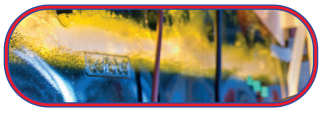
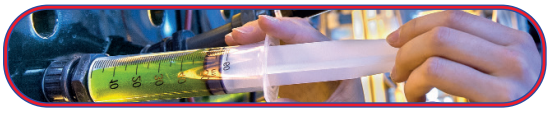
RAPPORT SCIENTIFIQUE CEA TECH EN RÉGION










2023

Édito



CEA Tech en région a pour mission de diffuser les technologies génériques clés développées par le CEA auprès des filières industrielles régionales structurantes afin d'accompagner les transformations requises pour faire face aux enjeux sociétaux de décarbonation, de digitalisation, de défense, et de santé globale. Pour soutenir cette mission, l'institut est présent dans sept régions avec des équipes de recherche et des moyens techniques et expérimentaux couvrant de multiples activités thématiques et technologiques allant de l'électronique de puissance aux biotechnologies innovantes en passant par exemple par le packaging, la synthèse de matériaux, l'imagerie multispectrale ou bien les piles à combustible.
Ces activités, articulées avec les feuilles de route des autres instituts du CEA, collaborent également avec les écosystèmes académiques locaux. Preuve de l'excellence des travaux réalisés au sein de l'institut seulement créé en 2013, CEA Tech en région a participé en 2025 à vingt-cinq projets européens et est auteur d'une vingtaine de publications scientifiques de rang A. Par ailleurs, avec plus d'une soixantaine de collaborations industrielles sur cette même année, CEA Tech en région a ainsi contribué à améliorer la compétitivité de ses partenaires économiques régionaux et nationaux.

C'est avec grand plaisir que je vous présente le premier rapport scientifique de CEA Tech en région proposant de revenir sur nos principales réalisations de l'année écoulée et je tiens à remercier chaleureusement les équipes pour leurs contributions.

Séverine Jouanneau Si Larbi
Directrice de l'Institut
CEA Tech en région

L'essentiel en chiffres

Institut fondé en 2013

Localisé dans 7 régions françaises

ISO 9001 depuis 2021

20 publications de rang A par an

25 brevets dans le portefeuille

21 experts

Superficie des plateformes technologiques : environ 7 000 m²

54 ingénieurs-chercheurs et 7 techniciens

60 partenaires industriels en 2025

25 projets européens en 2025

Sommaire

Édito – L'essentiel en chiffres **Page 2**

1. Tests et packaging pour l'électronique de puissance **Pages 4 - 15**

Simulation Hardware-in-the-Loop de convertisseurs CC-CC haute fréquence destinés aux applications de recharge embarquée automobile 6 - 7
Influence des surtensions de grille sur la résistance dynamique des HEMT GaN p-GaN 8 - 9
Caractérisation de la commutation du SiC MOSFET depuis la puce jusqu'au module de puissance 10 - 11
Réalisation par impression 3D d'une chambre à vapeur en céramique pour un dispositif électronique 12 - 13
Packaging de module de puissance utilisant des substrats 3D en céramique 14 - 15

2. Outils de caractérisation et de simulation pour les applications énergétiques **Pages 16 - 23**

Évaluation de la criticité des ions chlorures sur la durabilité des PEMFC en environnement marin 18 - 19
Stabilité d'une SOFC exposée à des aérosols de chlorure de sodium représentatifs d'un air marin 20 - 21
Modélisation de systèmes énergétiques complexes dans l'environnement Dymola - Modelica 22 - 23

3. De nouvelles applications pour les technologies d'imagerie **Pages 24 - 29**

Imagerie active sub-THz pour la détection à distance et l'identification de matières dangereuses 26 - 27
Recyclage des textiles par imagerie hyperspectrale dans le proche et le court infrarouge 28 - 29

4. Synthèse et caractérisations innovantes de matériaux **Pages 30 - 37**

Synthèse combinatoire d'alliages AlNi par co-projection cold spray et post alliation laser 32 - 33
Caractérisation expérimentale et numérique du comportement thermique du composite FR4 34 - 35
Limite de détection ultra-basse du lithium par LIBS dans les couches atomiques LiF 36 - 37

5. Biotechnologies innovantes **Pages 38 - 43**

Conversion du CO_2 en bioplastique par la microalgue *Chlorella vulgaris* 40 - 41
Un nouveau modèle mathématique pour simuler et optimiser la production de lipides dans les cultures de microalgues 42 - 43

Perspectives de publications scientifiques **Pages 44 - 45**

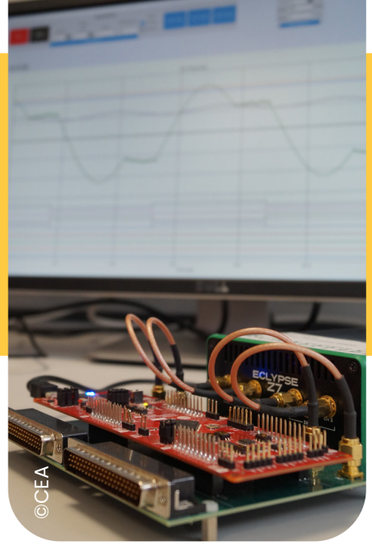
Développement de nanoparticules LNP contenant de l'ARNm 44
Développement d'une mesure rapide et hors laboratoire de traces de deux pesticides sur une matrice végétale 44
Détection et supervision d'attaques adversariales pour véhicule autonome par IA embarquée 45
Architecture logicielle générique pour jumeaux numériques prédictifs 45
Modélisation du contenu carbone du réseau électrique dans un objectif d'autonomie de micro-réseau 45

Les implantations en région **Pages 46 - 47**

Tests et packaging pour l'électronique de puissance

- **Simulation Hardware-in-the-Loop de convertisseurs CC-CC haute fréquence destinés aux applications de recharge embarquée automobile** p. 6-7
- **Influence des surtensions de grille sur la résistance dynamique des HEMT GaN p-GaN** p. 8-9
- **Caractérisation de la commutation du SiC MOSFET depuis la puce jusqu'au module de puissance** p. 10-11
- **Réalisation par impression 3D d'une chambre à vapeur en céramique pour un dispositif électronique** p. 12-13
- **Packaging de module de puissance utilisant des substrats 3D en céramique** p. 14-15

©GRIMAULT-CEA



Simulation Hardware-in-the-Loop de convertisseurs CC-CC haute fréquence destinés aux applications de recharge embarquée automobile

La simulation temps réel s'impose pour valider les systèmes d'électronique de puissance des véhicules électrifiés. En effet, en reproduisant le comportement des composants, elle permet de tester les commandes embarquées avant l'intégration matérielle, réduisant ainsi les risques, les coûts et les délais. CEA Tech en région et Schaeffler France ont ainsi développé une plateforme Hardware-in-the-Loop dédiée aux convertisseurs résonnants haute fréquence.

Simulation en temps réel des convertisseurs résonnants à haute fréquence : défis et résultats

Nos travaux concernent le convertisseur CC-CC isolé utilisé dans les chargeurs embarqués. En électronique de puissance, la recherche vise à améliorer le rendement énergétique tout en réduisant les coûts. Le convertisseur résonnant CLLLC répond bien à ces enjeux et se prête particulièrement aux chargeurs de batterie pour véhicules électriques.

Sa simulation temps réel reste toutefois complexe, en raison des hautes fréquences de fonctionnement, de la commutation naturelle, ainsi que de la forte sensibilité aux erreurs d'échantillonnage liées à la discrétisation. Ce travail propose une approche fondée sur un solveur à matrices commutées avec gestion explicite des diodes, implémentée sur une cible FPGA à faible coût.

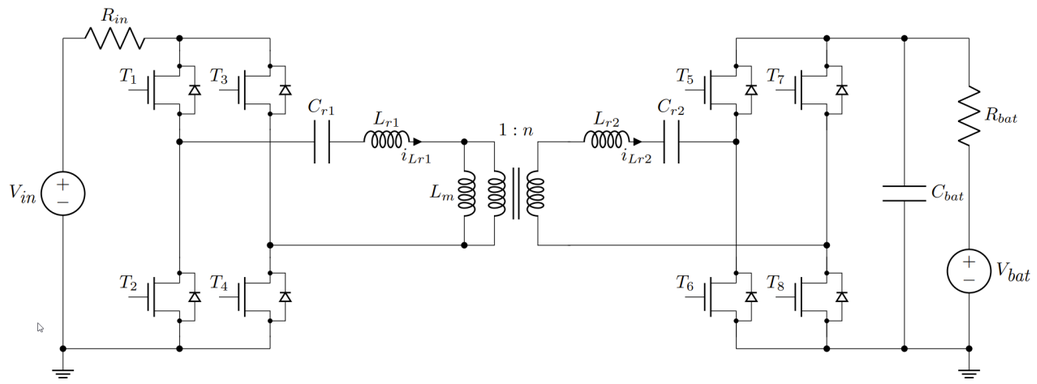
La plateforme obtenue atteint un pas de calcul de 25ns et des erreurs relatives inférieures à 2%, démontrant la faisabilité d'une simulation temps réel performante de convertisseurs résonnants haute fréquence sur FPGA économique.

Réaliser une simulation précise et fidèle des convertisseurs résonnants en temps réel

Pour garantir la fidélité requise, le solveur s'appuie sur des matrices commutées précalculées et discrétisées avec un pas de 25ns, assurant au moins 200 points par cycle, même aux fréquences les plus élevées.

Il est couplé à un solveur déterminant l'état des interrupteurs, se basant sur les commandes et le calcul des diodes. L'ensemble est implémenté sur un FPGA Zynq-7000 avec interfaces de reconfiguration, d'acquisition, entrées numériques et convertisseurs N/A pour l'interfaçage avec le contrôleur testé.

Les résultats expérimentaux montrent de faibles écarts avec la simulation hors ligne, y compris sur le courant résonnant Fig. 4, le gain autour de la fréquence de résonnance à 150 kHz Fig. 5 et l'état des diodes, ce qui confirme la fidélité du modèle temps réel développé.



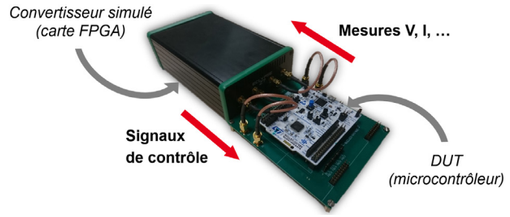
Convertisseur CLLLC résonnant

Hardware-In-the-Loop · **Simulation temps réel** · **Chargeur embarqué** · **Contrôle embarqué** · **Convertisseur CLLLC** · **FPGA**

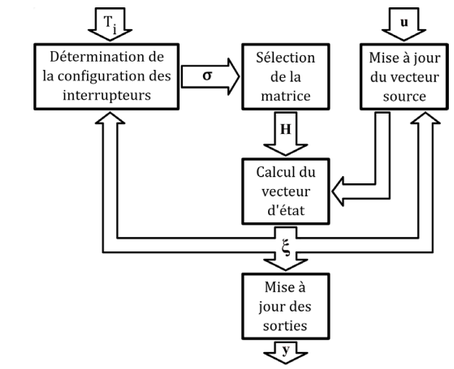
Téo Robert
Ingénieur Chercheur
CEA Occitanie



Partenariats
Schaeffler
IPCEI Microelectronics - France 2030 - Projet HillTops



Plateforme FPGA avec microcontrôleur et carte d'interface



Structure du solveur

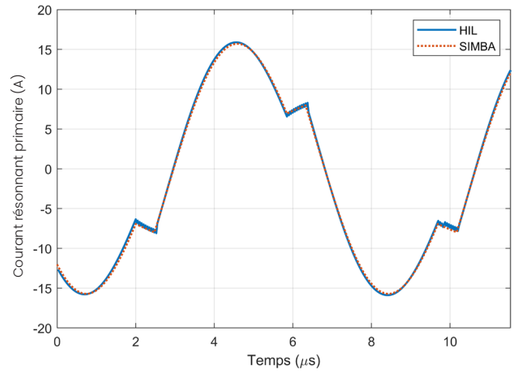


Fig. 4 *Formes d'onde du courant résonnant : HIL (bleu) vs simulation hors ligne (orange)*

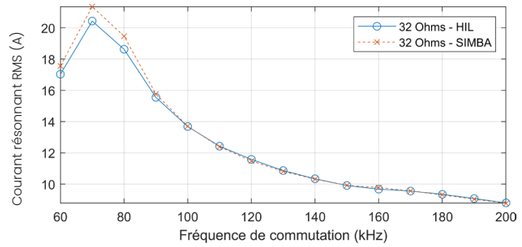


Fig. 5 *Courbe de gain du courant résonnant RMS : HIL (bleu) vs simulation hors ligne (orange)*

Perspectives

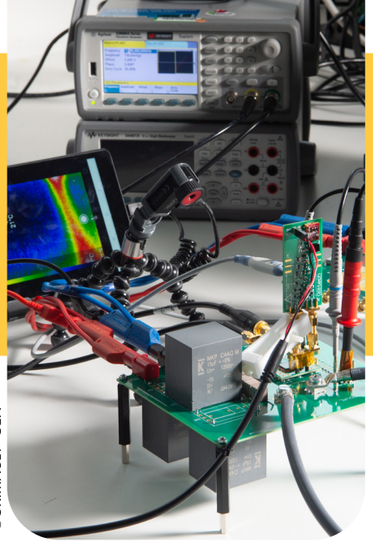
Tout en démontrant la faisabilité de la simulation en temps réel de convertisseurs résonnants à haute fréquence grâce à la mise en place d'une plateforme complète pour la validation « Hardware-in-the-Loop » des contrôleurs embarqués dans l'automobile, ces travaux mettent également en évidence certains défis.

Parmi ceux-ci, les erreurs d'échantillonnage des signaux de commande et la gestion des diodes, revêtent un intérêt particulier. Les travaux futurs pourraient se concentrer sur ces défis, en appliquant des méthodes de moyennage pour atténuer les erreurs d'échantillonnage des signaux de commande et les effets de battement, et pour mettre en œuvre des algorithmes avancés de gestion des diodes.

La plateforme de simulation pourrait également être étendue à l'étage PFC du chargeur embarqué afin de valider son contrôle ou d'évaluer l'impact des variations de la tension du bus CC sur la loi de commande CC-CC.

Pour en savoir plus

T. Robert, T. Ould-Bachir, V. Combet, M. Kenzi and R. Monthéard, «Accurate Real-Time Simulation of CLLLC Converters on FPGA: A Study of Sampling Resolution and Beating Effect», *IECON 2025 – 51st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Madrid, Spain, 2025, pp. 1-6, DOI: 10.1109/IECON58223.2025.11221460.



©GRIMAULT-CEA

Influence des surtensions de grille sur la résistance dynamique des HEMT GaN p-GaN

Les transistors GaN HEMT jouent un rôle crucial dans l'amélioration du rendement des convertisseurs de puissance. Leur comportement dynamique, complexe lors de commutations rapides, a fait l'objet d'études approfondies. Les recherches se sont concentrées sur l'impact des surtensions transitoires de grille sur la résistance dynamique Ron de transistors p-GaN commerciaux, ce qui a permis d'élaborer un modèle physique expliquant ces phénomènes.

Impact des surtensions de grille sur la résistance dynamique des HEMT GaN

Les transistors GaN HEMT offrent une très faible résistance (quelques mOhm) à l'état passant et des temps de commutation extrêmement rapides (quelques ns), ce qui améliore fortement les performances des convertisseurs de puissance. Toutefois, lors des commutations rapides, des surtensions transitoires peuvent apparaître sur la grille.

Des expériences réalisées sur plusieurs transistors commerciaux montrent que ces surtensions peuvent modifier fortement la résistance dynamique (Ron) du composant. Dans certains cas, une augmentation importante de Ron est observée, pouvant atteindre plusieurs dizaines d'ohms alors que la valeur nominale est inférieure de l'ordre de quelques mOhm.

L'étude révèle que ces variations ne correspondent pas à un mécanisme de dégradation permanent mais à un phénomène dynamique lié à la structure interne du transistor p-GaN. Selon la référence du composant et l'amplitude des surtensions de grille, différents comportements apparaissent : augmentation progressive de Ron, diminution de sa valeur stabilisée, ou évolution non monotone au cours des cycles de commutation.

Cette étude met donc en évidence l'influence déterminante des surtensions transitoires de grille sur le comportement dynamique des transistors GaN p-GaN.

Modélisation physique du phénomène par un modèle de grille à deux diodes

Pour expliquer ces observations, un modèle comportemental du stack de grille basé sur deux diodes représentant respectivement la jonction métal-p-GaN et la structure p-GaN/AlGaN/GaN a été développé.

Ce modèle permet de reproduire les évolutions expérimentales de Ron observées lors des commutations de l'ordre de la nanoseconde et pour une valeur de Vrc,th (Reverse Conduction THreshold) de 8V. Les simulations montrent qu'un mécanisme de conduction inverse dans la diode Schottky peut modifier le potentiel de la couche p-GaN et ainsi influencer la densité du gaz d'électrons bidimensionnel (2DEG), responsable de la conduction du transistor.

Cette approche permet d'expliquer les différents comportements observés expérimentalement et met en évidence l'importance des surtensions de grille dans le fonctionnement dynamique des transistors GaN.

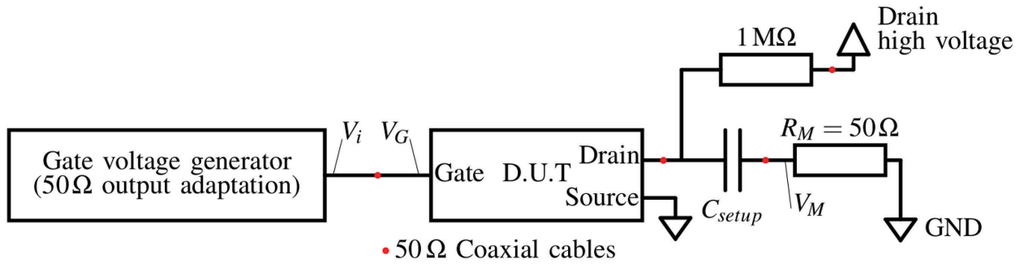


Schéma de principe du banc de test

Électronique de puissance | **Fiabilité des composants**

GaN HEMT | **p-GaN**

Ron dynamique | **Surtension de grille**

Emmanuel Marcault
Ingénieur Chercheur
CEA Occitanie



©DUMAS-CEA

Partenariats
CNRS, INPT Toulouse, Université Toulouse 3 Paul Sabatier (Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie : Laplace) – Université de Toulouse

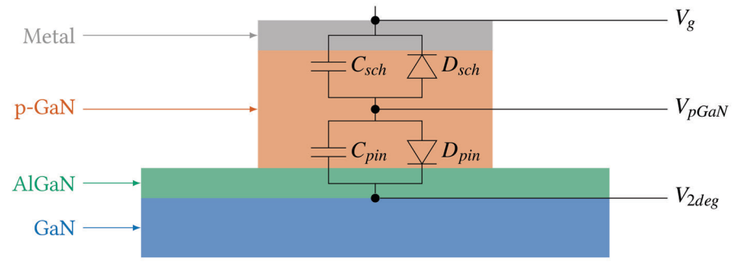
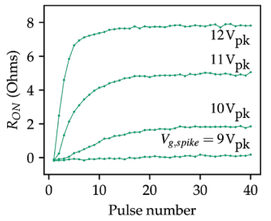
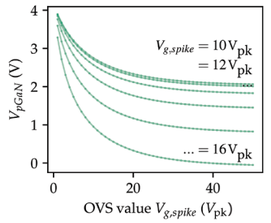


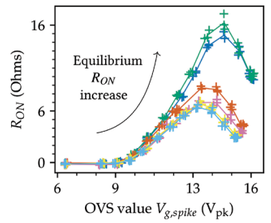
Schéma de principe du banc de test



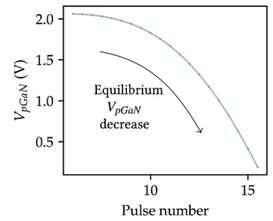
1. Réf. A, pour des pics de tension inférieurs à Vlim=13,5V



2. Modèle de l'évolution de VpGaN avec une diode PIN de Shockley



3. Réf. A, Ron à l'équilibre. (Un composant par couleur)



4. Modèle de l'évolution de VpGaN à l'équilibre

Comparaison entre le comportement expérimental de la réf. A (à gauche) et le comportement modélisé à l'aide d'une diode PIN exponentielle (à droite). Les évolutions de Ron et de VpGaN des figures 1 et 2 sont qualitativement similaires, avec une évolution de VpGaN vers une valeur de plateau stabilisée. Le plateau de Ron augmente lorsque l'amplitude des pics de tension augmente dans la figure 2 pour des pics inférieurs à 13,5V. Cela est cohérent avec la diminution de la valeur d'équilibre de VpGaN lorsque les pics de tension augmentent, comme montré figure 3.

Perspectives

Les travaux futurs viseront à affiner le modèle afin d'obtenir une correspondance quantitative avec les mesures expérimentales.

Des expériences complémentaires explorant d'autres durées de conduction et tensions drain-source permettront également d'évaluer plus précisément les mécanismes physiques impliqués et d'améliorer la robustesse des dispositifs GaN utilisés dans les convertisseurs de puissance.

Enfin, ces résultats suggèrent que les critères de sélection des composants devront intégrer leur sensibilité aux surtensions de grille dès les phases de conception des convertisseurs.

Pour en savoir plus

L. Roche, "Novel dynamic characterization method applied to modeling and understanding of power GaN HEMTs to enhance Statistic converter reliability", *doctoral dissertation manuscript*, 2026.

L. Roche, D. Trémouilles, E. Marcault and C. Alonso, «Experimental Investigation and Behavioral Modeling of the Ron vs. Gate Overshoots Relationship in Schottky p-GaN HEMTs», *2025 IEEE 12th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*, Fayetteville, AR, USA, 2025, pp. 1-6, DOI: 10.1109/WiPDA63755.2025.11303413.

L. Roche, D. Trémouilles, E. Marcault and C. Alonso, «The Decisive Role of Gate Voltage Overshoots on the Dynamic Ron of Schottky p-GaN HEMTs», TechRxiv Preprint, 2024, hal-04980326.

L. Roche, D. Trémouilles, E. Marcault and C. Alonso, «Study of GaN HEMTs Robustness to Application-Like, Software-Controlled Overshoots Emulating Different Gate Routings in Original 50 Ω Environment», in Proc. *IEEE 10th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*, Charlotte, NC, USA, 2023, pp. 1-6, DOI: 10.1109/WiPDA58524.2023.10382216.



©GRIMAULT-CEA

Caractérisation de la commutation du SiC MOSFET depuis la puce jusqu'au module de puissance

Les applications de l'électronique de puissance sont en plein essor et nécessitent des modules de puissance de plus en plus performants. Les interrupteurs SiC MOSFET sont prometteurs mais leur évaluation est complexe. CEA Tech en région développe des méthodes de test innovantes, adaptées aux contraintes sévères des essais, depuis la puce nue jusqu'au module de puissance final.

Défis de l'étude de la commutation du SiC MOSFET au niveau de la puce nue

Le module de puissance est un dispositif utilisé dans des secteurs tels que la mobilité électrique, l'énergie renouvelable et la gestion énergétique.

Actuellement, la parallélisation de transistors de puces nues SiC MOSFET apporte un gain considérable dans la performance des modules de puissance. Afin de poursuivre ce progrès, la compréhension fine du comportement au niveau de la puce et de son impact sur la parallélisation devient essentielle pour la conception des futurs modules de puissance.

Cependant, la caractérisation de la commutation de la puce nue entraîne des défis, y compris des aspects tels que la vitesse de commutation, le niveau de tension, la densité de courant, la structure verticale avec connexions dans les deux faces, sa fragilité mécanique et la dépendance thermique de paramètres électriques.

Tous ces éléments ont motivé le développement d'un banc d'essai innovant des puces nues SiC MOSFET pour la caractérisation de la commutation à l'échelle des nanosecondes, dans des conditions nominales (800V, 90A, 150°C) et en limitant le di/dt avec une faible inductance parasite.

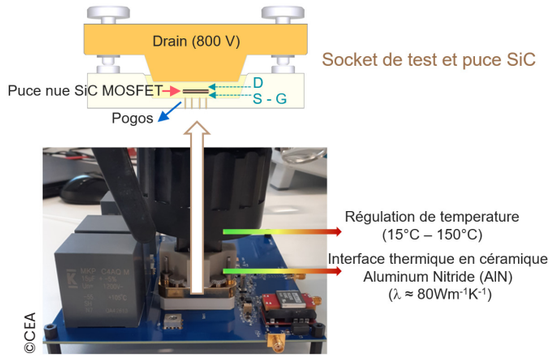
Surmonter les défis liés à la caractérisation de la commutation des puces nues SiC de puissance

Le banc d'essai est basé sur un socket de test développé en considérant les spécificités de la puce SiC MOSFET ainsi que la tension de claquage, la contrainte mécanique, la plage de température et la limitation des surtensions.

Par ailleurs, ce banc d'essai a pour avantage l'intégration à posteriori des puces mesurées dans des modules de puissance afin d'évaluer leur comportement thermoélectrique dans le module.

En outre, les paramètres de la commutation issus de la caractérisation électrique pourront contribuer à la conception de nouvelles générations de modules de puissance. Les essais sont de type double-pulse et ils sont réalisés jusqu'à 800V et 90A. En plus, une interface thermique en céramique AIN (80Wm-1K-1) permet de faire des mesures dans une plage de 15°C à 150°C.

Les résultats positionnent le travail en conformité aux plus récentes directives pour la caractérisation électrique de composants de puissance SiC MOSFET (par exemple Guideline JEDEC-JEP201).



©CEA

Banc d'essai base sur socket pour puce nue SiC MOSFET

Électronique de puissance
SiC MOSFET
Socket
Module de puissance
Grand Gap
Banc d'essai
Puce nue

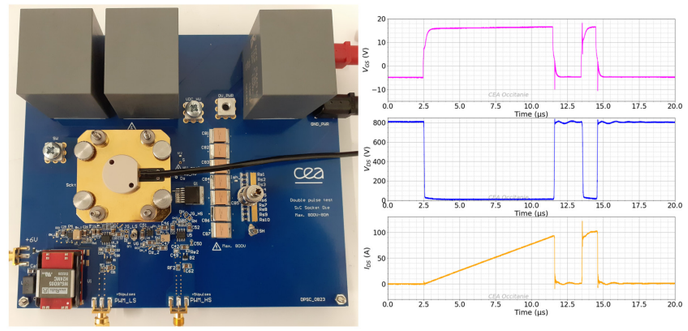
Alonso Gutierrez Galeano
Ingénieur Chercheur
CEA Occitanie



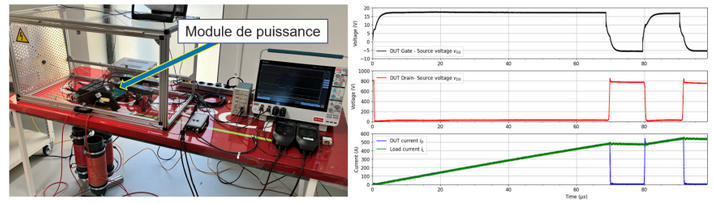
©DUMAS-CEA

Partenariat
IPCEI Microelectronics - France 2030 - Projet FastLane

Funded by the European Union
KEY DIGITAL TECHNOLOGIES JOINT UNDERTAKING



Carte d'essai double-pulse et test sur puce nue à 800V-90A-150°C



Banc d'essai double pulse pour test de modules de puissance à 800V-500A

Perspectives sur la caractérisation électrique et la contribution aux modules de puissance

La caractérisation de la commutation du SiC MOSFET au niveau de la puce nue peut contribuer à la conception des modules de puissance constitués de plusieurs puces nues en parallèle.
De plus, l'évaluation des performances électriques de différents fournisseurs de puces nues SiC MOSFET en cours de développement est facilitée par la solution présentée.

Ainsi, les résultats du travail de caractérisation, depuis la puce, visent à favoriser l'amélioration du module de puissance dans des conditions similaires à l'utilisation finale. Dans cette optique, CEA Tech en région travaille aussi sur la mise en œuvre des bancs d'essais pour l'étude du comportement des modules de puissance (par exemple banc d'essais double-pulse à 800V – 500A).

En effet, la meilleure compréhension depuis la puce, et sa corrélation avec le comportement du module de puissance, entraînent de potentiels axes d'amélioration de la performance du module. Les divers secteurs d'application de puissance demandant de plus en plus un rendement optimal de ce dispositif de puissance.

Pour en savoir plus

L. Zhang et al., «Low-Parasitic-Inductance Module with Interleaved Vertical PCB Layout for Dynamic Testing of SiC MOSFET Bare Die», in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 75, pp. 1-11, 2026, DOI: 10.1109/TIM.2026.3661695.

A. Gutierrez, A. Izoulet, M. Orsatelli, C. Chabot, E. Marcault, M. Gavelle, R. Gwoziecki, «Socket Based Test Bench for Dynamic Characterization of SiC MOSFET Bare Dice,» *PCIM Conference*, Nuremberg, 2025, DOI: 10.30420/566541319.

A. Gutierrez, M.N. Ngo, A. Izoulet, M. Gavelle, «Stray Inductance Evaluation of PCB Busbar for Double Pulse Test of SiC Power Modules,» *SGE 2025 - Symposium de Génie Électrique*, Toulouse, France, 2025, hal-05506893.

R. Takeda, Y. Watanabe and T. Arai, «Challenges of Bare Chip Dynamic Characterization,» in *Bodo's Power Systems, EEPower - Technical Articles*, 2024. https://eepower.com/technical-articles/challenges-of-bare-chip-dynamic-characterization/#.

Y. Park, S. Chakraborty and A. Khaligh, «Characterization of a Bare-Die SiC-Based, Wirebond-Less, Integrated Half-Bridge with Multi-Functional Bus-Bars,» in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 3, pp. 3946-3959, 2022, DOI: 10.1109/TTE.2022.3155737.



©DUMAS-CEA

Réalisation par impression 3D d'une chambre à vapeur en céramique pour un dispositif électronique

La bonne gestion thermique et la compatibilité électromagnétique sont cruciales pour le développement de modules de puissance à composants grand gap. Parmi les diverses voies explorées, les chambres à vapeur offrent un refroidissement efficace tout en réduisant leurs capacités parasites. CEA Tech en région, en collaboration avec le CEA-Leti et le CEA-Liten, a conçu une chambre optimisée thermiquement et électriquement.

La chambre à vapeur, un dispositif de refroidissement prometteur pour les composants Grand Gap

Dans le cadre du Carnot « Énergie du futur », une chambre à vapeur en céramique électriquement isolante a été développée pour répondre aux défis de la gestion thermique et de la compatibilité électromagnétique en électronique de puissance.

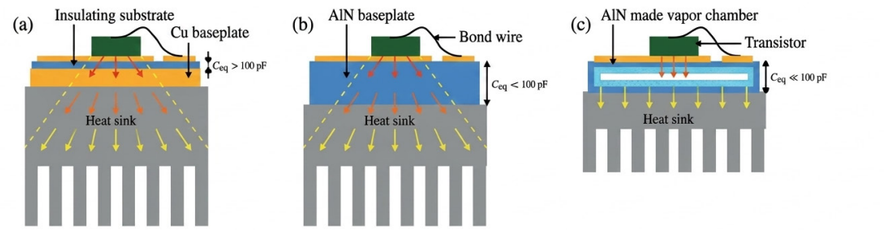
Le dispositif combine un corps en alumine dense et un cœur poreux jouant le rôle de mèche, assurant la circulation de l'eau par capillarité et ainsi le cycle diphasique de refroidissement. Sa fabrication repose sur l'impression 3D SLA-DLP pour la pièce dense et impression par jet de liant pour la pièces poreuse, suivies d'un déliantage à 650°C et d'un frittage à 1650°C. Les deux éléments sont ensuite assemblés par collage puis partiellement remplis d'eau.

La chambre à vapeur ainsi obtenue a été testée sur un banc de test du CEA-Liten, qui permet de soumettre le dispositif à un flux thermique, et de suivre l'évolution des températures du système pour en déduire la résistance thermique.

Des performances supérieures à celles des chambres à vapeur entièrement à base d'alumine

Le taux de remplissage optimal en eau de la chambre à vapeur est d'environ 37%, ce qui donne une résistance thermique de 0,84 $K \cdot W^{-1}$ et une capacité de 18,8pF à 107Hz, valeurs qui correspondent très bien aux résultats prévus par la simulation et valident donc les hypothèses retenues lors de la conception (CAO) des éléments.

Au final, la chambre à vapeur en céramique présente une résistance thermique et une capacité électrique supérieures à celles d'une plaque de base en AlN seule. Bien que ses performances thermiques restent inférieures à celles des chambres à vapeur métalliques - et à celles de certaines conceptions en céramique entièrement en SiC - elles surpassent les chambres à vapeur entièrement à base d'alumine et présentent un potentiel d'amélioration prometteur.



©CEA-Publication

Figure 1: (a) Conventional packaging for power electronics : a DBC plate. (b) To reduce the equivalent capacity, a solution to EMC is to increase the thickness of the ceramic baseplate. (c) Innovative solution : a ceramic vapor chamber with low thermal resistance and low equivalent capacity.

Schéma intégration dissipateur classique & chambre à vapeur

Électronique de puissance

Refroidissement des composants

Chambre à vapeur

Céramiques dense et poreuse

Céramique, Al_2O_3, AlN, SiC

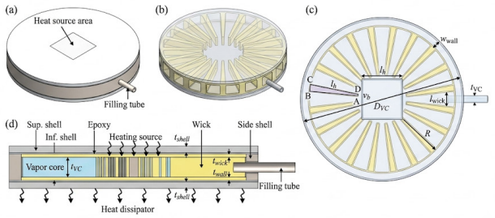
Fabrication additive

Lucile Mage
Ingénieure Chercheuse
CEA Occitanie



©DUMAS-CEA

Partenariats
CEA-Liten, CEA-Leti

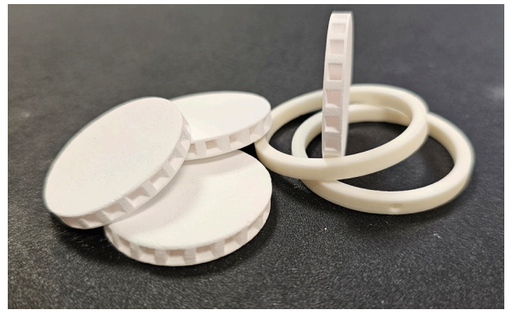


©CEA-Publication

Table 1: Range of tested values for different geometrical
Table 1: Range of tested values for different geometrical parameters of the wick.

Parameters	Min	Max
Vapor thickness, t_{vap} [mm]	1	4
Blades length, l_b [mm]	9	14
Blades width, w_b [mm]	0.4	0.6
Number of blades, n_b [-]	8	20

Schéma chambre à vapeur



©CEA-Saysense

Matériaux céramiques chambre à vapeur

Perspectives

L'étude montre que les chambres à vapeur en céramique constituent une solution viable pour la gestion thermique des composants grand gap et sont une alternative aux chambres à vapeur métalliques pour garantir la compatibilité électromagnétique, l'isolation électrique et la robustesse thermique des systèmes.

Les modèles numériques développés par le CEA-Liten suggèrent plusieurs pistes pour améliorer les performances comme :

- La maîtrise des couches d'interface du dispositif,
- Le remplacement de la céramique poreuse en Al_2O_3 par un matériau de meilleure conductivité thermique (AlN, SiC).
- La résistance thermique pourrait atteindre 0,142 K/W avec de l'AlN.

Cependant des développements sont nécessaires :

- Pour la voie AlN, optimiser le procédé d'impression 3D par jet de liant et traiter la surface de la céramique pour la rendre compatible avec l'eau,
- Pour la voie SiC, optimiser le procédé d'impression 3D par jet de liant des structures poreuses tout en garantissant leur tenue mécanique.

Pour en savoir plus

T. Camus, L. Mage, L. Sterna, M. Mariotto, B. Champel, «Design and characterization of an aluminum nitride vapor chamber for power electronics thermal management», *International journal of Heat and Mass Transfer*, 2026.

F. Pruvost, S. Guillemet-Fritsch, A. Mortagne-Coderch, Y. Thimont, R. Delsol, X. Clausse, and L. Presmanes, «Elaboration of complex aluminum nitride parts by binder jetting: Optimization of printing parameters and powder characteristics», *Materials Science in Additive Manufacturing*, 2025, DOI: 10.36922/MSAM025090008.



©GRIMAULT-CEA

Packaging de module de puissance utilisant des substrats 3D en céramique

L'impression 3D de céramiques (Al_2O_3, AlN) permet de répondre aux défis d'intégration des composants électroniques à grand gap. Cette approche réduit les éléments parasites et améliore la gestion thermique des modules de puissance. Un prototype fonctionnel a été réalisé, démontrant la qualité des diélectriques obtenus, la précision dimensionnelle du packaging et la fiabilité des interconnexions.

Le packaging céramique 3D pour l'intégration des composants à grand gap

Les composants de puissance à grand gap, tel que le GaN, s'imposent actuellement en conversion électrique. Mais leur intégration nécessite de réduire les éléments électriques parasites, tandis que la miniaturisation des circuits accroît la densité de puissance et ainsi les besoins en dissipation thermique par leurs excellentes propriétés thermiques et électriques, les céramiques Al_2O_3 et AlN apparaissent comme des matériaux de choix pour l'intégration et le refroidissement des modules de puissance.

Par ailleurs, leur mise en œuvre par impression 3D offre une grande liberté de conception permettant, grâce à des architectures innovantes de limiter les éléments parasites et d'améliorer la gestion thermique des modules. Afin de valider cette approche, un prototype fonctionnel a été réalisé par CEA Tech en région. Les résultats obtenus montrent une bonne qualité des diélectriques, une précision dimensionnelle satisfaisante et des interconnexions fiables, démontrant l'intérêt de cette stratégie de packaging avancé.

Des performances supérieures à celles chambres à vapeur entièrement à base d'alumine

Des substrats et radiateurs en alumine ont été fabriqués par impression 3D SLA-DLP, suivie d'un déliantage à 650°C et d'un frittage à 1650°C. Les céramiques obtenues atteignent une densité de 98% et présentent des propriétés électriques (ε_r = 9, rigidité diélectrique 24kV/mm) et thermiques (35W/m·K) comparables aux procédés classiques.

L'impression 3D permet une résolution jusqu'à 100µm, facilitant l'intégration de lignes d'interconnexion pour des puces GaN 100V/90A dans un demi-pont fonctionnel. Le module refroidi par aéraulique, maintient une température de 83°C pour 40W dissipés, démontrant une gestion thermique efficace. Cette approche de packaging 3D ouvre la voie à des densités de dissipation de 350 à 500W/cm², au-delà des 300W/cm² actuels en refroidissement liquide.



©CEA-Dumas

Fours déliantage frittage de la plateforme Matériaux

Substrats 3D fonctionnalisables

Packaging pour l'électronique

Composants grand gap

Céramique, Al_2O_3, AlN

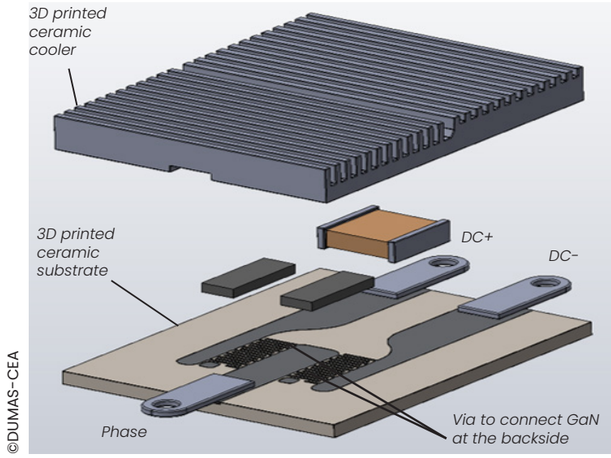
Fabrication additive

Régis Delsol
Ingénieur Chercheur
CEA Occitanie



©DUMAS-CEA

Partenariats
CEA-Leti
CNRS, INPT Toulouse, Université Toulouse 3 Paul Sabatier (Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie : Laplace) - CNRS (Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes : LAAS) - Icam Toulouse



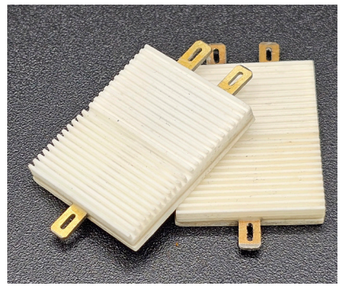
©DUMAS-CEA

Design 3D du module en céramique



©CEA-Sayerse

Substrat céramique métallisé



©CEA-Sayerse

Modules de puissance avec packaging céramique 3D

Conclusion et perspectives

Les thématiques présentées sont au cœur des enjeux de recherche adressés par la plateforme Matériaux de CEA Tech en région. Dans ce cadre, le packaging céramique 3D apparaît comme une brique technologique prometteuse pour l'intégration des composants à large bande interdite (GaN, SiC) et ultra large bande (diamant), en levant plusieurs verrous scientifiques et technologiques majeurs.

En effet, son architecture 3D innovante permet de concevoir des systèmes plus compacts et plus simples à assembler. L'utilisation des céramiques assure une gestion thermique optimisée, une isolation électrique performante ainsi que la préservation de l'intégrité des signaux électriques.

Les travaux à venir portent sur l'optimisation de diélectriques denses ou à porosité contrôlée , l'intégration de nouvelles fonctions électriques ou thermiques au plus près des composants de puissance, et la réalisation de démonstrateurs applicatifs.

Pour en savoir plus

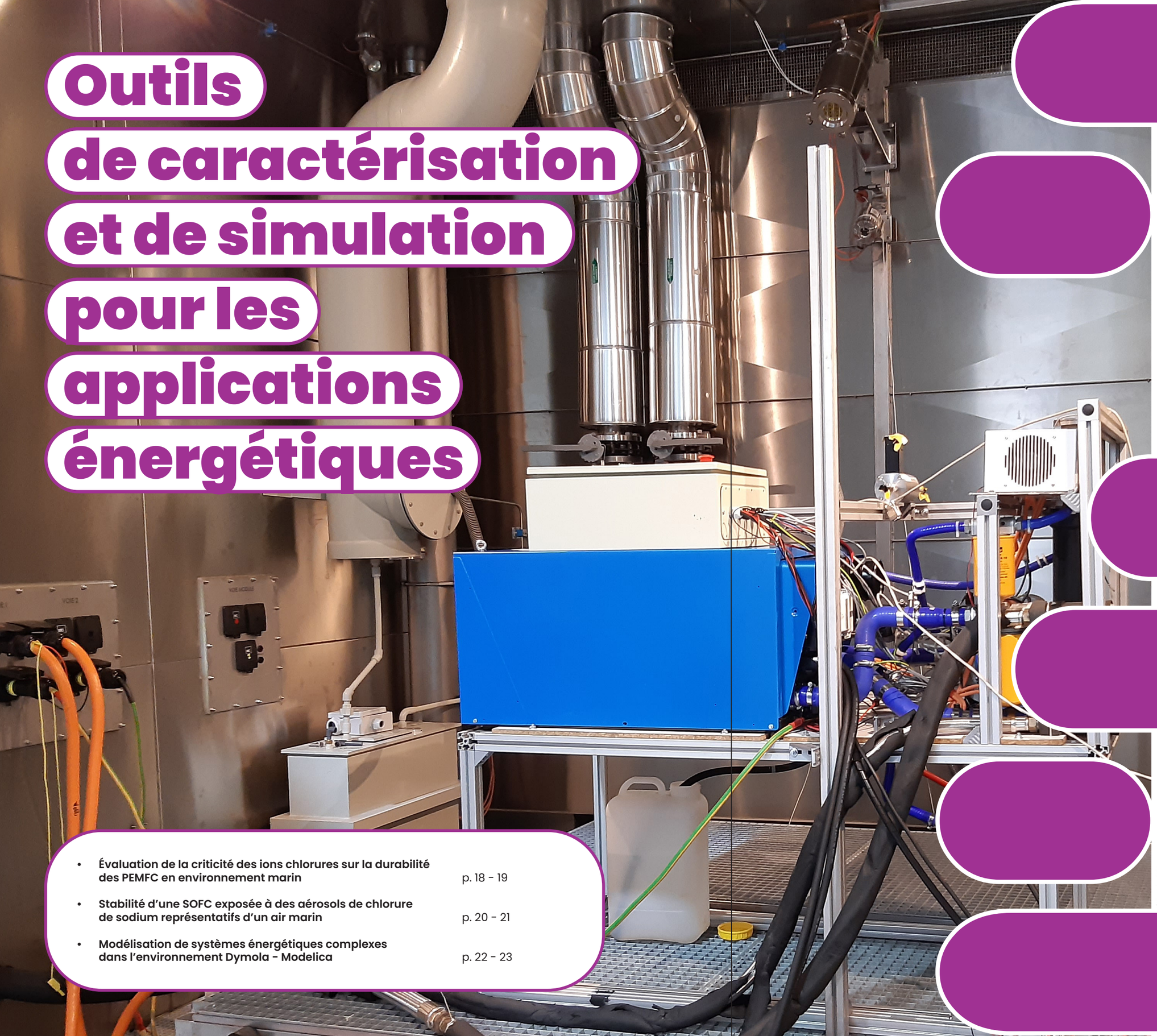
H. Luis, L. Mage, V. Bley, M-L. Locatelli, R. Delsol, Z. Valdez-Nava, «Comparison of dielectric and thermal properties of alumina substrates produced by additive manufacturing methods», *International conference on dielectrics Southampton*, UK, 2026.

E. Marcault, L. Teisserenc, M. Porlan, M. Beaujard, L. Mage and R. Delsol, «Power module packaging using 3D printed ceramics substrate», *2025 IEEE 12th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*, Fayetteville, AR, USA, 2025, pp. 1-5, DOI: 10.1109/WiPDA63755.2025.11303435.

H. Luis, L. Mage, M. Beaujard, V. Bley, M-L. Locatelli, et al.. «Comparaison des propriétés diélectriques de substrats d'alumine (Al_2O_3) obtenus par voies de fabrication additive et soustractive», *SGE- Symposium de Génie Électrique*, Toulouse, France, 2025, hal-05398201.

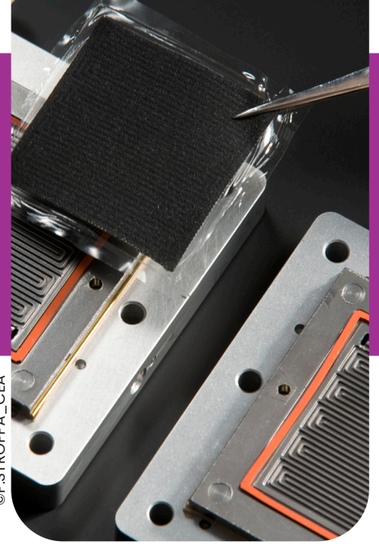
E. Marcault, C. Meuly, L. Mage, M. Beaujard, N. Seksik and R. Delsol, «Hybrid solution based on ceramic 3D printing for thermal management in power application», *2024 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Phoenix, AZ, USA, 2024, pp. 6614-6617, DOI: 10.1109/ECCE55643.2024.10861536.

Outils de caractérisation et de simulation pour les applications énergétiques



©BALLARD

- **Évaluation de la criticité des ions chlorures sur la durabilité des PEMFC en environnement marin** p. 18 - 19
- **Stabilité d'une SOFC exposée à des aérosols de chlorure de sodium représentatifs d'un air marin** p. 20 - 21
- **Modélisation de systèmes énergétiques complexes dans l'environnement Dymola - Modelica** p. 22 - 23



©P.STROPPA_CEA

Évaluation de la criticité des ions chlorures sur la durabilité des PEMFC en environnement marin

Bien que les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) soient plus matures que les autres types de piles à combustible, leur usage en environnement marin requiert des investigations spécifiques. Le CEA et le Laboratoire de Thermique et Énergie de Nantes (LTeN) étudient depuis 2020 les mécanismes de dégradation induits par une contamination cathodique au chlorure de sodium (NaCl), principal composant des aérosols marins.

Aucune dégradation irréversible critique liée aux chlorures en concentrations maritimes

Notre récente étude traite de l'impact de l'état physique du NaCl injecté sur la diffusion des chlorures dans le cœur de pile des PEMFC. La littérature révèle des disparités marquées en présence de chlorures : les pertes de performances varient de 0 à 90% pour des quantités cumulées allant de 0,1 à 1000mg/cm².

Nos travaux précédents (0,05 à 11mg/cm² de chlore) ont également montré des dégradations réversibles pour certains essais et irréversibles pour d'autres. Afin de déterminer si cette variabilité est liée à l'état physique du NaCl, nous avons comparé la concentration en chlore dans la couche catalytique de PEMFC contaminées par immersion (NaCl dissout) et par des particules solides. Les résultats indiquent que la diffusion des chlorures dans le cœur de pile est plus lente pour le NaCl cristallin que pour sa forme dissoute.

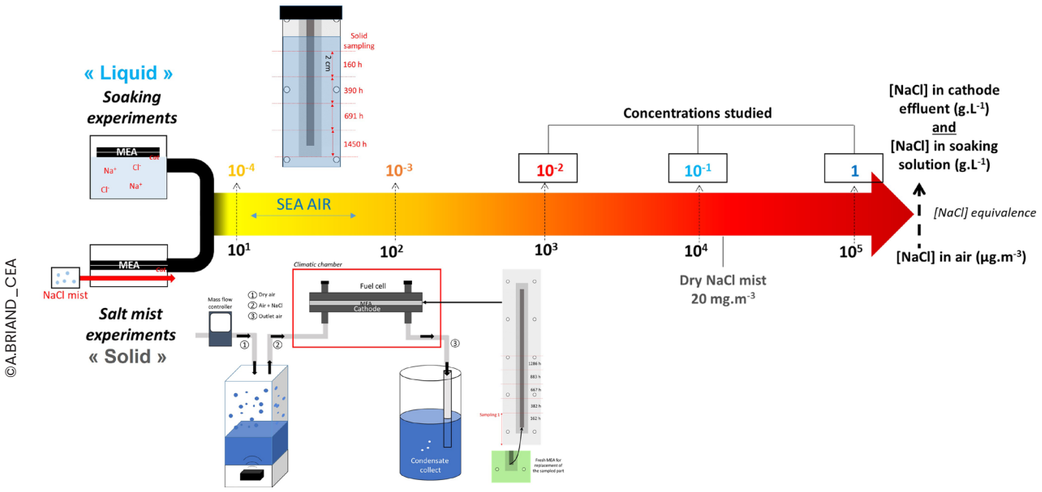
Néanmoins, quel que soit son état physique, le NaCl n'a pas causé de pertes de performance irréversibles majeures pour des concentrations typiques de l'air marin.

Influence de l'état physique du NaCl sur les pertes de performance irréversibles

Les analyses post-mortem montrent qu'il faut injecter 3 à 7 fois plus de particules solides que de particules liquides pour que du chlore soit détecté dans la couche catalytique. La couche de diffusion des gaz laisse pénétrer le NaCl dissout mais bloque une partie des cristaux solides.

Deux profils de dégradation ont également été identifiés dans la littérature, selon l'état physique du contaminant. En considérant un seuil de criticité de 10% de pertes irréversibles de performances, la quantité de chlorures nécessaire pour atteindre ce niveau est environ cent fois moindre en phase liquide (~1mg/cm²) qu'en phase solide (~100mg/cm²).

Ce seuil ne serait pas atteint pour une PEMFC équipée ou non d'un filtre à air après 80 000 h d'opération en mer, durée de vie ciblée pour cette application.



Description schématique de l'étude expérimentale

Pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC)

Applications maritimes

Hydrogène

Durabilité

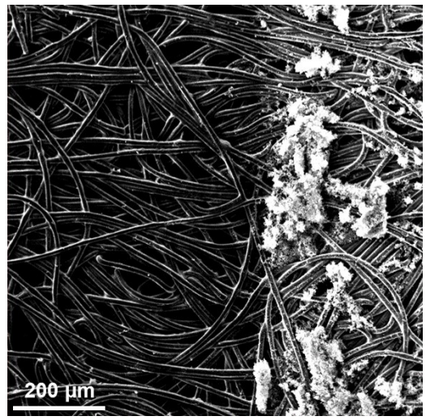
Diffusion

Ions chlorure

Marie Lamard
Ingénieure Chercheuse
CEA Pays de la Loire

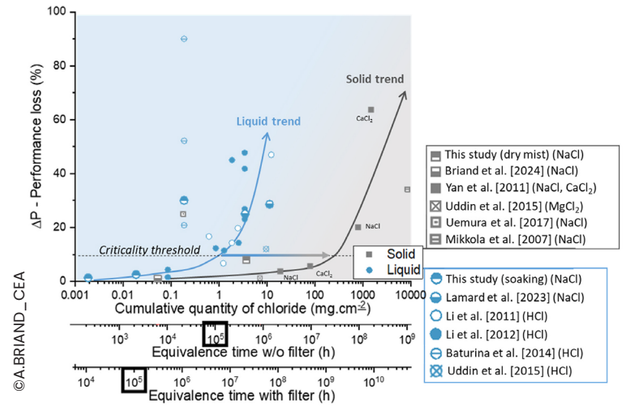


Partenariats
CEA-Liten
Nantes Université, CNRS, UMR 6607 (Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes : LTeN)



© A.BRIAND_CEA

Observation MEB de dépôts de NaCl sur une couche de diffusion des gaz



©A.BRIAND_CEA

Pertes de performance en fonction de la quantité cumulée de chlorures injectés

Perspectives

Des essais de vieillissement à l'échelle du système PEMFC permettraient d'évaluer la dégradation des composants auxiliaires tels que le compresseur ainsi que l'efficacité du filtre, tout en vérifiant si une hétérogénéité de contamination apparaît dans les stacks.

Ces tests d'un millier d'heures pourront révéler si les phénomènes réversibles, tels que l'accumulation de cristaux de NaCl dans les canaux de distribution de l'air, perturbent le fonctionnement des PEMFC à long terme. L'une des prochaines étapes consistera à définir des protocoles de vieillissement accéléré spécifiques aux applications maritimes. L'état physique des contaminants peut en effet varier selon les conditions environnementales et opérationnelles. Par exemple, lors des phases de démarrage/arrêt, la condensation due à la baisse de température peut faciliter leur transport vers le cœur de pile. De nouvelles contraintes (polluants gazeux, tangage, vibrations) pourront être ajoutées en vue de tests plus représentatifs.

Pour en savoir plus

A. Briand, B. Auvity, M. Lamard, S. Rosini, S. Henfling, "An attempt to assess the criticality of chlorides for PEMFC durability in a marine environment", *Journal of Power Sources*, vol. 644, 2025, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2025.237116.

A. Briand, S. Henfling, M. Lamard, C. Retière, N. Mariage, S. Rosini, B. Auvity, "Effects of sodium chloride on PEMFC durability at a concentration close to that of a marine environment", *Journal of the Electrochemical. Society*, vol. 171, n°10, 2024, DOI: 10.1149/1945-7111/ad81b7.

M. Lamard, B. Auvity, P. Buttin, S. Rosini, C. Retière, "Impact of NaCl spray on the durability of PEMFC single cells and stacks in marine environment", *Journal of the Electrochemical. Society*, vol. 170, n°2, 2023, DOI: 10.1149/1945-7111/acb8e0.



©A.AUBERT_CEA

Stabilité d'une SOFC exposée à des aérosols de chlorure de sodium représentatifs d'un air marin

Les piles à combustible à oxyde solide (SOFC) sont une alternative prometteuse pour réduire les émissions liées au transport maritime. Des travaux menés par CEA Tech en région, l'Institut des Matériaux de Nantes (IMN) et le CEA-Liten ont permis d'étudier la durabilité d'une SOFC alimentée par un air salin et humidifié, dont les effets doivent être considérés afin de préserver les performances et la durée de vie de cette technologie.

SOFC à cathode LSCF : une robustesse prometteuse face au chlorure de sodium

L'impact du chlorure de sodium (NaCl), principal composant des aérosols marins, sur les SOFC à cathode en LSCF (ferrite de lanthane strontium cobalt) est peu documenté, contrairement aux études menées sur les piles à combustible basse température.

Les quelques travaux antérieurs ont été réalisés avec de fortes concentrations en NaCl, non représentatives d'un air marin, et pour des durées d'exposition limitées. Afin de pallier ce manque d'études de durabilité, une cellule SOFC a été exposée alternativement à un air sec, humidifié et chargé en NaCl (jusqu'à 100µg/m³ soit le double des niveaux typiques) pendant 1120h. Aucune dégradation significative des performances n'a été observée, démontrant une stabilité du LSCF face au NaCl et à l'humidité, pour un fonctionnement à 750°C et une densité de courant de 0,5A/cm².

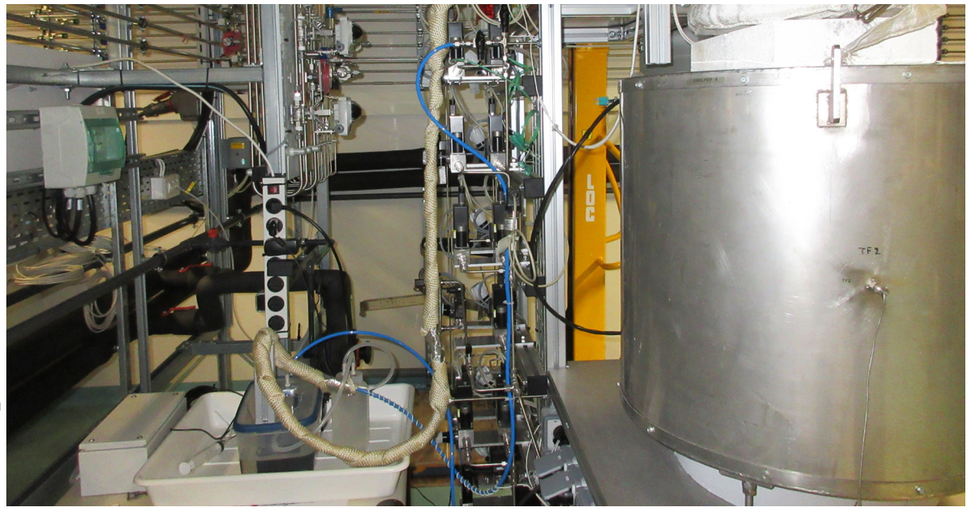
Ces résultats inédits par leur durée et leur proximité à un air marin réel ouvrent des perspectives prometteuses pour le déploiement des SOFC en environnement marin.

Une stabilité électrochimique malgré de premiers signes de ségrégation du strontium (Sr)

Le taux de dégradation observé est comparable à ceux rencontrés dans la littérature pour des SOFC non polluées. Ce résultat est valable pour les phases sous air sec, humidifié et chargé en NaCl.

Les spectres d'impédance électrochimique ont permis d'attribuer la faible perte de tension à une augmentation de la résistance de transfert de charge à l'anode, sans lien avec les polluants injectés à la cathode. Les analyses post-mortem ont néanmoins mis en évidence une ségrégation du Sr au centre de la cathode, suggérant un stade précoce de dégradation probablement lié à l'injection d'air humide, sans impact sur les performances en 1120h.

Une étude de réactivité sur un mélange LSCF-NaCl a conduit à un appauvrissement en Sr à 850°C, soulignant un risque accru de dégradation à plus haute température.



©S.HENFLING_CEA

Banc d'essai du CEA-Liten utilisé pour l'étude avec ajout du dispositif de pollution à gauche

Piles à combustible à oxyde solide (SOFC)

Chlorure de sodium (NaCl)

Dégradation

Ferrite de lanthane strontium cobalt (LSCF)

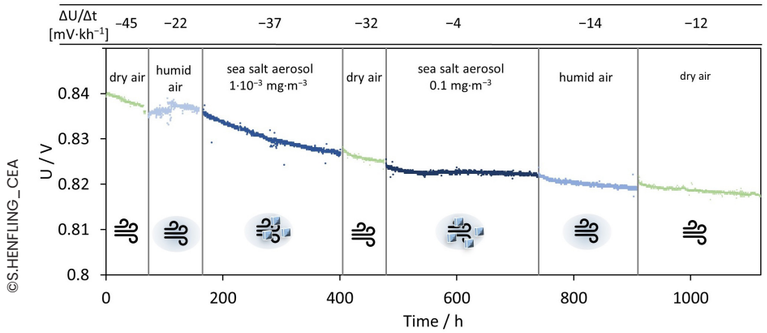
Environnement marin

Ségrégation du strontium

Marie Lamard
Ingénieure Chercheuse
CEA Pays de la Loire

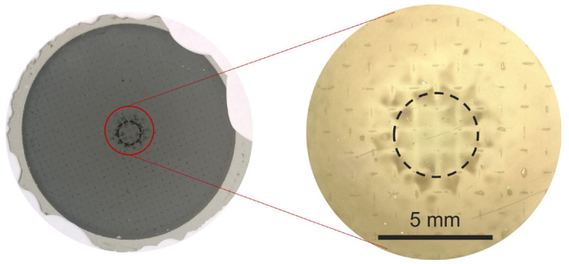


Partenariats
CEA-Liten
Nantes Université, CNRS, UMR 6502 (Institut des Matériaux de Nantes Jean Rouxel : IMN)



©S.HENFLING_CEA

Évolution de la tension de cellule en fonction du temps et de la composition de l'air



©S.HENFLING_CEA

Observations à l'œil nu et par microscopie de la cathode après l'essai de vieillissement de 1120h. Mise en évidence de traces noires au centre

Perspectives

Les résultats obtenus étant propres à la technologie, au dispositif expérimental et aux conditions opératoires appliquées lors de l'essai, leur réutilisation ou l'extrapolation à d'autres designs de cellules, matériaux de cathode, aux stacks ou encore aux systèmes SOFC intégrés en milieu marin nécessitera des tests approfondis.

Les travaux futurs pourront également porter sur l'impact d'une exposition au NaCl plus longue (> 2000h) et à différentes températures, en complément des études de réactivité entre le LSCF et le NaCl. La contamination du flux d'air cathodique par des aérosols marins plus complexes et des polluants gazeux permettra de mieux refléter les conditions maritimes réelles.

Enfin, comme pour les piles basse température, d'autres contraintes liées à l'environnement marin (tangage, vibrations, etc.) devront être appliquées aux cellules, stacks et systèmes SOFC en complément de la contamination de l'air, afin de se rapprocher davantage des conditions réelles.

Pour en savoir plus

S. Henfling, A. Briand, M. Lamard, A. Le Gal La Salle, O. Joubert, J. Manzi, B. Morel, "Electrochemical stability of a SOFC under marine-relevant sodium chloride aerosol exposure: Long-term testing and reactivity insights", *Journal of Power Sources*, vol. 671, 2026, DOI: 10.1016/j.jpowsour.2026.239463.



©CEA_NEWHEAT

Modélisation de systèmes énergétiques complexes dans l'environnement Dymola - Modelica

Qu'ils soient dédiés à la propulsion maritime, à la production de chaleur ou de molécules - H_2, CH_4, NH_3 - décarbonées, les systèmes énergétiques sont de plus en plus complexes à concevoir, à optimiser et à piloter. Le langage Modelica est spécifiquement dédié à la modélisation de systèmes multi-physiques. Il offre un cadre robuste pour décrire l'évolution de systèmes dynamiques à partir de modèles mathématiques basés sur des équations différentielles et algébriques.

Modelica : un langage acausal orienté objet dédié à la modélisation non linéaire de systèmes

Depuis 2021, la plateforme Seanergy de CEA Tech en Région utilise le langage Modelica dans l'environnement DYMOLA conjointement avec les laboratoires du CEA-Liten. Ces développements ont abouti à la CEA Energy Process Library (CEPL), un outil numérique permettant la modélisation de chaînes énergétiques dédiées au vecteur hydrogène.

La CEPL est exploitée dans le cadre de projets de recherche pour développer des jumeaux numériques de systèmes énergétiques, par exemple pour une production d'hydrogène via un électrolyseur SOEC [1] ou PEM [2]. Avec une approche Model in the Loop, ces jumeaux numériques sont capables de reproduire les caractéristiques opérationnelles du système réel, permettant une conception et une validation sûres et efficaces des stratégies de contrôle – commande ou d'un EMS (Energy Management System).

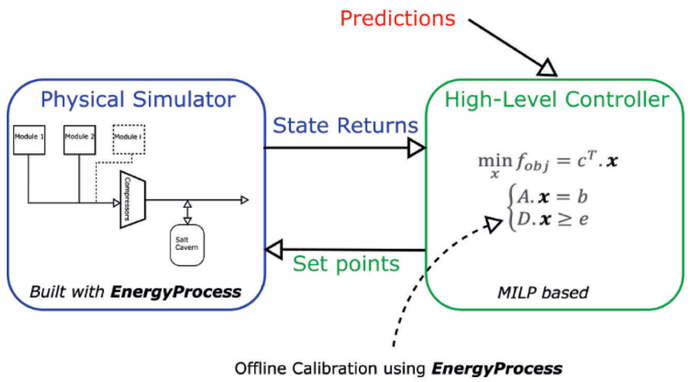
Notre expertise du langage Modelica a également permis d'accompagner en 2025 la PME NEWHEAT dans la mise en œuvre de la bibliothèque NewLib. Cet ensemble de modèles réalise la simulation thermique et hydraulique d'une centrale solaire thermique couplée à un stockage de chaleur, dédiée à la production de chaleur dans les industries et les territoires.

Des modèles non-linéaires dédiés à la simulation thermique et hydraulique d'une centrale solaire

Dans NewLib, des modèles de composants (capteur solaire, stockage de chaleur, échangeur, pompe, tuyauterie…) de différents niveaux de complexité ont été développés. Chacun est conçu pour répondre à des phases de projet distinctes : des simulations rapides pour les études de faisabilité en phase amont, et des simulations plus détaillées mais plus lentes pour la phase d'ingénierie.

Afin d'évaluer la précision des deux modèles, des comparaisons avec des données mesurées sur une centrale solaire en fonctionnement ont été réalisées. Les résultats montrent que les deux modèles présentent une grande précision thermique, avec des erreurs inférieures à 4% sur la production annuelle de chaleur.

Du point de vue hydraulique, le modèle détaillé fournit des résultats bien plus précis que le modèle simplifié, il engendre toutefois des temps de calcul très élevés en cas de configurations de champs solaires très complexes.



©CEA

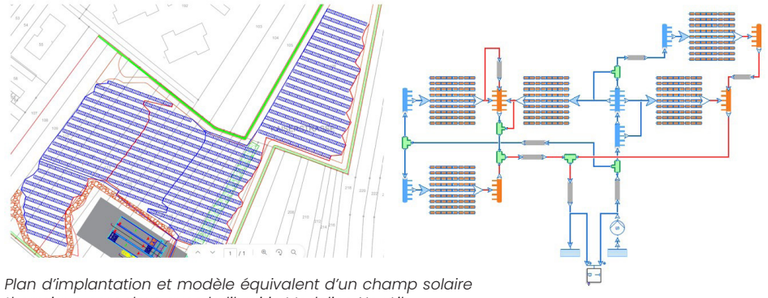
Utilisation de la librairie Modelica CEPL comme modèle physique détaillé et modèle simplifié pour la calibration hors ligne

Modelica | **Modélisation Dynamique** | **Hydrogène** | **EMS – Energy Management System** | **Centrale solaire** | **Jumeau Numérique**

François Nepveu
Ingénieur Chercheur
CEA Pays de la Loire

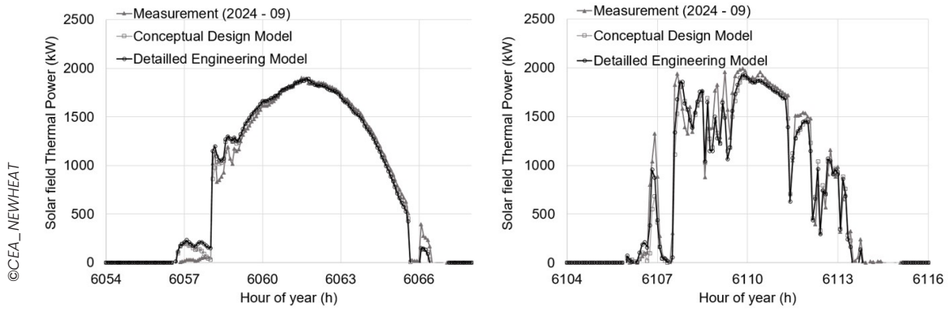


Partenariats
CEA-Liten
NEWHEAT



©CEA_NEWHEAT

Plan d'implantation et modèle équivalent d'un champ solaire thermique complexe avec la librairie Modelica NewLib



©CEA_NEWHEAT

Comparaison des résultats obtenus avec les deux modèles simplifié et détaillé en comparaison aux données expérimentales pour une journée ensoleillée et nuageuse

Vers des systèmes toujours plus complexes, du codéveloppement et de la cosimulation

Le langage Modelica dispose d'une communauté d'utilisateurs importante dans les instituts de recherche et le monde industriel (EDF, Naval Group, Atlantic…). Notre expertise permet de les accompagner sur des problématiques complexes, du développement de modèles mathématiques à la mise en place de plateformes de cosimulation Dymola/Simulink via des FMU (Functional Mock-Up Unit) sur des cibles temps réel (équipement X-MOD de Seanergy).

Dans le cadre du projet européen CALIPSO (14 pays, 32 partenaires, 25M€), dédié aux solutions innovantes de propulsion terrestres et navales pour les applications militaires, de nouveaux modèles de composants sont développés et intégrés à la CEPL. Ils permettront de réaliser des simulations dynamiques de différentes architectures énergétiques de systèmes dédiés à la propulsion maritime, basées sur l'utilisation d'une pile à combustible SOFC alimentée en ammoniac.

Le modèle SOFC sera construit et paramétré à partir de mesures expérimentales réalisées à l'échelle de la cellule et d'un « petit » stack par les équipes du CEA-Liten.

Pour en savoir plus

[1] A. Hego, F. Bosio, S. Mathonniere, "Model-based control design for a multi-stacks SOC systems", *16th Modelica & FMI Conference*, Lucerne, Switzerland, 2025, DOI: 10.3384/ecp218425.

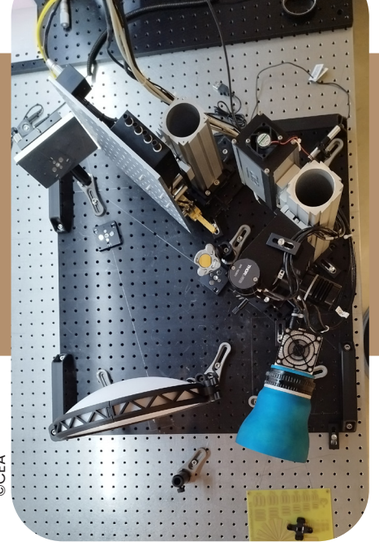
[2] I. Belot, F. Nepveu, P. Garcia, "Introducing the NewLib Library and its application to multi-level, large-scale solar field models", *16th Modelica & FMI Conference*, Lucerne, Switzerland, 2025, DOI: 10.3384/ecp218363.

[3] F. Nepveu, S. Mathonniere, N. Lamaison, G. Enee, "PreseValidation and application of the EnergyProcess Library", *15th Modelica & FMI Conference*, Aachen, Germany, 2023, DOI: 10.3384/ecp204311.

De nouvelles applications pour les technologies d'imagerie

- **Imagerie active sub-THz pour la détection à distance et l'identification de matières dangereuses** p. 26 - 27
- **Recyclage des textiles par imagerie hyperspectrale dans le proche et le court infrarouge** p. 28 - 29

©GODART_CEA



©CEA

Imagerie active sub-THz pour la détection à distance et l'identification de matières dangereuses

La détection rapide et en toute sécurité de menaces cachées représente un défi majeur. L'équipe PIMS de CEA Tech en région a développé une technologie d'imagerie active sub-térahertz capable de révéler des objets dissimulés et d'identifier des matières dangereuses via leurs signatures spectrales. Cette approche combine imagerie en temps réel et analyse multispectrale pour l'inspection de sécurité à distance.

L'imagerie sub-THz capable de révéler des objets cachés sous les vêtements en temps réel

Un système d'imagerie active fonctionnant en mode réflexion autour de 30GHz a été développé pour détecter des objets dissimulés. Il combine une source électronique sub-THz accordable, un système de balayage optique rapide du faisceau et une caméra temps réel à base de microbolomètres non refroidis.

Pour obtenir une illumination rapide et homogène de la scène, une stratégie de balayage dynamique basée sur des trajectoires de Lissajous a été mise en œuvre. Cette approche permet de couvrir le champ de vision en un temps très court, produisant une illumination uniforme tout en réduisant considérablement le temps d'acquisition par rapport au balayage point par point conventionnel : de l'ordre de quelques secondes, contre plusieurs minutes pour l'imagerie d'une surface de 10 × 10cm. Des tests expérimentaux ont démontré la capacité du système à détecter divers objets cachés, notamment des éléments métalliques et pulvérulents, même sous plusieurs couches de tissu.

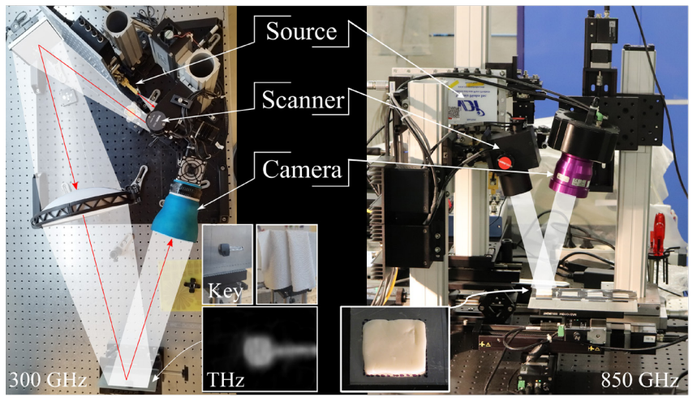
Cette solution a également été intégrée dans un système de sécurité multimodal développé dans le cadre du projet européen MELCHIOR.

L'imagerie multispectrale ouvre la voie à l'identification d'explosifs

Au-delà de la détection, le système est également en capacité d'identifier la nature des matériaux par imagerie multispectrale. Un second montage expérimental autour de 850GHz a été utilisé pour analyser la réflectivité spectrale d'un échantillon explosif, le RDX.

En mesurant le signal réfléchi à plusieurs fréquences sur une bande de 100GHz, une tendance spectrale claire a été observée. Sur un échantillon lissé, la réflectivité diminue jusqu'à 44% sur la gamme de fréquence considérée.

Ce comportement correspond aux données spectroscopiques de référence déjà validées et publiées dans la littérature et démontre que l'imagerie THz en réflexion peut révéler des signatures spectrales spécifiques aux matériaux. Cette capacité pourrait permettre, à l'avenir, de distinguer des objets inoffensifs de substances dangereuses.



Imagerie Multispectrale
Imagerie térahertz
Contrôle de sécurité
Sub-THz
Détection d'explosifs
Détection à distance

Maher Hamdi
Ingénieur Chercheur
CEA Nouvelle-Aquitaine



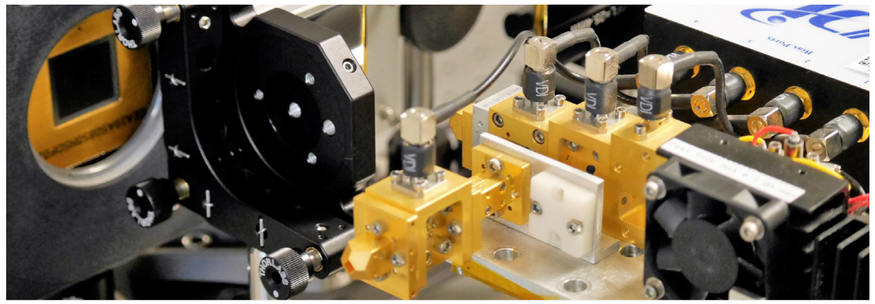
Simon Joly
Maître de Conférences
Université de Bordeaux
CEA



Partenariats
CEA-Leti, CEA site du Ripault
IMS, Université de Bordeaux, UMR CNRS 5218, Bordeaux INP (IMS : Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système)

EUROPEAN DEFENCE AGENCY

DGA DIRECTION GÉNÉRALE DE L'ARMEMENT





Perspectives

L'imagerie active sub-THz offre une approche prometteuse pour les systèmes de contrôle de sécurité de nouvelle génération. En combinant imagerie rapide et analyse spectrale, il devient possible non seulement de détecter des objets cachés, mais aussi d'identifier leur nature.

Cependant, de nombreux composés explosifs présentent leurs signatures spectrales les plus marquées à des fréquences THz plus élevées, entre 1 et 3THz. L'accès à cette gamme reste difficile avec les sources électroniques conventionnelles. Les recherches actuelles se concentrent donc sur de nouveaux réseaux d'antennes photoconductrices capables d'étendre la gamme spectrale accessible.

En parallèle, des améliorations de la puissance des sources et de la sensibilité des détecteurs sont à l'étude. Des méthodes d'intelligence artificielle sont également explorées pour analyser automatiquement les signatures spectrales et classer les matériaux, afin de permettre une identification fiable et en temps réel des menaces.

Pour en savoir plus

S. Joly, M. Hamdi, A. Cailly, «Active Sub-Terahertz Imaging for the Detection and Identification of Hazardous Materials,» 2025 IEEE Conference on *Antenna Measurements and Applications (CAMA)*, Antibes Juan-les-Pins, France, 2025, pp. 1-5, DOI: 10.1109/CAMA65664.2025.11335192.

H. E. Ouazzani, M. Hamdi, S. Joly and O. Redon, «Advancements in Sub-terahertz technology for detection and imaging in reflection mode,» 2024 *49th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, Perth, Australia, 2024, pp. 1-2, DOI: 10.1109/IRMMW-THz60956.2024.10697736.

S. Joly, M. Hamdi, A. Cailly, F. Sabary and O. Redon, «Towards THz spectro-imaging in reflection mode: addressing security challenges,» 2024 *49th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, Perth, Australia, 2024, pp. 1-2, DOI: 10.1109/IRMMW-THz60956.2024.10697553.

J.-B Perraud, A. Chopard, J.-P. Guillet, P. Gellie, A. Vuillot, P. Mounaix, P. «A Versatile Illumination System for Real-Time Terahertz Imaging», *Sensors*, n°20, 2020, DOI: 10.3390/s20143993.



©CEA_AUBERT

Recyclage des textiles par imagerie hyperspectrale dans le proche et le court infrarouge

Les déchets textiles constituent un problème environnemental croissant, et des méthodes précises de détection sont indispensables pour améliorer le recyclage. La plateforme PIMS de CEA Tech en région a évalué l'utilisation de l'imagerie hyperspectrale pour détecter les fibres textiles en scannant les échantillons à l'aide de caméras hyperspectrales dans deux gammes : le proche infrarouge et l'infrarouge à ondes courtes.

Méthode non destructive pour caractériser les textiles et les mélanges de fibres

Lors de ces travaux, CEA Tech en région a construit une base de données spectrale des tissus de cinq groupes (coton, viscose, polyamide, polyester et élasthanne) à l'aide de deux caméras hyperspectrales couvrant la plage entre de 900 à 2500nm.

Ensuite, 35 longueurs d'onde caractéristiques des matériaux ont été sélectionnées dans l'étude parmi les 284 disponibles afin d'améliorer la séparation entre les classes et réduire le temps de calcul (par ex. 1200 nm pour l'élasthanne, 1450nm pour le coton, 1660nm pour le polyester). Grâce à des modèles physiques, la proportion de chaque type de fibre dans l'image a été quantifiée, permettant ainsi de localiser et de classer les fibres (voir image coton-viscose).

Les résultats montrent plus de 95% d'identification correcte pour les textiles monomatière et une estimation des mélanges avec une erreur inférieure à 10%. Les cas les plus complexes concernent les textiles contenant du carbone noir ou des fibres d'élasthanne présentes dans les couches internes du textile.

Analyse spectrale dans le domaine infrarouge pour la classification des textiles

Après acquisition des images hyperspectrales, CEA Tech en région a identifié les signatures propres à chaque fibre et sélectionné les longueurs d'onde pertinentes en NIR (Near InfraRed) et SWIR (Short Wave InfraRed).

La similarité spectrale est ensuite calculée pour comparer chaque échantillon aux signatures de référence et classifier avec précision les textiles monofibres. Nos analyses montrent une séparation plus performante dans le domaine SWIR car le domaine 1700–2500nm apporte des informations supplémentaires sur la composition des matériaux.

En cas de mélange, un algorithme de démixage spectral (FCLS) estime l'abondance de chaque fibre. Malgré un nombre limité d'échantillons, la méthodologie développée assure à la fois l'identification fiable des matières et la vérification des compositions indiquées sur les étiquettes.

Imagerie hyperspectrale

Economie circulaire

Analyse spectrale

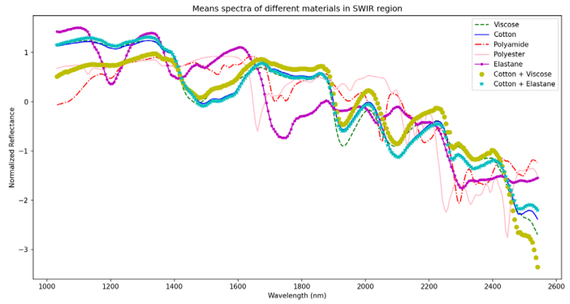
Recyclage des textiles

Imagerie infrarouge

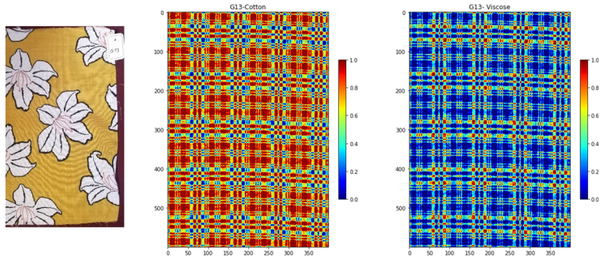
Ihab Makki
Ingénieur Chercheur
CEA Nouvelle-Aquitaine



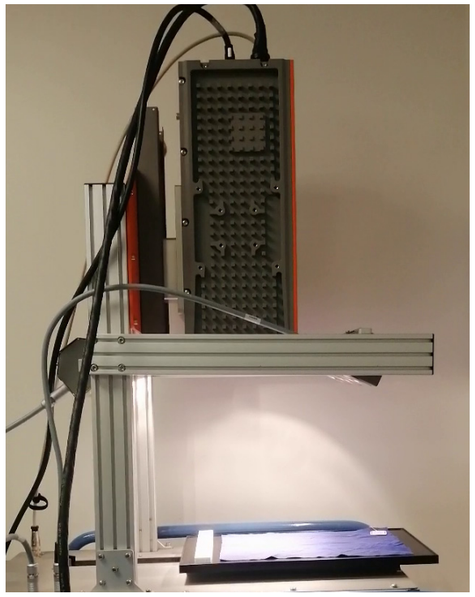
Partenariat
Refashion



Spectres normalisés SWIR



Détection des fibres coton viscose dans un mélange



Système d'acquisition

Perspectives

Cette étude démontre que l'imagerie hyperspectrale permet d'identifier les textiles et d'estimer les mélanges avec une précision compatible avec les exigences du recyclage industriel. Une sélection optimisée des bandes spectrales offre, en VNIR (Visible-Near InfraRed), un compromis pertinent entre performance et coût pour le tri automatisé.

Certaines limites subsistent : les textiles teints au noir de carbone, à faible réflectance, restent difficiles à détecter, et l'estimation des mélanges dépend de la structure du tissu ainsi que de la fibre dominante en surface, notamment lorsque l'élasthanne est masqué par le coton.

La levée de ces verrous et la réduction du temps de calcul, notamment grâce à un modèle d'intelligence artificielle dédié, constituent les prochaines étapes des travaux à mener dans le cadre du projet européen SORT4CIRC, dans lequel CEA Tech en région est partenaire.

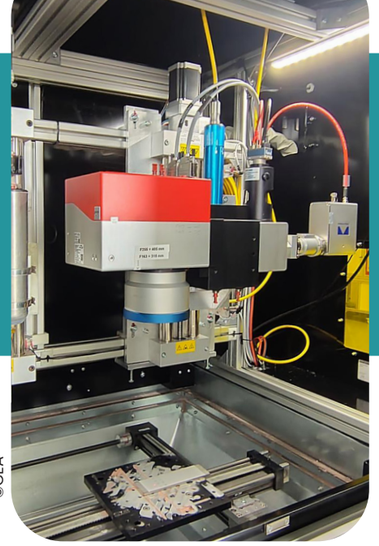
Pour en savoir plus

I. MAKKI, A. CAILLY, «Textile recycling using near and shortwave infrared hyperspectral imaging,» 2025 *15th Workshop on Hyperspectral Imaging and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)*, Barcelona, Spain, 2025, DOI: 10.1109/WHISPERS69515.2025.11501562.

Synthèse et caractérisations innovantes de matériaux

- **Synthèse combinatoire d'alliages AlNi par co-projection cold spray et post alliation laser** p. 32 - 33
- **Caractérisation expérimentale et numérique du comportement thermique du composite FR4** p. 34 - 35
- **Limite de détection ultra-basse du lithium par LIBS dans les couches atomiques LiF** p. 36 - 37

©GREENSANDBLUES-ENVATO-CEA DRT



©CEA

Synthèse combinatoire d'alliages AlNi par co-projection cold spray et post alliation laser

Dans un contexte d'accélération des transitions, les procédés de synthèse accélérée de matériaux sont des leviers essentiels pour réduire les cycles de R&D. CEA Tech en région développe une méthode hybride innovante, cold spray + alliation laser, pour produire rapidement des revêtements épais. Une avancée majeure pour la synthèse de matériaux sur mesure, avec des applications potentielles en réparation, additive manufacturing et protection contre l'usure.

Synthèse accélérée d'alliages Al-Ni : une rupture technologique par cold spray et laser

Les dépôts combinatoires sont principalement des revêtements de quelques micromètres réalisés en phase vapeur (CVD ou PVD). Ici, le procédé de cold spray permet d'obtenir des couches épaisses (50µm à 1mm). Les poudres métalliques sont projetées à haute vitesse (400–500m/s) tout en restant à une température inférieure à leur point de fusion, afin de conserver leurs propriétés. La co-projection de poudres d'aluminium et de nickel forme des composites denses aux compositions contrôlées (de 10Al-90Ni à 50Al-50Ni en % massique).

Un post-traitement laser (P=105–125W, v=20–40mm/s) induit une fusion localisée et une homogénéisation du dépôt, transformant le composite en alliage. 50 pastilles de 1cm² sont ainsi synthétisées en 32 minutes (cold spray : 5s + traitement laser : 8 à 66s).

Les caractérisations par SEM-EDS et DRX confirment l'obtention de 5 phases intermétalliques distinctes (Al_3Ni, $AlNi_3$, etc.), couvrant l'intégralité du diagramme de phase Al-Ni, sans résidus d'aluminium ni de nickel pur. Ces résultats surpassent les études antérieures, dont les épaisseurs alliées ne dépassaient pas 250µm et présentaient des hétérogénéités microstructurales.

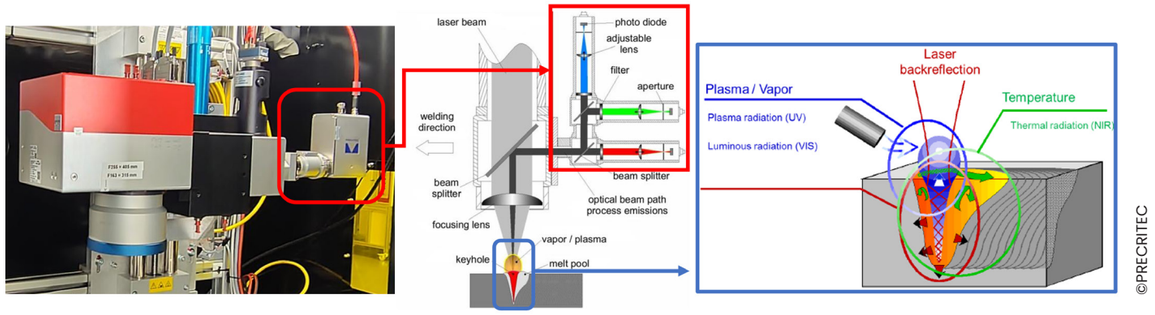
Contrôle de la composition et des propriétés : une avancée pour les revêtements fonctionnels

Cette méthode hybride permet de maîtriser la composition chimique avec une déviation moyenne de 5,2% massique par rapport aux cibles. Les analyses DRX révèlent la formation exclusive de phases Al_xNi_y (ex: Al_3Ni, $AlNi_3$), sans trace de phases résiduelles, confirmant l'efficacité de l'alliation in situ.

Les tests de micro- dureté Vickers montrent une variation de 381 à 832 HV en fonction de la composition :

- 832 HV pour les alliages riches en Al_3Ni_2 (50Al-50Ni).
- 381 HV pour les compositions 20Al-80Ni, moins renforcées par des précipités intermétalliques.

De plus, les paramètres laser influencent directement la morphologie et la taille des grains et la présence de défauts (fissures, porosités). Par exemple, une vitesse de balayage élevée (40mm/s) favorise des grains fins (~1µm), tandis qu'un double passage induit une croissance directionnelle.



©PRECRITEC

Intégration d'un système de monitoring de laser de soudure (Laser Welding Monitor)

Optimisation multiparamétrique | **Revêtements épais fonctionnels**

Cold spray | **Instrumentation**

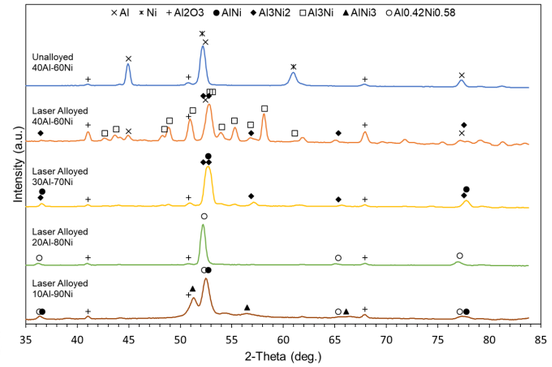
Laser | **Synthèse combinatoire**

Tanguy Lacondemine
Ingénieur Chercheur
CEA Grand Est

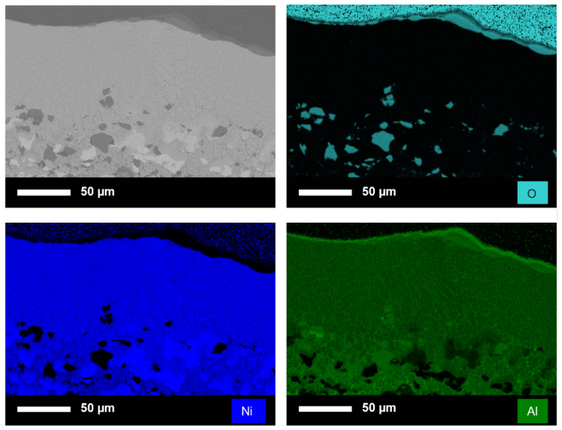


Partenariats
CEA isas
Université de Lorraine (Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique : LEM3 - Laboratoire Lorrain de Recherche en Informatique et ses Applications : LORIA) - INRIA Nancy - INSA Lyon

FRANCE 2030 PROGRAMME DE RECHERCHE MATÉRIAUX ÉMERGENTS



Spectres DRX et identification de différentes phases du diagramme AlNi



Observation MEB de microstructures obtenues pour une même composition 50Al-50Ni, avec différents paramètres laser

Coupe transversale MEB d'un dépôt de cold spray Al + Ni + Al2O2, avec zone traitée laser. Cartographie EDS des éléments Al, Ni et O.

Perspectives

Cette étude ouvre la voie à une optimisation multi-paramétrique du procédé, combinant instrumentation avancée (capteurs in situ pour le cold spray et le laser) et modélisation par IA.

Dans le cadre du PEPR DIADEM SIMOICS (ANR 24-PEXD-0014 auquel participe CEA Tech en région, les objectifs sont :

- Développer un modèle de substitution pour prédire les paramètres optimaux (vitesse de projection, puissance laser, etc.) en fonction des propriétés cibles (dureté, phases, épaisseur).
- Étudier les cinétiques d'alliation par DRX operando (collaboration avec l'INSTN), afin de comprendre les mécanismes de formation des intermétalliques et d'optimiser les cycles thermiques.
- Appliquer cette méthode pour la synthèse accélérée d'alliages plus complexes.

À terme, cette approche pourrait réduire les temps de développement de nouveaux matériaux, en combinant synthèse haut débit, caractérisations avancées et optimisation algorithmique.

Pour en savoir plus

T. Lacondemine, B. Puga, R. Kalmar, , M. Fendler, & F. Balbaud, "Combinatorial synthesis of AlNi alloys by low-pressure cold spray deposition and post-laser alloying process", 2024, DOI: 10.2139/ssrn.4964694.



©CEA

Caractérisation expérimentale et numérique du comportement thermique du composite FR4

Les cartes électroniques, au cœur de nombreux systèmes industriels, sont souvent soumises à des contraintes thermomécaniques importantes. Leur fiabilité dépend en grande partie d'un matériau clé : le FR4, un composite à base de fibres de verre et de résine époxy. Notre étude apporte un éclairage nouveau sur le comportement thermique du FR4 qui est très peu étudié dans l'état de l'art afin d'améliorer la conception et la durabilité des cartes électroniques.

Détermination des propriétés thermiques du FR4 par combinaison de méthodes expérimentales et numériques

Les études de fiabilité des circuits imprimés (PCB) sont de plus en plus souvent réalisées à l'aide de simulations numériques, ce qui nécessite une connaissance précise des propriétés thermiques des différents matériaux constitutifs de leur structure (surtout le FR4).

Cependant, les propriétés thermiques du FR4 sont très peu documentées dans la littérature, et encore moins en fonction de la température. Les rares données disponibles sont incomplètes et présentent souvent des incohérences. Dans ce travail, le comportement thermique orthotrope d'un stratifié FR4 a été entièrement caractérisé par une approche multi-échelle couplant méthodes expérimentales et numériques.

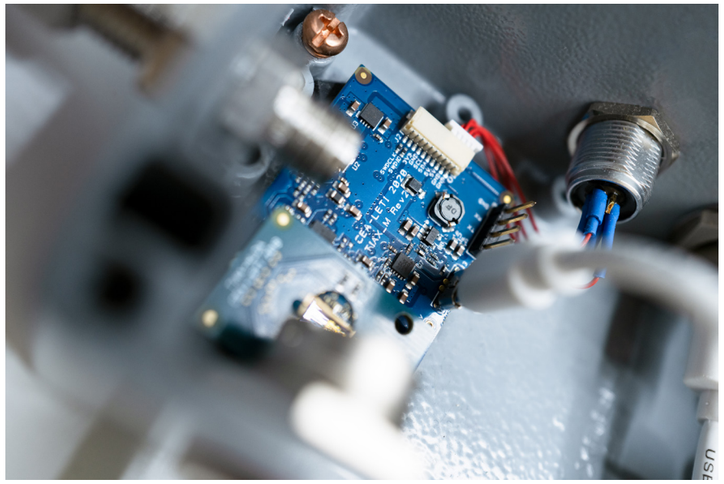
En intégrant les mesures DSC (Differential Scanning Calorimetry), dilatométriques et de flash laser à un schéma d'homogénéisation inverse basé sur la méthode MSG (Mechanics of Structure Genome) et un algorithme d'optimisation, nous avons identifié un ensemble complet de propriétés thermiques dépendant de la température incluant des paramètres dans le plan, généralement absents des fiches techniques commerciales et dans la littérature.

Caractérisation thermique du FR4

Les caractérisations expérimentales ont permis de déterminer la chaleur spécifique, la conductivité thermique et le coefficient de dilatation thermique dans la direction Z de l'épaisseur du FR4.

Afin de déterminer les propriétés manquantes non atteignables expérimentalement (dans le plan X et Y), la MSG, une méthode d'homogénéisation semi-analytique basée sur un génome de structure, a été utilisée. Un algorithme d'optimisation (Nelder-Mead globalisée) a été aussi implémenté afin de minimiser les écarts entre les valeurs expérimentales et numériques.

Les résultats montrent que la chaleur spécifique du FR4 augmente (de 760 à 1180J.kg^{-1}.K^{-1}) avec la température (entre 300 et 430K). Ses coefficients de dilatation thermique sont de 31,9 × 10^{-6} K^{-1} dans la direction X, 31,7 × 10^{-6} K^{-1} dans la direction Y et 35,8 × 10^{-6} K^{-1}dans la direction Z (à travers l'épaisseur). Les valeurs de conductivité thermique sont comprises entre 3,4 et 4,5 W.m^{-1}.K^{-1} dans le plan et entre 0,35 et 0,38 W.m^{-1}.K^{-1} dans la direction Z.



©CEA

Carte électronique

Caractérisation thermique | **Homogénéisation numérique**

PCB | **FR4**

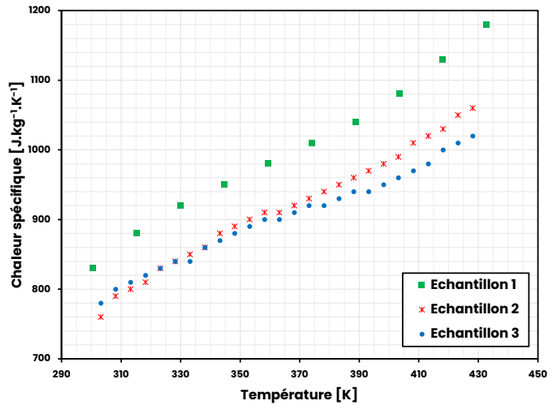
Composite tissé | **MSG**

Wiyao Kpobie
Ingénieur Chercheur
CEA Grand Est

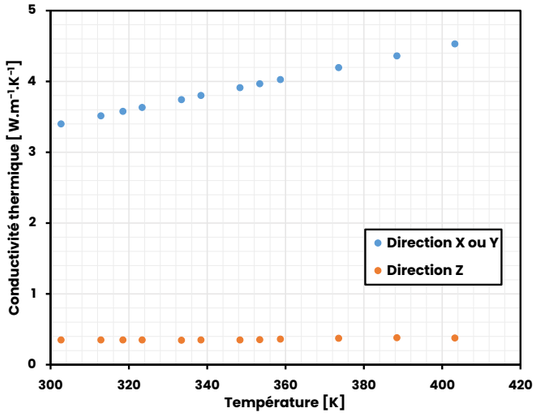


Partenariats
Université de Lorraine (Laboratoire d'Étude des Microstructures et de Mécanique : LEM3)
Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST)

Les résultats expérimentaux sont présentés sur les figures suivantes :



Chaleur spécifique du FR4 en fonction de la température



Conductivité thermique du FR4 dans la direction de l'épaisseur en fonction de la température

L'homogénéisation numérique permet de déterminer les propriétés suivantes

Direction X [10^{-6} K^{-1}]	Direction Y [10^{-6} K^{-1}]	Direction Z [10^{-6} K^{-1}]
31,9	31,7	35,8

Coefficients de dilatation thermique du FR4

Perspectives

Cette étude a démontré que le comportement thermique du FR4 présente une orthotropie significative, avec une conductivité thermique dans le plan environ dix fois supérieure à la valeur à travers l'épaisseur, principalement régie par l'architecture des fibres de verre tissées.

Les données quantitatives obtenues sont fondamentales pour les futures évaluations de la fiabilité thermomécanique des cartes de circuits imprimés (PCB).

En remplaçant les hypothèses isothermes et isotropes par les propriétés orthotropes et dépendantes de la température, la précision des simulations numériques peut être considérablement améliorée.

La prochaine étape de cette recherche consistera à utiliser ces propriétés pour prédire les dommages localisés aux interfaces fibre/matrice dans le FR4 et cuivre/FR4 à l'échelle du PCB lors des cycles thermiques, dans le but d'améliorer la durée de vie et la fiabilité des dispositifs électroniques complexes.

Pour en savoir plus

W. Kpobie, A. Atintoh, N. Bonfoh, M. Fendler, Y. Koutsawa, and F. Addiego, "Experimental and multiscale numerical characterization of the temperature-dependent thermal behavior of FR4 laminates," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 40, no. January, pp. 2559–2568, 2026, DOI: 10.1016/j.jmrt.2026.01.011.

A. Atintoh, W. Kpobie, N. Bonfoh, M. Fendler, F. Addiego, and P. Lipinski, "Multiscale characterization of the mechanical behavior of a printed circuit board (PCB)," *Mater. Today Commun.*, vol. 34, no. September 2022, p. 104968, 2023, DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.104968.



©ELSEVIER

Limite de détection ultra-basse du lithium par LIBS* dans les couches atomiques de LiF

**Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*

Comment quantifier et cartographier le lithium dans des couches atomiques avec une résolution spatiale de quelques dizaines de micromètres et en quelques secondes ? C'est l'avancée significative qu'a réalisée une équipe du CEA Tech en région avec l'ICMCB et l'ILM, en utilisant la spectroscopie d'émission du plasma induit par laser. Ils ont démontré une limite de détection du Li de quelques centaines de ppb pour un seul tir laser et à une cadence de 100 Hz.

Démonstration de la détection du Li dans une couche atomique de LiF par LIBS

En raison de la faible masse du lithium, sa détection rapide et résolue spatialement est un défi. La micro-spectroscopie d'émission du plasma induit par laser (micro-LIBS) est une des rares techniques qui remplit ces critères tout en étant un outil de table et peu couteux.

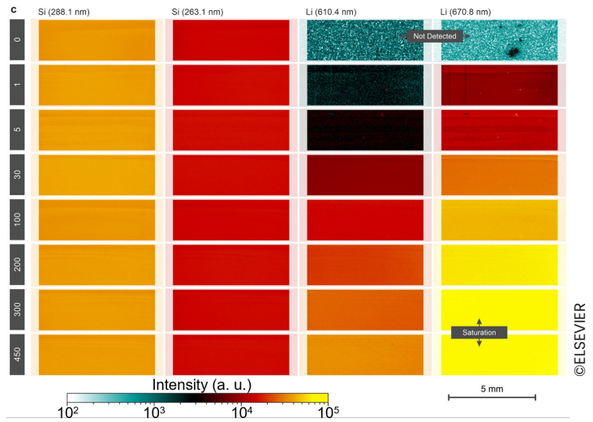
Pour évaluer ses performances, CEA Tech en région, en collaboration avec l'ILM et l'ICMCB, a développé une méthodologie qui repose sur la synthèse à l'échelle atomique de films de fluorure de lithium (LiF) par dépôt par couche atomique (ALD) et leur analyse spatiale et quantitative par micro-LIBS. D'une part, une distribution spatiale uniforme du Li sur 23 400 tirs laser a été confirmée et, d'autre part, il a été démontré que le Li dans une couche déposée avec un seul cycle ALD, correspondant à une couche atomique, était détecté avec un rapport signal sur bruit considérable.

Après une calibration, la limite de détection (LOD) du Li, pour un seul tir laser, a été estimée à 0,12-0,65fg pour une masse totale ablatée de 0,7ng, correspondant à une concentration de 170-930ppb. Il est important de noter que cette très faible LOD a été obtenue avec une vitesse de balayage de 100 tirs par seconde.

Développement d'une nouvelle méthodologie pour étudier la limite de détection

L'ALD permet la croissance d'un matériau couche par couche avec un excellent contrôle de l'uniformité du film à l'échelle atomique. CEA Tech en région a démontré une nouvelle synthèse de LiF non-rapportée dans la littérature. En plus de présenter un faible taux d'impuretés (<2%at), le film de LiF croît avec une vitesse contrôlée de 0,33Å par cycle ALD sur un wafer de silicium, ce qui représente moins d'une monocouche d'atomes à chaque cycle.

Grâce à une collaboration avec des experts en LIBS de l'ICMCB et de l'ILM, des cartographies par micro-LIBS ont été menées à 100Hz avec une taille de faisceau de 10µm et une distance de tir à tir de 35µm sur une série d'échantillons de LiF de plusieurs épaisseurs. Cette méthodologie, qui combine la synthèse à l'échelle atomique de LiF et un dispositif micro-LIBS hautement performant, a permis de quantifier et d'étudier la distribution spatiale du lithium dans ces films ultra-minces.



©ELSEVIER

Cartographies du Si I et Li I acquises avec 23 400 tirs LIBS en fonction du nombre de cycles ALD

Spectroscopie d'émission du plasma induit par laser

Dépôt par couche atomique

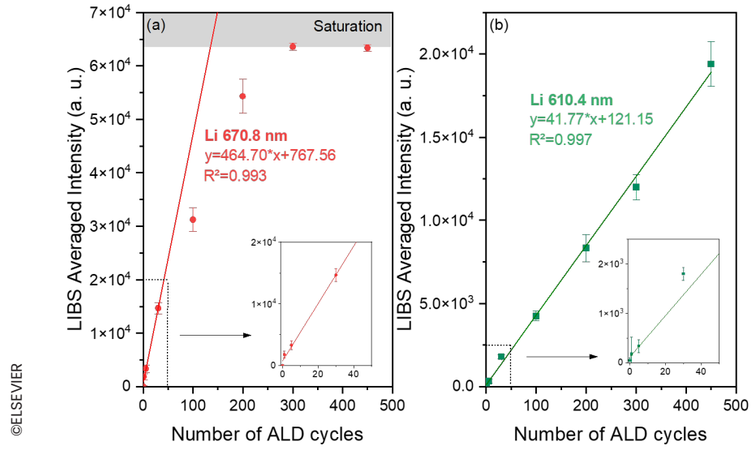
Fluorure de lithium

Limite de détection

Maxime Legallais
Ingénieur Chercheur
CEA Nouvelle-Aquitaine



Partenariats
CEA-Liten
CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1 (Institut Lumière Matière de Lyon : ILM) - CNRS, Université de Bordeaux, INP Bordeaux (Institut de Chimie de la Matière Condensée : ICMCB)



©ELSEVIER

Évolution de l'intensité LIBS en fonction du nombre de cycles ALD pour le Li I

Perspectives

L'ALD est une technique versatile qui permet le dépôt de nombreux matériaux. Par conséquent, cette méthodologie peut être appliquée pour d'autres éléments pour évaluer leur limite de détection par LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy). De plus, CEA Tech en région a récemment acquis un équipement de micro-LIBS intégré dans une boite à gants sous argon, compatible avec des échantillons de grandes dimensions (100mm de diamètre).

Cela permettra d'analyser des échantillons sensibles à l'air, comme les matériaux pour batterie. De plus, cet équipement a été spécifié dans une logique de criblage matériaux permettant de réaliser des cartographies chimiques sur des films déposés par synthèse combinatoire.

Pour en savoir plus

M. Audren-Paul, F. Le Cras, V. Motto-Ros, A. Cherrier, G. Yildirim, B. Bousquet, M. Legallais, "Towards ultra-low detection limits of lithium by LIBS in LiF atomic layers", *Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc. 238,* 2026, DOI: 10.1016/j.sab.2026.107467.

M. Audren-Paul, Y. Tison, H. Martinez, D. Peralta, G. Yildirim, F. Le Cras, M. Legallais, "Stability of LiF Deposited by ALD on High-Voltage Spinel/Polyimide Composite Electrodes", *ACS Appl. Energy Mater. 8, 3392−3403*, 2025, DOI: 10.1021/acsaem.4c02930.

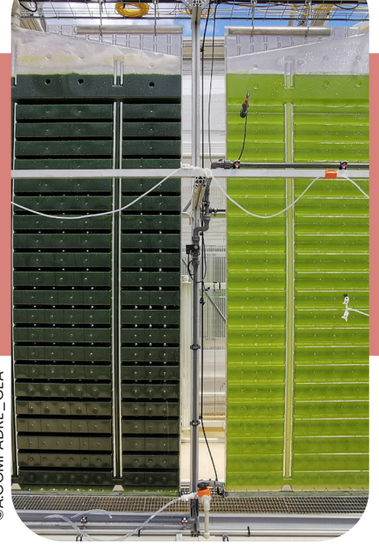
W. Berthou, M. Legallais, S. Sorieul, G. Yildirim, B. Bousquet, V. Motto-Ros, F. Le Cras, "High-Throughput Experimentation Unveils Composition – Structure – Conductivity Relationships in the Extended LiPON System", *Adv. Energy Mater.,* pp. 1–18, 2024, DOI: 10.1002/aenm.202400656.

W. Berthou, M. Legallais, B. Bousquet, V. Motto-Ros, F. Le Cras, "Characterization of lithium phosphorus oxide thin film libraries by laser-induced breakdown spectroscopy imaging: A step towards high-throughput quantitative analyses", Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc. 215, 2024, DOI: 10.1016/j.sab.2024.106906.

Biotechnologies innovantes

- **Conversion du CO_2 en bioplastique par la microalgue** *Chlorella vulgaris* p. 40 - 41
- **Un nouveau modèle mathématique pour simuler et optimiser la production de lipides dans les cultures de microalgues** p. 42 - 43

©GODART_CEA



©A.COMPADRE_CEA

Conversion du CO_2 en bioplastique par la microalgue *Chlorella vulgaris*

L'amidon thermoplastique (TPS, pour ThermoPlastic Starch) est un plastique biodégradable utilisé notamment dans la formulation d'emballages pour sa souplesse et sa capacité de déformation. Il est actuellement fabriqué à partir de ressources alimentaires (maïs, riz, blé, pois, manioc, etc.). Pour leur capacité à croître avec de fortes productivités sur des surfaces non arables, les microalgues représentent une source d'amidon alternative prometteuse.

Chlorella vulgaris comme vecteur de conversion de l'énergie solaire et du CO_2 en amidon

Les microalgues sont des organismes unicellulaires capables d'adapter rapidement leur métabolisme aux conditions environnementales, ce qui leur confère la possibilité d'obtenir à la fois des fortes productivités surfaciques et de fortes teneurs en amidon sous lumière naturelle.
Alors que les cultures photosynthétiques classiques telles que le maïs et le riz atteignent des productivités d'amidon maximales de 10t/ha/an, cette flexibilité métabolique permet d'atteindre des productivités surfaciques supérieures.

Avec *Chlorella vulgaris*, une espèce de microalgue verte communément utilisée comme complément alimentaire, une productivité 0,43g/L/jour en sucres totaux (principalement amidon) a été obtenue, qui, selon les hypothèses retenues pour l'extrapolation (150 jours de production par an, ressource solaire du sud de la France, etc.) mène à une productivité surfacique annuelle de plus de 20 t/ha/an.

Outre ce gain potentiel sur la productivité surfacique, les microalgues présentent l'avantage de ne pas mobiliser de terres arables pour la fabrication d'amidon thermoplastique.

Produire, extraire et transformer l'amidon de *Chlorella vulgaris* en bioplastique

CEA Tech en région a optimisé en pilote de 180L, la production d'amidon de *Chlorella vulgaris* sous lumière naturelle. Lors d'une culture à faible concentration (< 1gMS/L) durant trois jours de stress azoté, environ 3% de l'énergie solaire incidente (infrarouges compris) sont convertis en sucres, essentiellement sous forme d'amidon.

Pour fabriquer un bioplastique, les cellules sont ensuite lysées (i.e. décomposées) à haute pression afin de séparer les granules d'amidon, plus denses, des autres composés cellulaires (principalement protéines et lipides).

Après rinçage et séchage, les granules sont formulés en présence de glycérol (plastifiant) dans une extrudeuse bivis (120-140°C). Le TPS à base de microalgues (ThermoPlastic Starch : amidon thermoplastique) a été comparé lors d'essais de traction à un TPS commercial et à un TPS de référence à base de fécule de pomme de terre ; il est trouvé moins rigide avec une élongation à la rupture supérieure, sans doute un biais d'échelle du procédé de purification.

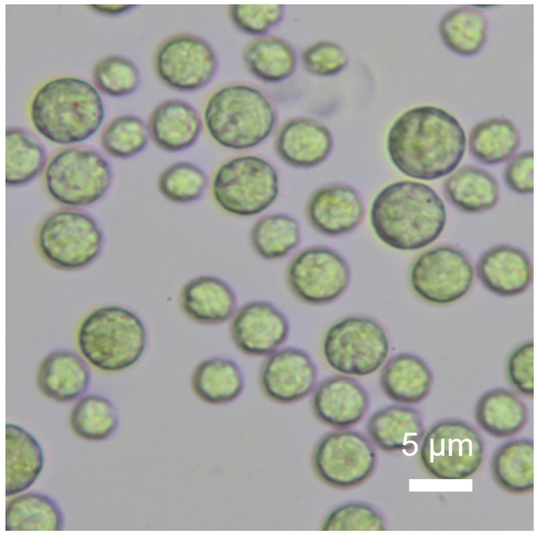
Amidon thermoplastique | **Dioxyde de carbone** | **Microalgues** | **Énergie solaire** | ***Chlorella vulgaris*** | **Bioplastique**

Gatien Fleury
Ingénieur Chercheur
CEA Région Sud



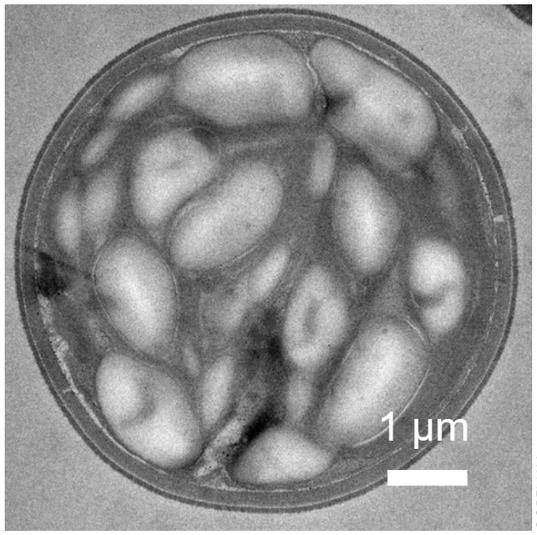
©A.PAJOT

Partenariats
CEA biam
Université Grenoble Alpes - CNRS, UPR 5301 (CERMAV) - Université de Lille, CNRS, UMR 8576 (Unité de Glycobiologie Structurale et Fonctionnelle : UGSF) - IMT Mines (AlèsPolymers Composites and Hybrids : PCH)



©CEA

Cellules de Chlorella



©CREMAV

Cellule Chlorella remplie d'amidon

Perspectives

Les caractérisations structurelles des granules d'amidon de *Chlorella vulgaris* font ressortir une structure proche de celle d'un amidon de céréale (type A avec une distance inter-lamellaire de 9,5nm pour l'amylopectine, part d'amylose de l'ordre de 10-15%) ayant toutefois un petit diamètre moyen (1,5µm).

Cette dernière propriété, qui permet une excellente dispersion, est originale par rapport aux sources d'amidon classiques. Ces propriétés en font un excellent candidat comme agent texturant dans les domaines de la cosmétique ou la nutraceutique.

Pour ces marchés, il est d'ailleurs envisageable d'utiliser des fermenteurs (hétérotrophie). Pour atteindre un marché de masse tel que celui des bioplastiques, des schémas de bioraffinerie et de co-valorisation des autres fractions (notamment protéiques et lipidiques) doivent encore être développés, comme c'est le cas pour les sources conventionnelles. Le marché de l'alimentation animale («feed») est la piste privilégiée.

Le transfert du procédé sur une souche marine, en utilisant des systèmes de culture ouverts est une voie prometteuse pour diminuer son impact environnemental et ses coûts de production.

Pour en savoir plus

A. Six, P. Chambonnière, P. Alvarez, S. Fon-Sing, C. Lancelon-Pin, J.-L. Putaux, J.-F. Sassi, Y. Li-Beisson, G. Fleury, "Microalgae, sunlight, and starch: low cell concentration is optimal for outdoor production under nutrient stress", Bioresource Technology, vol. 443, 2026, DOI: 10.1016/j.biortech.2025.133840.

A. Six, D. Dauvillée, C. Lancelon-Pin, A. Dimitriades-Lemaire, A. Compadre, C. Dubreuil, P. Alvarez, J.-F. Sassi, Y. Li-Beisson, J.-L. Putaux, N. Le Moigne, G. Fleury, "From raw microalgae to bioplastics: Conversion of *Chlorella vulgaris* starch granules into thermoplastic starch", Carbohydrate Polymers, vol. 342, 2024, DOI: 10.1016/j.carbpol.2024.122342.

A. Six, A. Dimitriades-Lemaire, C. Lancelon-Pin, J.-L. Putaux, D. Dauvillée, D. Petroutsos, P. Alvarez Diaz, J.-F. Sassi, Y. Li-Beisson, G. Fleury, "Red light induces starch accumulation in *Chlorella vulgaris* without affecting photosynthesis efficiency, unlike abiotic stress", Algal Research, vol. 80, 2024, DOI: 10.1016/j.algal.2024.103515.



©GODART_CEA

Un nouveau modèle mathématique pour simuler et optimiser la production de lipides dans les cultures de microalgues

Les lipides de microalgues offrent un potentiel immense pour les biocarburants et la nutrition. Pour exploiter ce potentiel, il est crucial de bien modéliser leur production. Une modélisation précise aide à anticiper les besoins en nutriments, lumière et conditions environnementales, tout en minimisant les coûts. Cette approche est essentielle pour une production durable et économiquement viable.

Un nouveau modèle complet et calibré

L'accumulation de lipides chez les microalgues est induite par des stress (par exemple, une carence en azote) qui compromettent l'activité photosynthétique, entraînant une productivité en biomasse nettement inférieure à celle observée en conditions de forte concentration en nutriments.

Si la croissance photosynthétique des algues a été bien caractérisée et modélisée en conditions de forte concentration en nutriments, la perte d'activité photosynthétique lors d'une carence en azote n'a pas encore fait l'objet d'études spécifiques permettant de développer une paramétrisation et une modélisation adéquates pour la simulation du procédé de culture des microalgues.

Un modèle prédictif de la croissance et de la composition cellulaire a été développé et spécifiquement calibré pour *Chlorella vulgaris* NIES227, une souche connue pour son importante accumulation lipidique, marquant ainsi une première dans le domaine.

Le modèle proposé comprend trois blocs (photosynthèse, répartition du carbone et division cellulaire) qui permettent l'estimation de la croissance des microalgues et la modélisation de leur composition en lipides, glucides et protéines.

Un modèle calibré de la composition macro-moléculaire des microalgues

La perte d'activité photosynthétique de la microalgue *Chlorella vulgaris* NIES 227 a été étudiée sous différentes intensités lumineuses lors d'une carence en azote. La répartition du carbone assimilé entre les différents pools de molécules (glucides, lipides, protéines) a été suivie simultanément. Les résultats montrent que la diminution d'activité photosynthétique est fortement corrélée à l'augmentation du rapport C:N cellulaire, permettant ainsi d'élaborer un modèle de croissance de la microalgue et de répartition du carbone en conditions de carence en azote.

L'augmentation de la biomasse a pu être prédite avec une bonne précision (R2=0,940, N=66), de même que la production de lipides et de glucides.

Ces travaux supportés par le Programme Focus Economie Circulaire du Carbone (ECC) sont publiés dans le journal Bioresource Technology (IF = 9,0).

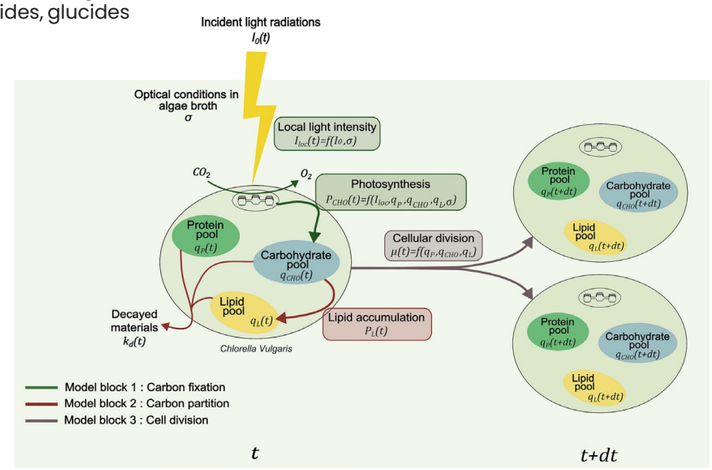
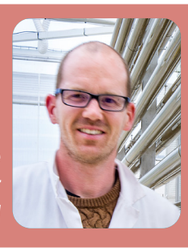


Schéma de fonctionnement du modèle de croissance des microalgues

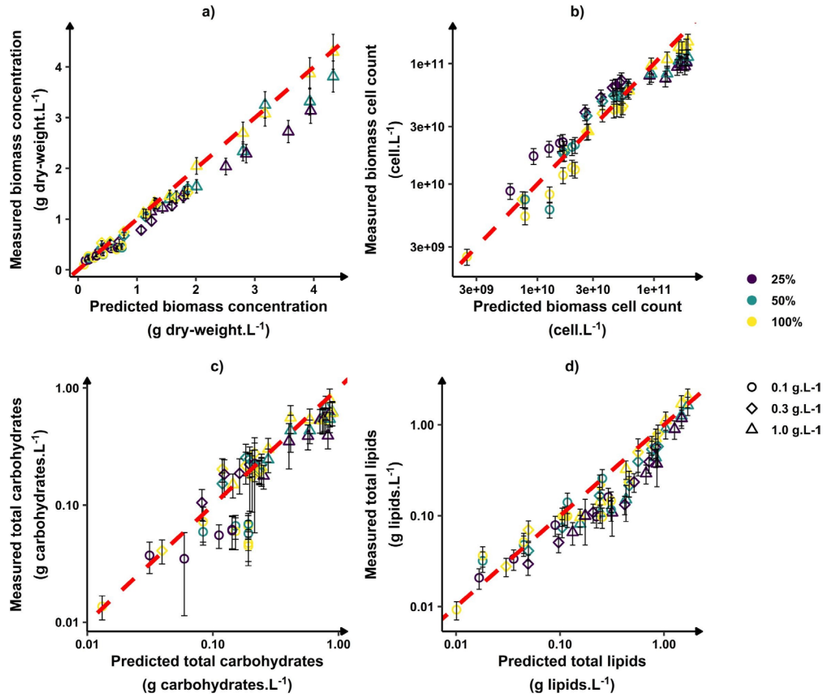
Microalgues **Biocarburants**

Lipides **Modélisation**

Florian Delrue
Ingénieur Chercheur
CEA Région Sud



©GODART_CEA



Pouvoir de prédiction du modèle sur 4 paramètres (concentration en biomasse, en glucides et en lipides, concentration cellulaire)

Perspectives

Ce travail constitue une première étape vers un modèle universel capable de simuler la croissance et la composition des microalgues dans n'importe quel système de culture. Pour rendre ce modèle exploitable dans des conditions industrielles, une étape de validation est nécessaire.

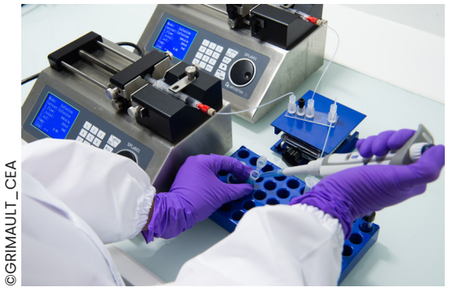
Celle-ci consistera en une série de validations en culture pilote solaire, dépendante du climat, ainsi qu'en conditions de culture sans stress azoté. Une fois validé, le modèle permettra de définir des stratégies de culture innovantes, susceptibles d'améliorer significativement la productivité. Par ailleurs, l'extension du modèle à d'autres souches de microalgues élargirait son applicabilité et permettrait d'identifier in silico les souches les plus performantes.

Enfin, le modèle, qui permet également de simuler la production de protéines et de glucides, pourra être appliqué à l'ensemble des voies de valorisation des microalgues, telles que les bioplastiques et la nutrition.

Pour en savoir plus

P. Chambonnière, E. Dollon, A. Dimitriades-Lemaire, J-F. Sassi, F. Delrue, «Scalable model development of carbon photosynthetic assimilation and partitioning in a green microalga during nitrogen starvation", *Bioresource Technology*, vol. 441, 2026, DOI: 10.1016/j.biortech.2025.133585.

Perspectives
de publications scientifiques



©GRIMAULT_CEA

Développement de nanoparticules LNP contenant de l'ARNm

Optimisation de la composition des LNP-ARNm pour l'amélioration de la transfection cellulaires.

Le besoin croissant de thérapies innovantes pour traiter ou prévenir les maladies émergentes et génétiques a mis en évidence le potentiel des médicaments à base d'ARNm. Bien que les nanoparticules lipidiques (LNP) aient démontré leur efficacité, la demande pour des nanovecteurs plus performants et adaptés à diverses applications thérapeutiques ne cesse d'augmenter.
Grâce à des techniques microfluidiques, CEA Tech en région a pu fabriquer des LNPs contenant de l'ARNm codant pour une protéine fluorescente modèle (GFP). Une étape d'optimisation de la composition lipidique des LNPs-ARNm par plan d'expérience a été nécessaire pour améliorer leur activité biologique. Les essais de transfection cellulaire in vitro ont ensuite été menés en collaboration avec l'INSERM I2MC et ont démontré l'expression cellulaire de la GFP par tri cellulaire activé par fluorescence (FACS). L'intérêt de ces nanovecteurs sera ensuite évalué sur d'autres types cellulaires et pour l'encapsulation d'ARN circulaire, plus stable que l'ARNm. La suite de l'étude sera consacrée au développement d'un procédé de fabrication continu des LNPs à plus grande échelle. Ces futures études fourniront une preuve de concept pour la production de nanovecteurs plus efficaces et industrialisables adaptés à un large éventail d'applications thérapeutiques.

Contact : Camille Favre, Ingénieure Chercheuse, CEA Occitanie



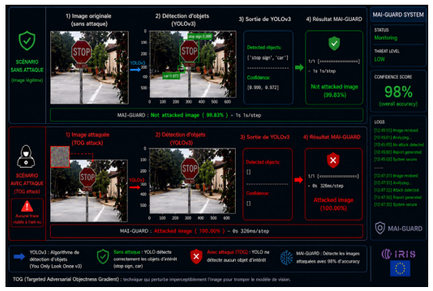
©CEA

Développement d'une mesure rapide et hors laboratoire de traces de deux pesticides sur une matrice végétale

L'électrode diamant dopé au bore pour la mesure de traces de pesticides dans une matrice végétale.

Les pesticides, largement utilisés en agriculture pour protéger les cultures contre les maladies, peuvent avoir de graves conséquences sur la santé humaine et celle des écosystèmes. La limitation de leur utilisation et leur détection dans les matrices alimentaires sont devenues un enjeu de santé publique.
CEA Tech en région, en collaboration avec le CEA-List, a développé une solution, basée sur de l'électrochimiluminescence sur électrode diamant couplée à un protocole de préparation d'échantillons et d'extraction.
Après de premiers tests convaincants en conditions de laboratoire, démontrant des limites de détection de l'ordre de 0.01ppm sur deux pesticides, des mesures sur échantillons réels de petits pois prélevés sur le terrain ont permis de valider la méthode. Les prochains travaux permettront une montée en maturité de la technologie en adressant notamment les problématiques d'interférents, d'automatisation et d'ergonomie.

Contact : Albin Monsorez, responsable de la plateforme TeQPA, CEA Bretagne



Détection et supervision d'attaques adversariales pour véhicule autonome par IA embarquée

Face à l'augmentation des cybermenaces, la protection des systèmes industriels critiques est devenue une priorité en Europe.

Dans le cadre du projet européen IRIS de nouveaux modules de cybersécurité ont été développés et intégrés à MAI-GUARD, un outil de détection d'anomalies et d'attaques pour systèmes industriels embarqués. Ces développements visent la détection d'attaques adversariales ciblant le système de vision d'une navette autonome afin de perturber la reconnaissance d'objets critiques. Le module de détection a atteint 98% de précision. La solution intègre des modules de génération d'images adversariales, et de détection d'images altérées. Les perspectives portent sur l'embarquement de ces capacités sur cartes électroniques basse consommation pour protéger drones, robots mobiles et véhicules autonomes, ainsi que sur leur généralisation à d'autres architectures d'IA et systèmes multi-capteurs.

Contact : Javier Gil Quijano, Ingénieur Chercheur, CEA Région Sud



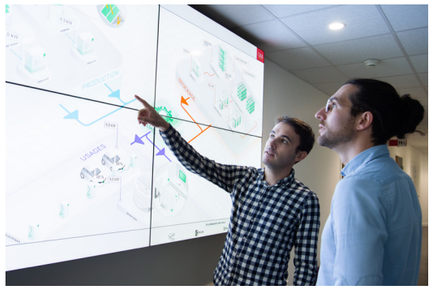
Architecture logicielle générique pour jumeaux numériques prédictifs

Déploiement rapide et agile d'architectures logicielles pour les jumeaux numériques fonctionnels de systèmes complexes

Les jumeaux numériques transforment tous les secteurs, de l'industrie à la santé. Pourtant, les jumeaux numériques prédictifs restent encore en développement. CEA Tech en région a développé une infrastructure logicielle générique composés de microservices, permettant de déployer facilement ces outils complexes.

De nouveaux usages s'offrent aux experts comme aux non-spécialistes via un déploiement en mode SaaS.
Cette architecture a déjà été mise en œuvre sur des projets industriels permettant d'obtenir un outil exploitable en seulement quelques semaines. Par exemple, un jumeau numérique d'intralogistique d'un entrepôt et ceux de plateformes multimodales ont été développés. Les travaux futurs portent sur l'intégration de nouvelles technologies sous forme de microservices supplémentaires.

Contact : Juan-Sebastian Restrepo Pinzon, Ingénieur Chercheur, CEA Hauts-de-France



Modélisation du contenu carbone du réseau électrique dans un objectif d'autonomie de micro-réseau

Pilotage intelligent des micro-réseaux : maximiser l'efficacité énergétique tout en réduisant l'empreinte carbone.

L'étude modélise un micro-réseau non isolé, avec un objectif initial de minimisation de l'électricité prélevée sur le réseau sur un an. Les résultats sont comparés à un pilotage visant à réduire les émissions de CO_2, en intégrant le contenu carbone dynamique du mix électrique.

Dans un cas en France ou en Allemagne, la prise en compte du critère environnemental permet de baisser de 16% les émissions, pour une hausse de seulement 4% de l'électricité soutirée.
Celle-ci est prélevée selon la pleine capacité de la ligne électrique aux périodes les moins carbonées : pour un cas français, 66% de l'électricité consommée est sous 60g CO_2eq/kWh. À l'inverse, avec un objectif d'autonomie électrique, les soutirages sont plus fréquents mais moins puissants, et 73% de l'électricité dépasse 6g CO_2eq/kWh.

Contact : Philippe Limousin, responsable équipe DIGIT plateformes COSY & TOTEM, CEA Occitanie

Les implantations en région

CEA en Grand Est
Metz Technopôle, Bâtiment Austrasie | 5 rue Marconi | 57075 Metz Cedex 3
Contact : 03 54 84 20 36 | ceatech-lorraine@cea.fr

Avec le soutien financier de :

Cofinancé par l'Union européenne

La Région Grand Est

CEA en Hauts-de-France
Euratechnologies | 165 avenue de Bretagne | 59000 Lille
Contact : 03 61 26 38 10 | ceatech-hautsdefrance@cea.fr

Avec le soutien financier de :

Région Hauts-de-France

Cofinancé par l'Union européenne

MEL MÉTROPOLE EUROPÉENNE DE LILLE

CEA en Nouvelle-Aquitaine
Coeur Bersol, Bâtiment B | 28 avenue Gustave Eiffel | 33600 Pessac
Contact : 05 24 44 10 00 | ceatech-aquitaine@cea.fr

Avec le soutien financier de :

Cofinancé par l'Union européenne

Région Nouvelle-Aquitaine

CEA en Pays de la Loire
4 allée du Rayon Vert | 44340 Bouguenais
Contact : 06 48 41 87 75 | ceatech-paysdelaloire@cea.fr

Avec le soutien financier de :

Cofinancé par l'Union européenne

RÉGION PAYS DE LA LOIRE

CEA en Bretagne
Pépinière des Innovations | 13 route de l'Innovation | 29561 Quimper Cedex 9
Contact : 06 48 41 87 75 | ceatech-bretagne@cea.fr

Avec le soutien financier de :

Cofinancé par l'Union européenne

Région Bretagne

DÉPARTEMENT Finistère Penn-ar-Bed

QUIMPER BRETAGNE OCCIDENTALE KEMPER BREIZH IZEL

CEA en Occitanie
- 51 rue de l'Innovation | 31670 Labège
- Le Village by CA | 621 rue Georges Méliès | 34000 Montpellier

Contact : 05 36 25 96 00 | ceatech-occitanie@cea.fr

Avec le soutien financier de :

L'EUROPE S'ENGAGE L'OCCITANIE AGIT

Cofinancé par l'Union européenne

La Région Occitanie Pyrénées - Méditerranée

PRÉFET DE LA RÉGION OCCITANIE
Liberté
Égalité
Fraternité

CEA en Région Sud
- CEA Cadarache, Cité des Énergies | 13108 St Paul lez Durance
- Bâtiment Connexion | 9 avenue Valéry Giscard d'Estaing | 06200 Nice
- Le Technopôle de l'Arbois | Avenue Louis Philibert | 13290 Aix-en-Provence

Contact : 04 42 25 44 56

Avec le soutien financier de :

Cofinancé par l'Union européenne

RÉGION SUD PROVENCE ALPES CÔTE D'AZUR

MÉTROPOLE NICE CÔTE D'AZUR

LA METROPOLE AIX-MARSEILLE-PROVENCE

Rapport scientifique CEA Tech en région
- Directrice de publication : Séverine Jouanneau Si Larbi
- Directeur de la rédaction : Gilles Marchand
- Coordination : Virginie Maugard
- Graphisme : Célia Roudet
- Contributions : Lucile Verdin, Clément Pichand
- Crédits photos couverture : ©CEA | ©P.STROPPA_CEA | ©GRIMAULT_CEA | ©GODART_CEA | ©GREENSANDBLUES_ENVATO_CEA

