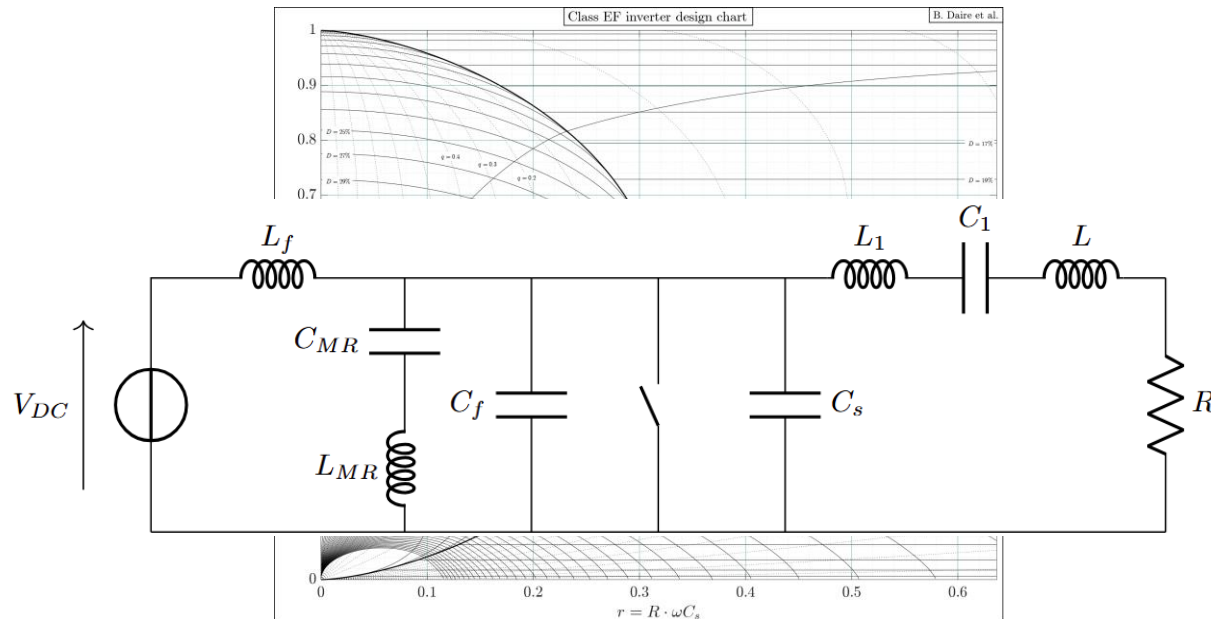
Convertisseur DC/AC de classe EF : réduction de la contrainte en tension



Étude de topologies (travaux de thèse Baptiste Daire)

DC-AC Classe EF

Convertisseur DC/AC de classe EF : réduction de la contrainte en tension



Méthodes de dimensionnement émergentes :

- Résolution numérique des équations issues de l'électrocinétique
- Utilisation de techniques de ML entraînées sur des données de simulation (...)

Originalité des travaux menés à Ampère :

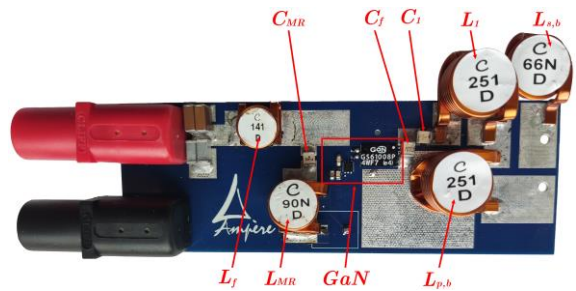
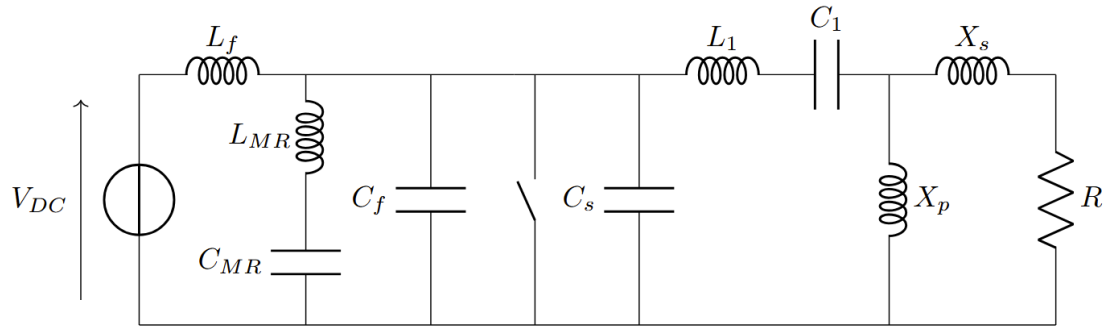
- Développement & mise en œuvre de méthodes d'analyse issues des RF
- Construction de nouvelles topologies robustes aux variations de charges

- Identification rapide de points de fonctionnement
- Aide à l'optimisation de convertisseurs

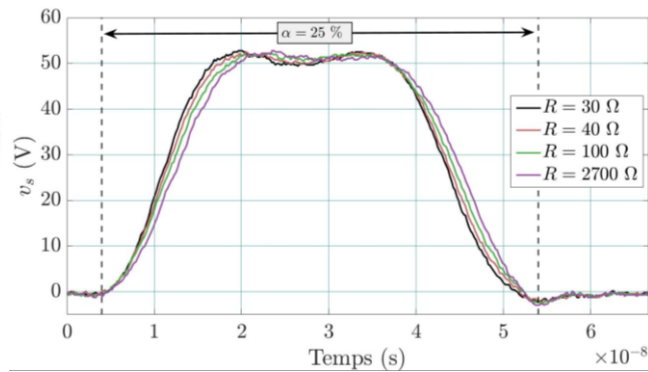
Étude de topologies (travaux de thèse Baptiste Daire)

Plusieurs topologies développées à Ampère

Convertisseurs DC/AC



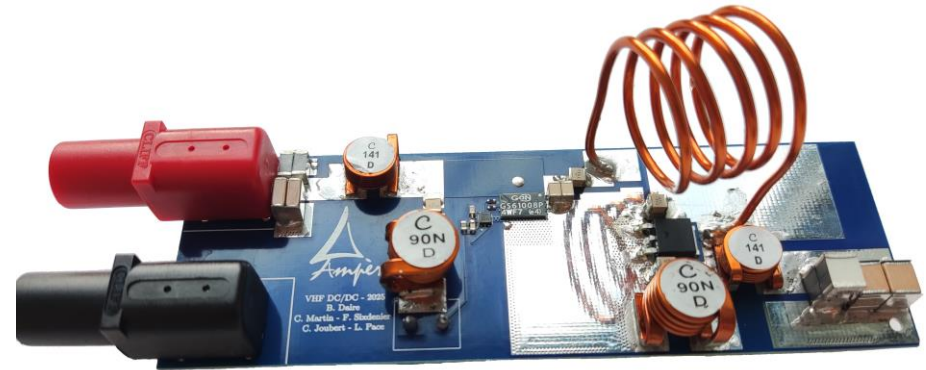
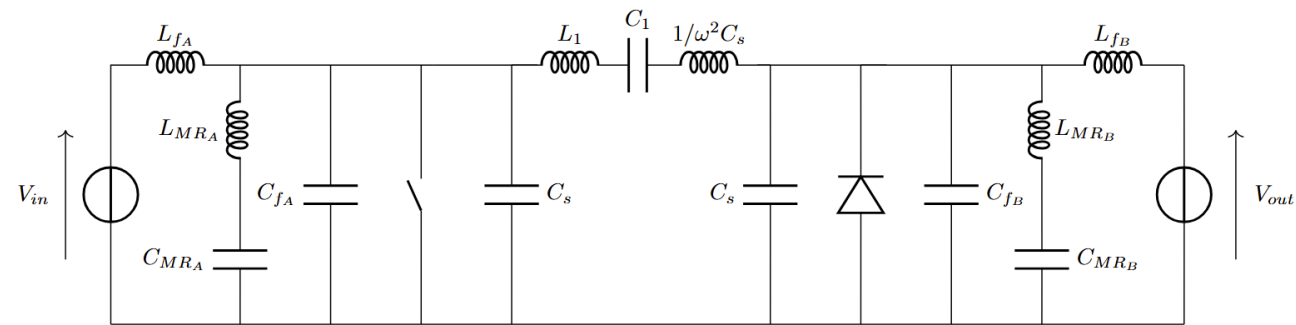
Prototype 15 MHz



Tension de drain mesurée

- Fonctionnement en ZVS avec un rapport cyclique fixe
- Maintient une amplitude de tension (ou de courant) constante en sortie

Convertisseur DC/DC



Exemple d'un prototype 15 MHz - 50 W

Tous les interrupteurs fonctionnent simultanément en ZVS et en ZCS peu importe la charge :

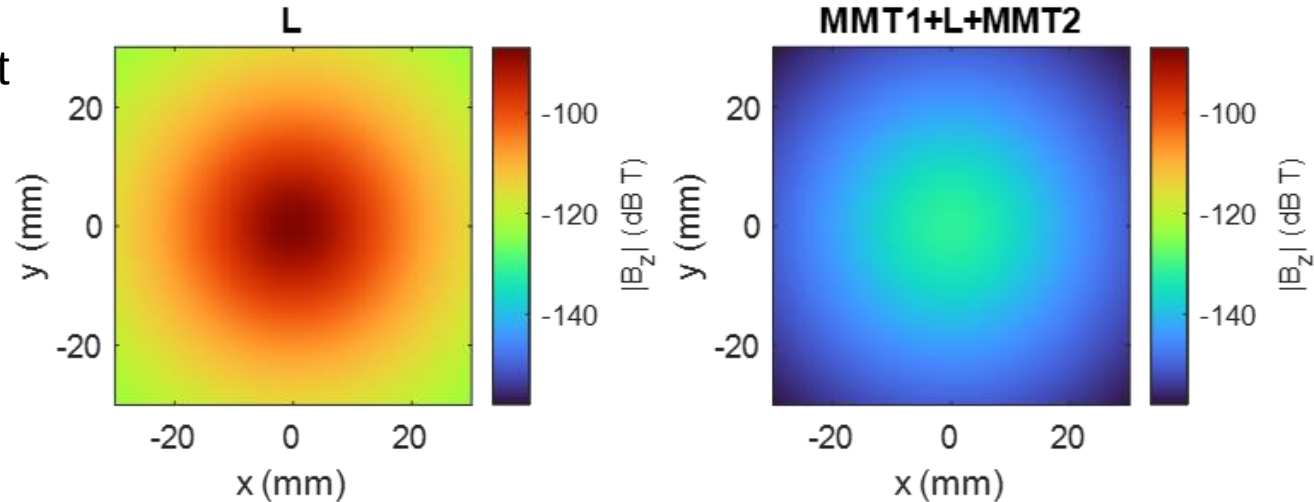
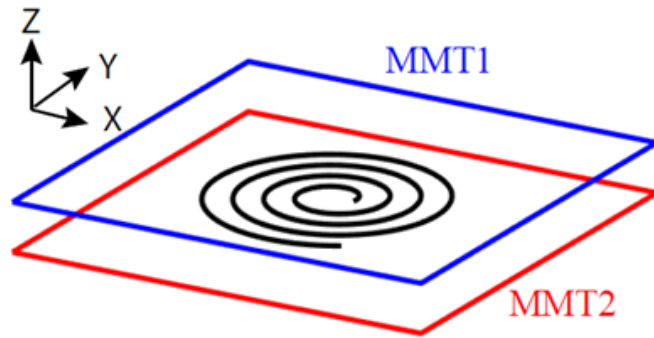
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \tan^2(\pi \cdot \alpha)$$

Applications des métamatériaux

Amélioration des performances des bobines à air dans les convertisseurs très haute fréquence

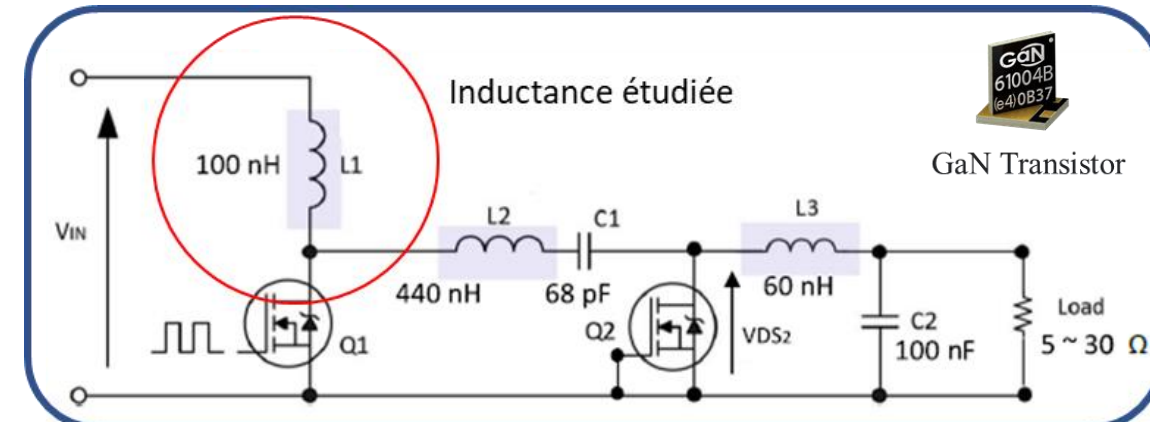
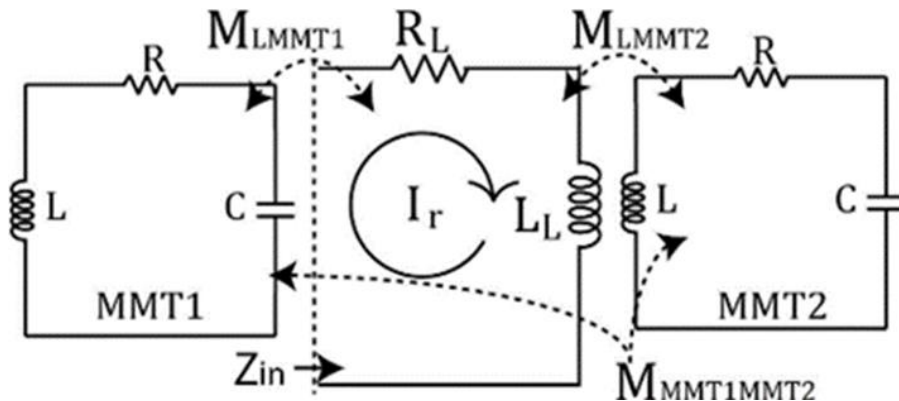
Applications des métamatériaux (travaux de thèse Felipe Freitas)

Objectif : limiter les interférences EM en encapsulant l'inductance avec des métamatériaux



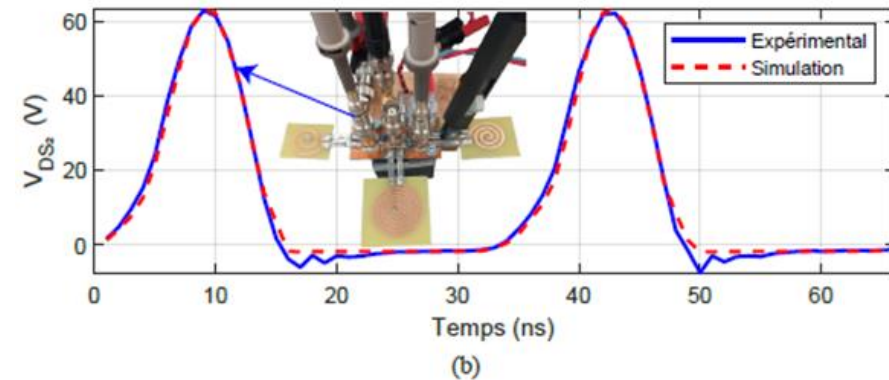
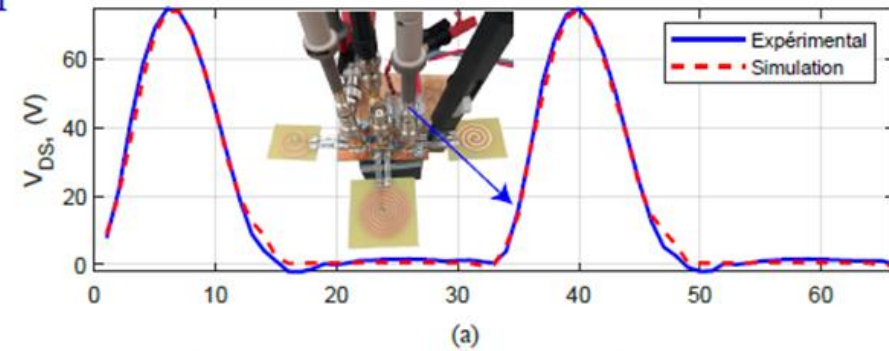
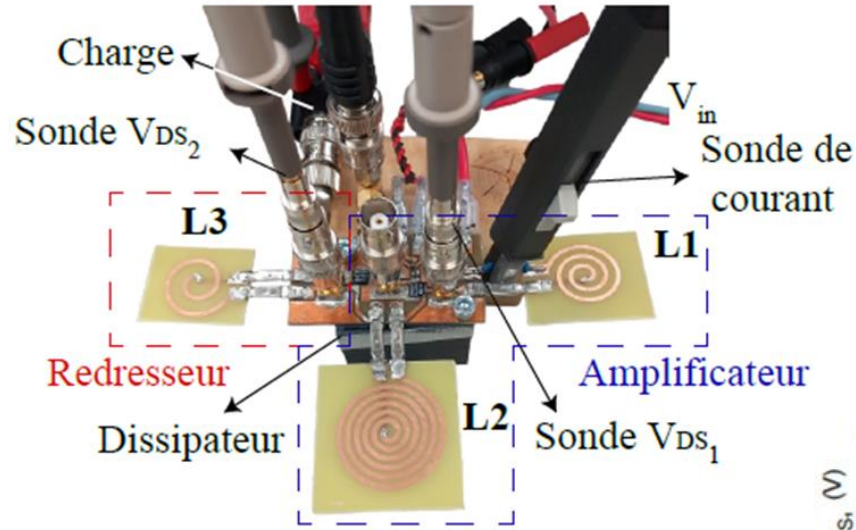
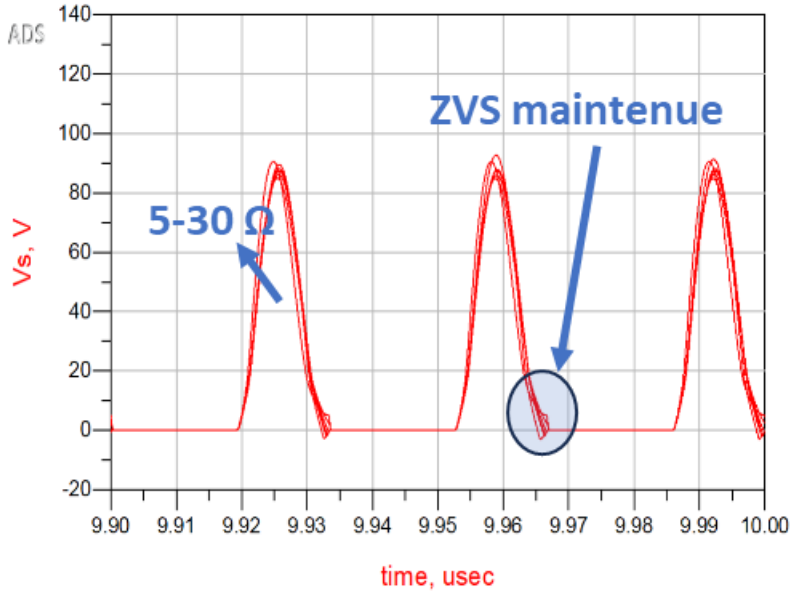
Carte du champ B_z à une hauteur de 10 mm au-dessus du plan.

Circuit équivalent de l'inductance encapsulée

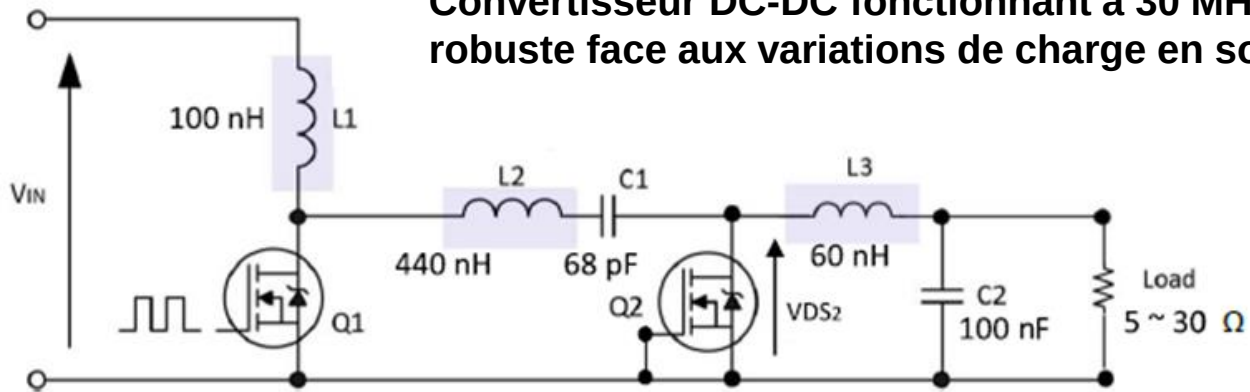


Application des méthodes sur un convertisseur DC/DC classe E²

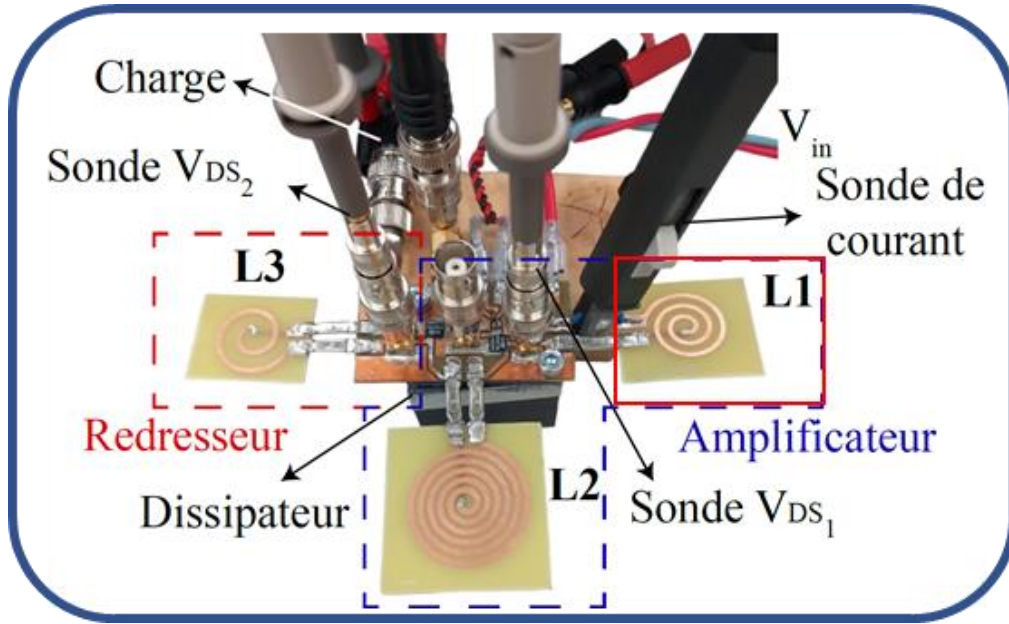
Applications des métamatériaux (travaux de thèse Felipe Freitas)



Convertisseur DC-DC fonctionnant à 30 MHz et robuste face aux variations de charge en sortie.



Applications des métamatériaux (travaux de thèse Felipe Freitas)



Inductances étudiées



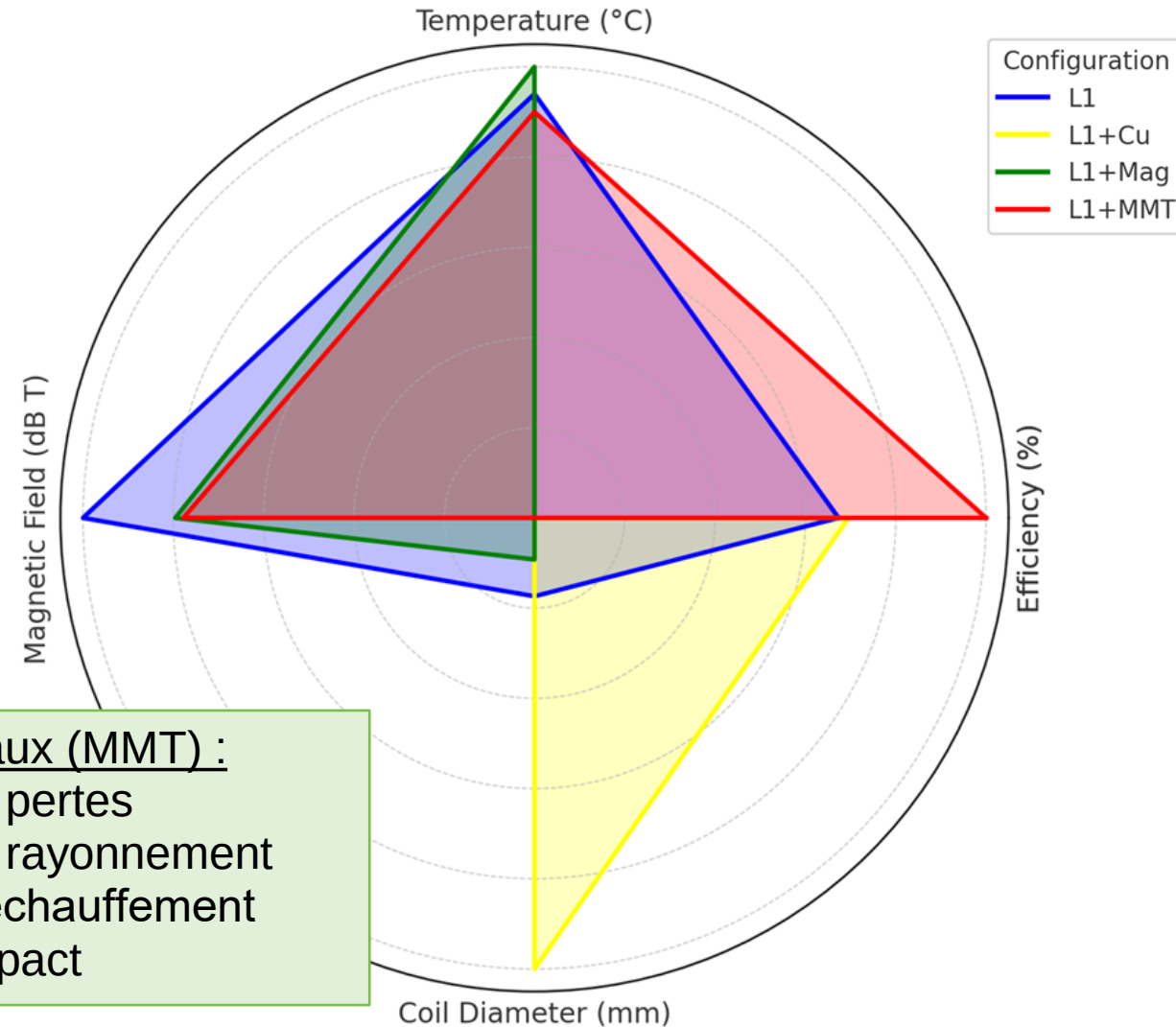
L1+Cu



L1+Mag



L1+MMT



Métamatériaux (MMT) :

- Moins de pertes
- Moins de rayonnement
- Moins d'échauffement
- Plus compact

Conclusion & Perspectives

- Deux axes de recherches sur la VHF à Ampère :
 - Études des topologies, méthodes de dimensionnement
 - Utilisation de métamatériaux
- Perspectives :
 - Amélioration des rendements à l'aide de métamatériaux
 - Développement de nouvelles topologies de convertisseurs DC/DC
 - Lancement d'une thèse sur la thématique en septembre 2026 (ANR)

MERCI POUR VOTRE ATTENTION



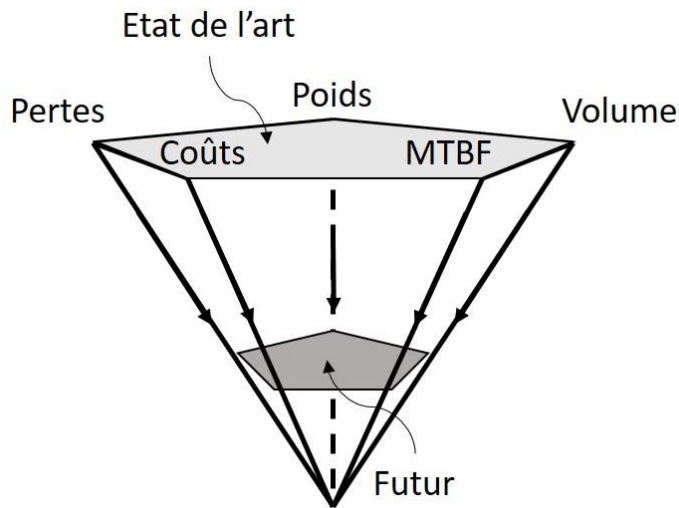
PowerAlps
Université Grenoble Alpes

Conversion d'énergie électrique à très haute fréquence (VHF)

Groupe de travail VHF

Ampère, Lyon : Bruno Allard, Matthieu Beley, Baptiste Daire, Felipe Freitas, Christian Martin, Loris Pace
CEA, Grenoble : Vincent Blanchon, Sébastien Carcouet, Ghislain Despesse, Xavier Maynard
G2Elab, Grenoble : Ansley Jugoo, Yves Lembeye, Florentin Salomez, Jean-Luc Schanen
Support à l'organisation : Cristina Rigo

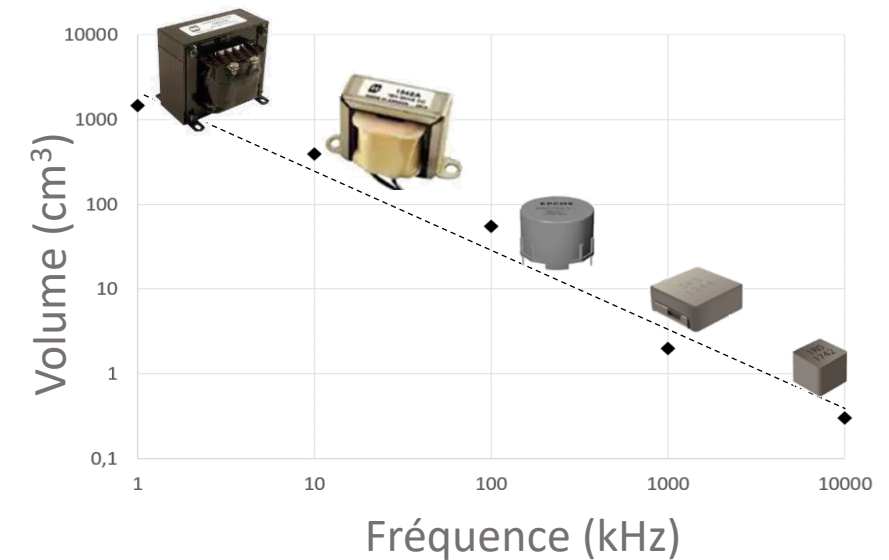
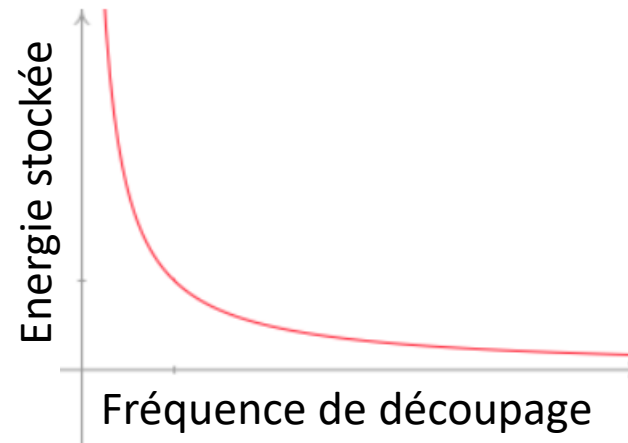
Montée en fréquence des convertisseurs - intérêts



Objectifs de l'électronique de puissance

J. W. Kolar *et al.*, "PWM Converter Power Density Barriers," 2007 Power Conversion Conference - Nagoya, Nagoya, Japan, 2007, pp. P-9-P-29, doi: 10.1109/PCCON.2007.372914.

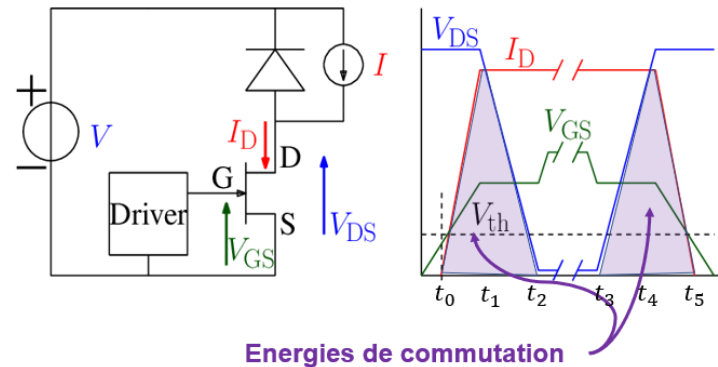
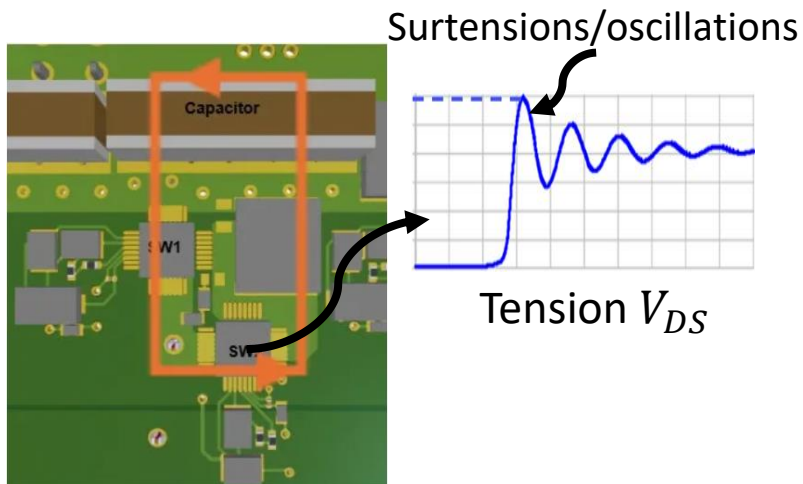
- A puissance équivalente : augmenter la fréquence de commutation revient à réduire l'énergie stockée par cycle



Volume d'une bobine dans un hacheur en fonction de la fréquence

Montée en fréquence des convertisseurs - problèmes

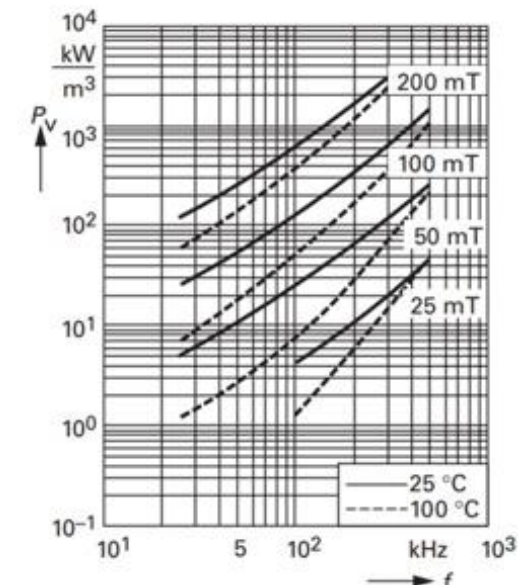
- La montée en fréquence entraine une sensibilité accrue des convertisseurs aux éléments parasites du circuit et des pertes importantes dans les composants actifs et passifs



Pertes par commutation :

$$P = (E_{on} + E_{off}) \cdot f$$

Pertes dans les noyaux magnétiques en fonction de la fréquence



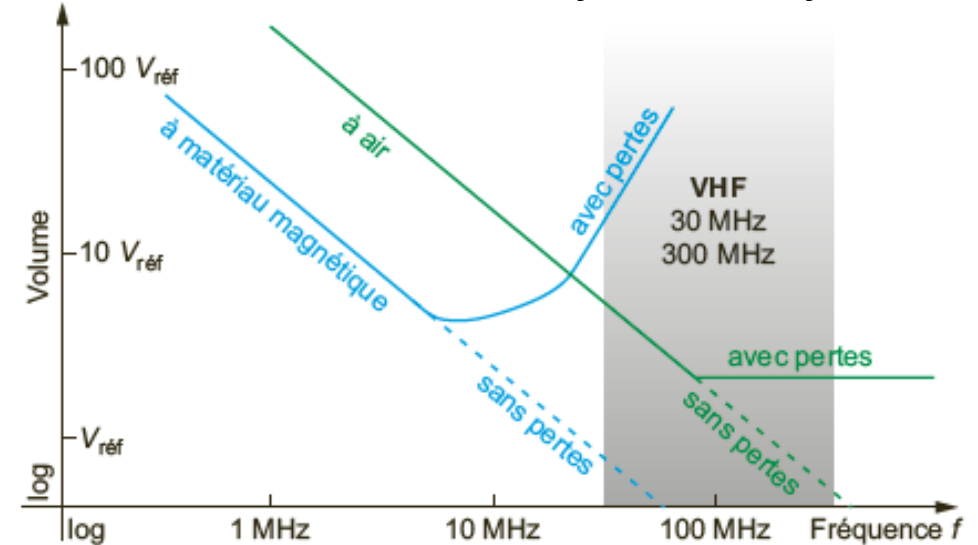
L'électronique de puissance aux fréquences VHF



De nombreux intérêts...

- Topologies mono-interrupteurs à commutations douces
- Fonctionnalisation des éléments parasites
- Suppression des noyaux magnétiques
- Techniques de commande avancées grâce aux dynamiques élevées

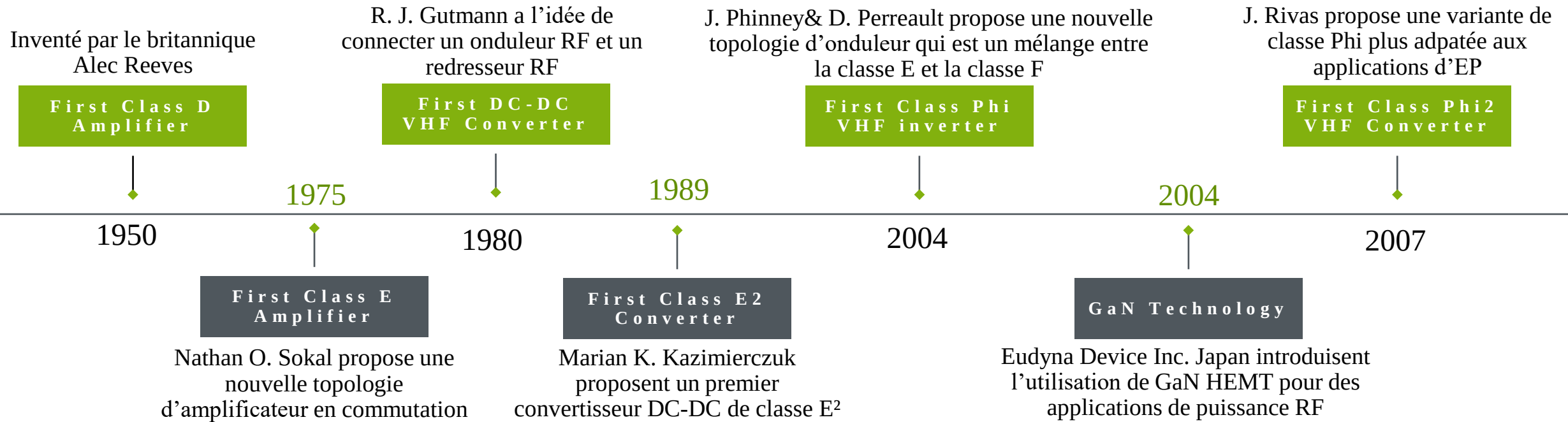
Volume d'une bobine en fonction de f



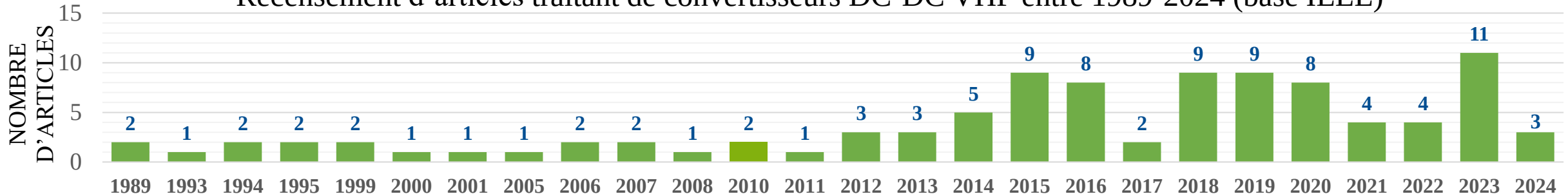
... Mais des challenges

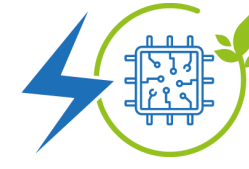
- Pertes par effet de peau et rayonnement
- Sensibilité au point de fonctionnement
- Contraintes en tension/courant sur les composants

L'EP VHF à travers le temps



Recensement d'articles traitant de convertisseurs DC-DC VHF entre 1989-2024 (base IEEE)



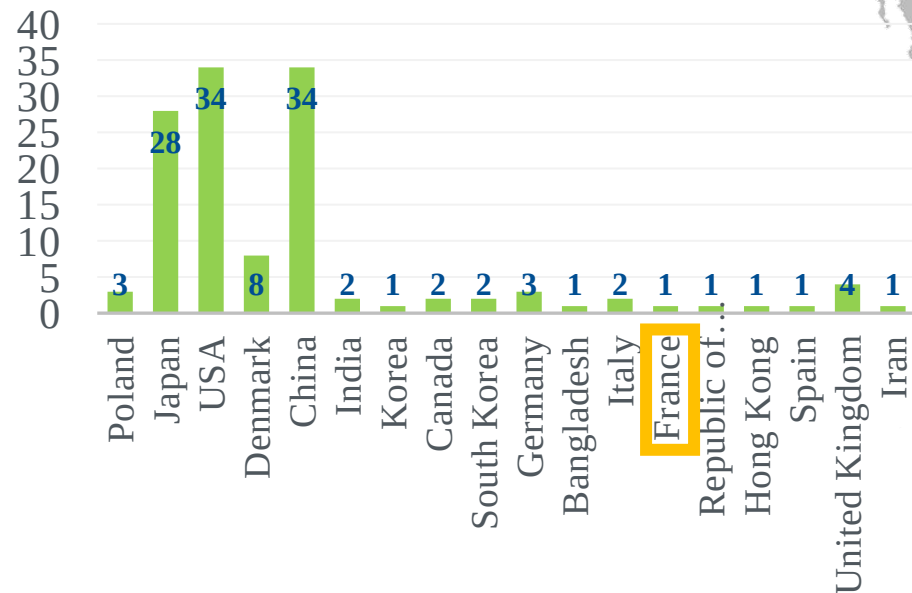


PowerAlps
Université Grenoble Alpes

L'EP VHF à travers l'espace

VHF Power Conversion Actors from 2014-2024:

Identified Publication in Journal as per Country from 2014-2024



Historique des travaux du CEA sur la conversion de puissance VHF

Vincent Blanchon – CEA Leti

Une multitude de thématiques



Rawad MAKHOUL
Thèse de 2017 à 2020



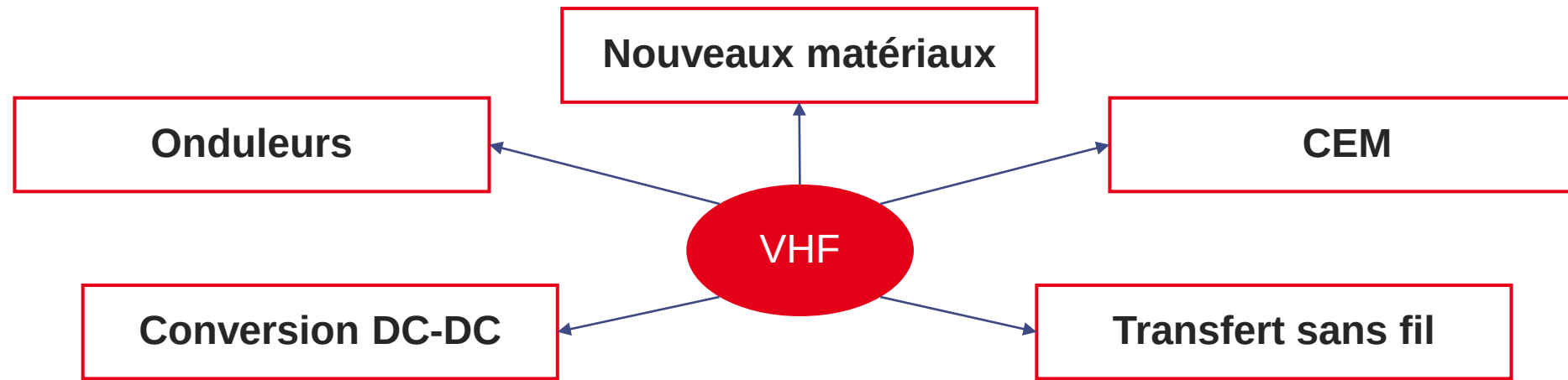
Vincent MASSAVIE
Thèse de 2020 à 2023



Nathis COTE
Thèse de 2021 à 2024



Vincent BLANCHON
Thèse de 2022 à 2025

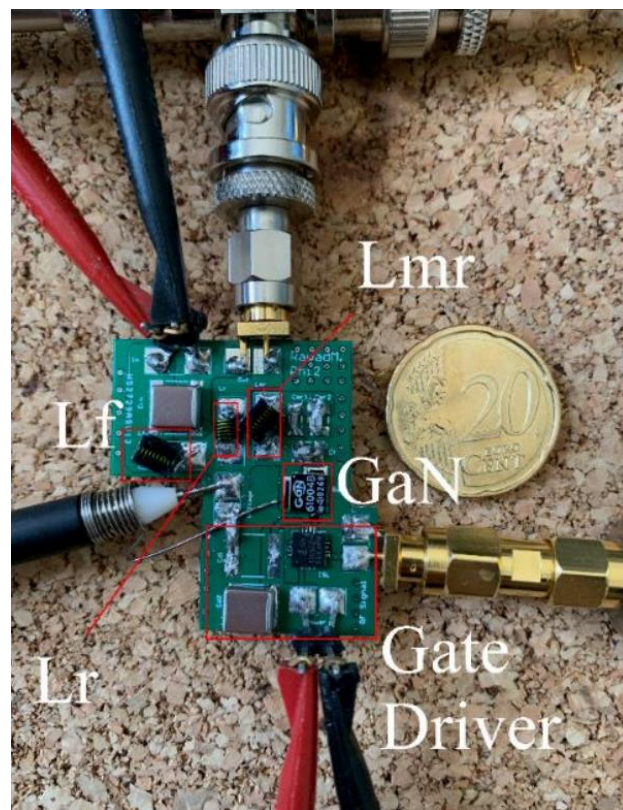


Rawad MAKHOUL

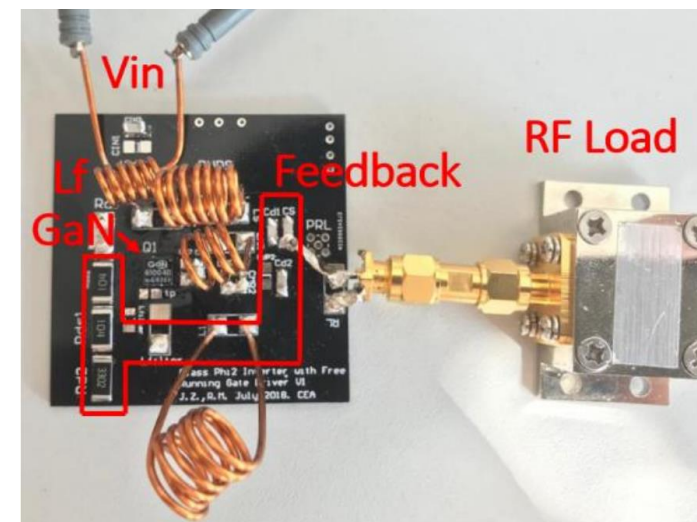
Thèse de 2017 à 2020



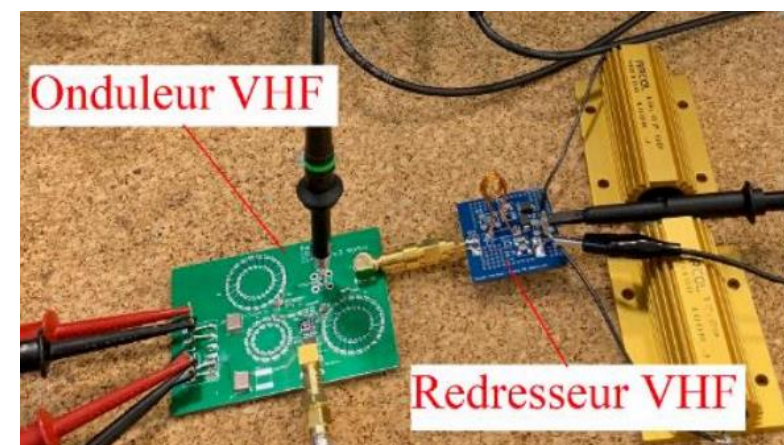
- Travaux sur l'onduleur $\Phi 2$
- Limitation des circuits de pilotage de grille
 - Introduction d'une topologie autopilotée
- Conversion DC-DC VHF



Onduleur $\Phi 2$ fonctionnant à 50 MHz



Onduleur $\Phi 2$ autopiloté



Convertisseur DC-DC 50 MHz

Vincent MASSAVIE

Thèse de 2020 à 2023



- Mauvaises performances des inductances à VHF
 - Introduction des résonateurs piézoélectriques en conversion VHF
 - Développement de la topologie L-piezo
- Sensibilité à la variation de charge
 - Régulation du ZVS

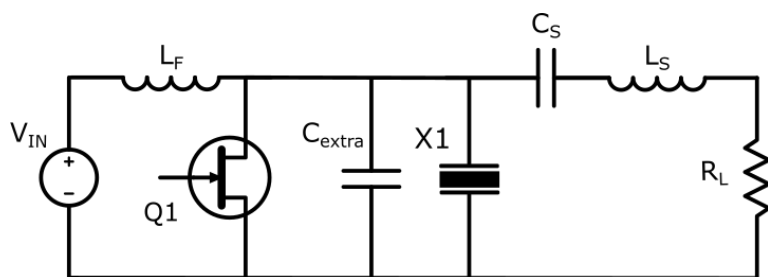
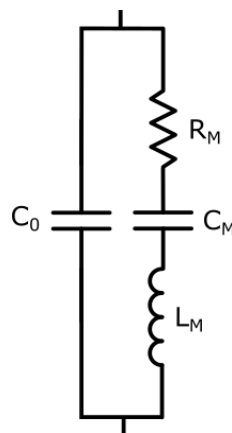
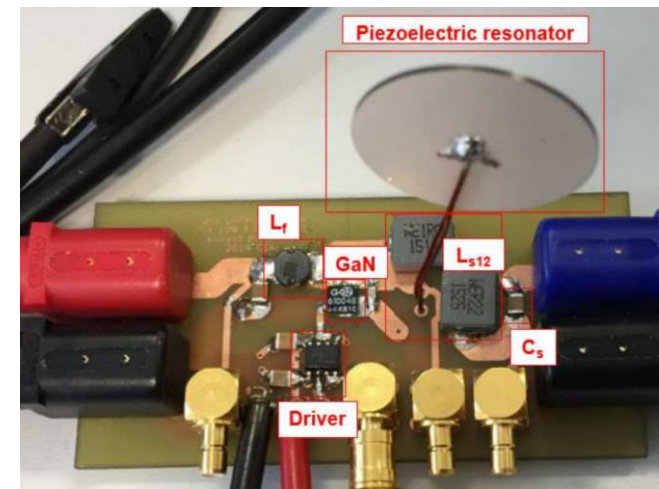


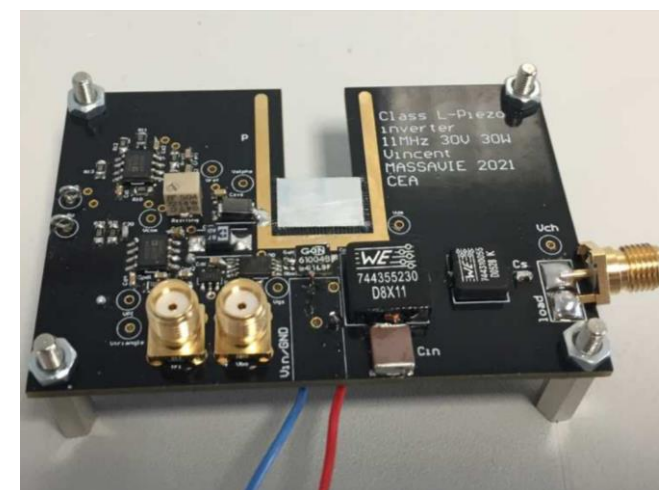
Schéma onduleur L-piezo



Modèle électrique (BVD) résonateur piézoélectrique



Onduleur L-piezo
1.4 MHz
(résonateur PZT)



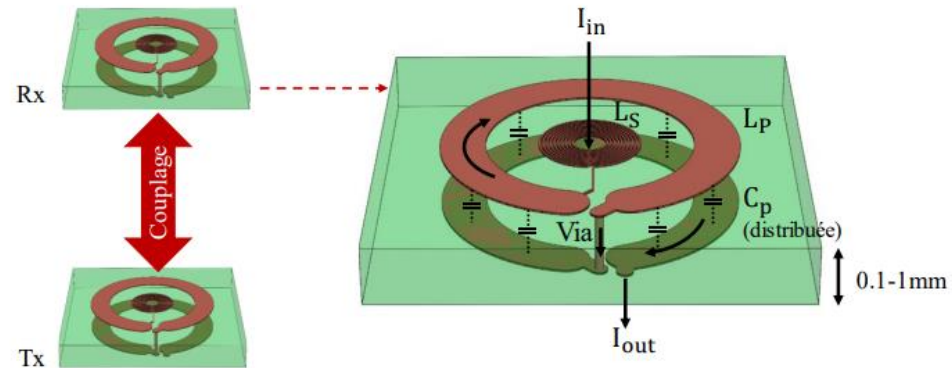
Onduleur L-piezo
10.4 MHz avec
régulation du ZVS
(résonateur LNO)

Nathis COTE

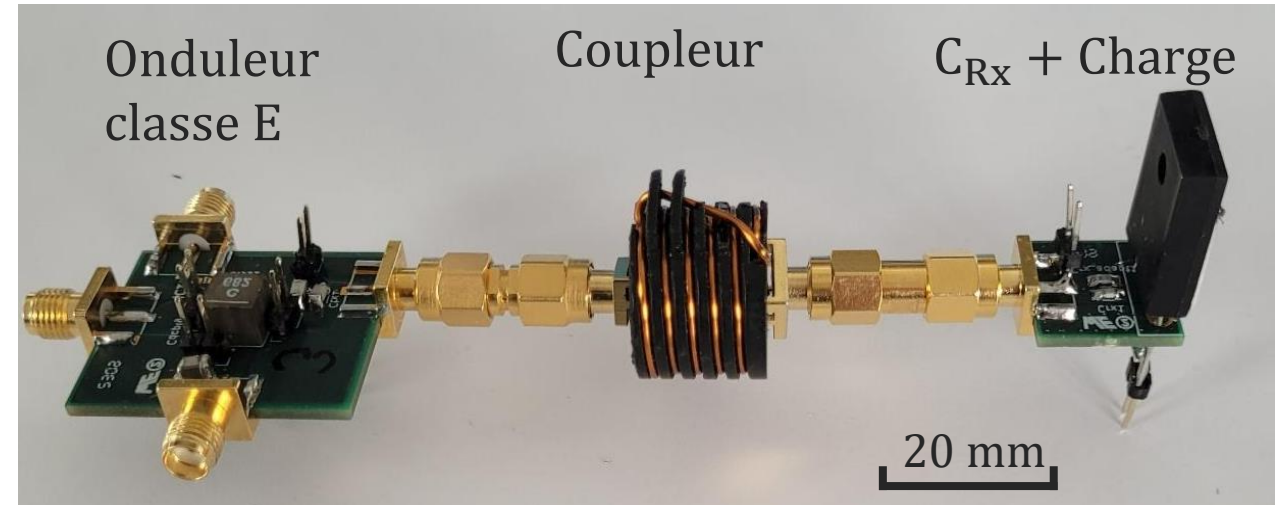
Thèse de 2021 à 2024



- Conversion VHF appliquée à la transmission sans fil
 - Onduleur classe E
- Modélisation et mise en œuvre de coupleurs inductifs, capacitifs et auto-résonants

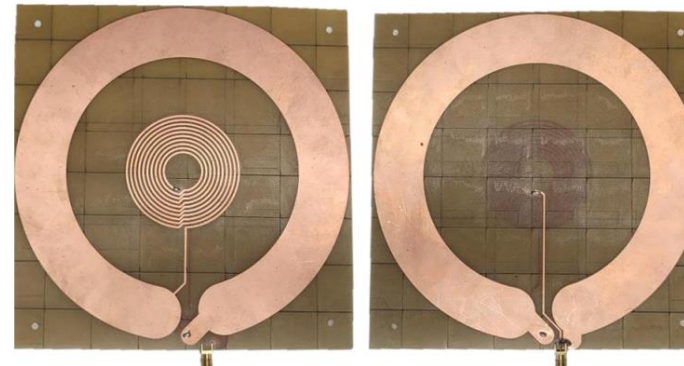


Coupleurs auto-résonants avec adaptation d'impédance



Système de connecteur sans fil compact

$P_{OUT} = 43 \text{ W}$ $\eta = 78\%$ $f = 13,56 \text{ MHz}$

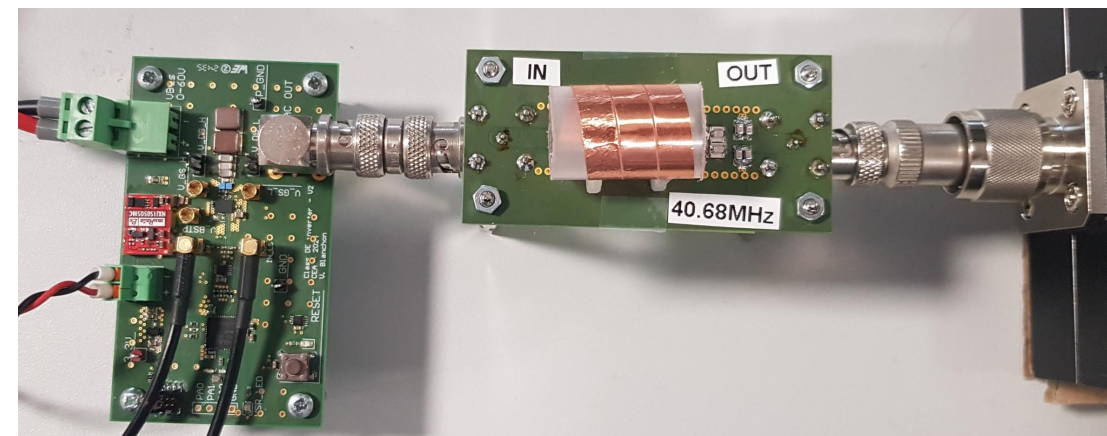


Vincent BLANCHON

Thèse de 2022 à 2025



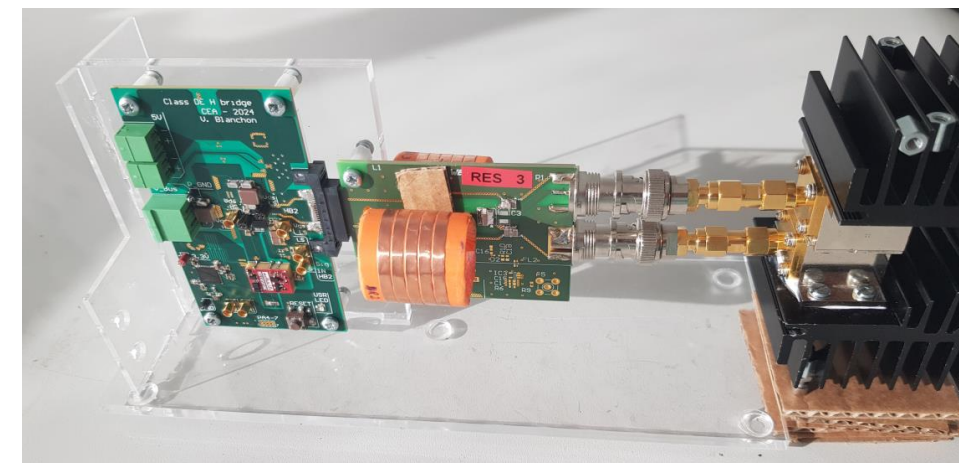
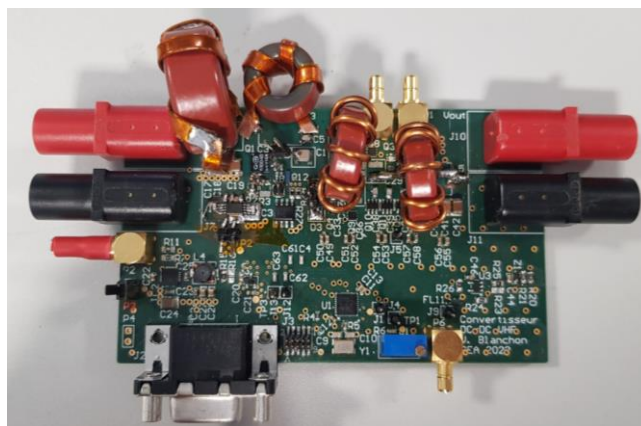
- Conversion DC-DC VHF
 - Régulation de la tension de sortie
- Onduleur VHF
 - Travail sur l'onduleur classe DE (bras de pont)
 - Montée en fréquence
- Travaux autour de la CEM



Onduleur classe DE 40,68 MHz

Convertisseur DC-DC
24 V vers 12 V

$$\eta_{MAX} = 85,6 \% @ P_{OUT} = 9 W$$



Onduleur classe DE push-pull 2 x 50 W



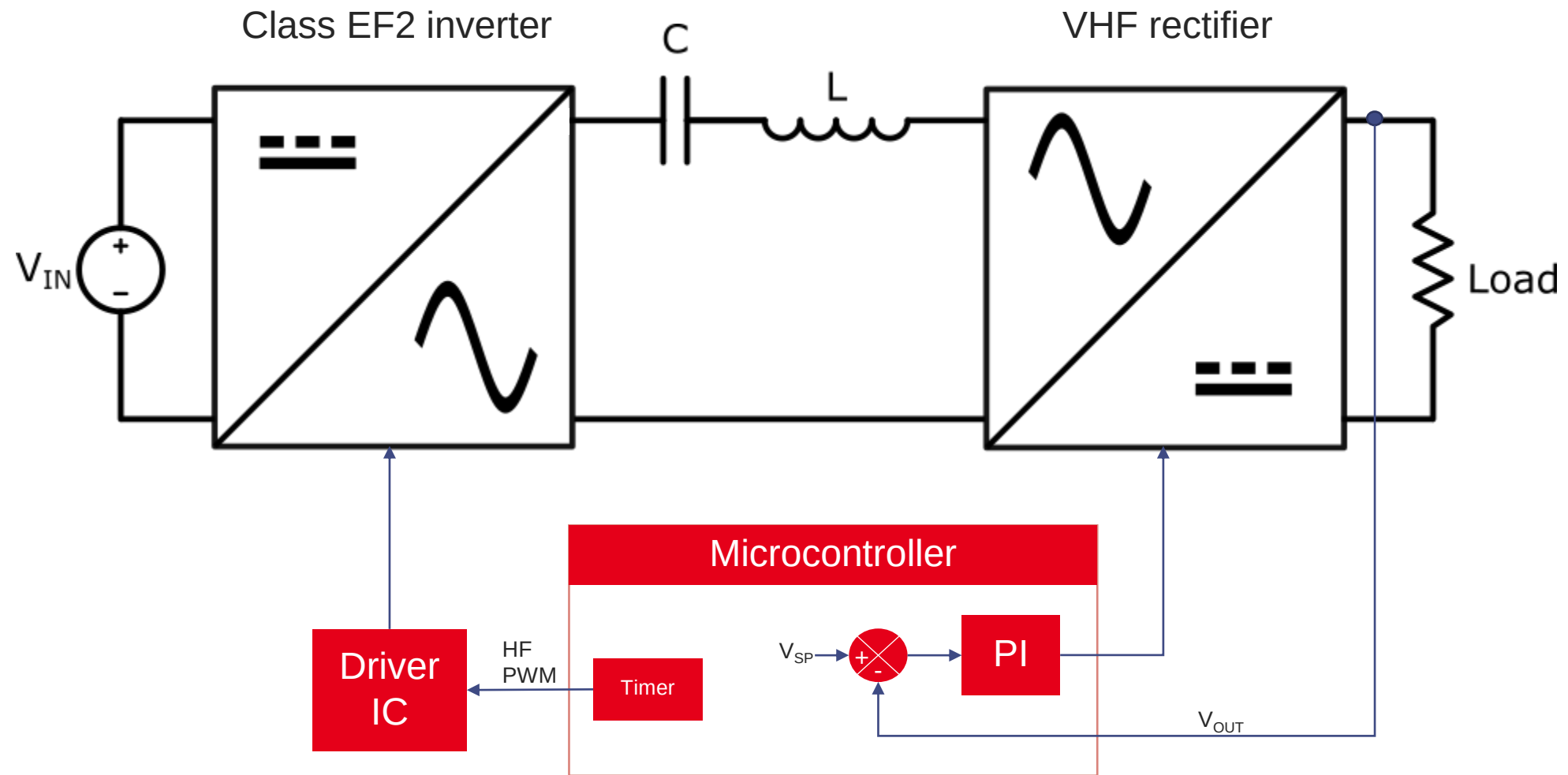
Convertisseur DC- DC régulé en ■ tension

Une méthode basée sur une impédance pilotée

DC-DC VHF régulé en tension

Objectif

$f = 13,56 \text{ MHz}$

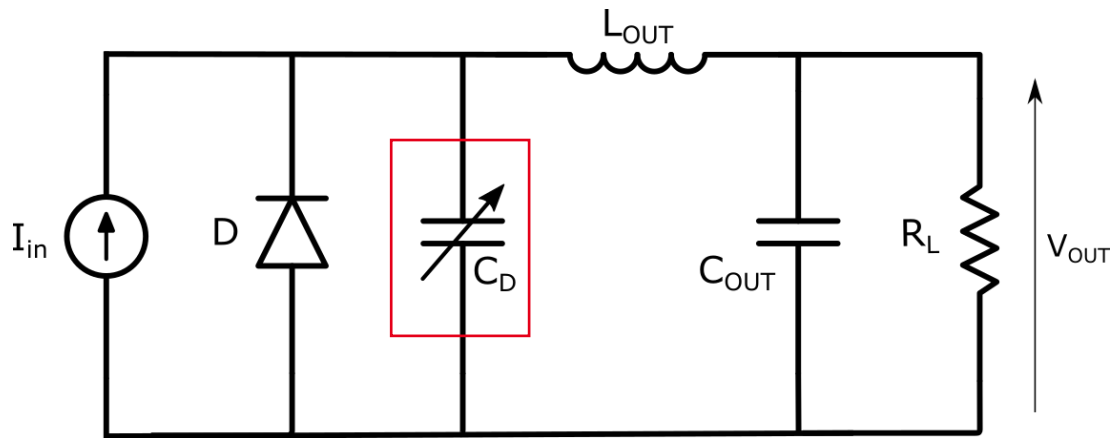


DC-DC VHF réglé en tension

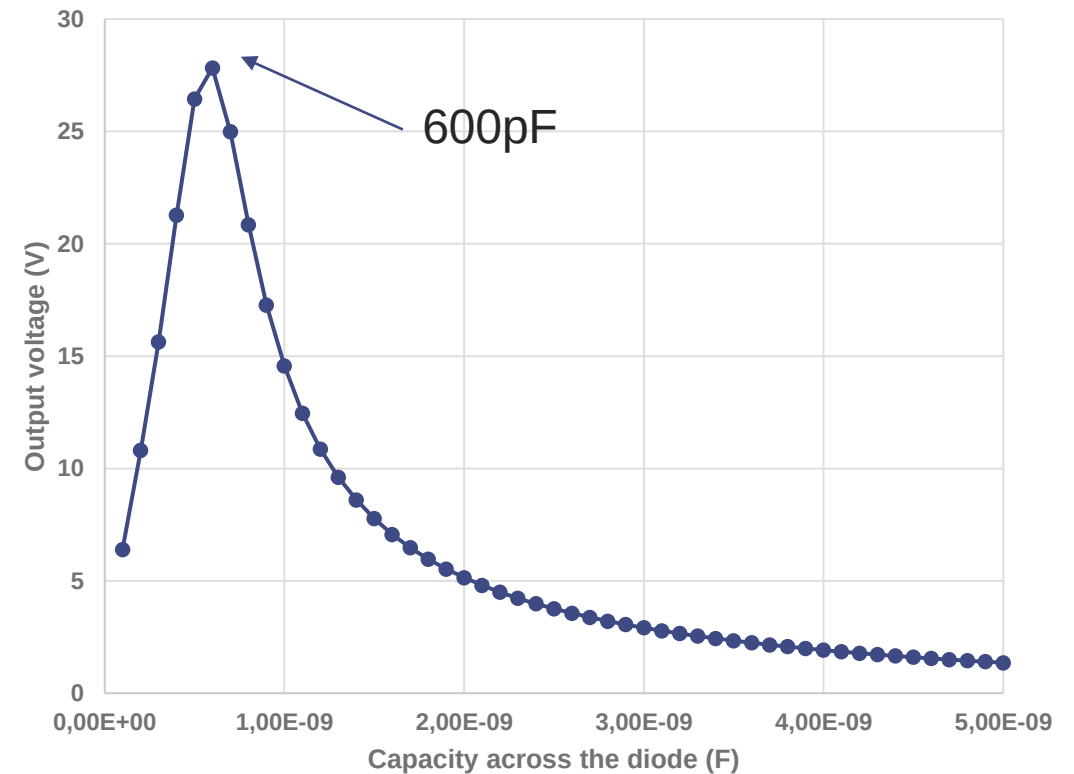
Comment agir sur la tension de sortie ?

$f = 13,56 \text{ MHz}$

Redresseur classe E avec condensateur C_D ajustable



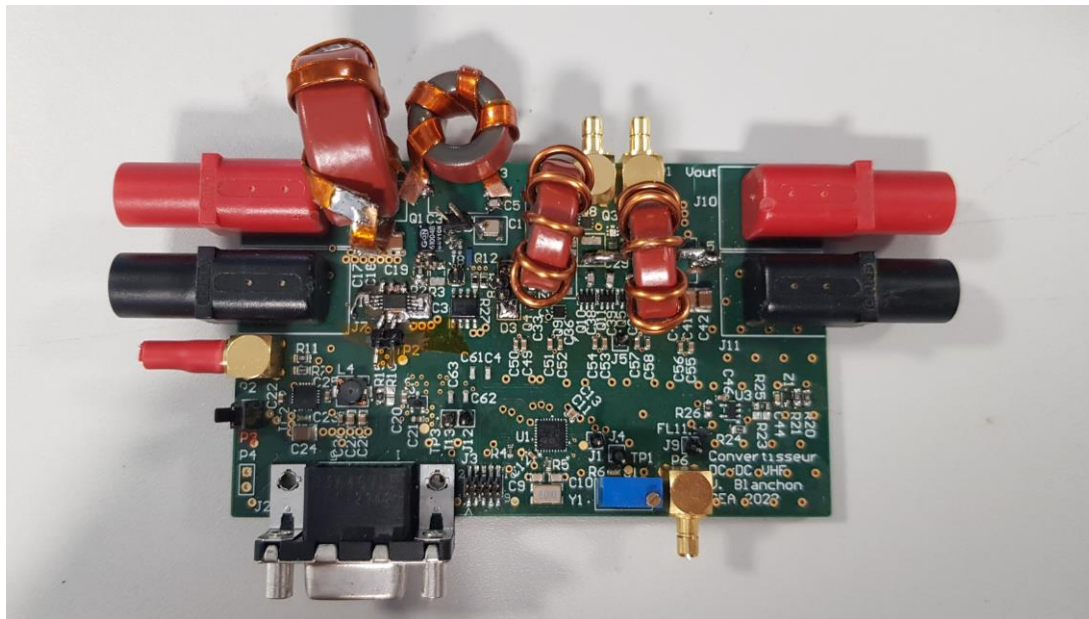
Tension de sortie du redresseur en fonction de la valeur de C_D



DC-DC VHF réglé en tension

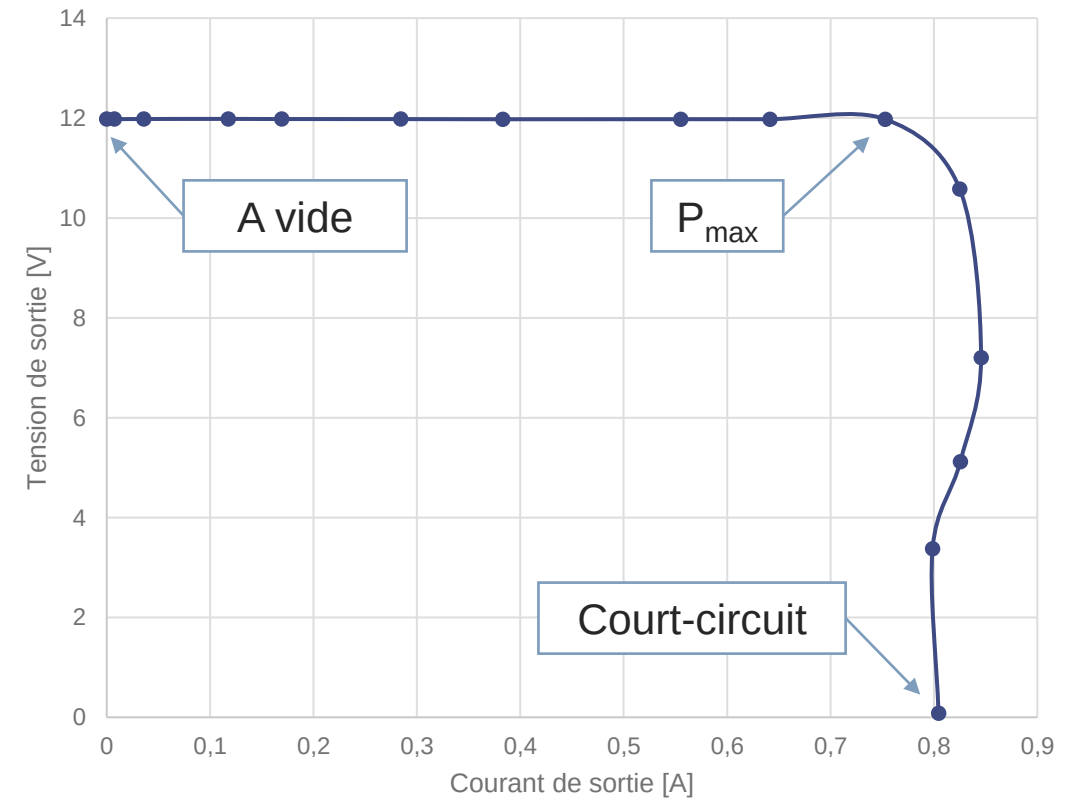
Mise en œuvre expérimentale

$f = 13,56 \text{ MHz}$



$\eta_{MAX} = 85,6 \% @ P_{OUT} = 9 \text{ W}$

Tension de sortie en fonction du courant de sortie
@ $V_{IN} = 24\text{V}$

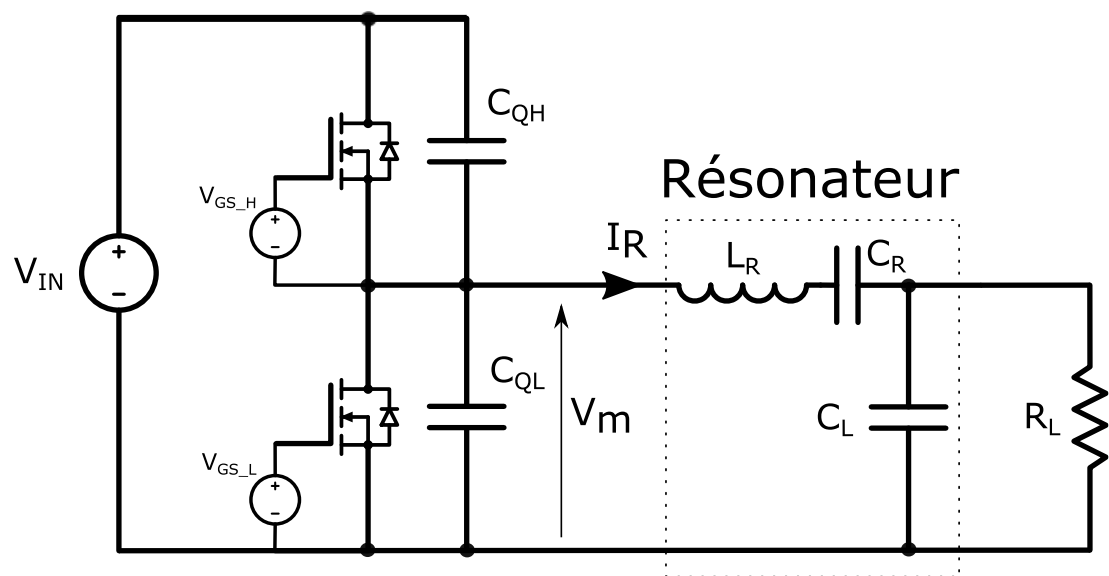




■ Onduleur classe DE

Comment faire fonctionner un bras de pont à très haute fréquence ?

L'onduleur classe DE

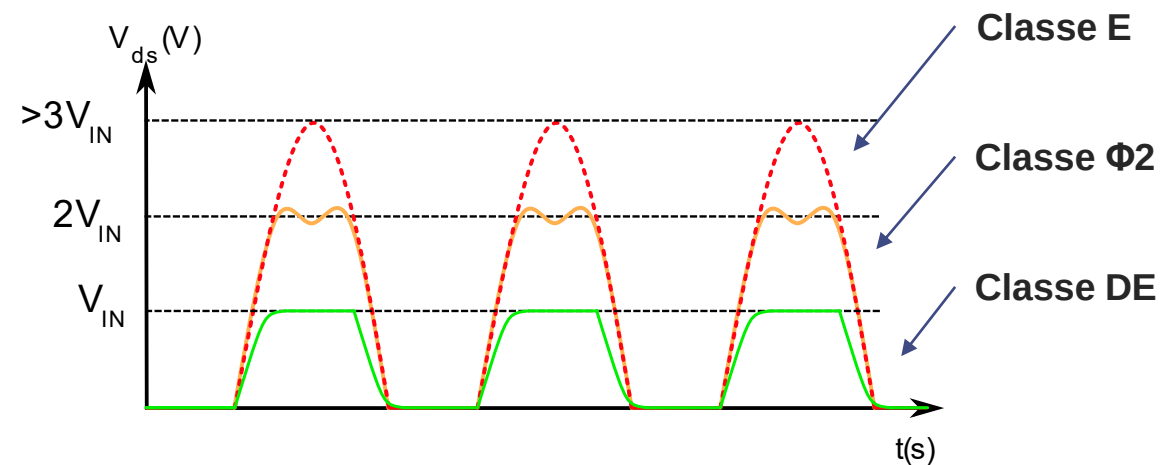


Avantages

- Faible contrainte en tension sur les interrupteurs
- Une seule inductance

Défi : Pilotage des interrupteurs

- Gestion des temps morts
- Interrupteur du haut référencé au point milieu
- Rapport cyclique des commandes < 50%



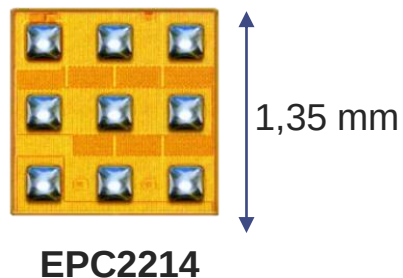
Viable à 40,68 MHz ?

Une commutation rapide

Driver : Courant de sortie suffisant

Transistor : Faible charge de grille Q_G

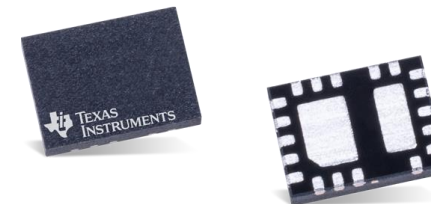
Interconnexion : Faible inductance de maille
+ packages



Des commutations synchronisées

Driver : Délai maîtrisé entre la commande du transistor haut et bas

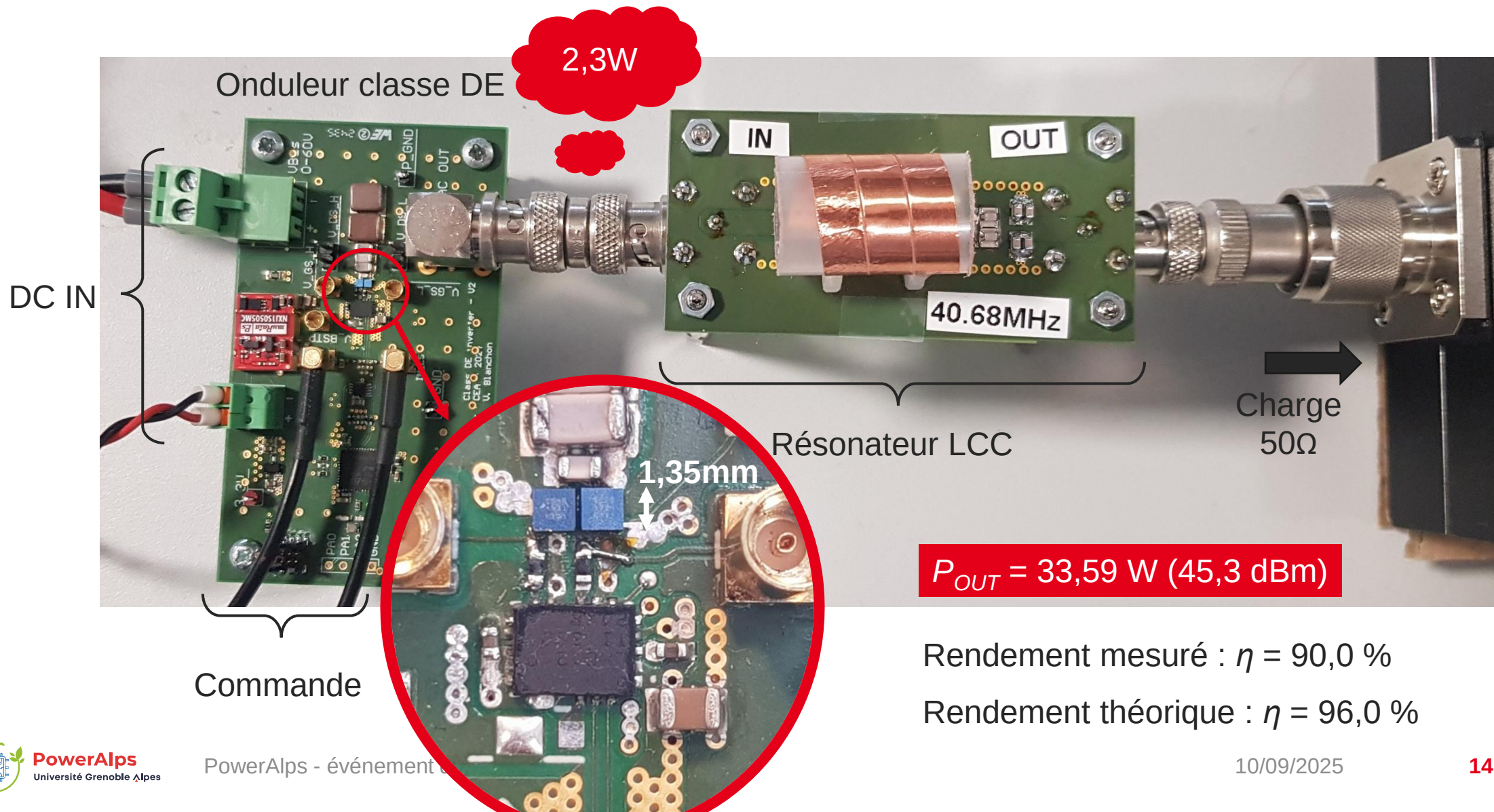
Interconnexion : Temps de propagations maîtrisés



LMG1210

Validation expérimentale

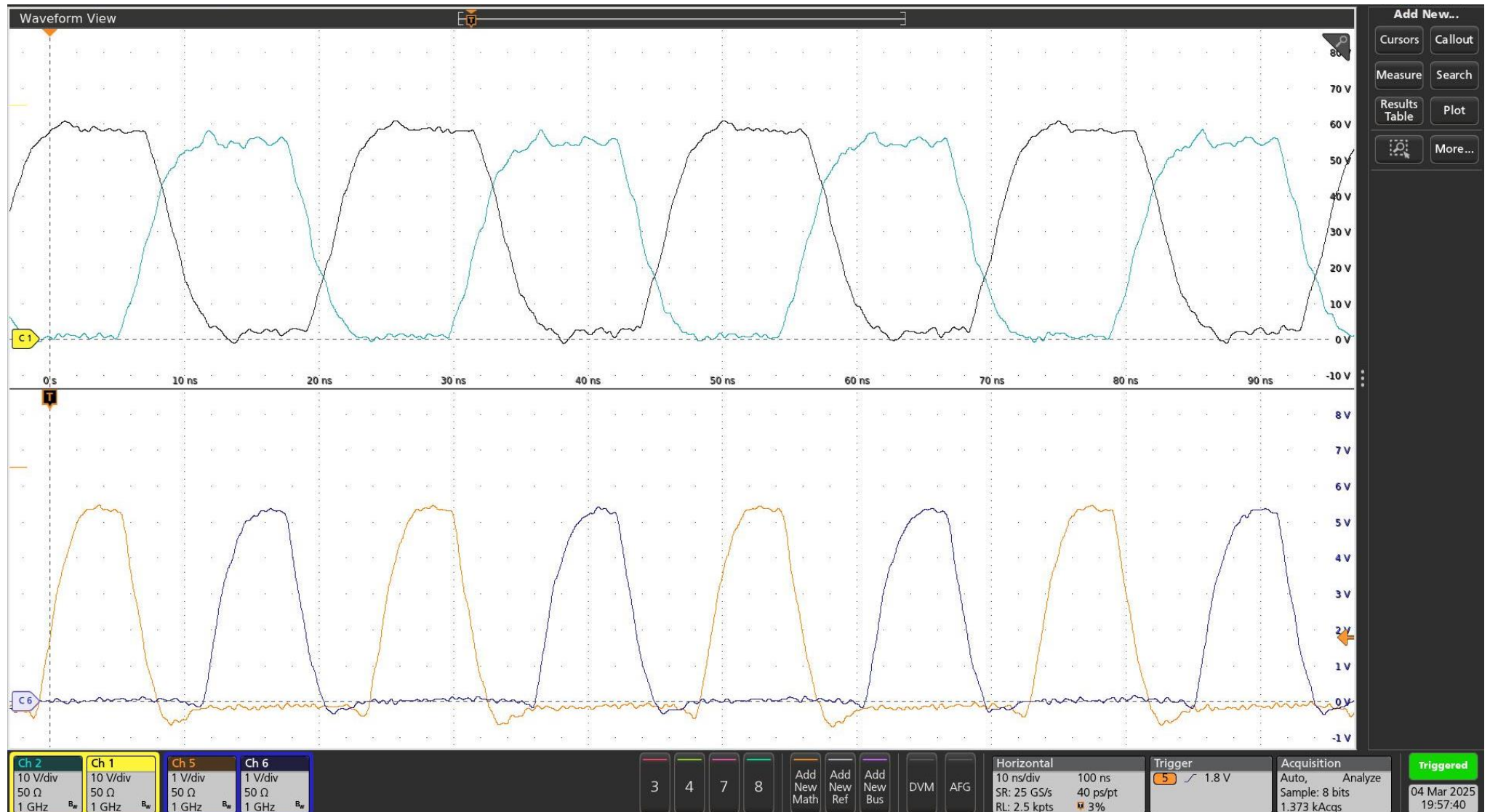
$f = 40,68 \text{ MHz}$



Formes d'onde expérimentales à 40,68 MHz

Tension drain
source V_{DS}

Tension grille
source V_{GS}





Onduleur classe DE

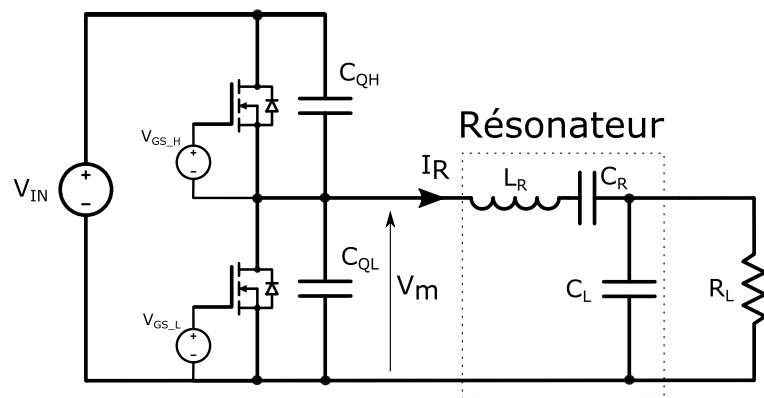
■ push-pull

Impact sur la CEM

Réduction des émissions CEM

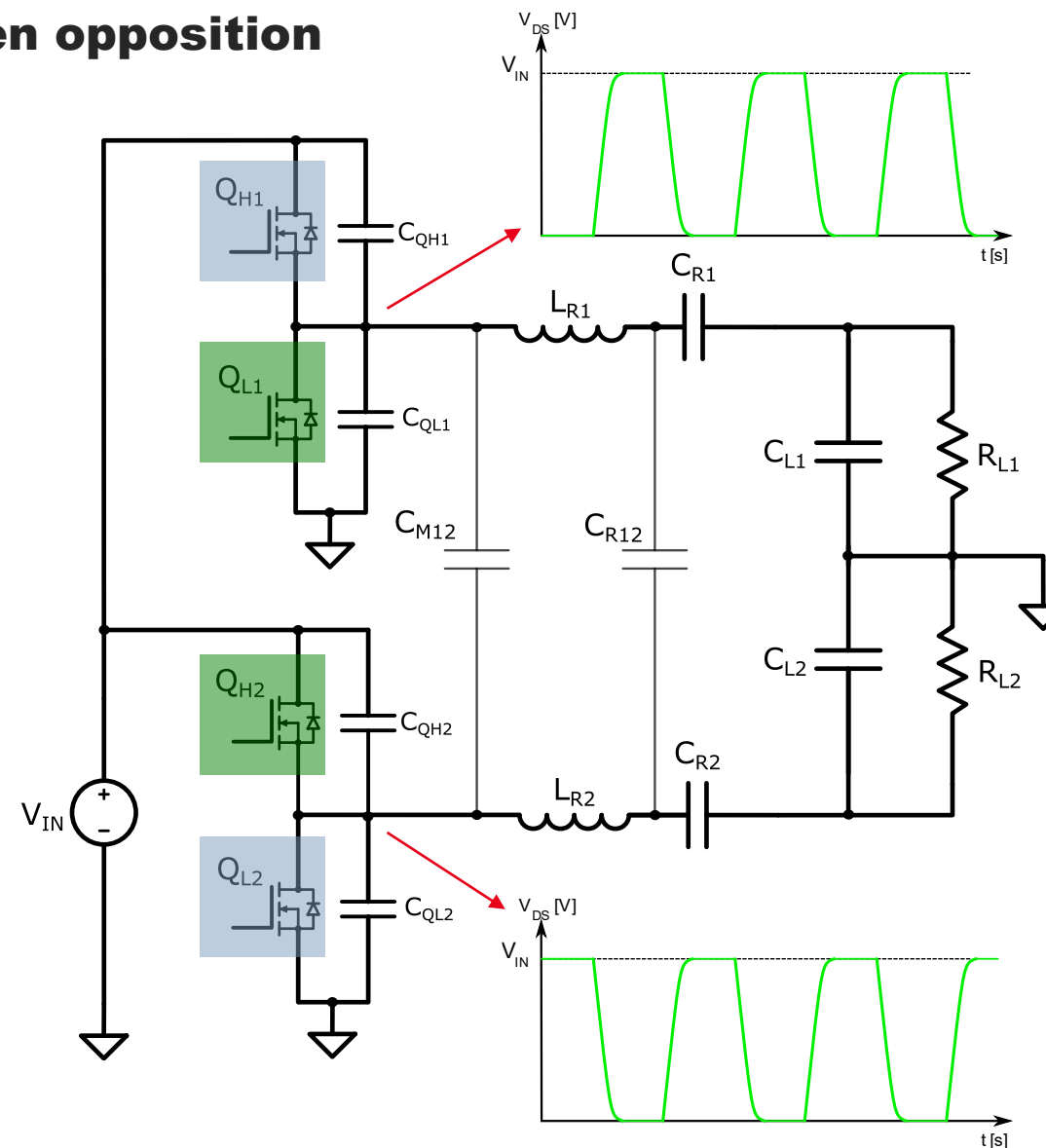
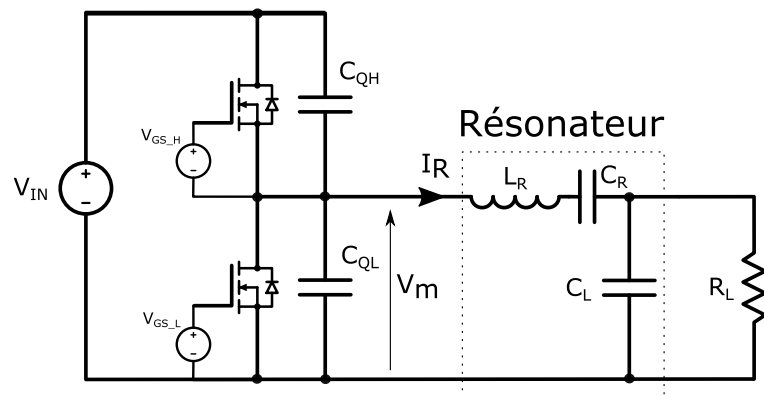
Fonctionnement de convertisseurs VHF en opposition de phase

$f = 13,56 \text{ MHz}$



+

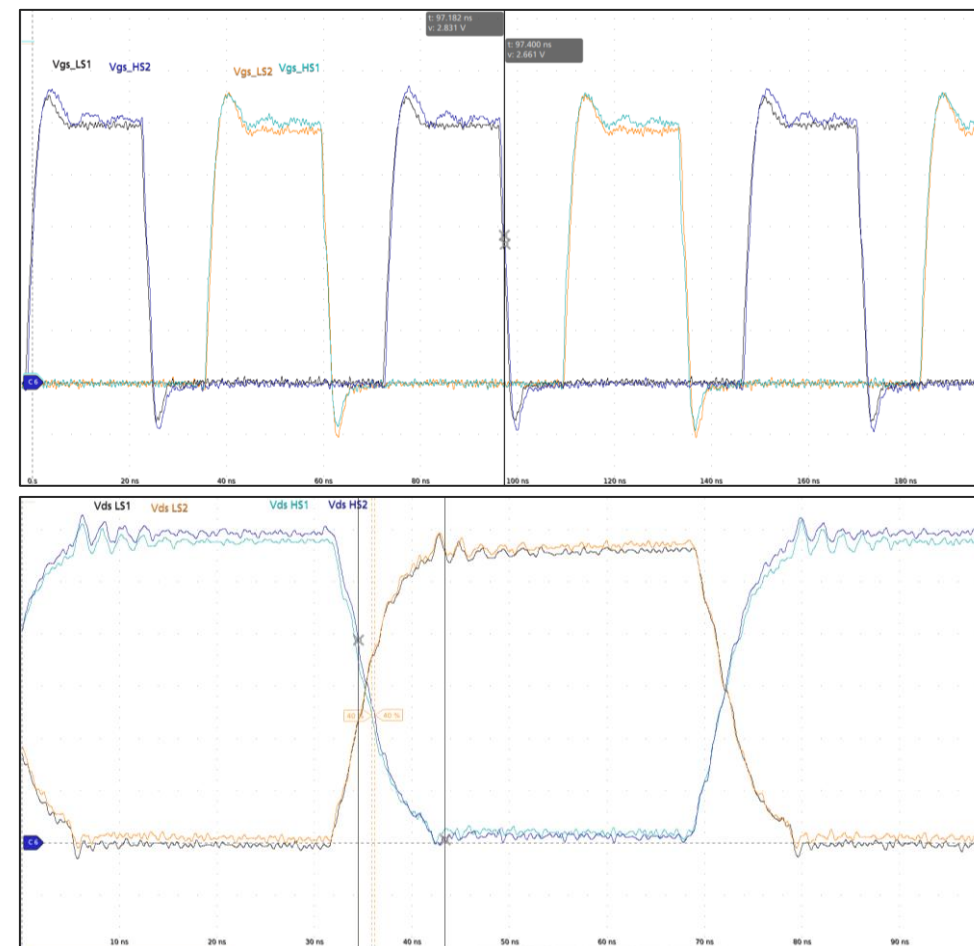
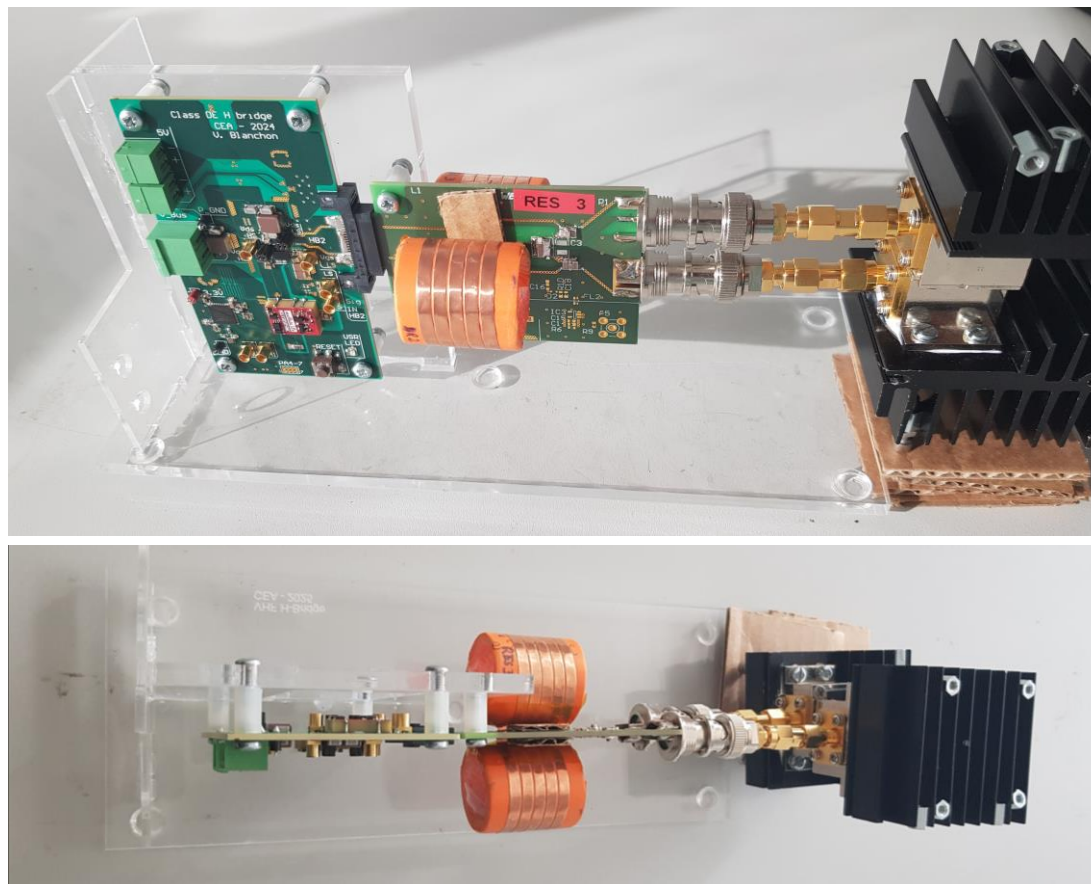
=



Réduction des émissions CEM

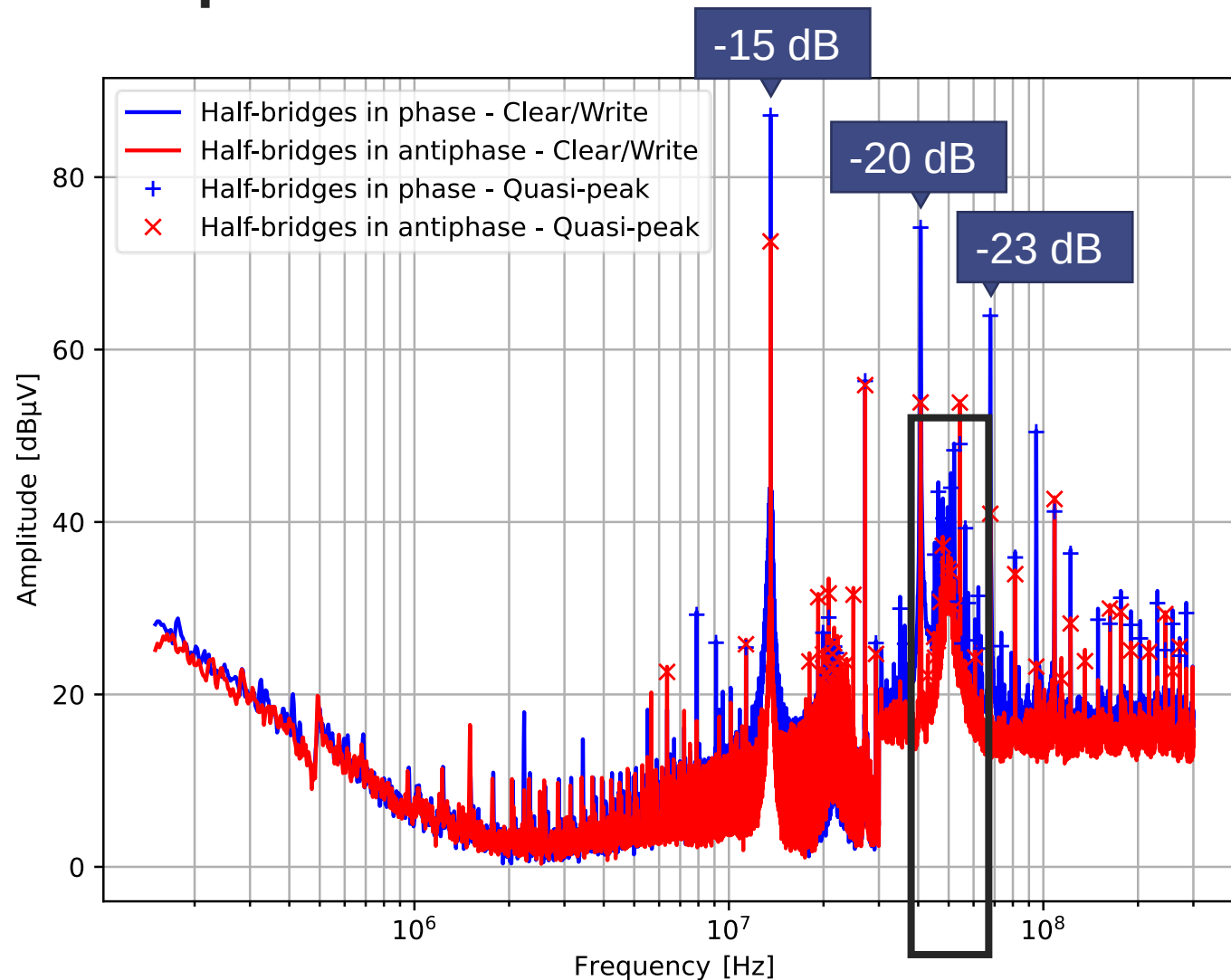
Prototype

2 x 50W onduleurs classe DE à 13,56 MHz



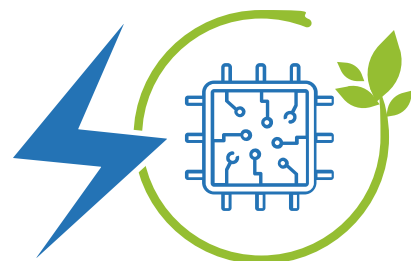
Réduction des émissions CEM

Résultats expérimentaux

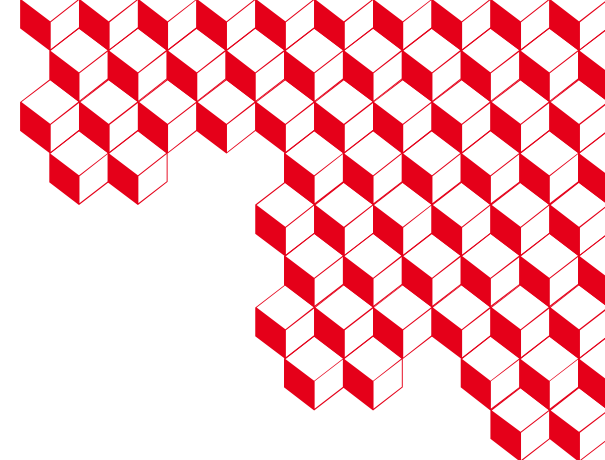


- **Réduction** de l'amplitude des **harmoniques impaires** de la fréquence de commutation en opposition de phase (par rapport à un fonctionnement en phase)

Plus de détails dans le poster présenté ce midi



PowerAlps
Université Grenoble Alpes



Merci pour votre attention

Vincent BLANCHON

Doctorant conversion de puissance
VHF

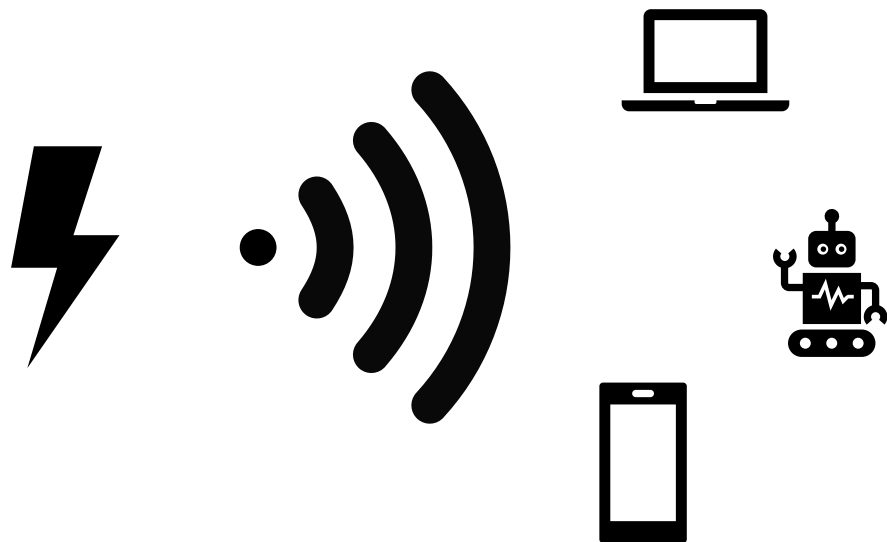
CEA Leti

vincent.blanchon@cea.fr

04 38 78 94 52

Champ d'application des onduleurs VHF

Transfert de puissance sans fil (WPT)



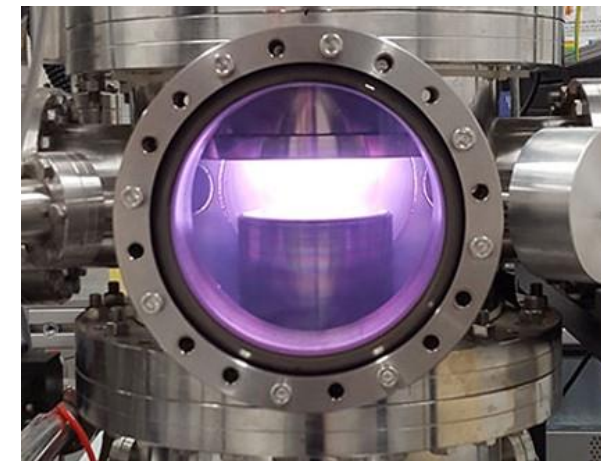
Génération de plasma

Pour la microélectronique:

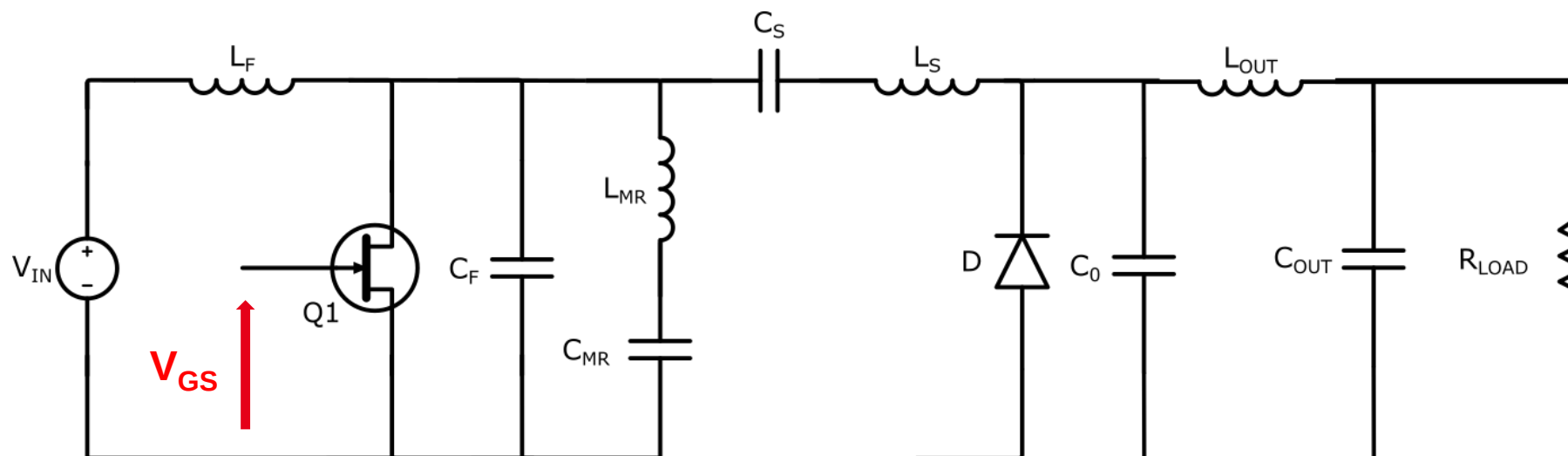
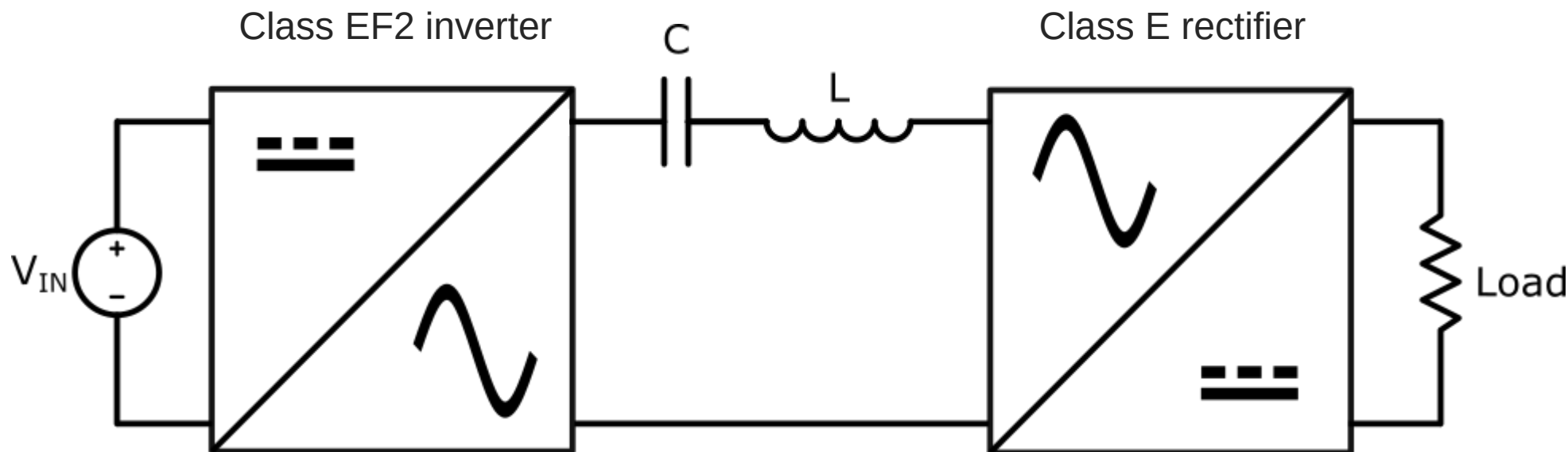
- Gravure
- Dépôt
- Découpe

Pour l'industrie

- Traitement de surface
- Réaction chimiques
- etc.

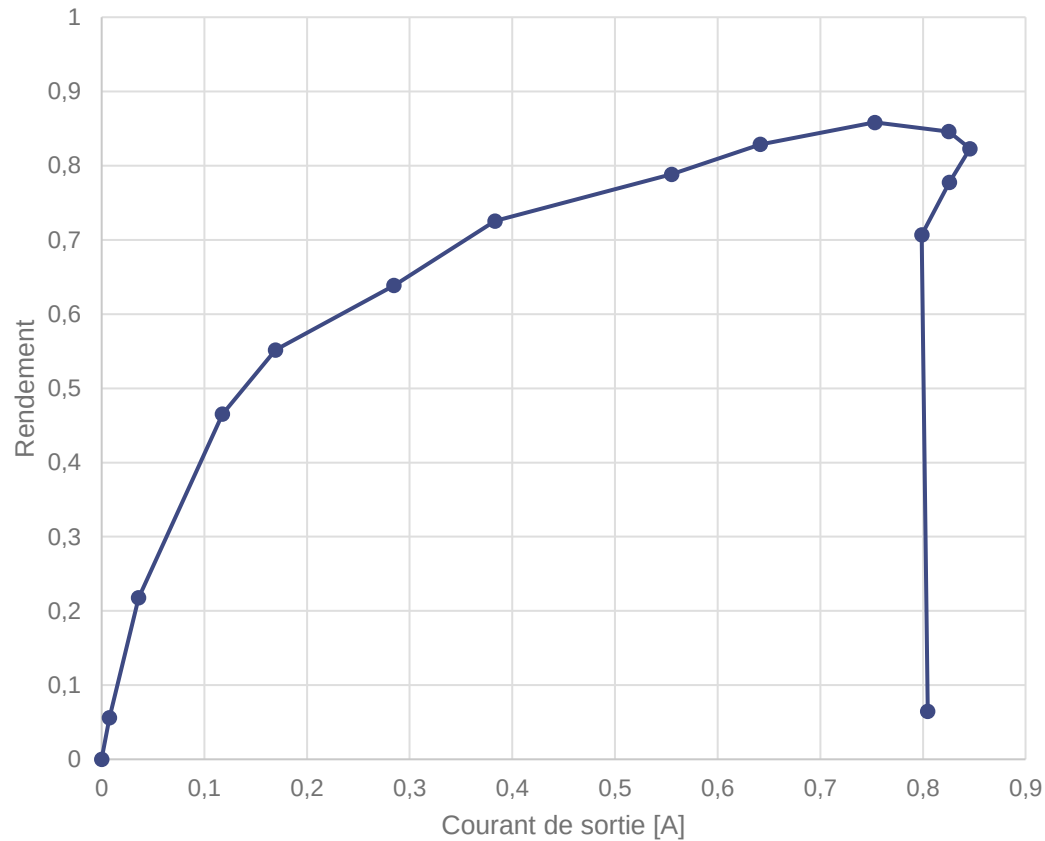


Bloc diagram

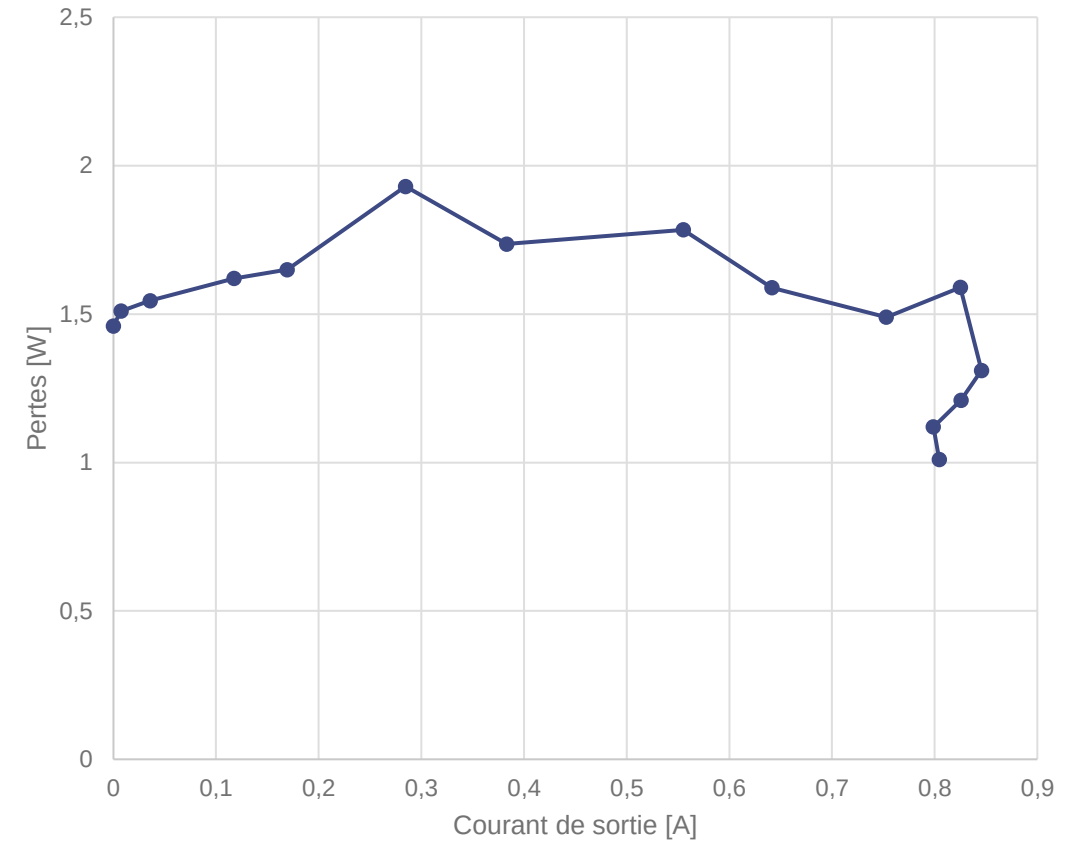


Rendement du convertisseur de 24 V vers 12 V

Rendement en fonction du courant de sortie

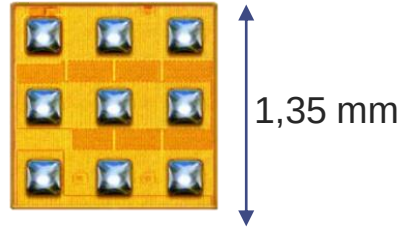


Pertes en fonction du courant de sortie



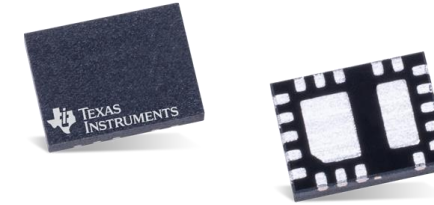
Avec des composants commerciaux

EPC2214



- Tension drain source max : 80 V
- Courant drain source continu : 10 A
- R_{DSon} typique : 20 m Ω
- Q_G typique : 1,8 nC
- C_{oss} typique : 129 pF
- Package faiblement inductif

LMG1210

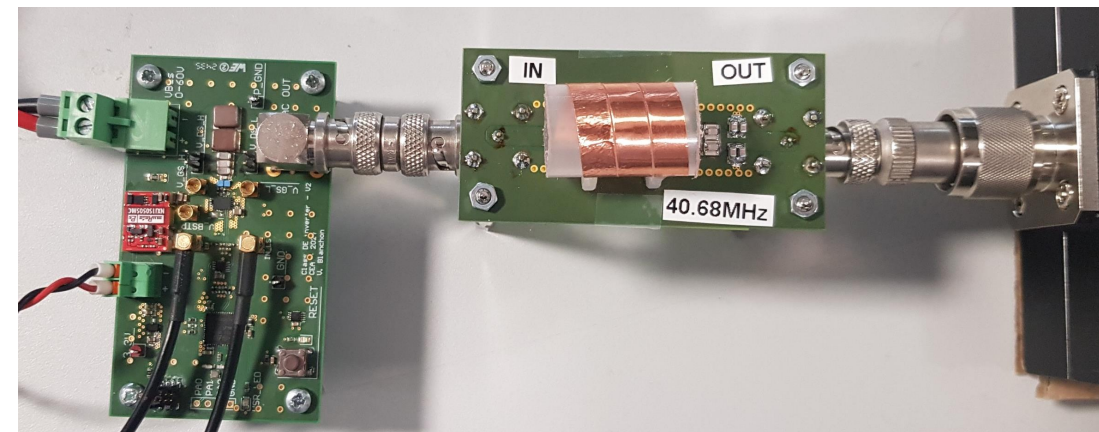
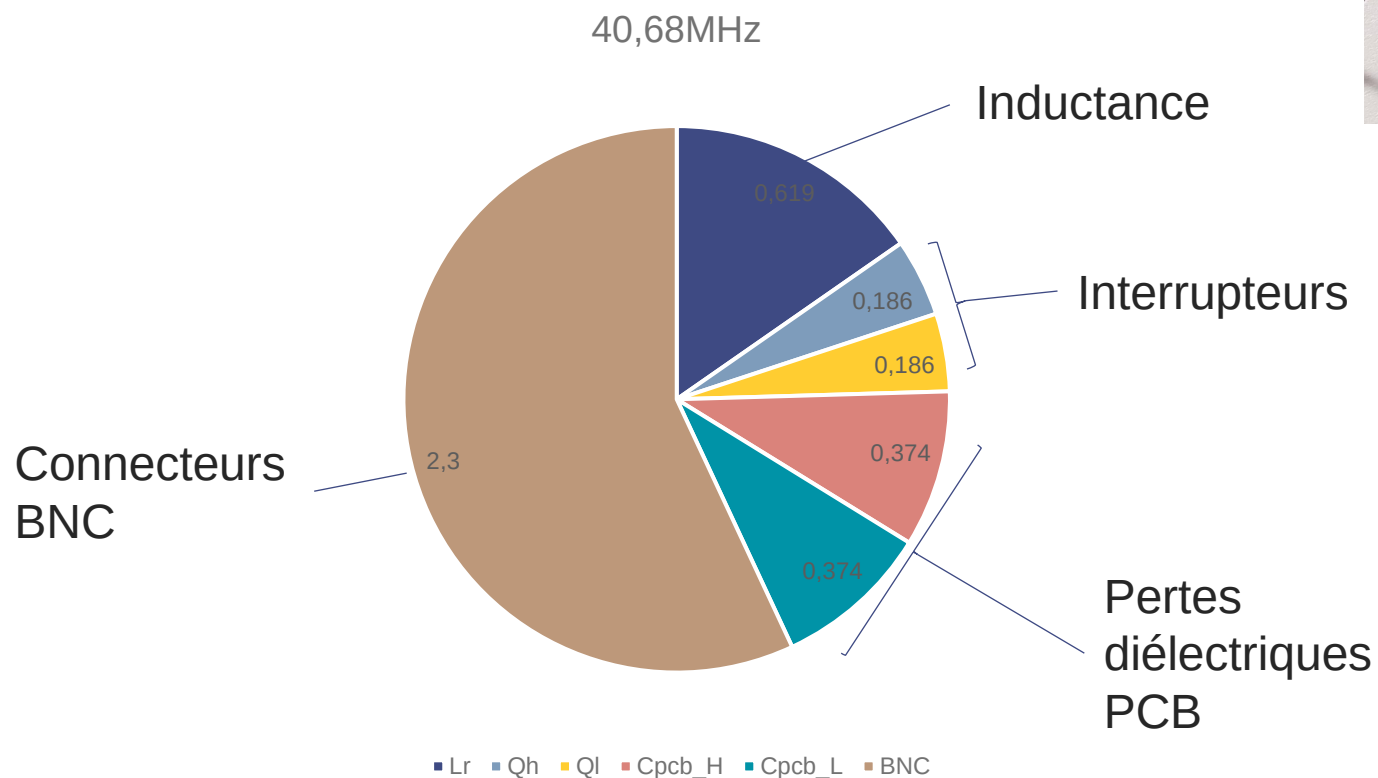


- Pilotage de bras de pont jusqu'à 200 V
- Fréquence maximale de 50 MHz
- Temps de propagation typique : 10 ns
- Déphase entre high-side et low-side : 3.4 ns
- Largeur d'impulsion minimale : 4 ns

Mais routage délicat pour atteindre ces performances

Rendement et répartition des pertes

Répartition des pertes



$$P_{OUT} = 33,59 \text{ W (45,3 dBm) @ 40,68 MHz}$$
$$\eta = 90,0 \%$$

$$P_{OUT} = 45,28 \text{ W (46,5 dBm) @ 13,56 MHz}$$
$$\eta = 90,0 \%$$

Rendement hypothétique sans
connecteurs intermédiaires

$$\eta = 96 \% @ 40,68 \text{ MHz}$$

Journées de clôture du CDP*
électronique de puissance

*Cross-disciplinary program

9-10 Septembre 2025
Centre congrès Minattec
Grenoble

Conception d'Active Gate Drivers pour composant grand-gap - MOSFET SiC et HEMT GaN

Illustration des travaux menés au LAPLACE groupe CS
et au LabCom SEMA
(M. Cousineau, N. Rouger, F. Richardeau)

Marc COUSINEAU
Pr. Toulouse INP

marc.cousineau@laplace.univ-tlse.fr

Sommaire

I. Problématique et objectifs

II. AGD pour MOSFET SiC

I. Protection : Détection rapide de court-circuit

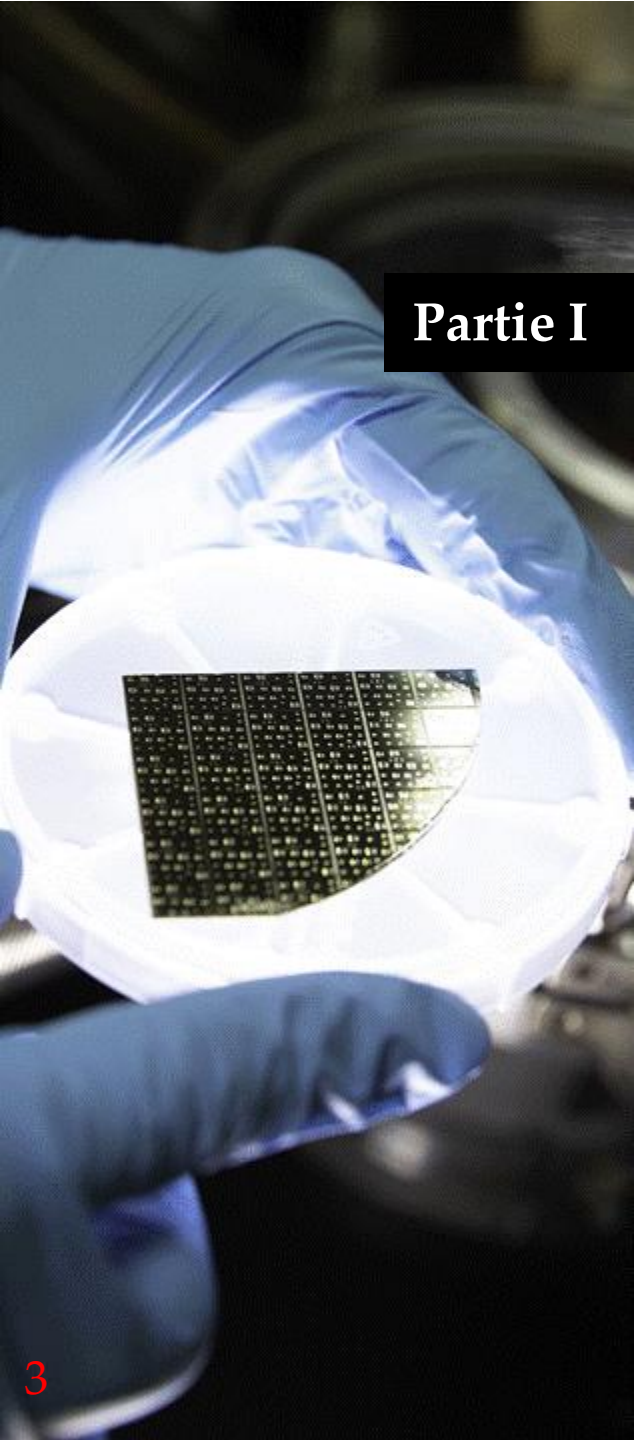
II. Surveillance de l'état de santé

III. Réglage adaptatif du temps-mort (à l'échelle de la commutation)

III. AGD pour HEMT GaN (GaN-on-SOI)

I. Boucle de rétroaction intégrée pour contrôle du dv/dt

II. Réalisation et résultats expérimentaux

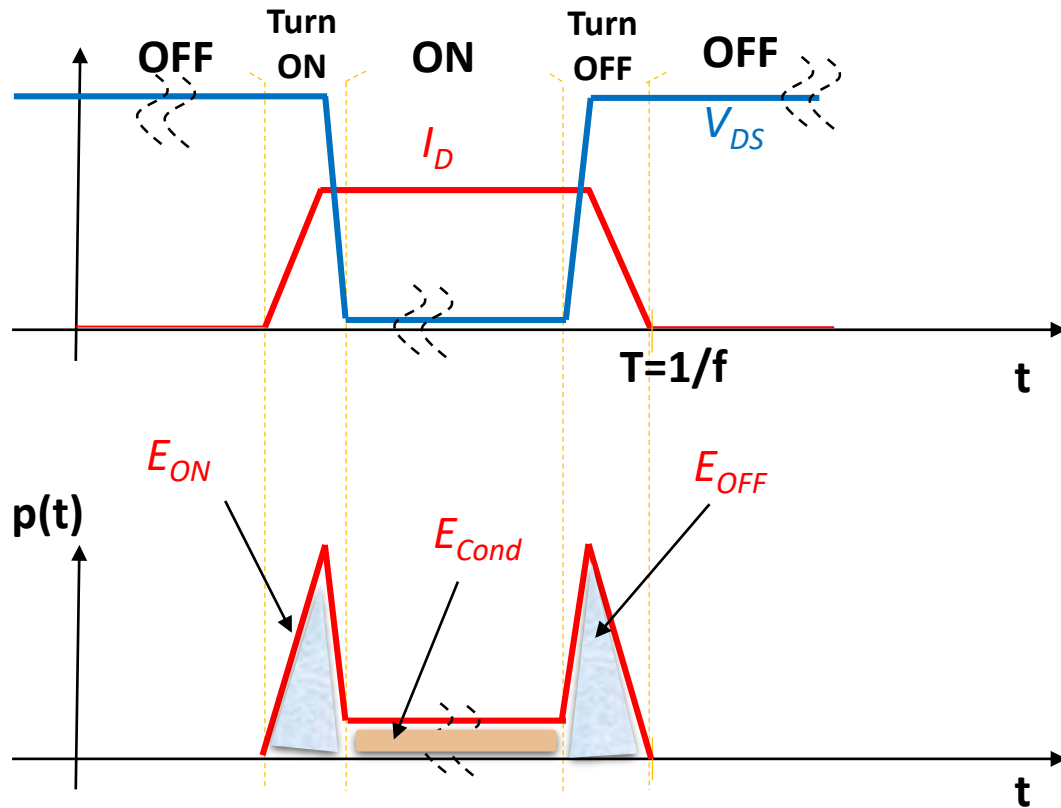


Partie I

Problématique et objectifs

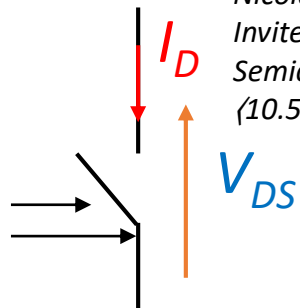
I. Problématique et objectifs

Simplified waveforms



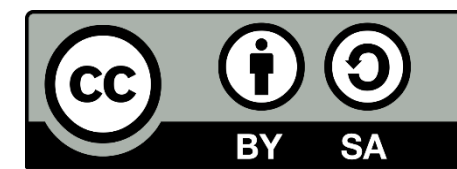
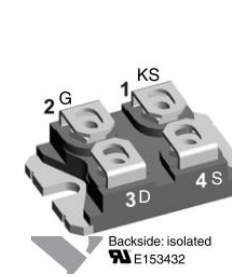
<https://hal.science/hal-04661363v1>

Nicolas C. Rouger. Gate driver topologies, concepts and challenges for WBG devices - Invited short course speaker. 2024 36th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), Jun 2024, Bremen, Germany. (10.5281/zenodo.12941224). (hal-04661363)



$di/dt \geq 1 \text{ A/ns}$ ➡ Over-voltage
 $dv/dt \geq 30 \text{ V/ns}$ ➡ Over-current + Common mode issues

SiC - GaN



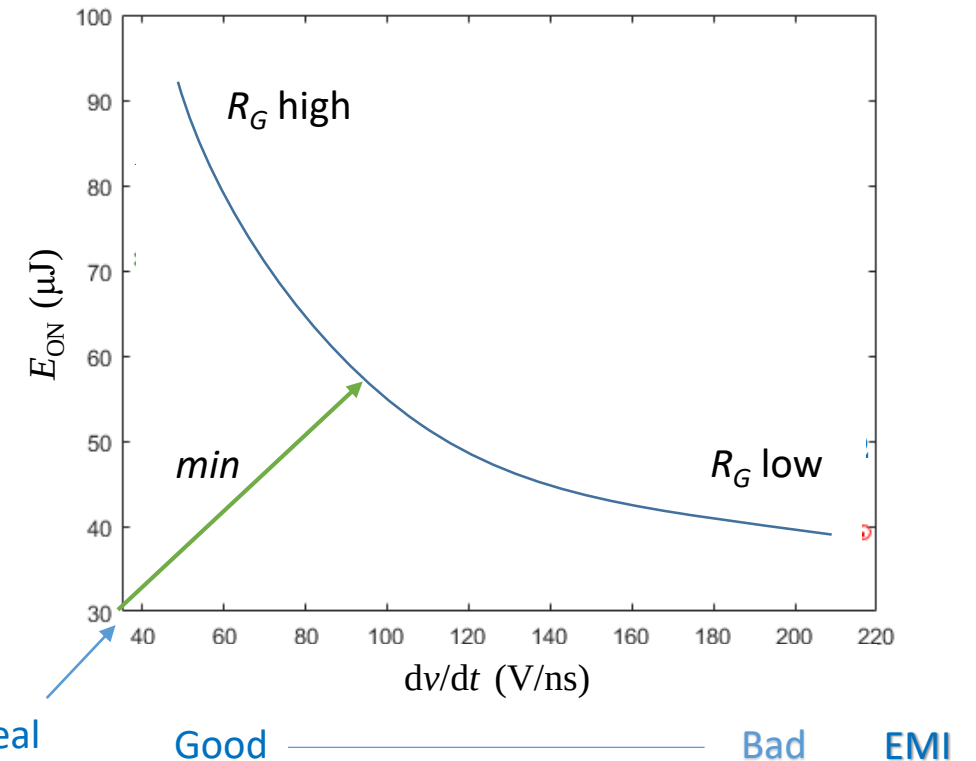
Trade-off E_{ON} vs. dv/dt

Efficiency

Bad

Good

Ideal



I. Problématique et objectifs

Failures of semiconductor components :

- overvoltages ΔV_{DS} (L_p , L_s & dI/dt)
- and channel overcurrent ΔI_D (C_{OSS} & dV/dt + recovery)

EMC conducted emissions :

- due to the presence of parasitic elements L and C (influences dV/dt and dI/dt)
- common mode issues
- harmonic spectrum impact of signals

Floating power supply :

- Bootstrap
- Flyback
- Self-supply

Command isolation :

- Piezoelectric
- Magnetic
- Optical
- Electronic

dV/dt & dI/dt control:

- Configurable R_G
- V_{GS} waveform control
- Local Active loop

Dead-time Control:

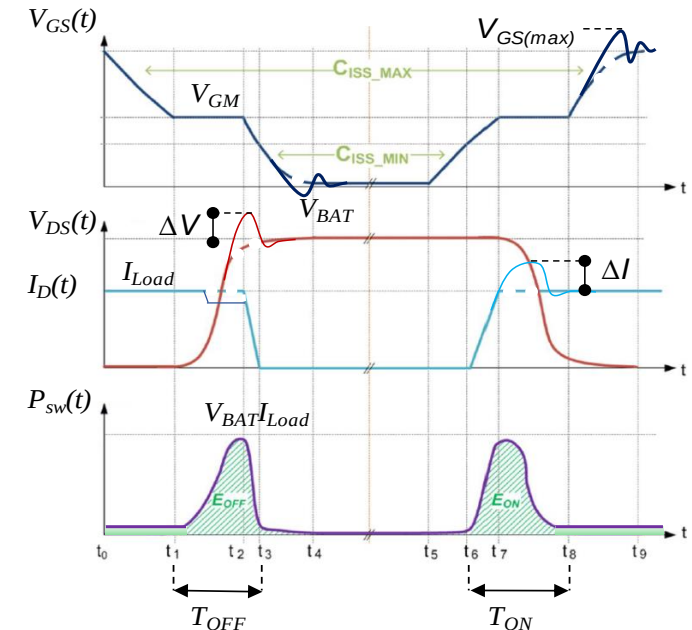
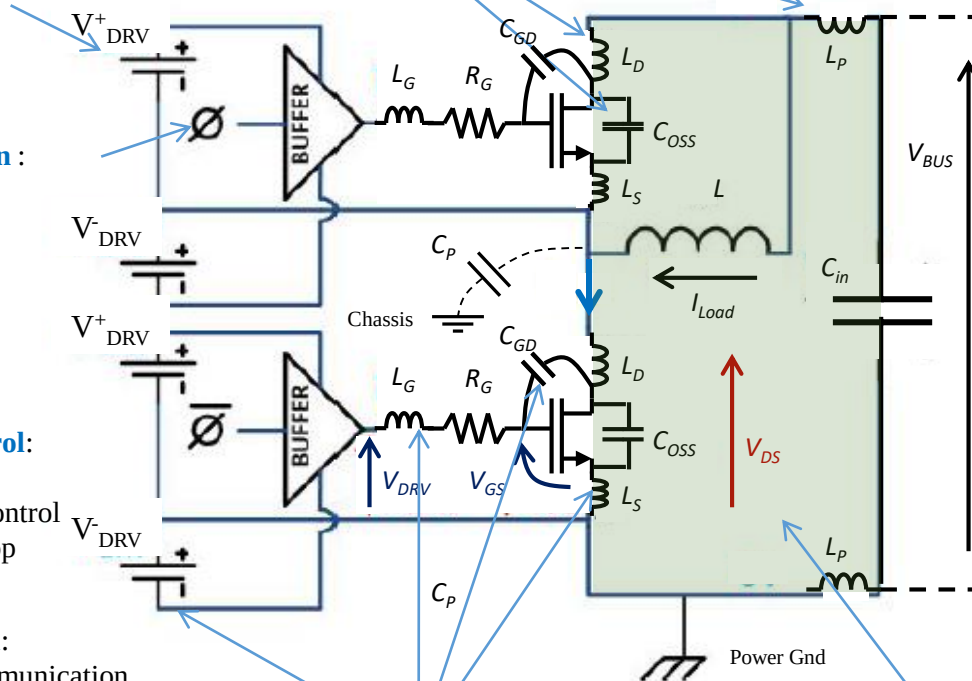
- Inter-driver communication

Command failures :

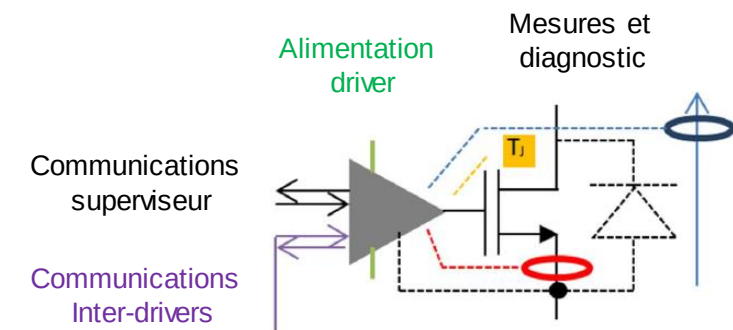
- complementary transistor turn-on during a turn-on sequence
- oscillations and overvoltage on V_{GS} during turn-on
- absence of negative supply for Normally-ON

EMC radiated emissions :

- surface of the the switching-loop
- sensitive to dI/dt



Waveforms during turn-off and turn-on



Modern driver circuit with its interfaces

AGD pour MOSFET SiC

- I. Protection : Détection rapide de court-circuit
- II. Surveillance de l'état de santé
- III. Réglage adaptatif du temps-mort (à l'échelle de la commutation)

Technological barrier : Short-circuit detection method too slow for WBG (SiC), presence of external DESAT components, False detections

Key parameters : Suitable for SiC discrete and modules. No external components (CMOS only). Robust!

- Studies :
- ⊙ Robust and Fast detection of Short-Circuit event at the IC Gate Driver level
 - ⊙ Diagnostic using local Gate Driver signals & impact of parasitics
 - ⊙ Optimized circuit implementation (driver & power die, PCB parasitic mitigation)

<https://theses.fr/2024TLSEP035>

Anas El Boubkari. Système électronique intégré de détection rapide et robuste de court-circuit pour la protection des modules de puissance à effet de champ en technologie SiC. Energie électrique. Université de Toulouse, 2024. Français. (NNT : 2024TLSEP035). (tel-04972880)



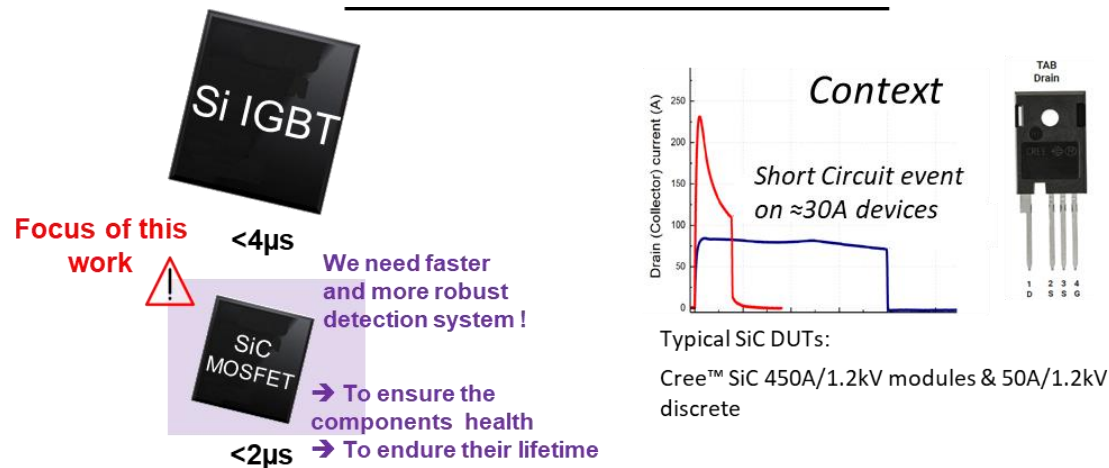
Anas ELBOUBKARI

PhD student: 04/2021-03/2024

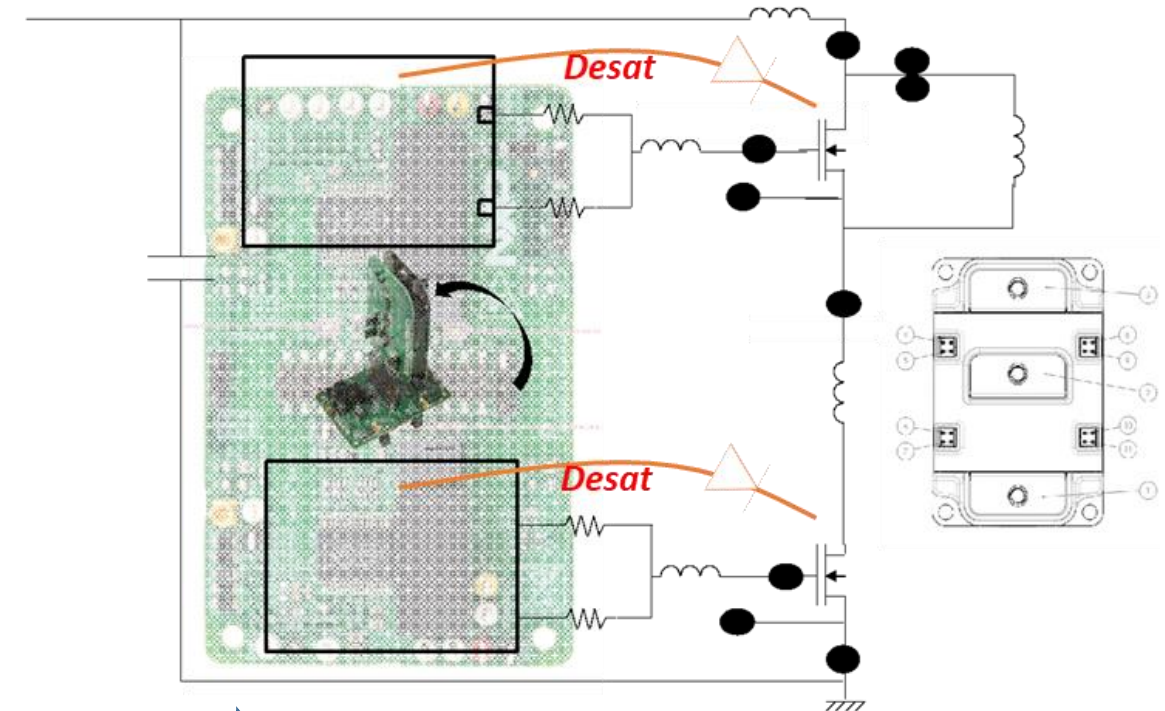
Temp. Research.Eng: 01/2021-04/2021



Recommended SC detection time (Tdet):



Today (NXP High-Voltage SC detection)



Future : NXP-LAPLACE new Fast and Robust IC

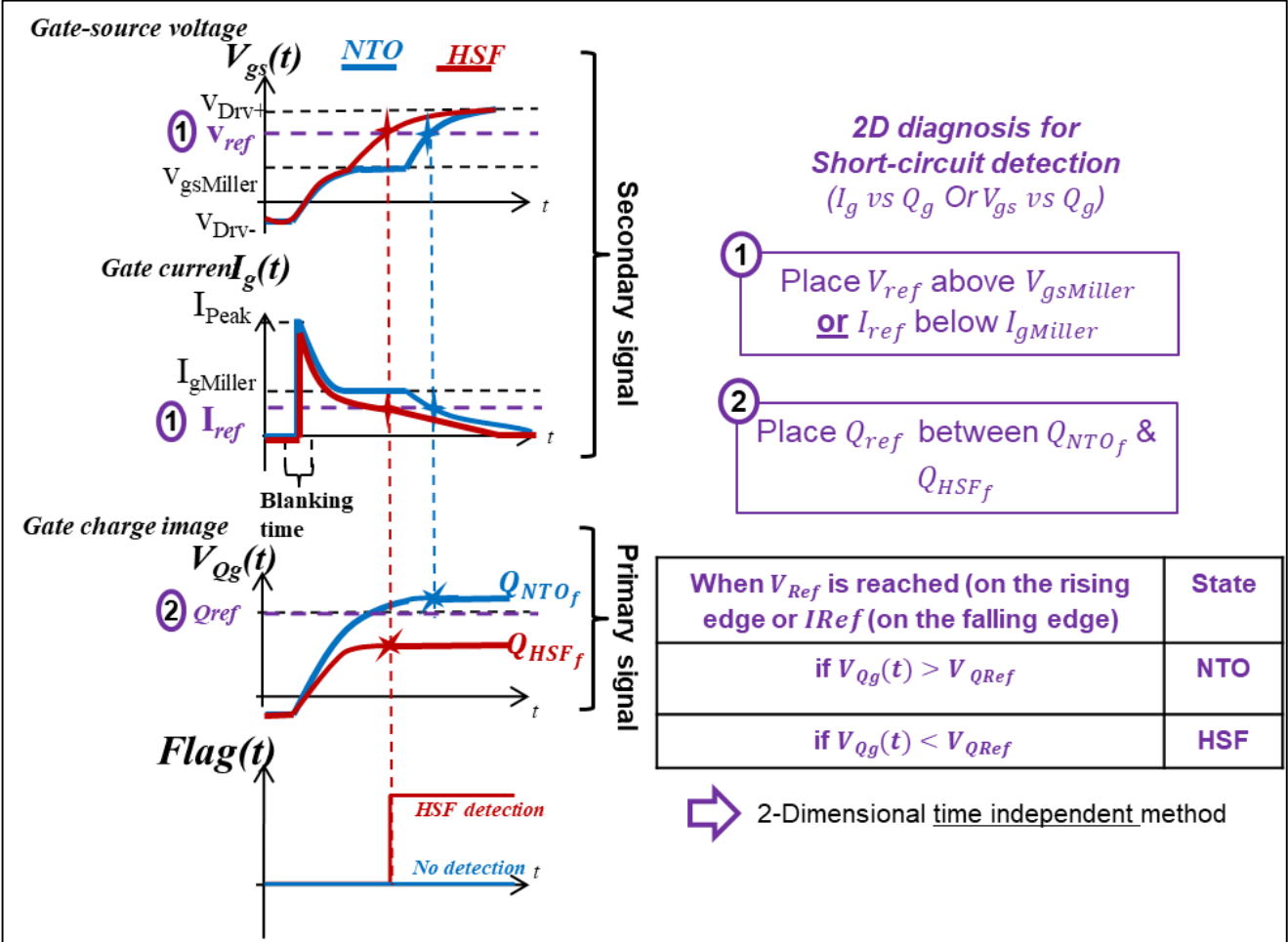
Future : NXP-LAPLACE new Fast and Robust IC : Based on **fast** (<40ns) and **accurate** (error <1%) integrated gate **current measurement**



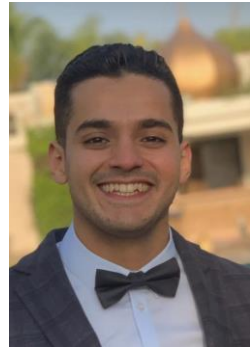
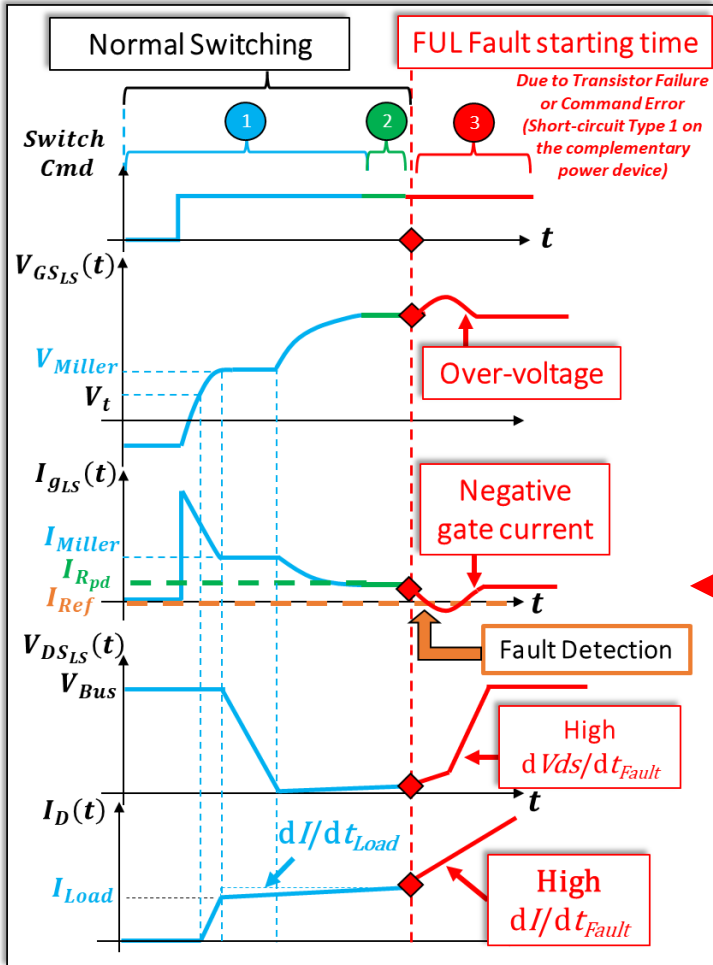
Diffusion, reproduction interdits - 2025

Short-Circuit Monitoring Methods

Type 1: Hard Switch Fault (HSF)

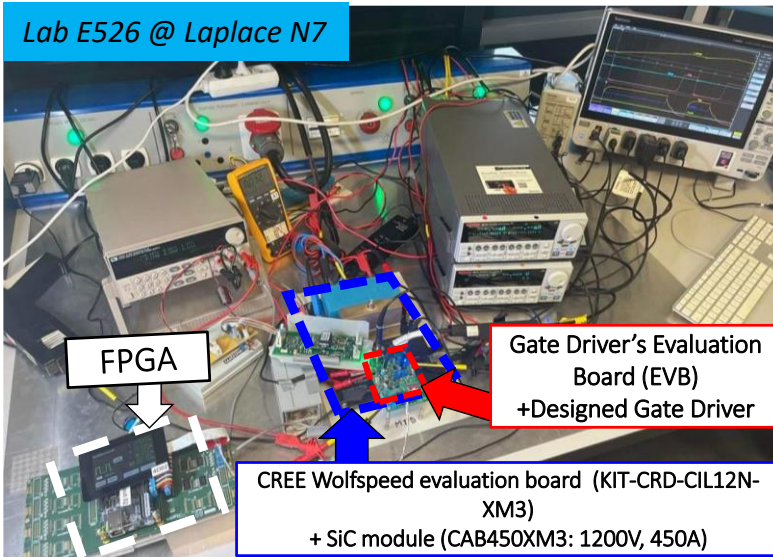
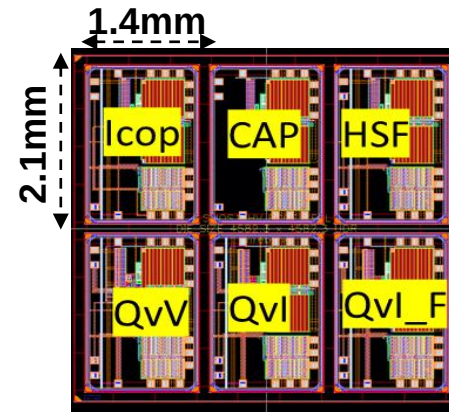


Type 2 : Fault Under Load (FUL)

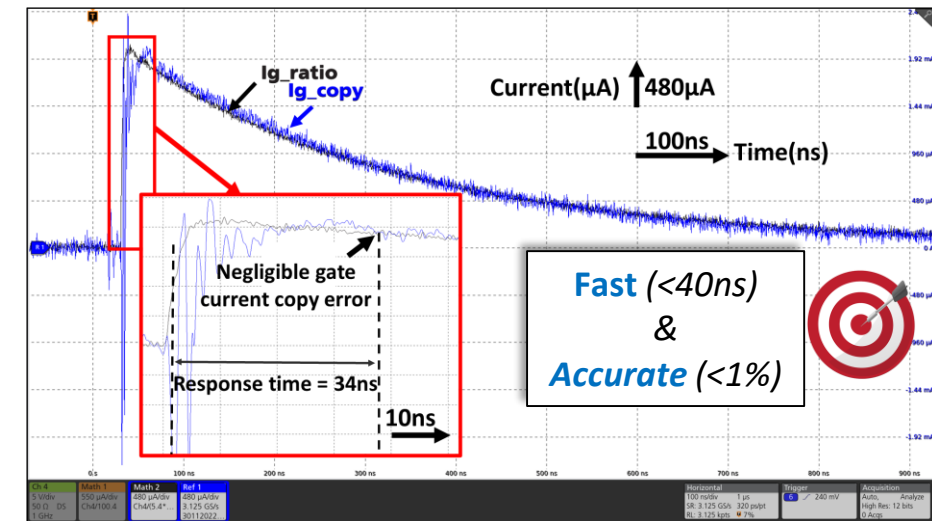
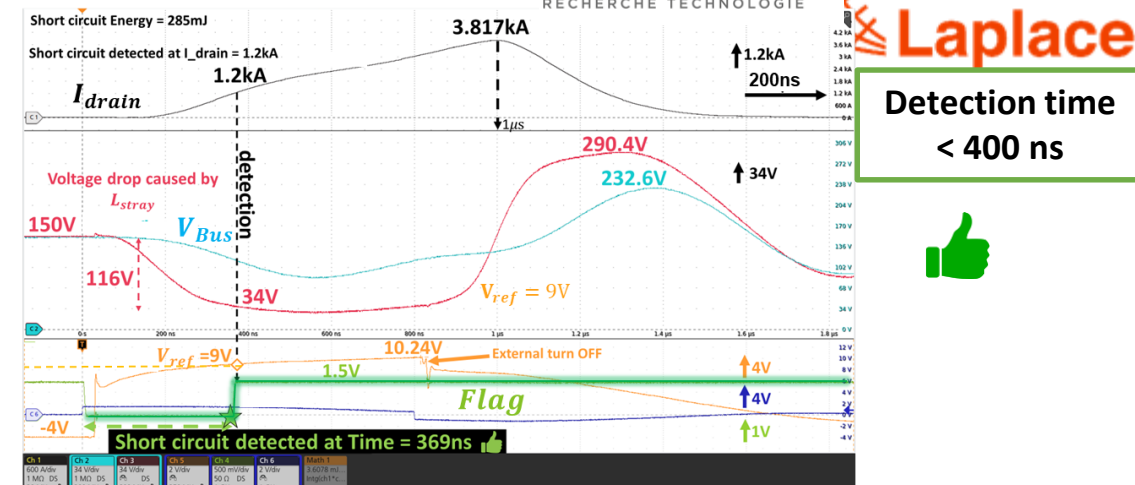
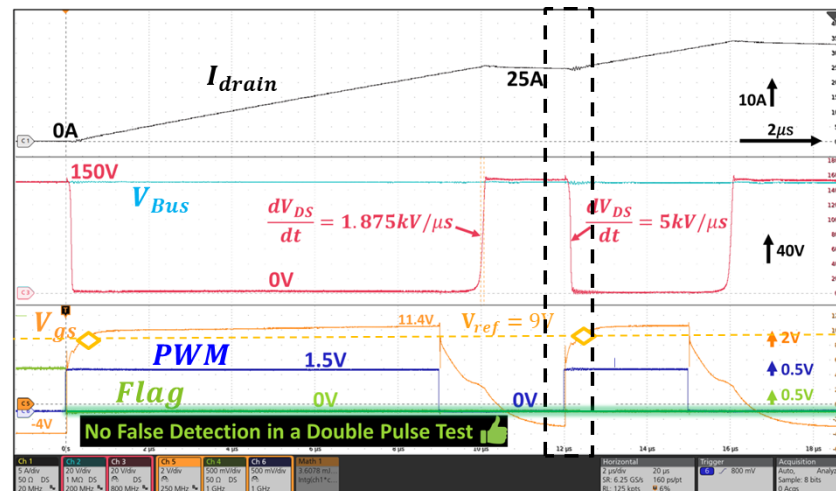


Anas ELBOUBKARI

Detecting negative current

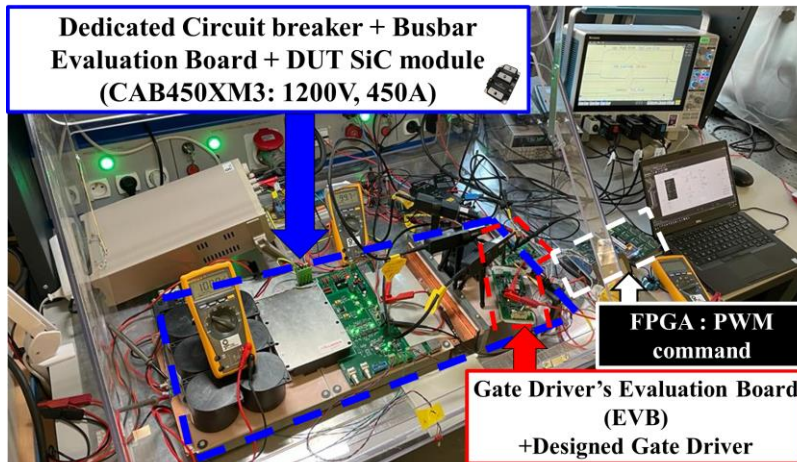
Type 1: Hard Switch Fault (HSF)SEMA Module XM3 Test Bench3 Solutions and 6 variants : Tape out Apr. 2022

Solution 1 : QvV $\rightarrow$ Vgs vs Qg
Solution 2 : QvI $\rightarrow$ Ig vs Qg
Solution 3 : HSF $\rightarrow$ Ig
Variant 2 : Icop $\rightarrow$ Current copy characterization

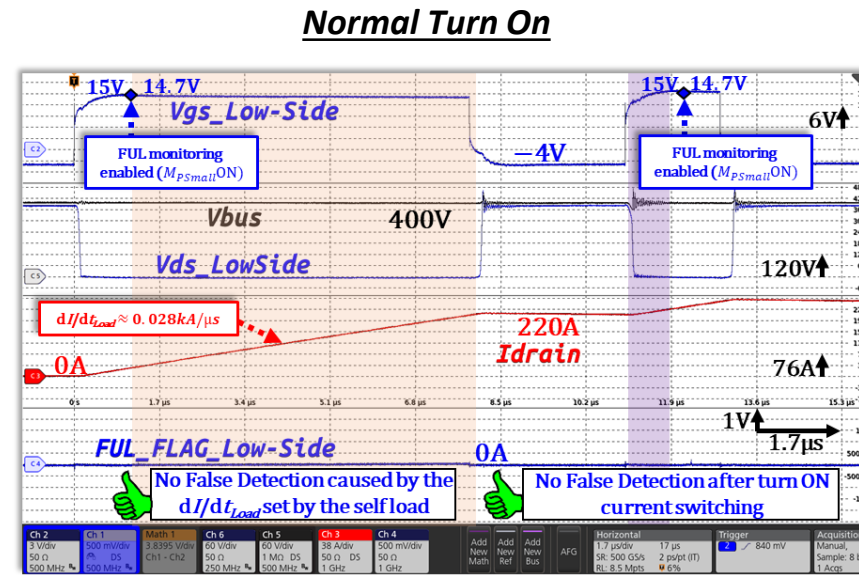
Current sensor functionality experimental validationHSF detection functionality validation: DUT $\rightarrow$ CREE SiC module (CAB450XM3: 1.2kV, 450A)

Type 2: Fault Under Load (FUL)

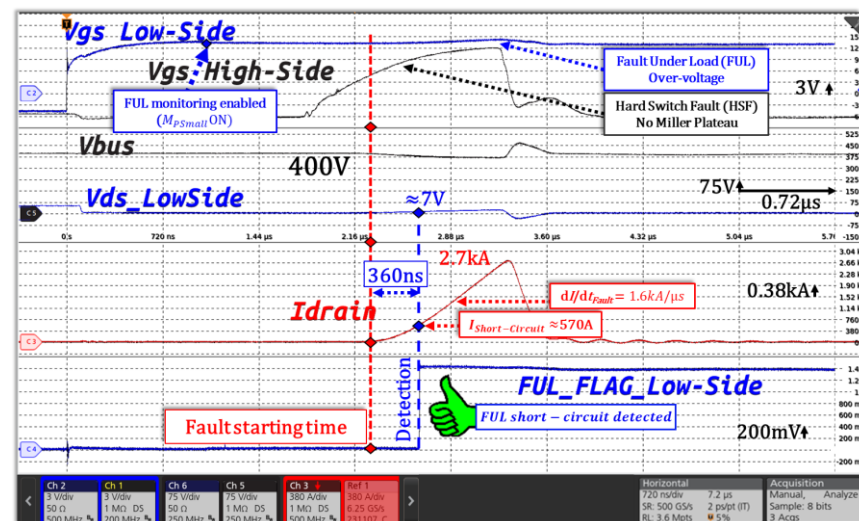
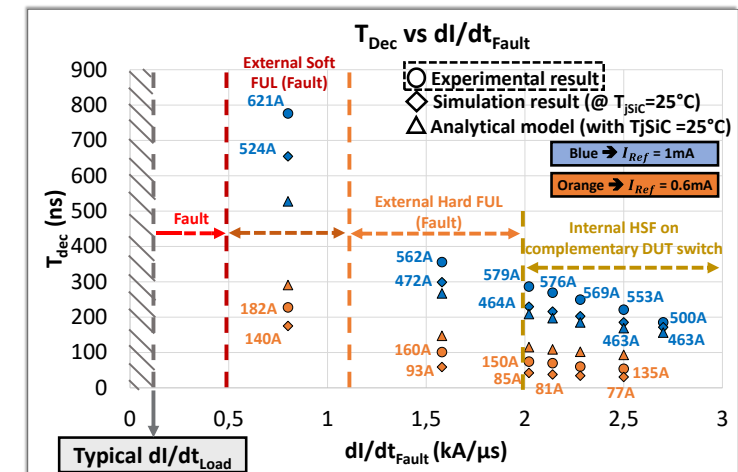
HSF detection functionality validation: DUT → CREE SiC module (CAB450XM3: 1.2kV, 450A)



1 Solution, 2 Variants: Tape out Apr. 2023



FUL short-circuit

Detection time (T_{Dec}) in Simulation, Experiment and Analytical ModelDetection time
< 400 ns

Technological barrier : Additional SiC Schottky diode required or 3rd Q. SiC FET conduction during dead time (e.g. losses, reliability issues)

Key parameters : Adaptive dead time controller integrated in gate driver (CMOS only). Reduced body-diode conduction time.

- Studies :
- Dead Time management at the Gate Driver IC level
 - Robust and Fast detection of the opposite transistor commutation
 - SiC MOSFET 3rd quadrant behavior characterization & modeling



Matthieu MASSON
PhD student: 11/2021-11/2024

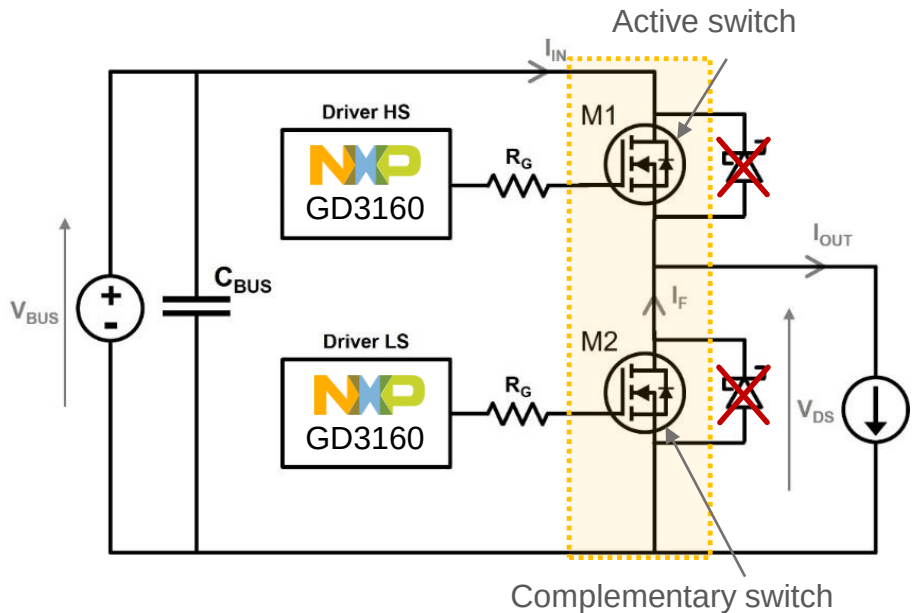


Objectives

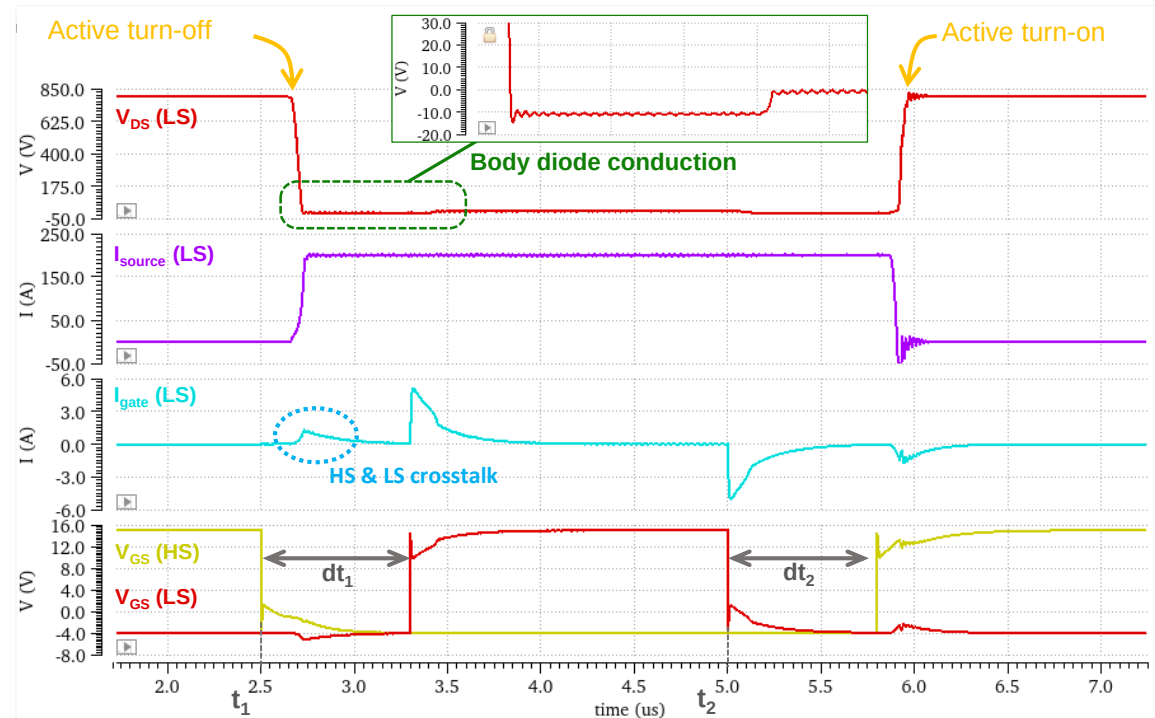


$V_{DS} = 1.2\text{kV}$
 $I_{DS} = 450\text{A}$
 $R_{DS(on)} = 2.6\text{m}\Omega$

Wolfspeed™ SiC Module



dv/dt not constant during turn-off !!
Current dependent

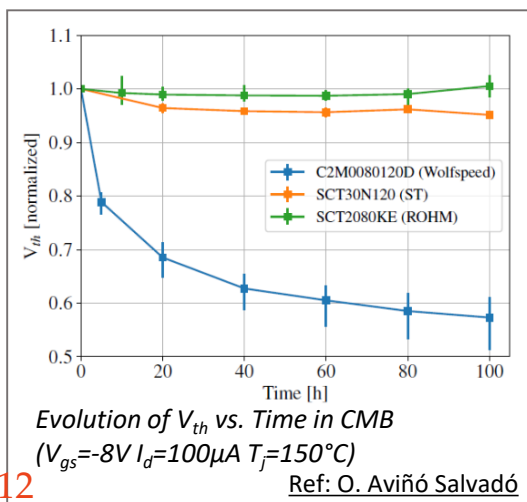
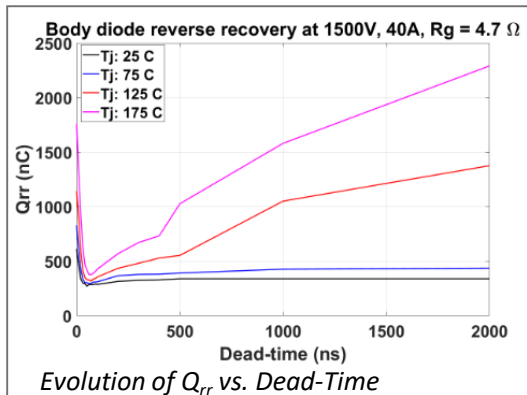


Virtuoso™ simulation: Inverter-leg switching period with the two fixed dead-times

Future : NXP-LAPLACE new IC : Based on **fast** (<20ns) gate current copy and **robust** Peak Detection

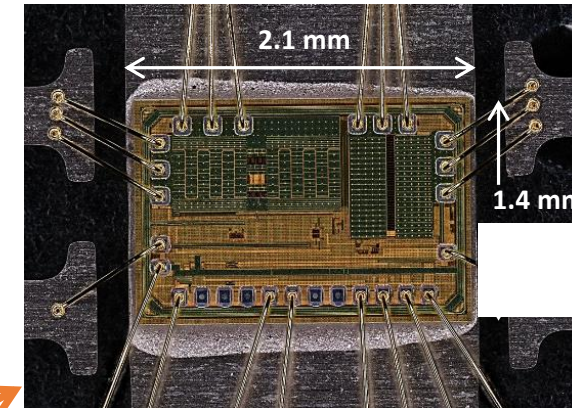


Impact of dead-time reduction:



Gate-Driver design:

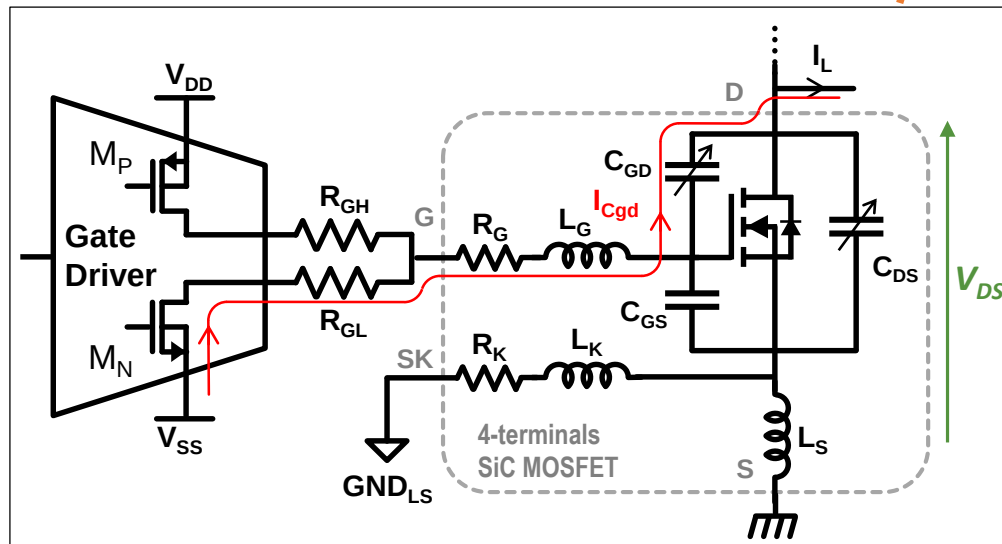
- CMOS integrated circuit with NXP's **SMOS10HV** technology.
- Low side internal gate current copy (no additional external component needed)
- Proposed current peak detection system: independent of switching speed and amplitude



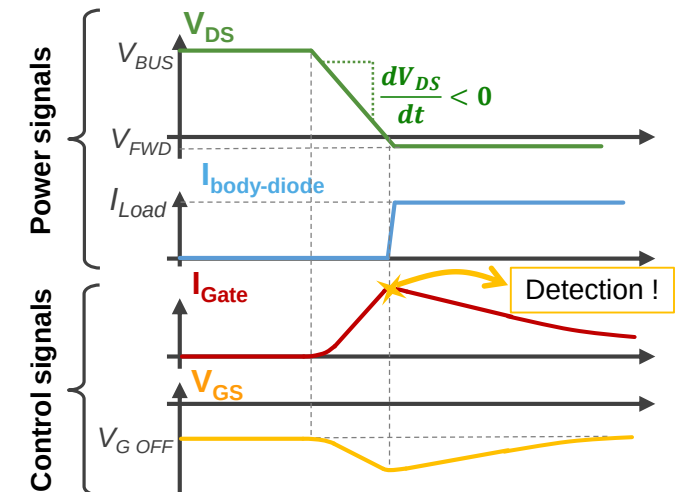
Gate-Driver prototype with integrated dead-time optimization



Matthieu MASSON
PhD student: 11/2021-11/2024



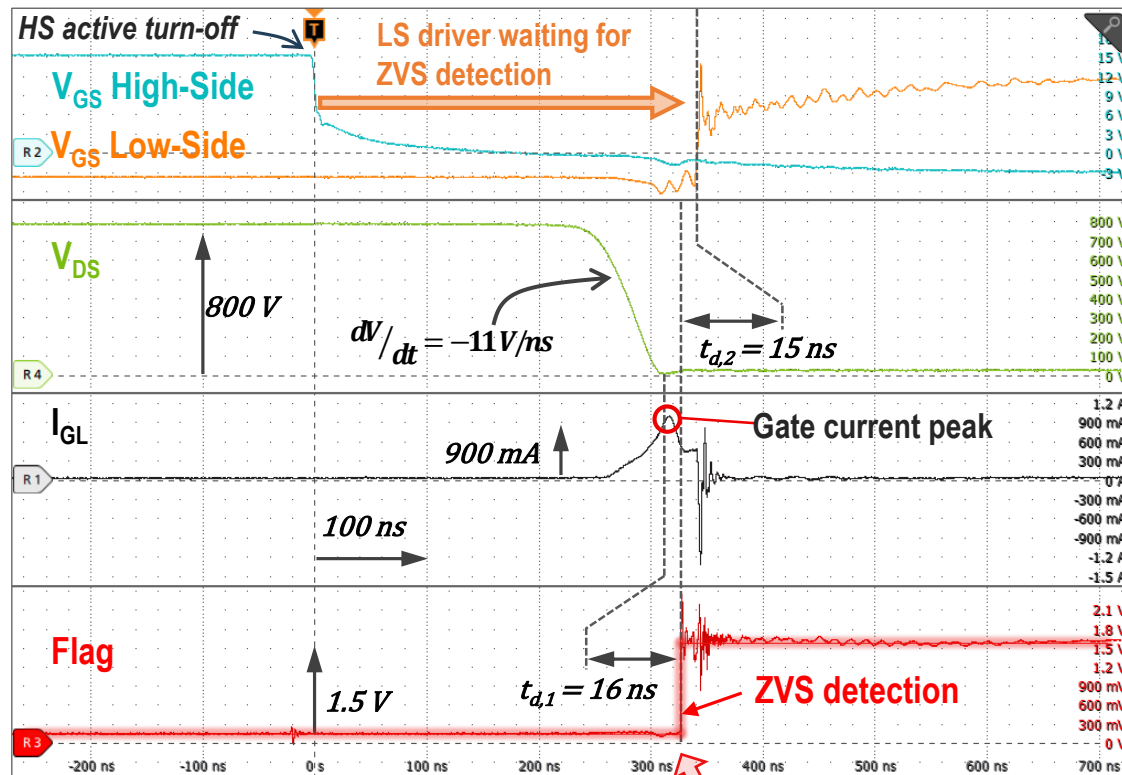
Gate-Drain capacitive coupling during commutations



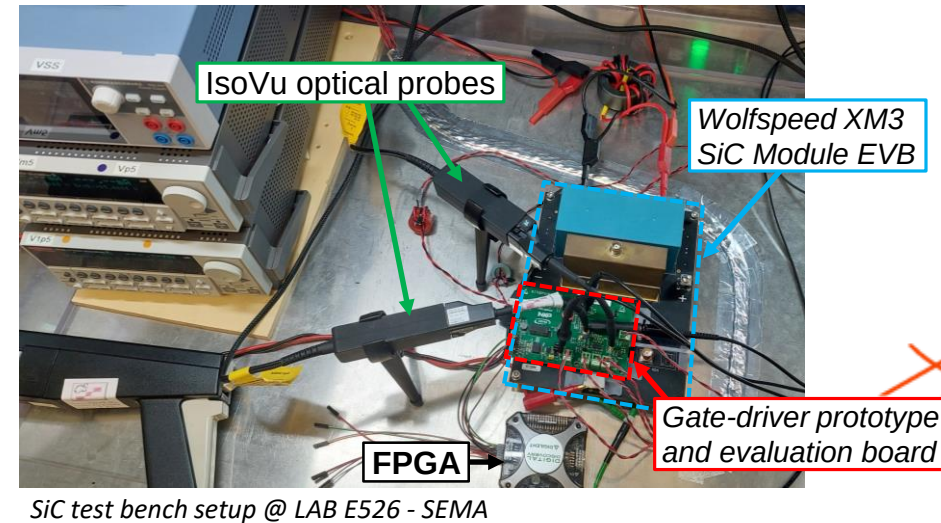
Adaptive dead-time Gate-Driver IC validation

- Design and study of the High-Power test bench (Double-Pulse)
- Optimized PCB Design and Layout for the GD prototype
- High-Bandwidth measurement with Optically Isolated Probes

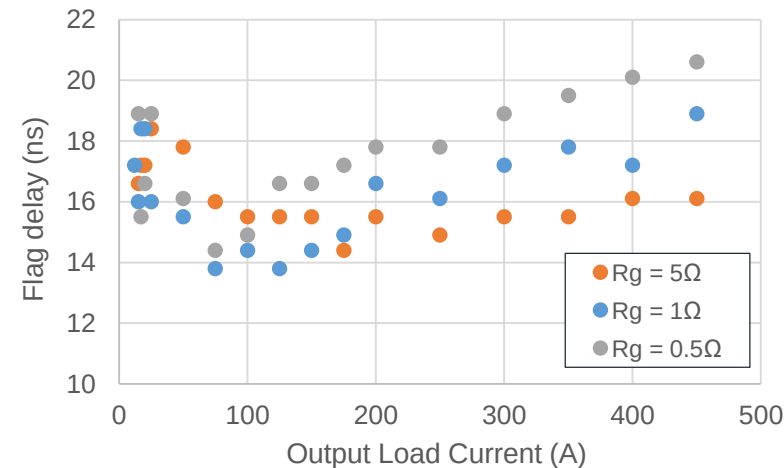
2nd prototype: Integrated zero-crossing detection



- V_{DS} zero crossing detected in <20ns
- No LS PWM



Peak detector validated over the entire range of operation



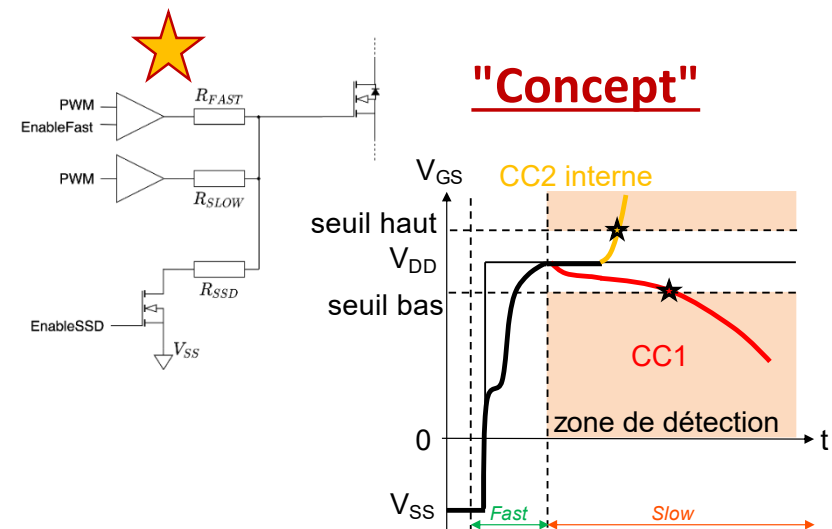
Conclusion:

- The gate current peak detector provides a fast and robust signal to detect the end of switching
- The gate driver can achieve an adaptive dead-time over the entire operating range of the switching cell

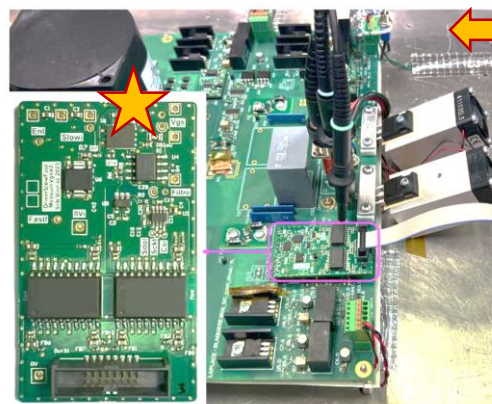
HIGHLIGHTS

Solutions de Fiabilisation de la Technologie SiC MOSFET Embarquée pour Aéronef "Plus Electrique"

"Concept"



"Banc de Validation Préliminaire sur Composants discrets SiC MOSFET 1.2kV / 30A"



"Option 1"

de Surveillance de l'état de santé de l'oxyde de grille du SiC MOSFET à haute précision et en temps réel sur MLI 600V 20kHz

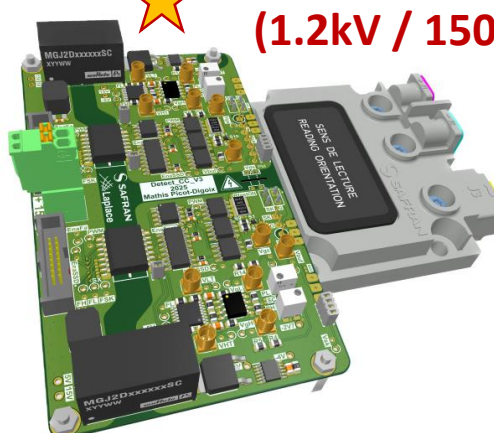
"Option 2"

de Dépiégeage statique / dynamique de l'oxyde de grille en temps réel par topologie Gate-Driver à 4 niveaux de tension de commande

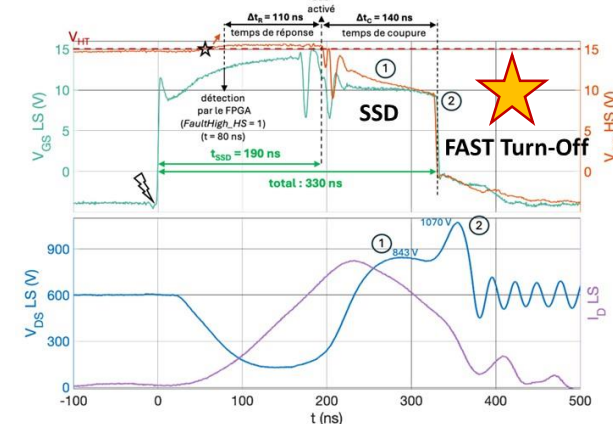


Extension à un Nouveau Gate-Driver

pour ENGINEUS 50 (1.2kV / 150A)



Détection et Gestion du Court-Circuit "Validée" sur Module en 330ns sous 600V



Carte de Seuillage et de Détection Court-Circuits
Architecture à Voies Parallèles Commutées

AGD pour HEMT GaN (GaN-on-SOI)

- I. Boucle de rétroaction intégrée pour contrôle du dv/dt
- II. Réalisation et résultats expérimentaux

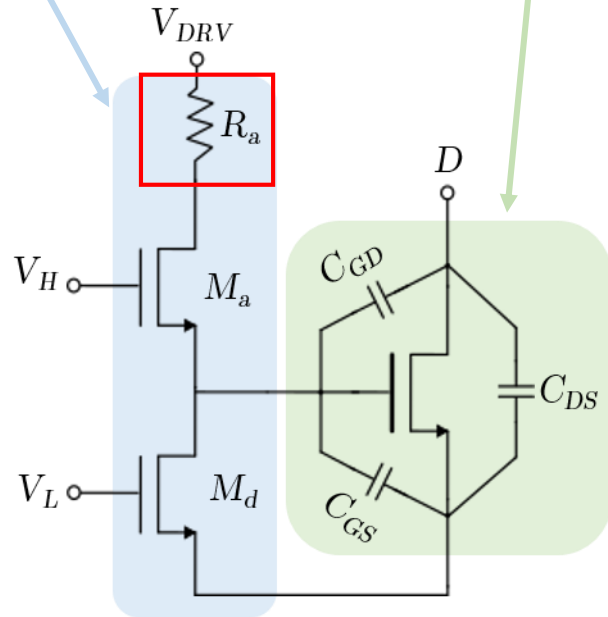
II. Contrôle du dv/dt

Contrôle classique du dv/dt à l'amorçage

État de l'art des gate drivers GaN intégrés avec contrôle du dv/dt à l'amorçage

Étage de sortie du gate driver

Transistor de puissance



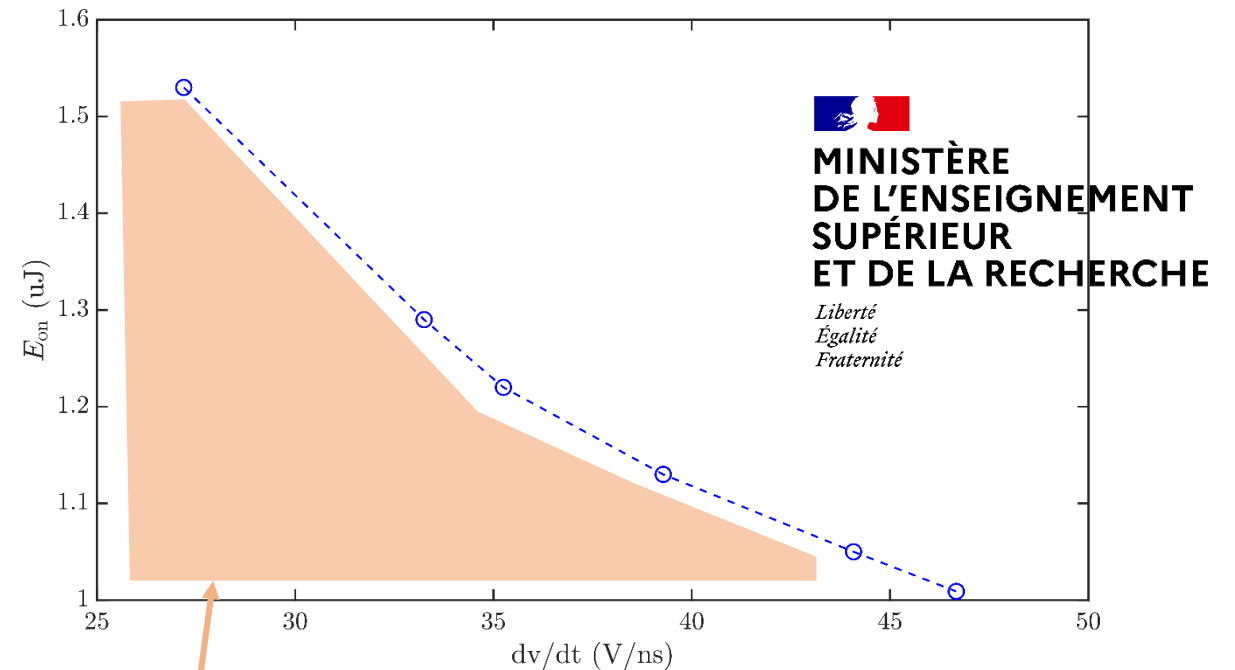
$R_a \rightarrow$ Contrôle du dv/dt



Joseph KEMDENG

PhD student: 09/2022-12/2025

Performances dans le plan pertes - CEM



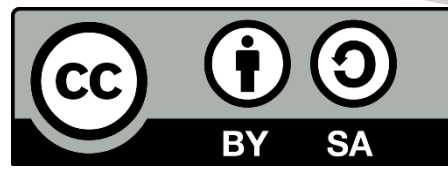
[Kemden et al. ECCE Europe 2025]

[Kemden et al. SGE 2025]

Zone de compromis plus intéressante


**MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE**
*Liberté
Égalité
Fraternité*

II. Contrôle du dv/dt



Joseph Kemdeng, Marc Cousineau, Nicolas C. Rouger. A 200V Monolithic GaN Half-Bridge with Active Gate Driver Including a Fast dv/dt Feedback Loop. 2nd Bi-annual IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Europe (WiPDA-Europe 2024), Sep 2024, Cardiff (GB), United Kingdom. {10.1109/WiPDAEurope62087.2024.10797415}. {hal-04844869}



Joseph KEMDENG

PhD student: 09/2022-12/2025

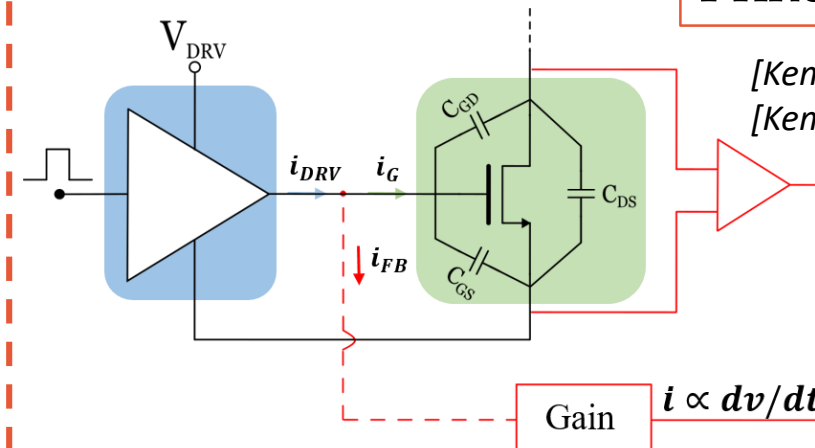


**MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE**

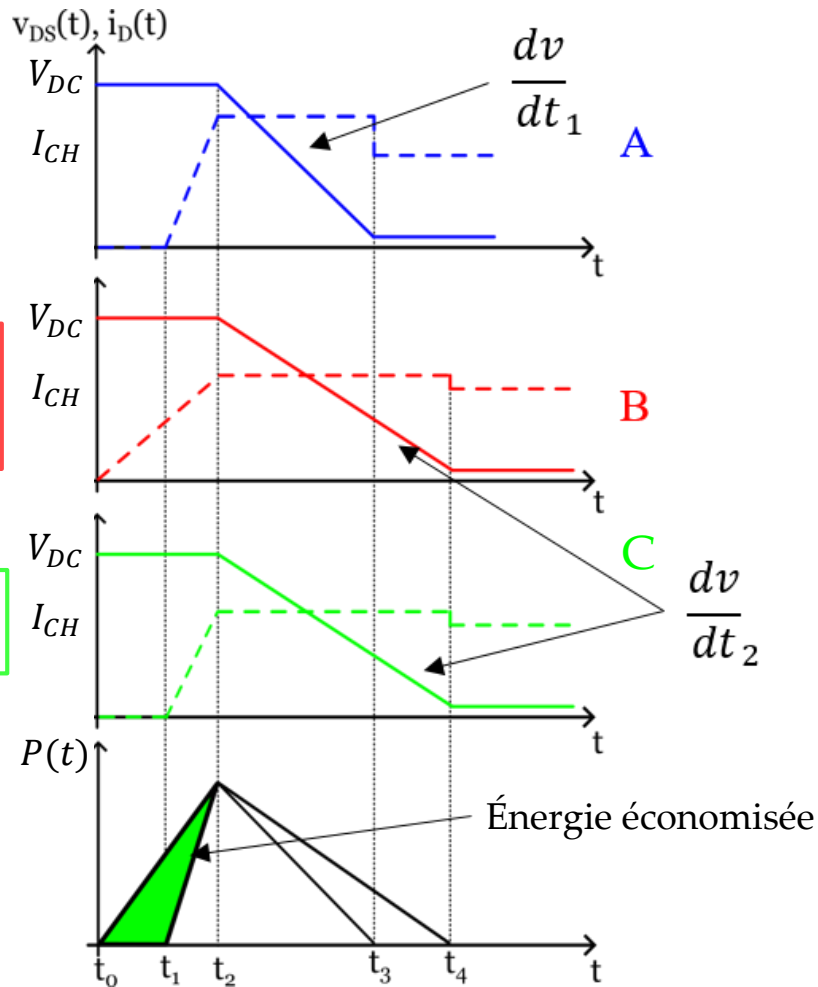
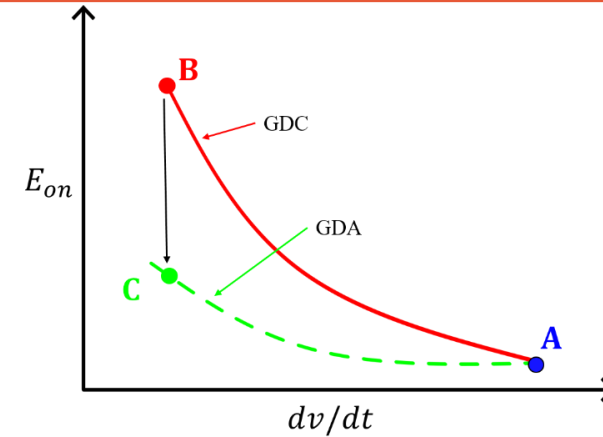
*Liberté
Égalité
Fraternité*

Principe de base du GDA

[Kemdenget al. ECCE Europe 2025]
[Kemdenget al. SGE 2025]



Nouvelle zone de compromis



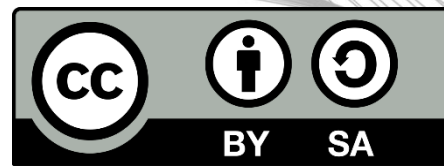
Formes d'ondes
initiales

Utilisation d'un gate
driver conventionnel
(GDC)

Utilisation d'un gate
driver actif (GDA)

Énergie économisée

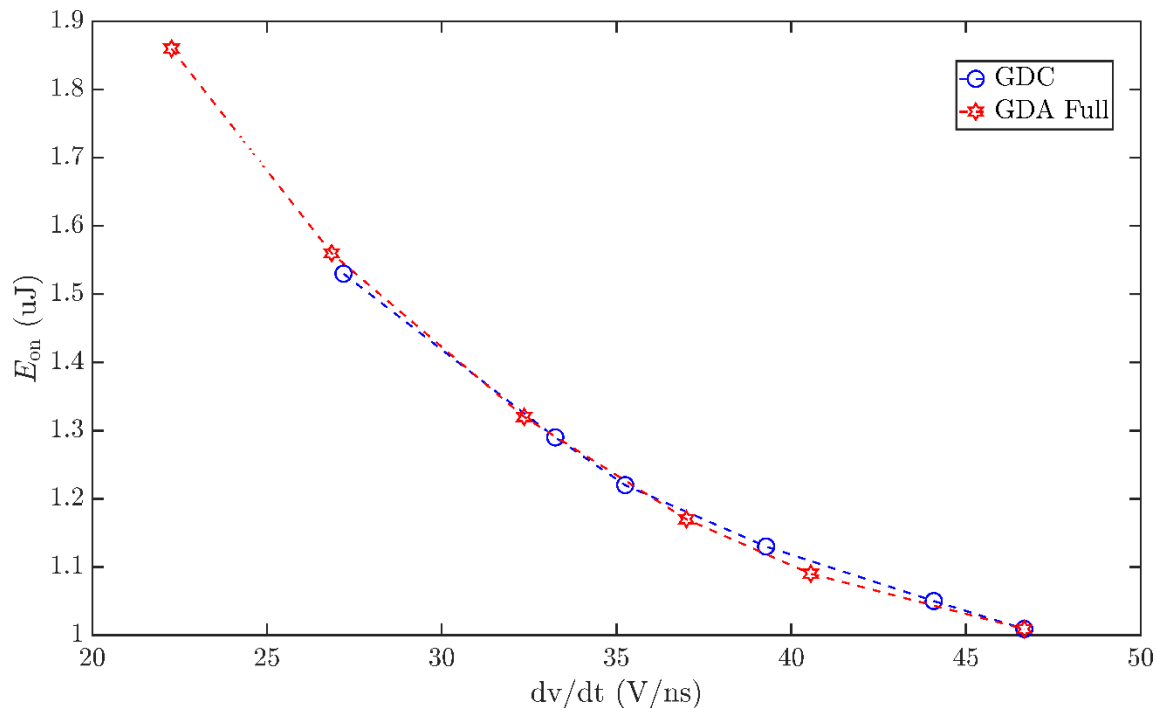
II. Contrôle du dv/dt



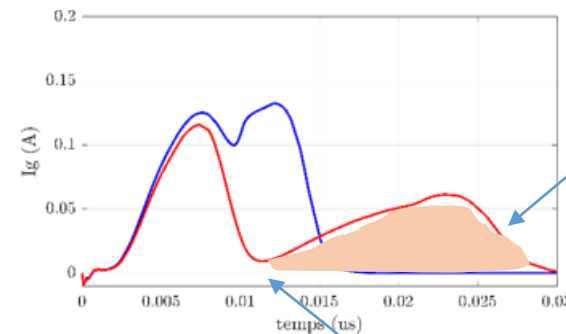
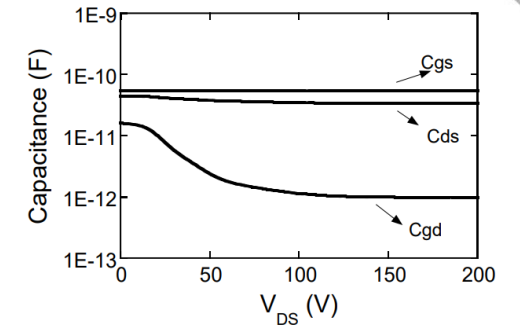
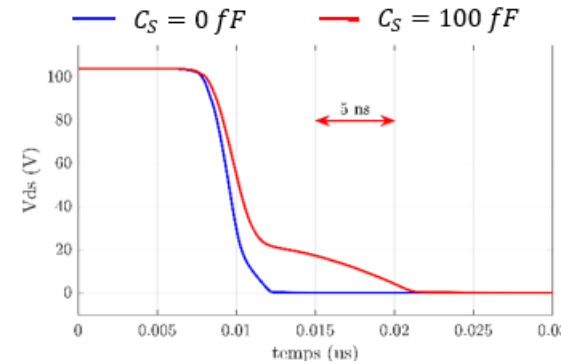
GDA 1 : Full Feedback

[Kemdenget al. SGE 2025]

Étude du compromis pertes - CEM



Le circuit GDA Full ne permet pas d'améliorer le compromis pertes - CEM



2- Charge nécessaire à apporter pour terminer la commutation

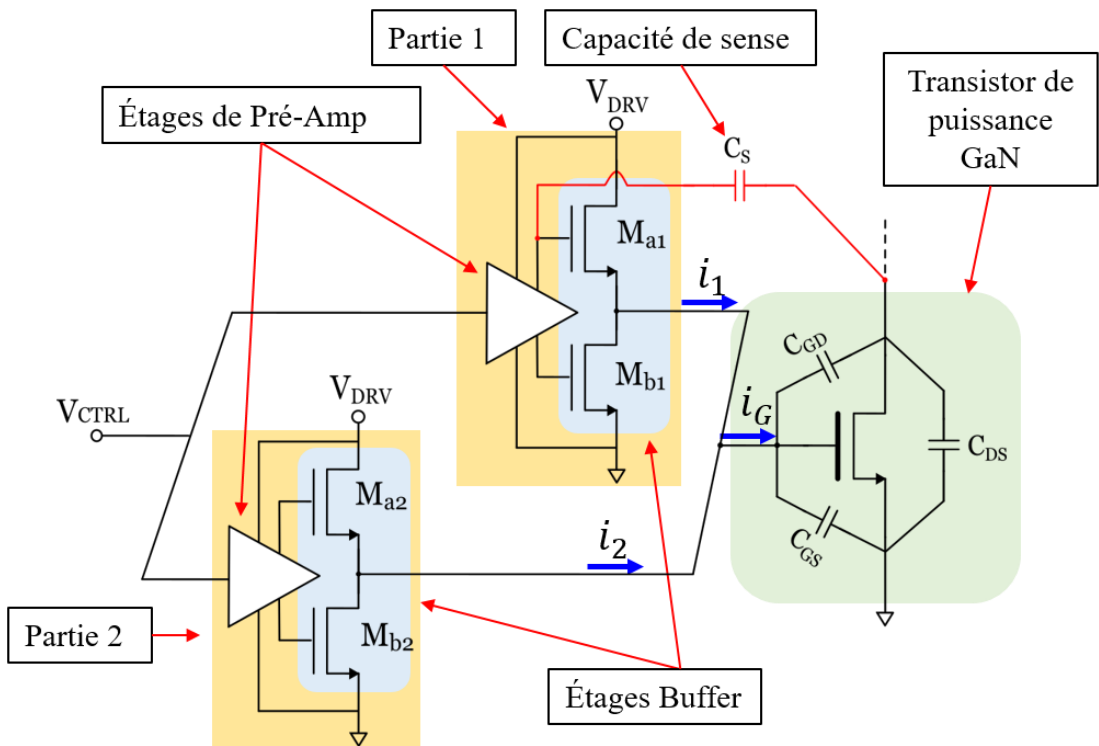
1- Non linéarité de C_{GD} entraîne une baisse trop forte de i_G et un temps de fin de charge trop long

La baisse de i_G par le GDA couplée à l'augmentation de C_{GD}
→ Augmentation excessive de E_{on} durant la séquence dv/dt

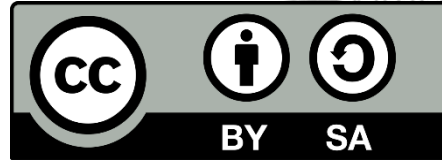
II. Contrôle du dv/dt

[Kemdenget al. SGE 2025]

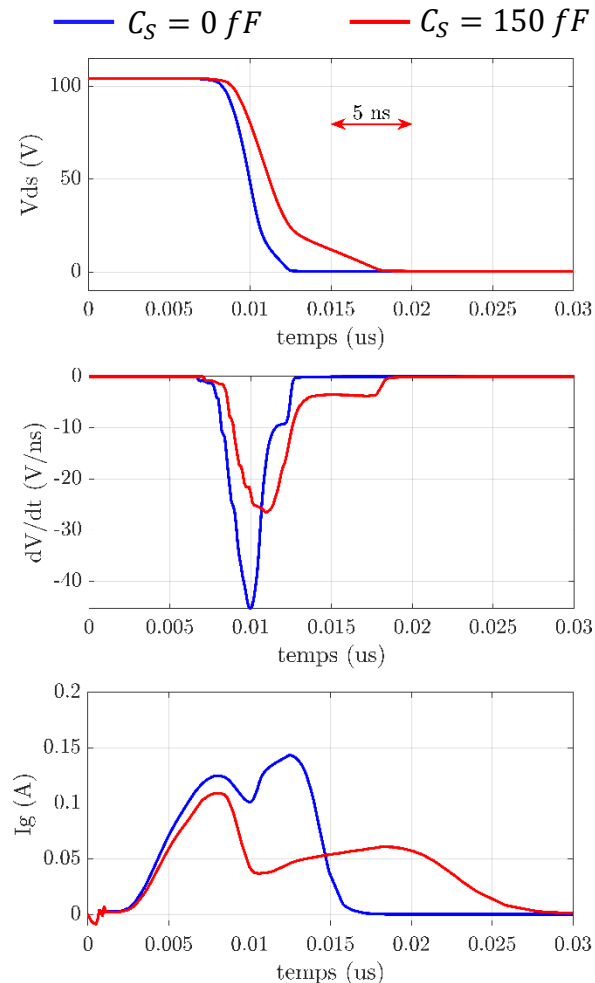
GDA 2 : Partial Feedback



- ❑ Segmentation du gate driver initial en deux parties
- ❑ Introduction du facteur $\beta \in [0; 1]$:
 - ❑ Partie 1 = β . Driver initial
 - ❑ Partie 2 = $(1 - \beta)$. Driver initial



Résultats de simulation



Paramètres de simulation

V_{DC}	100 V
I_L	2 A
α	0,5
β	0,7
F_{DEC}	500 kHz
T_{amb}	25 °

Observations

- ❑ Réduction de plus de 40% du dv/dt maximal avec $C_s = 150$ fF
- ❑ Impact quasi-nul sur le di/dt

II. Contrôle du dv/dt

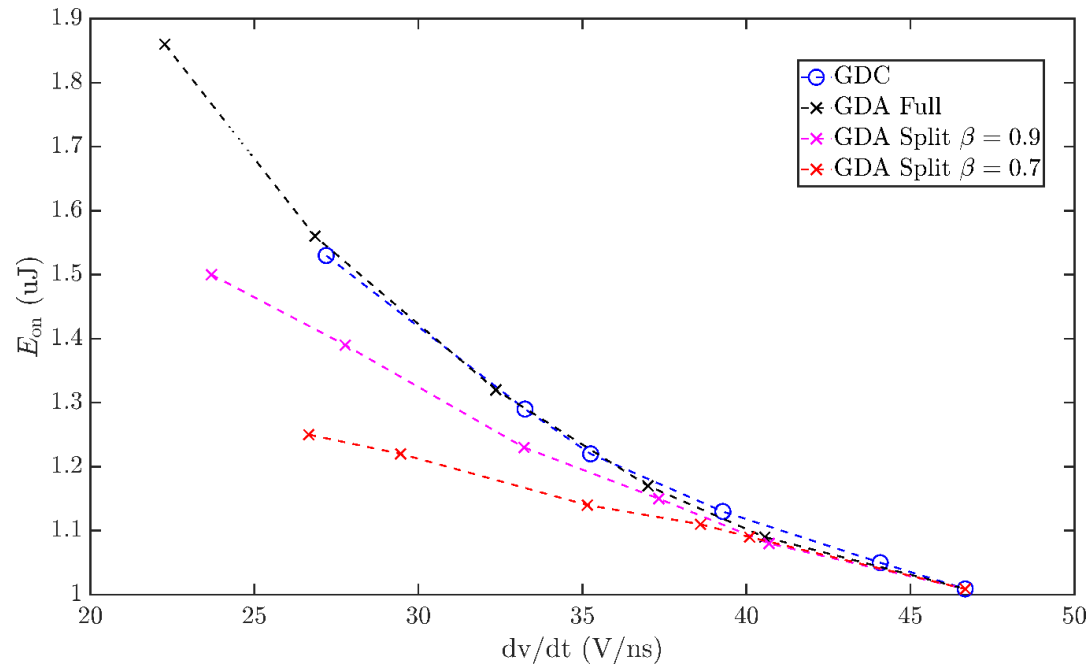


Remarques

[Kemdenget al. SGE 2025]

GDA 2 : Partial Feedback

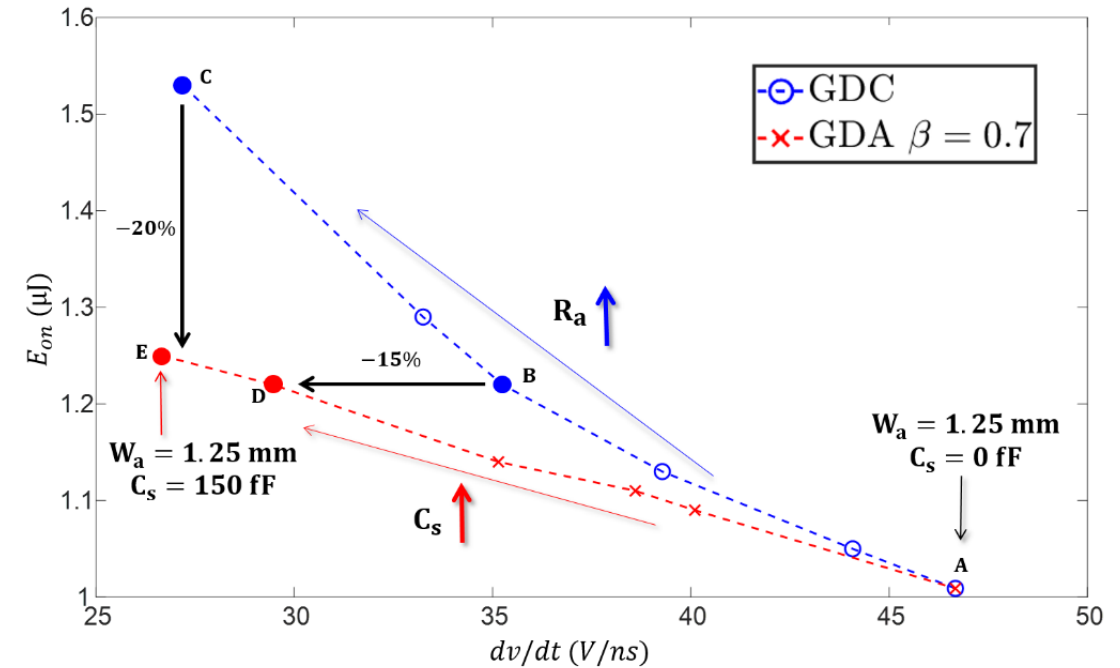
Étude du compromis pertes - CEM



Réseau de caractéristiques en fonction de β

- Augmenter la valeur de β permet d'augmenter la plage de réglage du dv/dt
- Diminuer la valeur de β permet d'améliorer le compromis pertes - CEM

Focus $\beta = 0,7$



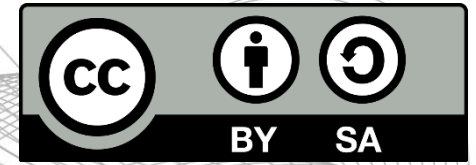
Le circuit GDA Split propose des points de compromis inatteignables avec le circuit GDC

II. Contrôle du dv/dt

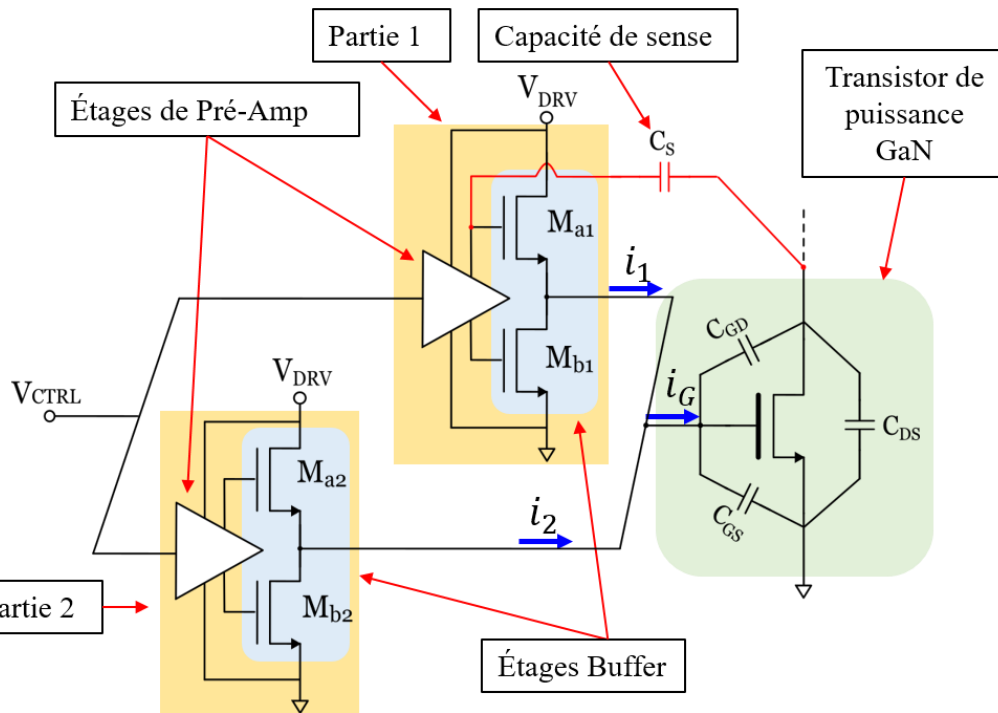


MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE

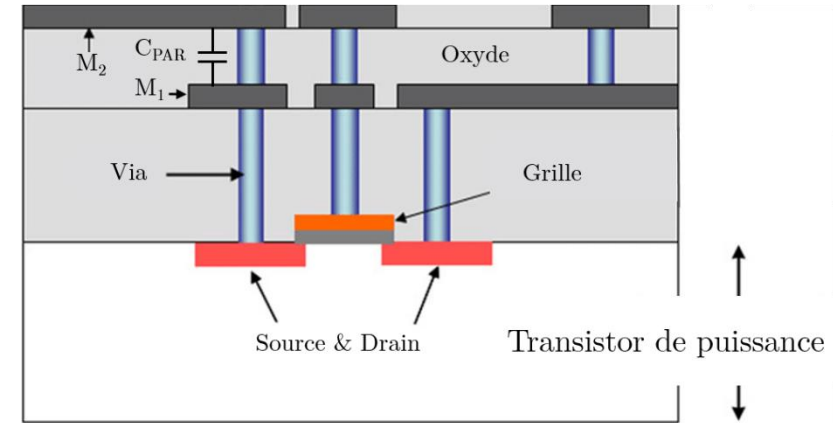
Liberté
Égalité
Fraternité



Design du condensateur HT [Kemeng et al. SGE 2025]



Le condensateur C_S doit tenir la haute tension



- ❑ Superposer M_1 et M_2 sans vias $\rightarrow$ utilisation de C_{PAR}
- ❑ Le type (SiO_2) et l'épaisseur d'oxyde sont définis par le process de fabrication

$$V = E \cdot e$$

$$C_{/S} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{e}$$

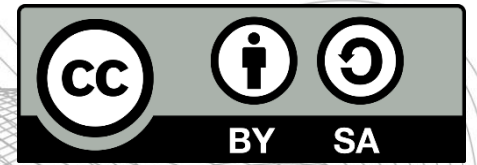
Modifier la surface de superposition de M_1 et M_2 permet de définir la valeur de C_{PAR}

III. Résultats Expérimentaux

Vue microscopique du circuit intégré GaN

[Kemden et al. ECCE Europe 2025]

[Kemden et al. SGE 2025]



Condensateurs
GaN 200V

Gate driver
segmenté

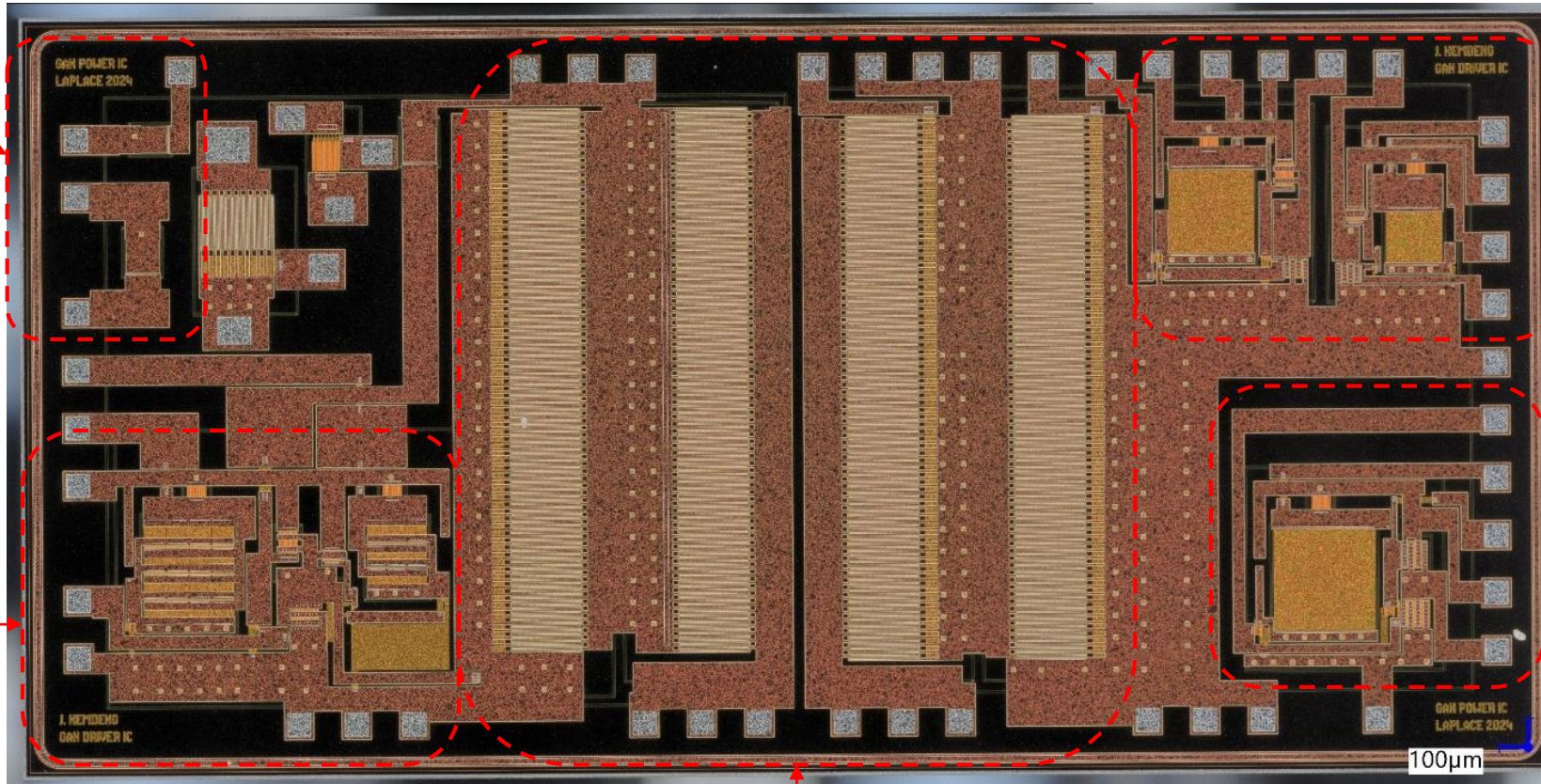
GDA Split 0,7

2.5 mm
5 mm

Gate driver GaN

Cellules de commutation GaN

Le circuit a été mis en boîtier dans un package QFN56 8mm x 8mm



**MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Laplace

III. Résultats Expérimentaux

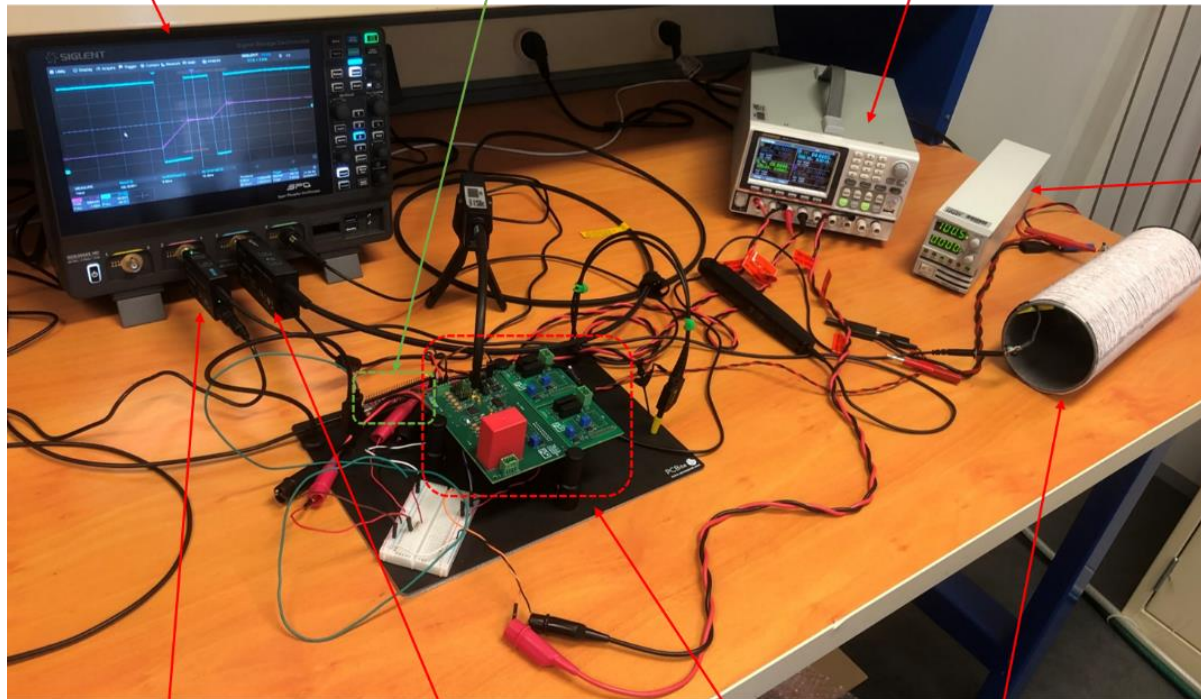
Banc de caractérisation

L	215 μ H
I_L	1A
V_{HV}	100V

Oscilloscope

Générateur de signaux PWM

Alimentation basse tension



Alimentation Haute tension

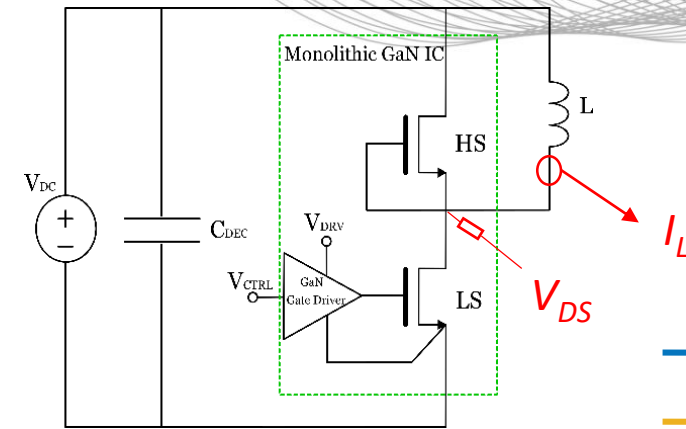
Sonde de courant

Sonde de tension

Carte d'évaluation

Inductance à air

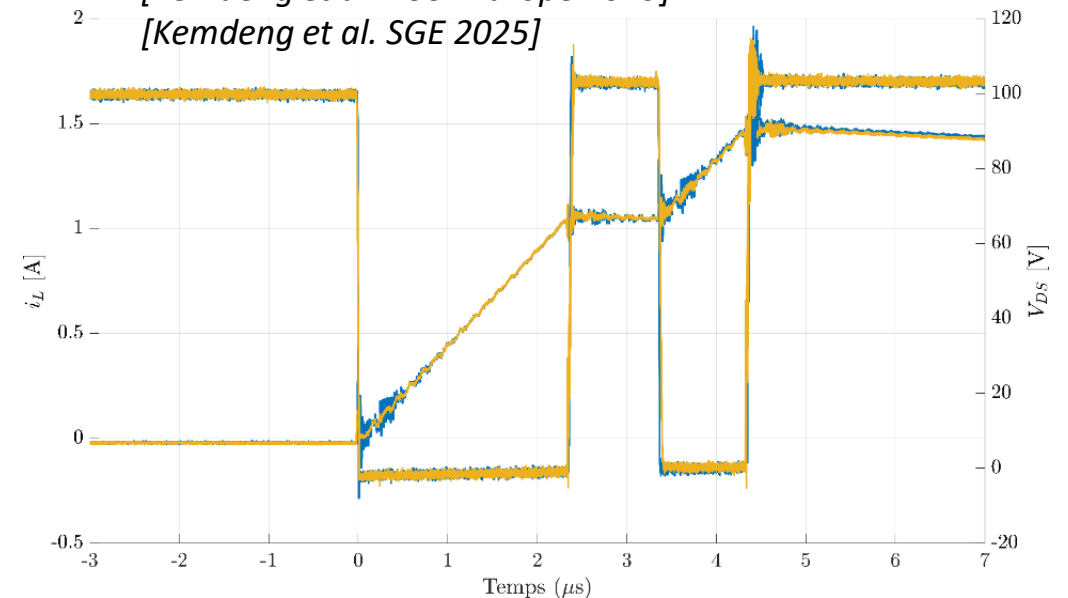
Résultats des essais en Double Pulse



MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE
*Liberté
Égalité
Fraternité*

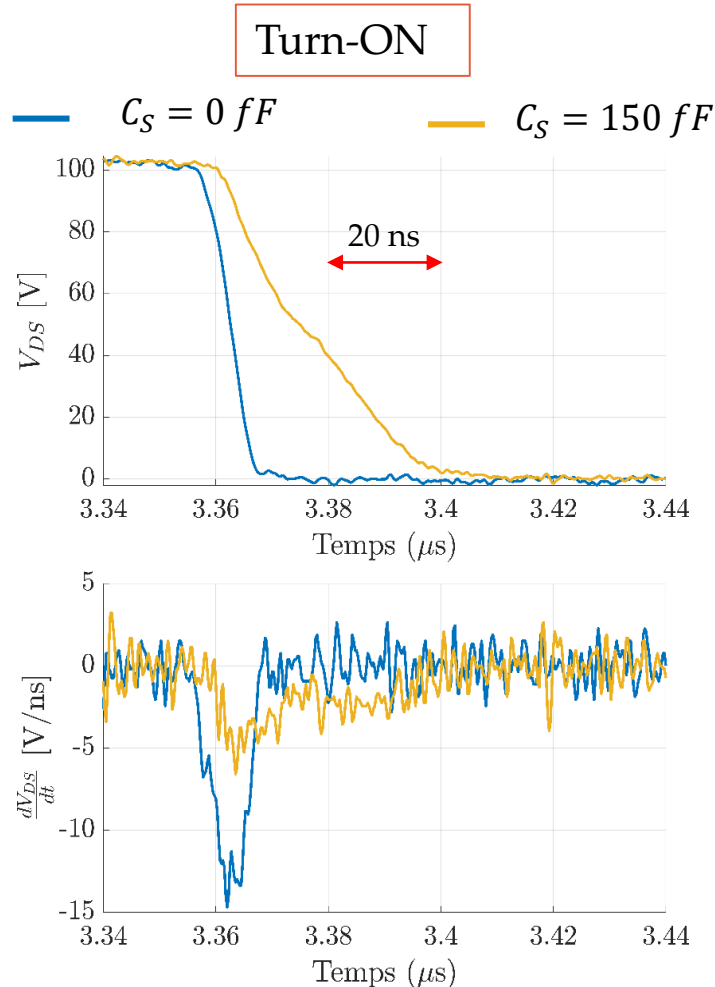
— $C_S = 0$ fF
— $C_S = 150$ fF

[Kemdenget al. ECCE Europe 2025]
[Kemdenget al. SGE 2025]



III. Résultats Expérimentaux

Résultats GDA Split : Zoom

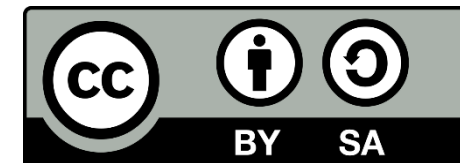


- ❑ Réduction de 60% du dv/dt maximal passant de 15 V/ns à 6 V/ns
- ❑ Réaction rapide de la boucle de contre réaction $< 200 \text{ ps}$

[Kemden et al. Wipda Europe 2024]

[Kemden et al. ECCE Europe 2025]

[Kemden et al. SGE 2025]



MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE

Liberté
Égalité
Fraternité

- ❑ Boucle de rétroaction inconditionnellement stable
- ❑ Bande passante 8 GHz

III. Conclusion - Enjeux principaux

EMI / CEM

- Les fortes pentes dv/dt génèrent beaucoup d'interférences → nécessité de packaging optimisé et de drivers avec contrôle actif du slew rate.

Fiabilité à haute température

- SiC et GaN fonctionnent à >150 °C. Les drivers doivent utiliser des technologies robustes (CMOS haute tension, SOI).

Gestion des coûts

- Les solutions intégrées (driver + transistor), réduction des coûts, simplification la conception.
- Trouver le bon compromis entre performance et accessibilité.

Sécurité fonctionnelle et robustesse

- Systèmes critiques (aéronautique, automobile, énergie) exigent une protection et un monitoring embarqués dans le driver.

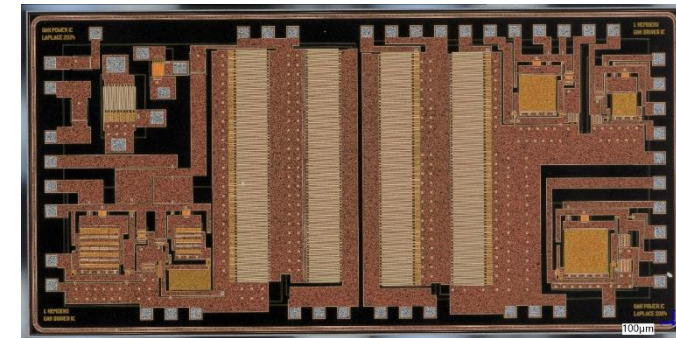
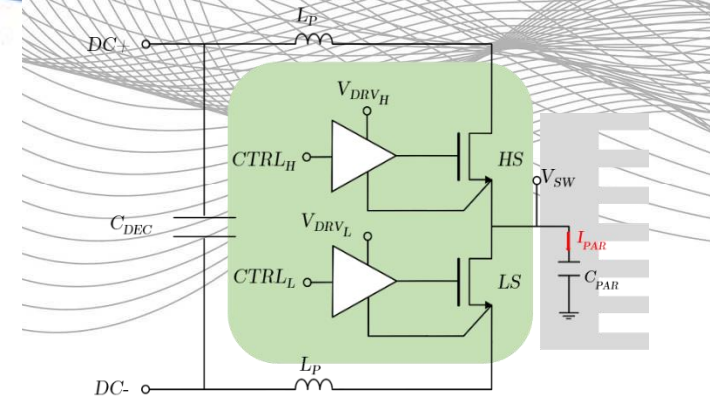
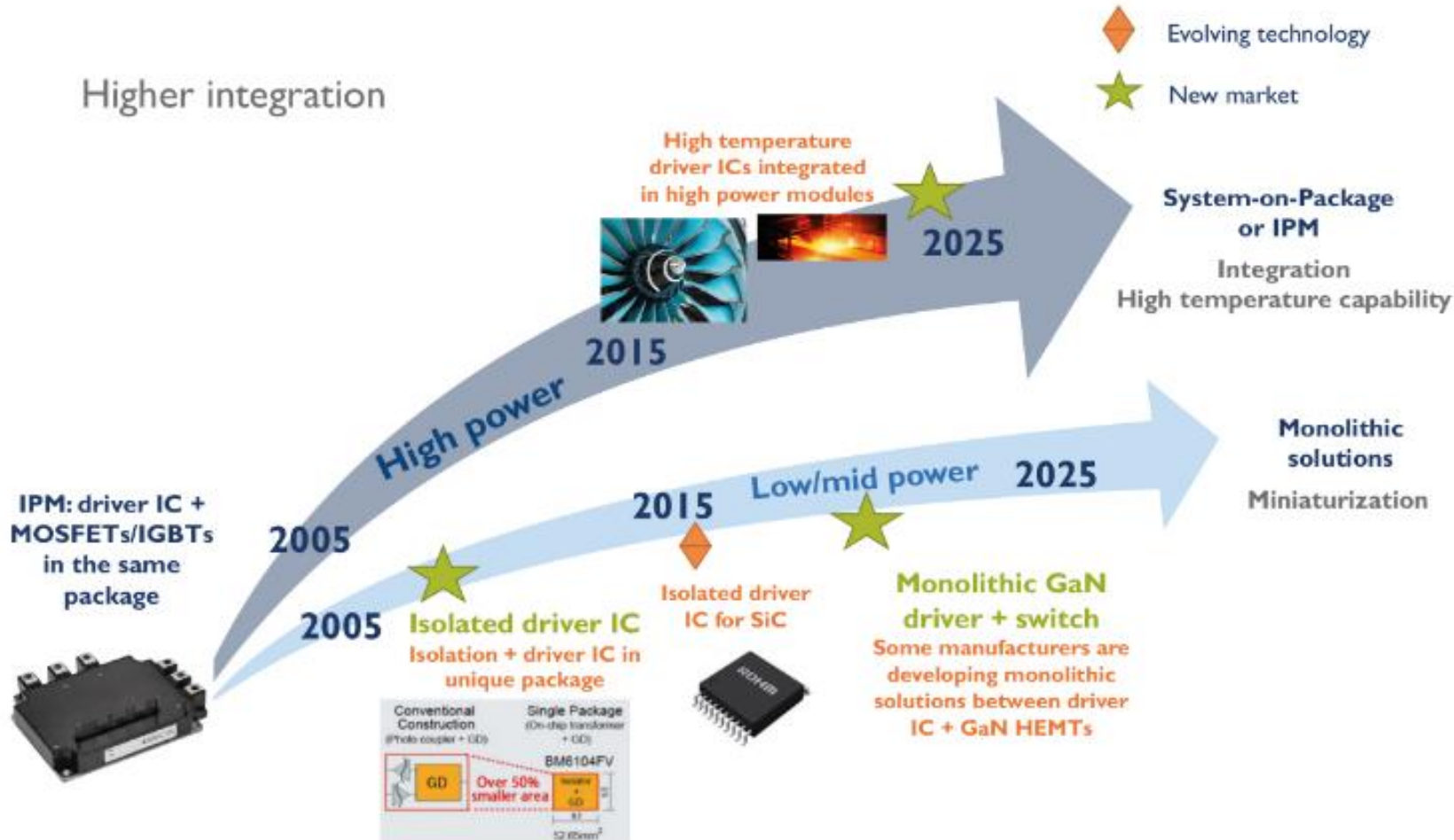
Normalisation & adoption industrielle

- Besoin de standards pour favoriser l'adoption (par ex. ISO 26262 pour l'automobile).

III. Conclusion

Gate driver technology roadmap for high power and low/mid power applications

(Source: Gate Driver Market and Technology Trends 2017 report, March 2017, Yole Développement)



Forte intégration des composants de la cellule de commutation

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

UNIVERSITÉ PAUL SABATIER
Bât. 3R3, 118 route de Narbonne
31062 Toulouse Cedex 9

+33 (0)5 61 55 67 97
sec-ups@laplace.univ-tlse.fr

ENSEEIH
2 Rue Camichel,
31071 Toulouse Cedex 7

+33 (0)5 34 32 23 91
sec-n7@laplace.univ-tlse.fr

Ga₂O₃ as an Emerging UWBG Semiconductor for Power Electronics:

The Strong Involvement of Grenoble's Labs

Vincent Consonni

Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LMGP, 38000 Grenoble, France



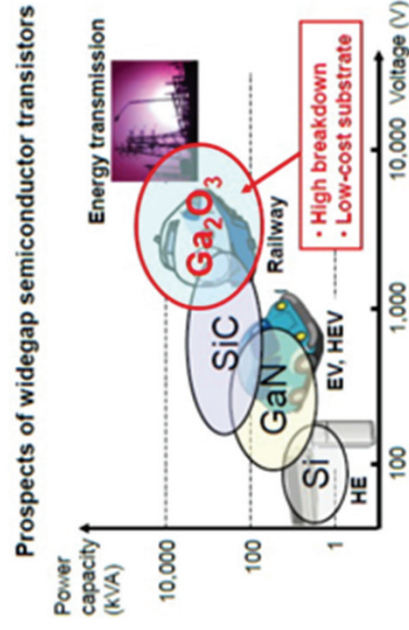
Ultra-Wide Band Gap Semiconductors

Materials parameters	Si	GaAs	4H-SiC	GaN	Diamond	β -Ga ₂ O ₃	Comments
Bandgap, E_g (eV)	1.1	1.43	3.25	3.4	5.5	4.85	Bandgap of Ga ₂ O ₃ reported in range 4.6–4.9 eV
Dielectric constant, ϵ	11.8	12.9	9.7	9	5.5	10	
Breakdown field, E_C (MV/cm)	0.3	0.4	2.5	3.3	10	8	Experimental values for Ga ₂ O ₃ have reached ~0.5 times the theoretical maximum
Electron mobility, μ (cm ² /Vs)	1480	8400	1000	1250	2000	300	
Saturation velocity, v_s (10 ⁷ cm/s)	1	1.2	2	2.5	1	1.8-2	1.8 $\langle 001 \rangle$ and $\langle 010 \rangle$, 2.0 $\langle 010 \rangle$
Thermal conductivity λ (W/cm K)	1.5	0.5	4.9	2.3	20	0.1–0.3	0.13 $\langle 100 \rangle$, 0.23 $\langle 010 \rangle$
Figures of merit relative to Si							
Johnson = $E_c^2 \cdot V_s^2 / 4\pi^2$	1	1.8	278	1089	1110	2844	Power-frequency capability
Baliga = $\epsilon \cdot \mu \cdot E_c^3$	1	14.7	317	846	24660	3214	Specific on-resistance in (vertical) drift region
Combined = $\lambda \cdot \epsilon \cdot \mu \cdot V_s \cdot E_c^2$	1	3.7	248.6	353.8	9331	37	Combined power/frequency/voltage
Baliga high frequency = $\mu \cdot E_c^2$	1	10.1	46.3	100.8	1501	142.2	Measure of switching losses
Keyes = $\lambda \cdot [(c \cdot V_s) / (4\pi \cdot \epsilon)]^{1/2}$	1	0.3	3.6	1.8	41.5	0.2	Thermal capability for power density/speed
Huang HCAFOM, $\epsilon \mu^{0.5} E_c^2$	1	5	48	85	619	279	Huang chip area manufacturing FOM

Ultra-Wide Band Gap Semiconductors

Materials parameters	Si	GaAs	4H-SiC	GaN	Diamond	β -Ga ₂ O ₃	Comments
Bandgap, E_g (eV)	1.1	1.43	3.25	3.4	5.5	4.85	Bandgap of Ga ₂ O ₃ reported in range 4.6–4.9 eV
Dielectric constant, ϵ	11.8	12.9	9.7	9	5.5	10	
Breakdown field, E_C (MV/cm)	0.3	0.4	2.5	3.3	10	8	Experimental values for Ga ₂ O ₃ have reached ~0.5 times the theoretical maximum
Electron mobility, μ (cm ² /Vs)	1480	8400	1000	1250	2000	300	1.8 $\langle 001 \rangle$ and $\langle 010 \rangle$, 2.0 $\langle 010 \rangle$ 0.13 $\langle 100 \rangle$, 0.23 $\langle 010 \rangle$
Saturation velocity, v_s (10 ⁷ cm/s)	1	1.2	2	2.5	1	1.8-2	
Thermal conductivity λ (W/cm K)	1.5	0.5	4.9	2.3	20	0.1–0.3	
Figures of merit relative to Si							Power-frequency capability
Johnson = $E_c^2 \cdot V_s^2 / 4\pi^2$	1	1.8	278	1089	1110	2844	Specific on-resistance in (vertical) drift region
Baliga = $\epsilon \cdot \mu \cdot E_c^3$	1	14.7	317	846	24660	3214	
Combined = $\lambda \cdot \epsilon \cdot \mu \cdot V_s \cdot E_c^2$	1	3.7	248.6	353.8	9331	37	Combined power/frequency/voltage
Baliga high frequency = $\mu \cdot E_c^2$	1	10.1	46.3	100.8	1501	142.2	Measure of switching losses
Keyes = $\lambda \cdot [(c \cdot V_s) / (4\pi \cdot \epsilon)]^{1/2}$	1	0.3	3.6	1.8	41.5	0.2	Thermal capability for power density/speed
Huang HCAFOM, $\epsilon \mu^{0.5} E_c^2$	1	5	48	85	619	279	Huang chip area manufacturing FOM

β -Ga₂O₃ attractive properties for power electronics community



M. Higashiwaki *et al.*, Applied Physics Letters 100, 013504 (2012)

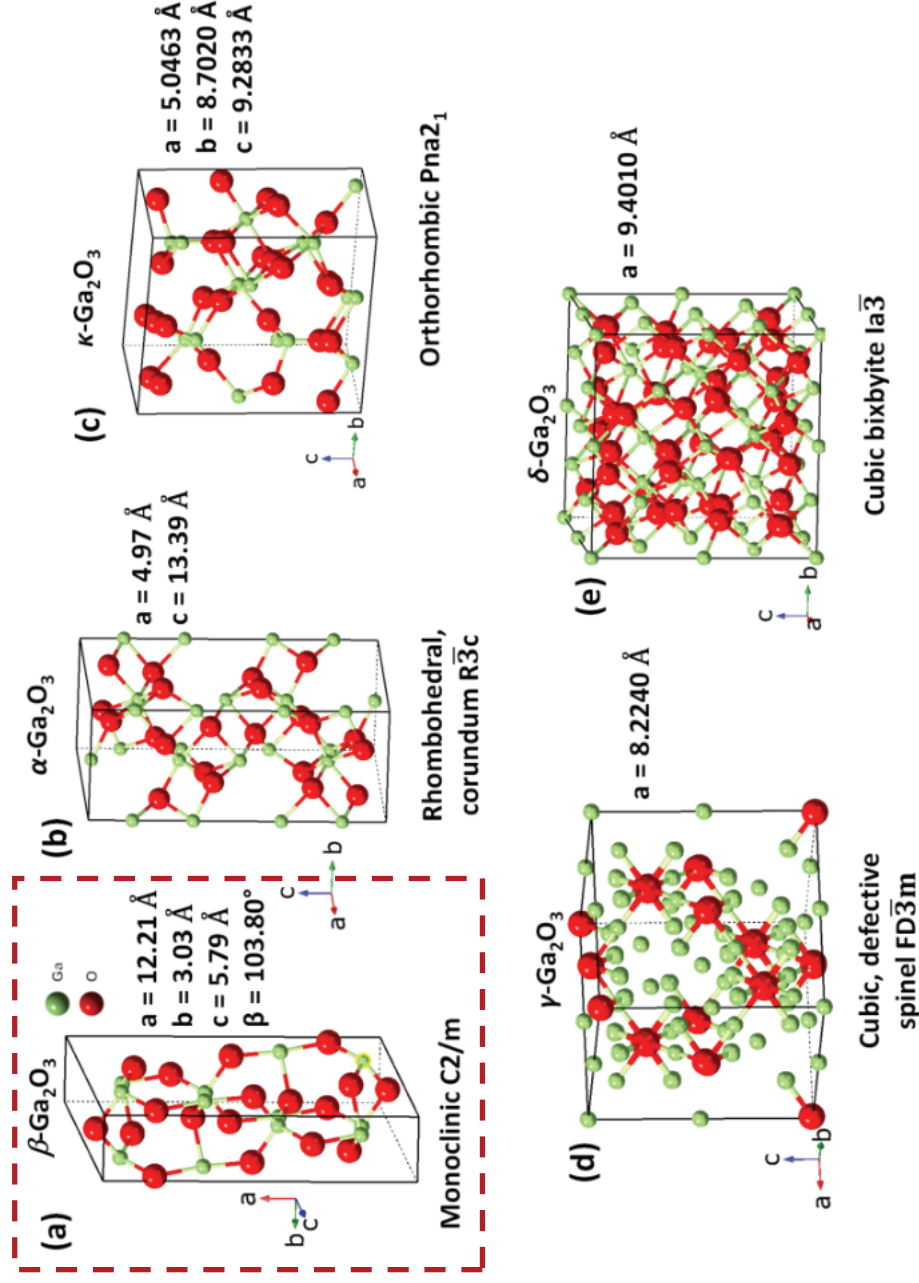
Material parameters	β -Ga ₂ O ₃
Bandgap E_g (eV)	4.8 ~ 4.9
Critical field E_C (MV/cm)	8
Dielectric constant ϵ	10
Electron mobility μ_e (cm ² /Vs)	300
Thermal conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)	10–27
Saturation velocity (10 ⁷ cm s ⁻¹)	1.8–2.0
Baliga's FOM ($\epsilon\mu E_C^3$)	3214
Johnson's FOM ($v_{sat}^2 E_C^2 / 4\pi^2$)	2844
Doping	n

Experimental: 194 cm²/Vs

Very low thermal dissipation

No p-type doping?

Among its five polymorphs, β -Ga₂O₃ is the most stable

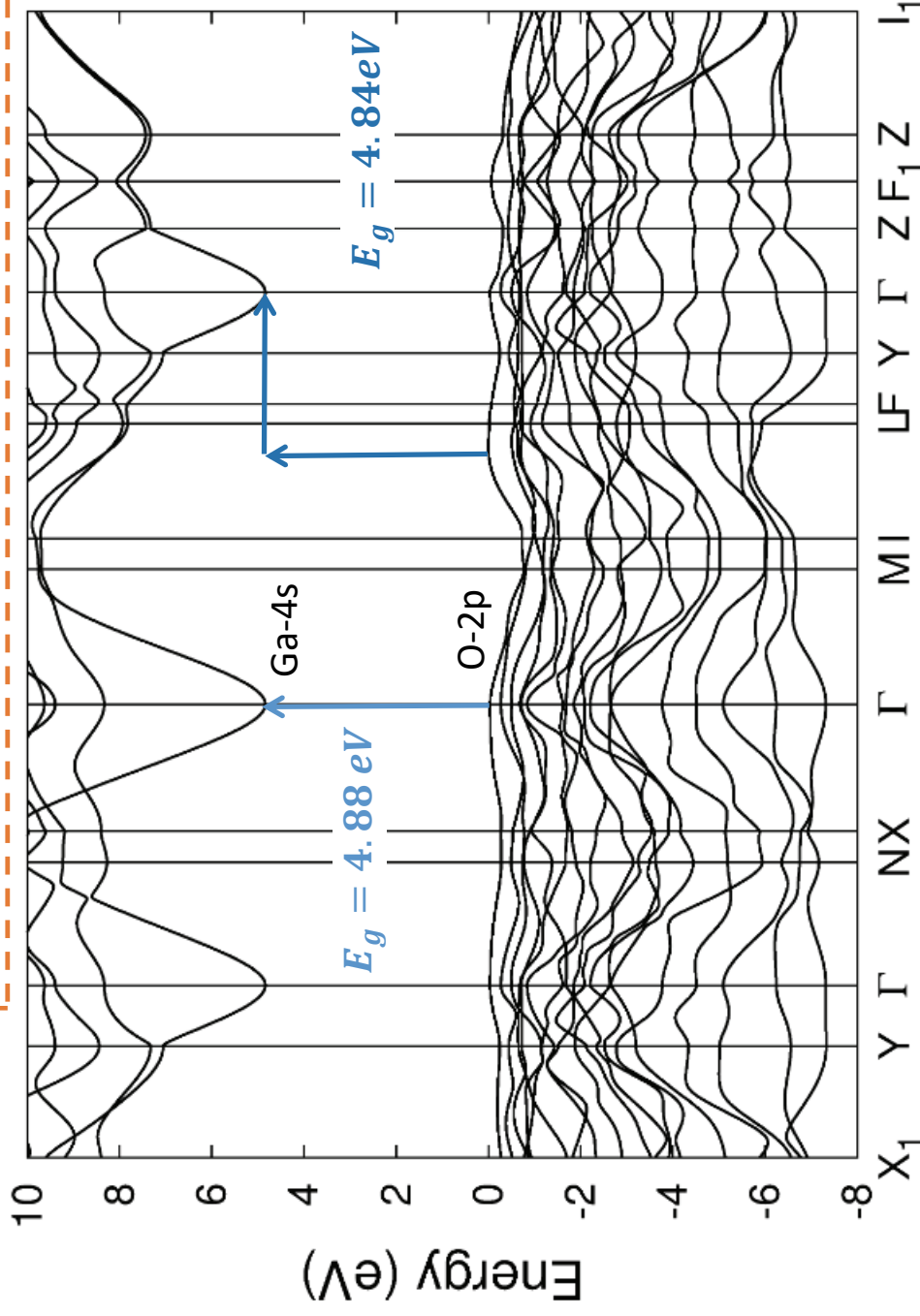


All Ga₂O₃ polymorphs convert to the stable β -phase using thermal annealing

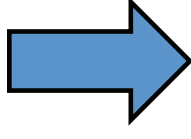
R. Roy et al. *J. Am. Chem. Soc.* 74, 3, 719–722 (1952)

A.F.M. Bhuiyan et al., *J. Appl. Phys.* 133, 211103 (2023)

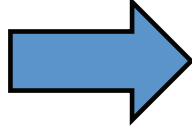
Simulated band structure of β -Ga₂O₃ considered as direct



Large effective mass for holes



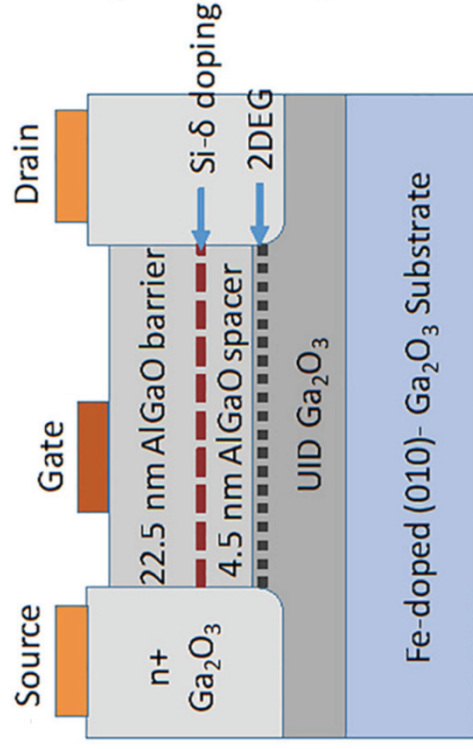
Self-trapped holes



Hole polarons and no free holes!?

T. Wang et al. Phys. Rev. Appl. 10, 011003 (2018)

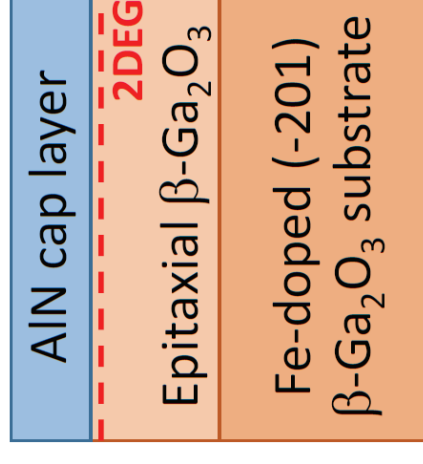
Homojunctions & Heterojunctions with Ga₂O₃



Zhang et al. Appl. Phys. Lett. 112 (2018)

(Al_xGa_{1-x})₂O₃/Ga₂O₃ homojunctions to compensate for the fairly low electron mobility by the formation of 2DEG in the epitaxial Ga₂O₃ layer*

*inspired from AlGaN/GaN structures



ANR ALOFET (2023-2027) : NEEL, LMGP, CEA-IRIG

AlN/ Ga₂O₃ heterojunctions to compensate for the fairly low electron mobility by the formation of 2DEG in the epitaxial Ga₂O₃ layer*

*induced by the spontaneous and piezoelectric polarization in AlN

Ga₂O₃: Status on the site of Grenoble

Development of the whole process flow from synthesis/deposition to integration



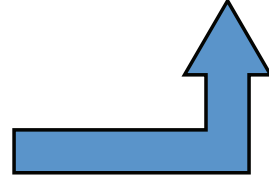
Past and Present Projects

ED IMEP² (LMGP) → Dr. Guislain Hector (PhD 2022) ANR JCJC DOSETTE
 ED Physique (NEEL) → Dr. Coralie Perrier (PhD 2025) J-FAST IRL (Tsukuba)
 IRGA DEF12 (IRIG, LMGP) – 2023/2026 → Andy Séguret
 ANR PRC ALOFET (NEEL, IRIG, LMGP) – 2024/2028 → J.C. Trujillo-Yague
 Labex MateriAlps (LMGP, IRIG) – 2024/2027 → Marty Volant
 Smart^{Cut} Ga₂O₃ (LETI, NEEL) – 2023/2026 → Adrien Roth 
 MSCA SusMatEner (LMGP, Lisboa) – 2025/2028 → Catarina Matos

First Publications

G. Hector *et al.* Inorganic Chemistry 2020 (LMGP)
 G. Hector *et al.* Inorganic Chemistry 2023 (LMGP)
 C. Perrier *et al.* Applied Physics Letters 2023 (NEEL)
 G. Hector *et al.* Nanomaterials 2024 (LMGP)
 ...

- ☐ Advanced Structural Characterization (LMGP, IRIG)
- ☐ Advanced Optical & Electrical Characterization (NEEL, IRIG)
- ☐ Design & Integration into Field-Effect Transistors (NEEL, LETI)



PLI-MOCVD of epitaxial Ga_2O_3 thin films

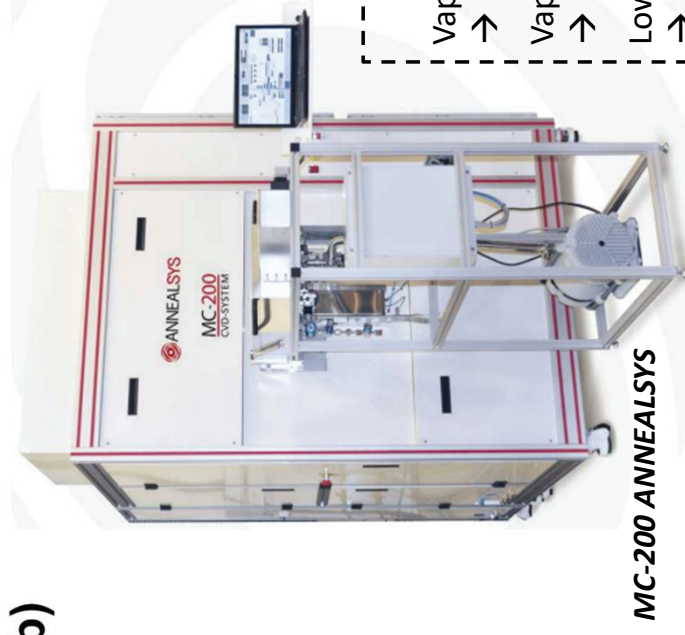
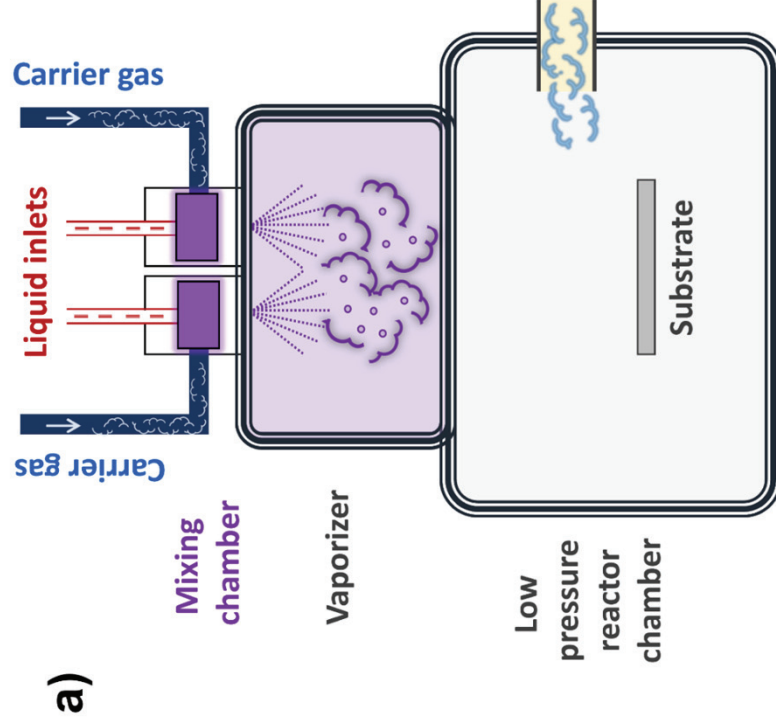


Marielena
Velasco-Enriquez



Dr. Vincent Consonni (LMGP)
Prof. Eirini Sarigiannidou (LMGP)
Dr. Philippe Ferrandis (NEEL)

PLI-MOCVD as a new tool for epitaxial Ga_2O_3



MC-200 ANNEALSYS

A couple of advantages

- Vaporizer system: low-P chemical precursors
 - alternative chemicals
- Vaporizer system: precise dosing
 - more sustainable than conventional MOCVD
- Lower growth temperature
 - reduction in the thermal budget

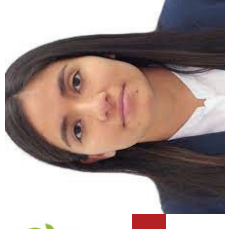
*Pulsed-liquid injection metal-organic chemical vapor deposition**

** previously patented in LMGP and typically used for semiconducting oxides*

PLI-MOCVD of epitaxial Ga_2O_3 thin films

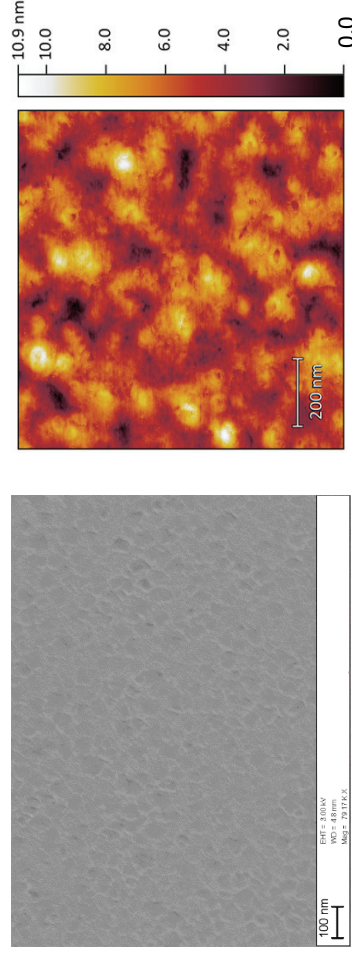


35

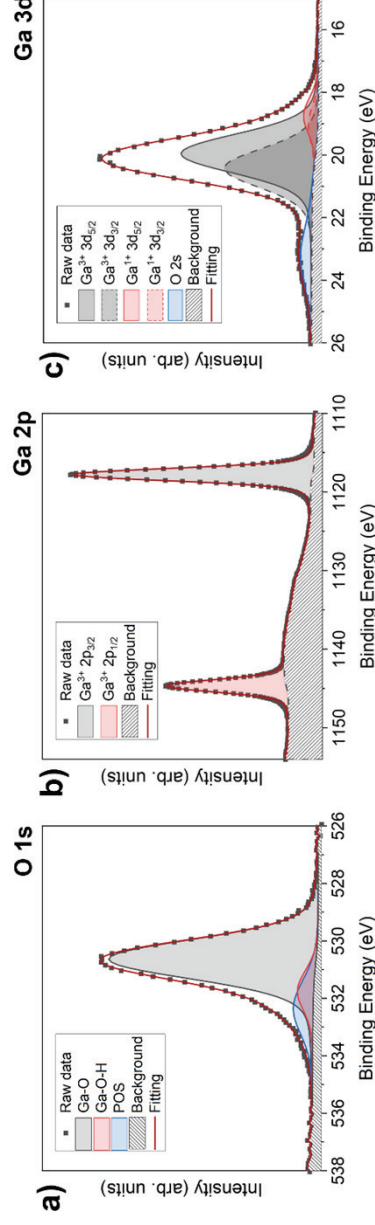


Marielena
Velasco-Enriquez

PLI-MOCVD of Ga_2O_3 thin films using TEGa & O_2



Field-Emission scanning Electron Microscopy & Atomic Force Microscopy



X-Ray Photoelectron Spectroscopy

Ga_2O_3 thin films on c-plane sapphire

Significant Thickness (>100 nm)

→ Compatible with power devices

Small roughness (RMS ~ 1.5 nm)

→ Compatible with heterojunctions

Stoichiometric composition (O/Ga ~ 1.5)

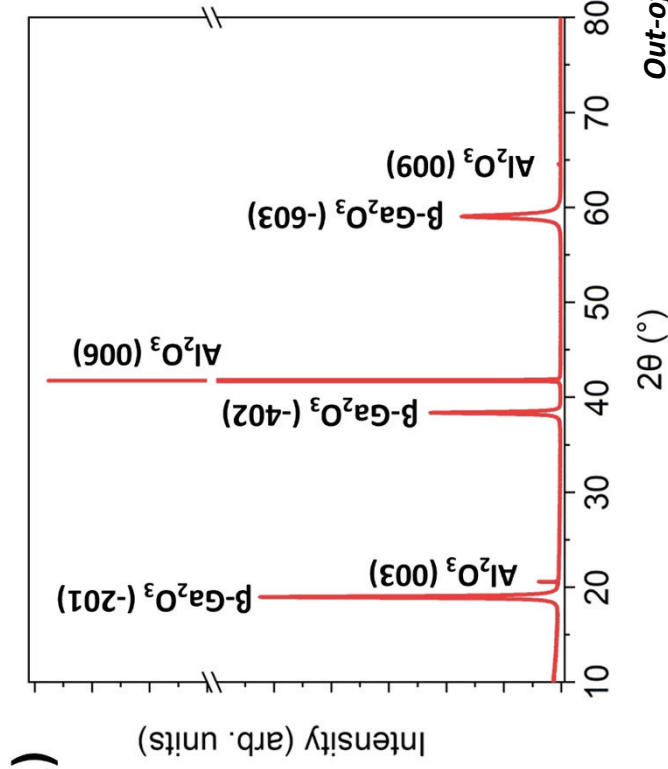
PLI-MOCVD of epitaxial Ga_2O_3 thin films



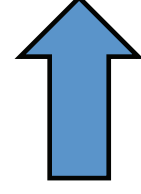
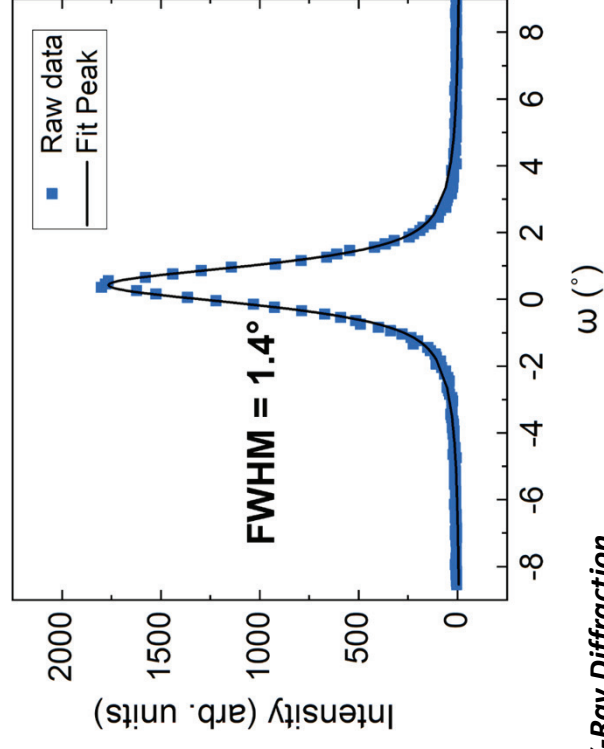
Marielena
Velasco-Enriquez

Epitaxy of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films on c-plane sapphire

a)



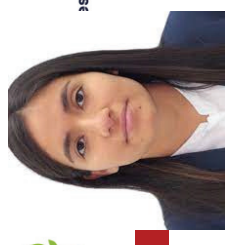
b)



Single-crystalline Ga_2O_3 thin films

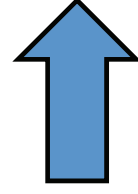
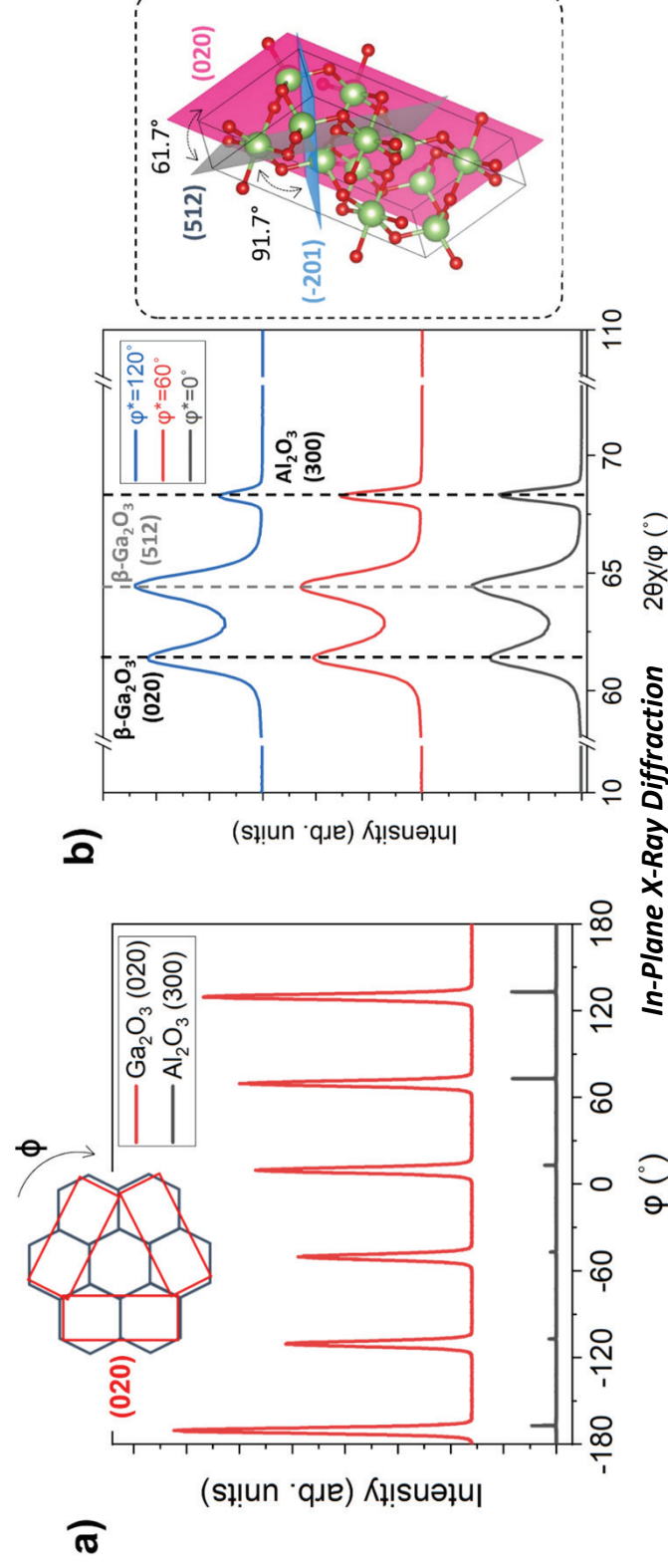
A pure, single β -phase
A single out-of-plane (-201) orientation
A FWHM as low as 1.4°

PLI-MOCVD of epitaxial Ga_2O_3 thin films



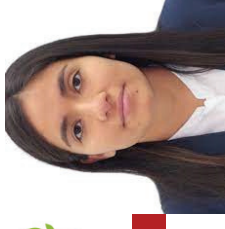
Marielena
Velasco-Enriquez

Epitaxy of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films on *c*-plane sapphire



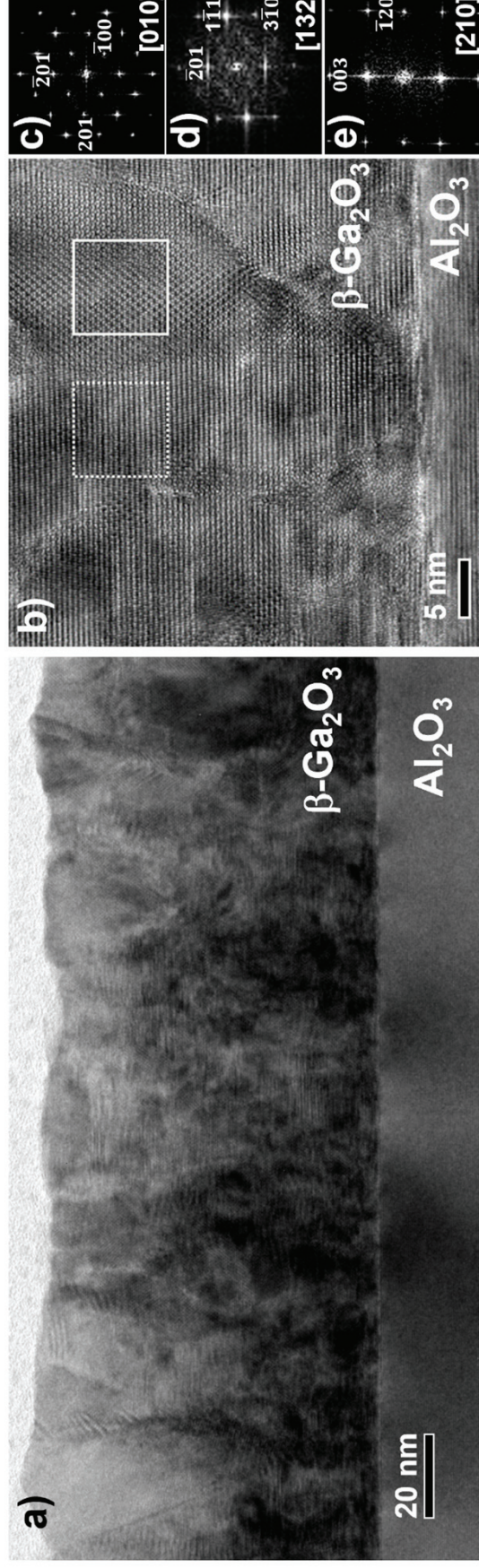
Epitaxial relationship

Out-of-plane: $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (-201) || Al_2O_3 (003)
In-plane: $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (020) || Al_2O_3 (300)



Marielena
Velasco-Enriquez

Epitaxy of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films on c-plane sapphire



High-Resolution Transmission Electron Microscopy

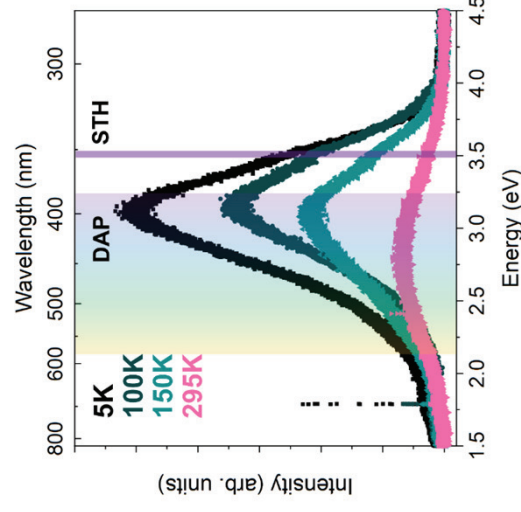
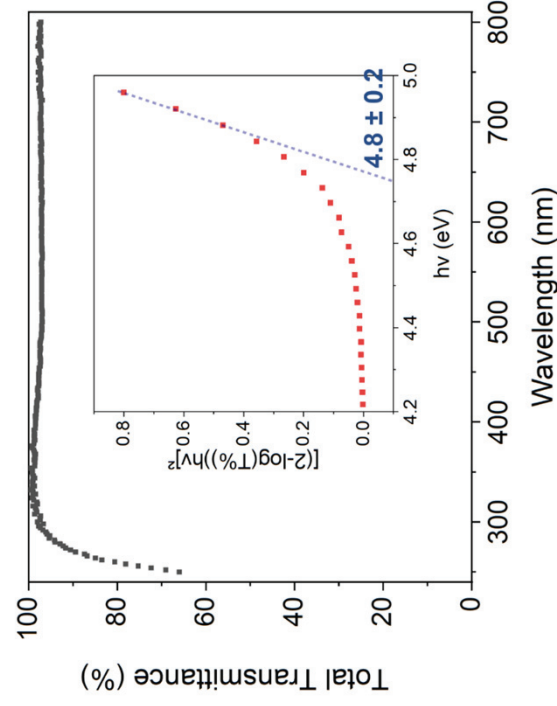
The interface with the c-plane sapphire is abrupt with no evidence of an interfacial layer, but the Ga_2O_3 thin film exhibits rotational domains to accommodate the lattice mismatch

PLI-MOCVD of epitaxial Ga_2O_3 thin films

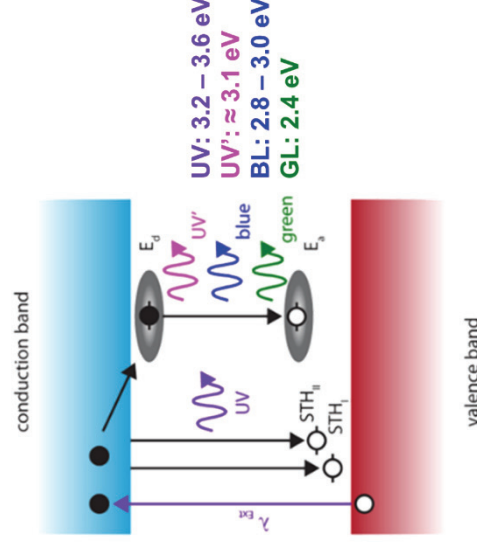


Marielena
Velasco-Enriquez

Optical properties of epitaxial $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films



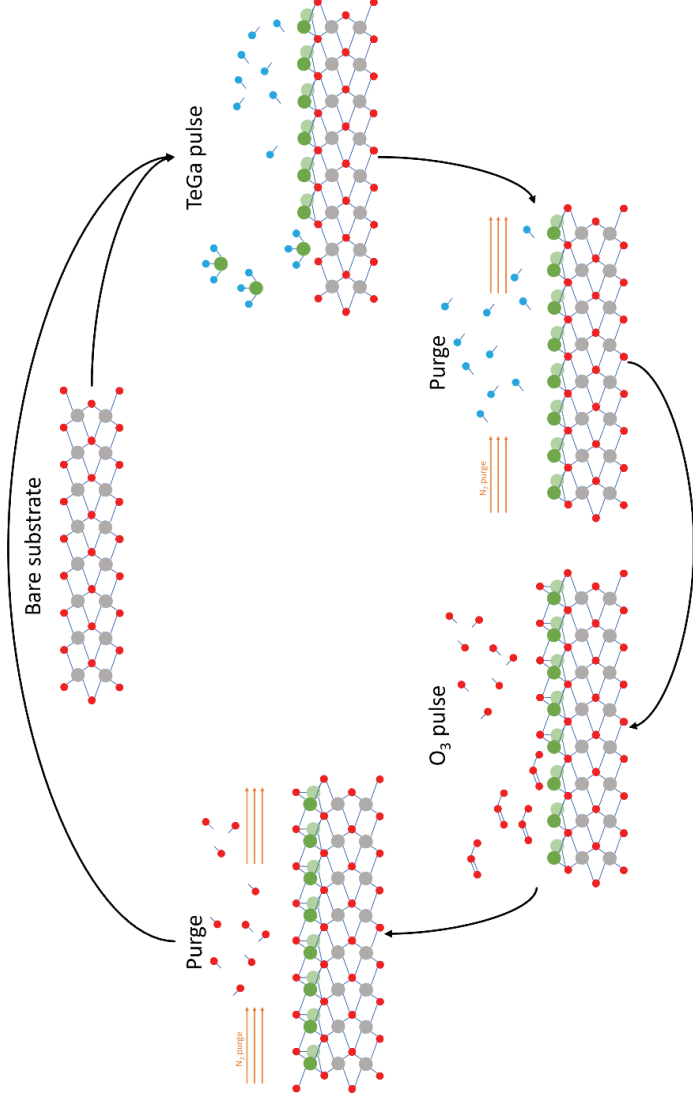
Cathodoluminescence spectroscopy



The wide bandgap energy of 4.8 ± 0.2 eV is determined with the presence of UV, blue and green emission bands, some of them being assigned to vacancies (V_{Ga} , V_{O}) or substitutional C (C_{O})

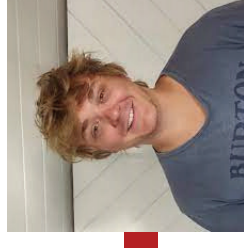
Thermal ALD of epitaxial Ga_2O_3 thin films

Thermal ALD as a new tool for epitaxial Ga_2O_3*



A couple of advantages

- Successive cycles of TEGa and O_3 :
 - high conformity and interface control
- Self-limiting surface reaction
 - High thickness control and homogeneity
- Lower growth temperature
 - reduction in the thermal budget

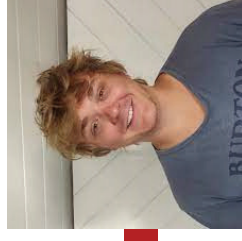


Andy Séguret



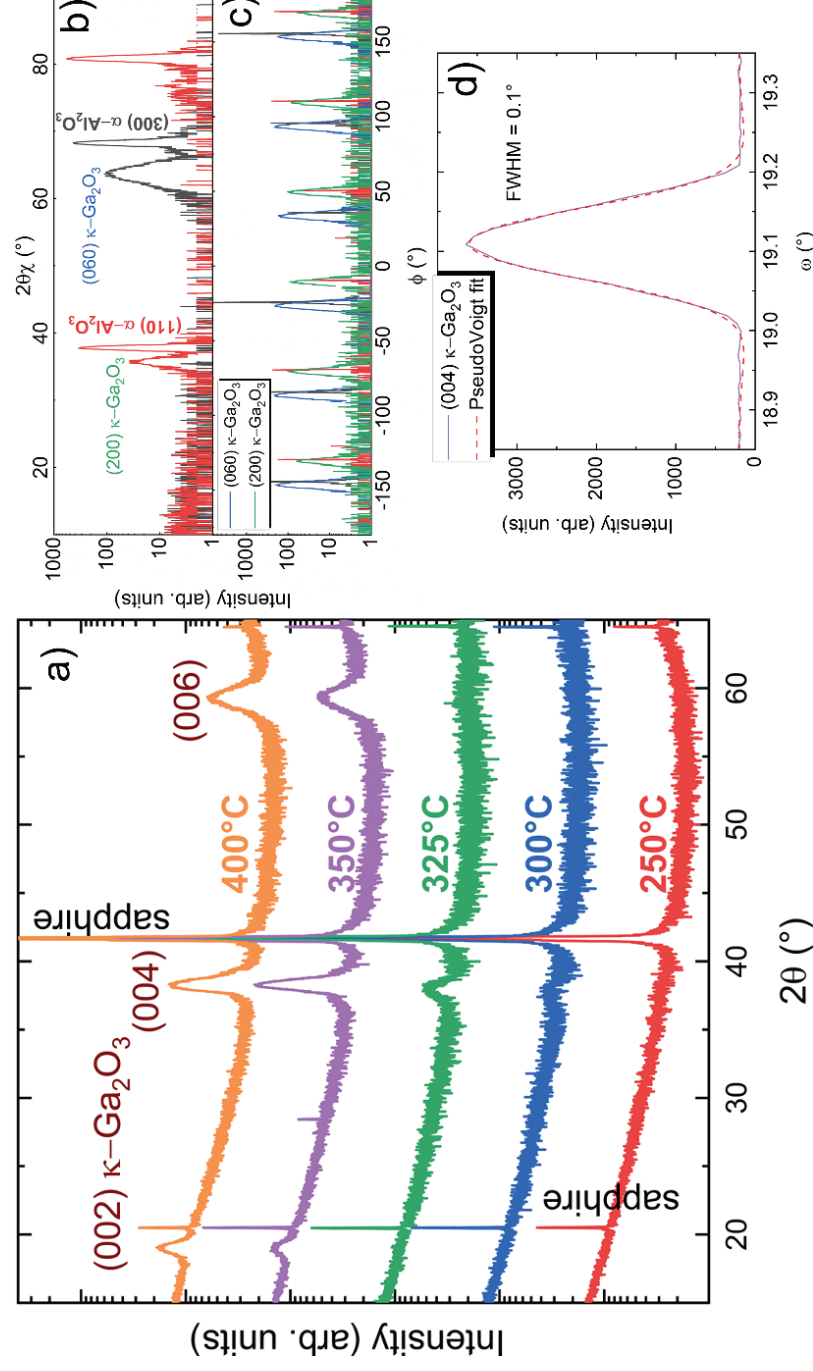
Ilyass Jellal

Thermal ALD of epitaxial Ga_2O_3 thin films

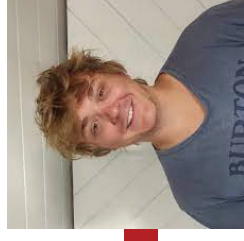


Andy Séguret

Epitaxy of $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films on c-plane sapphire

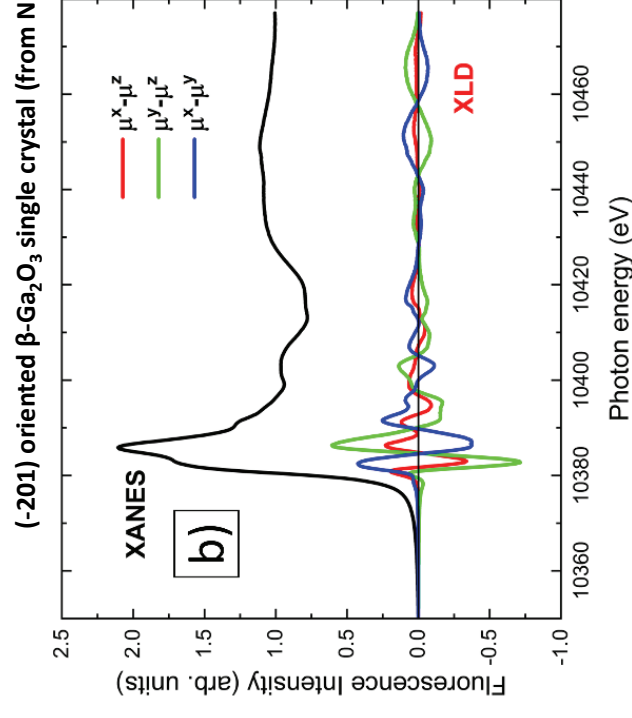
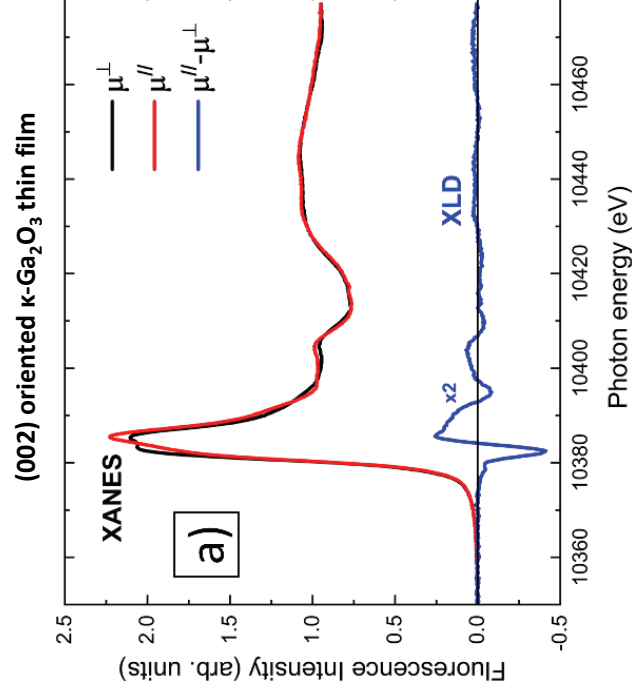


Thermal ALD of epitaxial Ga_2O_3 thin films



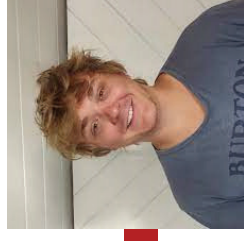
Andy Séguret

Epitaxy of $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films on c-plane sapphire



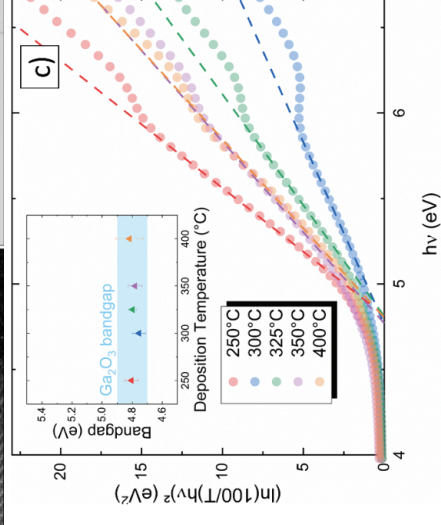
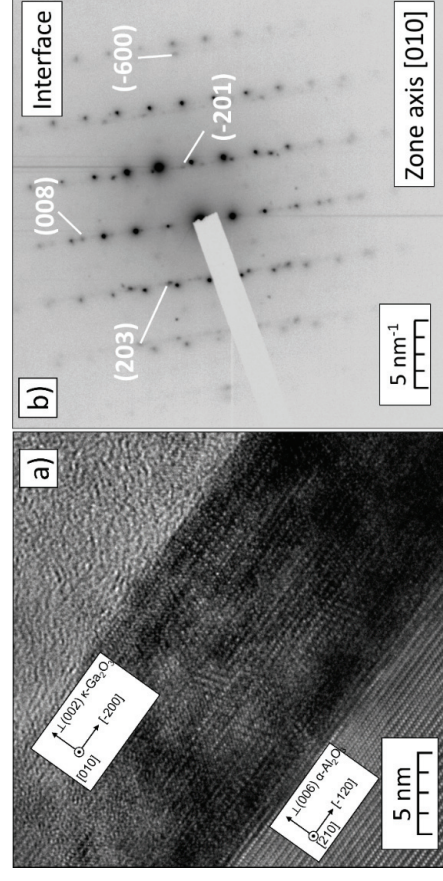
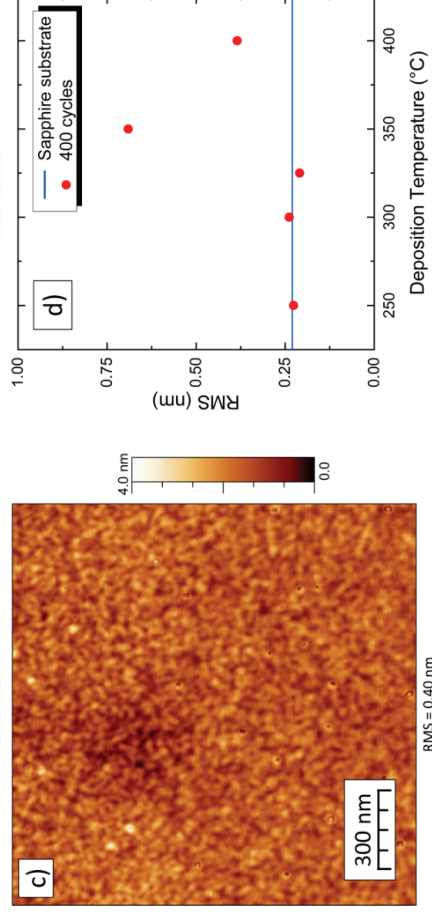
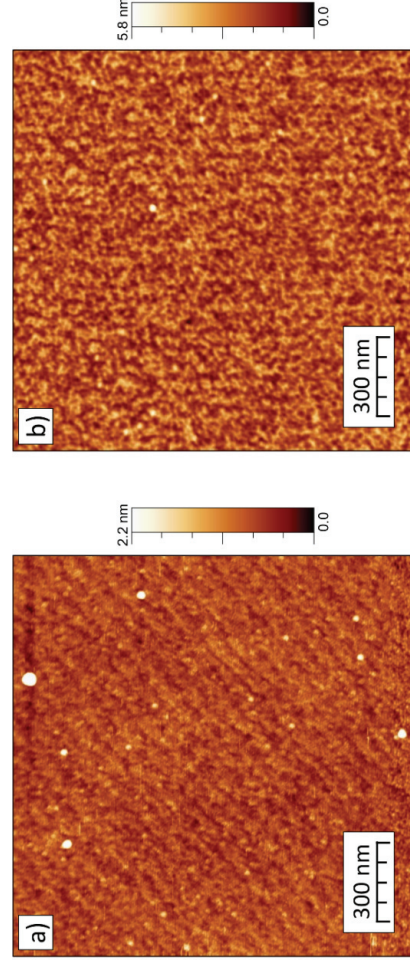
The $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films have a high crystalline quality and a high purity with no detection of any residual β -phase

Thermal ALD of epitaxial Ga_2O_3 thin films

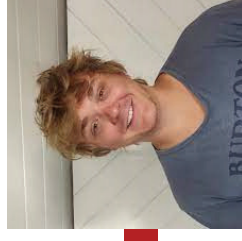


Andy Séguret

Epitaxy of $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films on c-plane sapphire

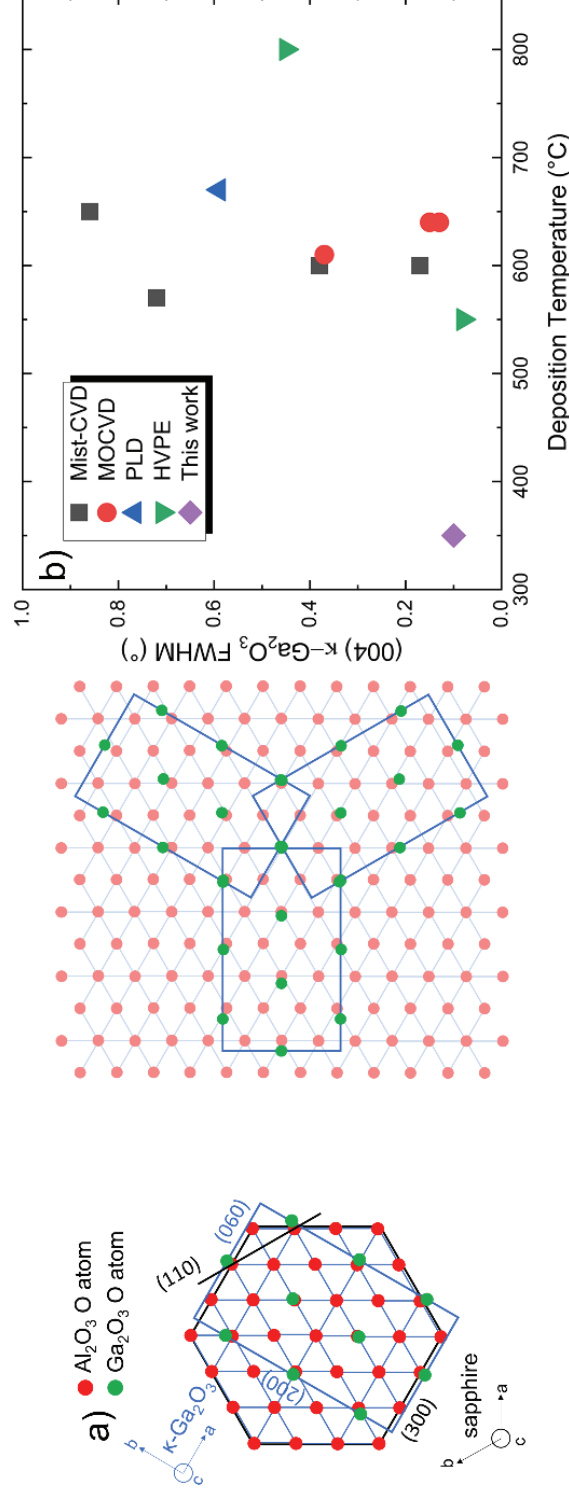


Thermal ALD of epitaxial Ga_2O_3 thin films



Andy Séguret

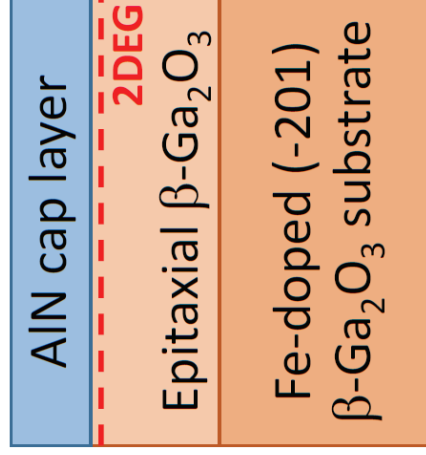
Thermal ALD of $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$ in the field of Atomic Layer Epitaxy



The growth of epitaxial $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films by ALD operates in the framework of atomic layer epitaxy (ALE), competing with most of the epitaxial deposition techniques while using a much lower growth temperature.

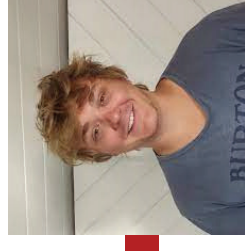
An example of heterojunctions with Ga_2O_3

MBE to grow AlN on top of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$

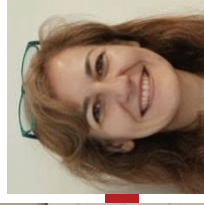


AlN by MBE on $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ single crystal

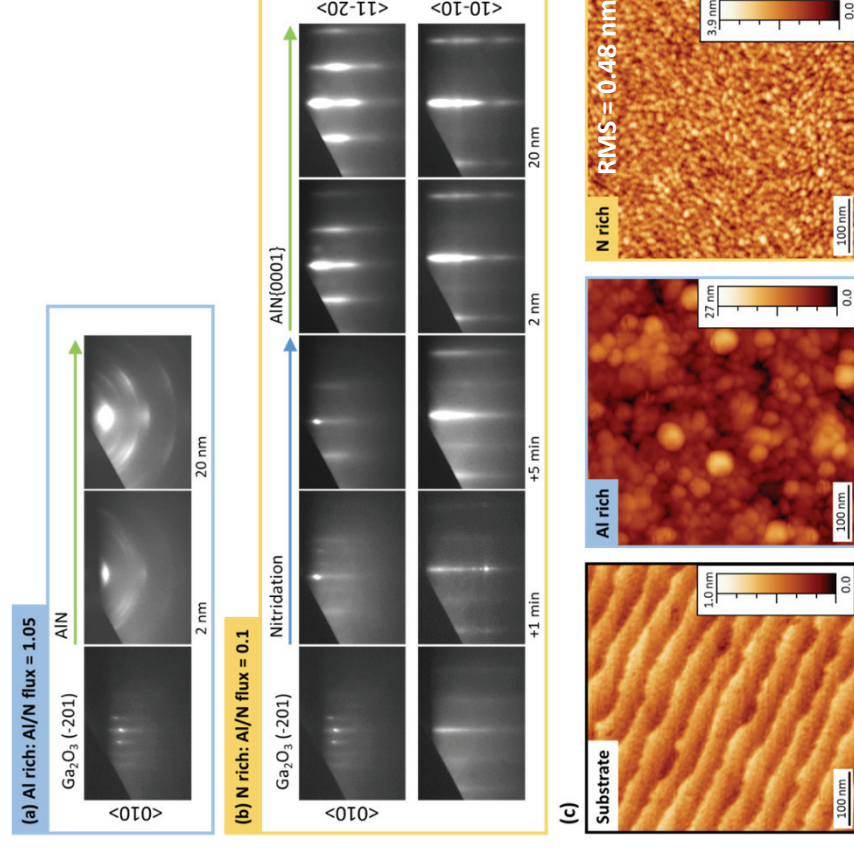
The N-rich conditions are required to grow fairly smooth AlN layer



Andy Séguret

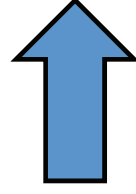
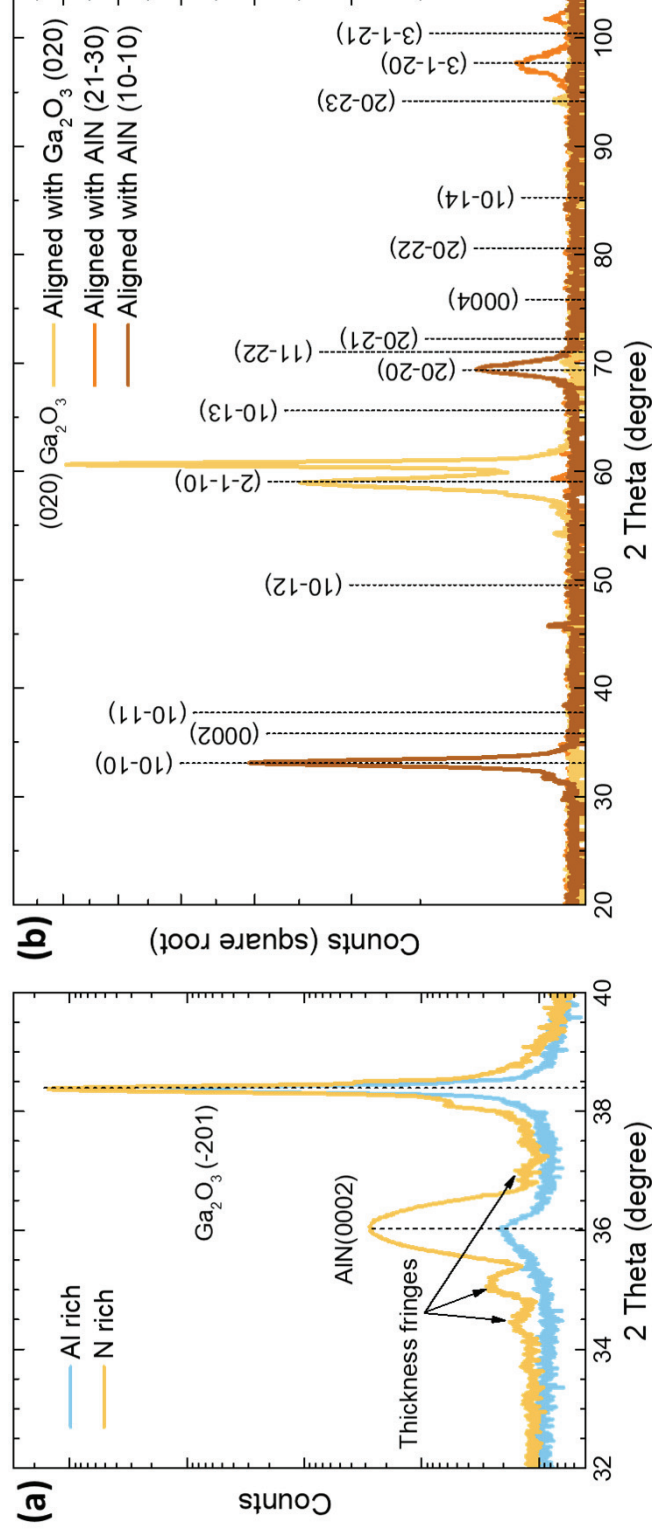


Eva Monroy



An example of heterojunctions with Ga_2O_3

Epitaxy of AlN layer on $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ single crystal

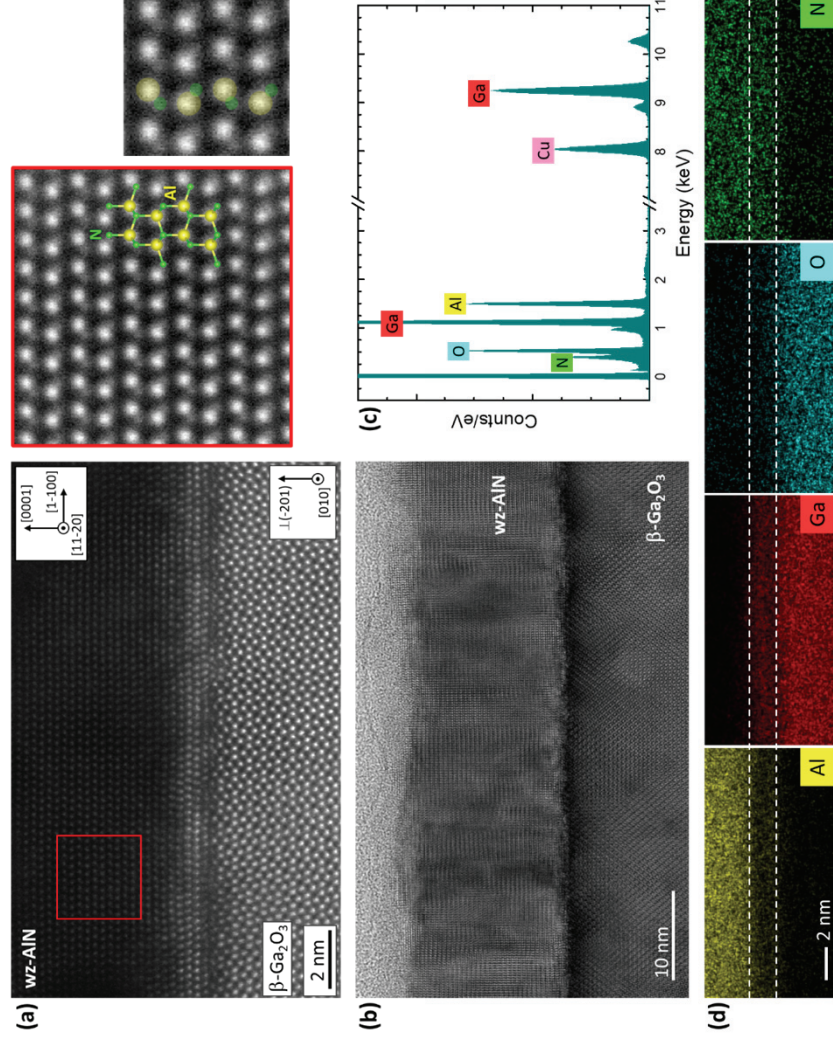


Epitaxial relationship

Out-of-plane: AlN (001) || $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (-201)
In-plane: AlN (2-1-10) || $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (020)

An example of heterojunctions with Ga_2O_3

Epitaxy of AlN layer on $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ single crystal

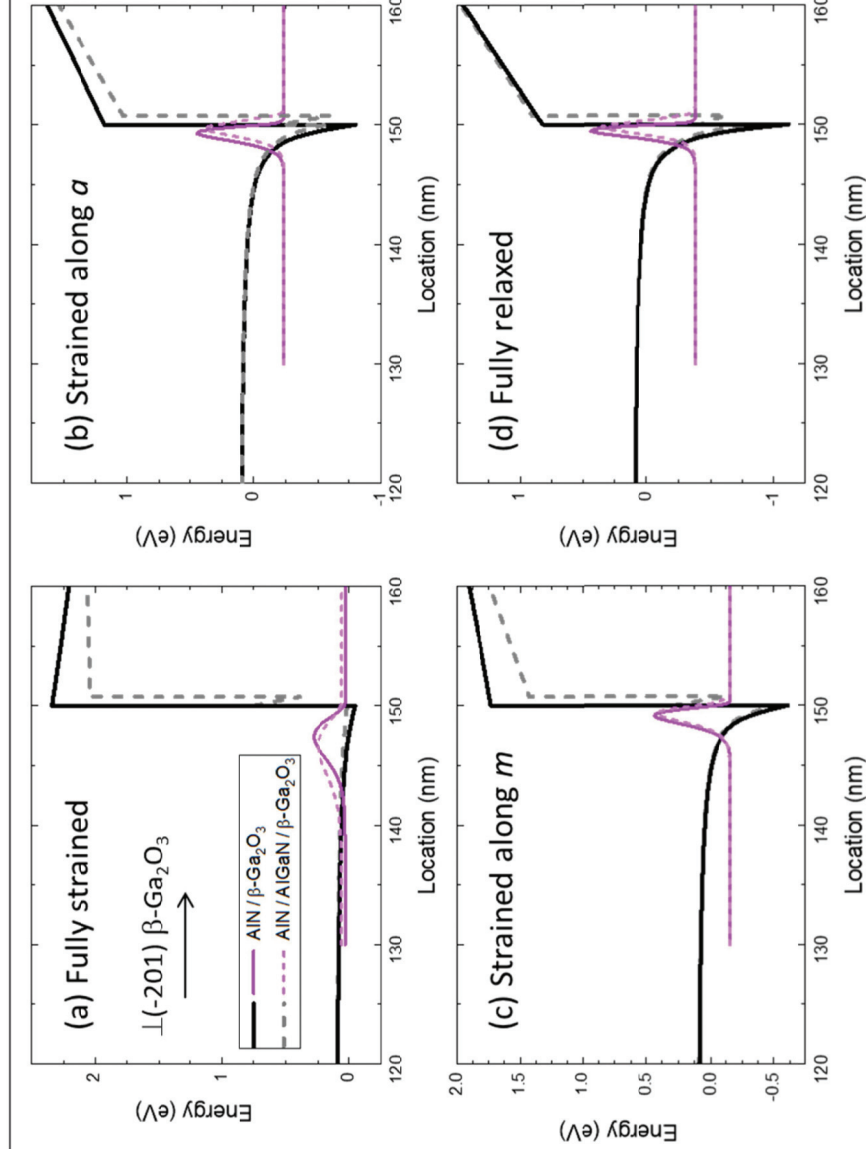


Epitaxial AlN layer with no rotational domains and with the Al-polarity

Al-rich AlGaN interlayer

An example of heterojunctions with Ga_2O_3

Potential of the $\text{AlN}/\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ heterojunction



	Relaxed	Strained along a	Strained along m	Fully strained
Polarization [C m^{-2}]	90.0	55.4	35.4	8.0
Charge [cm^{-2}]	5.6×10^{13}	3.5×10^{13}	2.2×10^{13}	5.4×10^{12}

The presence of the ternary AlGaN layer does not hinder the formation of the 2DEG and the interface charge density is calculated to be higher than 10^{13} cm^{-2} (but it exhibits a strong dependence on the strain state)

Conclusions

- ✓ A comprehensive platform to grow Ga_2O_3 using PLI-MOCVD, ALD, CBD, and MBE in Grenoble
- ✓ A need for fundamental investigations regarding epitaxy, doping, interfaces, contacts, ...
- ✓ A strong support from the local Université Grenoble Alpes, following the exciting development in the international community (Germany, Japan, USA, China, ...)
- ✓ The next UWBG semiconductor for power electronics...!?

Creation of the « French » Workshop on Ga_2O_3 and Related Materials gathering the French community

First event in Grenoble on 29th and 30th September 2025

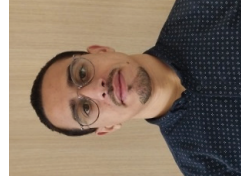
Acknowledgements



Marielena
Velasco-Enriquez
PhD



Andy Séguret
PhD



Ilyass Jellal
Post-doc



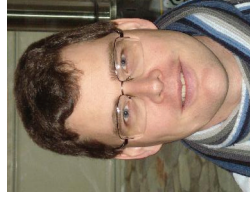
Eirini Sarigiannidou



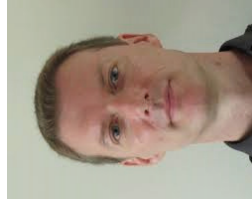
Laetitia Rapenne



Carmen Jiménez



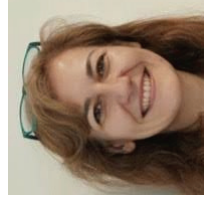
Hervé Roussel



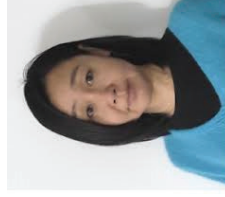
Philippe Ferrandis



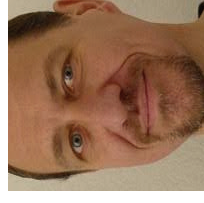
Fabrice Donatini



Eva Monroy



Hanako Okuno



Jean-Luc Rouvières



Fabrice Wilhelm

Acknowledgements



PowerAlps
Université Grenoble Alpes

UGA
Université
Grenoble Alpes

IRGA DEF12

Labex MICROELECTRONIQUE

Labex MATERIALPS - MAGO

GRENOBLE
INP Phelma
UGA

anr
agence nationale
de la recherche

ANR-23-CE24-0018
ALOFET



MSCA

Marie Skłodowska-Curie Actions
*Developing talents,
advancing research*

Doctoral Networks

SusMatEner

THANK YOU FOR YOUR ATTENTION