

# RAPPORT D'ACTIVITÉ 2017





# ÉDITO

## LE LITEN, INSTITUT DE RÉFÉRENCE FRANÇAIS DANS LE DOMAINE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Cet institut est focalisé sur les piliers principaux accompagnant la stratégie française dans la transition énergétique :

- La production des énergies renouvelables, avec un accent particulier mis sur l'énergie solaire et les bioressources : les recherches couvrent l'ensemble de la chaîne de la valeur depuis la fabrication des composants, leur intégration dans des systèmes élémentaires, jusqu'à leur insertion dans des systèmes énergétiques beaucoup plus complexes comme des micro-réseaux, des quartiers, et demain des territoires ;
- Une contribution active sur la baisse des émissions de gaz à effet de serre, avec un focus sur le dioxyde de carbone à travers les développements sur la mobilité électrique, mais aussi sur la valorisation du CO<sub>2</sub> par différentes voies de conversion ;
- La maîtrise de la consommation énergétique plus particulièrement dans les domaines du bâtiment et des procédés industriels ;
- Enfin, un ancrage de plus en plus fort de la démarche de l'institut sur une économie de la matière en travaillant sur la synthèse de nouvelles générations de matériaux ou le développement de nouveaux procédés économes en matière, notamment d'impression 2D et 3D.



Vous découvrirez ainsi les nombreux résultats dans ces domaines clés et qui rythment ce rapport. Fin 2017, le Liten dispose de technologies majeures sur différents vecteurs énergétiques : électrique, thermique et hydrogène.

Dans notre secteur d'activité, 2017 aura été marquée par l'explosion des énergies renouvelables, en particulier le solaire, dans le monde, l'essor du véhicule électrique, et la création de l'Hydrogen Council marquant l'intérêt de grands industriels pour ce vecteur énergétique. En France, nous pouvons citer le Plan Climat qui vise la neutralité carbone en 2050, et l'annonce de réflexions par l'Etat sur le rôle des batteries et de l'hydrogène dans la transition énergétique. Les activités du

Liten s'alignent totalement avec les orientations souhaitées par ses tutelles ministérielles. La transition énergétique ne pourra pas avoir lieu sans s'appuyer sur la transition numérique en cours. C'est pourquoi, le Liten a amorcé une réorientation stratégique depuis quelques années déjà, en mobilisant ses forces de modélisation autour du développement de plateformes logicielles visant le dimensionnement et la gestion agile des systèmes énergétiques complexes.

La capacité d'innovation du Liten s'est traduite en 2017 par un nombre de dépôt de brevets toujours aussi important, contribuant au maintien du CEA parmi les organismes les plus innovants au monde. 2017 aura aussi été marquée par des nouvelles tensions sur certains matériaux (comme par exemple le cobalt utilisé dans les batteries de véhicule électrique), ce qui justifie également une démarche pour trouver des nouveaux matériaux et nouveaux procédés, dans un esprit de soutenabilité et d'économie circulaire.

Enfin, l'année 2017 a vu se concrétiser un certain nombre de collaborations à l'étranger dont l'accord avec l'ITRI (Taiwan) autour des matériaux, le NISE (Inde) autour du solaire photovoltaïque, et enfin le transfert de la technologie solaire photovoltaïque hétérojonction auprès d'ENEL Green Power (Italie). ■

**Florence Lambert,**  
Directrice du Liten



# SOMMAIRE

## LE LITEN, QUI SOMMES NOUS ? 4

## COLLABORER 5

## MATIÈRES ET MATÉRIAUX 6

Synthèse matériaux	6
Matériaux magnétiques	7
Ingénierie des matériaux	8
Fabrication additive	9
Électronique imprimée	10

## ÉNERGIES RENOUVELABLES 11

Solaire photovoltaïque	11
Cellules photovoltaïques	12
Technologie hétérojonction	13
Modules photovoltaïques	14
Systèmes solaires	15
Bioressources	16

## STOCKAGE DE L'ÉNERGIE 17

Prototypes	17
Batteries sous observation	18
Familles technologiques de batteries	19
Approches modélisation	20

## VECTEUR HYDROGÈNE 21

Piles à combustible PEM	21
Electrolyse haute température	23

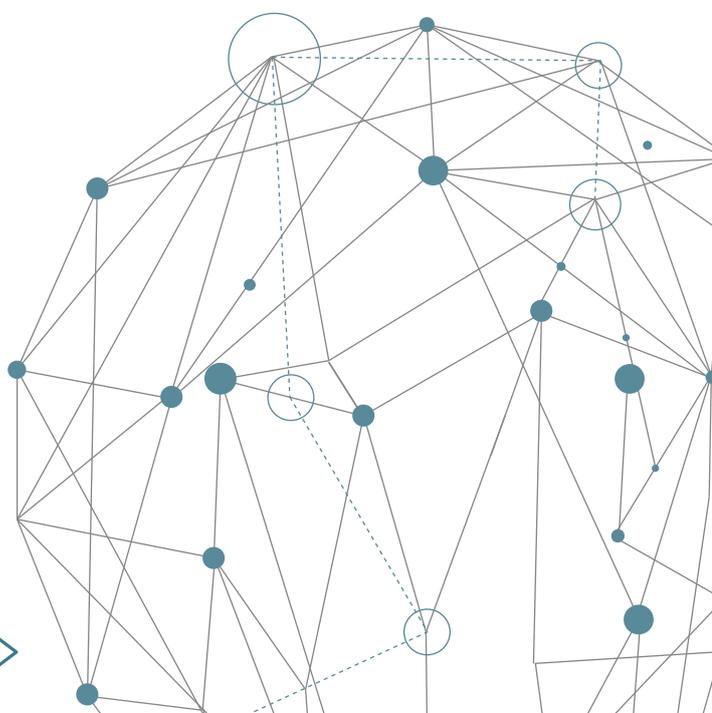
## EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE 24

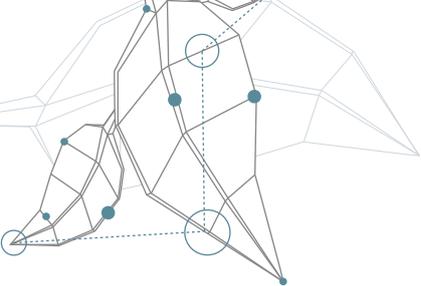
Bâtiments	24
Gestion de la chaleur	25
Intégration des ENR	26

## NOUVEAUX PROJETS FÉDÉRATEURS 27

## LES PLATEFORMES 29

## CHIFFRES CLÉS 32





# LE LITEN

## INNOVER POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Basé principalement à Grenoble et Chambéry, Le Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Énergies nouvelles et les Nanomatériaux (Liten) est le premier institut européen entièrement dédié aux nouvelles technologies de l'énergie.

Fort de son positionnement au sein du CEA, le Liten développe depuis plus de 10 ans une recherche technologique de pointe pour faire face aux enjeux climatiques et assurer le développement d'une économie circulaire respectueuse de l'environnement au profit des futures générations.

## QUI SOMMES NOUS ?

Parmi les quelques rares Instituts de recherche en Europe couvrant toute la chaîne de valeur, de la synthèse des matériaux à la pré-industrialisation, le Liten procure à ses partenaires industriels un avantage concurrentiel crucial sur leurs marchés.

Pour atteindre cet objectif, l'institut s'appuie sur ses 14 plateformes technologiques, son portefeuille de plus de 1500 brevets, et mobilise l'expertise d'un millier de chercheurs, techniciens et équipes supports. Avec ses atouts, le Liten constitue un puissant outil de R&D capable de relever des défis technologiques complexes et à élaborer les produits, composants et procédés industriels du futur.

### LE LITEN ACTEUR DE L'INSTITUT CARNOT ÉNERGIES DU FUTUR

Le label Carnot, attribué par le MESRI, renforce et encourage le partenariat direct entre des laboratoires de recherche et l'industrie. Énergies du futur associe le Liten à dix laboratoires académiques pour proposer une offre d'innovation complémentaire sur l'échelle de maturité.

Les Filières Carnot rassemblent plusieurs instituts Carnot autour d'un enjeu industriel et soutiennent la diffusion et l'adaptation de l'offre de recherche vers les PME. Le Carnot Énergie du Futur coordonne la filière EnergICs (énergies renouvelables et efficacité énergétique) et participe aux filières IMP (Industries Mécaniques et Procédés) et Carnauto (automobile).

Les moyens complémentaires du label Carnot, nous ont permis de financer 21 thèses et post-doctorats et d'initier plusieurs actions de ressourcement scientifique afin d'anticiper les futurs transferts technologiques et répondre aux enjeux énergétiques de demain.

Le Liten focalise son activité autour de 3 axes principaux :

#### 1/Synthèse et mise en œuvre des matériaux :

- Substituer les matériaux critiques pour une croissance verte,
- Développer des composants et procédés toujours plus économes en matière et énergie,
- Imaginer les matériaux de demain pour gagner en performance, sécurité et durabilité.

#### 2/Production et stockage d'énergies renouvelables à faible empreinte carbone :

- Optimiser l'exploitation de la ressource solaire (PV, thermique et thermodynamique) et des bioressources,
- Réduire l'empreinte carbone en utilisant le vecteur hydrogène pour la production, le stockage et la conversion des énergies,
- Décarboner les usages (mobilité, industrie et bâtiments).

#### 3/Efficacité énergétique :

- Intégrer la dimension systémique de la gestion de l'énergie pour optimiser l'efficacité globale,
- Concevoir et tester des solutions pour gérer l'intermittence des ressources,
- Explorer avec nos partenaires les solutions économiquement adaptées aux usages et aux territoires.

# COLLABORER

## LE LITEN, PARTENAIRE DE RECHERCHE TECHNOLOGIQUE DE RÉFÉRENCE POUR LES INDUSTRIELS

**1512** BREVETS ACTIFS (220 DÉPÔTS PAR AN)  
**350** PARTENAIRES INDUSTRIELS  
**100** PROJETS EUROPÉENS

### UN PARTENAIRE FIABLE ROMPU AUX PROJETS DE R&D AVEC LES INDUSTRIELS

- 30% des chercheurs issus de l'industrie,
- Gestion de projets et Jalons adaptés aux contraintes spécifiques du partenaire,
- Engagement de planning et de livrables,
- Certification ISO,
- Collaboration avec des PME, ETI et Grands Groupes.

### UN EXPÉRIENCE MULTI SECTEUR ET UNE APPROCHE COMPLÈTEMENT INTÉGRÉE

- Le Liten a acquis une expérience approfondie multi secteur (transport, énergie, biens industriels, agro alimentaire...) tant en France qu'à l'international,
- Notre approche intégrée (du composant au système) permet de focaliser sur votre centre d'intérêt tout en étant pertinent dans la chaîne de valeur globale.

### DES MOYENS ET DES COMPÉTENCES D'INNOVATION UNIQUES À VOTRE SERVICE

- Une expertise technique, un savoir-faire unique et un portefeuille brevets conséquent que nous pouvons mettre en œuvre dans votre projet et vous transférer si besoin,
- Nous assurons une veille technologique au niveau international et nous sommes un acteur présent dans plusieurs comités nationaux de la transition énergétique,
- Nos 14 plateformes technologiques sont un atout pour travailler sur de la R&D à la fois produit et process.

### HAUTE VALEUR AJOUTÉE POUR LES INDUSTRIELS

L'innovation au service du développement d'activités :

- Pour les acteurs du domaine de l'énergie : **pérenniser l'activité cœur business**,
- Pour les industriels dont les produits/procédés sont directement impactés par les évolutions énergétiques (par exemple, électrification de véhicule) : **se différencier sur ses marchés ou attaquer des marchés à l'export**,
- Pour les industriels qui souhaitent saisir les opportunités de la transition énergétique : **se diversifier en lançant une nouvelle activité**.

Gagner du temps :

- **Accélérer les phases de développement et d'industrialisation**: un accès immédiat à l'expertise acquise par le Liten, et au portefeuille brevets disponible pour lever des verrous techniques,
- **Renforcer son image innovante et valider des faisabilités** : Disposer de prototypes innovants (POC ou démonstration sur Salon),
- **Monter en compétences** rapidement par transfert de savoir-faire, outils.

Sécuriser et exploiter sa R&D :

- **Confidentialité** assurée,
- **Exploitation exclusive possible** des résultats sur le domaine/produit,
- **Tester des idées, benchmarker et analyser le marché** avant de lancer des études de R&D.





# MATIÈRES & MATÉRIAUX

AMÉLIORER LES PERFORMANCES, CONCEVOIR DE NOUVEAUX PROCÉDÉS

Le Liten améliore les performances des matériaux pour l'énergie. Il conçoit des solutions innovantes en jouant sur la structuration pour exacerber certaines propriétés, ou en combinant plusieurs matériaux quand aucun ne répond seul au cahier des charges. Il développe des alternatives aux solutions existantes, quand l'usage d'un matériau est remis en cause pour des raisons géopolitiques, économiques ou réglementaires (terres rares, indium, gallium, plomb, solvants...). En parallèle, il explore de nouveaux procédés qui visent simultanément trois objectifs: rechercher l'économie de matière, par exemple avec la fabrication additive ; limiter l'empreinte environnementale (solvants, énergie...) ; utiliser une part croissante de matériaux recyclés. L'électronique imprimée grande surface se convertit progressivement en électrique structurelle, avec des premières applications en plastronique.

## SYNTHÈSE MATÉRIAUX



### DES FILMS POLYMÈRES À LA FOIS CHAUFFANTS ET TRANSPARENTS

Le Liten a breveté le tout premier film chauffant transparent 100% polymère à base de PEDOT. Ce dernier, étudié conjointement avec l'institut INAC du CEA, dans le cadre du développement de matériaux thermoélectriques, est suffisamment conducteur pour présenter de faibles résistances électriques même à des épaisseurs extrêmement réduites lui permettant de laisser passer la lumière. Il est, en outre, flexible et facile à mettre en œuvre sur des grandes surfaces, à bas coût, par différents procédés (spray, trempage, flow coating, impression). Soumis à une tension de 12V, sa température peut dépasser 120°C, ce qui est parfaitement adapté pour des applications de dégivrage et de désembuage. Un prototype de visière de moto a été réalisé pour démontrer l'intérêt et la faisabilité du concept, suscitant l'intérêt de plusieurs industriels. ■

#### CAROLINE CELLE



« Le Liten s'intéresse aux nanofils d'argent depuis 2010 pour répondre à un besoin industriel d'électrodes transparentes et souples associés aux nouveaux marchés de l'optoélectronique flexible. Après avoir travaillé sur la synthèse des matériaux et le procédé de fabrication des électrodes, le laboratoire a réalisé

une première preuve de concept sur des cellules solaires organiques. Les très bonnes propriétés optoélectroniques des nanofils d'argent, ainsi que leur coût maîtrisé au vu des quantités de matière utilisées, ont permis de les placer comme une alternative crédible à l'oxyde d'indium et d'étain (ITO) pour ces nouveaux marchés. Aujourd'hui, le Liten maîtrise toute la chaîne de valeur des nanofils d'argent, depuis leur synthèse jusqu'à leur intégration.

La montée en maturité technologique a permis de décrocher les premiers contrats industriels dès 2015 pour la réalisation de films chauffants dans les applications de dégivrage. Approché par le chimiste français Protavic International qui cherchait à

intégrer des nanofils métalliques dans ses produits, le Liten l'a accompagné dans la mise en place d'un réacteur pilote sur son site de production. Le transfert du savoir-faire de synthèse s'est opéré en 2017 et le Liten continue à assister l'industriel dans la personnalisation des produits destinés à ses futurs clients. » ■



Le Liten maîtrise toute la chaîne de valeur des nanofils d'argent »



# MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

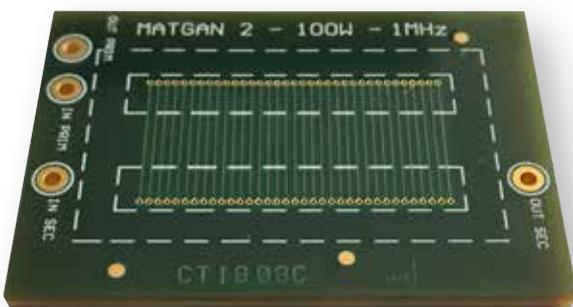
## VERS LA RÉALISATION D'AIMANTS NdFeB DE FORME COMPLEXE

Une technique de protection de la poudre de néodyme-fer-bore contre l'oxydation a été validée pour réaliser à terme des aimants NdFeB par procédé Powder Injection Molding (PIM). Ce procédé permet en effet la réalisation d'aimants de formes complexes pour optimiser le rendement des moteurs électriques, et ce, sans usinage et avec une haute cadence de production. La poudre est mélangée sous atmosphère neutre à une solution d'acide stéarique et de solvant, puis ce mélange est chauffé sous vide pour évaporer ce dernier. Ainsi traitée, la poudre peut être manipulée à l'air libre pendant deux heures pour réaliser le mélange poudre-polymère (feedstock) nécessaire à la fabrication PIM. Suite à celle-ci, le matériau présente des teneurs en oxygène et en carbone assez faibles pour ne pas dégrader les performances magnétiques. De nouvelles études sont en cours pour optimiser le déliantage des pièces obtenues. ■



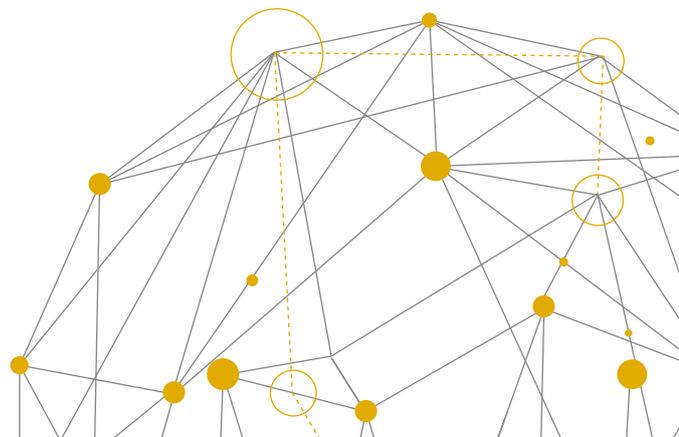
## UN TRANSFORMATEUR PLANAIRE POUR CONVERTISSEUR ULTRA COMPACT

Deux prototypes de transformateur à faibles pertes thermiques pour convertisseur ultra compact (1MHz, 100W) ont été dimensionnés et fabriqués. Ils sont constitués d'un oxyde de fer ferromagnétique moulé au sein même d'un circuit imprimé conventionnel. Leur architecture plane permet une intégration au cœur d'une carte électronique, sans ajout de refroidisseurs. Ils peuvent être fabriqués par un procédé industrialisable, le Powder Injection Molding (PIM). Le premier prototype a été caractérisé sous une puissance de 60W, et l'élévation de température observée reste dans une plage compatible avec l'utilisation du matériau. Les pertes du matériau de 300 mW/cm<sup>3</sup>, sont trois à cinq fois plus faibles que celles des solutions du marché. Ces résultats issus d'une thèse ont fait l'objet de plusieurs brevets. Ils sont exploitables pour d'autres composants planaires d'un convertisseur comme les inductances. ■



## LE FRITTAGE FLASH RÉUSSIT AUX FERRITES

Pour élaborer des noyaux magnétiques hautes performances en ferrite de structure spinelle, des pièces ont été fabriquées par frittage flash (Spark Plasma Sintering) et non par frittage classique. Ce procédé implique un chauffage très rapide (jusqu'à 1000° C/min) et un temps de séjour bref. Il s'avère très bénéfique pour les matériaux magnétiques qui, comparés à des échantillons témoins, présentent un gain de 5% de l'aimantation à 7 Teslas. Le procédé a été modélisé afin de disposer à terme d'un outil d'optimisation des conditions opératoires ouvrant la voie à la réalisation de pièces complexes. Ces ferrites à faibles pertes magnétiques sont des candidats de choix pour les inductances des convertisseurs de puissance à haute fréquence de commutation (1 à 5MHz). ■





## DE L'HYDROGÈNE PUR PRODUIT PAR THERMOLYSE DE BOROHYDRURES MÉTALLIQUES

Les borohydrures métalliques et leurs dérivés font l'objet de recherches au Liten depuis quelques années pour leur potentiel en tant que matériaux de stockage d'hydrogène à haute capacité. La thermolyse de ces composés, qui entraîne une libération plus importante d'hydrogène en comparaison à l'hydrolyse jusqu'alors développée, a été expérimentée pour la première fois au laboratoire. En particulier, un nouveau borohydrure métallique synthétisé à base de  $\text{NaBH}_4$ , permettant d'atteindre un rendement de 10% d'hydrogène pur à des températures compatibles avec le fonctionnement des piles à combustible, est en cours de développement. Celui-ci, qui pourra être régénéré en usine après utilisation, vise à être mis en œuvre dans des applications de stockage non réversible. Les travaux se poursuivent pour améliorer les conditions de désorption de l'hydrogène, et à terme obtenir un processus réversible. ■

## PHILIPPE EMONOT



« Nous développons au Liten des compétences dans le domaine de la métallurgie, autour de la mise en œuvre de procédés particuliers de fabrication et d'assemblage de composants. En particulier, la compression isostatique à chaud (CIC) et le brasage.

La CIC est un procédé à haute température (1000° C) et

haute pression (1000 bars) utilisé au laboratoire pour l'assemblage de composants par soudage diffusion. Il a donné lieu à une belle avancée en 2017. Après plus de 15 ans de développement, ce procédé a en effet permis de fabriquer un premier panneau de première paroi à échelle un pour le réacteur ITER. Autre exemple de succès: le procédé de fabrication des échangeurs compacts développé pour le système de conversion d'énergie du futur réacteur nucléaire

ASTRID, qui a donné lieu à des applications dans le domaine des énergies renouvelables avec la fabrication de réacteurs de méthanation. Le brasage est une technique permettant de réaliser une liaison entre deux pièces par fusion et solidification d'une brasure disposée entre eux. En 2017, le laboratoire a initié le développement d'une technologie de réparation des miroirs en carbure de silicium des télescopes spatiaux. Cette technologie est basée sur le brasage hors four et utilise une brasure adaptée conçue au laboratoire.» ■



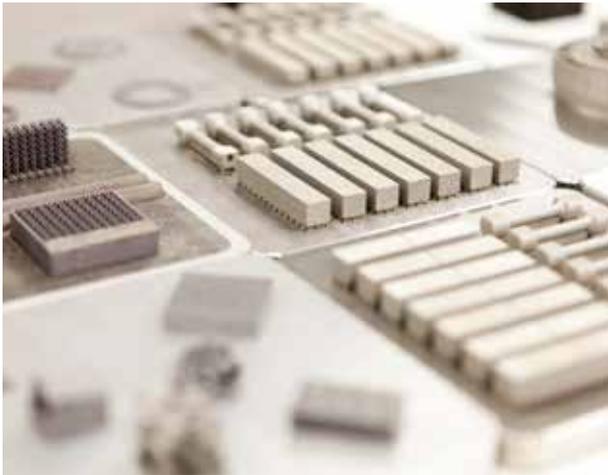
L'activité assemblage a connu quelques belles avancées en 2017 »



# FABRICATION ADDITIVE

## LA FABRICATION ADDITIVE FAIT SES PREUVES SUR LE 316LN

Dans le cadre d'un partenariat avec Naval Group, un procédé de fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre a pour la première fois été mis en œuvre sur du 316LN, un acier inoxydable utilisé pour certaines applications nécessitant des propriétés mécaniques spécifiques. Avec une densité atteignant 99% de la densité théorique du matériau, les pièces obtenues présentent de meilleures caractéristiques que celles réalisées dans les mêmes conditions avec d'autres aciers inoxydables tels que le 316L ou le 304L. Les tests de traction et de résistance aux chocs réalisés sur divers échantillons mettent en évidence des performances mécaniques supérieures aux valeurs minimales définies par la norme pour la même nuance forgée. Enfin, la quantité d'énergie nécessaire pour obtenir ces pièces est inférieure de 39% au minimum publié dans la littérature. ■



## DES ALLIAGES Fe-Si PRÊTS POUR LA FABRICATION ADDITIVE

Le Liten cherche à réaliser des pièces de forme complexe en alliage fer-silicium par impression 3D (Selective Laser Melting ou SLM). Deux nuances d'alliage, respectivement à 3% et à 3,9% de silicium, ont été retenues. Elles permettent d'élaborer des pièces brutes non fissurées. Toutefois, la fabrication SLM doit être suivie d'un traitement thermique à 1350°C sous hydrogène pour retrouver des propriétés magnétiques à l'état de l'art. Les travaux portent sur le réglage des paramètres procédé et de la teneur en silicium selon les propriétés magnétiques visées. L'objectif est aussi de réduire la température du traitement thermique, pour optimiser la microstructure et donc la résistance mécanique des pièces ainsi que réduire les coûts. Celles-ci sont notamment destinées aux rotors des moteurs électriques. ■

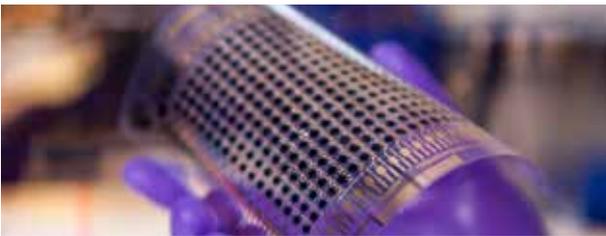
## FABRICATION DE PIÈCES DE FORME COMPLEXE EN CARBURE DE SILICIUM PAR STÉRÉOLITHOGRAPHIE

Aujourd'hui réalisées par métallurgie des poudres et usinage, les pièces à base de carbure de silicium (SiC) de forme complexe (alvéolées, évidées, structures en grille...) ont des applications limitées en raison du coût de l'usinage. Pour accroître les possibilités techniques et maîtriser le coût, le recours à la fabrication additive est à l'étude, avec une technique encore peu explorée : l'impression par stéréolithographie de polymères précéramiques. Des composants de taille centimétrique et de forme complexe ont été réalisés à une vitesse d'impression de couches d'environ 500 µm/s, puis pyrolysés pour générer la céramique finale. A ce stade, certaines structures sont saines et sans fissure interne. En revanche, leur teneur en oxygène (5 à 8%) doit encore être réduite. Une thèse a commencé début 2018 pour établir le lien entre la composition des polymères utilisés, les conditions de pyrolyse et les performances finales des pièces. ■



## UNE PREMIÈRE MATRICE ACTIVE EN ÉLECTRONIQUE IMPRIMÉE

Une matrice active de 256 pixels au pas de 5mm a pour la première fois été réalisée sur la plateforme PICTIC du Liten. Il s'agit du premier démonstrateur de matrice représentatif d'un système fabriqué par impression et intégrant des fonctions électroniques d'adressage avec des capteurs élaborés. La réalisation des pixels (chaque capteur étant piloté par un transistor) a nécessité une dizaine d'étapes successives : impression par héliogravure pour l'élaboration des transistors, puis sérigraphie pour celle des capteurs. La démonstration a été réalisée avec des capteurs de lumière (photodiodes) et des capteurs de pression (jauges de contrainte résistive). Les travaux se poursuivent pour augmenter encore la taille des matrices et réduire la taille des composants, donc le pas, afin d'améliorer la résolution. ■



## INSTALLATION EN COURS POUR LA LIGNE-PILOTE PIXORG

Partenaires depuis 2010, la start-up ISORG et le Liten ont consacré l'année 2017 à dimensionner et à sélectionner les équipements de la ligne-pilote Pixorg dédiée à la fabrication de photo détecteurs organiques, projet porté par ISORG et qui s'inscrit dans le cadre « de l'appel à projets NANOÉLECTRONIQUE ». La réception des premiers d'entre eux a commencé sur le futur site industriel d'ISORG à Limoges, dans près de 900m<sup>2</sup> de salles blanches. Première du genre dans l'Hexagone, cette ligne participe à la structuration de la filière électronique organique française. Les travaux portent sur le transfert industriel du procédé développé sur la plateforme PICTIC (Grenoble) et sur son optimisation en vue du lancement de l'échantillonnage en 2019. Le procédé générique développé permettra d'adresser les marchés des smartphones, de la sécurité par identification biométrique, de l'imagerie médicale et plus généralement de l'industrie (capteurs pour industrie 4.0 et objets connectés). ■



## EMMANUELLE VÉRAN



« En associant des composants piézoélectriques imprimés pour applications haptiques et un procédé de plasturgie, nous avons réalisé pour le CES 2018 à Las Vegas un prototype d'interrupteur innovant. Il est plat et lisse mais en réponse à une pression, il émet une vibration pour confirmer qu'il a été actionné. Cette technologie

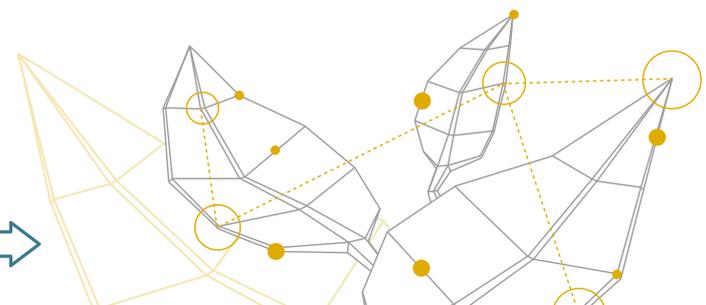
intéresse notamment les designers pour l'automobile, qui privilégient aujourd'hui les surfaces lisses. Mais elle peut avoir bien d'autres applications : domotique, santé, sport, jeux vidéo, réalité virtuelle, réalité augmentée etc. La réalisation de ces composants dits « plastroniques » fait appel à des compétences en électronique imprimée, en matériaux, en dépôt de couches minces et en plasturgie.

Nous les élaborons en coopération avec deux autres instituts du CEA et avec l'IPC\*, un centre technique industriel. Pour être compatibles avec le procédé d'In Mold Labelling, les composants doivent supporter plusieurs centaines de degrés et plusieurs centaines de bars. Nous progressons par itérations en ajustant les matériaux, le design du composant, les paramètres de pression et de température, etc. A plus long terme, nous voudrions passer à l'impression 3D quand ces procédés auront acquis plus de maturité. » ■

\* Innovation plasturgie composites



Un composant plastronique présenté au CES 2018 à Las Vegas »



# ÉNERGIES RENOUVELABLES

## DU SOLAIRE AUX BIORESSOURCES

Les activités « énergies renouvelables » portent sur le photovoltaïque, le solaire thermique et les bioressources. Elles couvrent l'ensemble de la chaîne de valeur, du matériau au système connecté au réseau. Elles répondent à des besoins industriels en fabricant des prototypes sur les plateformes technologiques du Liten. En photovoltaïque, les travaux portent en particulier sur des modules premium (très haut rendement, communicants, munis d'auto-diagnostic...) et des modules intégrés conçus pour une application dédiée, par exemple pour le spatial. L'activité solaire thermodynamique accompagne les efforts à l'export d'entreprises françaises. En bioressources, l'objectif est de convertir en énergie des déchets liquides ou solides : boues d'épuration, combustibles solides de récupération...

## SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

**ETIENNE PIHAN  
ET GAUTIER FORTIN, ECM GREENTECH**



« Nous avons franchi en 2017 plusieurs étapes importantes dans le développement de la technologie monolike. La première, c'est la production de lingots de 650 kilos (G6) d'orientation cristalline contrôlée. Nous atteignons un niveau d'homogénéité conforme aux exigences industrielles. La qualité du matériau a été évaluée par

plusieurs industriels dans le monde sur la base de quelques milliers de cellules photovoltaïques. Les performances sont intermédiaires entre celles des matériaux multicristallins haute performance et celles du monocristallin Cz, confirmant l'intérêt d'un tel procédé. Seconde avancée, sur la base de ces évaluations, notre partenaire ECM-GT a débuté sa valorisation par de la vente de fours de taille G6 et de procédés associés à des leaders du domaine. Il nous faut maintenant confirmer ce potentiel à l'échelle d'un lingot G8 de 1,4 tonne. Nous y travaillons dans le cadre d'un programme institutionnel piloté par l'ADEME et d'un contrat bilatéral avec ECM-GT. Nos deux objectifs : obtenir à nouveau une excellente qualité de matériau et assurer une haute productivité du procédé. Le monolike pourrait par ce biais prétendre à un niveau de coût encore plus attractif pour les industriels ». ■



Le monolike se rapproche de l'échelle industrielle »

**DÉCOUPER UN FOND DE LINGOT  
MONOLIKE G6, C'EST POSSIBLE**

Dans le cadre de la collaboration avec la société BEA, un nouvel équipement de sciage au fil diamanté en boucle fermée a été testé sur un fond de lingot monolike G6. Un équipement de format plus réduit avait déjà été validé sur un format G5. Toutefois, le changement d'échelle a multiplié les difficultés : maintien mécanique du lingot de 650 kilos, oscillations du mécanisme d'entraînement du fil, vibrations de la boucle de fil diamanté (plus de 5 m de long) etc. Après prise en compte de ces paramètres, une découpe complète a pu être réalisée en 15 heures. Cette durée pourra être réduite d'au moins 50% grâce aux optimisations en cours. Le pavage du germe, récupéré dans son intégralité, peut servir à la croissance d'un nouveau lingot monolike dont le coût pourra ainsi être réduit. ■





# CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

## SILICIUM COMPENSÉ : UNE MESURE SIMPLIFIÉE DES CONCENTRATIONS EN DOPANTS

Comment mesurer facilement la concentration en dopants du silicium dit « compensé », obtenu à partir de déchets de silicium recyclés ? Plutôt que de recourir aux techniques classiques d'analyse chimique par spectrométrie de masse, une équipe du Liten a développé une méthode de mesure basée exclusivement sur des caractérisations électriques. A partir de mesures de résistivité du silicium pratiquées à 70 K (-203° C), puis à 20 K (-253° C), un traitement mathématique a été développé et breveté pour remonter aux concentrations en dopants. Cette technique est assez précise pour du contrôle de routine et elle est nettement moins coûteuse et plus rapide que la spectrométrie de masse. Elle va être testée sur un échantillonnage statistique élargi pour valider la robustesse et réduire les incertitudes. ■



## PREMIÈRES CELLULES À BASE DE SILICIUM RECYCLÉ

Dans le cadre du projet H2020 CABRISS coordonné par le Liten, des cellules Al-BSF ont été fabriquées à partir de différentes sources de silicium recyclé. CABRISS a pour but de favoriser une économie circulaire des matériaux du PV et réunit tous les acteurs de la récupération des rebuts et modules en fin de vie jusqu'à ceux de la fabrication de nouveaux modules à l'aide de matériaux recyclés. Les meilleurs résultats sont obtenus après cristallisation du silicium recyclé par procédé monolike en lingot G2 de 60 kilos. Le rendement moyen des cellules est de 17,5%, la meilleure cellule atteignant les 18,1%. C'est à partir de ces cellules qu'un module entièrement à base de silicium recyclé a été réalisé.

Sa puissance de 252Wc et son ratio de performance « cell to module » de 99% sont comparables à ceux des modules du marché. Ces résultats, supérieurs aux objectifs initiaux, permettent d'envisager la création d'une filière de recyclage viable. ■



## CELLULES SILICIUM-PÉROVSKITE : OBJECTIF 30% DE RENDEMENT

Les recherches sur des cellules tandem silicium-pérovskite ont débuté avec la validation de la mise en série de deux jonctions. Elles montrent que la stabilité thermique du matériau pérovskite et le contrôle des procédés de dépôt lors de la métallisation doivent être améliorés en priorité. D'autre part, la gamme d'absorption de la couche pérovskite va être optimisée pour devenir complémentaire de celle du silicium. Ainsi, les deux jonctions délivreront le même courant. Les travaux sur ce sujet encore prospectif s'accroissent, avec le démarrage de deux thèses et le passage à des surfaces actives de 50x50mm puis 156x156mm au lieu de 20mm². La technologie silicium - pérovskite est susceptible de dépasser à terme les 30% de rendement et a l'avantage de s'appuyer sur des matériaux bas coût et des procédés simples. ■

# TECHNOLOGIE HÉTÉROJONCTION

DELPHINE CHERPIN ET PIERRE-JEAN RIBEYRON



*ENEL Green Power a décidé d'investir dans son usine de Catane en vue de produire en 2019 des modules photovoltaïques de plus de 400 W, basés sur la technologie hétérojonction développée au Liten. Le rendement actuel des cellules, voisin de 22,5 %, associé à leur faible sensibilité à la température, et à un*

*potentiel de cadence de production élevé permet d'atteindre un LCOE\* (€/KWh) plus faible que les plus avancées des technologies actuellement sur le marché. Ces modules, compétitifs dans l'offre mondiale, sont destinés à des centrales solaires en Inde, Afrique du Sud, Amérique latine*

*etc. Nous collaborons avec ENEL sur la définition de leurs nouvelles lignes industrielles, modules et cellules, ainsi que sur leur mise en service avec des procédures adaptées à leur cahier des charges. Une dizaine de collaborateurs de Catane se forment à INES, sur les équipements de notre LabFab. En parallèle, d'autres équipes continuent à améliorer la technologie hétérojonction. Objectif : 24 % de rendement moyen à l'horizon 2020. » ■*

\*LCOE : Levelized Cost of Energy



*ENEL Green Power mise sur notre technologie hétérojonction »*



## LES CELLULES À HÉTÉROJONCTION PRÊTES POUR LA PRODUCTION

Le projet FP7 Hercules, coordonné par l'INES, a été distingué par un prix « Etoiles de l'Europe » pour ses excellents résultats. Plus de 100 000 cellules à hétérojonction de silicium amorphe/cristallin bifaciales ont été produites à l'échelle pilote. Leur efficacité moyenne est supérieure à 22 % et la meilleure cellule atteint 22,9%. La solution module certifié à plus de 380 W a été aussi démontrée. Hercules a par ailleurs donné lieu à 76 publications et fait l'objet de huit thèses, dont deux à INES. Le transfert des procédés à l'échelle industrielle et l'étude complète des facteurs de coût ont été menés à bien. La voie est maintenant ouverte pour produire en Europe ces cellules à haut rendement. Des transferts technologiques sont en cours auprès d'industriels russes et italiens. En parallèle, trois nouveaux projets européens sur les cellules hétérojonction innovantes ont été lancés. ■

## UN MODULE DE 60 CELLULES D'UNE PUISSANCE RECORD

Un module de 60 cellules PV bifaces à hétérojonction d'une puissance de 324 Wc a été réalisé au Liten. Affichant un rendement de près de 20 %, il est constitué de cellules solaires, interconnectées entre elles par des rubans texturés, de façon à piéger le flux lumineux, et assemblés avec une colle conductrice. Le module dispose par ailleurs d'un nouveau verre antireflet et d'un encapsulant laissant passer plus de lumière. La face arrière du module intègre en outre une feuille d'aluminium qui renvoie les infrarouges non utilisés vers la face arrière des cellules, augmentant ainsi le rendement. Enfin, les distances entre cellules ont été calculées pour récupérer un maximum de lumière. Ces optimisations permettent de réduire les pertes liées à l'intégration des cellules en modules et même, de générer des gains optiques permettant de produire au final un courant de 9,6 A pour le module, contre 9,1 A pour la cellule. ■



# MODULES PHOTOVOLTAÏQUES

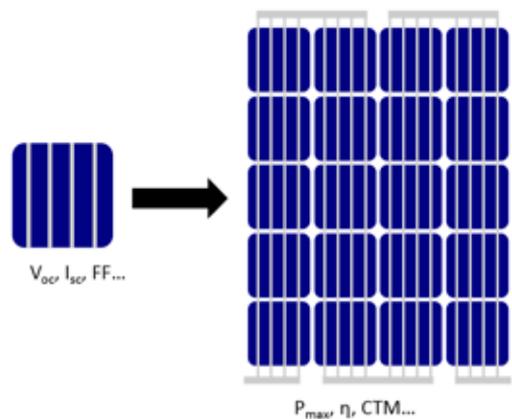


## UN MODULE PV ULTRA LÉGER POUR ÉQUIPER DES BALLONS STRATOSPHERIQUES

Dans le cadre du projet Stratobus mené avec Thales Aléni Space France (TAS-F), le Liten a développé un module flexible et ultra léger destiné à équiper des ballons stratosphériques. Il affiche un poids inférieur à  $800\text{g/m}^2$  (contre  $12\text{kg/m}^2$  pour un module classique) et une puissance supérieure à  $180\text{Wc/m}^2$ , et pourrait répondre aux contraintes liées à l'application visée en termes de résistance thermique, de tenue aux vents et aux conditions d'illumination extrêmes, et de durée de vie. Le module est constitué de cellules IBC à haut rendement ( $>24\%$ ) et dont les métallisations et les contacts sont situés en face arrière. En outre, le cadre aluminium a été supprimé, et le verre de face avant remplacé par un polymère mince beaucoup plus léger. Un autre prototype, plus léger et présentant de meilleures performances en  $\text{W/kg}$ , a également été mis au point à partir de cellules HET produites à l'INES sur des wafers dont l'épaisseur a été réduite à moins de 120 microns. ■

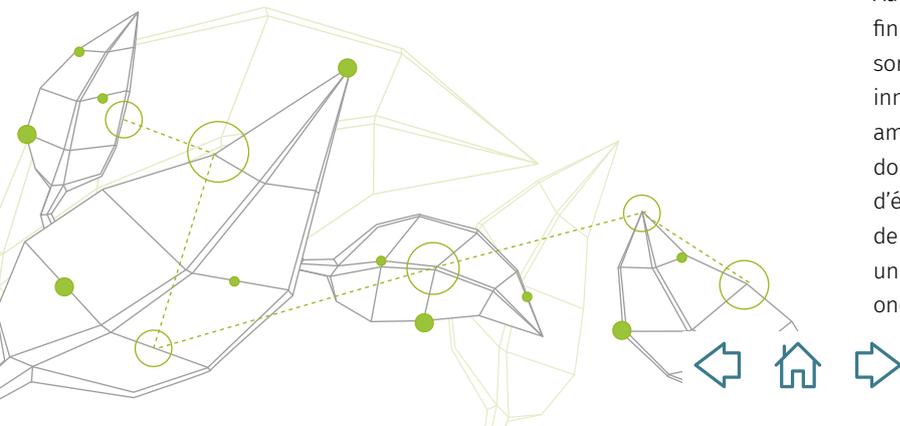
## UN OUTIL D'AIDE AU CHOIX DES TECHNOLOGIES D'INTERCONNEXION DE CELLULES

Un outil de prévision des performances des modules photovoltaïques a été mis au point au Liten. À partir des caractéristiques de différents types de cellules silicium existantes, regroupées dans une base de données spécialement mise au point pour l'alimenter, le modèle permet de prédire les performances du module final en tenant compte des pertes résistives dans les interconnexions. Ces dernières sont estimées en fonction de la géométrie et de la taille des rubans d'interconnexion. La comparaison des pertes prévues par l'outil avec celle réellement observée sur un module révèle un écart inférieur à 0,5%. A terme, il permettra également de prendre en compte les pertes optiques, pour par exemple choisir le matériau d'encapsulation le mieux adapté à une architecture de module donnée. ■



## GOPV INVENTE L'ÉNERGIE SOLAIRE À BAS COÛT

Regroupant une douzaine de partenaires, le projet européen GOPV vise à développer un système photovoltaïque destiné à de grandes centrales dans le sud de l'Europe. Objectif : produire de l'électricité à  $0,02\text{€ le kWh}$ . Outre une réduction des coûts d'exploitation et de maintenance, des économies doivent être réalisées sur le matériel. Au niveau du module (bifacial à hétérojonction sur wafer fin pour une efficacité optimale), des économies de matière sont réalisées grâce à une technologie d'interconnexion innovante. Celle-ci réduit la quantité d'argent nécessaire et améliore la fiabilité de l'assemblage par le biais d'un collage doux. Une architecture avancée de l'onduleur permet en outre d'éliminer les condensateurs chimiques, améliorant sa durée de vie. L'approche sera évaluée en environnement réel sur un système complet, module photovoltaïque / tracker 1 axe / onduleur, à l'échelle de 100 kW durant un an. ■



## HERVÉ COLIN



« A l'INES, nous avons développé une plateforme dédiée à l'évaluation économique des modules bifaciaux. Composée de 17 systèmes photovoltaïques modèles de 3 kWc, elle est utilisée notamment pour quantifier le gain de production d'énergie entre un système bifacial et un système de référence monofacial. En s'appuyant sur des

modèles et des données issues du monitoring de centrales, elle nous permet de prévoir les performances du système en tenant compte de l'impact de facteurs tels que l'albédo du sol, l'orientation des modules, le niveau d'irradiation, la hauteur des modules, etc. En 2017, nous avons mis cette plateforme en œuvre dans le cadre du projet BISUN pour comparer des modules bifaciaux fabriqués à partir de cellules homojonction sur silicium monocristallin type n, à une référence commerciale monofaciale, et ce dans différentes configurations. Dans le cadre du projet CHIC, nous avons étudié différentes versions de modules à hétérojonction SWCT (monofaciaux et bifaciaux) fabriqués par MeyerBurger et les avons comparés à des références commerciales équivalentes et opérant dans des conditions similaires. » ■



Le démonstrateur CHIC/BISUN évalue les systèmes bifaciaux »



## ET SI LES CENTRALES PV SE PASSAIENT DE TRANSFORMATEUR ?

Un prototype de centrale photovoltaïque fonctionnant à 3000V a été réalisé et a fait l'objet de premiers tests. Il comprend deux chaînes 1500V constituées de 36 modules à isolation renforcée et de convertisseurs statiques adaptés à la haute tension continue. L'appareillage et les équipements de sécurité ont été conçus spécifiquement ou sont issus d'autres domaines industriels dans lesquels le 3000V est déjà un standard. Dans le photovoltaïque, fonctionner à haute tension engendrera des économies de câbles et des pertes électriques moindres. L'objectif à terme est d'injecter directement l'énergie dans le réseau sans recours à un transformateur. L'évaluation de cette unité prototype se poursuit en 2018 avec la mise en place d'une chaîne de mesures pour évaluer l'effet PID (Potential Induced Degradation) propre à la configuration haute tension. ■



## DES SOLUTIONS D'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE INNOVANTES POUR LES CONVERTISSEURS PV

Trois prototypes de convertisseurs PV ont vu le jour au Liten, répondant chacun aux contraintes spécifiques des applications visées. Le premier est un convertisseur DC-DC de 200W pour la Route Solaire. Il comprend un système de transfert d'énergie sans fil pour faciliter l'intégration des modules à la route, ainsi que leur remplacement. Un onduleur de 5kW pour le PV intégré au bâtiment a par ailleurs été développé en utilisant des composants Carbone de Silicium (SiC) pour gagner en compacité afin de pouvoir être installé par une seule personne. Enfin, un onduleur de 125kW compact et à haut rendement, comprenant également des composants SiC, a été mis au point pour répondre aux besoins des centrales au sol. Ces prototypes de laboratoire feront l'objet d'expérimentations en conditions réelles en 2018. ■



## LES PRODUITS ISSUS DE LA GAZÉIFICATION DE CSR PASSÉS AU CRIBLE

Leroux et Lotz Technologies a fait appel au Liten pour concevoir et réaliser un dispositif complet de prélèvement et d'analyse (quantification et qualification) des particules, produits condensables et gaz issus de son réacteur de gazéification de CSR (Combustibles Solides de Récupération). Conçu et testé en laboratoire, l'équipement a été installé sur le gazéifieur pilote de l'industriel à Nantes. Le gaz sortant du réacteur est aspiré au travers de filtres démontables maintenus à 300° C. Une fois nettoyé de ses particules, il est conduit par une ligne chauffée vers un ensemble de barbotage où sont piégés les goudrons, lesquels sont ensuite dosés en laboratoire. Enfin, les gaz permanents (CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, etc.) sont quantifiés en ligne. Cet ensemble permet de faire des bilans de masse et de calculer les rendements du gazéifieur. ■



## UN OUTIL DE SIMULATION MULTI-ÉCHELLE ET MULTICRITÈRE DE FILIÈRES DE TRANSFORMATION DE LA BIOMASSE

Un outil numérique pour l'évaluation économique et environnementale des systèmes de valorisation énergétique de la biomasse a été développé au Liten. Il repose sur la modélisation et la simulation des filières à plusieurs échelles et selon plusieurs critères, et tient compte de la disponibilité des ressources, du rendement des procédés de transformation, de leur bilan économique et enfin de leurs émissions de gaz à effet de serre. Développé en partenariat avec l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, il s'appuie sur des modèles physiques, économiques et environnementaux ainsi que des bases de données associées. Il fournit des éléments concrets d'aide à la décision pour une intégration optimale de la biomasse dans un mix énergétique. ■



## GENEPI CONVERTIT LES DÉCHETS MÉNAGERS SECS EN CARBURANTS LIQUIDES

Initialement conçue pour étudier la conversion thermochimique à haute température et haute pression à partir de biomasse et produire un gaz de synthèse (CO+H<sub>2</sub>), la plateforme GENEPI a pour la première fois été utilisée pour gazéifier des combustibles solides de récupération (CSR) issus de déchets ménagers. A 1350° C et sous 1,5 bar de pression, la poudre de CSR est gazéifiée en quelques secondes. Les cendres sont piégées sur la paroi du four en phase liquide puis solidifiées par aspersion de gouttelettes d'eau en partie basse du réacteur. L'opération permet de séparer efficacement les particules indésirables et de récupérer un gaz de synthèse très propre (teneur en goudrons de l'ordre de quelques mg/Nm<sup>3</sup>) prêt à être converti en carburant liquide par une synthèse catalytique. Ce premier essai ouvre des perspectives prometteuses pour la valorisation d'autres types de déchets tels que le bois B, les pneus etc... ■



# STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

## POUR APPLICATIONS STATIONNAIRES ET EMBARQUÉES

Les travaux du Liten sur le stockage électrochimique visent les applications stationnaires, mais aussi l'embarqué, depuis les fortes puissances requises pour le véhicule électrique jusqu'aux objets nomades : dispositifs médicaux, montres, etc. Ils portent à la fois sur des technologies déjà disponibles sur le marché comme le lithium-ion, et sur des voies en rupture : lithium-soufre, sodium-ion... Les chercheurs couvrent toute la chaîne de valeur : conception du matériau, accumulateurs, systèmes de gestion et de suivi des batteries. Dans ce dernier domaine, des solutions d'instrumentation et de supervision sont développées pour fiabiliser le fonctionnement (thermique, seuils critiques...) et allonger la durée de vie des dispositifs de stockage.

## PROTOTYPES



### DÉFIS DESCARTES : LA DGA SÉDUITE PAR LES PERFORMANCES DES BATTERIES DU LITEN

Afin de comparer les performances de plusieurs technologies de batteries, la DGA les a mises en concurrence dans le cadre d'un projet ANR du programme « Défis Descartes ». Trois équipes impliquant totalement ou en partie le Liten, ont planché sur différents types de batteries qu'elles ont mis en œuvre dans un même petit robot terrestre du commerce : Lithium-ion, Sodium-ion et Nickel-Zinc. Les trois technologies ont répondu au cahier des charges en effectuant plusieurs fois le parcours le plus difficile. Elles ont été également évaluées sur les critères de toxicité, coût, sécurité et performances. En termes d'autonomie, le prototype Li-ion a largement surpassé la batterie d'origine du robot. La batterie lithium a finalement été retenue pour ses performances énergétiques et l'absence de cobalt dans sa composition. ■

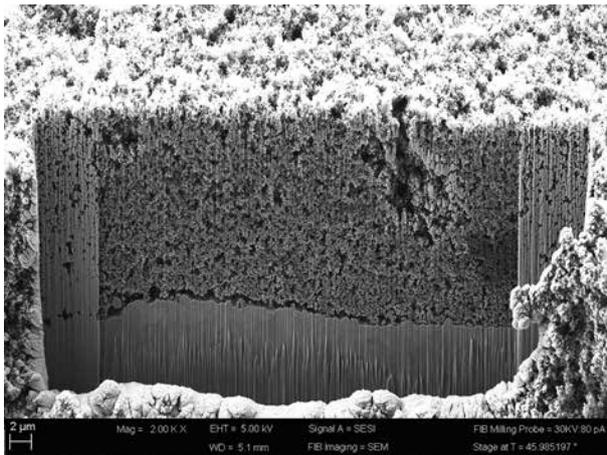
### DES CONVERTISSEURS BIDIRECTIONNELS

Dans le cadre du projet européen Esprit, qui vise à rendre économiquement viables les systèmes d'autopartage urbains, des stratégies de redistribution de véhicules par « trains routiers » sont à l'étude. Ces dernières impliquent de développer des solutions d'échange d'énergie entre batteries, afin de la faire transiter entre véhicules en stationnement lorsque seul le premier est connecté au secteur, mais aussi afin d'équilibrer la charge des véhicules connectés entre eux et en roulage. En adaptant du matériel existant, le Liten a proposé des chargeurs capables de fonctionner aussi bien sur courant alternatif (charge sur secteur) que sur courant continu (charge à partir d'un autre véhicule). Le laboratoire développe également des solutions innovantes d'échange d'énergie entre batteries, grâce à des chargeurs de très faible puissance compensant uniquement les différences de tensions. ■



## ELECTRODE SILICIUM : LES VRAIES CAUSES DU VIEILLISSEMENT

Des observations combinant plusieurs techniques d'imagerie et de spectroscopie ont permis de comprendre les mécanismes de dégradation des électrodes silicium, pressenties pour remplacer celles en graphite dans les batteries lithium et permettre, en théorie, de multiplier par 10 leur autonomie. Réalisées pour la première fois dans des conditions réelles, elles révèlent que le mécanisme de dégradation principal est lié à une pénurie de lithium, elle-même causée par le piégeage de ce dernier dans des réactions parasites. Ces résultats contredisent des travaux antérieurs qui suggéraient qu'une influence néfaste de la SEI (solid electrolyte interface) était l'une des principales sources de dégradation de telles électrodes. L'observation sur cellules entières a été rendue possible en combinant pertinemment différentes techniques d'imagerie et de spectroscopie. ■



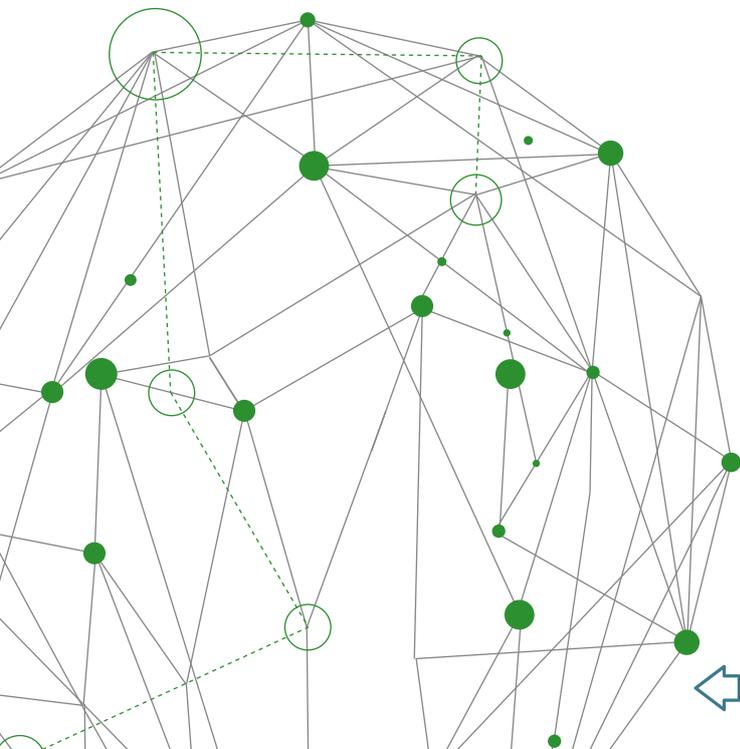
## LES MÉCANISMES DE TRANSFERT DES IONS $Mg^{2+}$ OBSERVÉS PAR XPS

Plus sûres et présentant une densité énergétique supérieure à celle des batteries lithium-ion, les batteries au magnésium font l'objet de recherches au Liten. L'un des points faibles de cette technologie réside dans la faible mobilité des ions  $Mg^{2+}$ , les mécanismes d'insertion du magnésium dans un matériau dit « phase de Chevrel »  $Mo_6S_8$  utilisé à l'électrode positive, ont été observés par XPS\*. Cette étude a mis en évidence un processus de transfert de charge réversible en deux étapes mettant successivement en jeu les atomes de soufre axiaux de la structure, puis les centres redox des clusters  $Mo_6$ . Une meilleure compréhension de ces phénomènes permettra de proposer des matériaux de cathode facilitant les processus d'insertion et de désinsertion du magnésium, de façon à ce que le transfert de charge soit plus rapide et surtout réversible. ■

\* XPS : spectrométrie photoélectronique X

## LA COMPOSITION CHIMIQUE DES BATTERIES OBSERVÉE OPERANDO

L'évolution de la composition chimique de batteries lithium-ion a pour la première fois été observée en fonctionnement. Jusqu'à présent, ce genre d'observation nécessitait l'arrêt du test de cyclage et le désassemblage de la batterie à différents temps de fonctionnement. Un porte-objet a été développé pour connecter un accumulateur au lithium à un potentiostat et suivre les changements de structures chimiques aux interfaces électrolyte/électrodes en direct. Le protocole, baptisé OXPS, a été testé sur des micro-batteries. Les résultats obtenus ont été corroborés par ceux d'une campagne parallèle d'observation directe. L'OXPS permettra de comprendre la relation entre la structure chimique et les mécanismes de dégradation des électrolytes aux interfaces avec les matériaux d'électrode pour, à terme, améliorer l'efficacité des matériaux pour la conversion de l'énergie. ■



# FAMILLES TECHNOLOGIQUES DE BATTERIES

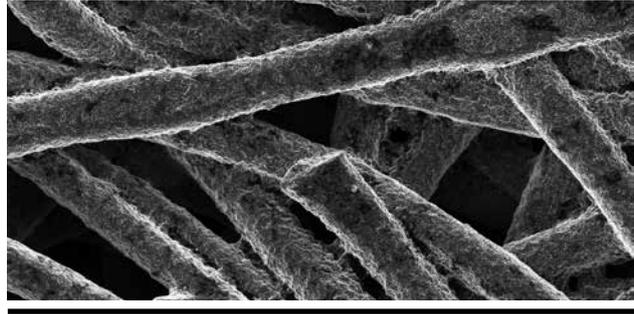
## LES COMPÉTENCES DU LITEN EN BATTERIES LITHIUM S'EXPORTENT EN BOLIVIE

Après des mois de travail, la toute nouvelle ligne pilote de fabrication de matériaux cathodiques pour batteries lithium-ion de COMIBOL a été mise en route courant 2017. La société bolivienne s'était adressée à la société ECM Greentech qui s'est elle-même associée au Liten afin de concevoir et mettre en place une ligne de production de matériaux à haute valeur ajoutée tels que le LMO et le NMC. Le Liten s'est chargé de la formation théorique et pratique des ingénieurs boliviens à la synthèse et à la caractérisation des matériaux produits. La mise en route de cette ligne pilote marque une étape importante pour le développement industriel du lithium bolivien. Les matériaux synthétisés affichent des performances dans les spécifications attendues. Une collaboration sur la mise en place d'une usine de production beaucoup plus importante est envisagée. ■



## UN ÉLECTROLYTE GÉLIFIÉ DANS UN POLYMÈRE

La demande croissante de batteries plus sûres pour les marchés de l'automobile et de l'électronique pousse les industriels à se pencher sur les électrolytes gélifiés, moins volatils que leurs homologues liquides. Un tel produit a été fabriqué à partir d'un polymère fluoré (PVDF) spécialement développé par Solvay. Le PVDF est dans un premier temps solubilisé, puis mélangé à l'électrolyte avant de subir une réticulation au moment de l'enduction. L'électrolyte se retrouve ainsi piégé dans un réseau de chaînes polymériques. Outre le fait que l'électrolyte gélifié fonctionne à température ambiante, sa mise en œuvre se fait sur des équipements en environnement anhydre classiques. Les résultats des premiers tests électrochimiques révèlent des performances équivalentes à celles des batteries lithium-ion à régimes faibles et modérés. ■



## FABIEN PERDU



« Tandis que les batteries lithium-ion atteignent leurs limites, de nouveaux concepts de batterie sont actuellement étudiés au Liten. Avec trois objectifs en ligne de mire : augmenter la durée de vie, adapter la densité énergétique au besoin de l'application, et réduire la quantité de matériaux critiques comme le cobalt. Parmi les chimies

étudiées, figure la technologie lithium-soufre, ce dernier étant abondant et peu polluant. Associé à une électrode négative de lithium métallique, le soufre à l'électrode positive permettrait de démultiplier la capacité d'échange d'électrons. Mais le lithium n'étant plus sous forme d'ions, de vrais problèmes scientifiques restent à résoudre avant que le concept ne devienne réalité. Au Liten, nous cherchons également à remplacer le lithium par un autre alcalin.

Nous avons notamment développé des prototypes de cellules et même de modules au sodium, lesquels présentent des performances comparables à celles des batteries lithium-ion actuelles. Le magnésium, qui peut cycliser sous forme métallique sans faire de dendrites, fait également l'objet de travaux pour parvenir à réaliser un système électrochimique complet. Enfin, d'autres candidats comme le calcium et le potassium sont également à l'étude. » ■



Quels successeurs pour le lithium-ion ? »



## UN LOGICIEL POUR SIMULER LA VIE DES PACKS BATTERIES

Le Liten a développé un logiciel permettant de calculer automatiquement la configuration et le dimensionnement idéal de systèmes de stockage électriques composés de batteries lithium-ion, de façon à ce qu'ils atteignent les performances et la durée de vie attendues en fonction de l'application visée. Cet outil permet de simuler l'évolution des différents paramètres et les performances des packs batteries dans le temps, en fonction du nombre de modules et du profil d'utilisation du système. Il intègre un modèle électrothermique dynamique permettant, à chaque instant, de simuler la température de chaque cellule, le courant qui la traverse et le vieillissement individuel de chaque élément. Il peut, enfin, prédire l'impact sur la durabilité du pack de paramètres de dimensionnement tels que le nombre de modules, la température et le débit d'huile, etc ■



## LE COMPORTEMENT ÉLECTROCHIMIQUE DES BATTERIES LITHIUM-ION SIMULÉ EN PSEUDO 2D

Un modèle pseudo 2D simulant le comportement électrochimique de batteries lithium-ion a été mis au point. Il décrit en temps réel et à l'échelle d'un empilement élémentaire collecteur/électrode/séparateur, les conditions locales dans l'épaisseur d'une électrode et dans les particules de matière active. Il permet notamment d'explorer les hétérogénéités de lithiation lors du fonctionnement de l'électrode de graphite. Basé sur les paramètres physiques des matériaux utilisés, ce modèle est facilement transposable à d'autres chimies de batterie. Il sera, à terme, complété par un modèle de vieillissement innovant couplant l'évolution de la couche de passivation à la surface de la matière active (SEI) et apparition de lithium-plating, et permettra de proposer des architectures et des stratégies d'utilisation optimisées pour améliorer les performances et ralentir le vieillissement de la batterie. ■

## ESTIMER LA DURÉE DE VIE DES BATTERIES RECONDITIONNÉES

Une méthode d'estimation de la durée de vie de batteries Li-ion usagées a été développée en partenariat avec la SNAM. Objectif: valider à la fois expérimentalement et par simulation le potentiel des nouvelles batteries manufacturées à 80% à partir d'éléments recyclés et le modèle économique associé. Des cellules ont été prélevées sur un pack ayant été utilisé à bord d'un véhicule électrique, et présentant 15% de pertes de performances. Elles ont ensuite été soumises à 15 conditions de vieillissement différentes. Le modèle établi à partir de ces résultats expérimentaux montre que, selon les conditions de réutilisation, il est tout à fait envisageable de réaliser 4000 cycles avec ces batteries. Le Liten continue de travailler avec la SNAM pour améliorer la gestion des batteries, et finalement atteindre de telles performances. ■



# VECTEUR HYDROGÈNE

## AU SERVICE DE LA MOBILITÉ ÉCOLOGIQUE ET DU STOCKAGE

En tant que vecteur énergie, l'hydrogène est d'abord utilisé au Liten pour prolonger l'autonomie de véhicules propres et élargir ainsi leur utilisation à l'interurbain. Les travaux portent sur des piles à combustible moins coûteuses, et sur des systèmes batteries - pile à combustible optimisés capables de s'auto-réguler. L'hydrogène est également étudié en tant que moyen de stockage de surplus de production d'électricité renouvelable, comme alternative aux batteries. Le Liten développe des solutions power to gas performantes qui associent des électrolyseurs haute température à fort rendement et la valorisation de l'hydrogène produit, soit par fourniture directe à l'industrie soit en le transformant en méthane de synthèse via un ajout de  $\text{CO}_2$ , soit en produisant directement un gaz de synthèse par co-électrolyse  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ .

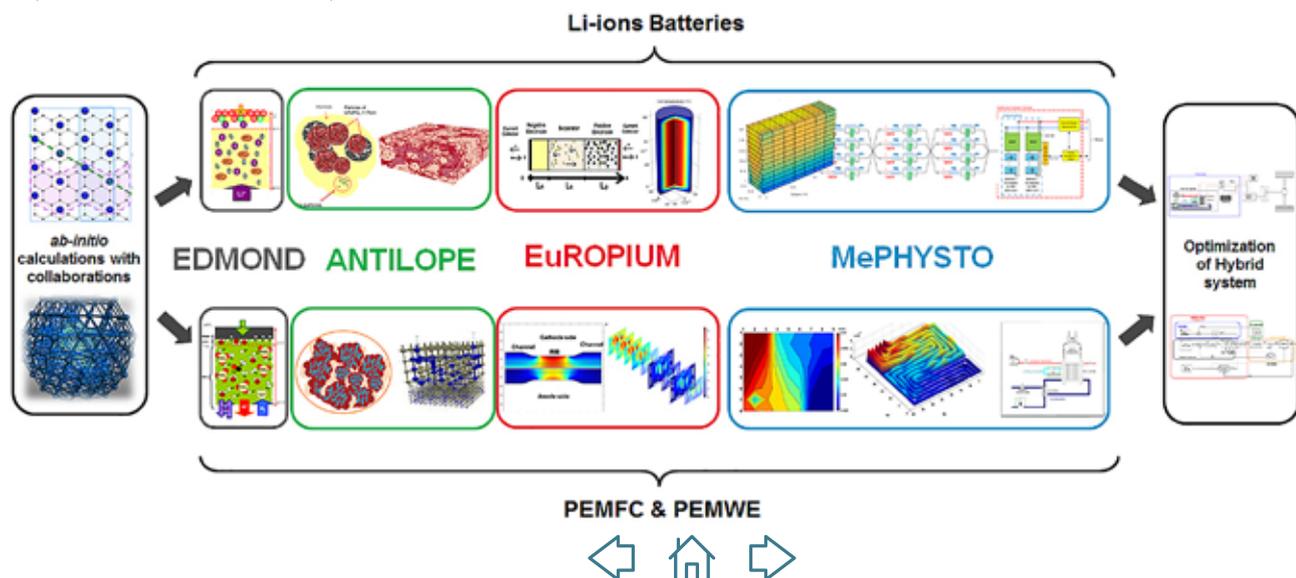
## PILES À COMBUSTIBLE PEM

### LA PLATEFORME MUSES SIMULE LE FONCTIONNEMENT DES GÉNÉRATEURS ÉLECTROCHIMIQUES À TOUTES LES ÉCHELLES

Les phénomènes physico-chimiques à l'œuvre dans les piles à combustible basse température (PEMFC) et les batteries lithium-ion, sont par nature multi-physiques et multi-échelles. Afin d'étudier finement le fonctionnement de ces dispositifs dans leur ensemble, le Liten a mis en place la plateforme de simulation MUSES. Cette dernière regroupe cinq environnements de développement organisés par échelle spatiale, de l'échelle du matériau actif jusqu'au système. L'homogénéisation de la structure des modèles permet de les faire évoluer plus facilement en capitalisant l'expérience. Les modèles de simulation numérique sont un complément important pour mieux comprendre les phénomènes et ainsi améliorer les propriétés des matériaux, optimiser les designs, mais aussi estimer les performances et prédire le vieillissement du système. ■

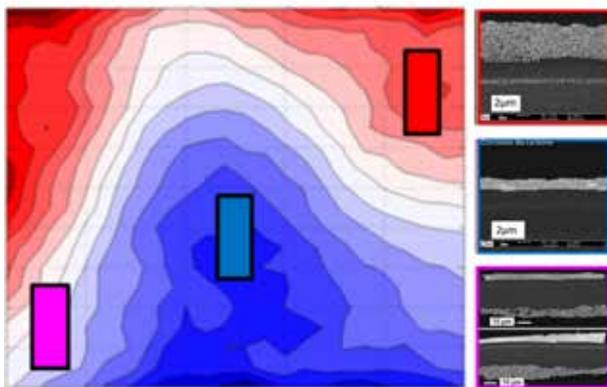
### DIAGNOSTIC EN TEMPS RÉEL DES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT DANS LES PILES PEM

Les mécanismes de dégradation à l'œuvre dans les piles PEM sont très dépendants des conditions de fonctionnement (température, pression, humidité). Un algorithme de diagnostic a été mis au point par le Liten pour aider à maintenir ces dernières à un niveau permettant d'obtenir à la fois de bonnes performances et un environnement peu dégradant. Celui-ci compare les valeurs de la tension et de la résistance relevées expérimentalement, à des valeurs théoriques pré-calculées par un modèle disponible sur la plateforme MUSES. Le décalage éventuel permet de détecter un dysfonctionnement, dont la nature est déterminée par une analyse plus fine des résultats. A l'heure actuelle, l'efficacité de la classification des défauts est d'environ 90%. Robuste et peu gourmande en mémoire, cette cartographie de modèle permet un diagnostic en temps réel. ■



## LES PHÉNOMÈNES RESPONSABLES DE DÉGRADATIONS LOCALES DANS LES AME IDENTIFIÉS

Les phénomènes à l'origine des dégradations apparaissant dans les Assemblages Membrane-Electrodes (AME) des piles PEM, ont été étudiés lors de cycles d'arrêt/démarrage forcés à un rythme soutenu. Trois types d'analyses ont été réalisés : des mesures locales *in situ* de densité de courant, des mesures électrochimiques et des observations des modifications de la microstructure post-mortem. L'association de ces trois niveaux de caractérisation a permis de mettre en évidence les mécanismes préférentiellement impliqués dans les dégradations locales, comme la corrosion du carbone dans certaines zones. L'identification des phénomènes en jeu et de leur champ d'action précis permettra, à terme, d'adapter localement les électrodes pour atténuer les dégradations et améliorer la durée de vie des piles. ■



## MICRO-COGÉNÉRATION : PAS D'INFLUENCE SUR LE VIEILLISSEMENT DES PILES À COMBUSTIBLE

Afin de vérifier si la micro-cogénération de chaleur et d'électricité dans les piles à combustible (PAC) a une influence sur le vieillissement des piles, le Liten a simulé les besoins énergétiques d'un foyer sur une année, alternant des fonctionnements à différentes puissances, pour induire un effet de cyclage caractéristique des conditions réelles. Ce profil de sollicitation a ensuite été appliqué pendant 1000 heures sur le système EPICEA, délivrant une puissance électrique maximale de 4kW et une puissance thermique équivalente. Un suivi régulier a été effectué pour vérifier l'état du matériel et le bon fonctionnement de l'ensemble grâce à diverses mesures. Il apparaît que la micro-cogénération n'accélère pas le vieillissement de la PAC. Ces résultats serviront à construire un algorithme de pronostic de durée de vie de la pile pour ce type de fonctionnement. ■



## DIDIER BOUX

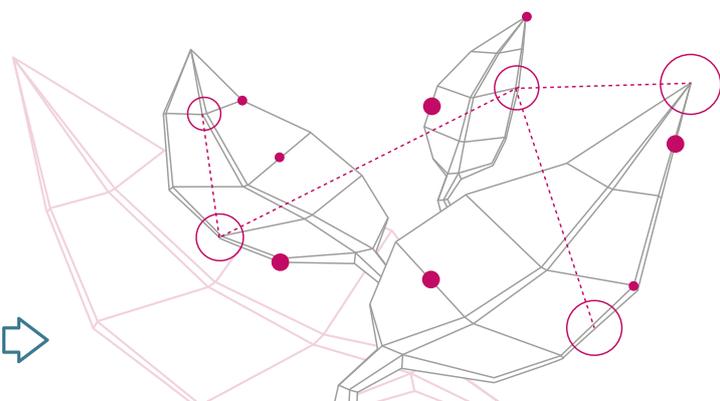


« Depuis 2016, nous avons développé l'ensemble de la chaîne énergétique du catamaran Energy Observer. Ce dernier, qui a déjà fait le tour de France, s'apprête à naviguer à travers le monde en totale autonomie, sans émission de gaz à effet de serre ni particules fines. Au Liten, nous avons développé une véritable

architecture énergétique autour de deux éoliennes à axe vertical, d'une aile de traction intelligente, de modules photovoltaïques à hétérojonction répartis sur 140 m<sup>2</sup> et de deux moteurs électriques. Mais la véritable originalité du navire réside dans le fait d'utiliser l'hydrogène comme source de stockage de l'énergie à long terme, en plus des batteries embarquées. Le surplus d'énergie produit par les panneaux solaires et les éoliennes est utilisé pour alimenter un électrolyseur, et produire de l'hydrogène à partir d'eau de mer préalablement dessalinisée. Lorsqu'il n'y a ni soleil ni vent, cet hydrogène peut être reconverti à bord par la pile à combustible pour alimenter les moteurs électriques du navire, la chaleur étant par ailleurs valorisée pour la vie à bord. ■



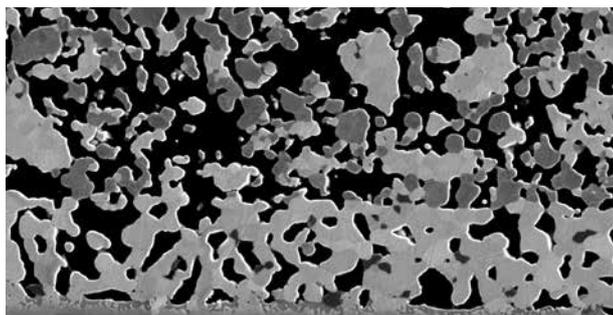
Energy Observer est un laboratoire énergétique flottant »



# ÉLECTROLYSE HAUTE TEMPÉRATURE

## LES PHÉNOMÈNES DE DÉGRADATION DANS LES PILES SOC ENFIN DÉCRYPTÉS

Alors que la dégradation des piles à combustible céramique SOC (Solid Oxide Cell) est plus intense en mode électrolyse qu'en mode pile, les reconstructions d'électrodes en 3D par tomographie réalisées à l'ESRF ont révélé que la formation d'agrégats de nickel est équivalente dans les deux modes. D'autres caractérisations par micro diffraction et micro fluorescence ont été effectuées pour déterminer le(s) mécanisme(s) expliquant cette différence. Les résultats ont mis en évidence l'existence d'un phénomène de diffusion de strontium et la formation de  $\text{SrZrO}_3$  se produisant essentiellement en mode électrolyse. L'instabilité du *Ferro-cobaltite de lanthane* substitué au strontium (LSCF) pourrait donc expliquer le taux de dégradation plus élevé en mode électrolyseur. Ces résultats fournissent des pistes d'amélioration des microstructures des électrodes pour augmenter la durée de vie des piles. ■

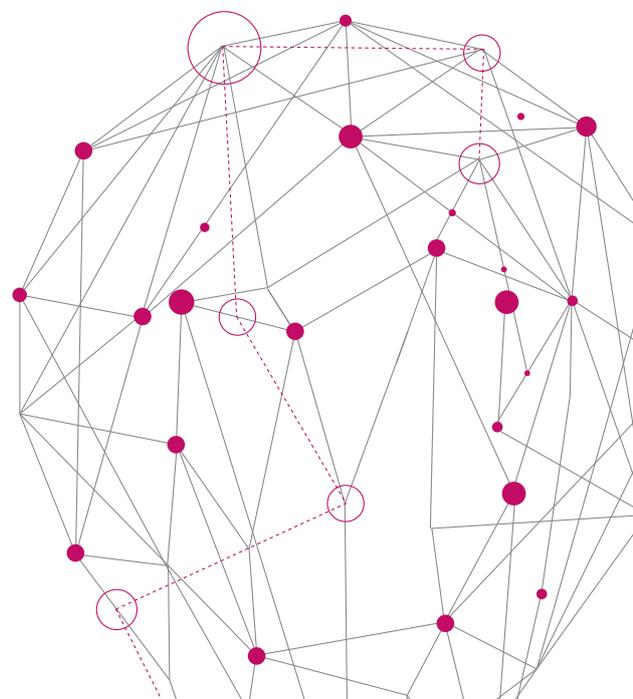


## UN DISPOSITIF RÉVERSIBLE DU STOCKAGE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES DANS LES BÂTIMENTS

Un prototype de dispositif réversible, fonctionnant de manière automatique à la fois comme électrolyseur et comme pile à combustible, a été conçu et réalisé par le Liten. Il est basé sur la technologie à oxydes solides qui fonctionne à haute température ( $>700^\circ\text{C}$ ) pour un rendement inégalé. En mode électrolyseur, il convertit l'électricité en hydrogène à partir de vapeur d'eau. En mode pile à combustible, il permet de restituer une puissance électrique à partir de l'hydrogène produit et stocké. Avantages majeurs dans ce mode, il peut être alimenté par d'autres combustibles que l'hydrogène tels que le gaz naturel ou le biométhane et il produit de la chaleur qui est valorisée. Il constitue le cœur technologique du « Smart Energy Hub », solution développée par la startup SYLFEN permettant d'améliorer l'autonomie énergétique des bâtiments et éco-quartiers. Il a été hybridé avec des batteries dans un système dédié géré via des stratégies de pilotage intelligentes développées par SYLFEN. ■

## CO-ÉLECTROLYSE : PREMIERS ESSAIS DE DURABILITÉ SOUS PRESSION

La co-électrolyse de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone produit un gaz de synthèse qui peut faire l'objet de nombreux usages énergétiques. Le Liten, qui avait auparavant démontré l'intérêt de monter en pression pour augmenter l'efficacité de ce procédé, vient de franchir une étape majeure avec un premier essai de co-électrolyse de 1600 heures sous pression en laboratoire. L'objectif était d'analyser l'impact de la pression de fonctionnement sur la durabilité de l'électrolyseur. Les résultats montrent qu'après une phase initiale de baisse de performances, le taux de dégradation apparent de la cellule à oxyde solide se stabilise à un niveau équivalent à celui observé à pression atmosphérique. Fort de ce résultat encourageant, les équipes mettent d'ores et déjà en œuvre des tests pour évaluer plus spécifiquement le vieillissement des matériaux en mode co-électrolyse sous pression. ■



# EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

## RÉCUPÉRER, STOCKER, REDISTRIBUER L'ÉNERGIE

Gérer l'intermittence des énergies renouvelables est un cap décisif pour les mettre en œuvre dans des réseaux. Le Liten s'attache à stocker l'énergie produite par diverses sources afin de la restituer en fonction des besoins, dans un délai qui peut aller de quelques heures à plusieurs mois. Il intervient dans trois domaines applicatifs : le bâtiment, avec des modèles de prédiction de la performance énergétique en fonction des besoins des occupants et des différents composants (murs, vitrages, climatisation...) ; l'industrie, où l'objectif est de réinjecter ou de valoriser sous d'autres formes les déperditions thermiques et la chaleur fatale de différents procédés ; les réseaux, avec des travaux de simulation et d'optimisation visant à dimensionner des moyens de stockage et à définir des stratégies de gestion.

## BÂTIMENTS

### DES ÉLÉMENTS BIPV EN COURS D'ÉVALUATION SUR FACT

Dans le cadre du projet européen CONIPHER, des éléments de façade combinant des fonctions d'isolation thermique et de production d'énergie PV ont été évalués sur l'outil FACT (FACade Tool) installé sur la plateforme « Énergétique du Bâtiment » à l'INES. Ces composants BIPV (Building-Integrated Photovoltaics) associent des cellules à hétérojonction bifaciales laminées dans un module bi-verre fixé sur un cadre en béton conçu pour faciliter la maintenance. Les caractéristiques thermiques du mur sont comparées avant et après la pose par des mesures de température et de flux thermique. La production d'énergie électrique BIPV est en cours d'évaluation. Parallèlement, le projet Homeskin développe des panneaux isolants de faible épaisseur à base d'aérogel de silice. Ces panneaux dont l'épaisseur est réduite d'un facteur 5, font également l'objet de tests de caractérisation thermique sur FACT et pourraient être avantageusement combinés avec l'élément CONIPHER. ■



### CONJUGUER EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET QUALITÉ DE L'AIR

Les enveloppes de bâtiments ultra-étanches conçues pour réduire les pertes thermiques impactent souvent négativement la qualité d'air à l'intérieur des bâtiments. Un algorithme de pilotage de la ventilation a donc été développé pour concilier efficacité énergétique et qualité de l'air intérieur. Il est fondé sur une méthode dite de « logique floue », qui nécessite de définir des plages de concentrations acceptables pour chaque polluant considéré. Le débit de ventilation est ensuite optimisé et modulé en fonction des concentrations mesurées par un algorithme conçu spécialement. Les seuils de déclenchement et de ventilation maximale sont tous optimisés afin de satisfaire au mieux les trois objectifs d'isolation thermique, qualité de l'air intérieur, et limiter les intermittences de fonctionnement du système mécanique d'insufflation d'air. ■



## RAPHAËL COUTURIER



« Dans un contexte de prix bas des énergies fossiles, nous développons deux types de systèmes capables de faire du stockage thermique sur quelques heures à quelques jours. Les premiers, très compétitifs, utilisent l'eau comme matériau de stockage. Les seconds s'appuient sur des matériaux à changement

de phase pour atteindre des densités de stockage très élevées, de l'ordre de 100 kWh/m<sup>3</sup> ou plus. Dans les deux cas, ces solutions sont conçues autour d'un échangeur de chaleur dont nous définissons la géométrie, les matériaux et le dimensionnement, afin de maîtriser la courbe de puissance à la charge et à la décharge. Nous avons beaucoup progressé pour les systèmes basés sur les matériaux à changement de phase. Un premier démonstrateur de 120 kWh est déployé en 2018 sur un écoquartier desservi par le réseau de chaleur de Grenoble. Pour les systèmes à très haute densité, nous avons identifié des matériaux à fort potentiel qui agissent par réaction chimique avec l'eau ou la vapeur d'eau. Reste à les valider à l'échelle de systèmes de plusieurs centaines de litres. En effet, leurs changements d'état successifs altèrent leurs propriétés physiques, par exemple leur granulométrie, ainsi que leur capacité de stockage thermique. Nous évaluons donc différents moyens de préserver ou restaurer ces propriétés. » ■

“

Nous testons en 2018 un démonstrateur de stockage thermique de 120 kWh »

## VALORISER LA CHALEUR FATALE BASSE TEMPÉRATURE AVEC L'ORC

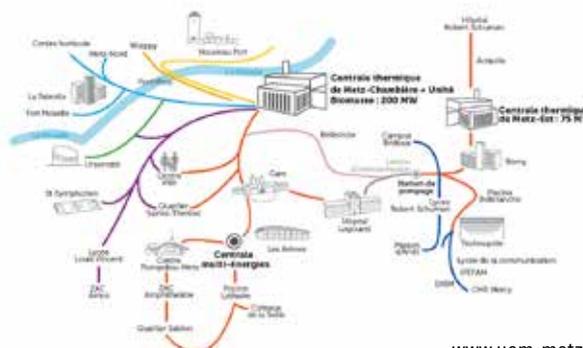
Une machine ORC\* spécifique aux sources de chaleur basse température a été conçue et fabriquée avec la société Enogia. Testée en conditions opérationnelles, elle a fourni une puissance électrique maximale de 630 We à partir d'un apport de chaleur variant entre 90° C et 110° C. Le fluide caloporteur avait été choisi pour son très faible impact environnemental. L'amélioration de la machine se poursuit, notamment à travers une thèse sur la définition d'un mélange optimisé de fluides zéotropes. L'objectif est d'atteindre une puissance électrique de 1 kWe. Cette machine ORC compacte et légère (0,1 m<sup>3</sup>, moins de 80 kilos) ouvrira de nouvelles possibilités de récupération de chaleur fatale : transports routiers et maritimes, habitat isolé en couplage avec une installation solaire thermique etc. ■

\*Organic Rankine Cycle



## METZ ÉVALUE LA GESTION AVANCÉE DE SON RÉSEAU DE CHALEUR

Une étude d'opportunité a été menée pour UEM, opérateur du réseau de chaleur de Metz, afin d'évaluer l'intérêt d'une gestion avancée. Les performances thermiques et hydrauliques de 50 sous-stations représentatives du réseau ont été suivies pendant la saison de chauffe 2016 - 2017. Le Liten a conçu un modèle dynamique simplifié, puis utilisé sa plateforme de simulation Pegase pour estimer un optimum économique de gestion des températures de réseau qui intègre le coût des sources d'énergie renouvelable utilisées. L'étude montre qu'une gestion avancée du réseau de Metz pourrait permettre une réduction des pertes réseau et une optimisation des moyens de production avec un retour sur investissement intéressant. Les gains porteraient à la fois sur le pilotage quotidien, la maintenance des équipements et la planification des investissements. ■



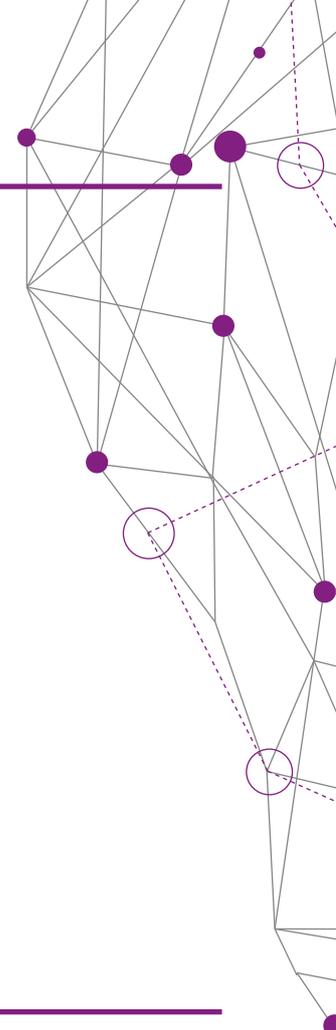
www.uem-metz.fr



## INTÉGRATION DES ENR

### DE L'INTÉRÊT DU STOCKAGE ÉLECTRIQUE POUR LA CORSE

Réalisée avec l'ADEME, l'étude Smarthyles a évalué l'intérêt technico-économique de solutions de stockage (telles que des batteries ou une chaîne hydrogène) associées à des productions d'origine renouvelable, dans un contexte de micro-réseaux locaux connectés au réseau principal en Corse. Leur apport a été étudié pour trois cas d'application : (i) maximiser l'autoconsommation d'énergie photovoltaïque dans un port de plaisance, (ii) contribuer au maintien du plan de tension dans un village isolé, (iii) simuler le délestage du réseau pendant le raccordement à quai des ferries. Les simulations réalisées sur les plateformes Odyssey et Spider montrent que le stockage associé à une source ENR peut apporter une grande diversité de services dont la valeur économique, approximée du fait du cadre législatif en évolution, permet d'envisager un surcoût limité dans un contexte insulaire. ■



### MODÉLISATION MULTI-DOMAINES DES CENTRALES SOLAIRES À CONCENTRATION

Le Liten conduit des travaux de modélisation avancée liés aux développements des technologies de centrales solaires à concentration. Les procédés solaires ont par essence des dynamiques complexes liées aux variations rapides de l'ensoleillement. La modélisation multi-domaines, qui couvre le contrôle commande, ainsi que des parties optique et thermohydraulique, permet de tester virtuellement les modes de pilotage des centrales dans différentes conditions de fonctionnement. Chaque domaine est traité avec un outil de simulation ad hoc, puis ces modèles sont assemblés et co-simulés grâce à la plateforme Pegase. Ces modélisations dynamiques ont déjà permis d'évaluer plusieurs stratégies de régulation lors de passages nuageux qui occultent jusqu'à 100% du rayonnement solaire. D'autres usages vont être expérimentés : stratégies de régulation avancées, essais en conditions accidentelles... Les outils pourront à terme être déployés pour la formation d'opérateurs et l'automatisation totale de futures installations industrielles. ■



### LA STEG SE MET AUX SMARTGRIDS

Une feuille de route devant permettre à la STEG, société tunisienne de l'électricité et du gaz, de multiplier par 10 la contribution des énergies renouvelables en 12 ans a été établie. En étudiant les besoins, les contraintes et les spécificités du réseau tunisien, une équipe commune CEA-STEG complétée de quelques industriels du domaine, a défini des préconisations reposant sur 38 briques technologiques smart grids qui seront déployées suivant un calendrier pré-établi. Pour la suite, le Liten a proposé d'accompagner notamment la mise en place de 400 000 compteurs intelligents, lesquels permettront d'accéder aux données de consommation en temps réel, ainsi que des outils de prévision et de planification pour adapter en permanence production et consommation en prenant en compte l'intégration des énergies renouvelables. ■



# NOUVEAUX PROJETS FÉDÉRATEURS

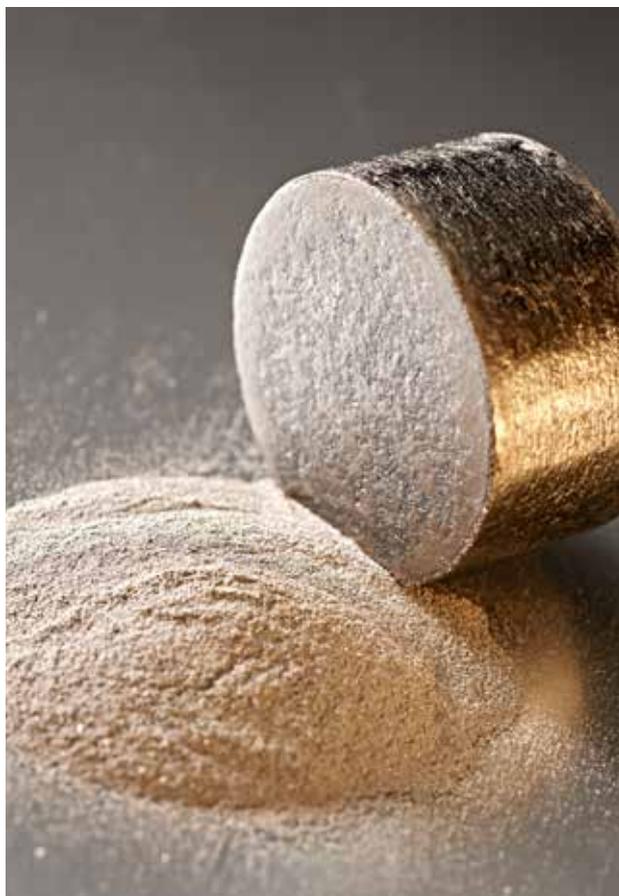
## SUPREME

L'ECONOMIE CIRCULAIRE AU CŒUR DE LA MÉTALLURGIE DES POUDRES



Le projet SUPREME a pour objectif d'améliorer l'efficacité (énergie, eau, rendement) de la filière « métallurgie des poudres » par des gains à tous les niveaux: extraction minière, fabrication de poudres par broyage et atomisation, mise en forme (fabrication additive, frittage). Des démonstrateurs verront le jour pour plusieurs applications: automobile (CRF), outils de coupe (DELLAS), aéronautique (PRISMADD), prothèses (MBA) et outillage (IPC/MOO). Le Liten est plus particulièrement impliqué dans les tâches sur la mise en œuvre d'aciers haut carbone et inoxydable 316L par fabrication additive respectivement pour les secteurs de l'automobile et de l'énergie et de l'acier 17-4PH par moulage par injection pour le secteur médical.

DATE DE LANCEMENT 01/09/2017 | DURÉE 3 ANS | FINANCEUR  
HORIZON 2020 | BUDGET GLOBAL DU PROJET 7.9 M€  
COORDINATEUR LITEN | NOMBRE DE PARTENAIRES 17



## NENUFAR

PROCHAINE GÉNÉRATION DE SOLUTIONS DE STOCKAGE D'ÉNERGIE POUR DES AVIONS PLUS ÉLECTRIQUES



Le projet H2020 NENUFAR du sous-programme Clean Sky 2 a pour objectif de contribuer à la réduction de l'empreinte environnementale des avions en vol et au sol. Cela se traduit notamment par des objectifs de diminution du bruit et des émissions de CO<sub>2</sub> et de NOx. L'électrification croissante des avions entraîne un besoin croissant de stockage d'énergie. Les solutions commerciales ne sont pas satisfaisantes en raison de densités d'énergie massique au niveau système trop élevées, notamment lorsque tous les éléments de sécurité autour des batteries Li-ion sont intégrés. Le projet NENUFAR va au-delà du stockage d'énergie seul puisqu'il adresse également les problématiques de recharge et d'architecture système. L'objectif à horizon 4 ans est de réaliser deux démonstrateurs systèmes batteries TRL5 de tension différente, intégrant modules batteries, BMS, chargeur et système de communication. Le programme de travail s'appuie sur des plateformes technologiques mais également sur les plateformes de modélisations/simulations pour accompagner les développements et améliorer tout au long du projet la compréhension des phénomènes de vieillissement, d'emballage thermique, de dégazage ou même dans les cas extrêmes de départ de feu. La contribution du Liten porte plus particulièrement sur les volets modélisation et compréhension des mécanismes de dégradations.

DATE DE LANCEMENT 01/01/2018 | DURÉE 4 ANS | FINANCEUR  
HORIZON 2020 | BUDGET GLOBAL DU PROJET 5 M€ | COORDINATEUR  
LITEN | NOMBRE DE PARTENAIRES 4



## JUPITER 1000

UN DÉMONSTRATEUR DU POWER-TO-GAS DANS LA ZONE PORTUAIRE DE MARSEILLE



Le premier enjeu du projet JUPITER 1000 est de construire une unité de démonstration de Power-to-Gas d'une taille de 1MWe avec une injection d'hydrogène et de méthane de synthèse dans le réseau de transport de gaz naturel sur le port industriel de Marseille Fos. Il rassemble les principaux acteurs d'une filière française du Power-to-Gas. A l'issue du projet, un business plan sera établi et des évolutions réglementaires proposées aux politiques pour faciliter l'émergence de cette technologie à l'échelle Européenne. Ce projet s'inscrit dans la transition énergétique en proposant une solution complémentaire de stockage grande capacité d'électricité qui ne nécessite pas de nouvelles infrastructures. Pour le CEA, le principal enjeu est l'implémentation de sa technologie de réacteur-échangeur compact de méthanation de CO<sub>2</sub> sur le démonstrateur. Le Liten participe aussi aux évaluations technico-économiques et environnementales de cette technologie ainsi que sur la stratégie de pilotage de telles installations.

DATE DE LANCEMENT 01/03/2016 | DURÉE 5 ANS | FINANCEUR ADEME | BUDGET GLOBAL DU PROJET 30 M€ | COORDINATEUR GRT GAZ | NOMBRE DE PARTENAIRES 9



## NOUVELLE COLLABORATION AVEC ITRI À TAIWAN

Initialement tourné vers la microélectronique, l'ITRI développe désormais une forte activité de R&D dans les domaines de l'énergie et de l'environnement à l'image de celle du Liten, avec des moyens humains et expérimentaux comparables. La complémentarité des expertises, des approches et des écosystèmes respectifs a conduit les deux instituts à initier un partenariat tourné résolument vers l'innovation pour l'industrie. La signature d'un MoU le 7 Juin 2017 a marqué le lancement de ce partenariat d'ores et déjà concrétisé par deux axes de collaboration sur la fabrication additive de poudres métalliques et sur les batteries tout solide. Les discussions se poursuivent sur des thèmes tels que les piles à combustible, les cellules photovoltaïques ou le smartgrid.

## OSMOSE

MIX OPTIMAL DE FLEXIBILITÉS POUR UNE INTÉGRATION MAXIMALE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES (ENR)



Le projet OSMOSE a pour objectifs de définir, expérimenter et évaluer les différentes sources de flexibilités nécessaires pour les systèmes électriques de demain, au sein desquels une part croissante de la production proviendra de sources d'EnR, notamment PV et éolienne. Les solutions de stockage, de gestion de la demande, et d'opération du réseau seront considérées pour constituer le mix optimal de flexibilités nécessaire, déterminé à la suite de simulations. La structuration du cadre permettant le développement approprié de l'ensemble des flexibilités nécessaires sera également étudiée. La particularité du projet OSMOSE repose sur l'approche globale, évitant le travail en silo, depuis l'identification du besoin jusqu'à l'expérimentation par 4 démonstrateurs de la mutualisation de services par divers couplages de flexibilités. La capitalisation des résultats dans une tâche coordonnée par le CEA doit aider au déploiement des flexibilités pertinentes pour le réseau électrique.

DATE DE LANCEMENT 01/09/2017 | DURÉE 4 ANS | FINANCEUR HORIZON 2020 | BUDGET GLOBAL DU PROJET 28.3 M€ | COORDINATEUR RTE | NOMBRE DE PARTENAIRES 33 DONT 6 TSO



# LES PLATEFORMES

## PLATEFORME BIORESSOURCES

Produire de l'énergie en éliminant des déchets, avec un rendement énergétique élevé : c'est la vocation de cette plateforme unique en France. Ses activités couvrent le broyage, la torréfaction, la pyrolyse, la liquéfaction hydrothermale et la gazéification, à une échelle extrapolable à des procédés industriels. Elle collabore avec une quinzaine de partenaires industriels, dont CMI, Valoneo, Leroux & Lotz et plus récemment Vinci Environnement.



## PLATEFORME SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

La plateforme participe au développement de la filière industrielle française voire européenne du solaire. Ses recherches portent sur les matériaux, les procédés et les équipements pour le photovoltaïque. Son équipement phare, représentatif d'une ligne pilote de production, développe la technologie de cellule photovoltaïque silicium hétérojonction. Elle collabore avec plus de 100 industriels, des PME (Semco Technologies, Thermocompact, B.E.A., Sunpartner, CNR...), des ETI (ECM Greentech, ARMOR...) et des grands groupes (Enel, EDF-PWT, Arkema...).



## PLATEFORME RÉSEAU ET STOCKAGE THERMIQUE

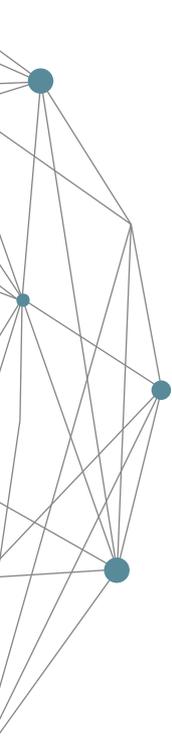
Unique en Europe par sa taille et la diversité de ses activités, la plateforme développe des technologies pour gérer l'énergie thermique, la récupérer, la stocker en vue d'une utilisation ultérieure, l'utiliser dans l'industrie ou la distribuer via les réseaux de chaleurs : pompes à chaleur, chaudières, échangeurs thermiques, etc. Elle accompagne une cinquantaine de partenaires industriels, dont Total, Engie, CCIAG, Safran, ALFA LAVAL et Roquette.



## PLATEFORME SYSTÈMES SMART GRID

Dimensionner, piloter et optimiser des systèmes énergétiques comprenant des sources de production variables et des moyens de stockage électrique : c'est la vocation de cette plateforme. Ses équipements lui permettent d'étudier des configurations variées, de gérer leurs composants et de définir des stratégies de pilotage. Elle collabore avec une cinquantaine de partenaires industriels dont RTE, Valorem, Socomec, Cap Vert Energie et UEM.





## PLATEFORME ÉNERGÉTIQUE BÂTIMENT

La plateforme permet aux constructeurs et aux équipementiers d'améliorer la performance énergétique des bâtiments, leur confort intérieur et l'intégration du photovoltaïque: nouveaux modes constructifs, parois opaques et vitrées, matériaux, enduits, menuiseries spécifiques, systèmes de ventilation innovants, capteurs solaires, systèmes et stockage thermique... Elle compte 40 collaborateurs et dispose de 5 bâtiments expérimentaux instrumentés dont un nouvel outil de test de façades.



## PLATEFORME PRODUCTION ET STOCKAGE HYDROGÈNE

La plateforme développe des procédés de production et de stockage de l'hydrogène utilisé comme source d'énergie. Elle est l'un des tout premiers déposants mondiaux de brevets sur l'électrolyse haute température et la pile à combustible à oxyde solide. Elle teste des démonstrateurs, par exemple des réservoirs de stockage. Elle collabore avec une dizaine d'industriels, dont Vinci Entrepose, NKG, PSA, Vicat, et la startup Sylfen.

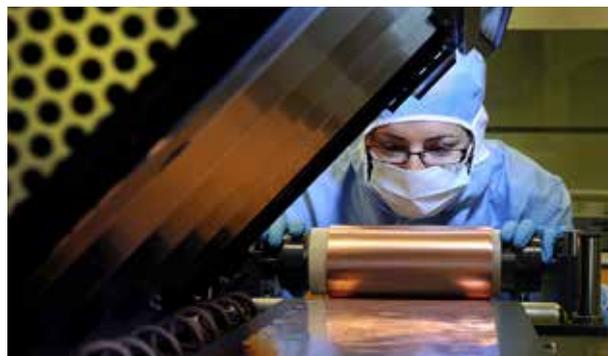


## PLATEFORME MOBILITÉ ÉLECTRIQUE

La plateforme intègre des prototypes de batteries ou de piles à combustible développés par le CEA dans des véhicules terrestres, aériens ou marins, et les teste en conditions réelles. Les essais, menés sur site fermé ou ouvert, alimentent le retour d'expérience sur les performances, le cyclage et le vieillissement. Une dizaine d'industriels sont associés à ses travaux : fabricants de batteries, de piles, de véhicules classiques ou électriques...

## PLATEFORME BATTERIES

La plateforme développe et fabrique à petite échelle des batteries lithium-ion : matériaux, composants, assemblages des packs, intégration système, tests ... Elle vise toutes sortes d'applications, de l'implant auditif au bus électrique. Sa taille et son niveau technologique en font un outil de R&D unique en Europe. Plus de 30 industriels utilisent ses services, des PME aux grands groupes comme Renault, Umicore et Solvay.



## PLATEFORME PILE À COMBUSTIBLE

La plateforme améliore les performances et la durée de vie des piles de type PEMFC et réduit leur coût, grâce à une approche intégrée : matériaux, assemblages membrane-électrode, stacks, tests en conditions réelles. Ses travaux de R&D se situent à l'état de l'art mondial et donnent lieu à 10 à 20 dépôts de brevet par an. Une dizaine d'industriels y participent, dont Michelin, Faurecia et Safran.



## PLATEFORME MICRO-SOURCES D'ÉNERGIE

La plateforme développe des micro-piles à combustible pour alimenter cartes à puce, capteurs, ordinateurs portables, etc. Elle dispose d'équipements préindustriels et mise notamment sur l'innovation matériaux, avec des procédés de sérigraphie et de dépôt physique ou chimique en phase vapeur (PVD-CVD).



## PLATEFORME IMPRESSION GRANDE SURFACE

La plateforme met en valeur des substrats plastique, papier ou textile en les dotant de fonctions électroniques : capteurs, optiques, circuits logiques, systèmes de visualisation... Elle cible des marchés comme les interfaces homme-machine, l'éclairage intelligent, les écrans interactifs, la surveillance de l'environnement, etc. Elle collabore avec plusieurs industriels français et étrangers, dont les start-ups Isorg et Symbiose, des chimistes japonais et le papetier Arjowiggins.



## PLATEFORME NANOSÉCURITÉ

La plateforme travaille sur les questions de protection, de santé et de sécurité liées à la mise en œuvre des nanomatériaux. Elle mène des travaux de R&D et des missions plus opérationnelles de mesures, d'expertise, d'intervention et de formation. Un spectre d'activités unique en France et probablement en Europe.



## PLATEFORME POUDR'INNOV 2.0

La plateforme développe et fabrique des composants à haute valeur ajoutée à partir de poudres métalliques, céramiques, semi-conductrices ou magnétiques dont les propriétés sont optimisées et dépassent parfois celles du matériau conventionnel. Marchés visés : énergie, connectique puissance, santé, chimie fine, etc. Elle compte une cinquantaine de collaborateurs. Procédés : injection, compression, frittage, fabrication additive, brasage, soudage-diffusion.



## PLATEFORME NANOCARACTÉRISATION

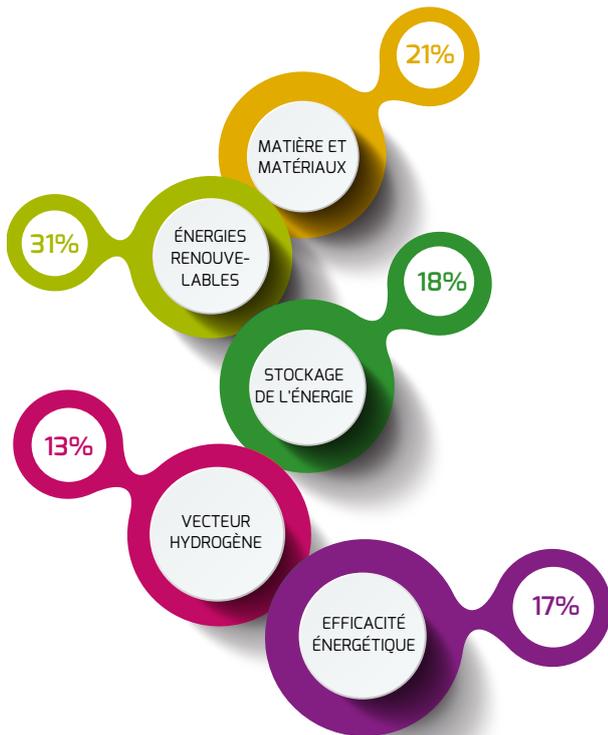
Pour élaborer matériaux et composants à l'échelle nanométrique, il faut connaître leur morphologie et leurs propriétés chimiques et physiques. C'est le rôle de cette plateforme qui compte une quarantaine d'équipements capables de scruter la matière en 2D ou 3D à une échelle proche de l'atome. Certains d'entre eux n'existent qu'à quelques exemplaires dans le monde. Elle collabore avec une vingtaine d'équipementiers et d'industriels.



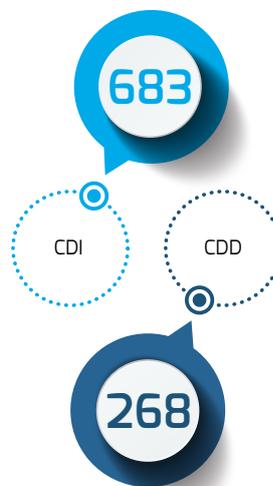
# CHIFFRES CLÉS

WWW-LITEN.CEA.FR

## EFFECTIF PROGRAMME R&D



## EFFECTIF DU LITEN

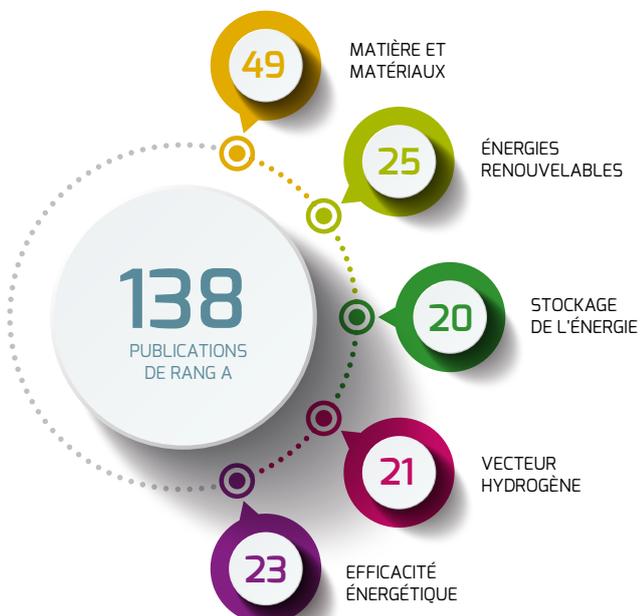


## RESSOURCES FINANCIÈRES

130 MILLIONS D'EUROS DE BUDGET



## RÉPARTITION DES PUBLICATIONS



## RÉPARTITION DU PORTEFEUILLE

