

A large, stylized red number '2013' dominates the background. The number is composed of a thick red band with a fine, grid-like texture. Various mechanical components are integrated into the design: a grey metal bracket is attached to the top of the '2'; a grey gear is partially visible behind the '3'; and two grey rectangular blocks sit on a pile of grey granular material at the bottom left.

Rapport annuel

Sommaire

01

Introduction	4
Actualité	6

Photovoltaïque 8-13

2 questions à David Duca	10
Vers des panneaux solaires de nouvelle génération : innovations et perspectives.....	11
Éco-concevoir les centrales solaires.....	12
Dessiner l'avenir de l'Agrivoltaïsme	12
[Décryptage] Imagerie du shunt ohmique de cellules photovoltaïques tandem.....	13

02

Batteries 14-21

Batteries du futur : un nouveau cap est franchi	16
Une première membrane hybride polymère réalisée par extrusion réactive.....	16
Un procédé d'extrusion pour réduire l'usage de solvants toxiques.....	16
[Décryptage] Avancées majeures dans le développement de batteries Li-ion tout solides	17
De nouveaux matériaux pour batteries, plus durables.....	18
Évaluer l'impact environnemental d'une batterie selon son design.....	19
Une approche innovante pour simplifier la réparation des modules batteries.....	19
Réglementation pour une filière batteries européenne durable.....	19
Un fluide en ébullition pour contrer la montée en température des batteries.....	20
De l'aérogel de silice pour stopper l'emballement thermique des batteries	20
Accélérer les méthodes d'analyse des batteries lithium-ion	21

03

Hydrogène, molécules et carburants durables 22-29

Vers une durabilité accrue des cellules céramiques à conduction anionique	24
La modélisation au service de l'électrolyse haute température.....	24
[Décryptage] Une compréhension approfondie de la robustesse mécanique des cellules à oxyde solide ..	25
Des piles à combustibles à base de platine recyclé	26
Améliorer les PEMFC pour applications automobiles.....	26
Sécurité hydrogène : capitalisation des outils de modélisation	27
Vers une conception plus écologique des systèmes hydrogène en Europe de modélisation	27
3 questions à Muriel Matheron	28
Des catalyseurs au service de la transition énergétique.....	29
3 questions à Jessica Thery	30
[Décryptage] L'oxygène accommode les allers-retours des ions lithium dans les batteries	31

04

Matériaux et économie circulaire 32-37

Orano et le CEA collaborent pour recycler les batteries Li-ion	34
Vers une électronique imprimée plus durable	35
Réduire l'impact environnemental des matériaux plastiques.....	35
Des matériaux architecturés innovants en impression 3D	36
Améliorer les performances d'échangeurs thermiques grâce à la fabrication additive métallique.....	36
Révolution du recyclage des aimants dans les moteurs électriques.....	37
Des équipements sur mesure pour la R&D	38
12 plateformes pour une recherche technologique de pointe.....	39

05

Systèmes, réseaux et efficacité énergétique 40-47

2 questions à Alain Ruby	42
Optimiser les systèmes énergétiques complexes	43
Accompagner la rénovation énergétique du Bâtiment	44
Maximiser l'injection des gaz verts dans les réseaux de distribution	44
Des réseaux de chaleur au sein des systèmes énergétiques multi-vecteurs.....	45
Chargeur embarqué bidirectionnel à très haut rendement.....	46
Une compétence concentrée dans la gestion des batteries.....	46
[Décryptage] Architectures de conversion pour les centrales Photovoltaïques de forte puissance	31

Événements	48
Décarbonation et R&D pour un avenir durable : franc succès pour l'école d'été RD20 !	49
Travailler au CEA-Liten	50

édito



Chères équipes du CEA-Liten, chers partenaires et amis de l'institut, c'est avec une grande fierté et un enthousiasme renouvelé que je vous présente le rapport d'activité de notre institut pour l'année écoulée.

À la source de nos recherches réside notre engagement collectif pour la décarbonation, pierre angulaire de la stratégie énergétique française et européenne. Nous apportons en effet toute notre contribution aux recherches sur les énergies au sein du CEA, dans le cadre de la vision intégrée de l'énergie portée par notre organisme. Nous sommes convaincus que les énergies bas carbone, qu'elles soient renouvelables ou issues du nucléaire, sont des leviers indispensables pour la lutte contre le changement climatique.

Cette année encore, nos activités ont contribué au développement de filières industrielles nationales et européennes et à l'accroissement de notre souveraineté énergétique. Nous assistons dans le même temps à l'échelle mondiale, à un déploiement massif et sans précédent de certaines technologies bas carbone. Afin de tenir les objectifs de l'accord de Paris, cette dynamique doit être amplifiée et combinée à des efforts de sobriété et d'efficacité énergétique.

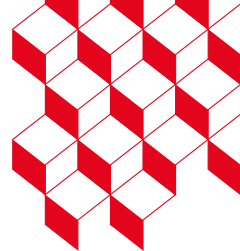
Forts de cette vision et de l'expérience de ces 20 dernières années, nous regardons vers l'avenir, analysons les défis qui se présentent à nous, et préparons les innovations qui permettront de les relever. La dynamique de création de start-ups que nous avons initiée depuis plusieurs années témoigne de notre engagement envers l'innovation et le transfert vers l'industrie. C'est également avec une grande fierté que nous voyons plusieurs de nos partenaires stratégiques concrétiser leurs développements et installer des usines en France et en Europe.

Amélioration des performances et de l'efficacité énergétique, tant au niveau des composants que des systèmes, réduction des coûts et de l'impact environnemental, circularité des matières et du carbone... Autant d'enjeux qui guident notre R&D, au service de la société et de nos partenaires industriels.

Enfin, je tiens à remercier l'ensemble des équipes du CEA-Liten pour leur enthousiasme et leur engagement au quotidien dans la réussite de nos activités et de nos missions. C'est un grand plaisir et un grand honneur de travailler avec une telle équipe.

François Legalland
Directeur du CEA-Liten

Présentation



L'aventure du CEA-Liten débute en 2004. En seulement deux décennies, l'institut a émergé comme un acteur européen incontournable de la R&D sur les solutions énergétiques bas-carbone compétitives, responsables et à faible empreinte environnementale.

Les recherches de l'institut portent à la fois sur le développement de composants et de briques technologiques pour la transition énergétique et sur leur intégration au sein de systèmes ou de réseaux modulaires et optimisés.

Implanté au cœur du site du CEA-Grenoble et sur le campus de l'INES à Chambéry, le CEA-Liten met ses activités de recherche au service d'une double mission d'innovation pour atteindre la neutralité carbone et de création de valeur à travers le transfert vers l'industrie. Son engagement pour la transition énergétique s'appuie sur l'innovation autour de l'énergie solaire, des batteries, du vecteur hydrogène, des molécules et des carburants durables, des réseaux et systèmes énergétiques multi-vecteurs, en ayant bien sûr toujours en tête l'efficacité énergétique et l'économie circulaire.

Le CEA-Liten innove et crée de la valeur au sein des différentes filières industrielles de la transition énergétique, pour répondre aux objectifs de la Stratégie Nationale Bas Carbone, de « France 2030 » et des différentes politiques publiques nationales et européennes. En tant qu'Organisme de Recherche Technologique (RTO), il a par ailleurs pour mission de servir l'industrie via la recherche partenariale, reconnue par le label Carnot depuis 2006. ■

Chiffres clés 2023

1 000 chercheurs, techniciens, équipes support

200 publications annuelles

200 doctorants et post-docs

160 millions d'euros de budget annuel

200 partenaires industriels

12 plateformes technologiques

2 000 familles de brevets en portefeuille

Le CEA-Liten, membre du Carnot Énergies du Futur

Le Carnot Energies du Futur, le troisième plus grand Institut Carnot, a alloué 6 M€ au CEA-Liten pour préparer les innovations qui seront transférées aux partenaires industriels dans les prochaines années et financer la recherche amont. Le financement est consacré pour moitié à 15 projets exploratoires, marqués par une forte ambition scientifique et menés par des post-doctorants à partir de 2024. L'accent est également mis sur l'aspect collaboratif entre instituts Carnot, en particulier les Carnot ARTS, M.I.N.E.S., CEA-Leti et Icéel. Ont été également financés 4 projets stratégiques, de grande ampleur, qui mobilisent des chercheurs sur plusieurs domaines d'activité transverses du Liten, et qui doivent aboutir à des réalisations ambitieuses démontrant nos capacités scientifiques et technologiques susceptibles d'attirer des partenaires industriels. ■



5

Le CEA-Liten impliqué dans plusieurs PEPR

Le CEA co-pilote avec le CNRS plusieurs PEPR, pour Programmes et Equipements Prioritaires de Recherche, dont la vocation est de financer la recherche sur des sujets stratégiques pour la France dans le cadre du plan d'investissement « France 2030 ». En 2023, trois de ces programmes ont démarré et concernent le CEA-Liten : Batteries, Technologies avancées des systèmes énergétiques (TASE), et Hydrogène décarboné dont le projet CELCER-EHT qu'il coordonne. Les nouveaux outils de caractérisation et de simulation, les chimies innovantes et les systèmes de gestion de batterie adaptés à ces nouvelles chimies sont principalement concernés par le PEPR Batteries. Celui sur l'hydrogène décarboné couvre la chaîne de valeur depuis la production, le stockage, le transport, la conversion jusqu'aux usages, tandis que le PEPR Tase concerne l'énergie solaire et les réseaux énergétiques. Avec le soutien de l'Université Grenoble-Alpes, il vise à assurer une transition soutenable en intégrant les sciences humaines et sociales. ■



The CEA-Liten Journal

Revue de presse de nos partenaires



Photo : © S. Perolari-REA - Le monde

L'ANNÉE 2023 EST PLACÉE SOUS LE SIGNE DE LA GIGA FACTORY !

L'année 2023 est placée sous le signe de la gigafactory ! Photovoltaïque, batteries ou encore hydrogène, le CEA-Liten est fier d'accompagner ses partenaires sur chacun de leurs divers projets. Parmi les plus belles annonces de l'année, voici une sélection d'article de presse qui souligne l'alliance réussie du savoir-faire de l'institut et de celui de ses partenaires.

Enel met le paquet sur les panneaux solaires pour s'affranchir de la Chine

Le géant italien de l'énergie Enel compte multiplier par 15 la capacité de production annuelle de son usine de panneaux photovoltaïques à Catane en Sicile. D'ici la mi-2024, l'usine 3Sun devrait ainsi voir passer sa capacité de production annuelle à 3 gigawatts, contre 200 mégawatts actuellement, ce qui en fera « la plus grande usine de panneaux solaires d'Europe », selon Enel.

Source : AFP/6 février 2023

Hydrogène : avec la gigafactory de Symbio, l'Europe part à l'assaut des Etats-Unis

Ce mardi [5 décembre] avait lieu l'inauguration de la plus grande gigafactory d'Europe de piles à hydrogène à Saint Fons, près de Lyon. C'est l'entreprise

Symbio, co-détenue par Stellantis, Forvia et Michelin qui est à l'origine du projet et qui vise les 50 000 systèmes à hydrogène pour 2026. Ces piles équiperont d'abord les véhicules utilitaires de Stellantis ainsi que les bus en Europe, avant de s'attaquer au marché du pick-up aux États-Unis, le plus grand rival sur ce terrain.

Source : La Tribune/5 décembre 2023

Stellantis et Orano veulent créer une coentreprise autour d'une techno "disruptive" de recyclage des batteries

Stellantis et Orano ont annoncé mardi 24 octobre leur intention de créer une coentreprise dans le recyclage des batteries. Celle-ci se concentrera sur le pré-traitement des batteries pour produire de la "black mass" chargée en métaux critiques, qui sera ensuite traitée dans l'usine hydrométallurgique qu'Orano souhaite implanter à Dunkerque (Nord).

Source : L'usine nouvelle/24 octobre 2023

La ligne pilote de Genvia inaugurée sur le site de l'ex-Camerone avant la gigafactory demain

Jeudi 8 juin après-midi, la ligne pilote de Genvia sur le site de l'ex-Camerone à Béziers, a été inaugurée en grande pompe. Elle permettra la fabrication d'électrolyseurs haute température pour la production d'hydrogène bas carbone. Une concrétisation de la filière hydrogène soutenue par l'État dans le cadre de France 2030.

Source : Midi Libre/8 juin 2023

Une première gigafactory française de batteries pour l'automobile ouvre dans le Pas-de-Calais

L'usine d'Automotive Cells Company, une coentreprise de Stellantis, TotalEnergies et Mercedes-Benz, a été inaugurée mardi [30 mai 2023]. Il s'agit de la première gigafactory qui produira en France des

cellules de batteries pour l'automobile en grande série, et la première des trois unités de production du site dont la montée en puissance est programmée pour s'achever d'ici fin 2024.

Source : Le Monde/30 mai 2023

Inocel produira à Belfort ses piles à combustible de forte puissance

La jeune société de Grenoble a déjà enregistré 1 milliard d'euros d'intentions de vente de sa pile à combustible de nouvelle génération. Compacte avec ses 50 cm³ et 100 kg, pour une puissance de 300 kW, soit l'équivalent de 407 chevaux, la pile à combustible basse température est le fruit de deux ans de développement au sein du CEA-Liten. Inocel vise une production à partir de septembre 2024. ■

Source : Les Echos/10 mai 2023

Les start-up partenaires

LEVÉE DE FONDS

Heliup



Startup spécialisée dans les panneaux photovoltaïques ultralégers, Heliup vient de lever 10 millions d'euros. Protégée par 2 brevets CEA, l'innovation réside dans un verre ultra-mince préservant la protection des cellules solaires avec un système de pose léger, une aubaine pour les bâtiments à ossature métallique en France. Cette première levée de fonds, dont 4,5 millions en fonds propres, permettra à la startup de commercialiser ses produits et d'installer sa première ligne pilote au Bourget du Lac. Pour optimiser ses panneaux, Heliup collabore notamment avec l'ITE INES.2S. ■

LANCEMENT

DistrictLab



DistrictLab est née ! Cette startup développe et commercialise une solution logiciel d'optimisation du design et de l'opération des réseaux thermiques urbains afin de décarboner les systèmes existants, abaisser leur température, intégrer massivement les ENR&R, déployer de nouveaux systèmes et proposer des architectures réseaux innovants. DistrictLab est le résultat prometteur des efforts continus de R&D fournis par le Liten dans le domaine des réseaux énergétiques complexes depuis 2013. ■

RACHAT

SEED-Energy



Créée en 2017, la startup SEED-Energy évalue la rentabilité des systèmes énergétiques multi-énergies et multi-technologies, en s'appuyant sur une solution développée dans les laboratoires du Liten. Le 7 juin 2023, la startup a été rachetée par Technip Energies, un acteur majeur de l'ingénierie et de la technologie. Cette acquisition témoigne de la reconnaissance de l'expertise de la startup dans le domaine de la modélisation des systèmes énergétiques et des opportunités qu'elle apporte à l'industrie. ■



PERCÉE TECHNOLOGIQUE

INOOCQ

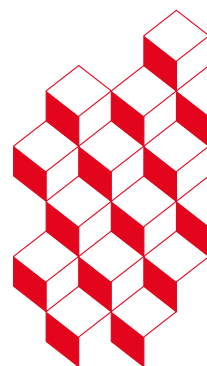
INOOCQ effectue une percée technologique majeure pour la traçabilité des produits de produits cosmétiques. Après 10 ans de R&D, leur solution est opérationnelle : elle consiste en un tracker biocompatible invisible intégré directement aux produits ou à leur emballage, qui se détecte facilement avec un téléphone portable par le biais d'une application associée. Facile d'utilisation et à disposition de chacun, c'est une avancée majeure dans la lutte contre la contrefaçon. ■

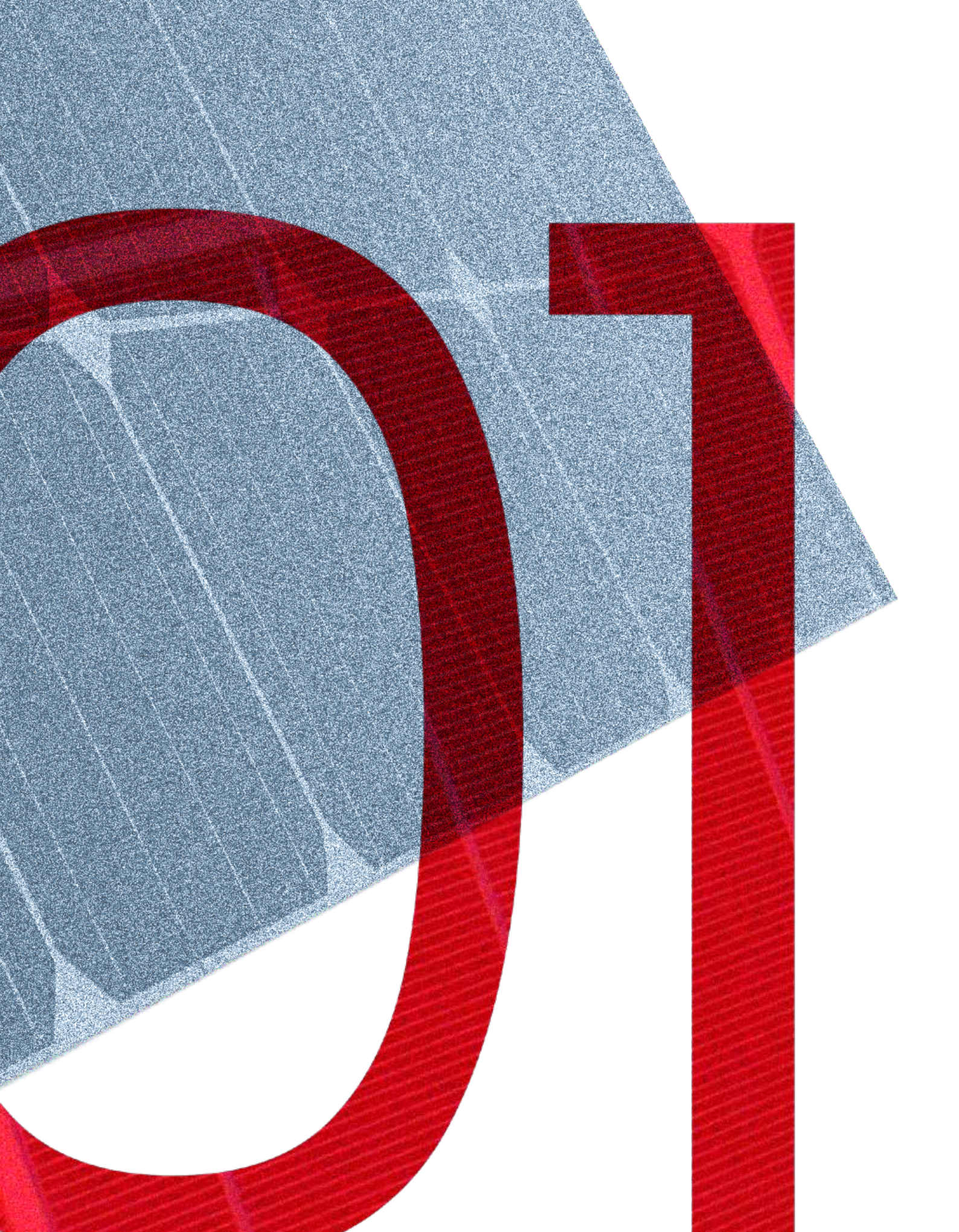


PARTENARIAT

Solreed

Pour passer à la vitesse supérieure dans le réemploi des modules photovoltaïques usés, la startup Solreed en passe d'être essaimée vient de signer un partenariat avec un acteur important du domaine. Il s'agit de la dernière étape qu'il lui fallait franchir pour se lancer sur le marché et monter rapidement en maturité. Au-delà des enjeux environnementaux auxquels elle s'adresse, Solreed prend en compte des aspects sociétaux : son objectif est d'employer uniquement des personnes en réinsertion. ■





Photovoltaïque

Le marché mondial de l'énergie photovoltaïque est en pleine expansion, au point d'atteindre d'ici 2030 une production estimée à presque 1 TW. Dans ce contexte dynamique, le CEA-Liten déploie ses efforts pour soutenir cette croissance en couvrant toute la chaîne de la valeur des composants photovoltaïques, du matériau au système complet. Son expertise et les performances qu'il obtient à l'échelle préindustrielle font sa renommée en Europe et le place au meilleur niveau mondial. Son attention se porte vers la recherche de rendements élevés pour les cellules photovoltaïques respectueuses de l'environnement, l'optimisation des systèmes, l'intégration de la haute tension et les algorithmes de diagnostic des centrales photovoltaïques. Le CEA-Liten privilégie des technologies innovantes comme les cellules à hétérojonction, les TOPCon et les cellules tandem silicium/pérovskite, visant à dépasser les 30 % de rendement. Pour favoriser la durabilité, l'institut se concentre sur la récupération et la valorisation des matériaux des panneaux en les rendant modulaires, recyclables et facilement démontables. Le choix des matériaux est guidé par ses compétences en analyse du cycle de vie et la recherche d'alternatives durables lorsque c'est possible. Le CEA-Liten cible diverses applications, de la production massive d'électricité en centrale photovoltaïque ou sur des surfaces déjà artificialisées sur lesquels de nouveaux type de modules doivent être inventés, en passant par la mobilité terrestre jusqu'à l'autonomie énergétique des véhicules spatiaux. Chacune des avancées du CEA-Liten dans le domaine du photovoltaïque œuvre à façonner un avenir énergétiquement plus efficace et à l'impact environnemental réduit. Les rendements plus élevés et la diversification des applications ouvrent la voie à une transition énergétique durable, tout en créant de nouvelles opportunités économiques.



**Façonner un avenir
énergétiquement
plus efficace
et à l'impact
environnemental
réduit.**



2 questions à...



David Duca

Chef du département des technologies solaires du CEA-Liten



01.

Quel est votre parcours, et qu'est ce qui vous a motivé à rejoindre le CEA-Liten ?

J'ai travaillé 25 ans dans les secteurs de l'optique et des semi-conducteurs, en R&D au début de ma carrière, puis dans l'industrie. Mon parcours professionnel s'est déroulé pour beaucoup en France, notamment chez ST dans le cadre de l'Alliance Crolles 2, et chez Sofradir, mais également au Québec chez

Excelitas Technologies pour accompagner la montée en maturité de leur site industriel. Intégrer le CEA-Liten aujourd'hui, c'est mettre à profit mon expérience au service du photovoltaïque – à la croisée du monde des photons et des électrons – et de la transition énergétique.

02.

Quels sont les enjeux pour le photovoltaïque en France, et quelle est la stratégie du CEA-Liten pour y répondre ?

À mon sens, l'enjeu stratégique principal concerne l'intégration verticale de la technologie PV en Europe. En d'autres termes, maîtriser l'ensemble de la chaîne de valeur, depuis le polysilicium jusqu'au module. Et le Liten possède justement des compétences historiques sur les matériaux, la cristallinogenèse, ou encore l'usinage des wafers.

D'un point de vue des enjeux technologiques, nous continuons à mettre à niveau et à faire évoluer notre LabFab, pour les technologies hétérojonction, TOPCon, et les futures générations de cellules. Cette infrastructure de R&D remarquable a pour vocation de préparer le transfert de procédés optimisés et reproductibles vers les lignes pilotes de nos partenaires français et européens. Nous focalisons notre R&D sur nos fondamentaux, pour optimiser chaque brique élémentaire des procédés de fabrication des technologies actuelles en ayant soin d'être compatibles avec les exigences industrielles comme les surfaces de cellules ou la réduction des temps de

passage de chaque procédé. Et pour préparer l'avenir avec la future génération de cellules tandem de demain, qui permettra de dépasser des rendements de 30%.

En aval, nous devons continuer à déployer les panneaux photovoltaïques sur des surfaces déjà artificialisées, mais également sur des surfaces tridimensionnelles. Et concernant la question de l'intégration de cette EnR au réseau, nous travaillons sur la montée en tension et le passage en courant continu, notamment pour diminuer les pertes électriques.

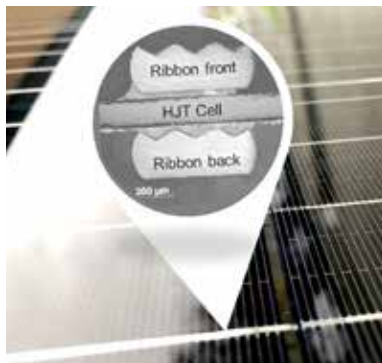
Enfin, notre stratégie intègre non seulement les enjeux de soutenabilité, avec une diminution de consommation des quantités de matière première et une conception de modules démontables en fin de vie pour permettre le recyclage des matériaux qui les composent, mais aussi les enjeux sociétaux liés à l'acceptabilité des solutions technologiques que nous proposons. ■

Vers des panneaux solaires de nouvelle génération : innovations et perspectives

3

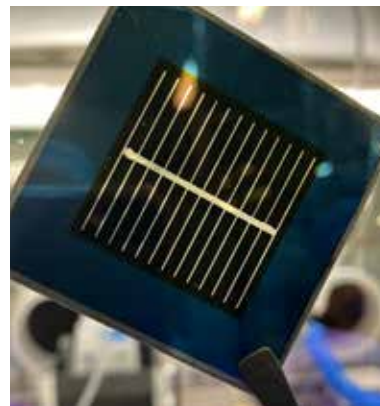
exemples de réalisation

De nouveaux procédés ont été développés sur la ligne pilote LabFab hétérojonction (HJT). D'une part, les équipes ont adapté et qualifié des procédés de fabrication pour des wafers de silicium de plus grand format (+80% de surface en plus que le M2, G12) pour accompagner le démarrage de la Gigafactory chez notre partenaire 3SUN/ENEL. D'autre part, elles ont démontré la compatibilité de la technologie HJT avec les applications spatiales, avec l'utilisation d'un absorbeur de silicium cristallin de type p plus robuste aux irradiations de l'environnement hors atmosphère que le silicium de type n, et plus fin. ■



La réduction de la teneur en matériaux critiques est indispensable pour que les technologies soient compatibles avec une production de masse. Les équipes ont démontré une réduction de la teneur en In de 90% sur la face avant des cellules, en combinant l'usage de couches minces de silicium nanocristallin avec des couches d'oxyde d'indium ultra fines et des couches de nitrure de silicium (Si_3N_4). Par ailleurs, de nouvelles pâtes de métallisation ont été mises en œuvre par sérigraphie avec une teneur en argent réduite de 40 à 60 %. Un premier module démonstrateur à l'échelle 1 a été réalisé avec une teneur globale en Ag < 25 mg/W, quand les acteurs industriels du domaine sont à plus de 35 mg/W. ■

Un nouveau record de rendement pour nos cellules développées avec 3SUN, filiale du groupe Enel Green Power : 28,4 % sur 9 cm², atteint pour une cellule d'architecture PIN, avec correction d'ombrage. Un résultat d'autant plus pertinent que la plupart des records de rendement, publiés au plan international, le sont pour une surface de 1 cm². ■



Éco-concevoir les centrales solaires

Le CEA a développé EcoSPV, un outil d'analyse d'impact dédié aux centrales photovoltaïques. Couplé à une base de données intégrant des données à jour, il permet d'obtenir des résultats précis sur des indicateurs tels que le temps de retour énergétique et le temps de retour CO₂. La première version logicielle prend en considération les composants principaux de l'installation électrique – onduleurs, transformateurs, les modules PV et câbles électriques – supposés avoir le plus d'impacts environnemental.

L'outil modélise deux centrales en parallèle : la centrale étudiée, et une centrale « de référence » qui intègre des grandeurs classiques issues de la modélisation d'un cas réel. EcoSPV complète la suite d'outils d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) développés dans le cadre de l'ITE INES.2S. ■



12

Dessiner l'avenir de l'agrivoltaïsme

Le CEA participe au pôle national de recherche, innovation et enseignement sur la thématique de l'agrivoltaïsme, coordonné par l'INRAE. Rassemblant des acteurs publics et privés, ce pôle doit permettre le développement raisonné de la technologie photovoltaïque sur les terres agricoles, en cohérence avec la loi votée au Sénat en février 2023 encadrant l'agrivoltaïsme. L'objectif majeur est de créer des connaissances pour maintenir ou améliorer la production agricole, tout en produisant de l'énergie élec-

trique. Installés dans une parcelle agricole, des panneaux photovoltaïques permettent ainsi de moduler le rayonnement et de protéger les plantes ou les animaux d'élevage contre la grêle, le gel ou la canicule. Les experts du CEA-Liten interviennent principalement sur le volet technologies pour l'énergie solaire. ■



EU-PVSEC 2023 Quelle édition pour nos chercheurs !

À l'occasion de la 40^e édition de la plus grande conférence internationale sur le photovoltaïque, certains chercheurs du CEA ont été mis à l'honneur !
Nouha GAZBOUR est intervenue sur la question de la durabilité pour l'industrie photovoltaïque, lors de la session plénière, et deux présentations* ont été lauréates lors de la session de posters.



- * 1/ Imagerie du shunt ohmique de la cellule supérieure dans les cellules solaires tandem silicium / pérovskite.
- 2/ Optimisation des absorbeurs à large et étroite bande passante pour les cellules solaires tandem tout-Pérovskite.

Imagerie du shunt ohmique de cellules photovoltaïques tandem

CONTEXTE

Les cellules photovoltaïques tandem silicium-pérovskites ont un rendement de conversion potentiellement nettement supérieur à celui de cellules commerciales pour un coût supplémentaire raisonnable. La compréhension en deux dimensions des multiples interactions internes permet de rendre ces systèmes plus stables et performants, ce pourquoi une nouvelle méthode en luminescence propose d'imager quantitativement un défaut particulièrement pénalisant ^[1] : le shunt ohmique de la cellule pérovskite.

APPROCHE & RÉSULTATS

En raison de leur arrivée relativement récente, il existe peu de caractérisations spécifiques des cellules tandem silicium-pérovskite. Il s'agit de parvenir à isoler la contribution des différents défauts pour remédier spécifiquement à chacun, ce que permet de faire l'imagerie sélective, quantitative et non destructive présentée par cette méthode. Initialement, une observation fortuite a mis en évidence des variations du profil de luminescence en fonction de la tension d'alimentation d'une cellule, cette dernière déclenchant séquentiellement l'illumination des sous-cellules selon une seconde expérience. Une étude théorique généralise ensuite ces observations et définit des simplifications contextuelles du modèle électrique équivalent. Par exemple, la luminescence provient uniquement du silicium à proximité de 0.7 V, et la pente de la caractéristique courant-tension dépend uniquement du shunt de la cellule pérovskite. On calcule alors ce dernier pour chaque pixel grâce à la calibration luminescence/courant ^[2]. Les résultats sur plus de 60 cellules corrélaient très bien l'imagerie à la mesure électrique du shunt, et une expérience particulière permet de lier ce dernier à l'épaisseur du matériau pérovskite. La forme, la localisation et la force des shunts locaux suggèrent fortement des pistes d'amélioration, que ce soit lié à la fabrication, à l'encapsulation ou au vieillissement.

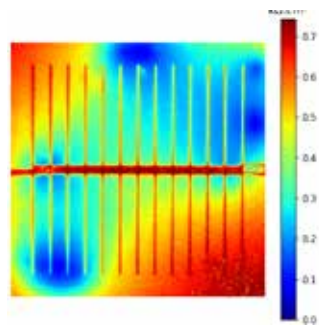


Figure 1: exemple d'une cellule tandem avec d'importants shunt locaux représentés par une résistance faible

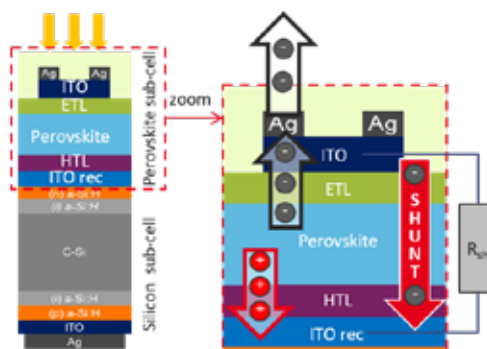


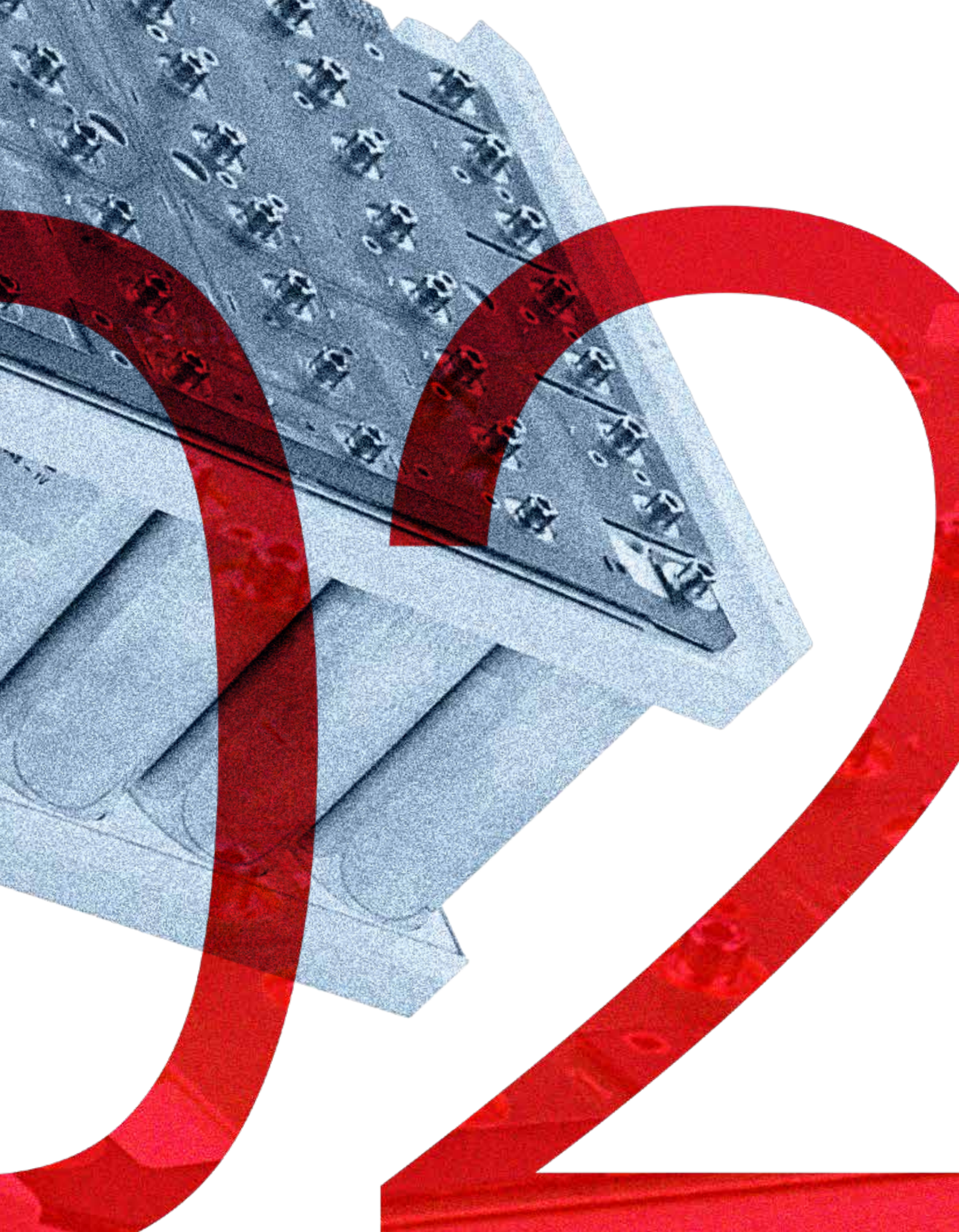
Figure 2: localisation et effet du shunt ohmique de la cellule

Ce nouvel outil cartographie sélectivement le shunt ohmique de cellules tandem à partir de mesures en luminescence, non destructives en raison d'une tension positive modérée et de l'absence de chaleur, radiation ou atmosphère spécifique. Des conditions d'essais particulières simplifient la modélisation, le shunt est alors calculé par résolution différentielle ^[3]. Toujours sans dégradation, l'extension à d'autres paramètres permettra par la suite de visualiser plusieurs mécanismes limitants.

CONCLUSION

RÉFÉRENCES

- [1] C. M. Proctor et T.-Q. Nguyen, « Effect of leakage current and shunt resistance on the light intensity dependence of organic solar cells », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 106, no 8, p. 083301, févr. 2015, doi: 10.1063/1.4913589.
- [2] D. Hinken, K. Ramspeck, K. Bothe, B. Fischer, et R. Brendel, « Series resistance imaging of solar cells by voltage dependent electroluminescence », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, no 18, p. 182104, oct. 2007, doi: 10.1063/1.2804562.
- [3] M. Seeland, C. Kästner, et H. Hoppe, « Quantitative evaluation of inhomogeneous device operation in thin film solar cells by luminescence imaging », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 107, no 7, p. 073302, août 2015, doi: 10.1063/1.4929343.



Batteries

Le développement de nouvelles technologies de batteries est essentiel pour l'essor d'une mobilité propre. Le CEA-Liten y contribue en améliorant constamment leur performance, en repoussant les limites de leur chimie tout en portant une réflexion sur l'usage de matériaux les moins critiques possibles pour une utilisation généralisée. Densité d'énergie, densité de puissance, durabilité, sécurité, coût global et empreinte environnementale : ces briques principales guident ses choix et ses innovations. Grâce à sa vision holistique du système, le CEA-Liten joue un rôle particulier dans la mobilité décarbonée et la flexibilisation du réseau électrique. À cela s'ajoute son expertise complète de la chaîne de valeur des batteries, allant des matériaux aux systèmes, et leur recyclage, sur laquelle repose sa stratégie. Force de proposition, l'institut travaille activement sur de nouvelles générations de batteries avec un accent mis sur deux axes principaux : les batteries à plus forte performance en densité d'énergie, au-delà du système NMC (nickel, manganèse, cobalt)/Graphite, et les batteries à plus faible empreinte environnementale, au-delà du système LFP (Lithium/Phosphate de fer)/Graphite. L'objectif est d'optimiser ces systèmes en levant des verrous technologiques et trouver le bon équilibre entre toutes les caractéristiques attendues pour un déploiement industriel. Pour optimiser les systèmes, l'institut exploite sa compétence historique en chimie au service des besoins du marché de l'électrification massive des transports. Il s'efforce ainsi de sélectionner les meilleures cellules en termes de chimie, format et taille, tout en proposant une intégration tenant compte des facteurs mécaniques, électriques et thermiques. Dans cet objectif, il s'entoure de partenaires clés tels que Solvay, Umicore, Saft, ACC, Orano ou encore Stellantis.



“
**Le CEA-Liten
 joue un rôle
 particulier
 dans la mobilité
 décarbonée et
 la flexibilisation
 du réseau
 électrique.**
 ”

Batteries du futur : un nouveau cap est franchi

En 2023, le CEA-Liten passe un nouveau cap dans ses recherches sur les batteries de nouvelle génération dites « tout-solide ». En effet, les équipes ont réussi à mettre au point un premier prototype d'accumulateur d'une capacité de l'ordre de 1Ah, avec un électrolyte tout solide de type sulfure. Ce matériau, reconnu par la communauté scientifique comme étant

parmi les plus prometteurs pour cette technologie, a été associé à un matériau lamellaire de type NMC à l'électrode positive et au silicium à l'électrode négative. Toutes les étapes du procédé de fabrication ont été optimisées pour passer de cellules de faible capacité (dizaine de mAh) jusqu'à alors réalisées en laboratoire à cette mise à l'échelle de l'Ah. ■

Une première membrane hybride polymère réalisée par extrusion réactive

La technologie polymère hybride Solgain™ développée par Solvay et le CEA consiste à confiner l'électrolyte dans les électrodes et la membrane dès leur fabrication. Pour s'affranchir de l'étape d'enduction de la membrane, et supprimer ainsi l'utilisation de solvant sacrificiel, les deux partenaires ont expérimenté

un procédé alternatif original par extrusion réactive. La membrane alors obtenue par lamination a été testée en pile bouton entre deux électrodes Solgain™. Ses performances en cyclage sont identiques à celles obtenues avec le procédé classique de préparation en voie liquide. ■



Un procédé d'extrusion pour réduire l'usage de solvants toxiques

Les électrodes positives des accumulateurs Li-ion actuels sont mises en œuvre industriellement par un procédé d'enduction à base de solvants organiques toxiques. La formulation alternative contenant de l'eau pour solvant, plus respectueuse de l'environnement, permet de réaliser les électrodes

négatives, mais reste inadaptée pour l'électrode positive. Pour cette dernière, le CEA-Liten a évalué avec succès la mise en forme par un procédé d'extrusion, permettant de s'affranchir de solvants toxiques et même de limiter la quantité d'eau à utiliser. Les caractéristiques mécaniques et les

performances électrochimiques des électrodes ainsi obtenues sont encourageantes. Par ailleurs, les optimisations réalisées au niveau de la formulation et du procédé ont permis de développer un procédé continu, nécessitant une unique étape de séchage sans dégradation des performances. ■

Avancées majeures dans le développement de batteries Li-ion tout-solide

CONTEXTE

L'industrie automobile incite la communauté scientifique à faire progresser continuellement les technologies de batteries, en visant à accroître leurs performances et leur durabilité et à renforcer leur sécurité. Les recherches sur les batteries tout-solide, technologie permettant d'éliminer les électrolytes liquides à l'origine de problèmes de sécurité, s'inscrivent dans ce contexte.

APPROCHE & RÉSULTATS

Dans le cadre d'une thèse financée par le programme CEA FOCUS-Batteries, les équipes du Liten et de l'IRIG ont collaboré afin de développer des prototypes innovants de batteries tout-solides. Ces cellules s'appuient sur l'utilisation d'électrolytes solides inorganiques de type sulfures, dont la conductivité ionique à température ambiante est proche de celle des électrolytes liquides. Les matériaux actifs choisis sont des oxydes lamellaires commerciaux de type NMC à l'électrode positive et des nanoparticules de silicium à l'électrode négative (figure 1). Ces matériaux permettront à terme de réaliser des cellules tout-solide de haute énergie sans avoir recours au lithium métal. En effet, l'utilisation à l'électrode négative de ce matériau à la densité d'énergie exceptionnelle, initialement pressenti par la communauté scientifique comme matériau de choix pour les batteries tout-solide, s'est rapidement heurtée à des difficultés de cyclabilité.

Dans le cadre de la collaboration Liten-IRIG, ces matériaux ont été mis en œuvre en développant un procédé d'enduction spécifiquement adapté à cette technologie. Cette technique a notamment permis de passer de cellules laboratoire de 1-2 mAh à des cellules en sachet souple de 10-20 mAh, tout en conservant les performances. Une des caractéristiques de la technologie tout-solide est la nécessité de maintenir une forte pression sur les cellules pendant le cyclage. Ce changement d'échelle a permis de diminuer considérablement la pression de fonctionnement à 1 MPa contre 100 MPa ou plus à l'échelle laboratoire (figure 2)^{[1]et[2]}. Ces expériences ont donné lieu au résultat phare de notre publication^[3], puisque les cellules ont conservé leurs performances électrochimiques à faible pression.

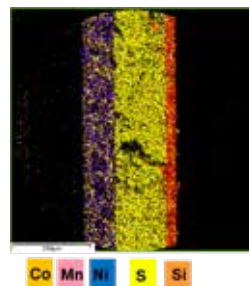


Figure 1: Image de microscopie électronique en coupe de la batterie, montrant l'électrode positive (contenant Co, Mn, Ni), l'électrode négative (contenant Si) et l'électrolyte (contenant S).

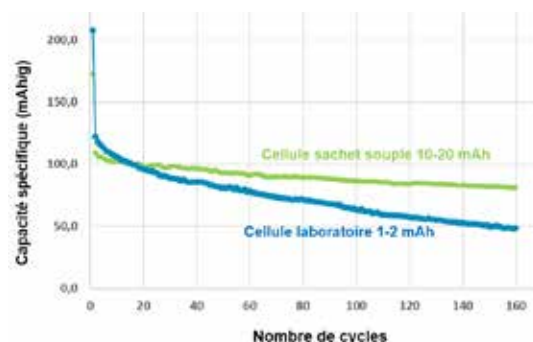


Figure 2: Comparaison des performances en cyclage entre une cellule de laboratoire (bleu) fonctionnant à une pression de 100 MPa et une cellule en sachet souple (vert) à une pression de 1 MPa.

De nombreux travaux seront encore nécessaires pour réussir la maturation de cette technologie, et son transfert vers l'industrie. Nous souhaitons notamment mieux comprendre les mécanismes permettant le fonctionnement à basse pression afin d'optimiser différents paramètres pour atteindre les performances requises pour les applications automobiles.

CONCLUSION

RÉFÉRENCES

- [1] D.H.S. Tan et al. et al., "Carbon-Free High-Loading Silicon Anodes Enabled by Sulfide Solid Electrolytes.", *Science*, 373 (2021) 1494-1499. doi: 10.1126/science.abg7217
- [2] D.H. Kim et al. "Sheet-Type Li₆PS₅Cl-Infiltrated Si Anodes Fabricated by Solution Process for All-Solid-State Lithium-Ion Batteries", *J. Power Sources* 426 (2019), 143-150. Doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.04.028
- [3] M. Grandjean et al., "Low pressure cycling of solid state Li-ion pouch cells based on NMC - Sulfide - nanosilicon chemistry", *J. Power Sources* (2023), 233646, 10.1016/j.jpowsour.2023.233646

De nouveaux matériaux pour batteries, plus durables



18

Les batteries Li-ion actuelles les plus performantes sont principalement composées d'une électrode négative en graphite et d'une électrode positive de type NMC, dont le principal inconvénient provient des tensions d'approvisionnement sur le nickel et le cobalt. Impliqué dans la prise en compte de l'impact environnemental des technologies qu'il développe, le CEA-Liten étudie depuis plusieurs années des matériaux d'électrode positive de nouvelle génération, sans métaux critiques, pour les technologies Li-ion et post Li-ion (de type Na-ion et K-ion). Plusieurs de ces matériaux présentent des performances électrochimiques intéressantes : Des oxydes de manganèse lithiés de structure rocksalt (type NaCl) désordonnée, peu coûteux et dont l'empreinte CO₂ est divisée par 2 par rapport aux matériaux NMC, permettent d'obtenir de très fortes capacités de l'ordre de 300mAh.g⁻¹ et une densité d'énergie massique de 900Wh.kg⁻¹ matériau en pile bouton. Les prochains travaux

viseront à optimiser l'étape d'enduction et à tester ces matériaux au format pouch cell. Des blancs de prusse de type K₂Mn[Fe(CN)₆] mis en œuvre dans des systèmes K-ion présentent une densité d'énergie théorique de l'ordre de 600 Wh/kg matériau, et peuvent être enduit en voie aqueuse, sans solvants toxiques. Les matériaux synthétisés au laboratoire ont déjà permis d'atteindre 450 Wh/kg matériau, et des marges de progrès existent. Enfin, plusieurs familles de matériaux tout organique (sans métal de transition) ont été synthétisés en voie aqueuse, et évalués, depuis une dizaine d'années au CEA. Parmi ceux-ci, des travaux poussés ont été menés sur des téréphtalates lithiés permettant l'obtention de prototypes de batteries organiques (180mAh) ensuite assemblés en configuration Li-ion, avec une densité d'énergie encourageante de 60Wh/kg cellule, et surtout, une tension de fonctionnement proche de celle des accumulateurs Li-ion traditionnels. ■

Évaluer l'impact environnemental d'une batterie selon son design

L'évaluation de l'impact environnemental des batteries Li-ion est complexe, du fait de la grande variabilité de ces systèmes. Bien que la durée de vie de la batterie soit un paramètre essentiel pour le calcul de l'impact final, elle est bien souvent fixée arbitrairement dans ces études. Pour y remédier,

le CEA-Liten a développé une nouvelle méthode qui intègre un modèle de vieillissement directement dans l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), afin de prédire la durée de vie en fonction des paramètres de conception. Ce modèle est facilement paramétrable et vise à être utilisé comme outil d'éco-

conception. Il pourrait mettre en évidence de nouveaux leviers d'actions, dès les premières étapes de conception, pour réduire l'impact environnemental des batteries. ■



Une approche innovante pour simplifier la réparation des modules batteries

Minimiser l'impact environnemental des systèmes batteries, dès leur conception, est aujourd'hui un enjeu incontournable pour une mobilité électrique durable. Très impliqué dans cette démarche, le CEA-Liten développe un module batteries réparable, dans lequel le remplacement des cellules défectueuses est facilité, grâce à l'utilisation de connectiques sou-

ples. Cette solution ingénieuse permet également de réutiliser l'ensemble des parties mécaniques et électroniques de la batterie en fin de vie, ou suite à un défaut de cellules. L'architecture mécanique et électrique du module ont été validés expérimentalement. ■

Règlementation pour une filière batteries européenne durable

Le Centre commun de recherche de l'Union Européenne a publié durant l'été 2023 son projet de Règlementation pour la production de batteries à faible empreinte

carbone. Les experts du CEA et du BRGM ont commenté la méthodologie proposée. Découvrez leurs recommandations ici. ■



Un fluide en ébullition pour contrer la montée en température des batteries

Les batteries de véhicules électriques nécessitent un contrôle efficace de leur température, tant pour des raisons de sécurité, pour éviter un emballement thermique, que pour augmenter leur durée de vie. La recherche d'une solution optimale de gestion thermique est donc essentielle. Le CEA-Liten a évalué le refroidissement direct des composants par un fluide

diélectrique, solution habituellement mise en œuvre dans les data center. Le principe : le fluide passe en ébullition en cas de surchauffe locale. Une boucle diphasique a été mise au point pour étudier expérimentalement ce phénomène d'ébullition confinée à l'échelle mini-canal entre 2 cellules. Les résultats ont été confrontés avec succès à l'approche numérique menée en parallèle.

Ce système de refroidissement s'avère être une solution efficace et prometteuse pour évacuer la chaleur. ■

20



De l'aérogel de silice pour stopper l'emballement thermique des batteries

La société Enersens est spécialisée dans la production de feuillets à base d'aérogels de silice, aux propriétés d'isolation thermique exceptionnelles. Dans le cadre d'un projet EasyPOC, le CEA a caractérisé ces feuillets comme barrière à la propagation de l'emballement thermique de cellules Li-ion pour l'application automobile. L'objectif était de caractériser finement les mécanismes en jeu, via des essais en conditions abusives. Pour optimiser encore l'utilisation de ce matériau, les feuillets ont été

caractérisés en fonction de leur épaisseur et d'une force de compression simulant celle subie lors du gonflement des cellules. Le comportement des différents matériaux face aux contraintes complexes des emballages thermiques a ainsi été étudié et les solutions optimales sont désormais proposées par Enersens aux fabricants de batteries. ■

Accélérer les méthodes d'analyse des batteries lithium-ion

Chaque année, une large quantité d'images et de données associées sont générées par les laboratoires du CEA-Liten et du CEA-Irig, au sein des différents projets relatifs aux batteries via les grands instruments (ESRF, ILL). Pour optimiser leur stockage et leur traitement, Victor Vanpeene, jeune chercheur, a soumis un projet de gestion de données massives dans le cadre du programme Science Impulse.

Concevoir des outils intelligents et automatisés

L'enjeu est de développer des solutions de stockage, d'archivage et de hiérarchisation des images acquises, puis de les rendre accessibles à tous les chercheurs via une base de données commune. Pour y parvenir, il s'agit de concevoir des outils d'étude plus automatisés et plus intelligents, pour accélérer l'analyse des données acquises sur les différentes chimies de batteries étudiées.

Au croisement de divers projets de caractérisation

Ce projet a vocation à soutenir directement le fonctionnement du Grenoble Battery Hub – conjointement créé par l'ESRF, l'ILL et le CEA – dont la vocation est de proposer des modes d'accès alternatifs aux grands instruments. Les études transverses qui y sont menées permettent d'accéder à des problématiques batterie très complètes : post mortem abusif et/ou caractérisation électrochimique extrêmement poussée, couplé avec diverses techniques de scattering et/ou tomographie des batteries. Concernant la tomographie,



le jeune chercheur déclare que «la quantité de données obtenues les trois dernières années dépasse les 15 téraoctets et le taux de croissance prévu s'élève à 3 téras par an. Or, il faut pouvoir travailler efficacement sur ces informations, les valoriser et en tirer des conclusions pour avancer.» ■



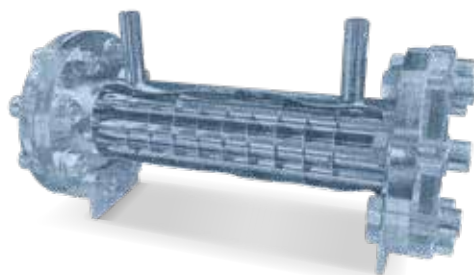
Hydrogène, molécules et carburants durables

Le CEA-Liten explore diverses options pour décarboner les usages, stocker l'énergie et flexibiliser le mix énergétique. Ses travaux couvrent la production, le stockage, le transport, et la conversion de l'hydrogène en électricité (et chaleur), ainsi que la production de molécules carbonées d'intérêt. Ces dernières s'obtiennent en utilisant de l'hydrogène, de l'énergie, et en transformant du CO₂ ou des bioressources. Secteurs applicatifs visés : l'industrie et les transports.

L'institut privilégie des choix technologiques axés sur la performance, la réduction des coûts et la durabilité. Il étudie la technologie d'électrolyse haute température SOEL, prometteuse pour une production efficace et économique d'hydrogène, et la technologie basse température AEMEL, aux performances élevées. Concernant la conversion, l'accent est mis sur la PEMFC basse température, compacte et haute performance et côté transport et stockage, ce sont les Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) qui retiennent son attention.

Les projets de valorisation du CO₂ ou de ressources carbonées dans lesquels le CEA-Liten s'implique visent à produire des molécules carbonées à partir d'hydrogène et d'énergie renouvelable ou nucléaire, avec un accent particulier sur le méthane, le méthanol et le kérosène. Elles sont particulièrement utiles pour l'énergie, la chimie et le transport longue distance. Pour ce faire, l'institut s'appuie sur ses compétences en modélisation, design de réacteurs et génie des procédés.

Les avancées technologiques de l'institut sont évaluées via des essais en interne, pour valider le potentiel et l'intégration des innovations dans le paysage énergétique mondial. Ses recherches ont conduit à des transferts technologiques tels que Genvia dans la production d'hydrogène, Symbio, Inocel et Faurecia dans le domaine des piles à combustible, ou Khimod sur la méthanation.



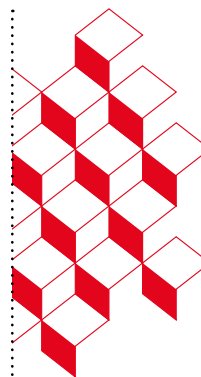
L'institut privilégie des choix technologiques axés sur la performance, la réduction des coûts et la durabilité.



Vers une durabilité accrue des cellules céramiques à conduction anionique

Le projet CELCER-EHT du PEPR H2 vise le développement de matériaux et de procédés innovants pour la fabrication à taille préindustrielle (200cm²) de cellules d'Électrolyse de la vapeur d'eau à Haute Température (EHT) présentant des performances et une durée de vie accrues par rapport à l'état de l'art actuel. Il rassemble les compétences de 11 laboratoires académiques, dont le CEA. Les premiers travaux ont porté sur l'optimisation des électrodes

avec la mise en œuvre de structures multicouches intégrant des microstructures avec un gradient de taille de particules et de porosités. Cette première génération de cellule a fonctionné près de 6 mois (>4000h) avec un taux de dégradation inférieur à 1%/1000h. Des matériaux innovants pour l'électrode à oxygène sont également à l'étude, qui seront intégrés aux prochaines générations de cellules CELCER EHT. ■



Record

1 tonne d'hydrogène

a été produite
par électrolyse
haute température
sur un unique stack.



24

La modélisation au service de l'électrolyse haute température

La montée en maturité de la technologie de production d'hydrogène par électrolyse haute température (EHT) vise l'intégration des stacks dans des systèmes industriels de forte puissance. La modélisation joue un rôle clé pour accompagner le déploiement de la technologie ; en modélisant les mécanismes

physico-chimiques en jeu, elle permet de mieux dimensionner les composants et d'orienter le choix des architectures. Un premier modèle 3D a été construit à l'échelle d'un stack unitaire composé de cellules de 200 cm², qui intègre simultanément les effets thermiques, fluidiques et

électrochimiques. Les premiers résultats permettent d'ores et déjà de connaître les champs de température à l'intérieur du stack en fonction de ses points de fonctionnement. La poursuite de cette démarche permettra à terme d'optimiser les stratégies de pilotage. ■

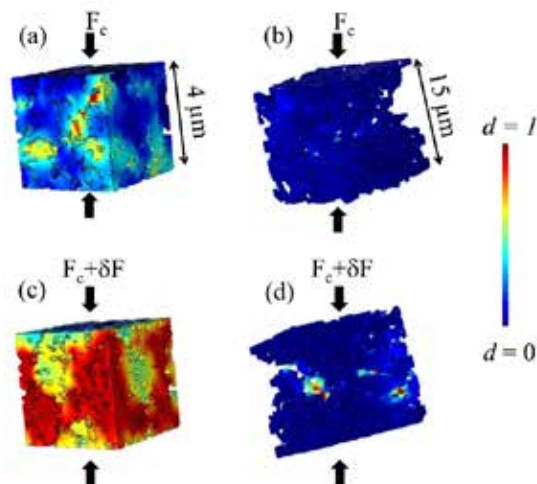
Une compréhension approfondie de la robustesse mécanique des cellules à oxyde solide

CONTEXTE

La technologie d'électrolyse de vapeur d'eau à haute température (EHT) permet de convertir l'électricité produite par des énergies renouvelables ou des centrales nucléaires en hydrogène. Le composant clé de cette technologie, la cellule à oxydes solides, est constitué d'un électrolyte en céramique dense prit en sandwich entre deux céramiques poreuses, les électrodes. Cette alternance de couches de natures différentes génère des contraintes thermo-mécaniques qui peuvent induire une baisse significative des performances de l'électrolyseur.

APPROCHE & RÉSULTATS

Pour augmenter la durée de vie des systèmes EHT, il est nécessaire d'améliorer la robustesse mécanique de ces cellules à oxyde solide. Ceci implique de pouvoir prévoir l'amorçage et la propagation des fissures dans les électrodes, dont les microstructure 3D se révèlent très complexes à analyser. Ces phénomènes ont été étudiés au CEA dans le cadre d'une thèse, en collaboration avec l'INSA Lyon. Un travail de modélisation a été mené pour identifier les zones dans la microstructure à partir desquelles les fissures sont susceptibles de s'amorcer puis se propager [1]. Pour valider cet outil de modélisation, des données expérimentales très spécifiques étaient nécessaires. Des essais de micro-mécanique ont été mis en œuvre pour caractériser les matériaux à une échelle représentative des couches d'électrodes (dizaines de microns). Après avoir réalisé des micro-pilliers sur l'équipement de faisceau d'ion du CEA-Leti, les échantillons ont été testés à l'INSA. La limite à rupture en compression du matériau a ainsi été déterminée à différents niveaux de porosité. Au-delà de la validation du modèle théorique, ils ont également permis de comprendre les mécanismes d'endommagement mis en jeu. Pour la céramique testée faiblement poreuse, la rupture présente un comportement fragile, tandis qu'elle devient diffuse à forte porosité. Dans ce dernier cas, on observe le développement de nombreuses microfissures stables dans le poreux [2].



Visualisation des fissures créées dans les microstructures poreuses soumises à la compression : premières microfissures créées dans la microstructure d'une porosité de a) 33% et b) 63%. Évolution de la variable d'endommagement après une petite augmentation de la charge à c) 33% and d) 63%

Le CEA-Liten dispose d'un outil numérique puissant pour l'étude de la robustesse mécanique des cellules à oxyde solide, qui permettra d'anticiper et de prévenir l'endommagement des électrodes, et ainsi d'optimiser le fonctionnement des systèmes EHT dans la durée.

CONCLUSION

RÉFÉRENCES

- [1] A. Abaza, J. Laurencin, A. Nakajo, S. Meille, J. Debayle, D. Leguillon, « Prediction of crack nucleation and propagation in porous ceramics using the phase-field approach », *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 119, 2022, 103349
- [2] A. Abaza, J. Laurencin, A. Nakajo, M. Hubert, T. David, F. Monaco, C. Lenser, S. Meille, « Fracture properties of porous yttria-stabilized zirconia under micro-compression testing », *Journal of the European Ceramic Society*, 42, 2022, 1656–1669

Des piles à combustibles à base de platine recyclé

Le projet européen Best4Hy vise à recycler les matériaux bruts critiques issus des technologies hydrogène (PEMFC et SOFC) en fin de vie, notamment le platine pour les PEMFC. Les matériaux ainsi recyclés seront remis dans une boucle fermée lors de la fabrication de nouveaux composants pour les deux applications visées. Après avoir comparé différentes

synthèses de catalyseurs réalisées à partir de sels de Pt recyclés, et réalisé la mise à l'échelle de la plus prometteuses, les catalyseurs dits recyclés ont été intégrés dans des encres catalytiques et enfin dans des AME de différentes surfaces. Après avoir optimisée la formulation des encres catalytiques, un AME intégrant 100% de catalyseur recyclé synthétisé a

ainsi été réalisé, testé en monocellule dans des conditions représentatives du fonctionnement en stack de l'industriel, et a montré des performances de plus de 96% @ 1A/cm² par rapport à un AME fabriqué avec des composants commerciaux. Il surpasse l'objectif visé par le projet de 80%. ■

Drone à hydrogène

26

Découvrez en images le vol d'essai du drone à hydrogène développé par le CEA, le Centre de Recherche de l'École de l'air et de l'espace et le Groupe Atechsys.



Améliorer les PEMFC pour applications automobiles

La technologie de piles PEMFC doit encore progresser en vue de son industrialisation pour des applications automobiles. Dans ce contexte, les acteurs du projet européen DOLPHIN, coordonné par le CEA-Liten, évaluent différentes technologies innovantes de fabrication des composants. Des procédés ont été mis en point

pour réduire les dimensions des canaux de distribution de gaz et des dents collectrices de courant. Des enductions d'encres catalytiques ont permis de réaliser des couches actives de grande surface (170 cm²) aux performances électrochimiques reproductibles et similaires à la meilleure référence commerciale connue. Des ministack 6 cellules testés en conditions de fonctionnement représentatives de l'application automobile ont confirmé l'intérêt de ces innovations avec des performances très élevées (1.5 à 2 W/cm² @ 0.66V) et des kW/l et kW/kg nettement améliorés par rapport à l'état de l'art connu. Sur ces bases, un démonstrateur de 5kW doit être réalisé et testé. ■



Sécurité hydrogène : capitalisation des outils de modélisation

Le CEA est engagé dans la recherche pour améliorer la sécurité de l'hydrogène, initialement pour les applications nucléaires, et plus récemment pour la transition énergétique. Un grand nombre d'outils de modélisation ont été développés au fil des années et des projets. Afin de mutualiser ces

résultats et d'en faire profiter tous les acteurs de cette thématique au CEA à l'avenir, un logiciel unique a été créé à la suite d'une collaboration entre le CEA-Liten et le CEA-ISAS, l'institut des sciences appliquées et de la simulation pour les énergies bas carbone. Son architecture modulaire permettra

de le faire évoluer au grès des besoins. Cet outil permettra de vérifier le dimensionnement des éléments de sécurité des installations et des systèmes hydrogène, ou encore pour définir des distances de sécurité. ■



27

Vers une conception plus écologique des systèmes hydrogène en Europe

Le projet européen eGHOST a débuté en 2021 avec l'objectif de promouvoir l'écoconception et la soutenabilité des systèmes hydrogène. Dans ce cadre, le CEA a calculé les indicateurs d'impacts environnementaux, économiques et sociétaux d'un stack de pile à combustible de 48 kW à partir de

données collectées par un partenaire industriel du projet. Objectif de la démarche : intégrer ces critères à la conception de systèmes PEMFC, ou SOFC dans une autre partie du projet, au même titre que les critères de performance, qualité, ou encore sécurité. Forts des conclusions de ces analyses

multi-critères, les partenaires du projet rédigent ensuite des guides d'éco-conception à destination des acteurs de la filière hydrogène, qui aideront à considérer ces aspects dès les premières étapes des développements technologiques. ■

3 questions à...



Muriel Matheron

En charge de la thématique économie circulaire
du carbone au CEA-Liten



01.

Qu'est-ce que le « power-to-x » et le « biomass-to-x » ?

Le power-to-X consiste à utiliser du CO₂ (issu d'une source biogénique ou capté dans l'atmosphère), de l'hydrogène et des énergies renouvelables ou nucléaire pour produire des molécules durables, qui ne soient pas d'origine fossiles. Le biomass-to-X utilise comme source de carbone et d'hydrogène

les composés présents dans la biomasse pour produire des biocarburants ou autres molécules biosourcées : méthane, méthanol, hydrocarbures liquides, oléfines. Ces deux voies concernent des usages tels que le transport longue distance (aérien et maritime), la chimie et l'énergie.

02.

Quelles sont les activités du CEA-Liten sur ce sujet ?

Nous développons des réacteurs optimisés pour la synthèse de molécules carbonées, par des procédés d'hydrogénation catalytique (réacteurs de méthanation), et disposons également d'une expertise en procédés thermochimiques pour convertir la biomasse par voie hydrothermale ou par voie sèche. Ces réacteurs et procédés ont pour vocation de s'intégrer à une chaîne complète de conversion, qui maximise le rendement de conversion du carbone et optimise l'efficacité énergétique globale du système.

Nous exploitons et développons nos compétences en catalyse hétérogène pour améliorer le rendement et la sélectivité des réactions, et apportons notre expertise en thermoconversion à l'étude de la transformation de nouvelles ressources carbonées. Enfin, nous bénéficions d'un accès aux briques technologiques sur l'hydrogène et à l'expertise en optimisation de procédé des chercheurs du CEA-Liten, ce qui est clef pour atteindre les meilleures efficacités des systèmes.

03.

Présentez-nous un exemple de réalisation en 2023

Dans le cadre du projet européen Waste2Road, nous avons valorisé des déchets alimentaires en un biocarburant, apparenté à du « bio-pétrole ». Nous avons transformé la matière première en un produit intermédiaire appelé « biocrude », par liquéfaction hydrothermale. Ce procédé en eau liquide sous pression fonctionne à environ 300 °C et 150 bar. Le bio-

crude a ensuite été hydrotraité chez un partenaire, pour obtenir le biocarburant désiré. Des améliorations sont encore nécessaires pour améliorer le procédé et la qualité du biocrude intermédiaire, mais cette voie semble prometteuse pour la production de carburants durables liquides et de nouveaux projets européens sont en montage pour poursuivre ce travail. ■

Des catalyseurs au service de la transition énergétique

Les catalyseurs sont des matériaux qui facilitent les réactions chimiques et électrochimiques thermodynamiquement réalisables. Ils augmentent les cinétiques de réactions, et grâce à leur sélectivité, peuvent favoriser la production de molécules à forte valeur ajoutée. Les travaux de R&D du Liten portent sur toute la chaîne de valeur, et intègre des analyses technico-économiques et des études ACV. Le processus débute par le développement de catalyseurs à l'échelle laboratoire, suivi d'une évaluation de leurs propriétés visant à sélectionner les plus performants, avant de réaliser le passage à l'échelle supérieure des synthèses pour une validation finale en réacteur. Les caractérisations in situ et operando rendent possible une compréhension fine des mécanismes réactionnels en fonctionnement, et permettent d'accélérer le développement des catalyseurs. Au sein des équipes applicatives, les développements se poursuivent dans trois domaines principaux que sont l'économie circulaire du carbone, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau à haute et à basse température, et la synthèse d'ammoniac.

En 2023, le CEA-Liten a synthétisé et évalué des catalyseurs de type Na-FeMnO_x pour la réaction d'hydrogénation du CO₂ pour la production de molécules carbonées (C5+, e-fuel) dans le cadre d'un projet Carnot. L'objectif était de favoriser le taux de conversion du CO₂ et la sélectivité des réactions. En dopant les molécules avec du cobalt et du cuivre, la sélectivité vis-à-vis de la production d'hydrocarbures est effectivement améliorée.

Dans un autre projet, le CEA-Liten a étudié la réaction de réduction électrochimique du CO₂ en CO, molécule clé dans la synthèse de nombreux produits carbonés. Un catalyseur à base de Pd comme demandé par le



Catalyseur d'hydrolyse du NaBH₄ à base de Co supporté sur une mousse de nickel pour la génération d'H₂.

partenaire a été développé et intégré dans un électrolyseur spécifique utilisant du CO₂ pur, et a permis de générer du CO avec un rendement faradique de 40%. Un projet Europe a été déposé dans le but d'augmenter la surface des électrodes à 100cm², l'intégration se faisant chez un partenaire industriel (TRL5). ■

3 questions à...



Jessica Thery

Cheffe de laboratoire
de la PlateForme NanoCaractérisation



01.

Quels sont les enjeux autour la caractérisation dans le domaine de l'énergie ?

La caractérisation est un outil essentiel pour relier les caractéristiques des matériaux aux performances des dispositifs, et in fine proposer des solutions d'amélioration. Il y a plusieurs enjeux propres à la caractérisation des matériaux dans le domaine de l'énergie. Il est primordial notamment de collecter des informations sur des zones représentatives des matériaux et des systèmes, par exemple en réalisant des acquisitions à différentes échelles, ou encore en travaillant en 3 dimensions. Un autre point très

important, c'est d'être le plus représentatif possible des mécanismes en jeu en fonctionnement, via notamment le développement d'analyses in situ. Enfin, combiner approche expérimentale et simulation permet de pousser l'interprétation de nos jeux de données et donc d'aller plus loin dans la compréhension des mécanismes en jeu. Dans tous les cas, la maîtrise d'outils et méthodes numériques est indispensable, pour améliorer l'acquisition des données, les méthodes d'interprétation, l'analyse des données.

02.

De quels moyens dispose le CEA-Liten ?

Notre équipe Liten compte une vingtaine de personnes. Nous avons de la chance de travailler avec le LETI et l'IRIG sur la PlateForme NanoCaractérisation, en mutualisant l'utilisation d'une cinquantaine d'équipements de caractérisation avancée. Un effort particulier est

porté par la plateforme pour intégrer des équipements à l'état de l'art et clefs pour nos enjeux. Je citerai par exemple l'installation récente d'un laser sur un FIB pour accéder aux zones enterrées des batteries.

03.

Sur quels sujets avez-vous travaillé en 2023 ?

Nous avons par exemple mis en place des méthodes à différentes échelles pour caractériser finement des aimants NdFeB et quantifier les phases, taille de grains et joints de grains, avec notamment des éléments légers comme le bore qui nécessitent l'utilisation de détecteurs spécifiques. Ce travail a

d'ailleurs pu se faire grâce à la collaboration avec l'IRIG sur la PFNC. Nous travaillons sur de nombreux autres sujets, comme la compréhension du vieillissement des cellules EHT en stack, les matériaux de batteries recyclés, les couches perovskites pour les cellules tandems, la caractérisation des PEMFCs... ■

L'oxygène accommode les allers-retours des ions lithium dans les batteries

CONTEXTE

Les électrodes à base d'oxydes de métaux de transition lamellaires, sont largement utilisées dans les batteries lithium-ion à haute densité d'énergie. Au cours du cyclage ces matériaux subissent des variations structurales et morphologiques, responsables de leur perte de performance. Appréhender ces mécanismes nécessite des approches innovantes qui couplent expérience et simulation. Une équipe du CEA a clarifié le rôle des atomes d'oxygène pendant la désinsertion du lithium fournissant une base théorique et méthodologique pour la recherche de matériaux exploitant l'activité de l'oxygène.

APPROCHE & RÉSULTATS

Le succès des oxydes de métaux de transition lamellaires (LiMO_2 , M : Ni, Co, Mn) comme matériaux d'électrode positive est dû à leur capacité à intercaler de manière réversible les ions lithium en préservant l'intégrité cristalline de l'électrode. Bien que LiCoO_2 , soit l'un des matériaux cathodiques les plus étudiés et utilisés^[1], les mécanismes en jeu à l'échelle électronique lors de la désinsertion du lithium ne sont toujours pas clarifiés. Pour comprendre le rôle des atomes d'oxygène et du cobalt, des approches originales couplant méthodes expérimentales nouvelles et simulations ab-initio^[2] ont été développées. Grâce au couplage de la spectroscopie de photoélectrons à rayonnement-X à haute énergie (HAXPES)^[3] avec les calculs atomistiques, ce travail révèle pour la première fois le rôle des orbitales de l'oxygène dans l'autorégulation de la charge autour des atomes du cobalt pendant la désinsertion du lithium. La participation du cobalt et de l'oxygène dans le processus redox est analysée en quantifiant la répulsion Coulombique entre les orbitales « d » du cobalt et le transfert de charge entre les orbitales du cobalt et de l'oxygène « p-d » le long de la désinsertion des ions lithium entre la phase LiCoO_2 et CoO_2 ^[4]. La figure 1 illustre le transfert de charge négative entre les orbitales « p » de l'oxygène et « e_g » du cobalt lors de la désinsertion des ions lithium. Ce résultat montre le rôle majeur que joue l'oxygène dans les mécanismes redox dans les matériaux de type LiMO_2 , en particulier ceux riches en lithium et Nickel destinés aux batteries de prochaines générations.

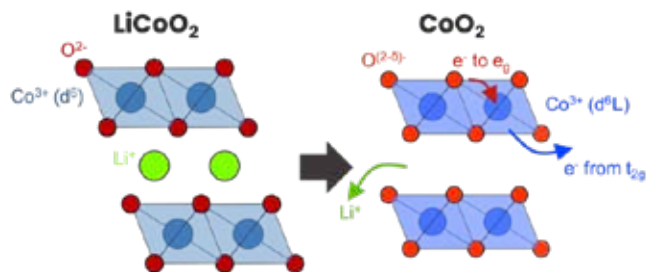


Figure 1: Autorégulation du transfert de charge entre les orbitales « p » de l'oxygène et « e_g » du cobalt lors de la désinsertion des ions lithium.

Ce travail présente une avancée majeure dans la compréhension des mécanismes de transfert de charge dans les batteries Li-ion et dans l'interprétation des processus électrochimiques aux interfaces entre matériaux d'électrode et électrolyte. Une meilleure compréhension de ces aspects permet d'apporter des solutions innovantes pour stabiliser les interfaces dans les batteries du futur.

CONCLUSION

RÉFÉRENCES

- [1] A. Manthiram and J. B. Goodenough, Layered lithium cobalt oxide cathodes, *Nat. Energy* 6, 323 (2021).
- [2] Travail de thèse de Roberto Fantin, qui s'inscrit dans le cadre du programme FOCUS-Batterie. Les mesures HAXPES sont réalisées à la Plateforme de Nano-caractérisation (PFNC).
- [3] Roberto Fantin, Ambroise van Rookeghem, and Anass Benayad, *Surf Interface Anal.* 2022; 1–7.
- [4] Roberto Fantin, Ambroise van Rookeghem, and Anass Benayad, *PRX ENERGY* 2, 043010 (2023).



Matériaux et économie circulaire

La contribution du CEA-Liten à une économie circulaire respectueuse de l'environnement s'articule autour de ses compétences plurielles : écoconception, caractérisations des matériaux et des assemblages, fabrication de pièces au design original, développement sûr et durable, analyse du cycle de vie ou encore procédés à faible impact environnemental, compatibilité matériau/environnement, chimie et recyclage.... Son approche vise à favoriser la durabilité et la gestion efficace des ressources en développant des procédés innovants et adaptés aux besoins de ses partenaires industriels et académiques.

Son atout différenciant : sa capacité à concevoir des pièces au design unique et à répondre aux besoins les plus divers de ses partenaires, dont les applications visées vont de l'automobile à l'énergie nucléaire en passant par la santé, l'aéronautique et le spatial ainsi que les nouvelles technologies de l'énergie. À l'aide de ses plateformes et de ses experts, l'institut favorise le passage à l'échelle industrielle de ses procédés. Les différentes technologies maîtrisées par le CEA-Liten challengent les traitements conventionnels des matériaux afin d'en optimiser les performances. Au cœur de sa stratégie se trouve ainsi son expertise reconnue en caractérisations microstructurale et mécanique des matériaux et des assemblages, en fabrication additive et électronique imprimée mais aussi en brasage et en compression isostatique à chaud (CIC).

Enfin, et dans l'objectif de créer des boucles de recyclage fermées et réduire leur empreinte environnementale, le CEA-Liten traite les matériaux critiques des énergies renouvelables, notamment les batteries Li-ion, et les matériaux polymères. Guidé par l'économie de matière, l'institut réexploite autant que possible des matériaux rares et coûteux et utilise des matériaux biosourcés voire biodégradables au détriment des pétrosourcés.



33

“

Favoriser la durabilité et la gestion efficace des ressources en développant des procédés innovants.

”

Orano et le CEA collaborent pour recycler les batteries Li-ion

Les évolutions réglementaires européennes tendant vers le développement des véhicules électriques d'ici 2035 nécessitent d'anticiper les filières de recyclage des batteries Li-ion. Impliquée sur ce sujet, le groupe Orano collabore depuis 2019 avec le CEA à la mise au point d'un procédé innovant, allant de la mise en sécurité des modules batteries à la production de nouveaux matériaux de cathode. Ces travaux bénéficient de plusieurs financements tant au niveau français, au travers de la région Nouvelle-Aquitaine et le soutien du plan France Relance, qu'au niveau européen avec deux aides du programme-cadre de l'UE (Horizon Europe) dédié à la R&D et l'innovation (projets Batraw, Respect).

Orano et le CEA collaborent ainsi au développement d'un procédé de recyclage complet, qui répond à l'ensemble des exigences économiques, législatives et environnementales. La première étape consiste à mettre en sécurité les modules issus des packs batteries de véhicules électriques, sans altération ni perte des matières. Le pré-traitement permet ensuite de séparer sélectivement et de concentrer les matériaux d'intérêt, notamment les matériaux actifs de cathode et le graphite. Enfin, l'hydrométallurgie combine différents procédés chimiques, notamment des étapes de dissolution, d'élimination des impuretés métalliques résiduelles et des étapes d'extraction, qui permettent l'obtention de précurseurs réutilisables pour la fabrication de nouveaux matériaux de batterie. Ce procédé de recyclage assure également une meilleure valorisation des matières (cuivre, aluminium...) mais aussi le graphite



de l'anode dont la régénération au grade batterie est à l'étude. En 2023, une autre voie complémentaire dite « directe » a également été explorée. Elle consiste à régénérer les matériaux de cathode issus de rebuts de lignes de fabrication provenant des gigafactories ou issues de batteries en fin de vie. Cette méthode s'appuie sur la récupération de la matière active de la manière la plus sélective possible, puis sur la possibilité de réordonner les structures cristallines potentiellement endommagées. Elle nécessite de définir des traitements de recyclage qui soient sélectifs, non destructifs des matériaux de cathodes et compatibles avec une approche industrielle. Des résultats encourageants ont été obtenus, avec la récupération par traitement thermique de 90 % de la capacité initiale d'une NMC Ni-rich (nickel, manganèse, cobalt) issue de black mass de cellules cyclées. ■

Vers une électronique imprimée plus durable

L'électronique imprimée a démontré son intérêt dans divers secteurs applicatifs, dont celui de l'automobile, pour sa capacité à produire à bas coût des circuits conformables sur de grandes surfaces. L'enjeu aujourd'hui est de mieux considérer l'impact environnemental de cette technologie. Sous l'impulsion de l'Europe, les projets se multiplient pour substituer les polymères d'origine pétrolière par des polymères

biosourcés, et plus largement pour adopter des matériaux moins toxiques et dont l'empreinte environnementale sera la plus faible possible. Il s'agit également de considérer les aspects de fin de vie des produits dès leur conception, pour faciliter leur démontage et de ce fait leur recyclage. Le CEA-Liten, acteur majeur avec plus de 15 ans d'expertise dans le domaine de l'électronique imprimée, joue

un rôle dans cette transition en s'impliquant dans plusieurs projets européens. Sa force réside dans la complémentarité des compétences de ses équipes développant les procédés d'élaboration de l'électronique imprimée allant des polyméristes, en passant par les spécialistes du recyclage et les experts en Analyse de Cycle de Vie (ACV). ■

Réduire l'impact environnemental des matériaux plastiques

La production mondiale de plastiques a atteint 390,7 millions de tonnes en 2021. Les projections indiquent que ce chiffre pourrait atteindre 1 200 millions de tonnes d'ici 2060. Depuis plusieurs années, le CEA-Liten développe des matériaux polymères biosourcés, potentiellement biodégradables, en remplacement des matériaux pétrosourcés dans l'objectif de limiter les émissions de gaz à effet de serre liés à cette production. Les travaux sur la synthèse et la fonctionnalisation de nouveaux thermoplastiques biosourcés à architecture contrôlée ou de précurseurs biosourcés pour la fabrication de résines thermodurcissables permettent d'ajuster au mieux les structures macromoléculaires, en fonction des cahiers des charges des partenaires. À partir des polymères synthétisés

au laboratoire ou de matériaux biosourcés commerciaux, le laboratoire développe ensuite des biocomposites thermoplastiques par le procédé d'extrusion bi-vis. Produits sous la forme de granulés, ils peuvent ensuite être utilisés en injection plastique.

Ces compétences permettent aujourd'hui d'envisager le déploiement de ces nouveaux matériaux biosourcés dans des technologies clés pour le CEA, liées notamment à la transition énergétique, aux systèmes électroniques ou à la Médecine du Futur. ■



Éprouvettes de matériaux biosourcés. Fibres polymères en blanc, et fibres naturelles pour les éprouvettes colorées (lin, chanvre, coco).

Des matériaux architecturés innovants en impression 3D

Parmi ses nombreux atouts, la fabrication additive permet d'aller au-delà des performances de matériaux massifs par la réalisation de matériaux architecturés innovants, présentant par exemple des structures cellulaires. Avec la maîtrise des procédés d'impression 3D et la physique des matériaux, les outils digitaux de conception algorithmiques et implicites permettent d'optimiser et customiser le comportement d'un composant pour qu'il réponde à des contraintes thermiques ou mécaniques très particulières. Et de proposer une réponse à un cahier des charges en des temps très courts, avec des possibilités de personnalisation et de modularité. Dans le cadre d'un partenariat industriel, le CEA-Liten a ainsi développé une matelassure de siège de véhicule, qui s'adapte à l'anatomie du conducteur, présente une meilleure respirabilité, un gain de masse et se recycle plus facilement. ■



Exemple de structure cellulaire réalisée en impression 3D.

Améliorer les performances d'échangeurs thermiques grâce à la fabrication additive métallique

La société MOTA a sollicité l'expertise du CEA pour concevoir un échangeur thermique pour refroidir les moteurs de bateaux. Objectif : exploiter les opportunités offertes par la fabrication additive en terme de géométries complexes pour fabriquer des échangeurs innovants optimisant les performances

thermo-hydrauliques. Fort de ses compétences en design et modélisation, le CEA a proposé un concept utilisant les structures cellulaires TPMS, améliorant la compacité de la structure tout en garantissant les performances thermiques attendues. Un prototype à échelle réduite a ensuite été

réalisée par fabrication additive métallique, pour valider les concepts retenus et qualifier la fabricabilité d'un tel échangeur complexe. La validation expérimentale réalisée par MOTA permet de valider les performances thermiques et d'ouvrir les pistes d'optimisation du dimensionnement de tels concepts ■

Révolution du recyclage des aimants dans les moteurs électriques

Un défi majeur de l'industrie consiste à réduire l'utilisation des terres rares tout en maintenant les performances des moteurs électriques. Or, les aimants des moteurs sont difficilement accessibles et démontables pour pouvoir alimenter une filière de recyclage. Leur collecte est particulièrement délicate du fait des formes traditionnelles des aimants qui imposent, le plus souvent, des solutions d'assemblage irréversibles dans les moteurs. Pour y remédier, il est essentiel d'intégrer la contrainte de démontage dès la conception des aimants : des formes complexes ont été envisagées comme une solution idéale. Cependant, les procédés classiques ne permettent pas de produire ces géométries sans une perte importante de matière critique lors de l'usinage, ce qui est par ailleurs coûteux.

Le projet Melchior réalisé en collaboration avec IFPEN a permis de développer un moteur électrique éco-conçu représentatif

des besoins du secteur automobile. La clé de cette innovation : la forme des aimants, qui permet un démontage et une récupération aisée, tout en améliorant les performances de la machine. Pour y parvenir, le CEA-Liten développe le procédé PIM, pour Power Injection Molding, pour fabriquer directement les aimants à la forme.

Ce moteur affiche ainsi une puissance de 125 kW par kg d'aimant permanent, ce qui représente une économie de plus de 30 % par rapport à l'état de l'art. En ce qui concerne l'impact environnemental, une Analyse de Cycle de Vie préliminaire a montré que plus la forme de l'aimant est complexe, plus les pertes de matière lors de l'usinage sont importantes avec les procédés traditionnels, donnant un avantage significatif au procédé PIM. Un gain supplémentaire de 35 % les émissions de CO₂ nécessaires à la fabrication des aimants est attendu en s'appuyant sur le recyclage des aimants par une voie courte. ■



Des équipements sur mesure pour la R&D

Les 12 plateformes technologiques du CEA-Liten ont chacune leurs spécificités, du fait de la grande diversité des sujets étudiés. On peut cependant citer un point commun, au cœur de toutes les démarches de R&D de l'institut, qu'est l'indispensable triptyque « Essais / Modélisation-Simulation / Caractérisation » pour comprendre les phénomènes mis en jeu et accompagner les montées en maturité des technologies. Les laboratoires du CEA-Liten ont développé des savoir-faire internes sur les équipements et outils indispensables à cette démarche.

Dès le début de l'activité sur la production d'hydrogène par électrolyse haute température (EHT), pour mieux maîtriser les résultats expérimentaux, les équipes ont conçu et fabriqué leurs premiers bancs de test de composants et de cellules, puis sont montées en gamme au fil du temps pour aller jusqu'aux modules EHT. L'avantage principal étant de disposer d'équipements fiables, robustes, entièrement maîtrisés, qui fonctionnent dans les conditions optimales pour l'évaluation d'une technologie donnée. Le dernier banc en date a été construit et mis en service en seulement 5 mois, pour étudier la durabilité de stacks de 10 à 30 kWdc, en visant 10000 heures d'essais, et ainsi d'accompagner le passage à l'échelle de la technologie. ■

À la même période, partant d'un constat sur l'absence d'équipements disponibles pour étudier la fragilisation par l'hydrogène gazeux des matériaux métalliques, une autre équipe a rédigé les spécifications d'une première machine d'essai haute pression. Elle a ensuite collaboré avec Top Industrie afin d'acquérir un deuxième équipement sous pression d'H₂, dont le développement a bénéficié de l'expérience acquise au CEA. Cette compétence du CEA-Liten est actuellement mise à profit dans le cadre d'un étroit partenariat avec le CETIM, pour étudier finement le comportement des matériaux en présence d'hydrogène et définir des protocoles dédiés. ■



En fabrication additive, une équipe du CEA-Liten a mis en place une démarche couplée d'expérimentation et de simulation pour optimiser le procédé d'impression 3D métallique par jet de liant. Un banc instrumenté, représentatif dudit procédé, a été conçu et réalisé pour étudier l'interaction entre le liant et le lit de poudre, et déterminer les paramètres influants. Les données issues du banc permettront d'alimenter et calibrer les modèles numériques. Centrés sur les interactions locales liant/poudre, ces modèles évalueront l'impact des propriétés rhéologiques du liant, des caractéristiques de la poudre, et des paramètres du procédé sur la mésostructure après infiltration du liant. La compréhension des mécanismes en jeu devrait aider à prédire et corriger les défauts d'impression. ■

12 plateformes pour une recherche technologique de pointe

Les 12 plateformes numériques et technologiques du CEA-Liten allient moyens et compétences, au service des activités de R&D de l'institut. Convaincu que la compétitivité passe entre autre par le développement, le test et la validation des innovations sur des équipements pré-industriels, le CEA-Liten investit continuellement pour maintenir ces infrastructures au meilleur niveau mondial. En voici quelques exemples en 2023 :

MISE EN ROUTE D'UN ÉQUIPEMENT D'EXCELLENCE

Dans le cadre du projet Equipex+ Calhipso, qui favorise le développement des industries métallurgiques en France, une nouvelle enceinte de Compression Isostatique à Chaud (CIC) s'est installée dans les locaux du CEA-Liten. Démarré en 2023, cet équipement d'un volume utile de 30L peut atteindre jusqu'à 1400 degrés Celsius et 2 000 bar en fonctionnement. Il est principalement destiné aux matériaux métalliques. ■



39

POUR UN PILOTAGE INTELLIGENT DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

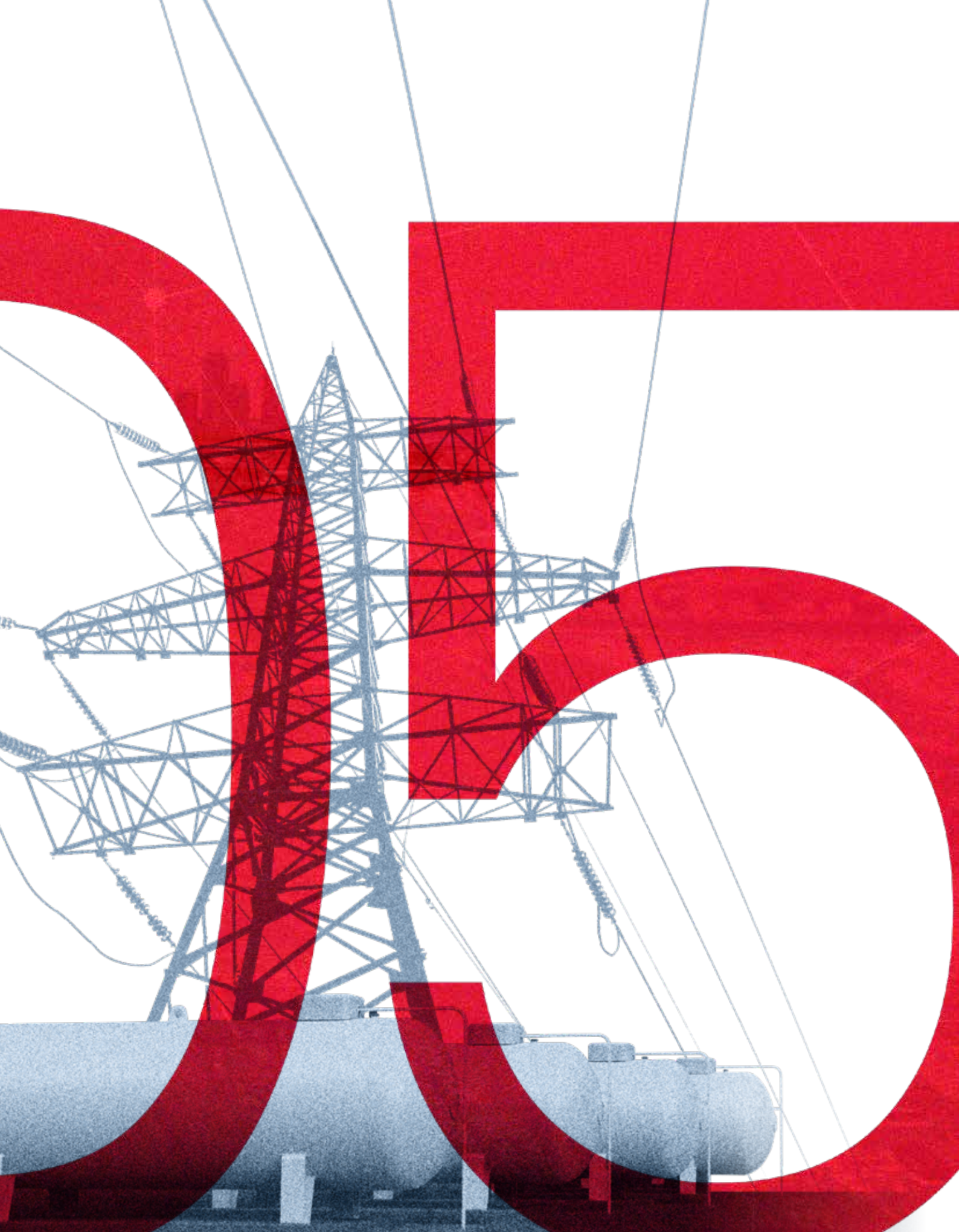
Dans le contexte d'intégration massive de l'énergie solaire, du stockage de l'énergie (batteries, hydrogène) et de la mobilité électrique, le CEA-Liten a inauguré sa plateforme expérimentale Grid Control Lab sur le campus de l'INES au Bourget-du-lac. Elle offre une boucle expérimentale moyenne-tension de 20kV AC, qui peut être isolée ou connectée au réseau public de distribution. Grâce à des systèmes numériques en temps réel, il sera possible de piloter des micro-réseaux. ■



OBTENTION DE LA CERTIFICATION ISO 50001

En août 2023, le centre CEA de Grenoble a obtenu la certification ISO50001 grâce à son engagement en continu d'amélioration de sa performance énergétique et à l'adoption d'un Système de management de l'énergie (SMEn) fondé sur le référentiel de ladite norme. L'optimisation des consommations énergétiques des salles anhydres pour batteries, déjà engagée depuis 10 ans au CEA-Liten, se poursuit dans ce cadre. ■



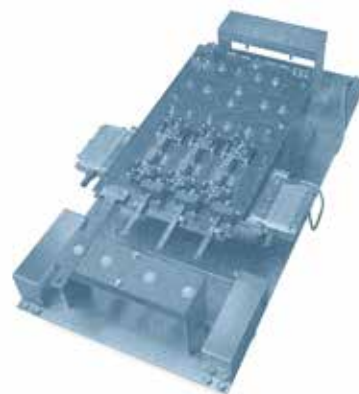


Systemes, réseaux et efficacité énergétique

La transition énergétique vers un système décentralisé et intermittent est un défi complexe que le CEA-Liten relève grâce à sa vision systémique et son expertise diversifiée. De la conception à la mise en application, l'institut optimise les architectures énergétiques selon les besoins de ses partenaires, tout en favorisant la sobriété, l'efficacité et la soutenabilité.

Son approche agnostique des technologies et des vecteurs énergétiques lui permet de repenser les réseaux énergétiques multi-vecteurs, multi-échelles et multi-technologies. Il s'appuie pour cela sur ses compétences en simulation, virtualisation, diagnostic operando, et en pilotage des systèmes pour maximiser leur potentiel, contribuant ainsi à la décarbonation de l'économie.

L'ingénierie thermique et les convertisseurs de puissances constituent une part importante de sa réflexion. Afin de décarboner les processus industriels et valoriser la chaleur fatale, le CEA-Liten développe des solutions logicielles et techniques pour optimiser les systèmes thermiques, le stockage thermique et des technologies prometteuses comme les batteries de Carnot. L'institut œuvre aussi à adapter ses convertisseurs aux réseaux de moyenne tension, un marché très peu adressé aujourd'hui, et à concevoir des convertisseurs compacts, robustes, durables et économes en matériaux. Les matériaux dits « grands gaps », tels que le nitrure de gallium, font partie de ses matériaux favoris pour mener à bien cette mission.



41

“

**Optimiser
les architectures
énergétiques,
tout en favorisant
la sobriété,
l'efficacité et la
soutenabilité**

”

2 questions à...



Alain Ruby

Ingénieur modélisation/simulation
pour les systèmes énergétiques



01.

Dans quel contexte le CEA-Liten a-t-il développé cet outil ?

Dans le cadre de la transition énergétique, les acteurs institutionnels ou industriels cherchent à satisfaire la demande énergétique tout en minimisant les impacts environnementaux et les coûts. Choisir les solutions les plus efficaces nécessite de modéliser les systèmes énergétiques et de simuler différents

scénarios d'approvisionnement pour dimensionner au plus juste les différents composants. Les outils de simulation actuels ayant atteint leurs limites, nous avons recours aux méthodes issues de la recherche opérationnelle, et c'est ce qui a conduit à développer un outil comme PERSEE.

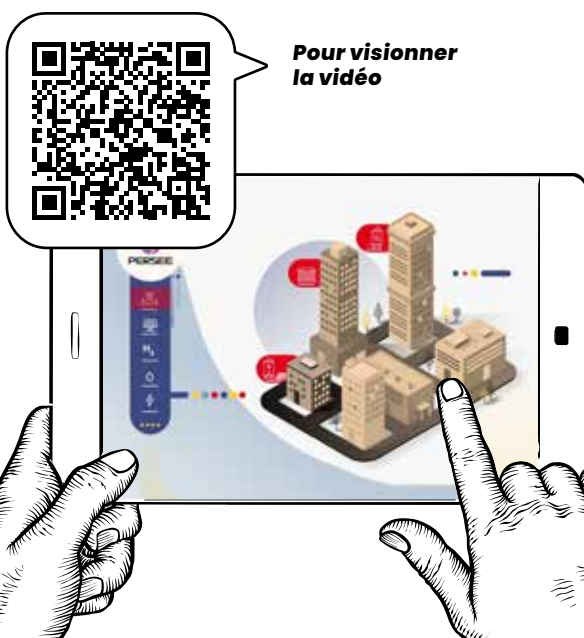
02.

Présentez-nous l'outil PERSEE.

PERSEE est un outil d'aide à la décision qui permet de concevoir, prédimensionner et opérer des systèmes énergétiques complexes, qui peuvent inclure différentes sources d'énergie (électricité, chaleur, de froid...). En modélisant ces systèmes à différentes échelles, au niveau d'un site industriel ou d'un quartier,

on met en concurrence différentes technologies pour évaluer leurs apports dans le mix énergétique. On peut étudier par exemple la mise en concurrence d'un brûleur gaz, d'une co-génération biomasse et de pompes à chaleur décentralisées.

Par l'optimisation avec PERSEE sur une année type, les différents composants sont dimensionnés et contrôlés de manière optimum pour réduire les coûts d'investissement et d'opération sous différentes contraintes d'émissions environnementales. On va ensuite évaluer la représentativité des mix énergétiques obtenus en appliquant, à un simulateur du système réel, des trajectoires de pilotage optimales à plus court terme calculées par PERSEE. L'objectif est alors d'anticiper et évaluer la performance du système réel par rapport aux indicateurs de performance attendus. On en tire une meilleure confiance dans la pertinence des résultats obtenus : les modèles utilisés étant plus fins, et les prévisions de besoin énergétique plus réalistes, on obtient des conditions plus représentatives de l'utilisation réelle du système. ■



Optimiser les systèmes énergétiques complexes

2

exemples de réalisation

MICHELIN

Le CEA a accompagné Michelin dans l'optimisation énergétique de l'un de ses sites industriels. Une méthodologie complète d'accompagnement a été proposée au travers de la modélisation de l'architecture actuelle du site et la simulation d'un ensemble de scénarii d'évolutions technologiques permettant de définir une architecture optimale en termes d'efficacité énergétique, de décarbonation et de réduction des consommations en eau. ■

L'OCCITANE

Le site de production de L'OCCITANE EN PROVENCE à Lagorce (07) vise à maximiser son autonomie énergétique et sa sobriété hydrique d'ici 2030. Le CEA a défini et modélisé sous PERSEE une combinaison de solutions technologiques optimale (photovoltaïque, solaire thermique, et capacités de stockage électrique et thermique, biomasse, pompes à chaleur...). L'architecture ainsi définie répond au meilleur compromis d'efficacité énergétique, d'économie d'eau et d'émissions CO₂ du site. ■

Vue aérienne du site de production de L'OCCITANE EN PROVENCE, à Lagorce.



Accompagner la rénovation énergétique du bâtiment

Représentant 36 % des émissions de CO₂ et 40 % de la consommation d'énergie, le parc de bâtiments est encore loin d'être durable. Le CEA-Liten est engagé dans différentes initiatives visant à faire évoluer la rénovation des bâtiments. Il coordonne le projet EASI ZERO, qui vise à créer un portefeuille unique de composants d'enveloppe faciles à installer, avec l'objectif d'accroître de 20 % la performance thermique des bâtiments. Et ceci en utilisant des matériaux bio-sourcés et recyclés. Les solutions développées seront évaluées sur les bâtiments expérimentaux du site de l'INES (illustration). Le CEA contribue également au projet AEGIR*, dont l'objectif est de réduire les coûts et temps de réalisation des travaux de rénovation énergétique. Pour



Maisons expérimentales du CEA pour le test de composants d'enveloppe.

y parvenir, des solutions d'enveloppes modulaires, renouvelables et facilement industrialisables seront développées. ■

* Projet financé dans le cadre d'Horizon Europe.

Maximiser l'injection des gaz verts dans les réseaux de distribution

Dans un paysage énergétique en pleine évolution, les gaz verts peuvent entièrement se substituer au gaz fossile d'ici 2050. Aujourd'hui, le gaz vert injecté dans les réseaux représente 12 TWh soit l'équivalent d'environ 3 millions de logements neufs chauffés au gaz. Cet essor rapide nécessite une évolution de la conduite du réseau de distribution. Depuis janvier 2023, le CEA et GRDF ont mis en place un partenariat pour maximiser l'injection des gaz verts en tenant compte

de la structure du réseau de distribution et des consommations. Partant des outils de la recherche opérationnelle, le CEA a proposé à GRDF un outil permettant d'optimiser les réglages d'exploitation pour injecter le maximum de gaz verts tout en satisfaisant l'ensemble des contraintes opérationnelles du réseau. L'algorithme développé dans le cadre de cette collaboration a été testé avec succès sur plusieurs scénarios d'exploitation réels, et fait l'objet d'une licence

d'utilisation par le partenaire. Ainsi, GRDF disposera d'un nouvel outil pour la conduite du réseau de distribution et répondre aux nouveaux enjeux liés au développement des gaz verts. ■

Des réseaux de chaleur au sein des systèmes énergétiques multi-vecteurs

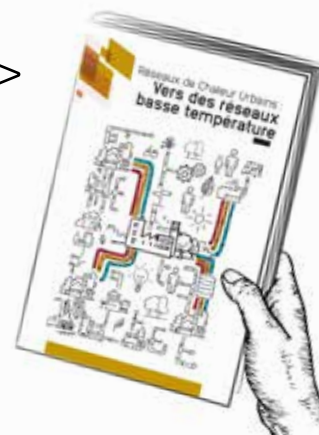
RTE réalise des études prospectives de systèmes énergétiques multi-vecteurs. Dans ce cadre, la société a sollicité les compétences du CEA pour l'aider à représenter les réseaux de chaleur dans son outil logiciel Antares, dans le but d'étudier leur apport de flexibilité à la gestion des réseaux électriques. La méthodologie mise au point a permis de modéliser avec succès différentes centrales de production dans Antares, adressant différents mix énergétiques. Le CEA a également abordé la problématique de

l'agrégation des différents réseaux de chaleur d'une zone géographique en un seul nœud réseau de chaleur représentant cette zone, de façon à rendre possible des calculs à large échelle géographique. Ce travail a abouti à l'établissement de contraintes supplémentaires dans le modèle agrégé, et a ouvert la voie à une représentation à l'échelle nationale en combinant les différentes zones géographiques, les différents types de réseau, et leurs températures dans les bonnes proportions. ■

Les réseaux de chaleur urbains sont un atout précieux pour promouvoir une transition énergétique durable. S'ils sont encore majoritairement basés sur des sources fossiles, la solution pour réduire leur empreinte carbone consiste avant tout à abaisser leur température de fonctionnement. Dans un deuxième temps, des sources d'énergies renouvelables pourront y être intégrées. Comment s'y prendre ? Découvrez les réponses dans ce guide, rédigé dans le cadre du projet européen RES-DHC. ■



**TÉLÉCHARGEZ
LE RAPPORT :**



45



Le CEA-Liten et la startup STORABELLE s'associent pour transformer d'anciennes centrales électriques en gigantesques réserves d'énergie, grâce au stockage d'électricité sous forme thermique. Les deux partenaires s'appuieront sur la technologie du stockage thermique en sels fondus, et sur l'outil logiciel PERSEE du CEA-Liten pour un dimensionnement optimal des installations.

**Pour en savoir plus,
consultez le post LinkedIn**

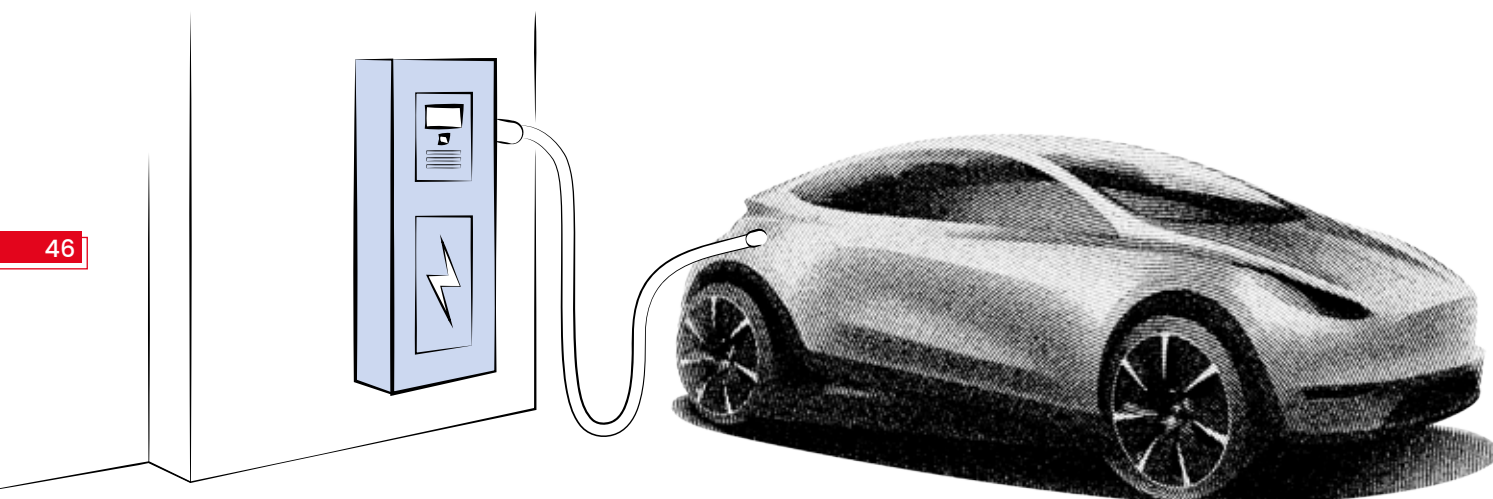


Chargeur embarqué bidirectionnel à très haut rendement

Le CEA et Renault Group ont développé ensemble une nouvelle architecture électronique de convertisseur de puissance, directement intégrée au chargeur du véhicule. Ce convertisseur de puissance, développé à partir de matériaux innovants que sont les semi-conducteurs dits à « Grand Gap », permettra de réduire les

pertes d'énergies de 30 % lors de la conversion, et d'autant l'échauffement. Grâce à l'utilisation de matériaux ferrites, dédiés à la haute fréquence, le convertisseur a également pu gagner en compacité. Sa capacité de charge allant jusqu'à 22 kW en mode triphasé, le véhicule pourra être chargé plus rapidement. Autre

innovation rendue possible par cette nouvelle architecture : le chargeur peut être bidirectionnel. Cela signifie que l'énergie stockée dans la batterie peut être renvoyée vers le réseau, et pallier le caractère intermittent des énergies renouvelables, ou servir à alimenter les besoins en énergie d'une maison autonome. ■



Une compétence concentrée dans la gestion des batteries

Vitesco Technologies et le CEA ont développé une technologie innovante de gestion de l'énergie, appelée SWIBA, qui utilise les cellules, qui composent le pack batterie, de manière individualisée. Ces cellules sont reliées à des interrupteurs de puissance qui peuvent les connecter entre elles ou les mettre de côté par un contrôle dynamique en temps réel. Le dispositif les sélectionne de

manière optimale en fonction de leurs caractéristiques et des modes de fonctionnement du véhicule. Ce fonctionnement individualisé limite les phénomènes ayant un impact sur leur vieillissement et permet donc une augmentation de la durée de vie de l'ensemble du pack batterie et une optimisation de la gestion de l'énergie disponible. En outre, les performances du système sont

améliorées, ce qui se traduit par une autonomie accrue et des temps de charge plus courts. La réalisation d'un démonstrateur a permis de chiffrer ces bénéfices : 6% d'amélioration de l'autonomie du véhicule, 20% de réduction du temps de charge, 15% d'allongement de la durée de vie des batteries. Enfin, l'utilisation en seconde vie des batteries est largement facilitée. ■

Architectures de conversion pour les centrales photovoltaïques de forte puissance

CONTEXTE

Une innovation permettant de s'affranchir des inconvénients des centrales PV actuelles consiste à progressivement étendre la technologie PV vers le domaine de la moyenne tension^[1]. Une topologie électronique de puissance à isolement galvanique intégrée a été conçue pour de futures centrales PV. Elle permettra la mise en œuvre de strings PV plus longs et donc plus puissants, et un raccordement direct au réseau de distribution sans passer par des transformateurs fonctionnant à 50 Hz. Ces travaux ont reçu le prix "young researcher award" lors de la conférence PCIM 2023.

APPROCHE & RÉSULTATS

Grâce à la disponibilité des modules de puissance SiC dans les calibres MT, les transformateurs électroniques de puissance moyenne fréquence sont désormais réalisables, offrant un rendement élevé ainsi qu'une densité de puissance élevée. Dans cette perspective, l'architecture MT proposée Figure 1 met en œuvre une topologie résonnante pour réaliser le convertisseur DC/DC isolé dont la mise en série est connectée à un convertisseur DC/AC (MMC)^[2].

Le bloc électronique de puissance (PEBB) est composé de deux étages de conversion en cascade. Tout d'abord, la recherche du point de puissance maximale (MPPT) est réalisée par un hacheur à trois niveaux. Ensuite, l'isolement galvanique entre le champ PV 2 kV et le collecteur MT continu intermédiaire est fait par un transformateur électronique qui est composé de deux onduleurs monophasés à résonance^[3]. Le banc d'essai du transformateur électronique comporte les power stacks d'entrée (Boost + VSI + dissipateur) et de sortie (redresseur + dissipateur), deux transformateurs fonctionnant à 20kHz (2x30kg réalisé par CEFEM) ainsi que les condensateurs à résonance. Les équipements de la nouvelle plateforme Grid Control Lab du CEA-Liten ont permis de caractériser le convertisseur à puissance unitaire.

La Figure 2 présente les pertes totales ainsi que le rendement du transformateur électronique. Le rendement crête atteint 99,06% lorsque la puissance d'entrée est égale à 140 kW; ce rendement est quasiment maintenu sur 60% de la plage de fonctionnement^[4].



Figure 1: Système de conversion modulaire comportant un collecteur MVDC.

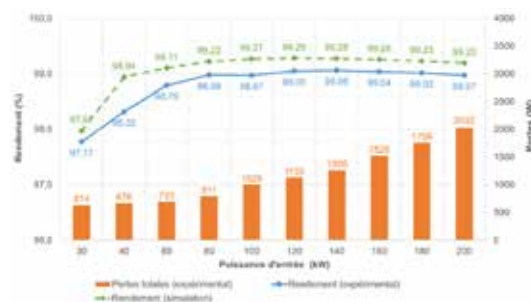


Figure 2: Formes d'ondes à la puissance maximale et rendement de conversion ($V_{in}=2kV$, $I_{out}=100A$).

La suite de ces travaux vise à fabriquer un démonstrateur du collecteur MT en DC^[5]. Il s'agira donc d'associer plusieurs blocs de prototype, et de développer et optimiser les transformateurs MF qui satisferont les contraintes diélectriques imposées par le collecteur MT en DC. L'interaction entre collecteur MT et convertisseur MMC et/ou le réseau de transports/ferroviaire électrifié sera étudiée.

CONCLUSION

RÉFÉRENCES

- [1] A. Bier, O. Wiss, and P. Messaoudi, "A 3 kV, 20 kW Medium-Voltage PV Plant Demonstrator," p. 8, 2017. HAL Id: cea-03780308.
- [2] M. N. Ngo, P. Ladoux, J. Martin, and S. Sanchez, "Silicium-Carbide-Based Isolated DC/DC Converter for Medium-Voltage Photovoltaic Power Plants," *Energies*, vol. 15, no. 3, p. 1038, Jan. 2022, <https://doi.org/10.3390/en15031038>.
- [3] M. N. Ngo and P. Ladoux, "Performance Evaluation of SiC MOSFETs for Isolated DC-DC Conversion in Medium Voltage Photovoltaic Power Plants," p. 9, 2022. • DOI: 10.30420/565822043.
- [4] M. N. Ngo, P. Ladoux, and S. Dumenil, "Implementation and Characterization of a 200-kW Full-SiC Isolated DC/DC Converter for Future Medium Voltage PV Plants". DOI: 10.30420/566091092.
- [5] M. N. Ngo, J. Martin, P. Ladoux, and S. Sanchez, "Comparison of High-Power DC/AC Converters for Medium-Voltage PV Power Plants". <https://doi.org/10.1109/EEE-AM58328.2023.10395366>.

Événements

Cette année encore, l'institut a brillé sur la scène des salons d'ampleur nationale comme mondial, à l'image du CES, d'Hyvolution ou encore de MIX.E. L'organisation à Grenoble de la conférence Nanosafe, le rendez-vous des experts des nanomatériaux, a permis de souligner l'expertise de l'institut sur ce sujet. De façon générale, la présence du CEA-Liten sur ses salons professionnels contribue à renforcer sa position d'acteur majeur et innovant dans les domaines qu'ils adressent.



1



2



3

1. Hyvolution

2. EUPVSEC

3. Nanosafe

4. MIX.E

5. CES



4



5

Décarbonation et R&D pour un avenir durable : franc succès pour l'école d'été RD20 !

Ils étaient 60 doctorants, post-doc ou nouveaux embauchés venant de 15 pays différents à se réunir à Prapoutel (Isère) au mois de juillet pour l'école d'été, une initiative lancée lors du sommet du G20 au Japon. Leur objectif : échanger et partager leurs connaissances autour de la décarbonation des systèmes énergétiques et de la R&D associée.

L'école d'été vise à encourager l'expression et la production de recommandations aux organisations du RD 20 afin d'atteindre les objectifs de réduction des émissions de carbone. Organisée par le CEA et le CNRS, cette semaine de formation a fait émerger un message international commun, issu des jeunes chercheurs, qui apportera une perspective novatrice pour décarboner notre société.

Pour les aider, des orateurs de renom, experts dans leurs domaines, ont présenté des cours de formation sur divers sujets, tels que le photovoltaïque, l'énergie éolienne, les réseaux intelligents, l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie, le stockage de l'énergie, les bioénergies, le captage du carbone, ainsi que des aspects sociétaux des sciences humaines. Leurs recommandations finales portent sur la valorisation des déchets, l'efficacité énergétique et la sobriété, la prise en compte de la criticité des matériaux, le besoin d'indicateurs harmonisés, la nécessité de revoir les cycles de formation

en y intégrant les leviers de la transition énergétique et enfin l'établissement d'un marché du carbone équitable et incitatif.

L'ambition de cette université d'été est que les organisations de recherche des pays du G20 participantes interpellent leurs autorités nationales respectives. En présentant ces propositions et recommandations lors de la prochaine assemblée du G20, elles n'auront qu'un objectif commun : influencer les décisions politiques et contribuer activement à la transition vers un avenir plus durable. ■



Travailler au CEA-Liten

Ils ont récemment rejoint le CEA-Liten, et nous expliquent pourquoi :



Sebastien KAWKA

« J'ai choisi de venir travailler au CEA-Liten pour le haut niveau scientifique dans le domaine des piles à combustible et batteries, et en particulier pour la maîtrise efficace de la simulation numérique et son application au développement de systèmes réels. »

Polyxeni TSOULKA

« Le CEA-Liten, c'est une structure à mi-chemin entre le milieu académique et le milieu industriel. Dans mon laboratoire on travaille sur la dernière génération de cellules solaires et on essaye de trouver des procédés industrialisables pour faire émerger ces matériaux sur le marché ; c'est très motivant pour moi. »



Elie GHANATOS

« Travailler au CEA-Liten c'est participer à la transition énergétique, avoir un rôle et pouvoir agir. On fait de la recherche technologique, pour transférer les innovations à l'industrie : nos recherches sont concrètes, applicables et industrialisables. »



Johannes AST

« Ce qui est remarquable au CEA-Liten c'est qu'on a une plateforme de caractérisation qui permet d'accéder à de nombreux instruments pour étudier des matériaux qui sont très complexes, comme par exemple les pérovskites ou les matériaux des piles à combustible. Comprendre les mécanismes en jeu nous permet d'avancer sur la compréhension de ces applications. »



Vous aussi !

Vous souhaitez devenir acteur de la transition énergétique : consultez nos offres d'emploi et candidatez sur www.emploi.cea.fr



Comité de rédaction, rédaction : CEA-Liten

Conception, réalisation : Matt Design & Communication

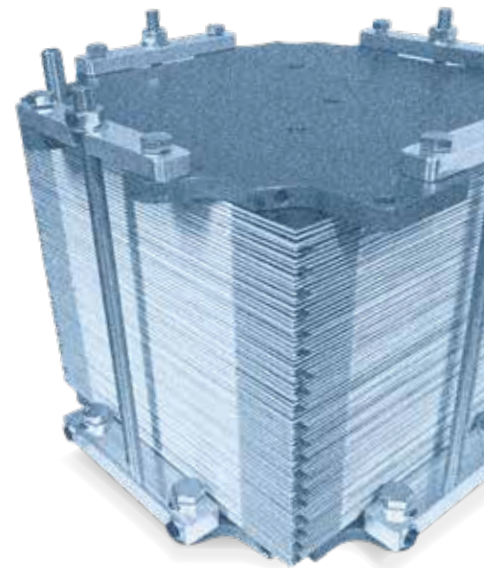
Traductions : SFM Traduction

© **Crédits photos :** CEA, T. Shu, D. Guillaudin, Guerrini, D. Morel, Armée de l'Air, L'occitane, Vendredi 4, F. Ardito, P. Avavian, L. Godart, IFPEN, P. Jayet, No comment, Adobestock, Shutterstock.

Le CEA-Liten est membre du réseau des instituts Carnot.

Merci à l'ensemble de nos partenaires et financeurs.

23



www.liten.cea.fr

