

cea



RAPPORT ANNUEL
CEA-LITEN
2021





François Legalland,
Directeur du Liten

Face au réchauffement climatique, il est plus que jamais urgent de proposer et de déployer massivement des alternatives aux énergies fossiles. Cette prise de conscience conduit la France ainsi que de nombreux pays à mettre en œuvre des politiques publiques volontaristes pour viser la neutralité carbone d'ici trente ans.

La France en a fait une des priorités nationales à travers le plan d'investissement « France 2030 » qui vise à développer et à améliorer la compétitivité des technologies et à bâtir des filières industrielles d'avenir. La performance et la compétitivité de ces technologies passent par la recherche, étape essentielle avant un déploiement à grande échelle ; d'après l'IEA, 45% des technologies nécessaires à la neutralité carbone d'ici 2050 ne sont actuellement pas encore assez matures pour entrer sur le marché.

L'année 2021 a été marquée par une dynamique très forte sur les sujets phares de notre institut, le vecteur hydrogène, que ce soit sa production par électrolyse, son stockage et transport ou son utilisation, les batteries Li-ion, l'économie circulaire du carbone, les réseaux multi-vecteurs, le photovoltaïque haute performance et bien sûr l'éco-innovation et le recyclage. L'excellence scientifique est au cœur de notre ADN avec nos 150 doctorants, nos plus de 210 articles publiés et nos 193 brevets déposés en 2021. Avec la reconnaissance de nos expertises et la confiance de nos partenaires industriels et académiques, nous sommes plus que jamais mobilisés pour relever les défis technologiques liés à l'atteinte de l'objectif « zéro carbone d'ici 2050 » tout en renforçant les filières industrielles associées en France et en Europe.

Pour plus de lisibilité, nous avons fait le choix de présenter cette nouvelle édition en un seul document synthétisant à la fois nos résultats de recherche et nos avancées scientifiques. Ce rapport annuel reflète une année 2021 riche en collaborations et en avancées technologiques, leviers majeurs pour construire une économie compétitive, souveraine et durable.

Rédaction : CEA Liten - Traduction : SFM Traduction

Conception - Réalisation : DEUXPONTS Manufacture d'Histoires

© Crédits photos : CEA, D. Guillaudin, ATAMOSTEC, GRIGaz / D. NICOLAS, F. Ardito, D. Morel, J. Penelon, Shutterstock, P. Jayet, DR

LE LITEN

ACTEUR MAJEUR DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE.	4
ACTEUR DE L'INSTITUT CARNOT ÉNERGIES DU FUTUR	5
L'ÉCOSYSTÈME PARTENARIAL DU LITEN	6

LA PRODUCTION
D'ÉNERGIE
DÉCARBONÉE

LE PHOTOVOLTAÏQUE À HAUTE PERFORMANCE	8
LES NOUVELLES GÉNÉRATIONS PHOTOVOLTAÏQUES	10
LA PRODUCTION PHOTOVOLTAÏQUE MASSIVE	11
LE PHOTOVOLTAÏQUE «EVERYWHERE»	12

STOCKAGE
ET SOLUTIONS
DE FLEXIBILITÉ

LE VECTEUR HYDROGÈNE	14
L'ÉLECTROLYSE HAUTE TEMPÉRATURE	15
STOCKAGE ET TRANSPORT D'HYDROGÈNE	17
LES PILES PEMFC	18
LES BATTERIES	20
LA MOBILITÉ DÉCARBONÉE	23

12 PLATEFORMES POUR UNE RECHERCHE TECHNOLOGIQUE DE POINTE	24
--	----

SYSTÈMES, RÉSEAUX
ET EFFICACITÉ
ÉNERGÉTIQUE

SYSTÈMES ET RÉSEAUX ÉNERGÉTIQUES	26
GESTION DE L'ÉNERGIE THERMIQUE	29
DES CONVERTISSEURS DE PUISSANCE PERFORMANTS	30

ÉCONOMIE
CIRCULAIRE

FABRICATION ADDITIVE	32
PROCÉDÉS ET ASSEMBLAGES COMPLEXES.	33
ÉLECTRONIQUE STRUCTURELLE	34
CHIMIE VERTE ET RECYCLAGE	35
ÉCONOMIE CIRCULAIRE DU CARBONE.	37

LE LITEN, ACTEUR ENGAGÉ DANS LA FORMATION DES JEUNES.	38
--	----

LE LITEN, ACTEUR MAJEUR DE

LE CEA-LITEN, MEMBRE DE L'INSTITUT CARNOT ÉNERGIES DU FUTUR, IMPLANTÉ SUR LES CENTRES DU CEA-GRENOBLE ET D'INES (CHAMBÉRY), EST DÉDIÉ À LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE. SES ACTIVITÉS SE CONCENTRENT SUR PLUSIEURS DOMAINES CLÉS : L'ÉNERGIE SOLAIRE, LE PILOTAGE DES RÉSEAUX, LE STOCKAGE DONT LES BATTERIES ET L'HYDROGÈNE DANS UNE LOGIQUE D'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET D'ÉCONOMIE CIRCULAIRE. IL ADRESSE DE NOMBREUSES APPLICATIONS DANS LES MARCHÉS DE LA PRODUCTION ET LA DISTRIBUTION D'ÉNERGIE, DES TRANSPORTS, DES PROCÉDÉS INDUSTRIELS, ET DE L'ENVIRONNEMENT. FORT DE SON POSITIONNEMENT AU SEIN DU CEA, LE LITEN EST UN ACTEUR MAJEUR DE LA RECHERCHE TECHNOLOGIQUE EN DÉVELOPPANT DES SOLUTIONS COMPLÉMENTAIRES, COMPÉTITIVES ET PLUS RESPECTUEUSES DE L'ENVIRONNEMENT AFIN DE DÉPLOYER UNE STRATÉGIE ÉNERGÉTIQUE MULTI-VECTEURS, MULTI-ÉCHELLES ET MULTI-TEMPORALITÉS.

Dans cette perspective, nos axes de recherche principaux se concentrent sur :

- Développer des composants solaires photovoltaïques à haute performance, les intégrer dans des systèmes innovants et compétitifs.
- Imaginer et mettre au point les futures générations de batteries alliant performance, sécurité et durabilité.
- Concevoir des technologies de production, stockage, transport et conversion pour le déploiement de la filière hydrogène.
- Concevoir et exploiter des outils numériques pour dimensionner et piloter de manière optimale les systèmes et réseaux d'énergie - électricité, gaz et chaleur.
- Développer des composants pour la gestion de l'énergie électrique (convertisseurs de puissance) et de l'énergie thermique (génération, conversion et stockage).
- Intégrer les principes de l'économie circulaire « réduire, réutiliser, recycler » à l'ensemble de nos développements afin de réduire l'empreinte de la transition énergétique sur les matières premières.
- Développer des technologies de conversion du CO₂ et de ressources carbonées en produits synthétiques d'intérêt pour l'énergie ou la chimie.



CHIFFRES - CLÉS 2021


1000
EMPLOYÉS


150
DOCTORANTS
ET POST-DOCS


150
MILLIONS D'EUROS
DE BUDGET


1865
FAMILLES DE BREVETS
EN PORTEFEUILLE


200
PUBLICATIONS/AN

LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE



LE LITEN, UN ACTEUR MAJEUR DE L'INSTITUT CARNOT ÉNERGIES DU FUTUR

En 2022, le Carnot *Énergies du futur* fêtera ses 15 ans. 15 années de R&D en partenariat avec les entreprises! C'est bien la politique volontariste en matière de recherche partenariale au profit des entreprises et la qualité de ses recherches que la labellisation Carnot, attribué par le MESRI, vient souligner. Le Carnot *Énergies du futur* réunit le Liten et dix laboratoires académiques pour proposer une offre d'innovation élargie sur l'échelle de maturité technologique et une visibilité renforcée. Les ressources additionnelles attribuées aux instituts Carnot nous permettent le développement d'actions de ressourcement scientifiques à l'origine des prochaines innovations en anticipation des besoins futurs des entreprises.

Pour en savoir plus, www.energiesdufutur.fr



RENCONTRE ECOTECH ÉNERGIE

La 4^{ème} Rencontre Ecotech Energie (14 décembre 2021) portait sur les nouvelles énergies dans la ville et dans les territoires. Co-organisées avec le PeXe (association des PME et ETI engagées dans la transition écologique), le comité stratégique de filière des Nouveaux Systèmes Énergétiques et les deux filières Carnot Energics et Extra& Co (regroupement d'instituts Carnot), cet événement rassemble toute la chaîne de l'innovation (laboratoires R&D, start-up, PME, ETI, grand groupes, financeurs) autour de séquences enjeux et actualités, de rendez-vous business, de présentations de solutions innovantes. L'occasion de faire vivre et développer l'excellence de la filière française des nouveaux systèmes énergétiques.

Deux des innovations Liten avaient été sélectionnées dans la programmation:

- DistrictLab-H: une solution d'optimisation pour les réseaux de chaleur et de froid.
- Modélisation multi échelles pour l'étude de la flexibilité des réseaux et l'intégration des consom'acteurs.


+200
PARTENAIRES
INDUSTRIELS


12
PLATEFORMES

L'ÉCOSYSTÈME PARTENARIAL DU LITEN

1. COLLABORATIONS INDUSTRIELLES

Un des rares instituts de recherche en Europe à couvrir toute la chaîne de valeur, de la synthèse des matériaux à la pré-industrialisation, et fort de la combinaison de ses ressources humaines et de ses moyens technologiques, le Liten procure à ses partenaires industriels un avantage concurrentiel crucial, en élaborant des technologies de pointe dans les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique et l'économie circulaire.

Témoignage de Bertrand MOREL,

Directeur R&D chez  **orano**

«Les travaux initiés avec le LITEN en 2019 ont rapidement conduit à la création d'un laboratoire commun de R&D pour développer le recyclage des batteries lithium-ion. Nous avons en effet été séduits par le caractère inventif des développements, ainsi que la réactivité et le dynamisme des équipes. Ce programme a passé avec succès les phases classiques de R&D et de micro-pilotes et arrive désormais aux phases pilotes industrielles auxquelles le Liten contribue fortement. Ainsi, en 2021 les différents projets de collaboration ont passé tous nos jalons malgré la crise Covid, grâce à la complémentarité des équipes Orano/Liten. Nous avons aussi étendu notre collaboration dans d'autres domaines de la transition énergétique (recyclage des aimants, cycle du carbone) et sommes aujourd'hui très satisfaits des résultats obtenus et des perspectives prometteuses pour le déploiement de ces projets.»

2. PROGRAMMES COLLABORATIFS

Le Liten contribue activement à la recherche partenariale en France et en Europe, dans le cadre de sa mission de transfert et de valorisation auprès du tissu industriel. Cette action implique une volonté d'ouverture et de collaborations et génère un dialogue permanent avec les institutions nationales et européennes, les associations et réseaux, ainsi qu'avec nos homologues actifs en R&D. De ce dialogue résulte la mise en œuvre de projets d'innovation mais également des contributions aux agendas de recherche pour tracer le futur.



- Au niveau national, les Programmes et Equipements Prioritaires de Recherche ont mobilisé les équipes pour le montage des différents projets. Le PEPR-H2, copiloté avec le CNRS, a été lancé officiellement début 2022.
- Au niveau européen, on peut citer des premiers succès sur l'appel à projet Horizon Europe, parmi lesquels: 



UN LABEL POUR ACCOMPAGNER
NOTRE ENGAGEMENT
DANS PLUS DE 250 PROJETS
AUPRÈS DE NOS PARTENAIRES
INDUSTRIELS EN 2021

Témoignage d'Olivier AMIEL,

Directeur du programme

«batteries tout-solide» chez 

«Saft est une entreprise détenue à 100 % par TotalEnergies et spécialisée dans les batteries de pointe pour l'industrie depuis plus de 100 ans. Dans cette logique d'excellence technologique, Saft a lancé en 2018 son programme de développement des batteries du futur dites «tout solide». L'objectif de ce programme est de pouvoir réaliser les premiers déploiements sur les marchés industriel et automobile, au travers de sa coentreprise ACC, à l'horizon 2026-2028. La collaboration avec le CEA rentre dans notre stratégie d'accélération en nous permettant de valider certaines briques technologies autour de différentes familles d'électrolyte solide. Ceci est rendu possible grâce aux compétences multi métiers des équipes du CEA et de la richesse de leurs équipements.»

- **Batraw**, sur le démantèlement et le recyclage batterie
- **Decagone**, sur la thématique du stockage thermique
- **Surpass**, portant sur des matériaux plastiques éco-conçu et safe by design
- **Resilex**, sur l'éco-conception des modules PV et la valorisation du Si recyclé

3. ALLIANCES SCIENTIFIQUES

Pour conduire ses travaux de recherche au meilleur niveau, dans une démarche d'excellence scientifique, le Liten cultive des partenariats solides et pérennes avec l'écosystème de recherche et d'innovation régional, national, européen et international dans le domaine des énergies renouvelables. Les recherches à bas TRL*, dont l'objet est la production de connaissances nouvelles et de concepts en rupture, sont ainsi conduites de façon privilégiée avec des laboratoires académiques.

*Technology readiness level



Témoignages croisés de :

Florence LEFEBVRE-JOUD,
Responsable des partenariats
académiques nationaux et
internationaux au CEA-Liten



Werner PLATZER,
Responsable du
développement commercial
international au Fraunhofer
ISE (Institut des systèmes
d'énergie solaire)

Pourriez-vous décrire brièvement le contexte et l'objectif de la collaboration entre le CEA-Liten et le Fraunhofer ISE ?

FLJ: Les travaux des deux instituts de recherche concernent les technologies et systèmes énergétiques à faible empreinte carbone. Cette collaboration vise à unir nos forces pour accélérer le développement de l'innovation technologique nécessaire à l'atteinte de la neutralité carbone d'ici 2050.
WP: Le Fraunhofer ISE a déjà de nombreux champs d'investigation. Cependant, la transition énergétique requiert encore plus de compétences pour contribuer à une Europe plus efficace énergétiquement, avec une plus grande production d'énergie solaire. C'est pourquoi nous unissons nos forces avec le CEA-Liten sur des sujets de recherche très spécifiques. Le CEA apparait comme un partenaire idéal pour nous, car nous partageons la même philosophie concernant le développement industriel et la recherche appliquée.

Quelle initiative peut-on souligner en 2021 ?

FLJ: Nous avons lancé deux doctorats en parallèle sur le photovoltaïque à concentration, avec des étudiants travaillant au CEA Liten et à Fraunhofer ISE sur des approches complémentaires. Nous souhaitons dupliquer ce type de "twin PhD" à l'avenir.
WP: Nous nous concentrerons sur des domaines qui ont suscité jusqu'à présent de l'intérêt, mais pour lesquels peu de coopérations ont été menées jusqu'ici: les réseaux de chaleur intelligents, l'électronique de puissance pour les réseaux moyenne tension.

Selon vous, quels sont les points forts de la collaboration entre les deux instituts ?

FLJ: Nos deux instituts partagent une culture commune de recherche appliquée de haute qualité, orientée vers le transfert industriel, et nos infrastructures de recherche sont souvent complémentaires.
WP: Au-delà des synergies générales de cette coopération, les deux instituts pourront rencontrer plus de succès avec des demandes conjointes dans le système de financement de la recherche européenne, très compétitif. Il deviendra également possible de sensibiliser les politiques au fait que les innovations énergétiques pourraient être accélérées par un financement bilatéral de notre coopération.



LE PHOTOVOLTAÏQUE (PV) EST AMENÉ À PRENDRE UNE PART DÉCISIVE DANS LE MIX ÉNERGÉTIQUE MONDIAL GRÂCE À LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ RENOUVELABLE, BON MARCHÉ ET AU PLUS PRÈS DES TERRITOIRES. LE LITEN SOUTIEN SON ESSOR EN DÉVELOPPANT DES TECHNOLOGIES QUI PERMETTENT UNE AUGMENTATION DES RENDEMENTS, COMME L'HÉTÉROJONCTION OU LES TANDEMS SILICIUM/PÉROVSKITE, QUI DÉPASSERONT LES 30 %. IL ADRESSE DANS SES RECHERCHES LES PROBLÉMATIQUES DES CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES AU SOL POUR OPTIMISER LEUR PRODUCTIVITÉ, D'INTÉGRATION DU PV SUR DIVERSES INFRASTRUCTURES POUR MINIMISER L'EMPREINTE AU SOL, ET D'AUTONOMIE ÉNERGÉTIQUE DE TOUS TYPES D'OBJETS NOMADES, DEPUIS LA MONTRE CONNECTÉE JUSQU'AU SATELLITE.



LA PRODUCTION D'ÉNERGIE DÉCARBONÉE

1 LE PHOTOVOLTAÏQUE À HAUTE PERFORMANCE

EN CHIFFRES

38 PUBLICATIONS

375 BREVETS

32 DOCTORANTS

200 SALARIÉS

La cellule solaire est au cœur de tout système photovoltaïque. L'objectif ultime, c'est le rendement à un coût maîtrisé ! Le record mondial du Liten, de 25 % sur la cellule à hétérojonction silicium, se situe à quatre points de la limite théorique pour cette technologie. La mise en module est également une étape clef, qui combine deux défis : la connexion des cellules entre elles pour réaliser un composant d'une puissance significative et la recherche d'une enveloppe transparente et étanche permettant de protéger les cellules de l'environnement extérieur. Les développements menés au Liten sur ces sujets, qui ont donné lieu à un premier transfert industriel réussi vers Enel Green Power, ont pour objectif d'accompagner les industriels français et européens vers la mise en place d'une filière industrielle capable de rivaliser avec la concurrence étrangère.

DES MODULES AVEC INTERCONNEXIONS SHINGLE INDUSTRIALISABLES

A l'Ines, le Liten développe la technologie d'interconnexions de cellules PV shingle, qui offre des densités de puissance et un rendement énergétique plus élevés, des pertes résistives plus faibles, à un coût compétitif. Une première campagne de fabrication semi-industrielle a permis de réaliser 10 modules hétérojonction hautes performances (HJT) Shingle (équivalent 60 cellules) conçus pour répondre aux besoins des applications «Building Applied PV». Ces modules ont été réalisés avec des cellules HJT «classiques»

de format M2, dans une configuration verre en face avant et en face arrière, avec pour certains d'entre eux un encapsulant non bloquant pour les UV. Ces derniers atteignent une puissance moyenne en face avant égale à 322,64 W, soit 214,15 W/m², supérieure de 2 % en puissance par rapport aux modules «classiques». Leur rendement moyen de 21,41% et leur poids surfacique de 11,8kg/m², inférieur d'un tiers au type standard, les positionnent dans le top 5 mondial sur l'échelle des modules HJT industriels.

Ce projet a reçu un financement du programme Horizon2020 de l'Union européenne pour la recherche, le développement technologique et la démonstration sous le Grant Agreement N° 857793.



“

LES ÉQUIPES DU CEA DÉVELOPPENT LA TECHNOLOGIE D'INTERCONNEXION SHINGLE APPLIQUÉE AUX CELLULES ET MODULES HÉTÉROJONCTIONS POUR LE MARCHÉ DES TOITURES INDUSTRIELLES. »

PARTENARIAT RENOUVELÉ AVEC MONDRAGON ASSEMBLY

Mondragon Assembly et le CEA-Liten poursuivent leurs développements sur l'assemblage des panneaux PV dans le cadre d'un nouvel accord de trois ans, qui adresse notamment les questions d'interconnexion des cellules. Pour Jean-Philippe Aguerre, directeur de R&D à Mondragon Assembly :

« La poursuite de cet accord est d'importance stratégique pour notre groupe. Les travaux menés permettront de maintenir des coûts compétitifs, notamment grâce à une réduction importante de certains matériaux coûteux, tout en augmentant l'efficacité des modules ».

UNE « GIGAFACTORY » EN EUROPE

Le projet TANGO d'Enel Green Power est lauréat de l'Innovation Fund de la Commission européenne pour les projets à grande échelle. Il va permettre d'augmenter la production de modules photovoltaïques bifaciaux hétérojonction dans l'usine 3SUN située à Catane, en Italie, de 200 MW/an à 3 GW/an. Enel Green Power collabore avec nos équipes sur la technologie hétérojonction depuis 2015.



3 GW/AN

FUTURE CAPACITÉ DE PRODUCTION DE L'USINE D'ENEL GREEN POWER

RÉDUIRE LA TENEUR EN INDIUM DANS LES OTC

Réduire la teneur en indium au sein des oxydes transparents conducteurs (OTC) est un levier de diminution de l'impact environnemental de la technologie photovoltaïque à hétérojonction (HET). Une approche consistant à amincir la couche OTC et à la couvrir d'une couche antireflet a été évaluée. Des dépôts PECVD basse fréquence et basse température, compatibles avec la limitation thermique à 200°C de la technologie HET, ont permis d'obtenir des couches aux caractéristiques satisfaisantes.

2 LES NOUVELLES GÉNÉRATIONS PHOTOVOLTAÏQUES

Pour le plus long terme, le Liten travaille au développement de structures tandems silicium/pérovskite qui sont conçues pour absorber une plus grande partie du spectre solaire. L'objectif est de parvenir à des cellules avec un rendement supérieur à 30 % d'efficacité au niveau du laboratoire, et en parallèle de développer un procédé industrialisable. Des verrous technologiques restent à lever : augmenter le rendement de conversion avec un procédé potentiellement industriel, améliorer leur stabilité et limiter leur sensibilité à la chaleur, aux UV ou encore à l'humidité.

“

LES CELLULES TANDEMS SILICIUM/PÉROVSKITE DEVRAIENT ATTEINDRE UN RENDEMENT DE 30 % D'ICI 2030. »



RENDEMENT RECORD POUR LES CELLULES PÉROVSKITE FLEXIBLES

Les pérovskites présentent l'intérêt de pouvoir être mises en œuvre par voie liquide et à basse température. Dans le cadre du projet européen APOLO, le CEA à l'Ines a transposé sur substrat flexible des résultats préalablement obtenus sur substrat rigide. Des performances moyennes de l'ordre de 18 % ont été atteintes pour un lot de 12 cellules solaires pérovskites flexibles simple jonction, avec une cellule

record à 19,2 % d'une surface de 0,33 cm². La structure mise en œuvre est simple, et la couche pérovskite de type double cations offre des résultats de stabilité prometteurs ; des cellules encapsulées ont conservé 90 % de leur rendement initial après un test de 800h en chaleur humide. Des travaux menés en parallèle visent la réalisation de modules flexibles de plus grandes dimensions.

Acknowledgement for fundings from Institut Carnot Energies du Futur (Si-Premium and LASPV projects) and H2020 APOLO project (N° 763989). APOLO project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement N° 763989.



UN PROCÉDÉ DE DÉPÔT INDUSTRIALISABLE DE COUCHES PÉROVSKITE SUR GRANDES SURFACES

Dans le cadre de ses travaux sur la formulation des matériaux, le Liten a réalisé une couche de pérovskite de haute efficacité à base d'un matériau pérovskite sans méthyl ammonium. Le procédé, industrialisable, comprend une étape de coating à l'air assisté par gaz. La couche ainsi formée à basse température (< 100 °C) a ensuite été intégrée en modules de 10 cm² de surface active en utilisant l'ablation laser comme procédé de

structuration, minimisant ainsi les zones inactives. Une efficacité maximale de 18 % a été atteinte sous illumination 1 soleil STC. Cette technologie est compatible avec les architectures tandems. Le temps de dépôt d'environ 30s de la couche pérovskite sur une plaquette de taille M2 fait de ce procédé le plus rapide à ce jour pour une production à grande échelle et en grand volume.

Remerciements : CEA, Carnot Energies du Futur Si-Premium, H2020 EU Grant APOLO project N°763989.

3 LA PRODUCTION PHOTOVOLTAÏQUE MASSIVE

Le CEA mène des travaux ciblés pour mieux prévoir et optimiser la productivité des systèmes photovoltaïques par la simulation/modélisation. Il développe des modules et systèmes adaptés aux applications en grandes centrales dans les déserts notamment, induisant des problématiques spécifiques en terme de durabilité, performance et optimisation du productible. De plus, à l'aide d'algorithmes avancés, il analyse les données issues du monitoring des installations pour réaliser un diagnostic de performance et identifier les dysfonctionnements afin d'optimiser les coûts sur le long terme.



UN OUTIL DE MODÉLISATION ET SIMULATION POUR LES NOUVELLES CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES

Les équipes ont développé TriFactors, un outil de modélisation et simulation des centrales composées de panneaux photovoltaïques bifaciaux. Grâce à son approche en facteurs de forme 3D, l'outil permet de calculer la production en courant continu et de quantifier les effets de bords des centrales PV ; ce qui n'est pas possible avec les outils classiques du marché. Il a été développé et validé sur les bancs d'essais du CEA, et a été mis à l'épreuve de plusieurs cas réels de grandes centrales. Ceci en conservant ses atouts majeurs lors de ce passage à l'échelle avec un temps de calcul raisonnable et une capacité de traiter la simulation de centrales aux caractéristiques inhabituelles. Il permet par exemple la simulation des centrales bifaciales verticales pour applications agricoles.

LE SOLAIRE À L'ÉPREUVE DU DÉSERT

Dans le cadre des projets menés en partenariat avec l'institut ATAMOSTEC au Chili, le CEA à l'Ines identifie une procédure de vieillissement accéléré des panneaux photovoltaïques en environnement désertique. Ce climat, bien que très favorable à l'implantation de systèmes solaires PV, soulève la question de leur durabilité en conditions extrêmes. Afin de garantir la fiabilité des

systèmes installés dans le désert d'Atacama, il est nécessaire d'adapter les méthodes de caractérisation aux taux élevés d'irradiation, d'humidité, et aux fortes variations de température lors de cycles jours/nuits. Le référentiel élaboré a permis de sélectionner les essais de vieillissement appropriés. Les partenaires du projet cherchent ainsi à définir une procédure de tests pour créer un « label désert ».

Ces travaux sont réalisés en collaboration avec ATAMOSTEC (Chili) et reçoivent le support financier et organisationnel de l'agence gouvernementale chilienne CORFO.



EN ENVIRONNEMENTS EXTRÊMES, LES MÉTHODES DE CARACTÉRISATION DES SYSTÈMES PV DOIVENT ÊTRE ADAPTÉES. »

4 LE PHOTOVOLTAÏQUE «EVERYWHERE»

Un point fort du photovoltaïque est aussi qu'il ouvre la porte à des applications sur tout type d'infrastructure, permettant la production d'électricité pour le réseau en n'augmentant pas son empreinte au sol. C'est l'objet de nombreux travaux au sein de l'ITE INES 2S. Le photovoltaïque peut également être intégré à des objets pour des usages « nomades », parmi lesquelles les applications aéronautiques et spatiales, ainsi que des solutions de mobilité et de transports maritimes ou terrestres. Ce domaine n'obéit pas à la même logique que le photovoltaïque raccordé au réseau ; ici la fonctionnalité prime sur la productivité, permettant d'explorer des solutions technologiques à plus fortes valeurs ajoutées.

DES SYSTÈMES À CONCENTRATION PHOTOVOLTAÏQUE AVEC LE FRAUNHOFER

Le photovoltaïque spatial doit innover pour fournir de l'énergie aux satellites de télécommunication, d'observation et d'exploration. Pour répondre à cette attente le Fraunhofer ISE et le CEA ont signé un accord de collaboration portant sur le développement de systèmes à concentration photovoltaïque. Prometteuse, cette solution utilise peu de matériaux III-V rares, réduit les coûts de fabrication et répond à la plupart des spécifications. Ces travaux permettront de proposer des solutions innovantes aux différents acteurs européens du domaine.

ROULER À L'ÉNERGIE SOLAIRE

Dans le cadre de l'ITE INES 2S, le CEA développe un kit de solarisation pour véhicule électrique. L'intérêt est de pouvoir solariser les véhicules en après-vente, et ainsi d'auto-générer des km d'autonomie, de diminuer la fréquence de recharge, tout en réduisant l'impact global CO₂ global du véhicule en fin de vie.

À PLEINES VOILES VERS L'ESPACE

L'essor des activités spatiales s'accompagne d'une augmentation des besoins en énergie photovoltaïque. Le Liten a réalisé les premières grandes voiles solaires pour générateurs spatiaux, minces et pliables dans le cadre du projet européen ALFAMA. Cette solution novatrice de « photovoltaic arrays » (PVA) flexibles est une alternative durable aux PVA classiques, épais et rigides, moins performants. La réalisation de deux démonstrateurs

grande taille de voiles solaires, de leur conception jusqu'à leur fabrication, constitue une montée en TRL au niveau 4, avec des procédés éprouvés et à faible coût. Un grand générateur solaire a passé avec succès un test de vibration simulant l'environnement d'un lanceur spatial, dans les installations de l'ESTEC (Centre européen de technologie spatiale).



“

CHACQUE GRANDE VOILE SOLAIRE PÈSE AU TOTAL 1,30 KG, MESURE 1,69 M² ET FAIT 4 CM D'ÉPAISSEUR UNE FOIS PLIÉE. »

L'ÉCO-CONCEPTION AU CŒUR DE L'INNOVATION DES TECHNOLOGIES PHOTOVOLTAÏQUES

CONTEXTE

Il devient nécessaire aujourd'hui de s'assurer que les technologies photovoltaïques répondent aux critères d'un produit peu impactant pour l'environnement. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV), méthode normée la plus pertinente pour évaluer cet impact, montre certaines limites dans le domaine PV [1] qui rendent la prise de décision dans un objectif d'éco-conception difficile. Le Liten a intégré de façon adaptée et systématique la prise en compte des impacts environnementaux dans les projets de R&D en accompagnement de ses partenaires industriels. Ces travaux ont été menés dans le cadre d'une thèse [2] et ont été poursuivis dans le cadre de programme de l'ITE INES2S par le biais d'un réseau d'experts.

RÉSULTATS TECHNIQUES

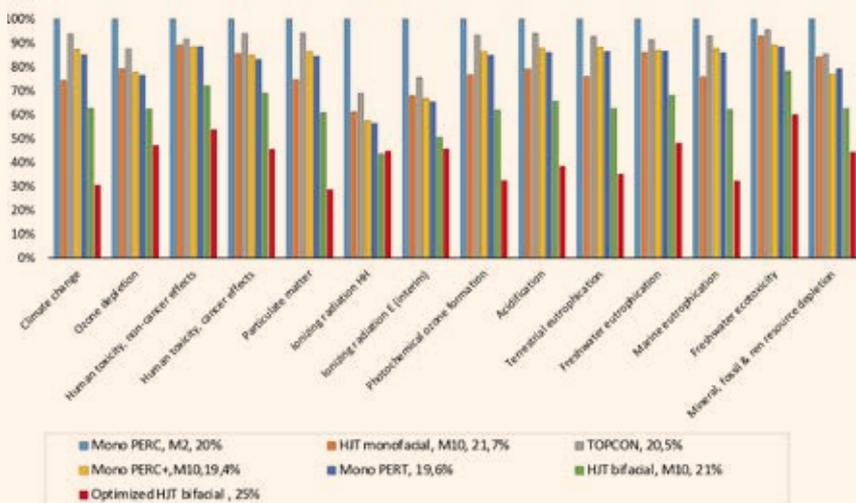
La méthodologie développée permet d'intégrer l'aspect environnemental dans les projets de R&D sur toute la chaîne de la valeur du PV (depuis les matériaux jusqu'aux systèmes), tout en tenant compte des enjeux économiques et techniques. Elle utilise l'ACV comme outil de pilotage pour évaluer précisément les gains environnementaux d'une nouvelle technologie. Une cartographie environnementale de toutes les technologies PV actuelles et à bas TRL susceptibles de pénétrer le marché à moyen/long terme a été réalisée (graphique). La base des données des différentes technologies PV intègre depuis peu la technologie tandem. Un inventaire a été mis en place pour les matériaux potentiels de

la « top cell » les plus performants avec des procédés de dépôt transposables à l'échelle industrielle. Les résultats de l'étude montrent que la technologie tandem PK/Si-HJT présente un large potentiel de réduction des impacts environnementaux par rapport à un module standard, notamment grâce à son rendement élevé [3]. L'ajout des différentes couches de la « top cell » n'augmente pas l'impact environnemental. Le silicium de la « bottom cell », en raison de son origine chinoise, est le principal contributeur sur l'ensemble des impacts. Fabriquer ces modules tandem en Europe sera donc un élément clé pour réduire les émissions à Gas à Effet de Serre (GES) de plus de 80% pour cette technologie.

MISE EN PERSPECTIVE

L'outil informatique « ECO PV » mis au point lors de ces travaux constitue la référence pour définir les roadmaps technologiques et guider les choix des partenaires industriels. L'automatisation de l'analyse environnementale a confirmé le critère de pérennité d'usage. La participation d'ingénieurs d'expertises diverses à la structuration de l'outil par briques technologiques a permis un transfert de connaissances entre les différents experts de la chaîne de valeur. Des offres d'éco-innovation sont dorénavant proposées à nos partenaires industriels et institutionnels.

Comparaison environnementale des différentes technologies PV existantes dans le marché



References :

- [1] N. Gazbour et al., « A path to reduce variability of the environmental footprint results of photovoltaic systems », J. Clean. Prod., vol. 197, p. 1607-1618, oct. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.276.
- [2] N. Gazbour, « Intégration systémique de l'éco-conception dès la phase de R&D des technologies photovoltaïques », www.theses.fr, 14 février 2019. www.theses.fr/s183189 (consulté le 22 octobre 2019).
- [3] INES, « Tandem Perovskite-Silicium », INES - Institut National de l'Énergie Solaire. www.ines-solaire.org/news/tandem-perovskite-silicium/ (consulté le 2 février 2022).



LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE EST UN ENJEU MAJEUR, NOTAMMENT POUR ACCOMPAGNER L'ESSOR DES ÉNERGIES RENOUVELABLES INTERMITTENTES, ET POUR DÉCARBONER LE SECTEUR DU TRANSPORT. LE LITEN TRAVAILLE SUR DEUX SOLUTIONS PRINCIPALES : LES BATTERIES ET LE VECTEUR HYDROGÈNE. NOS DÉVELOPPEMENTS SUR LES BATTERIES RÉPONDENT AUX DEMANDES DE DENSITÉ D'ÉNERGIE CROISSANTE TOUT EN GARANTISSANT LEUR FIABILITÉ ET LEUR SÉCURITÉ. CONCERNANT LE VECTEUR HYDROGÈNE, LE LITEN A UNE APPROCHE GLOBALE, DE LA PRODUCTION PAR ÉLECTROLYSE À HAUTE TEMPÉRATURE, AU STOCKAGE ET TRANSPORT, JUSQU'À LA CONVERSION PAR DES PILES À COMBUSTIBLE.

STOCKAGE ET SOLUTIONS DE FLEXIBILITÉ

1 LE VECTEUR HYDROGÈNE

EN CHIFFRES

59 PUBLICATIONS

696 BREVETS

54 DOCTORANTS

350 SALARIÉS

L'hydrogène apparaît aujourd'hui comme une solution pertinente pour décarboner la mobilité lourde ou intensive, mais aussi pour contribuer au déploiement des énergies renouvelables en proposant une solution de stockage massif sur de longues durées.

LE PEPR HYDROGÈNE

Le PEPR Hydrogène décarboné, piloté par le CEA et le CNRS, est à horizon 2030 un levier national incontournable de financement pour les activités sur l'électrolyse haute température, la PEMFC et le stockage. Le programme soutient des activités de R&D amont (TRL1 à 4) au plus haut niveau, en support aux industriels de la filière hydrogène et répondant aux priorités définies dans le cadre de la stratégie nationale. Les projets sélectionnés dans ce

cadre auront une durée de 5 à 6 ans et seront portés par des équipes de chercheurs reconnus dans les domaines clés de l'hydrogène : la production, le stockage, le transport et la conversion.

“

LE PEPR, UN LEVIER NATIONAL INCONTOURNABLE DE FINANCEMENT. »

2 L'ÉLECTROLYSE HAUTE TEMPÉRATURE

La mobilité hydrogène n'a de sens que si l'hydrogène est lui-même produit par des procédés émettant peu de gaz à effet de serre. Le CEA a développé un procédé de production d'hydrogène par électrolyse de vapeur d'eau à haute température (EVHT), présentant un rendement électrique de l'ordre de 85 %. Cette technologie est réversible et peut ainsi fonctionner en mode pile à combustible, en produisant de l'électricité à partir de gaz renouvelable.

LA SOCIÉTÉ GENVIA OFFICIELLEMENT LANCÉE

Créée par le CEA, Schlumberger et leurs partenaires (VINCI, VICAT et l'ARIS), Genvia a été lancée en mars 2021. La société vise le déploiement industriel de la technologie d'électrolyseur haute température à oxyde solide, développée par le CEA, pour la production d'hydrogène décarboné. Elle s'appuie sur une équipe de R&D et un centre de transfert technologique en lien étroit avec le CEA sur le site de Grenoble, afin d'accélérer la maturation de la technologie. Genvia dispose également de 2 autres sites, à Clamart pour l'ingénierie des systèmes, et à Béziers, lieu de la production des électrolyseurs.



“ LA TECHNOLOGIE D'ÉLECTROLYSE HAUTE TEMPÉRATURE À OXYDE SOLIDE EST LA PLUS EFFICACE ET LA PLUS RENTABLE POUR LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE DÉCARBONÉ. »

UN PREMIER STACK DE PUISSANCE VALIDÉ

La demande du marché concernant la technologie d'électrolyse haute température à oxyde solide (SOC) implique d'augmenter la puissance des systèmes délivrés. Jusqu'ici, les stacks dits "standards" fabriqués au Liten suivant le procédé de référence étaient constitués de 25 cellules de surface active 100 cm². Une étape a été franchie en 2021 avec la réalisation d'un premier « stack de puissance » constitué de 75 cellules de surface

active de 200 cm². Son fonctionnement a été validé, avec une production de 5 Nm³/h d'H₂, soit 6 fois plus qu'avec un stack de référence dans des conditions comparables. 200 Nm³ de H₂ ont ainsi été produit en 40 h, pour un point de fonctionnement à 0.9A/cm² et 55 % de taux d'utilisation de la vapeur d'eau. Le fonctionnement en mode pile à combustible a également pu être validé.

UNE INFRASTRUCTURE DE R&D AU MEILLEUR NIVEAU

Pour répondre à l'augmentation significative de ses activités sur l'électrolyse à haute température, et dans le but d'accompagner l'industrialisation de cette technologie en collaboration avec Genvia, le Liten a fait évoluer son parc d'équipements. Pour être en capacité de réaliser des stacks en nombre, pour adresser les nombreux enjeux d'optimisation de la technologie et les essais multiples, l'institut s'est doté de deux bancs de conditionnement. Cette étape, qui consiste à faire subir un premier cycle aux stacks afin de les rendre fonctionnels, est essentielle pour garantir leur qualité et l'adéquation avec les spécifications attendues. La plateforme de tests de modules SOC de forte puissance, lancée en 2020, a quant à elle été modifiée pour évaluer des modules de plus en plus puissants. Cette augmentation du nombre d'équipements sur la plateforme Hydrogène, de la taille des objets testés, et de la durée des essais de durabilité, entraîne une augmentation des quantités de gaz consommées. En conséquence, des travaux de mise à niveau des installations « gaz » et de fiabilisation de la plateforme hydrogène du CEA ont été menés en 2021.



DES OUTILS DE CARACTÉRISATION AVANCÉE ET DE MODÉLISATION POUR ACCOMPAGNER LE DÉPLOIEMENT DE LA FILIÈRE HYDROGÈNE.

Entretien avec Jérôme Laurencin, expert en modélisation et caractérisation des convertisseurs électrochimiques hautes températures

Comment se positionne votre activité en support de la filière hydrogène ?

Les recherches liées à la production, au stockage et au transport de l'hydrogène sont en plein essor. Depuis sa création, le CEA-Liten développe une expertise sur les piles à combustible et la production d'hydrogène par électrolyse haute température. Nos compétences nous permettent aujourd'hui d'accompagner l'industrialisation et la commercialisation de ces technologies, ce qui implique de garantir des performances et une durabilité optimale des systèmes.

Dans mon laboratoire, les travaux de recherche portent sur les systèmes électrochimiques haute température, que ce soit les électrolyseurs ou les piles à combustibles, et plus précisément sur la cellule électrochimique qui est le cœur du système. Nous cherchons à mieux comprendre les mécanismes de fonctionnement qui régissent ses performances et à identifier les mécanismes de dégradation qui impactent sa durabilité. Pour cela, l'équipe développe des modélisations et des outils de caractérisation avancée, notamment avec l'ESRF à Grenoble et le PSI en Suisse.

Quelles sont les avancées majeures issues de vos travaux en 2021 ?

En 2021, nos travaux ont porté sur l'analyse des mécanismes électrochimiques qui ont lieu dans les électrodes, pour une compréhension fine des processus réactionnels [1,2]. La modélisation et l'utilisation d'outils comme la voltammétrie cyclique nous ont permis de mieux détecter et d'analyser la dégradation [3].

Dans le cadre de travaux de thèse portant sur les problématiques de dégradation mécanique des matériaux, nous nous sommes dotés d'outils pour prévoir l'endommagement dans les microstructures complexes des électrodes (Fig. 1). [4,5]

En quoi l'environnement de recherche et votre récente nomination au titre de Fellow sont importants pour mener à bien vos recherches ?

Cet environnement dynamique de recherche nous permet de collaborer avec des universités nationales (LEPMI, ICMCB, Insa Lyon) et des partenaires académiques internationaux (DTU à Copenhague, AIST au Japon, EPFL à Lausanne) et de partager nos compétences.

Ma nomination au titre de Fellow en 2021 récompense des années de travaux de recherche, à titre personnel mais aussi pour l'ensemble de mon équipe, et je pense notamment à tous les thésards et post-doctorants encadrés au laboratoire ces dernières années.



- [1] F. Monaco, E. Effori, M. Hubert, E. Siebert, G. Geneste, B. Morel, E. Djurado, D. Montinaro, J. Laurencin, Electrode Kinetics of Porous Ni-3YSZ Cermet Operated in Fuel Cell and Electrolysis Modes for Solid Oxide Cell Application, *Electrochimica Acta* 389 (2021) 138765
- [2] E. Effori, J. Laurencin, E. Da Rosa Silva, M. Hubert, T. David, M. Petitjean, G. Geneste, L. Dessemond, E. Siebert, An Elementary Kinetic Model for the LSCF and LSCF-CGO Electrodes of Solid Oxide Cells: Impact of Operating Conditions and Degradation on the Electrode Response, *J. Electrochem. Soc.*, 168 (2021) 044520.
- [3] E. Effori, J. Laurencin, V. Tezyk, C. Montella, L. Dessemond, E. Siebert, A Physically-based Modelling to Predict the Cyclic Voltammetry Response of LSCF-type Electrodes: Impact of the Ohmic Losses and Microstructure, *Solid State Ionics* 371 (2021) 115765
- [4] 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.
- [5] 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, submitted to *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* (2022)

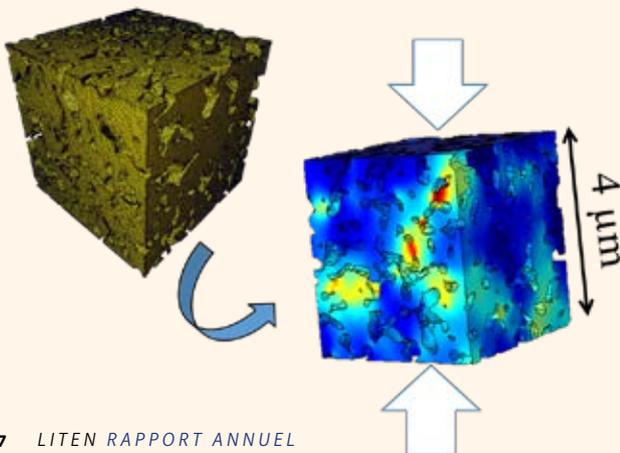


Fig. 1 Simulation de l'amorçage et la propagation des fissures dans la microstructure poreuse des électrodes.

3 STOCKAGE ET TRANSPORT D'HYDROGÈNE

Le Liten travaille sur la sécurité du transport de l'hydrogène, en évaluant le comportement des matériaux sous environnement hydrogène. Plus récemment, il a initié des activités sur le stockage de l'hydrogène à l'aide de molécules organiques LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers).

DE NOUVEAUX MATÉRIAUX POUR LE STOCKAGE D'HYDROGÈNE

La technologie LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier) permet de stocker l'hydrogène et de le transporter directement sous une forme liquide. Le Liten travaille notamment à identifier des nouvelles molécules biosourcées, non toxiques, stables, qui vont s'hydrogéner et se déshydrogéner au besoin. L'utilisation de la modélisation, avec la méthode DFT (Density Functional Theory) notamment, permet de prédire les

propriétés thermodynamiques des molécules. Les couples molécules/catalyseurs les plus prometteurs sont sélectionnés sur la base de la densité d'hydrogène stocké et de leur disponibilité / coût. Les travaux du Liten permettent également de développer des réacteurs innovants et d'évaluer le bénéfice des procédés d'un point de vue environnemental (ACV, bilan énergétique).



“

LES MATÉRIAUX LOHC VONT S'HYDROGÉNER ET SE DÉSHYDROGÉNER AU BESOIN. »

PRÉPARER LES RÉSEAUX GAZIERS À L'ARRIVÉE DE L'HYDROGÈNE



Les résultats obtenus en laboratoire ont été déclinés en un corpus opérationnel applicable à un réseau de transport de gaz de 32000 km de long.

Entretien avec Tanguy Manchec, Responsable Hydrogène chez RICE (pôle R&D de GRTgaz)

« Favoriser l'utilisation des tuyaux de gaz existants pour le transport de l'hydrogène est une solution compétitive, respectueuse de l'environnement, mais qui implique de comprendre les effets de l'hydrogène sur les métaux des canalisations. Nous avons fait appel aux spécialistes du CEA pour leur expertise de premier plan et leurs moyens d'essais très pointus. Ce partenariat a conduit à l'élaboration d'une base de données sur les matériaux des infrastructures de GRTgaz ainsi qu'à la mise en place d'un protocole d'essais sous hydrogène, représentatif des modes d'exploitation d'un réseau gazier. Les premiers résultats sont très encourageants. Ils confirment que le réseau de canalisations de GRTgaz est en mesure d'accepter l'injection de gaz contenant de l'hydrogène. »

4 LES PILES PEMFC

Le CEA travaille depuis plus de 20 ans au développement de piles à combustible à membranes échangeuses de protons (PEMFC) basse température pour leur compacité et leur rendement. Les avantages de cette technologie se retrouvent surtout dans certains transports lourds, pour lesquels le poids, l'encombrement et l'énergie embarquée des batteries restent pénalisants. Associée à un stockage sous une pression de 700 bars aux standards internationaux, elle devient concurrente des véhicules thermiques tant vis-à-vis de l'autonomie que du temps de recharge. Les travaux de recherche se poursuivent pour abaisser les coûts de production des piles, tout en améliorant leurs performances, et en allongeant leur durée de vie.



VERS UN DRONE À HYDROGÈNE MILITAIRE 100 % FRANÇAIS

Dans le cadre du projet RAPACE, l'Ecole de l'air et CEA-Liten développent un drone à hydrogène 100 % français. La technologie de pile à combustible développée au CEA a pour spécificité de s'adapter à toutes les conditions environnementales sévères. Il s'agit du seul projet de ce type en France appliquant un prisme militaire à la propulsion de drones par hydrogène.

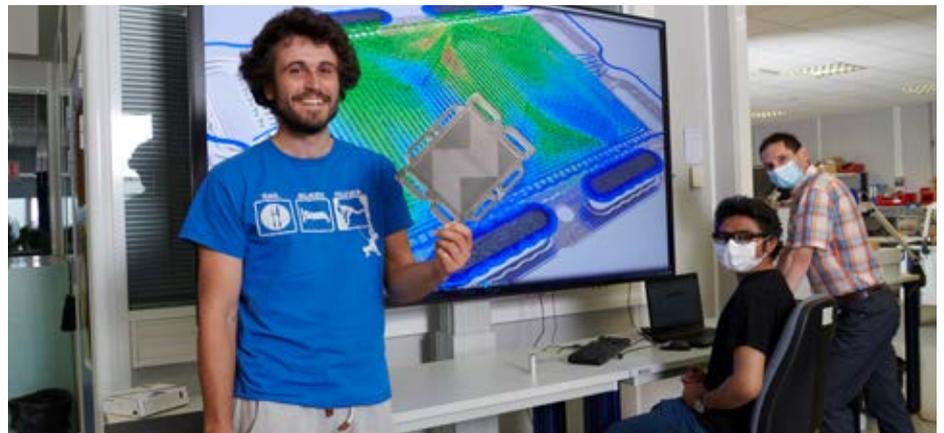
NOUVEAU PROCÉDÉ DE FABRICATION DES COUCHES ACTIVES DE PEMFC

Les chercheurs du Liten ont développé un nouveau procédé de fabrication des couches actives de PEMFC par enduction directe d'encres catalytiques sur des membranes mécaniquement stabilisées par des microfibrilles. Cette technologie en développement est compatible avec une industrialisation, même pour des faibles chargements en platine, et présente un fort potentiel de diminution de coût.

UN PAS VERS L'ALLONGEMENT DE LA DURÉE DE VIE DES PEMFC

Les différents mécanismes de dégradation des PEMFC sont généralement étudiés de manière isolée. Pour vérifier l'hypothèse selon laquelle les ions métalliques qui catalysent le mécanisme de dégradation de la membrane proviendraient de la corrosion des plaques bipolaires, les chercheurs ont modélisé l'émission d'ions fer induite par la corrosion ainsi que leur transport au travers de la cellule jusqu'à la membrane. Ils ont également modélisé le transfert inverse

des fluorures produits par la dégradation de la membrane et qui stimulent la corrosion. Ils ont ensuite intégré ces modèles dans MePHYSTO, un des outils de simulation des PEMFC du Liten. Cette approche unique de modélisation couplée permet de simuler les interactions entre les différents phénomènes de dégradation et de visualiser leur effet « boule de neige », et permettra à terme d'augmenter la durée de vie des piles.



Cette approche unique de modélisation permettra d'augmenter la durée de vie des piles.

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE AU SERVICE DES SYSTÈMES DE GESTION DES BATTERIES ET PILES À COMBUSTIBLE

CONTEXTE

Augmenter la durée de vie et la fiabilité des piles à combustible PEM et des batteries Li-ion dans des conditions réelles d'utilisation est crucial pour l'électrification des transports. Cela implique d'optimiser leur fonctionnement en temps réel, ce qui repose sur la détermination de l'état instantané du système et sur l'estimation de son état futur. Les algorithmes de diagnostic et de pronostic sont intégrés dans des composants électroniques dédiés: les systèmes de gestion de la batterie et de la pile à combustible (BMS et FCMS).

APPROCHE

On distingue trois approches pour développer les algorithmes de diagnostic et de pronostic. L'approche la plus utilisée, basée modèles, nécessite l'acquisition d'une grande quantité de données pour identifier les mécanismes de dégradation physico-chimiques en jeu et déterminer les états instantanés et ultérieurs des systèmes étudiés. La seconde approche,

basée données, s'appuie sur des méthodes d'auto-apprentissage pour évaluer les mécanismes de vieillissement. Bien que prometteuses, ses performances se révèlent encore limitées sur les cas applicatifs réels. Enfin, l'approche hybride combine les principes des deux approches précédentes et les optimise à l'aide d'algorithmes d'intelligence artificielle.

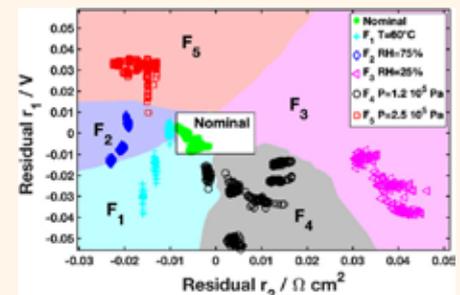


EXEMPLES D'APPLICATIONS

Voici deux exemples d'applications de cette approche hybride.

1 / Pour détecter et classer les défauts de fonctionnement des piles à combustible, le Liten a développé un nouvel algorithme basé sur l'analyse des mesures de courant, de tension et d'impédance en fonctionnement. Nous avons montré que les différences entre les mesures expérimentales et les données de sortie du modèle physique sont sensibles aux défauts de fonctionnement. En utilisant une base de données de résidus estimés de divers défauts connus, une classification des conditions de fonctionnement défectueuses a été développée par un algorithme des K plus proches voisins. Le score de classification dépend du type de défaut et est très précis (>99 %) pour les défauts de haute pression et de faible humidité.

2 / Pour améliorer l'estimation du vieillissement d'une batterie Li-ion, le Liten a développé un modèle qui combine une méthode basée sur filtre de Kalman pour estimer les indicateurs d'état de la batterie et une méthode d'apprentissage automatique de type machines à vecteurs de support pour suivre l'évolution de la capacité des cellules. Cette méthode hybridant des approches basées modèles et basées données permet d'atteindre une grande précision dans l'estimation de l'état de charge et de vieillissement de la batterie: moins de 1 % d'erreur, ce qui représente une amélioration de 85 % par rapport à une estimation standard basée sur filtre de Kalman.



En haut : Banc de test de pile à combustible

En bas : Défaut d'isolation dans le stack PEMFC

References

- [1] Fuel Cells Fault Detection and Isolation for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Using Impedance Measurements and Multiphysics Modeling
- [2] IEEE Battery-Aware Optimization of Green Small Cells: Sizing and Energy Management
- [3] IEEE An Adaptive Sigma Point Kalman Filter Hybridized by Support Vector Machine Algorithm for Battery SoC and SoH Estimation

5 LES BATTERIES

Les batteries, technologie clef du transport propre, sont un marché en pleine croissance qui permettra également progressivement d'adresser le marché du soutien au réseau. Fort de son expertise sur la chimie des matériaux qui constituent les électrodes de la batterie, le Liten conduit ses travaux en visant deux critères de performances : le gain en densité d'énergie, qui détermine en particulier l'autonomie des batteries, et le gain en densité de puissance, qui influence la vitesse à laquelle l'accumulateur se recharge ou se décharge. Il travaille au développement de nouvelles générations de batteries, plus sûres et performantes, notamment «tout solide», et plus en marge, sur d'autres voies alternatives. Enfin, dans une approche de développement durable, le Liten s'intéresse à la réduction de solvants critiques en évaluant de nouveaux procédés de fabrication d'électrodes mais aussi à la réduction et au recyclage de matériaux critiques comme le cobalt.

DES SOLUTIONS POUR DES MATÉRIAUX DE BATTERIES DURABLES

Les recherches menées au CEA-Liten sur les matériaux pour batteries lithium-ion n'adressent pas uniquement des aspects de performances (énergie, puissance) ou de sécurité ; elles concernent également les problématiques de durée de vie et l'évaluation de chimies alternatives bas coût. Elles intègrent par ailleurs une prise en compte des aspects environnementaux. Des travaux sont menés sur la suppression des matériaux critiques de cathode (Ni, Co) d'une part, et la

valorisation des éléments issus du recyclage des accumulateurs en fin de vie d'autre part. En effet, pour ce dernier point, les procédés mis en œuvre permettent de récupérer des sels de nickel, manganèse et cobalt en solution, à partir desquels de nouveaux matériaux sont synthétisés. Cette démarche répond au double objectif de diminution de l'impact environnemental de la mobilité électrique et de réduction des dépendances géopolitiques pour les matières premières.

PRÉPARER LE TEST ÉLECTRIQUE DES FUTURS ACCUMULATEURS "TOUT SOLIDE" DU COMMERCE.

Les futures générations d'accumulateurs tout solide seront vraisemblablement mises en œuvre dans des architectures de cellules de type « pouch », la nature solide de l'électrolyte/séparateur n'étant pas adaptée aux formats de cellules cylindriques. Le Liten a développé une méthodologie permettant l'assemblage, le test en fonctionnement puis le démontage de modules constitués de cellules Li-ion fonctionnelles de type « pouch ». L'évaluation électrique de tels modules en cyclage est conforme aux attentes, avec une bonne reproductibilité des mesures obtenues. Ce résultat ouvre des possibilités pour l'évaluation en systèmes batteries de chimies de plus forte densité d'énergie, au format « pouch », de type Li-ion et post Li-ion.



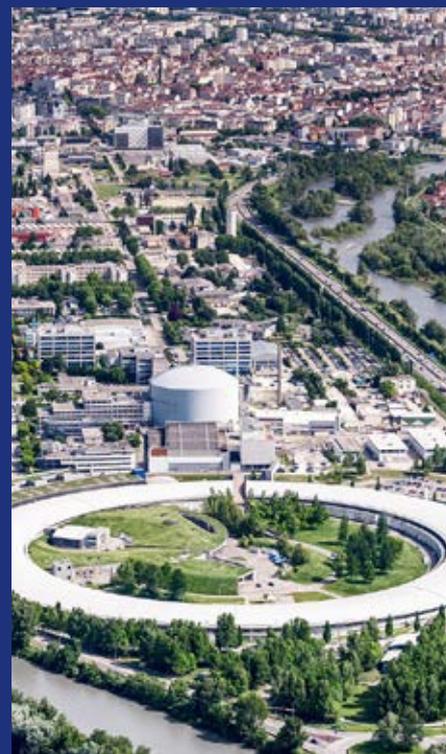
“

LES RECHERCHES MENÉES SUR LES MATÉRIAUX POUR BATTERIES PORTENT SUR DE MULTIPLES ASPECTS (PERFORMANCE, SÉCURITÉ, DURÉE DE VIE, RECYCLAGE...) »

DES ANODES SILICIUM POUR BATTERIES TOUT SOLIDE

Le Liten et l'institut IRIG de la Direction de la Recherche Fondamentale (DRF) du CEA mènent des travaux communs sur le développement de nouvelles générations d'anodes silicium pour batteries tout solide. La première étape a consisté à sélectionner un électrolyte compatible avec le silicium. Le choix s'est porté sur la famille des électrolytes solides à base de soufre pour leur conductivité ionique élevée et leurs propriétés mécaniques compatibles avec la réalisation des cellules par pressage à froid. Couplé à des particules

de silicium microniques, l'électrolyte $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$ (LPSCl) a permis d'obtenir une capacité spécifique de 3000mAh/gSi avec une efficacité coulombique supérieure à 97 % à partir du 2^{ème} cycle. Les travaux se poursuivent avec l'évaluation de matériaux silicium de différentes tailles et morphologies, avec des résultats prometteurs obtenus grâce aux nanofils synthétisés à l'IRIG. De nombreuses pistes restent à étudier en combinant les nanofils avec des matériaux carbonés et en optimisant la surface des matériaux actifs.



UN « BATTERY HUB » À GRENOBLE

En 2021, le CEA, l'ESRF et l'ILL ont lancé le Battery HUB, un projet dédié à la caractérisation des batteries au sein des Grands Instruments de Grenoble. L'objectif est d'étudier in operando les réactions au sein de batteries en fonctionnement, en conditions normales ou abusives, avec les meilleures résolutions spatiales et temporelles, grâce à un accès régulier au faisceau de l'ESRF. Les expériences croisées et les caractérisations multi-techniques menées par le HUB permettront de capitaliser de nombreuses données quantitatives, d'améliorer le champ des connaissances sur les mécanismes mis en jeu dans les batteries, et de mettre au point des modèles plus prédictifs sur les performances, le vieillissement et la sécurité des batteries. Cela dans le but d'accélérer le développement de nouveaux matériaux, capteurs et architectures. Le Battery HUB devrait bientôt s'ouvrir à d'autres laboratoires et instituts européens.

INTÉGRER UNE SOLUTION MULTI-CAPTEURS AU CŒUR DES BATTERIES

« Le Liten est coordinateur du projet INSTABAT, qui s'inscrit dans l'initiative européenne BATTERY 2030+ pour le développement des batteries de prochaines générations. L'objectif est de mesurer in operando les paramètres internes d'une batterie Li-ion afin d'accéder avec précision aux indicateurs d'états de charge, de santé, de puissance, d'énergie et de sécurité (SOx), ceci dans le but d'améliorer les performances

et la fiabilité des batteries, leur sécurité, et de mieux gérer les aspects de seconde vie et de recyclage. La solution technologique, composée de quatre capteurs physiques (1 capteur électrochimique, 2 capteurs optiques et 1 capteur de gaz) et de deux capteurs virtuels (basés sur des modèles électrochimiques et thermiques), sera intégrée dans la cellule de batterie, et les données collectées seront implémentées dans le BMS. »

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 955930.



UNE MÉTHODE OPERANDO D'ANALYSE DE BATTERIES

Connaître les mécanismes de réactions électrochimiques qui se produisent en temps réel dans les batteries est possible grâce à la méthode OEMS (online electrochemical mass spectrometry). L'analyse par spectrométrie de masse d'un gaz prélevé en continu dans une cellule spécifique contenant une batterie en fonctionnement permet notamment de mieux comprendre les mécanismes de vieillissement mis en jeu.

“

LA MESURE IN OPERANDO DE PARAMÈTRES INTERNE DE BATTERIES LI-ION PERMET DE COMPRENDRE LES MÉCANISMES MIS EN JEU ET D'AMÉLIORER LEURS PERFORMANCES, LEUR FIABILITÉ ET LEUR SÉCURITÉ. »

EMBALLERMENT THERMIQUE DES BATTERIES : SÉCURISER EN TOUTE LÉGÈRETÉ

Détecter le risque d'emballement thermique des batteries de façon précoce et sans les alourdir est un enjeu de sécurité majeur, notamment pour les applications aéronautiques. Dans le cadre du projet européen OASIS*, le CEA-Liten a contribué, en collaboration avec IPC** et Thales, au développement d'un packaging de cellules batteries 15% plus léger, résistant à des conditions thermo-mécaniques extrêmes et

doté de deux types de capteurs mis au point au Liten. Les capteurs de température sont intégrés au sein du couvercle en composite qui remplace l'actuel dispositif métallique, beaucoup plus lourd. Les capteurs piézoélectriques souples, intégrés au cœur même des modules, sont capables de déceler une modification du matériau de batterie annonciatrice d'un dysfonctionnement pouvant conduire à l'emballement.

* Grant Agreement N° 814581

** Centre Technique Industriel de la Plasturgie et des Composites



6 LA MOBILITÉ DÉCARBONÉE

Pour accompagner le développement de la mobilité décarbonée, le CEA propose une approche systémique de la chaîne énergétique, de la brique élémentaire au système complet, pour dimensionner et optimiser la gestion d'énergie en fonction des conditions d'usage. Ses activités se concentrent sur la conception et la réalisation de systèmes de chaînes de traction hybrides batterie/pile à combustible embarquant les électroniques de puissance et de commande, l'intégration de ces systèmes au sein de véhicules prototypes jusqu'au monitoring et à l'interprétation des données en conditions réelles d'usages des véhicules, sans oublier leurs interactions avec les infrastructures de recharge.

CAP SUR LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES HYBRIDES

A l'avenir, de plus en plus de véhicules électriques seront dotés à la fois d'une pile à combustible et d'une batterie. Afin d'optimiser le développement de ces véhicules électriques hybrides, le CEA-Liten a amélioré un logiciel de dimensionnement des systèmes associant piles à combustible et batteries. Une fois ces deux éléments choisis et dimensionnés, il faut établir une loi de commande qui détermine, à chaque

instant, laquelle de la pile ou de la batterie doit fournir l'électricité pour une utilisation optimale de l'énergie. Les chercheurs ont optimisé dans la plate-forme de modélisation multi-physiques multi-échelles MUSE un algorithme de programmation dynamique existant, dans le but de réduire le processus itératif de calcul. La nouvelle version du logiciel devient ainsi trois fois plus rapide que la précédente.



“

L'ALGORITHME DÉTERMINE PLUS RAPIDEMENT QUI DE LA PILE OU DE LA BATTERIE DOIT FOURNIR L'ÉLECTRICITÉ À CHAQUE INSTANT. »

GEN Z : RÉVOLUTIONNER LA MOBILITÉ LOURDE

Le projet Gen Z porté par Mike Horn et Cyril Despres vise le développement d'une technologie innovante de pile à combustible à forte puissance destinée au marché de la mobilité lourde. Pour l'éprouver « grande nature » et dans des conditions extrêmes qui valideront sa fiabilité, un véhicule électrique hydrogène s'engagera dans une prochaine course de rallye raid.

UN SCIENTIFIQUE DU LITEN PARMIS LES PLUS CITÉS AU MONDE

Natalio Mingo est le premier chercheur du CEA Grenoble à se voir décerner le titre d'HCR (Highly Cited Researcher) par Clarivate Analytics. Ses publications, relatives aux calculs théoriques sur la conductivité thermique ou à l'approche haut-débit pour du calcul prédictif de propriétés de nouveaux matériaux, ont été très largement citées par ses pairs.

EN ROUTE VERS DES VÉHICULES LOURDS ÉLECTRIQUES

La technologie de batterie « Cell-to-Pack », la miniaturisation des convertisseurs multi-niveaux ainsi que les systèmes de pilotage et de gestion fine de l'état des batteries sont les innovations technologiques au cœur de POWER2024. Ce projet, coordonné par Actia, favorisera l'électrification des véhicules lourds, qui ne peuvent bénéficier des technologies d'électrification standardisées pour véhicules légers du fait de la diversité de leurs usages et besoins. Ces innovations contribueront à réduire les émissions de gaz à effet de serre et la pollution dans les agglomérations.



BATTERIES

Développer des batteries lithium-ion et les futures générations, dont les batteries « tout solide » plus compactes, plus performantes et plus sûres.



CHIMIE VERTE ET PROCÉDÉS POUR L'ENVIRONNEMENT

Favoriser une croissance durable grâce à l'amélioration des matériaux et procédés dans une approche éco-circulaire.



ELECTRONIQUE STRUCTURELLE

Fonctionnaliser des surfaces planes ou 3D avec de l'électronique.



MODÉLISATION ET INTÉGRATION POUR LA MOBILITÉ



CONVERSION DU CARBONE

Convertir le CO₂ et ses dérivés en produits carbonés énergétiques.

Dimensionner et optimiser la gestion d'énergie en fonction des conditions d'usages par une approche systémique de la chaîne énergétique.



MÉTALLURGIE DES POUDRES, PLASTURGIE ET ASSEMBLAGES

Développer et fabriquer des composants à haute valeur ajoutée à partir de poudres ou de pièces massives métalliques ou céramiques.

12 PLATEFORMES UNE TECHNO DE



NANOCARACTÉRISATION

Sonder la structure et le comportement des matériaux sur une plateforme unique regroupant plus de 50 équipements de caractérisation avancée.



NANO SÉCURITÉ

Encadrer la mise en œuvre des nanomatériaux et maîtriser les risques émergents.

Proposer une approche unique de conception et d'optimisation des piles de type PEMFC.

POUR RECHERCHE LOGIQUE POINTE

NOS PLATEFORMES NUMÉRIQUES ET TECHNOLOGIQUES, ALLIANT MOYENS ET COMPÉTENCES, PERMETTENT D'INNOVER À LA FOIS SUR DE LA R&D DES PRODUITS ET DES PROCÉDÉS. CONVAINCU QUE LA COMPÉTITIVITÉ PASSE ENTRE AUTRE PAR LE DÉVELOPPEMENT, LE TEST ET LA VALIDATION DES INNOVATIONS SUR DES ÉQUIPEMENTS PRÉ-INDUSTRIELS, LE LITEN INVESTIT CONTINUELLEMENT POUR MAINTENIR SES PLATEFORMES AU MEILLEUR NIVEAU MONDIAL.

Tester en situations réelles des solutions de gestion de l'énergie sur des réseaux complexes (électricité, gaz, chaleur).



PILES À COMBUSTIBLE



PRODUCTION HYDROGÈNE ET STOCKAGE

Exploiter l'hydrogène en tant que source d'énergie, le produire par électrolyse de la vapeur d'eau.



SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Accélérer le déploiement des solutions photovoltaïques à haut rendement.



SMART GRID MULTI-ÉNERGIES



LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE SE TRADUIT PAR LE DÉPLOIEMENT DE SOURCES RENOUVELABLES INTERMITTENTES, L'APPARITION DE NOUVEAUX USAGES (COMME LA MOBILITÉ ÉLECTRIQUE, LA PRODUCTION MASSIVE D'HYDROGÈNE PAR ÉLECTROLYSE, OU ENCORE L'AUTOCONSOMMATION), ET LE COUPLAGE ENTRE LES DIFFÉRENTS VECTEURS (ÉLECTRICITÉ, CHALEUR, FROID, GAZ, ETC.). DANS CE CONTEXTE, LE LITEN CONÇOIT ET EXPLOITE DES OUTILS NUMÉRIQUES POUR DIMENSIONNER ET PILOTER DE MANIÈRE OPTIMALE LES SYSTÈMES ET RÉSEAUX D'ÉNERGIE, EN S'APPUYANT SUR DES PLATEFORMES EXPÉRIMENTALES MULTI-VECTEURS ET UNE CONNAISSANCE APPROFONDIE DES BRIQUES TECHNOLOGIQUES. LE LITEN DÉVELOPPE ÉGALEMENT DES COMPOSANTS POUR LA GESTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE (CONVERTISSEURS DE PUISSANCE) ET DE L'ÉNERGIE THERMIQUE (GÉNÉRATION, CONVERSION ET STOCKAGE), AFIN DE MAXIMISER L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES SYSTÈMES ET DES RÉSEAUX.

SYSTÈMES, RÉSEAUX ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

EN CHIFFRES

47 PUBLICATIONS

335 BREVETS

24 DOCTORANTS

170 PERSONNES

1 SYSTÈMES ET RÉSEAUX ÉNERGÉTIQUES

Pour répondre aux enjeux de la transition énergétique, faire face à l'intégration efficiente des énergies renouvelables dans le mix énergétique et à l'essor de nouveaux usages, les systèmes et réseaux énergétiques doivent être repensés. Les équipes du CEA sont mobilisées aux côtés de leurs partenaires industriels pour concevoir des systèmes multi-vecteurs plus efficaces et plus sobres. Il s'agit d'améliorer leur pilotage en les rendant davantage connectés et « intelligents » afin de prendre en compte les contraintes d'efficacité énergétique, d'empreinte carbone, tout en répondant aux besoins spécifiques des usages visés. Dans le cas des réseaux, ces technologies « smart grids » permettent de contrôler de manière coordonnée les différents producteurs, les consommateurs et les moyens de stockage.

UNE PLATEFORME D'INTÉGRATION DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES

La plateforme technologique PISE regroupe des installations existantes et de nouveaux équipements dédiés au développement de systèmes énergétiques complexes. Les extensions des réseaux et intégration de nouveaux composants de génération de

chaleur et de froid débutées en 2021 se poursuivent, pour proposer à terme un regroupement de moyens d'essais uniques pour l'étude de réseaux multi-vecteurs chaleur / froid / électricité / gaz / H₂.



“

PISE : UN REGROUPEMENT DE MOYENS D'ESSAIS UNIQUES POUR L'ÉTUDE DE RÉSEAUX MULTI-VECTEURS CHALEUR / FROID / ÉLECTRICITÉ / GAZ / H₂. »

Une des composantes de la Plateforme PISE, basée à l'Ines, permet l'étude et l'optimisation de solutions de gestion de chaleur et de froid

DISTRICTLAB-H, UNE SOLUTION DIGITALE POUR LES RÉSEAUX DE CHALEUR

Le CEA-Liten travaille de longue date avec ses partenaires sur les problématiques d'optimisation de la gestion de réseaux de chaleur urbains. Les algorithmes innovants développés par les équipes ont été implémentés dans un logiciel appelé DistrictLab-H, qui prend en charge à la fois la simulation et l'exploitation de ces réseaux. Il permet ainsi d'étudier des scénarios comme le raccordement de clients supplémentaires d'une part, et d'optimiser la production et la distribution d'énergie, tout en diminuant l'impact environnemental, d'autre part. Initialement développé à l'échelle d'un quartier, le logiciel a ensuite été adapté pour les systèmes à grande échelle et a été déployé avec succès à Grenoble et à Metz.

“

LA SOLUTION DISTRICTLAB-H ÉTANT À LA FOIS GÉNÉRIQUE, RÉPLICABLE ET D'INTÉRÊT POUR LES ACTEURS DU DOMAINE, ELLE FAIT AUJOURD'HUI L'OBJET D'UN PROJET DE CRÉATION D'ENTREPRISE. CELLE-CI AMBITIONNE D'EN DÉVELOPPER UNE VERSION INDUSTRIELLE ET COMMERCIALISABLE À HORIZON 2023. »

CONCEPTION DES BÂTIMENTS : RÉDUIRE LE TEMPS DE CALCUL DES ÉTUDES DE SIMULATION ET OPTIMISATION

Le bâtiment représente environ un tiers de la demande énergétique mondiale. Il peut être encore amélioré grâce à des approches systémique ou holistique intégrant des enveloppes plus performantes, des équipements à haut rendement et l'intégration des énergies renouvelables. Les approches globales de modélisation nécessitent des temps de calcul trop importants, et les modèles simplifiés peuvent affecter de manière importante la représentativité des études de cas. Des travaux menés au CEA à l'Ines explorent une autre voie, basée sur la réduction de la période simulée. L'algorithme de TypSS (Typical Short Sequence) développé conduit à des simulations beaucoup plus rapides pour un modèle de bâtiment détaillé, tout en aboutissant à des résultats très proches des résultats annuels.

Le logiciel DistrictLab-H aide notamment à optimiser le tracé des réseaux de chaleur.



STOCKAGE COUPLÉ DE CHALEUR ET D'HUMIDITÉ POUR LE REFROIDISSEMENT DES POINTS FROIDS DES CYCLES THERMODYNAMIQUES

CONTEXTE

Le refroidissement des cycles thermodynamiques pour la production électrique est un élément majeur en ce qu'il impacte directement et fortement le rendement de conversion [1]. Le refroidissement humide est le plus efficace, au prix d'une très forte consommation en eau [2]. A l'inverse, le refroidissement sec accuse une perte de rendement importante avec l'augmentation de la température ambiante [3]. Ces deux approches se conjuguent donc assez mal avec les prévisions de réchauffement climatique et de tension accrue sur les réserves d'eau.

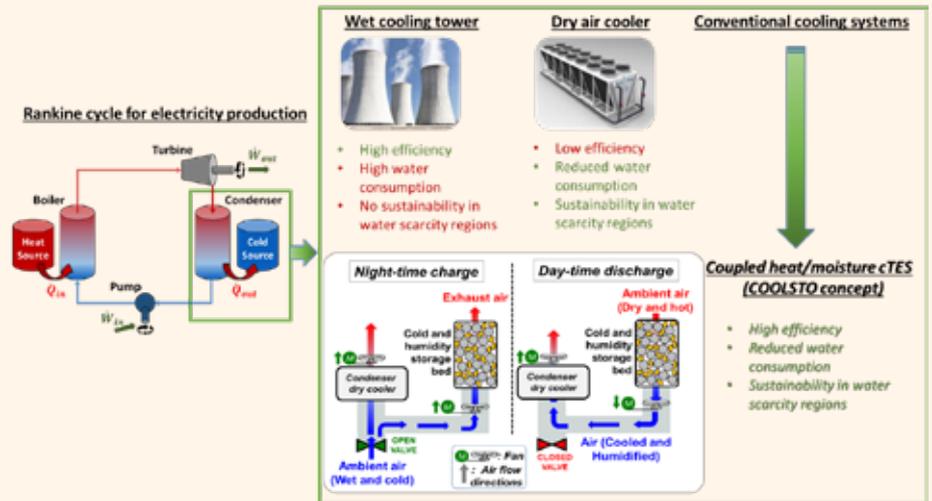


Figure 1 : Principe et avantages du concept de stockage couplé COOLSTO pour le refroidissement des cycles thermodynamiques.

RÉSULTATS

Le concept de stockage couplé de chaleur et d'humidité développé dans le projet COOLSTO (Figure 1) s'inscrit dans la démarche « efficacité énergétique » du Liten et d'une production électrique plus efficace et plus vertueuse. Il permet de compenser la perte de performances des systèmes de refroidissement sec, sans consommation additionnelle d'eau. Le principe est basé sur l'utilisation d'un stockage rempli de matériaux sensible et sorbant, stockant la chaleur et l'humidité durant la nuit pour refroidir l'air ambiant le jour, par effet cumulé de convection et de sorption.

Le projet COOLSTO a permis de vérifier expérimentalement la pertinence du concept grâce à la construction d'une installation dédiée et de développer un modèle numérique permettant une compréhension fine

des mécanismes physiques et une extrapolation à différents sites et régions. Un exemple typique de l'efficacité du système COOLSTO est présenté en Figure 2. Lors d'une nuit type « n », le système de stockage couplé est chargé (stockage du frais et de l'humidité de l'ambiant nocturne). En journée, l'air

ambiant chaud est refroidi par convection et désorption au sein du réservoir de stockage avant d'être envoyé vers le refroidisseur à air sec, ce qui permet de limiter ses pertes de performances. Un bon accord expérimental/numérique est obtenu, tant sur les températures que sur la masse d'eau ad/désorbée.

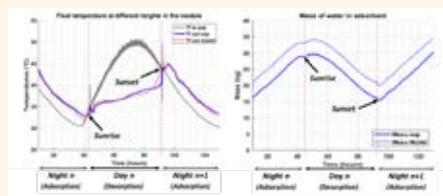


Figure 2 : Résultats expérimentaux et numériques typiques du concept COOLSTO ; gauche : effet de refroidissement de l'air ambiant par le système ; droite : évolution de la masse d'eau au sein du sorbant.

CONCLUSION

La pertinence des résultats obtenus lors du projet COOLSTO a été validée par 2 publications, une expérimentale [4] et une sur le modèle numérique [5], ainsi que par le financement d'une thèse de doctorat pour la poursuite et l'amélioration du système qui a déjà conduit au dépôt d'un brevet sur le développement d'un matériau innovant hybride [5] et à la rédaction de nouvelles publications.

[1] DOE, Concentrating Solar Power Commercial Application Study: Reducing Water Consumption of Concentrating Solar Power Electricity Generation. DOE, 2008.

[2] Carter, N., & Campbell, R., Water Issues of Concentrating Solar Power (CSP) Electricity in the U.S. Southwest (No. R40631), 2009.

[3] Turchi, C. S., Wagner, M. J., & Kutscher, C. F., Water Use in Parabolic Trough Power Plants: Summary Results from Worley Parsons' Analyses (No. NREL/TP-5500-49468). NREL, 2010.

[4] S. Rougé, O. Soriano, A. Bruch, G. Largiller, and J. Bentivoglio, 'Experimental characterization of coupled sensible heat and moisture storage for dry cooling enhancement', Appl. Therm. Eng., vol. 192, p. 116922, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116922.

[5] Grégory LARGILLER, Igor CORREA FERREIRA, Matériau composite adsorbant destiné à des dispositifs de contrôle de l'humidité, des dispositifs d'échange et de stockage thermique, Patent application (en dépôt).

2 GESTION DE L'ÉNERGIE THERMIQUE

La production de chaleur et de froid, qui représente une part importante de la consommation finale d'énergie (~40%) des secteurs industriels, tertiaires et résidentiels, est un enjeu majeur pour la transition énergétique. Nos travaux de recherche se concentrent d'une part sur le stockage thermique, pour apporter de la flexibilité aux systèmes et réseaux énergétiques, et d'autre part sur les machines thermiques, qui bénéficient d'améliorations continues en termes de performances et de coûts pour valoriser la chaleur fatale.

PRODUIRE DU FROID À MOINDRE COÛT

Une machine produisant simultanément froid et électricité par association d'une turbine électrogène et d'un dispositif fondé sur le principe du cycle à absorption a été mise au point au CEA-Liten. Elle consomme 10 à 20 fois moins d'électricité que les climatisations traditionnelles (machines à compression mécanique de vapeur) en valorisant la chaleur fatale issue de l'industrie

(80°C - 200°C). En s'appuyant sur des modèles numériques, les chercheurs ont mis au point un générateur de vapeur d'ammoniac de grande pureté, pour gagner en performance et en compacité. Celle-ci peut servir, en partie ou en totalité, à alimenter le cycle de réfrigération pour produire du froid, ou bien être dirigée vers une turbine intégrée au dispositif afin de produire de l'électricité.



“ LES MACHINES À ABSORPTION PERMETTENT DE VALORISER DE LA CHALEUR FATALE POUR LA PRODUCTION DE CHALEUR, OU POUR UNE CO-PRODUCTION DE FROID ET D'ÉLECTRICITÉ. »

DU SUCRE POUR STOCKER LA CHALEUR DES RÉSEAUX URBAINS

Les chercheurs du Liten ont mis au point un démonstrateur de stockage thermique utilisant... un sucre! Ce démonstrateur associe des techniques de bullage et d'ensemencement pour faciliter la cristallisation du Xylitol, un matériau biosourcé, peu coûteux et non toxique, mais qui reste liquide même en dessous de sa température théorique de fusion. Une fois le problème de surfusion résolu, toute l'énergie stockée dans le sucre est restituée de manière optimale.



Ce démonstrateur de stockage thermique utilise... un sucre!

UNE MACHINE À ABSORPTION POUR LA PRODUCTION DE CHALEUR

Dans le cadre d'un projet Easypoc, financé par la région AURA, le Liten a développé une nouvelle technologie de machine à absorption pour la production de chaleur (>65°C) nécessaire à la production d'eau chaude sanitaire. Cette solution, qui permet de valoriser une source de chaleur fatale ou issue des énergies renouvelables, offre un gain de performance de 70% en comparaison avec l'utilisation directe de cette source d'énergie. Cette technologie innovante qui utilise des fluides naturels sans impact CO₂, protégée par 2 brevets CEA, pourra être industrialisée prochainement.

3 DES CONVERTISSEURS DE PUISSANCE PERFORMANTS

Avec la part croissante de l'électricité dans le mix énergétique, l'électronique de puissance devient une brique prépondérante sur laquelle investir afin de répondre de manière efficace à l'intégration des énergies renouvelables au réseau et à l'électrification massive des transports. Au CEA-Liten, les équipes proposent des innovations pour optimiser, réduire l'encombrement et améliorer les performances des convertisseurs de puissance. Pour les applications visées, demandant de fortes densités de courant et une haute fréquence de fonctionnement, les développements se focalisent notamment sur l'intégration de composants dits à « grand gap » de type SiC et GaN.

COMPOSANTS GaN POUR LA MOBILITÉ : VERS DES APPLICATIONS FORTE PUISSANCE

La filière automobile doit répondre à des normes anti-pollution européennes qui conduisent les constructeurs à optimiser l'efficacité énergétique des véhicules. Dans le cadre d'un projet européen, le Liten, via son équipe commune avec le Leti, a travaillé sur une chaîne de traction de véhicule électrique utilisant des matériaux et design hautes performances, et plus précisément sur la conception d'un onduleur hexa-phasé à composants grand gap GaN. Les premiers essais réalisés sur des modules prototypes GaN 650V/240A du marché montrent de très bonnes performances avec des rendements supérieurs à 99% et une puissance maximum de 80kW. Les analyses menées grâce au jumeau numérique de l'onduleur montrent que cette puissance pourrait dépasser 120 kW en disposant d'une meilleure gestion thermique du packaging. Ce démonstrateur confirme l'intérêt des composants GaN pour des applications haute puissance (> 10kW), basse fréquence (< 50kHz).

UN MICRO-ONDULEUR PHOTOVOLTAÏQUE À BASE DE GaN

Un générateur photovoltaïque (PV) est couplé à un convertisseur statique afin de fonctionner au point de puissance maximale (MPP) et d'injecter l'énergie extraite vers des collecteurs d'énergie électrique (AC ou DC). Placer un convertisseur MPPT par module permet une extraction de puissance locale, ce qui est favorable dans des conditions hétérogènes de fonctionnement (ombrage, etc.). Ces convertisseurs, qui existent sous deux formes DC/AC (micro onduleur) ou DC/

DC (power optimizer), sont installés dans la boîte de jonction de chaque module PV. Le Liten à l'Ines a réalisé un banc de caractérisation dynamique haute température ainsi qu'un 1^{er} prototype de micro-onduleur photovoltaïque 400W basé sur des composants GaN réalisés par le département Composants du Leti. Une 2^{ème} génération de micro-onduleur est prévue fin 2022, mettant en œuvre des interrupteurs GaN optimisés pour l'application photovoltaïque.

DES TRANSFORMATEURS COMPACTS À HAUTS RENDEMENTS POUR CHARGEURS EMBARQUÉS DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Le CEA a mis au point une méthodologie de dimensionnement pour concevoir des composants magnétiques (transformateurs et inductances) compacts en collaboration avec Renault Group. La réduction de taille des composants magnétiques, qui occupent 30 à 40% du volume total des convertisseurs, constitue un enjeu majeur pour gagner en compacité tout en maintenant leur efficacité. L'analyse thermique du composant magnétique montre que les contraintes thermomécaniques sont

une limitation à la réduction de taille du composant lorsque les matériaux de type ferrite sont employés. Les composants de type POT-CORE permettent de limiter les émissions électromagnétiques mais sont plus sujets que les noyaux EE à l'apparition de gradients thermiques. L'intégration de matériaux conducteurs thermiques au plus proche des bobinages peut permettre d'améliorer la gestion thermique de ce type de composants et limiter l'apparition de ces gradients.

EN 2021, UN RÉSEAU ÉCO-INNOVATION SE DÉPLOIE AU SEIN DES LABORATOIRES DE RECHERCHE DU LITEN

LES 8 ACTEURS DE CETTE MISSION ÉCO-INNOVATION NOUS PRÉSENTENT SES ENJEUX

La raison d'être du Liten est de proposer des solutions techniques contribuant à réduire notre impact environnemental sur la planète, en particulier dans le domaine de l'énergie. Cette mission est essentielle, car nous devons intégrer les dimensions économiques, environnementales et sociétales dans le développement de toutes nos technologies. Il est important pour le chercheur de pouvoir projeter son système dans une application et d'en connaître les forces et faiblesses, sur le plan environnemental et financier, pour orienter ses innovations, avec une meilleure compréhension des outils technico-économiques pour éclairer les travaux de veille sur les systèmes énergétiques.

Cette mission éco-innovation nous permet d'acquérir une meilleure connaissance de l'impact environnemental des technologies afin de proposer des actions concrètes pour limiter ces impacts et répondre à ces enjeux – et quand on a un objectif, il faut des indicateurs pour s'assurer qu'on avance dans la direction voulue. De plus, les actions de l'équipe pour l'autonomisation des chercheurs s'adaptent à la culture, aux besoins et spécificités de chaque thématique, avec une capitalisation transverse au niveau Liten. L'équipe est motivée, et riche de ses compétences, expertises et de notre historique de plus de 10 ans sur l'ACV et la technico-économie.



QUELLE ACTION 2021 SOUHAITERIEZ-VOUS PARTAGER, POUR ILLUSTRER VOTRE IMPLICATION DANS LA MISSION ÉCO-INNOVATION ?

“

J'ai pu capitaliser et valoriser des résultats d'études environnementales sur des technologies de fabrication additive. Être impliquée dans cette mission donne du sens à mon travail au quotidien.»

Emmanuelle COR

“

Le projet conduit sur la modélisation d'un mix national 100% renouvelable a été riche d'enseignement et une belle réussite collective.»

Julie CREN

“

Le montage du projet européen SURPASS a permis de travailler sur les 3 piliers du développement durable, pour éco-innover dans le domaine des plastiques sûrs, durables et recyclables.»

Stephanie DESROUSSEAUX

“

La participation aux groupes de travail interministériels sur la route électrique (ERS), et la prise de conscience croissante de l'intérêt de cette solution, a clairement été un moment fort.»

Fabien PERDU

“

C'est important de soutenir le développement d'innovations avec l'intégration des préoccupations environnementales et sociétales dès leur conception.»

Elise MONNIER

“

Je suis fière de la diffusion de l'outil EcoPV plus flexible, plus simple d'utilisation pour soutenir les projets technologiques.»

Nouha GAZBOUR

“

C'est d'avoir partagé des éléments de réflexion relatifs aux limites techniques, économiques et environnementales de mix énergétiques variés et les enseignements à en tirer.»

Didier BLOCH

“

Et il ne faut pas perdre de vue que l'amélioration des performances économiques et environnementales de nos technologies sont des sources d'innovation!»

Isabelle MAILLOT



POUR MINIMISER L'IMPACT DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE SUR LA CONSOMMATION DE MATIÈRES PREMIÈRES, L'ÉCO-CIRCULARITÉ DOIT ÊTRE AU CŒUR DE L'INNOVATION TECHNOLOGIQUE. LE LITEN MÈNE DES TRAVAUX DE RECHERCHE POUR RÉPONDRE AUX ENJEUX DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE DE LA MATIÈRE « RÉDUIRE, RÉUTILISER, RECYCLER » : ÉCO-CONCEPTION ET RECYCLAGE DES NOUVELLES TECHNOLOGIES DE L'ÉNERGIE, MATÉRIAUX ET PROCÉDÉS ÉCO-INNOVANTS COMME LA FABRICATION ADDITIVE, LES ASSEMBLAGES COMPLEXES, LES MATÉRIAUX BIO-SOURCÉS OU L'INTÉGRATION DE FONCTIONS AVEC L'ÉLECTRONIQUE STRUCTURELLE. PAR AILLEURS, LE LITEN DÉVELOPPE DES MATÉRIAUX, PROCÉDÉS ET SYSTÈMES POUR L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE DU CARBONE, CE QUI PERMET DE CONVERTIR DES RESSOURCES CARBONÉES EN MOLÉCULES D'INTÉRÊT POUR L'ÉNERGIE OU LA CHIMIE.

ÉCONOMIE CIRCULAIRE



1 FABRICATION ADDITIVE

EN CHIFFRES

67 PUBLICATIONS

461 BREVETS

47 DOCTORANTS

230 PERSONNES

Depuis 2014, le Liten a investi sur l'impression 3D et établi des partenariats avec des équipementiers dans la perspective de la montée en puissance de la filière. Les recherches portent en particulier sur le développement de nouveaux matériaux, et sur la caractérisation fine des pièces imprimées pour comprendre les relations entre paramètres du procédé, microstructures du matériau et propriétés mécaniques. L'intégration dans les filières applicatives est également au cœur des développements, ainsi que le contrôle non destructif avec le CEA-List.

FONCTIONNALISER DES POUDRES COMPOSITES À HAUTE VALEUR AJOUTÉE

Le Liten a mis au point un procédé permettant la mise en œuvre d'alliages d'aluminium structuraux par fusion laser. Pour contrôler la germination de la matière au moment du refroidissement et se prémunir d'un phénomène connu de fissuration à chaud, un traitement préliminaire de fonctionnalisation des poudres par greffage électrostatique de

nanoparticules a été développé. La technologie, supportée par un nouveau mélangeur à fort taux de cisaillement, pourra être valorisée pour d'autres matériaux. Cette innovation s'inscrit dans une démarche d'économie de matière pour la fabrication de composants à forte valeur ajoutée.

HP ET LE CEA OUVRENT LA TECHNOLOGIE DU METAL BINDER JET À L'INDUSTRIE

Fort de leur collaboration depuis 2018, HP et le CEA permettent à leurs partenaires industriels de découvrir une nouvelle solution de fabrication additive métallique, avec la mise en service d'une imprimante HP Metal Jet au sein du CEA à Grenoble. Cette technologie à jet de liant sur lit de poudre rend possible une production qualifiable de masse à un coût compétitif et maîtrisé, et conduisant à la fabrication de pièces aux propriétés industrielles.



L'objectif des deux partenaires consiste à diffuser cette technologie HP Metal Jet et à la confronter aux exigences des différents secteurs applicatifs

2 PROCÉDÉS ET ASSEMBLAGES COMPLEXES

Un volet des activités du Liten est dédié à la fabrication de composants à haute valeur ajoutée à partir de poudres, via des procédés de plasturgie, de Compression Isostatique à Chaud (CIC) ou encore de brasage.

Les pièces obtenues peuvent être quasiment aux cotes (near net shape), limitant les étapes ultérieures d'usinage. De plus, le couplage des différents procédés de fabrication ouvre de nouvelles perspectives d'innovation avec le développement de composants multi-matériaux complexes.

ASSEMBLAGE POUR LE NUCLÉAIRE

La technologie d'assemblage par soudage-diffusion développée au Liten depuis 20 ans, historiquement pour la fusion nucléaire, est aujourd'hui valorisée dans le domaine des énergies bas carbone. Les compétences du laboratoire sur la fabrication des échangeurs de chaleur sont valorisées dans plusieurs projets pour différentes applications. Dans le projet IDNES, le Liten réalise le design des échangeurs et conduit des études technico-économiques sur la valorisation de la chaleur dégagée par le procédé pour des

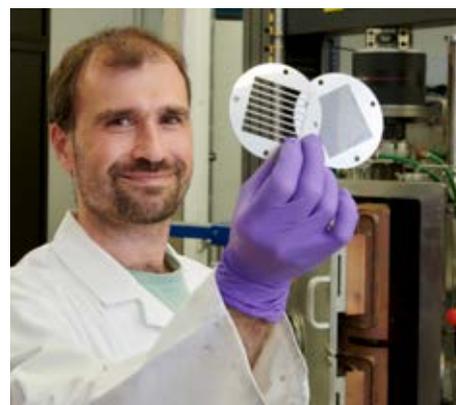
applications de réseaux de chaleur ou de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Dans le projet Nuward, en partenariat avec EDF, Framatome, NavalGroup et Technicatome, le Liten va notamment comparer les deux procédés de CIC* et CUC** pour l'assemblage des plaques, pour la fabrication d'un réacteur électrogène. Ces projets répondent aux défis du plan « France 2030 » qui vise notamment l'émergence des petits réacteurs modulaires, dits SMR (small modular reactors).

*CIC compression isostatique à chaud **CUC compression uniaxiale à chaud

UNE SOLUTION INNOVANTE D'ASSEMBLAGE POUR L'INDUSTRIE MÉTALLURGIQUE

Le projet CALHIPSO, coordonné par l'université Bourgogne Franche-Comté, est lauréat de l'appel à projets EQUIPEX+ 2020. Dédié au développement de la technologie de Compression Isostatique à Chaud (CIC) pour l'industrie métallurgique, il propose une approche globale d'expérimentation, de modélisation et de simulation pour définir des solutions « clés en main ». Dans ce cadre, le Liten acquiert une enceinte de CIC de R&D dernière génération.

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du Programme d'Investissements d'Avenir portant la référence ANR-21-ESRE-0039



3 ÉLECTRONIQUE STRUCTURELLE

L'électronique structurelle fait appel à des technologies génériques qui permettent d'intégrer de l'électronique au cœur des objets. Cette approche s'inscrit dans la suite logique des travaux que mène le Liten depuis une quinzaine d'années dans le domaine de l'électronique imprimée. Parallèlement à la formulation de nouvelles encres, les axes de recherche concernent le développement de procédés d'impression, de mise en forme et d'assemblage mettant en œuvre des substrats souples ou étirables pour des applications, énergie, santé ou transport par exemple.

L'ÉLECTRONIQUE ORGANIQUE IMPRIMÉE À L'HEURE DE LA MATURITÉ

L'électronique organique imprimée offre une solution écologique et rentable pour la production de capteurs pour l'IoT. Ainsi, une étiquette intelligente autonome capable de détecter des chocs, même légers, a été entièrement conçue sur substrat papier par Arkema, Arjowiggins et le CEA-Liten dans le cadre d'un projet européen. Elle mixe des technologies d'impression - pour les pistes,

antennes et capteurs piézoélectriques - et de report de composants. Le capteur mesure des vibrations et des chocs aussi légers qu'un simple toucher, et transmet les informations à la puce via une antenne. Il peut être utilisé pour la surveillance de colis et d'objets fragiles. Cette étiquette, qui pourrait intégrer à terme des capteurs d'humidité et de température, a l'avantage d'être entièrement recyclable.



“

CETTE ÉTIQUETTE INTELLIGENTE AUTONOME DE DÉTECTION DE CHOCS A ÉTÉ CONÇUE SUR SUBSTRAT PAPIER. »

AIDER LES ENTREPRISES À INNOVER PAR L'ÉLECTRONIQUE SOUPLE

L'association Européenne SmartEEs a été créée pour accompagner ETI, PME et start-up dans leur transition numérique via l'intégration d'électronique souple dans des produits et services innovants. Elle pérennise ainsi le service d'innovation mis en place dans le cadre du projet éponyme de "Digital Innovation Hub" Européen, se terminant fin 2022. « Nous offrons un service intégré et pan-européen d'innovation couvrant l'accès aux technologies digitales, un portefeuille complet de compétences et partenaires ainsi qu'un support au développement d'affaires » explique son président, Jérôme Gavillet, du CEA-Liten.

LE FBI CERTIFIE LES CAPTEURS D'EMPREINTES D'ISORG

Créée en 2010 en tant que spin off du CEA, spécialisée dans les capteurs polymères et les photo-détecteurs organiques, Isorg vient de décrocher la certification du FBI pour son capteur d'empreintes digitales. Cet indispensable sésame lui ouvre le marché en plein essor de la sécurité, en plus de celui des smartphones sur lequel elle est déjà positionnée.

LEVÉE DE FONDS POUR LE SITE DE PRODUCTION DE SYMBIOSE

Symbiose a levé 6,5 M€ en 2021 pour monter un site de production à Pugnac (Gironde). Positionnée sur la filière plastronique, Symbiose a développé en partenariat avec le CEA la technologie IME. Ce processus d'intégration de décors imprimés et de circuits électroniques permet de produire des objets de forme 3D avec des circuits intégrés et des guides optiques de différents degrés de complexité.

4 CHIMIE VERTE ET RECYCLAGE

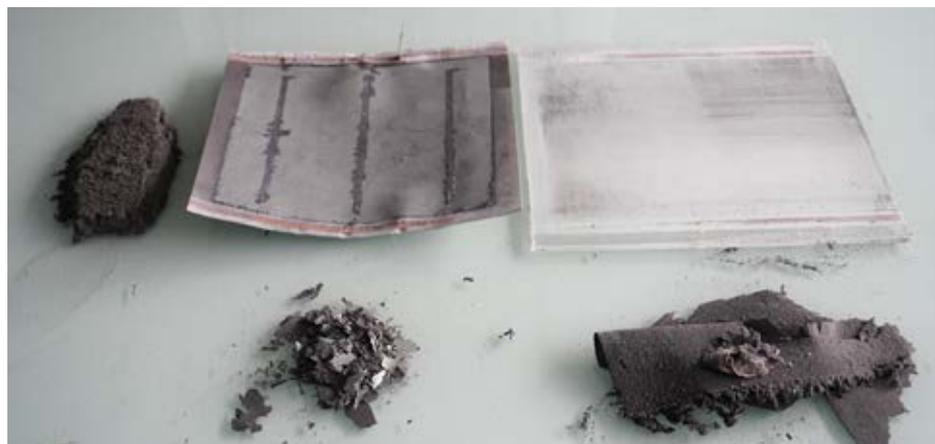
L'ambition est de concevoir des solutions permettant d'améliorer la soutenabilité des technologies pour les systèmes énergétiques décarbonés. Le Liten se distingue par sa capacité à développer des procédés de recyclage, plus respectueux de l'environnement et spécifiques aux composants des nouvelles technologies de l'énergie arrivés en fin de vie, mais aussi à investiguer de nouvelles filières de valorisation des matières secondaires. En parallèle, il développe des approches d'écoconception des composants permettant d'exploiter les procédés de recyclage dans les meilleures conditions.



MIEUX RECYCLER LES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES EN FIN DE VIE

Le Liten a développé une méthode peu polluante et peu consommatrice d'énergie pour recycler les panneaux photovoltaïques en fin de vie. Elle consiste à séparer la face avant en verre de la face arrière en polymères, en découpant à travers les cellules photovoltaïques grâce à un fil diamanté. Les chercheurs parviennent ainsi à désolidariser les deux faces espacées de quelques centaines de microns seulement. Avec cet équipement expérimental, un module d'un mètre carré peut être traité en une demie heure. Le verre récupéré pourra être recyclé dans une

nouvelle filière. Il est également possible, par traitement hydrométallurgique, de séparer et de récupérer les différents métaux présents dans les poudres de découpe afin de les réutiliser.



UN PROJET PILOTE POUR LE RECYCLAGE DE BATTERIES AVEC ORANO

Le groupe Orano s'est associé à des partenaires reconnus - Paprec, MTB Manufacturing, Saft et le CEA - afin de donner une seconde vie aux matériaux valorisables issus des batteries. Regroupés au sein du projet intitulé RECYVABAT (Recyclage et Valorisation de Batteries), le consortium a mis au point un procédé qui permet de purifier et de récupérer séparément les métaux (lithium, cobalt, nickel, etc.) contenus dans les batteries des véhicules électriques en vue de les recycler pour fabriquer de nouveaux composants de batteries. Le Liten apporte son expertise pour innover sur l'ensemble du cycle. Deux pilotes industriels seront construits afin de conduire les essais techniques et les tests sur le procédé.

LE LABEX SERENADE PRÉPARE LE FUTUR : VERS L'ÉCOCONCEPTION DE NANOMATÉRIAUX SOBRES, INNOVANTS ET SÛRS

CONTEXTE

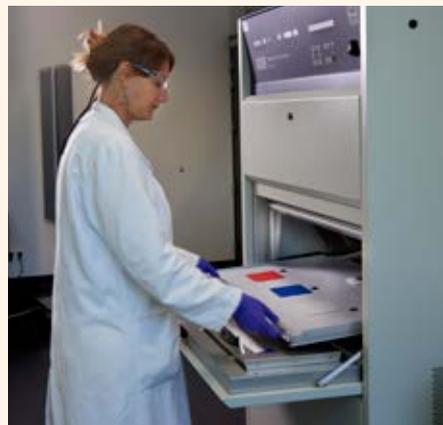
Le LABEX Serenade (Safer Ecodesign Research and Education applied for Nanomaterial Development) a rassemblé pendant plus de huit ans treize partenaires académiques et industriels français autour de l'enjeu du design de nanomatériaux plus sûrs à l'égard de l'homme et de l'environnement. Ce projet a fourni une occasion unique de mettre en place une approche globale et coordonnée pour étudier le développement, dès la phase de conception, de nanomatériaux plus sûrs à l'aide de plusieurs études de cas. Différents secteurs applicatifs, différentes étapes du cycle de vie et différents niveaux de maturité technologique ont été investigués [1].

RÉSULTATS TECHNIQUES

L'ajout de nanoparticules de dioxyde de titane (nanoTiO_2) dans les peintures photocatalytiques représente une alternative prometteuse visant à minéraliser les polluants gazeux, tels que les composés organiques volatils. Pour maîtriser les risques potentiels associés à l'utilisation de nanoTiO_2 , la stratégie de conception de la peinture a été conduite en tenant compte des risques, tant humains qu'environnementaux, tout au long de son cycle de vie [2]. Différentes variations de nanoTiO_2 ont été synthétisées[3],[4] et incorporées aux formulations de peinture. Ces peintures ont ensuite été appliquées sur des supports normés afin d'étudier leurs performances et leur comportement lors de sollicitations d'usage contrôlées (vieillessement artificiel en chambre climatique, abrasimètre TABER® permettant d'étudier l'émission particulaire liée à l'érosion – voir photos).

Ces travaux ont permis de démontrer l'utilité d'une approche holistique orientée "produit" pour laquelle le critère de performance, l'analyse de risque ainsi que l'étude des impacts

sanitaires et environnementaux sont pris en compte. Cette approche permet d'étudier le produit comportant des nanomatériaux sur l'intégralité de son cycle de vie, sur des scénarios d'usage et de fin de vie réalistes, tout en éliminant les candidats qui ne répondraient pas aux spécifications techniques attendues. Ce processus bien que complexe offre in fine une stratégie de conception et d'évaluation efficace [5].



Au-dessus, vieillissement artificiel en chambre climatique.
À droite, abrasimètre TABER® permettant d'étudier l'émission particulaire liée à l'érosion

MISE EN PERSPECTIVE

L'exemple le plus emblématique de la mise en application de ces approches holistiques d'écoconception concerne le développement de peintures photocatalytiques sûres et durables en collaboration avec la société française ALLIOS. Ces travaux ont débouché sur plusieurs projets européens auxquels participe le CEA Liten, dont l'ambition est de faciliter le développement de nanomatériaux intrinsèquement plus sûrs en anticipant les risques potentiels dès la phase de conception (SAbYNA, SBD4Nano, ASINA) et la préparation de feuilles de routes européennes pour une industrie de la nanofabrication sûre, durable et compétitive (SUSNANOFAB).



- [1] J. Rose et al. "The SERENADE project; a step forward in the safe by design process of nanomaterials: The benefits of a diverse and interdisciplinary approach", NanoToday, 37 (2021), 101065.
 [2] A. Rosset et al. "Towards the development of safer by design TiO_2 - based photocatalytic paint: impacts and performances", Environmental Science Nano, 8 (2021), 758.
 [3] J. Laisney, " TiO_2 nanoparticles coated with bio-inspired ligands for the safer-by-design development of photocatalytic paints", Environ. Sci.: Nano, 8 (2021), 297.
 [4] D. Musino, "CNC/AgNP hybrids as safer-by-design biocides in paints", Environ. Sci.: Nano, 8 (2021), 12, 3673.
 [5] J. Rose et al. "The SERENADE project - a step forward in the Safe by Design process of nanomaterials: Moving towards a product oriented approach", NanoToday, 39 (2021), 101238.

5 ÉCONOMIE CIRCULAIRE DU CARBONE

La transition vers une économie neutre en carbone implique des ruptures technologiques qui s'inscrivent dans les principes de l'économie circulaire. L'un des enjeux est de produire les molécules carbonées avec un carbone recyclé ou renouvelable, donc sans accumulation supplémentaire de CO₂ dans l'atmosphère. Une des voies explorées est de capter les émissions de CO₂, notamment issues de sources industrielles, et de le transformer en molécules valorisables pour l'énergie ou la chimie. La thermoconversion des bioressources est une autre alternative.

LA FILIÈRE BIOCHAR AU SERVICE DE LA DIMINUTION DE L'EMPREINTE CARBONE DE L'INDUSTRIE SIDÉRURGIQUE

L'industrie métallurgique des métaux non ferreux (Zn, Cu...) est fortement génératrice de gaz à effet de serre. Le « biochar », obtenu par torréfaction de bioressources agricoles, est aujourd'hui considéré comme un bon candidat de substitution au charbon fossile, utilisé comme combustible et agent réducteur des procédés métallurgiques. Le CEA évalue la fabrication de biochar dans le cadre de deux projets européens. Dans le premier projet, CIRMET, le procédé de fabrication du biochar a été défini et optimisé au laboratoire, puis une tonne de biochar de peuplier a été produite dans le four pilote du CEA. Les tests du biochar en four de métallurgie chez les partenaires du projet ont montré des taux de récupération de cuivre proches de ceux obtenus en charbon fossile. Dans le cadre du second projet, DIGISER++, les expériences menées à l'échelle laboratoire et pilote sur deux types de biomasse agricole ont permis de déterminer les conditions opératoires optimales pour la production de 250 kg de biochar aux caractéristiques similaires à celles du charbon fossile.

Ces performances, sur des biomasses de faible coût, ouvrent d'excellentes perspectives d'industrialisation du procédé.



CARBURANTS DE SYNTHÈSE : UNE SOLUTION POUR LA MOBILITÉ DURABLE ?



Les carburants de synthèse, produits à partir de CO₂ et d'électricité bas-carbone, s'inscrivent dans une approche circulaire dans laquelle le CO₂ émis par des industries est recyclé pour synthétiser des hydrocarbures non-fossiles. Ces e-carburants (e-fuels) suscitent un intérêt grandissant pour limiter les émissions nettes de CO₂ dans le secteur des transports en complément des biocarburants, du fait d'une empreinte carbone réduite sur tout leur cycle de fabrication d'au moins 70 % par rapport aux carburants pétroliers. En effet, ils représentent une solution alternative pour certains secteurs de la mobilité, tels que la mobilité lourde et longue distance, qui pourront difficilement se décarboner par l'électrification ou l'hydrogène. Le revers de ces carburants reste le besoin énergétique fort qu'ils occasionnent pour leur production, qui implique nécessairement d'anticiper ces besoins massifs en électricité et en chaleur bas-carbone dans les scénarios énergétiques.

Le CEA a mis en place un programme de recherche transversal dédié à l'économie circulaire du carbone pour accompagner les équipes (CEA, CNRS, INRAE, Universités Paris-Saclay, Grenoble Alpes et Aix-Marseille) dans la réalisation des ruptures scientifiques et technologiques nécessaires à l'émergence de carburants de synthèse compétitifs, et pour accompagner les partenaires industriels.

LE LITEN, ACTEUR ENGAGÉ DANS

LA FORMATION DES JEUNES A TOUJOURS ÉTÉ UNE DES MISSIONS DU CEA. NOUS LES ACCOMPAGNONS À CHAQUE ÉTAPE DE LEUR APPRENTISSAGE, DU STAGE « DÉCOUVERTE » JUSQU'AU DOCTORAT, VOIRE POST-DOCTORAT. CHAQUE ANNÉE NOUS COMPTONS ENVIRON 250 ÉTUDIANTS RIEN QU'AU LITEN, QUI INVESTISSENT AUSSI BIEN LES LABORATOIRES QUE LES SERVICES SUPPORTS. EN INTÉGRANT LE LITEN, CES ÉTUDIANTS CONTRIBUENT AU DÉVELOPPEMENT DE SUJETS D'AVENIR ET PORTEURS DE SENS, AU SERVICE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET ÉCOLOGIQUE.

«L'année 2021 a été marquée par la forte implication du Liten dans l'effort national d'éducation et d'enseignement supérieur à travers le plan «1 jeune 1 solution». Nous avons en effet participé aux côtés des autres instituts du CEA à l'embauche de 1 000 alternants depuis le lancement de la campagne à l'été 2020. Toute notre stratégie en faveur de l'insertion professionnelle des jeunes n'aurait pu aboutir sans l'engagement de nos salariés. Un très grand nombre d'entre eux sont impliqués dans la transmission de savoir en étant tuteur

ou enseignant. Nous avons d'ailleurs constitué en 2021 des « ambassadeurs » CEA qui, grâce à leurs liens privilégiés avec les écoles, permettent aux jeunes de mieux s'intégrer à leur nouvel environnement et d'être encadré par des experts de leurs domaines. En choisissant le Liten, les jeunes construisent leur parcours professionnel par la découverte et l'exercice de métiers dans un environnement technologique de pointe, et s'ouvrent à de nouvelles opportunités.»

P. Berruyer, Responsable ressources humaines du CEA-Liten

NOS ACTIONS POUR LA FORMATION EN QUELQUES CHIFFRES



1/3

DES SALARIÉS DU
LITEN TUTEURS OU
ENSEIGNANTS



+200

DOCTORANTS ET
ALTERNANTS
CHAQUE ANNÉE



60

STAGIAIRES
DE TROISIÈME
ACCUEILLIS
EN 2021



1200 H

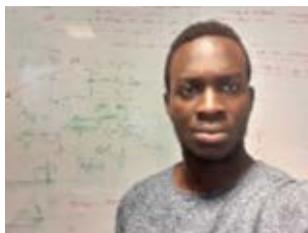
D'ENSEIGNEMENT
PAR LES EXPERTS
DU LITEN DANS
LES ÉCOLES ET
UNIVERSITÉS



LA FORMATION DES JEUNES

«J'ai choisi le Liten parce que le projet qu'on me proposais était un projet d'innovation, et je voulais relever un nouveau défi. Ce qui me plait le plus au Liten c'est que la plupart des personnes avec lesquelles je travaille sont également des enseignants chercheurs, des encadrants de thèses de stages ou des formateurs, et sont donc très expérimentés et pédagogiques dans leur manière de transmettre leur expérience.»

Alek GUEDEGBE, doctorant



«En qualité de doctorante, j'ai choisi le Liten car c'est un laboratoire centré sur les réponses aux enjeux climatiques gardant un lien étroit avec l'industrie. J'aime la diversité de mes missions rendue possible grâce à la plateforme piles à combustible qui permet d'aller des matériaux à l'intégration système.»

Marine CORNET, doctorante

«Je me suis tourné vers le Liten pour effectuer ma thèse car c'est un acteur majeur des technologies de l'hydrogène en France. Mes missions sont variées, portant autant sur de l'expérimentation et sur de la modélisation que sur de la caractérisation, et me donnent accès à de nombreux outils. Celles-ci me permettent également de travailler à la fois en autonomie et en étroite collaboration avec les membres de mon laboratoire.»

Amandine JAY, doctorante

«J'ai choisi de réaliser ma thèse au sein du Liten parce que c'est un acteur majeur de la transition énergétique en France avec des compétences fortes dans de nombreux domaines complémentaires. Pour réaliser ma thèse, j'ai l'appui de personnes toutes qualifiées dans des domaines spécifiques qui me permettent d'appréhender au mieux des sujets qui m'étaient jusqu'alors mal connus.»

Colette GARRON, doctorante



«Persuadé que la science des données puisse apporter énormément au monde des énergies décarbonées, j'ai choisi de rejoindre le Liten pour mon alternance en Big Data pour en faire l'expérience et découvrir comment je pouvais participer à la transition énergétique en apportant mes connaissances en science des données. J'apprends chaque jour de nouvelles choses, que ce soit sur l'aspect technique ou relationnel au travail, qui me permettent de m'épanouir, c'est super!»

Ludovic Desmeuzes, alternant

«Pour moi, choisir le Liten c'est choisir un organisme de recherche à la pointe de l'innovation dans les enjeux majeurs de notre temps. En thèse au Liten, on se sent utile, on apprend beaucoup car l'expertise scientifique et l'exigence technique y sont très grandes.»

Gatien Baccheta, doctorant

«Après deux stages au Liten, j'y suis revenu pour faire ma thèse car les thématiques de ce laboratoire sont d'actualité et très concrètes (transition énergétique, environnement...). D'autre part, la diversité des missions et des domaines scientifiques que je rencontre me stimule beaucoup et me permet d'élargir ma culture scientifique.»

Simon TOINET, doctorant



www.liten.cea.fr