



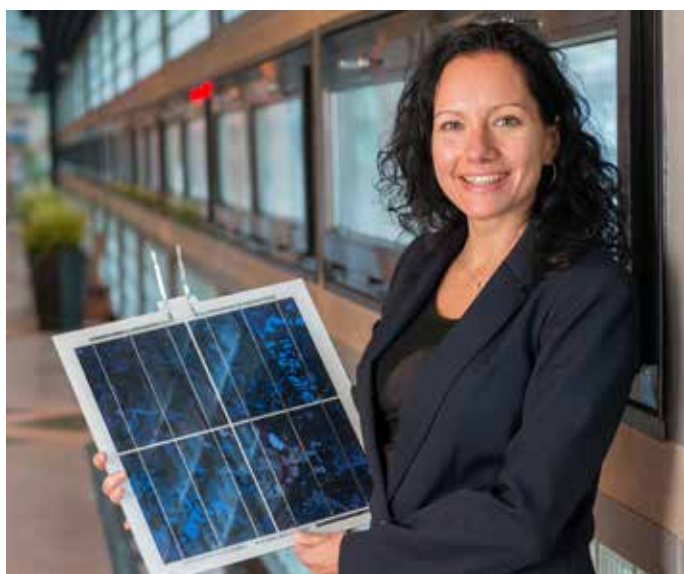
RAPPORT  
D'ACTIVITÉ  
2018





L'enjeu climatique fait l'objet d'une prise de conscience collective qui pousse les Etats à accentuer les politiques publiques encadrant la transition énergétique à l'image de la politique française. Celle-ci, révisée fin 2018, fixe des objectifs 2028 de 14 % de baisse de la consommation d'énergie par l'efficacité énergétique dans tous les secteurs et vise la neutralité carbone en 2050. Pour répondre à ces enjeux, l'effort doit porter en priorité sur l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau existant pour décarboner intégralement la production électrique et sur la sobriété énergétique dans l'habitat, le transport et l'industrie. L'usage croissant des sources intermittentes, la raréfaction des ressources naturelles et la problématique environnementale nous placent en face de verrous technologiques et économiques. Pour les lever, au Liten, nous portons une vision globale de l'ensemble des vecteurs électrique, thermique et gaz en termes de production, de stockage et de gestion, associée au développement de technologies en rupture comme la technologie PV à hétérojonction ou l'électrolyse haute température pour la production d'hydrogène décarboné. Cette approche combinée fait de nous des créateurs de solutions énergétiques, solutions que nos partenaires transforment en réalité industrielle et économique. Ce document illustre des réalisations marquantes de 2018 qui s'inscrivent dans notre ambition d'apporter les technologies nécessaires à un avenir durable. ■

**Florence Lambert,**  
Directrice du Liten



# SOMMAIRE



## LE LITEN

Créateur de solutions en réponse aux enjeux climatiques, énergétiques et environnementaux	4
Partenaire de recherche technologique de référence	6

## MATIÈRES ET MATÉRIAUX 8

Électronique imprimée	9
Fabrication additive	10
Procédés et composants	11
Recyclage	12

## ÉNERGIES RENOUVELABLES 13

Technologies photovoltaïques	14
Technologie hétérojonction	15
Modules photovoltaïques	16
Systèmes solaires	17

## STOCKAGE DE L'ÉNERGIE 18

L'avenir des batteries	19
Matériaux pour batterie	20
Modules et packs	21
Une approche sécuritaire	22

## VECTEUR HYDROGÈNE 23

Filière H <sub>2</sub>	24
Piles à combustible PEM	25
Electrolyse haute température	27

## EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE 28

Bâtiments	29
Power to X	30
Gestion de la chaleur	31
Réseau et numérique	32
Numérique au service de l'efficacité énergétique	33

## LES PLATEFORMES 34

## CHIFFRES CLÉS 36





# LE LITEN : CRÉATEUR DE SOLUTIONS CLIMATIQUES, ÉNERGÉTIQUES

Basé à Grenoble et Chambéry, au cœur de la première région française productrice d'énergie, le Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies Nouvelles et les nanomatériaux (Liten) est le premier institut européen entièrement dédié à la transition énergétique.

Fort de son positionnement au sein du CEA, le Liten est devenu en 15 ans un acteur majeur de la recherche technologique pour répondre aux enjeux de l'énergie, de l'environnement tout en soutenant la croissance économique.

Riches de cette expérience, nous sommes convaincus que la réussite de la transition énergétique reposera sur la convergence des énergies renouvelables, des réseaux intelligents et de l'efficacité énergétique globale. Dans cette perspective, notre stratégie de recherche est de développer des solutions pour accompagner nos partenaires et leur proposer des innovations afin de :

- Maîtriser la production d'énergie issue de sources renouvelables intermittentes
- Optimiser les réseaux énergétiques incluant différentes solutions de flexibilité par des outils numériques de dimensionnement et de pilotage
- Assurer la pertinence du bilan énergétique global

Pour atteindre cet objectif, l'institut s'appuie sur ses 13 plateformes technologiques, son portefeuille de plus de 1600 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 d'élaborer les produits, composants et procédés industriels du futur. □





# EN RÉPONSE AUX ENJEUX ET ENVIRONNEMENTAUX



## 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 élargie sur l'échelle de maturité. Les moyens complémentaires du label Carnot sont un véritable bras de levier depuis plus de 12 ans pour maintenir notre socle technologique et développer nos actions de ressourcement scientifique garantissant ainsi dans la durée le niveau d'innovation et d'exigence pour être un acteur majeur des énergies du futur. Pour en savoir plus [www.energiesdufutur.fr](http://www.energiesdufutur.fr) □

[www.liten.cea.fr](http://www.liten.cea.fr)



# LE LITEN, PARTENAIRE DE RECHERCHE



## ELISABETH AYRAULT, PDG DE CNR

« CNR a fait de l'innovation un axe stratégique majeur. Afin d'accélérer la transition vers un monde différent, nous nous appuyons sur les compétences de nos partenaires. Nous avons établi avec le Liten une collaboration importante, articulée autour de trois thèmes : piloter l'intermittence des énergies renouvelables, la réduire, et développer les énergies du futur. Par exemple, nous travaillons ensemble sur le démonstrateur industriel de Power-to-Gas «Jupiter 1000» à Fos-sur-Mer, avec l'ensemble des partenaires du projet, afin d'élaborer des systèmes pilotant l'injection de méthane de synthèse et la production d'hydrogène. Pour développer les énergies du futur, le Liten nous accompagne sur le développement du solaire linéaire, qui permettra de mieux exploiter les surfaces existantes comme les digues ou les voies de chemin de fer. Car soulignons-le, le Liten a cette particularité rare de travailler aussi bien sur des projets de grande envergure que sur projets plus modestes, fort de son socle de briques technologiques. » □



## LAETITIA BROTTIER, CO-FONDATRICE DE DUALSUN

« Notre collaboration avec le Liten a commencé il y a 4 ans sur le projet FUI Dualplas, dédié au développement d'un module hybride photovoltaïque et thermique (PVT). Souhaitant garder le leadership sur la technologie, nous avons consulté le Liten pour identifier la meilleure solution technologique. Fort de son expertise en solaire et en intégration de module, le laboratoire nous a aidés à choisir les meilleures options et à mener notre projet à bien. Très impliqués, ses chercheurs ont fait preuve de souplesse et de flexibilité, et ont été force de proposition tout au long du projet. Par la suite, le Liten nous a sollicités pour intégrer le consortium du projet H2020 SunHorizon dans lequel nous apportons aujourd'hui notre brique PVT innovante. Sans leur soutien, nous serions passés à côté de cette opportunité de travailler avec des chercheurs et industriels de différents pays européens. » □

## NOS DIFFÉRENTES OFFRES

### Contrat bilatéral :

Engagement sur un sujet clairement identifié, pour une durée définie. Possibilité d'y associer un programme collaboratif (ANR, FUI, Europe...)

### Programmes affiliés :

Programmes de recherche multi-partenaires, adaptés notamment aux PME. Démarches d'adhésion simplifiées.





# TECHNOLOGIQUE DE RÉFÉRENCE



## FRANCK ROGEZ, R&D MANAGER, ENTREPOSE

« Depuis 2015, Entrepose Group (filiale de Vinci Construction) travaille sur un procédé de stockage de l'hydrogène dans des cavités salines, afin de stocker de l'électricité en masse. A la faveur d'un partenariat établi en 2017 par VINCI Construction pour ses filiales, nous nous sommes rapprochés du Liten qui développait une pile à combustible réversible. C'est ainsi qu'est né ERMES, un projet de centrale solaire de grande puissance associée à du stockage en Afrique du nord. Notre expertise, associée à celle du Liten en électrolyse à haute température, ont permis de mener à bien une étude de faisabilité technique couplée à une analyse technico-économique. Différentes briques ont été comparées pour trouver le meilleur compromis et obtenir la meilleure efficacité et la meilleure pertinence économique possibles. Forts de ce succès, nous avons enchaîné sur une autre collaboration autour du power-to-liquid, qui vise à transformer du CO<sub>2</sub> en carburant de synthèse en utilisant l'électrolyse haute température alimentée par une électricité décarbonée. » □



## ERIC NOTTEZ, PDG DE LA SNAM\*

\*Société Nouvelle d'Affinage des Métaux

« Notre partenariat avec le Liten a démarré il y a plus de dix ans, alors que nous cherchions à améliorer les procédés de recyclage des batteries et à nous adapter aux évolutions des chimies des accumulateurs. Combinant des savoir-faire qui nous manquaient, notamment en sciences des matériaux, en électrochimie et en électronique, le laboratoire s'est illustré par sa capacité à nous apporter une réponse coordonnée. Avec succès : aujourd'hui, la SNAM détient 95% des parts de marché du recyclage de batteries de véhicules électriques. Peu à peu, les connaissances acquises grâce à ce partenariat nous ont permis d'ouvrir une nouvelle usine de fabrication de batteries neuves, issues à 80 % de composants recyclés. Parallèlement, nous avons finalisé un projet d'installation pilote pour la purification de sels métalliques grâce à un traitement hydrométallurgique mis au point en collaboration étroite avec le Liten. » □

## DE COLLABORATION

### Laboratoire commun :

Structuration d'une équipe commune Liten/ partenaire autour d'objectifs communs, de jalons techniques et d'un pilotage partagé.

### Transfert technologique :

Cession de licence sous certaines conditions, avec possibilité d'accompagnement technique sur une technologie brevetée.



## 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 pour répondre à des enjeux de soutenabilité (limitation des terres rares, substitution au 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.



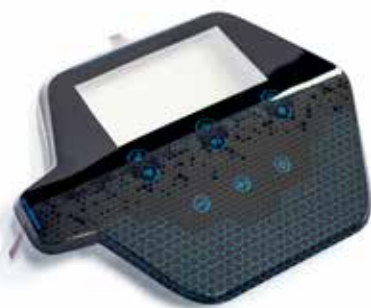
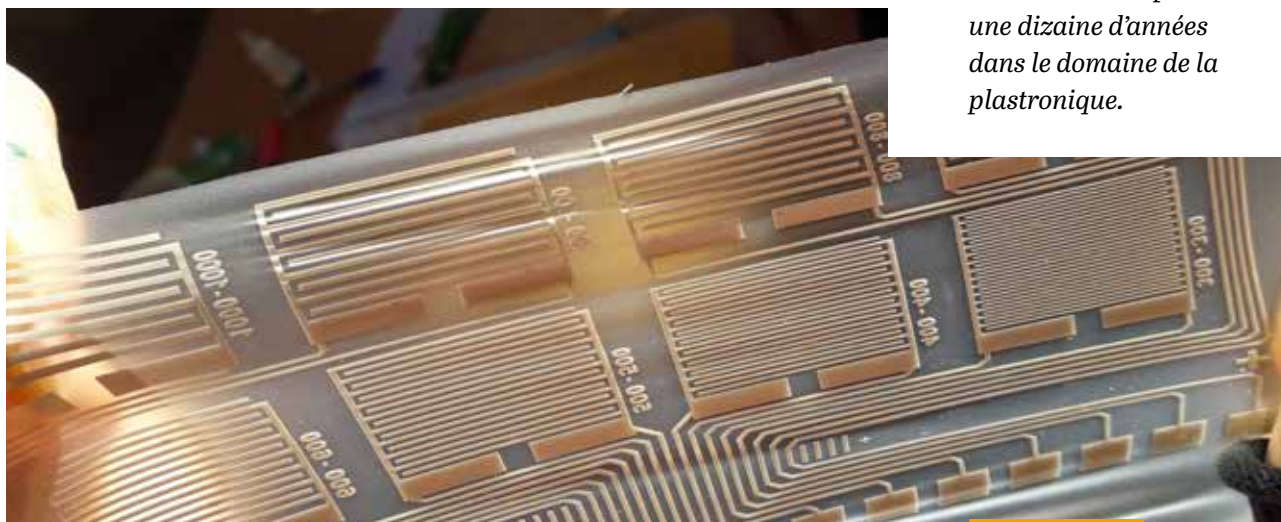


## L'ÉLECTRONIQUE STRUCTURELLE MET DE L'INTELLIGENCE AU CŒUR DE L'OBJET

Parce qu'elle permet de conjuguer esthétique, ergonomie et connectivité dans une même pièce, l'électronique structurelle permet de répondre à l'évolution de la demande des industriels. Faisant appel à des procédés d'assemblage complexes, elle associe des objets fonctionnalisés par impression de circuits et mis en forme par thermoformage, à des composants plus classiques issus de l'industrie du silicium. Cette

discipline transversale s'inscrit dans la suite logique des travaux que mène le Liten depuis une dizaine d'années dans le domaine de la plastronique, tout en évoluant vers de nouveaux substrats comme les textiles. Le laboratoire poursuit ses recherches pour améliorer les procédés d'assemblage. Il développe par exemple avec le Leti les moyens d'intégrer des puces de silicium amincies sur des substrats conformables. □

*Cette discipline transversale s'inscrit dans la suite logique des travaux que mène le Liten depuis une dizaine d'années dans le domaine de la plastronique.*



## QUAND L'ÉLECTRONIQUE S'INTÈGRE DANS LA STRUCTURE DES COMPOSANTS

Illustrant sa montée en compétences en électronique structurelle, le Liten a réalisé plusieurs démonstrateurs haptiques en partenariat avec la société SE2D dans le cadre du projet européen H2020 INSCOPE. Le premier est un *slider* incluant des composants capacitifs et des actuateurs. Imprimés par sérigraphie sur substrats flexibles sur la plateforme PICTIC, laminés sur des films de décoration, ils sont ensuite surmoulés par injection plastique. Destiné à être intégré à un tableau de bord, le dispositif est doté de LEDs pour assurer le rendu visuel. La collaboration avec SE2D se poursuit avec une montée en complexité sur le type de composants, comme des drivers de LED. Parallèlement, le laboratoire travaille sur des pièces intégrant de nouvelles fonctionnalités, comme des capteurs de pression et des systèmes capacitifs transparents. □



## RÉALISATION DE PIÈCES COMPLEXES EN CUIVRE PAR STÉRÉO-LITHOGRAPHIE



Le Liten a démontré la faisabilité de pièces en cuivre de formes complexes par fabrication additive de type stéréolithographie (SLA). Une pâte composée de poudre de cuivre (60% en volume) et d'une résine réticulable par exposition aux UV, a été formulée de manière à présenter un comportement rhéologique compatible avec le dispositif d'étalement. La pièce est fabriquée par dépôt de couches successives, avec une vitesse d'impression de l'ordre de 50 à 100  $\mu\text{m/s}$  avant d'être exposée aux UV pour obtenir la géométrie souhaitée. L'optimisation du cycle thermique de déliantage a permis d'éliminer de manière efficace la résine présente dans la pièce imprimée. Les objets ensuite consolidés par frittage naturel présentent une densité relative supérieure à 90% avec des teneurs en éléments légers très faibles, proches de celles de la poudre de cuivre initiale. □

## L'IMPRESSON 3D GAGNE DU TERRAIN AU SEIN DE POUDR'INNOV

**Rassemblés au sein de la plateforme Poudr'Innov 2.0, les procédés d'impression 3D du Liten comprennent un ensemble d'équipements de mise en forme de différents matériaux (polymères, céramiques, métaux, matériaux magnétiques, ...) par des approches directes ou indirectes.**

Les techniques de fabrication additive font l'objet d'un marché en pleine expansion. Le Liten a établi ses tout premiers partenariats en impression 3D avec 3DSystems et Prodways, et dispose aujourd'hui de trois machines de Fusion Laser sur lit de poudre (Laser Beam Melting). Il met actuellement en place une collaboration avec la société AddUp, leader français de l'impression 3D métal, auprès de qui il a réalisé un investissement important pour acquérir une quatrième machine de LBM. Cette dernière, investie dans le cadre du projet de Hub « FAMERGIE » soutenu par la Région Auvergne Rhône-Alpes et le FEDER, sera dédiée aux applications dans le domaine de l'énergie. Une technique de fabrication additive indirecte applicable aux matériaux céramiques et matériaux métalliques est également disponible sur la plateforme : il s'agit d'une machine Prodways de stéréolithographie (SLA) sur laquelle le Liten développe des composants métalliques.

Côté polymères, la plateforme dispose d'une machine Prodways permettant de travailler sur des matériaux avancés : polymères chargés, fibrés ou multimatériaux. De plus, le LITEN, fort d'un partenariat avec Hewlett Packard autour de l'équipement d'impression 3D polymères (MJF) de HP, met en place et co-anime un écosystème de partenaires industriels et académiques complémentaires autour des problématiques communes de l'impression 3D.

Le Liten participe également aux travaux menés sur la plateforme « Additive Factory Hub » du plateau de Saclay. □



## OBTENTION D'AIMANTS PERMANENTS EN NdFeB PAR LASER BEAM MELTING

Les performances des aimants à base de terres rares sont très fortement liées aux conditions d'élaboration, qui influent sur leur microstructure. Des aimants permanents isotropes en NdFeB de bonne qualité ont été fabriqués au Liten par impression 3D de type Laser Beam Melting (LBM). Un travail préalable d'ajustement des paramètres de fabrication (puissance du laser, vitesse de balayage, trajectoire du faisceau...) et d'analyse de la relation entre ceux-ci et les proprié-

tés magnétiques obtenues a été réalisé. Des pièces denses ont été élaborées par ce procédé de fusion tout en préservant la phase magnétique initiale. Les propriétés magnétiques des aimants obtenus sont comparables à celles de la poudre de départ. Des études sont en cours pour affiner les paramètres de la machine et améliorer encore ces résultats. L'impression 3D présente l'avantage de donner accès à des formes complexes, sans usinage et sans perte de matière. □





## FABRICATION D'AIMANTS PAR INJECTION PLASTIQUE DE TYPE PIM

Des aimants ont été produits directement à la forme souhaitée par un processus traditionnel d'injection plastique (Powder Injection Molding, PIM), en utilisant un moule innovant. Ce moule comprend des bobines produisant un champ au niveau des empreintes, de façon à aimanter la matière directement pendant l'injection. Les aimants

ainsi produits sont immédiatement utilisables dans un composant, sans nécessité d'étapes supplémentaires de ré-aimantation ni d'usinage. Ils ont été intégrés dans un dispositif de récupération d'énergie, dont le fonctionnement a été vérifié et validé dans une configuration où les aimants du commerce ont été remplacés par les aimants injectés. □

*Les aimants sont directement utilisables dans un composant, sans étapes supplémentaires de ré-aimantation ou d'usinage.*



## SYNTHÈSE DE NANOPARTICULES LUMINESCENTES À L'ÉCHELLE PRÉ-INDUSTRIELLE

Des particules luminescentes ont été synthétisées dans un réacteur de 20 litres au Liten. Développé à l'échelle laboratoire sur une centaine de ml de solution, le procédé de synthèse a été transposé sur un volume de 15 litres, permettant d'obtenir au final une centaine de grammes de nanocolloïdes luminescents. L'étape de purification, la plus délicate à cette échelle, a été réalisée en transférant le milieu réactionnel dans des membranes à dialyse. Réalisés dans le cadre d'un pro-

## NATALIO MINGO RÉCOMPENSÉ PAR UNE ÉTOILE DE L'EUROPE POUR LE PROJET ALMA



Natalio Mingo, chercheur au Liten et coordinateur du projet Alma, fait partie des douze scientifiques français récompensés pour leurs travaux par une « Etoile de l'Europe », dans le cadre du 5ème Forum Horizon 2020. Le projet Alma se penche sur le problème des échauffements pouvant survenir dans des structures nanométriques, lesquels ne sont pas prédictibles par les équations gouvernant les systèmes macroscopiques. Il a abouti au développement de AlmaBTE, le premier logiciel public de simulation d'échanges thermiques dans les systèmes multi-échelles, qui est utilisé comme outil pour la conception prédictive de matériaux micro et nanostructurés complexes. Les applications concernent l'électronique de puissance basée sur l'utilisation du GaN, et toutes les nouvelles technologies où le transport thermique est un problème clé. □

jet avec Sealock SARL, une PME Française située dans les Hauts de France, spécialisée dans la fabrication et la formulation de colles industrielles, ces travaux avaient pour but de marquer un premier batch de 20kg de produit à l'échelle pilote chez l'industriel. Invisible à l'œil nu, le code optique est décelable par un lecteur spécialement mis au point. Un prototype de fabrication de marqueurs à grande échelle est désormais accessible pour l'authentification de matériaux. □



## UN PROCÉDÉ D'EXTRACTION DES TERRES RARES CONTENUES DANS LES DÉCHETS SIDÉRURGIQUES

Un procédé d'extraction des terres rares contenues dans les co-produits issus de l'industrie sidérurgique (laitiers) a été mis au point dans le cadre du projet européen Reslag. Avec la société Seprosys, le Liten a développé un procédé continu de purification par chromatographie d'affinité en lit mobile simulé à l'échelle pilote. Ce procédé, fonctionnant en voie liquide, nécessite de réaliser au préalable une attaque acide de la matière à traiter

afin d'en extraire les éléments d'intérêt. Le lixiviat obtenu passe alors dans une résine échangeuse d'ions captant préférentiellement les éléments à valoriser. Testé avec un laitier provenant de la fusion de batteries NiMH, ce procédé a permis de récupérer un mélange (Nd, Ce, La) pur à 99,5%, avec un rendement de 94%. L'évaluation de l'intérêt économique du procédé est en cours, avant d'envisager un éventuel transfert industriel. □

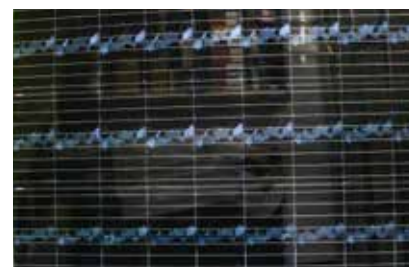
## UN PROCÉDÉ HYDROMÉTALLURGIQUE INNOVANT POUR LE RECYCLAGE DES BATTERIES

Spécialisée dans le recyclage des batteries et accumulateurs (Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion, alcalins salins), la SNAM s'est dotée d'une nouvelle unité de traitement hydrométallurgique suite aux travaux de recherche et développement du Liten. La masse active issue du pré-traitement des accumulateurs par thermolyse fait dans un premier temps l'objet d'une dissolution sélective des principaux éléments qu'elle contient. Ces derniers, en particulier le cobalt, le nickel et le manganèse, sont ensuite extraits un à un par des étapes de précipitation successives. Celles-ci permettent de récupérer la quasi-totalité des éléments contenus dans la *black mass*, et surtout, d'obtenir des produits dont le grade de pureté est compatible avec une valorisation dans l'industrie. □

*Les éléments chimiques sont récupérés dans la black mass avec un grade de pureté permettant une valorisation dans l'industrie.*



## UN PREMIER MODULE PHOTOVOLTAÏQUE ÉCO-CONÇU AVEC CELLULES ISSUES DU RECYCLAGE



Un premier module PV éco-conçu et issu du recyclage de déchets photovoltaïques a été réalisé au Liten. Composé de 60 cellules Al-BSF fabriquées à partir de 100% de silicium issu du recyclage de modules dans le cadre du projet H2020 CABRISS coordonné par le laboratoire, il affiche des performances comparables à celles classiquement observées pour cette technologie : à savoir une puissance de 252 Wc pour un ratio de performance « Cell-to-module » de 99%. Parallèlement, les matériaux les plus nocifs ont été remplacés par des produits plus respectueux de l'environnement, proposés dans le cadre du projet Ecolabel. Ainsi, le verre utilisé en face avant et arrière du module ne contient pas d'antimoine, le procédé de soudure mis en œuvre est garanti sans plomb, et le nouvel encapsulant thermoplastique utilisé pour l'assemblage se détruit facilement afin de faciliter les opérations de recyclage. □



## PRODUCTION DÉCARBONÉE D'ÉNERGIE SOLAIRE

Les activités « énergies renouvelables » portent sur le photovoltaïque et le solaire thermique. 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. Les travaux réalisés sur les équipements permettent d'accompagner des entreprises françaises à l'export.





## RÉALISATION D'UN PREMIER LINGOT MONOLIKE G8

Un premier lingot en silicium quasi monocristallin (Monolike) au format G8 a été réalisé sur l'équipement de solidification dirigée développé avec ECM-Greentech. Il présente des propriétés satisfaisantes en termes de taux de défauts, de compatibilité à la découpe diamant et de qualité cristalline pour le rendement PV. La compatibilité du four avec le procédé Crystalmax® par reprise

sur germes a également été validée. Le procédé va être optimisé pour améliorer la qualité des lingots et augmenter leur taille ; le premier pèse 1,2 tonne. De même, la qualité du Monolike G8 doit être validée aux différentes étapes de la chaîne de valeur : sciage diamant, rendement de conversion, vieillissement... Ces travaux sont menés dans le cadre du programme ADEME CrystalMega20. □



*Le silicium cristallise et le bore diffuse, sans apport d'hydrogène susceptible de provoquer des phénomènes de cloquage.*

## LE DOPAGE BORE DU POLYSILICIUM SANS DÉLAMINATION, C'EST POSSIBLE

La technologie de dopage Solenna du Liten a été employée pour le dopage bore d'une couche de polysilicium intégrée dans le contact passivé d'une cellule photovoltaïque. Elle consiste à déposer de l'oxyde dopé bore (SiON:B) par PECVD sur une couche de silicium amorphe, puis de soumettre l'empilement à un recuit. Le silicium cristallise et le bore diffuse, sans apport d'hydrogène susceptible de provoquer des phénomènes de cloquage. L'empilement est intègre et le procédé compatible d'épaisseurs supérieures. Le dopage est équivalent à celui réalisé par méthode conventionnelle. Le contact passivé alors obtenu offre un excellent potentiel de phototension, à 720 mV. Les travaux portent désormais sur sa validation dans des cellules, pour améliorer les contacts électriques. □

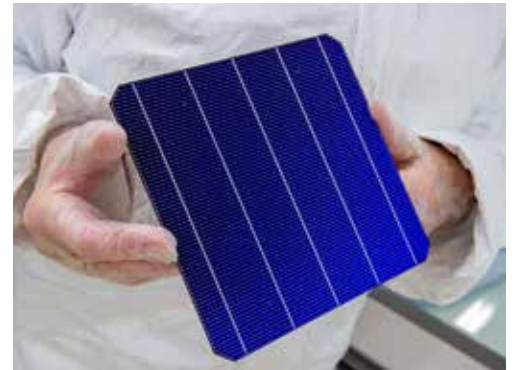




## EXCELLENTE PERFORMANCES POUR LES CELLULES HET À 5 BUSBARS

D'excellentes performances ont été obtenues avec Enel sur des modules de cellules à hétérojonction (HET) à 5 BusBars. Des avancées dans la fabrication des cellules permettent d'atteindre un rendement moyen de 23,1 %, avec un record à 23,3 %. L'intégration des cellules au module a été optimisée, avec des rubans d'interconnexion (strings) qui réduisent l'ombrage et augmentent l'intensité. De même, les matériaux

d'encapsulation retenus génèrent un gain optique et un gain en courant. Le ratio Cell to module est de 100 % pour la puissance et de 105,2 % pour le courant. Un module monofacial de 60 cellules a obtenu ainsi une puissance de 341 Wc, soit 409 Wc en équivalent 72 cellules. Quant au module bifacial, il atteint 388 Wc. Ces travaux se poursuivent pour parvenir aux 350 Wc en format 60 cellules. □



## 412 WC POUR UN MODULE PV, UN RECORD MONDIAL

Un module de 72 cellules hétérojonction à interconnexions filaires (SWCT) a été réalisé et mesuré à 412 Wc, soit 344 Wc en équivalent 60 cellules. Cette performance constitue un nouveau record mondial pour la technologie silicium. Les modules ont été fabriqués sur les équipements de Meyer-Burger, partenaire du projet, qui a depuis vendu une ligne de production de 600 MW exploitant cette technologie.

Tous les leviers d'optimisation ont été utilisés : couche nanocristalline en face avant des cellules, résistivité du substrat définie par modélisation/simulation, limitation des pertes résistives avec la SWCT, matériaux d'encapsulation spécifiques en faces avant et arrière, etc. De nouvelles améliorations sont en cours. Objectif : 500 Wc de puissance module en 2021. □

## 23 % DE RENDEMENT POUR LES CELLULES HET

Des cellules à hétérojonction de silicium de 15,6 x 15,6 cm<sup>2</sup> ont été certifiées à plus de 23 % de rendement de conversion par un laboratoire indépendant allemand. Elles ont été produites au CEA INES sur équipements Meyer-Burger de forte cadence (2400 cellules/heure). Les travaux ont permis d'améliorer notamment le dépôt par PECVD des couches nanométriques de silicium amorphe, et le dépôt de l'oxyde transparent conducteur. Une métallisation avec 6 bus-bars à lignes très fines (environ 50 microns) a été choisie, pour optimiser l'impact sur l'ombrage par rapport à la collecte des charges électriques. Les travaux se poursuivent pour industrialiser la technologie – coûts de fabrication, qualité, productivité – et porter le rendement cellule à 24 %. □



*Cette performance constitue un nouveau record mondial pour la technologie silicium.*





## DES DISPOSITIFS SOLAIRES PÉROVSKITES RÉALISÉS À L'ÉCHELLE DE MODULES

Des dispositifs photovoltaïques à base de matériaux pérovskites ont été réalisés sur des surfaces permettant le passage de cellules individuelles à des modules.

Les couches minces ont dans un premier temps été produites à l'échelle d'une cellule, puis le procédé a été étendu à l'échelle de mini-modules, jusqu'à obtenir des surfaces actives de 10 cm<sup>2</sup>.

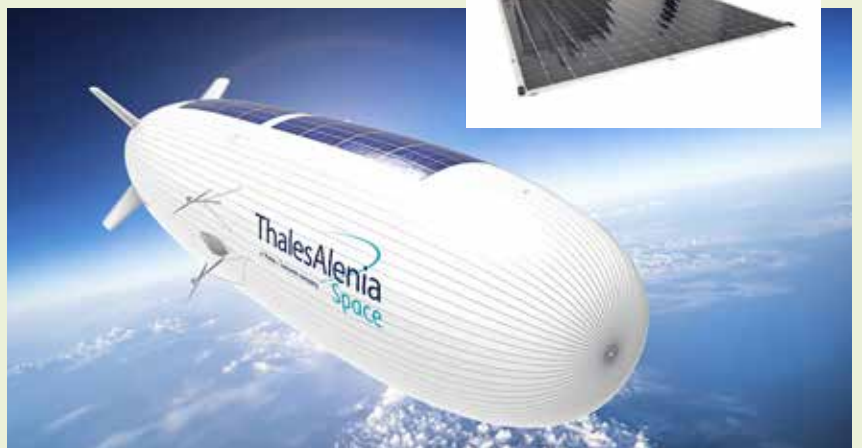
Le dispositif photovoltaïque ainsi obtenu affiche un rendement maximal de 16,9% et présente une surface active représentant plus de 93% de la surface totale du substrat. Cette performance a été rendue possible grâce notamment à la maîtrise du procédé de dépôt homogène sur ces surfaces et au développement des trois étapes de structuration laser pour la mise en série des cellules sans perte résistive. Le procédé utilisé est compatible avec le développement de cellules tandem basées sur la technologie hétérojonction développée au Liten pour des produits photovoltaïques à haut rendement. □

## PHOTOVOLTAÏQUE : VERS DES MODULES LÉGERS PERSONNALISÉS

**Depuis 2014, le Liten développe des modules photovoltaïques légers ou ultra légers pour répondre aux exigences de ses partenaires. Tandis qu'un module standard pèse environ 12 kg/m<sup>2</sup>, le laboratoire a réussi à réduire jusqu'à plus de dix fois ce chiffre en fonction de l'application visée.**

Des modules légers et rigides ont dans un premier temps été développés pour les projets Solight (pour PHOTOWATT) et Operasol (pour la société 2CA) dans le but d'être installés respectivement sur des toitures de bâtiments tertiaires (poids < 6 kg/m<sup>2</sup>) et sur des toiles de tentes militaires (poids < 4 kg/m<sup>2</sup>). La demande a par la suite concerné des objets volants, tels que le drone 100% solaire de la société Sunbirds et plus récemment le ballon Stratobus™ de Thales Alenia Space France (TAS-F), pour qui le Liten a développé un module affichant un poids inférieur à 800 g/m<sup>2</sup> et une puissance surfacique supérieure à 190 Wc/m<sup>2</sup> (STC).

Pour réduire le poids des modules, le verre de la face avant et le cadre en aluminium des modules standards ont été supprimés, et remplacés par des matériaux plus légers et éventuellement flexibles (films polymères minces, verre fin, matériaux composites...). L'épaisseur de l'encapsulant et celle des cellules elles-mêmes a également été revue à la baisse. Chaque module est non seulement conçu pour répondre aux besoins de l'application en termes de robustesse et de poids, mais aussi pour pouvoir être intégré dans l'objet : taille, épaisseur et même systèmes de fixation. □



## OPTIMISER LES ARCHITECTURES DE MODULES AVEC LA SIMULATION

Un outil de simulation de la puissance d'un module PV en fonction de son architecture (rubans ou fils, cellules entières ou demi-cellules) a été développé. Il intègre les pertes optiques (ombrage des métallisations, propriétés optiques des différentes couches constituant le module) et les pertes résistives

dans les interconnexions. Son utilisation repose également sur l'accès à une large base de données de caractérisations. Une simulation sur des modules de 72 cellules hétérojonction a montré par exemple qu'une architecture de 144 demi-cellules interconnectées par fil obtenait 4,4% de puissance maximale

de plus qu'une autre à 72 cellules interconnectées par rubans. Cet outil permet d'optimiser les rendements en limitant les tests expérimentaux. Son développement sera poursuivi, notamment pour intégrer de nouvelles architectures de type Shingle (tuilage). □





## 99,2 % DE RENDEMENT POUR L'ONDULEUR DE TENSION NPC



Des maquettes de convertisseur statique haut rendement de topologie Neutral Point Clamped (NPC) de plus de 100kW, à base de modules de puissance en carbure de silicium, ont été réalisées et évaluées. L'association entre cette topologie ancienne et ce nouveau matériau donne d'excellents résultats : 99,2 % de rendement crête, 30 kHz de fréquence de commutation optimale, convertisseur très compact. Ces caractéristiques, nettement supérieures à celles des onduleurs à composants silicium, répondent aux besoins de centrales photovoltaïques 700 à 1500 V connectées sur réseau industriel triphasé 230/400 V. Le convertisseur cible également les applications stockage connecté au réseau. La caractérisation des maquettes se poursuit afin de définir les spécifications d'un prototype, puis de pré-séries. □

## UN BANC DE TEST POUR REPRODUIRE L'ENCRASSEMENT DES MODULES

Un prototype de banc de test reproduisant les phénomènes d'encrassement des modules photovoltaïques a été développé et mis en service. Il permet de générer un flux contrôlé d'air sec chargé en salissures : poussières du sol, sels de mer, cendres volcaniques, suies, etc. Un dépôt homogène peut ainsi être effectué sur des maquettes de modules PV jusqu'à 40 cm x 40 cm, tout en ajustant l'hygrométrie et la température.

Ce banc simule le cycle naturel le plus fréquent d'encrassement des modules, capable de réduire la production de 50 % en zone aride et désertique. Sa mise au point se poursuit, en particulier pour les paramètres de température. A terme, il

permettra d'évaluer des couches de protection des modules et des méthodes de nettoyage, et de définir des protocoles de test à des fins de standardisation. □

***Le convertisseur sera installé sur deux sites de démonstration qui comptent chacun 20kWc de photovoltaïque intégré au bâtiment.***

## CONVERTISSEURS PV : ONDULEUR DE COURANT AU CARBURE DE SILICIUM



Une maquette pré-industrielle de convertisseur photovoltaïque de 5 kW basé sur une topologie d'onduleur de courant triphasé a été développée et brevetée dans le cadre d'un projet européen. Grâce à ses composants en carbure de silicium, elle atteint ainsi une fréquence de commutation élevée (150 kHz), avec un étage de conversion au lieu de deux. Autre spécificité, des cellules de commutation à base de transistors en « anti-série » qui limitent les pertes en conduction des diodes. Le rendement maximal est de 97,8 % et le coût des composants de 0,10 euro/Wc, pour une masse de 13 kg. En 2019, le convertisseur sera certifié par Bureau Veritas, fabriqué à huit exemplaires et installé sur deux sites de démonstration qui comptent chacun 20 kWc de photovoltaïque intégré au bâtiment. □

## 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.





## BATTERY 2030+ : FÉDÉRER LA RECHERCHE POUR SOUTENIR L'INDUSTRIE EUROPÉENNE DES BATTERIES

Afin de donner à l'Europe les moyens de faire face à la concurrence asiatique dans le domaine des batteries, la Commission Européenne a lancé dès 2018 un plan d'action stratégique de développement de la filière. Parallèlement à l'augmentation de la capacité de production européenne, il prévoit des actions de soutien à la recherche et l'innovation. Parmi ces actions figure le lancement d'un programme européen de recherche amont de grande ampleur, BATTERY 2030+.

Aux côtés de plusieurs partenaires, dont l'Université d'Uppsala, DTU, le CNRS, et les associations industrielles EMIRI, RECHARGE et EASE, le CEA-Liten et le CEA-Irig participent à la définition des axes prioritaires, ainsi qu'à l'élaboration

de la feuille de route sur 10 ans de BATTERY 2030+. Dans ce cadre, une première série d'appels à projets de recherche est lancée en juillet 2019 par la Commission Européenne. Parmi les technologies en rupture soutenues par

le programme figurent les plateformes de découverte haut débit de nouveaux matériaux et l'intégration de fonctionnalités intelligentes (capteurs et auto-réparation) au cœur des cellules de batteries.



## UN ÉQUIPEMENT PILOTE DE LAMINAGE DU LITHIUM MÉTAL

A l'étude depuis des années au Liten, la chimie lithium métal est l'une des solutions les plus prometteuses pour les batteries post lithium-ion. Dans le cadre du projet européen ALIM, le laboratoire a contribué à mettre

au point un laminoir pilote destiné à réduire de moitié l'épaisseur de la couche de lithium métal, actuellement de 50 microns, afin d'augmenter la quantité d'énergie embarquée dans un même volume. Un laminoir flexible dont les rouleaux sont constitués de matériaux choisis de façon à écraser le lithium sans qu'il ne colle a été mis au point. Installé en salle anhydre au Liten, cet équipement sera mis à profit dans la suite du projet pour affiner le processus de laminage et définir les paramètres clés (diamètre des rouleaux, vitesse, tension, lubrification...) afin de lever un des verrous technologiques nécessaire pour la mise au point de la future batterie tout solide.





## LA PRÉLITHIATION DOPE LA DURÉE DE VIE DES ACCUMULATEURS

Un procédé de pré lithiation a été développé pour augmenter la teneur en silicium de l'électrode négative de cellules 0,5 Ah au format 5x40x70mm. Les électrodes obtenues contiennent 15 % de silicium. Les cellules enregistrent des performances en cyclabilité supérieures à l'état de l'art. Elles perdent 0,001 % de capacité par cycle à 70 % de profondeur de décharge et 0,01 % par cycle à 100 %. Elles pourraient donc approcher voire atteindre les 2000 cycles exigés pour les applications véhicule électrique. Des cellules 1 Ah ont donné des résultats similaires. Le procédé, qui a été breveté, permet de surmonter les difficultés propres à la manipulation du lithium métal et se prête à une industrialisation. Prochain objectif des chercheurs : l'optimisation du taux de pré lithiation. □

## ESTOR PASSE AU CRIBLE LES PERFORMANCES DES CELLULES LI-ION

Spécifications fabricant, essais de performance initiale, de vieillissement, de stabilité thermique... La base de données Liten «Estor» dispose de données complètes sur de multiples dispositifs de stockage d'énergie, en particulier sur quelques 200 cellules Li-ion de technologie LFP, NMC, LCO, etc. Tous les essais sont réalisés selon des protocoles standardisés pour permettre des comparaisons fiables. De plus, Estor s'enrichit de 20 à 30 références par an. Elle intègre des prototypes CEA ou des cellules du marché sélectionnées pour couvrir un large panel de fabricants, de chimies et de sites de production. Cette base de données n'a aucun équivalent connu. Elle est utilisée dans le cadre de collaborations industrielles, afin d'orienter les partenaires vers des cellules parfaitement adaptées à leur application. □

## VERS DES ÉLECTROLYTES HYBRIDES POLYMÈRES ET SOLIDES

Les travaux sur des chimies d'électrolytes innovantes ont connu une nette accélération en 2018. Un électrolyte hybride polymère est à l'étude dans le cadre d'une collaboration pluriannuelle avec Solvay. Quatre thèses sont en cours sur des électrolytes solides de type polymères ou oxydes. Un nouvel électrolyte polymère a été breveté. Les électrolytes hybrides polymères ou solides devraient améliorer la sécurité des batteries et rehausser fortement leurs performances en densité d'énergie. Les travaux portent sur leur synthèse et leurs caractérisations, dont certaines sont réalisées à l'ESRF ou à l'ILL. Jusqu'à présent, l'objectif consistait essentiellement à comprendre le comportement de ces nouvelles chimies, notamment pendant les processus de charge/décharge. Désormais, il va également être question de réaliser des prototypes fonctionnels. □



*Les travaux sur des chimies d'électrolytes innovantes ont connu une nette accélération en 2018.*





## QUAND LES BATTERIES S'ENVOLENT

Des avancées marquantes ont été réalisées pour trois développements d'aéronefs 100 % électriques menés par Airbus. Le Liten a fourni en co-développement avec Airbus DS une batterie Li-ion de 1 kWh pour le projet Skyway de drone de livraison de colis en zone urbaine, dont le premier vol a eu lieu à Singapour, et deux packs batteries totalisant 38 kWh pour le taxi volant une place Vahana testé pour la première fois en Californie. Enfin, les batteries de 115

kWh de CityAirbus, un taxi volant de 4 places pour zones aéroportuaires, ont été livrées. Le poids et la sécurité sont des contraintes majeures pour ces trois projets. Les batteries livrées sont à l'état de l'art en terme de densité d'énergie avec une accréditation pour voler : 160 Wh/kg pour Vahana, 170 Wh/kg pour CityAirbus. Pour ce dernier, un refroidissement liquide permet une charge au sol plus rapide. □



## COMMENT DIMENSIONNER UNE BATTERIE HYBRIDE PUISSANCE/ÉNERGIE ?

Le dimensionnement d'un pack de deux batteries Li-ion hybridées, dédiées respectivement à des usages puissance et énergie, a été réalisé en combinant trois outils de simulation développés en interne Liten. Le premier réalise l'optimisation multicritères puissance/énergie. Le deuxième se penche sur le dimensionnement série/parallèle en fonction des contraintes de tension. Le dernier évalue le vieillissement calendaire et en cyclage de la batterie. Cette démarche innovante a mis en évidence plusieurs couples de batteries dont le vieillissement est infé-

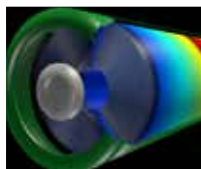
rieur à celui de la batterie de référence. Des stratégies d'usage optimales ont également été identifiées, notamment pour les recharges. □

*Le dimensionnement a été réalisé en combinant trois outils de simulation développés en interne Liten.*

## SIGMA CELLS, UN STOCKAGE D'ÉNERGIE NOMADE ET RECONFIGURABLE



Un démonstrateur de stockage d'énergie à architecture reconfigurable a été réalisé et validé avec le CEA-Leti sur un cas d'usage, la recharge sur tension secteur et l'alimentation d'une cafetière de 1 kW. Le système comprend une carte de contrôle et 32 modules reconfigurables de 4 cellules 18650 du commerce. Il ajuste en temps réel la topologie de la batterie pour délivrer tout type de tension dont le 230 V - 50 Hz, sans onduleur ni convertisseur. Les cellules sont indépendantes. Leur gestion est dynamique : le système les permute pour assurer une utilisation optimale, d'où une autonomie et une durée de vie accrue. Il peut générer directement le signal de commande d'un moteur et fonctionner avec des cellules hétéroclites (seconde vie, multi chimies...). Cette technologie baptisée Sigma Cells est protégée par 15 brevets. □

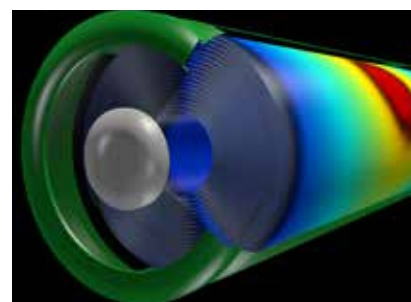


## TRANSPORT DES BATTERIES LI-ION : LA SURDÉCHARGE EST-ELLE LA SOLUTION ?

Quatre technologies de batteries ont été soumises à des surdécharges répétées afin d'évaluer l'impact sur leurs performances. En effet, la mise à 0V est envisagée pour réduire le risque électrique lors du transport et ainsi s'affranchir de contraintes imposées par la réglementation. Les essais ont montré que le Li-ion avec collecteur négatif en cuivre perdait toute capacité, parfois après seulement 150h à 0V. A l'inverse, la capacité de cel-

lules avec collecteur en aluminium (LFP/LTO et Na-ion) est très faiblement impactée par la mise à 0V. Toutefois, l'impact sur le Na-ion n'est pas négligeable. Les matériaux actifs de cette technologie peuvent donc être dégradés par la mise à 0V, contrairement à ce qui était attendu par la communauté scientifique. Une étude des mécanismes de dégradation des matériaux actifs du Na-ion est donc envisagée très rapidement. □

## L'EMBALLLEMENT THERMIQUE DES BATTERIES LI-ION MODÉLISÉ



Le Liten a développé un outil permettant de simuler les réactions d'ignition survenant dans certaines conditions et pouvant conduire à l'emballlement thermique des batteries Li-ion, principale cause des incidents liés à ces accumulateurs. Des essais expérimentaux par chauffage de cellules dans des enceintes adiabatiques ont permis d'identifier les paramètres de la cinétique de réaction globale d'emballlement thermique de la cellule batterie. Le modèle a ensuite été construit et résolu sur des modèles 3D de cellules en utilisant ces données, et implémenté sur le logiciel Comsol Multiphysics. A partir de l'impédance caractéristique d'un court-circuit interne, il permet de reproduire la signature de l'emballlement thermique susceptible de s'ensuivre. Validé en partie jusqu'à 150-200°C environ, il a été intégré à la plateforme de modélisation multiphysique MUSES. □

## SÉCURITÉ DES BATTERIES LI-ION : UN AXE DE RECHERCHE STRATÉGIQUE

**Outre la densité d'énergie et la durabilité, le Liten cherche à améliorer le niveau de sécurité des batteries Li-ion.**

Les chercheurs ont encore beaucoup à comprendre car la physique des batteries est complexe, avec de nombreux phénomènes couplés et pluridisciplinaires. En partenariat avec SERMA Technologies, le Liten s'est doté d'une plateforme expérimentale dédiée aux essais abusifs. Plus d'une centaine d'essais y sont réalisés par an pour qualifier, étudier ou modifier les batteries soumises à des sollicitations extrêmes : surchauffes, courts-circuits, perçages, écrasements... Elles sont ensuite expertisées, pour identifier la séquence des événements dégradants et les mécanismes impliqués. Le Liten teste des cellules jusqu'à 1 kWh, à proximité des équipes de conception et de simulation du fonctionnement des batteries. Les objets d'une énergie supérieure sont testés au centre DAM\* du Ripault.

Des travaux de modélisation/simulation multi-échelles (matériau, électrode, cellule, pack) et multi-physiques (thermique, électrique, électrochimique, mécanique) sont conduits pour déterminer les paramètres critiques à prendre

en compte dans l'analyse du comportement des batteries. Combinée avec des analyses de sûreté inspirées du domaine nucléaire, cette approche aboutit à des règles de conception optimisées en terme de performance, durabilité, sûreté et coût. Une dizaine de brevets ont été déposés grâce à ces travaux. □



*Le Liten s'est doté d'une plateforme expérimentale dédiée aux essais abusifs.*

\* Direction des Applications Militaires du CEA





## 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 plus performantes, moins coûteuses, et sur des systèmes hybrides batteries - pile à combustible optimisés capables de s'auto-réguler.

L'hydrogène est également étudié en tant que solution de flexibilité pour un réseau électrique intégrant un taux élevé de sources renouvelables. Les solutions Power to Gas performantes développées au Liten associent production d'hydrogène par électrolyse haute température à fort rendement et sa valorisation soit par fourniture directe à l'industrie soit en le transformant en méthane de synthèse par une réaction catalytique avec du  $\text{CO}_2$ .



## LA FILIÈRE HYDROGÈNE SE STRUCTURE

**Alors que politiques et industriels redoublent d'intérêt pour le vecteur hydrogène, le Liten se positionne comme un acteur majeur de la filière.**

Annoncé par Nicolas Hulot en 2018, le plan Hydrogène du gouvernement a été repris dans la programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) publiée fin 2018. Il confirme l'importance du vecteur hydrogène dans la transition énergétique, et œuvre pour une structuration de la filière. Côté mobilité, les piles à combustible (PAC) sont déjà dé-

ployées dans des flottes captives. La prochaine étape étend le déploiement vers le transport collectif de personnes par bus ou navette maritime, la livraison du dernier kilomètre en ville, ou l'usage dans des poids lourds. Les industriels de l'aéronautique et du ferroviaire commencent eux aussi à se manifester. Pour répondre à ces nouveaux besoins, le

Liten poursuit ses travaux de recherche en adaptant les PEM aux cahiers des charges spécifiques de ces applications. Toutes nécessitent des efforts de R&D soutenus autour de l'amélioration des performances et de la durabilité des piles, ainsi que sur la baisse de leurs coûts. Parallèlement, des efforts sont faits pour porter la technologie de production d'hydrogène par électrolyse haute température de la vapeur d'eau dans sa phase d'industrialisation. La feuille de route du Liten prévoit de faire passer la maîtrise de cette technologie de l'échelle de la dizaine de kW à 300 kW d'ici 3 ans. Différents démonstrateurs sont prévus pour démontrer le potentiel de cette technologie pour produire de l'hydrogène décarboné à coût compétitif pour le secteur industriel, pour la mobilité hydrogène et comme solution de stockage/flexibilité par rapport au réseau électrique. □



*Le Liten et SAFRAN ont créé une source d'énergie hybride portable associant une PAC et une petite batterie lithium-ion.*

## DES CARTOUCHES D'HYDROGÈNE À HAUT RENDEMENT ET RÉUTILISABLES

Le Liten et SAFRAN ont créé une source d'énergie hybride portable associant une PAC\* et une petite batterie lithium-ion. Elle propose une puissance de 10 à 30W, un fonctionnement de -20°C à 44°C, une autonomie de 72 heures et une masse divisée par deux par rapport à la solution batterie unique. La suite du projet a consisté à améliorer la chimie relative à l'hydrolyse du borohydrure de sodium, qui permet de libérer l'hydrogène à la demande. En jouant sur la

formulation des borohydrures et en optimisant le système catalytique, le rendement en H<sub>2</sub> est passé de 3 à 4%. Un nouveau concept de cartouche réutilisable et non plus jetable a en outre été développé, pour laquelle l'électronique de la source d'énergie utilisée pilote la libération d'hydrogène. En parallèle, le laboratoire mène des travaux sur de nouveaux matériaux permettant d'atteindre par thermolyse des rendements de 10 % massique en hydrogène. □

\*Pile à combustible





## TEST DE DURABILITÉ DES AME FAIBLEMENT CHARGÉS EN PLATINE

La réduction de la quantité de catalyseur est nécessaire pour réduire la dépendance au platine de la technologie PEMFC, impliquant des couches très fines ( $< 5 \mu\text{m}$ ) et l'utilisation de composants de plus en plus fins. Les couches actives doivent donc être homogènes et sans agglomérats pour ne pas nuire à la durabilité de fonctionnement. Le LITEN a travaillé sur la formulation des encres de couches actives : la modification de l'insertion et de la dispersion des

composants a permis de réduire leur granulométrie. Des AME, de géométrie représentative d'un stack de puissance ( $160 \text{ cm}^2$ ) ont été fabriqués et ont fourni des performances de  $1 \text{ W/cm}^2$  en conditions automobiles européennes avec  $0,25 \text{ mg}_{\text{Pt}}/\text{cm}^2$  au total. Bien que plus de 1000 h aient été réalisées en monocellule  $25 \text{ cm}^2$ , l'amélioration de la durabilité dans ces faibles gammes de chargement reste un challenge technologique et scientifique. □

## ETUDE DE L'IMPACT DES POLLUANTS DE L'HYDROGÈNE SUR LES PAC

Les effets de la présence de divers polluants dans l'hydrogène sur les performances et la durée de vie des piles à combustible (PAC) ont été étudiés afin de trouver le meilleur compromis coût/performances. Les polluants sélectionnés ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCl}$  et  $\text{C}_4\text{Cl}_4\text{F}_6$ ) ont été introduits volontairement dans de l' $\text{H}_2$  pur en quantités infimes. Les mesures de performances des PAC ainsi alimentées ont été menées sur des bancs adaptés

spécialement. L'influence sur la durée de vie des PAC est mesurée par extrapolation des résultats obtenus après 900 heures de test. Enfin, des analyses post-mortem réalisées sur les AME ont permis d'étudier l'impact des différents polluants sur les mécanismes de dégradation des matériaux. Les résultats obtenus ont été pris en compte pour définir des normes sur les quantités d'impuretés acceptables dans l'hydrogène. □



## OPTIMISER LA FABRICATION ET LA DURABILITÉ DES PLAQUES BIPOLAIRES DES PEMFC POUR RÉDUIRE LES COÛTS



La commercialisation des piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) passe par la réduction de leur coût et l'allongement de leur durée de vie. Dans le cadre du projet européen COBRA, de nouveaux revêtements de plaque ont été testés pour remplacer le dépôt d'or utilisé afin d'assurer la bonne conduction des électrons et la résistance à la corrosion. C'est le matériau MaxPhase®, un revêtement à bas coût commercialisé par IMPACT COATINGS, qui a finalement été sélectionné parmi plusieurs candidats. Parallèlement, les procédés de fabrication des plaques ont été revus : l'hydroformage et l'optimisation des découpes permettent de réduire le coût de production. Ces innovations ont été validées à l'échelle de la plaque réelle, puis dans un prototype de pile de 5 kW qui a servi à équiper un véhicule. □



## UN DÉMONSTRATEUR DE CONVERTISSEUR DE PUISSANCE INNOVANT

Dans le cadre du projet européen 3CCAR, le Liten a conçu, simulé, fabriqué et testé un convertisseur d'énergie intégré à une pile. D'une puissance comprise entre 10 et 15 kW et destiné à conditionner l'énergie produite par la pile pour la stocker dans une batterie, il a été conçu de façon à être posé au-dessus de la pile afin que le liquide de refroidissement de cette dernière circule également dans le convertisseur. En effet, les transistors de puissance produisent de la chaleur et doivent être refroidis, en général par un ventilateur d'air séparé. L'intégration poussée de ce démonstrateur s'est traduite par une réduction de l'encombrement et de la consommation d'énergie globale. Autre nouveauté : le système de pilotage des transistors de puissance est numérique plutôt qu'analogique, pour une meilleure précision de commutation. □



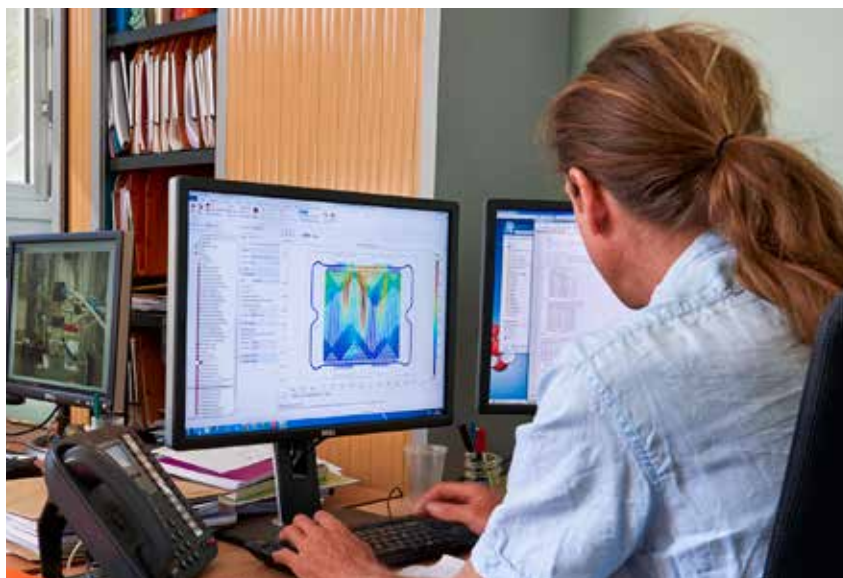
## DES PILES À COMBUSTIBLE MODULAIRES POUR LES FAIBLES PUISSANCES

Un financement Carnot a été attribué au développement d'une pile à combustible de puissance nominale comprise entre 100 W et 1000 W pour des applications mobiles, principalement dans le domaine aéronautique. Le concept retenu consiste en une pile modulaire composée d'un nombre variable de stacks (entre 1 et 12) eux-mêmes composés d'un nombre variable de cellules (typiquement entre 10 et 30), enserrés entre 2 plaques terminales. Cette architecture est modulaire électriquement (connexion en série et/ou parallèle des stacks pour atteindre le niveau de tension requis) et géométriquement (ratio hauteur/largeur de pile au choix). Un design innovant de plaque bipolaire en tôle emboutie de faible surface active (16 cm<sup>2</sup> au lieu de 100 au minimum précédemment) a été conçu et validé par la simulation fluide. Des tests expérimentaux sur mono-cellule sont en cours pour valider expérimentalement les performances. □

## UN MODÈLE PSEUDO 3D D'ASSEMBLAGE PLAQUE BIPOLAIRE – AME POUR VALIDER ES NOUVEAUX DESIGNS DE CELLULES

Le Liten a développé un modèle de simulation de cellule visant à anticiper l'influence des nouveaux designs de plaques bipolaires sur les performances des piles à combustible. Il permet de modéliser les couplages thermique, fluide et électrochimique entre l'assemblage membrane/électrode (AME) et les écoulements liquides et gazeux dans les canaux de la plaque bipolaire. Plutôt que de représenter explicitement la géométrie de l'ensemble en 3D, ce qui

serait extrêmement coûteux en temps de calcul, l'approche a consisté à traiter la cellule comme un empilement de couches dont chacune est simulée en 2D. Intégré à la plateforme MUSES, ce modèle a été utilisé sur de nouveaux designs dans le cadre d'un projet avec un industriel. Les simulations du fonctionnement d'une cellule ont montré un fonctionnement non uniforme de l'AME, et de nouvelles conditions opératoires ont été proposées. □





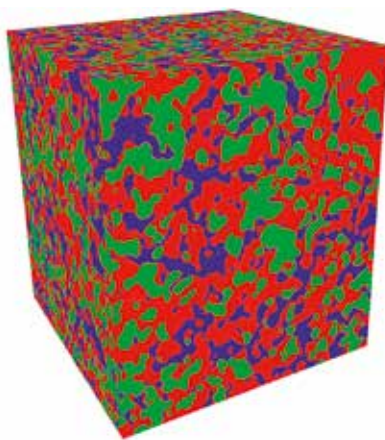


## GÉNÉRATION DE MICROSTRUCTURES VIRTUELLES REPRÉSENTATIVES DES ÉLECTRODES DE CELLULES À OXYDES SOLIDES

Les piles à combustible à oxydes solides (SOC) présentent des électrodes poreuses dont les propriétés doivent être finement caractérisées pour une meilleure compréhension des performances et des mécanismes de dégradation. Une méthode numérique reposant sur des modèles stochastiques 3D a été mise au point par le Liten afin de reconstruire virtuellement la microstructure tridimensionnelle d'une électrode de cellule SOC. La comparaison de cette microstructure théorique avec celle élaborée par

reconstruction d'images obtenues par nanotomographie aux rayons X (synchrotron) sur des électrodes commerciales montre que la méthode génère des microstructures de référence très représentatives de la réalité. Partant de ces simulations, la microstructure peut ensuite être optimisée en faisant évoluer différents paramètres et en vérifiant l'impact des modifications sur les performances grâce à des modèles électrochimiques. □

*La méthode permet de reconstruire virtuellement la microstructure 3D d'une électrode.*



## LE SMART ENERGY HUB DE SYLFEN TESTÉ AVEC SUCCÈS

Sylfen et le Liten ont annoncé avoir conçu, assemblé et testé avec succès le premier démonstrateur fonctionnel du Smart Energy Hub de Sylfen. Intégrant la technologie réversible r-SOC du CEA, il est capable en mode électrolyseur de produire de l'hydrogène et de le réutiliser en mode pile à combustible pour produire de l'électricité. Relié aux réseaux conventionnels (eau, gaz, électricité ..), ce système fonctionne désormais dans des conditions

normales d'utilisation hors laboratoire. Le démonstrateur intègre un stockage d'hydrogène, une hybridation avec des batteries et permet également de produire de l'eau chaude sanitaire par cogénération. Il peut ainsi assurer l'approvisionnement énergétique des bâtiments et des éco-quartiers à partir de sources de production locales et renouvelables. Il fonctionne de manière entièrement automatisée et est géré via un logiciel embarqué. □

## UN ATELIER PILOTE DE FABRICATION DE STACKS RÉVERSIBLES SOEC/SOFC



Pour les besoins des programmes de R&D et des démonstrateurs réversibles SOEC/SOFC du CEA et de ses partenaires, le nombre de stacks à produire augmente sensiblement. C'est pourquoi le Liten a mis en place un atelier pilote pour la fabrication de ces stacks. Il regroupe dans un même lieu une dizaine d'équipements dédiés aux différentes opérations de fabrication et d'assemblage des composants du stack (opérations chimiques, mécaniques, contrôle...). Ces machines répondent à la fois à des contraintes industrielles de reproductibilité et de cadence, et d'évolutivité pour s'adapter aux besoins de R&D et à la réalisation de nouveaux designs de stacks. Il permettra, à terme, de faire passer la cadence actuelle de fabrication d'un stack par mois à deux par semaine. □

# 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 performance énergétique; 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. La flexibilité apportée par le couplage des vecteurs électricité, gaz et chaleur est également étudiée. Des travaux sur la valorisation du CO<sub>2</sub> par différents mécanismes d'hydrogénation complètent le panorama.





## COMEPOS PRÉPARE LA MAISON À ÉNERGIE POSITIVE DE DEMAIN

Une vingtaine de maisons à énergie positive ont été conçues dans le cadre du projet COMEPOS de l'ADEME, coordonné par le Liten. Les prototypes, répartis sur le territoire national, sont suivis pendant deux ans grâce à un protocole de monitoring associant pilotage des installations, mesures et récupération des données. Ceci permet de tester leur impact énergétique et leur empreinte carbone. L'enjeu est d'évaluer en situation réelle les performances de ces habitats afin d'optimiser les modèles les décrivant et de proposer des améliorations. Le bilan énergétique sur l'année est globalement positif grâce à l'association d'enveloppes performantes et d'équipements techniques appropriés, et à l'intégration de systèmes photovoltaïques parfois associés à du stockage. L'ensemble est piloté pour développer le concept novateur de bâtiment intuitif 0-énergie, garantissant notamment le confort thermique et la qualité d'air intérieur. □



## SUIVI DE CHAUFFE-EAU THERMODYNAMIQUE HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE THERMIQUE

Dans le cadre d'une étude comparative des performances saisonnières de solutions innovantes pour la production d'eau chaude sanitaire, le Liten a accompagné EDILIANS dans la mise en œuvre d'un prototype de chauffe-eau solaire thermodynamique, innovant par son capteur hybride photovoltaïque thermique (PVT) couplé à un évaporateur. Ce chauffe-eau est constitué d'une pompe à chaleur récupérant non seulement la chaleur de l'air extérieur, mais également celle produite grâce

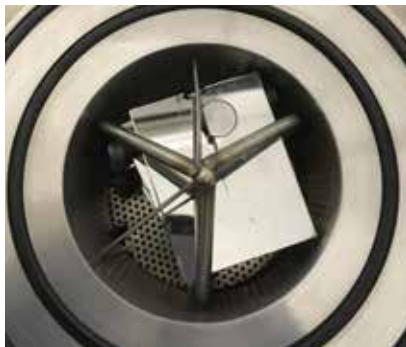
au rayonnement solaire sur les panneaux photovoltaïques au niveau de la toiture. Les essais ont mis en évidence que le modèle hybride, développé par la filiale d'Imerys Toiture, présente les meilleures performances des quatre solutions testées en termes de production d'eau chaude sanitaire comparée à l'énergie primaire consommée. Le PVT pourrait, à terme, être mis en œuvre dans le cadre du déploiement du photovoltaïque intégré au bâtiment (BIPV). □

*Le prototype de chauffe eau est innovant par son capteur hybride photovoltaïque thermique couplé à un évaporateur.*





## EFFETS DE L'HYDROGÈNE SUR LES CANALISATIONS DE TRANSPORT DE GAZ SOUS PRESSION



Afin de quantifier les effets de l'injection d'hydrogène dans le réseau de transport de gaz naturel (GN) sur les matériaux constituant les canalisations, le Liten procède à des essais sur divers alliages métalliques fournis par GRTgaz. La propagation de fissure de fatigue et la ténacité de trois aciers représentatifs des réseaux sont ainsi étudiées en autoclave sous 85 bar de mélanges de gaz (GN/ H<sub>2</sub>) contenant 2%, 25% et 100% de H<sub>2</sub>. Il apparaît que l'énergie nécessaire à la propagation de la fissure diminue avec l'augmentation de la teneur en hydrogène. Les données issues de ces expérimentations permettront à GRTgaz de déterminer les teneurs en H<sub>2</sub> admissibles dans le réseau de transport de gaz afin d'en garantir la sécurité. Des éprouvettes spécifiques seront testées en conditions réelles de composition de gaz dans le réseau du démonstrateur Jupiter 1000. En parallèle, les mécanismes de fragilisation des aciers par l'hydrogène sont étudiés dans le cadre d'une thèse. □

## MISE EN ROUTE DU PREMIER DÉMONSTRATEUR DE POWER-TO-GAS ISSU D'UNE TECHNOLOGIE CEA EN POLOGNE

Le tout premier démonstrateur de production de gaz de synthèse a été mis en service en septembre 2018 chez Tauron, énergéticien polonais. Tout comme Jupiter 1000, autre projet de démonstrateur de power-to-gas d'envergure à Fos-sur-Mer, il repose sur une technologie de réacteur compact à plaque millistructurée développée par le Liten. Conçus à l'aide de modèles développés et validés expérimentalement au laboratoire, les

réacteurs de méthanation, qui convertissent l'hydrogène et le CO<sub>2</sub> en gaz naturel de synthèse, ont été fabriqués par Atmosstat selon un procédé de compaction isostatique à chaud. Spécialement développés pour ce démonstrateur et de la taille d'une grande valise, ils peuvent être assemblés pour obtenir la puissance souhaitée. Les tests de performances montrent un taux de conversion du carbone supérieur à 97%. □



*Les tests de performance montrent un taux de conversion du carbone supérieur à 97%.*

## GAZÉIFICATION HYDROTHERMALE DE MICROALGUES EN EAU SUPERCRIQUE

Un procédé de gazéification de microalgues en eau supercritique a été mis en œuvre dans le cadre d'une étude pour le gestionnaire de réseau de transport GRTgaz. Ce procédé présente l'avantage de traiter les algues sans séchage préalable, et convertir la matière carbonée en gaz avec un haut rendement. Les essais, menés entre 500 et 700°C et 300 bar, sur une solution concentrée à 11% de matière sèche, ont permis d'obtenir un gaz de synthèse propre, avec un taux de

conversion du carbone en gaz constaté d'au moins 85% et un rendement énergétique global atteignant 70% ou plus. Tandis que le CH<sub>4</sub> peut être injecté dans le réseau de gaz, l'H<sub>2</sub> est utilisé pour fournir l'énergie au procédé et le CO<sub>2</sub> recyclé peut être valorisé comme nutriment dans une unité de production d'algues. L'étude de sensibilité économique menée a démontré que la rentabilité du procédé peut être atteinte avec la seule valorisation du gaz renouvelable générée. □





## MICRO-RÉSEAU CALORIE : LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUE ET THERMIQUE COUPLÉS POUR LA PREMIÈRE FOIS

Une pompe à chaleur de type thermo-frigo pompe a été installée sur le micro-réseau de chaleur et de froid expérimental Calorie du Liten. Produisant de la chaleur mais également du froid à partir d'électricité, elle servira à tester les algorithmes de pilotage de technologies power-to-heat développés sur la plateforme PEGASE dans le cadre du projet européen Pentagon. L'objectif est de valoriser au mieux l'énergie

électrique excédentaire sous forme de chaleur (ou de froid), en tenant compte des contraintes des réseaux (prix de l'électricité, contenu CO<sub>2</sub>, besoins de chaleur, etc). Le dispositif expérimental unique permettra par ailleurs de mesurer l'efficacité du système dans différents modes de fonctionnement, et d'étudier les effets de ces derniers sur le vieillissement des convertisseurs énergétiques. □



## DES OUTILS D'OPTIMISATION MÉCANIQUE DES SYSTÈMES DE STOCKAGE DE CHALEUR À MATRICE SOLIDE

Le Liten a mis au point le premier outil d'étude de la poussée d'un milieu granulaire sur les parois de la cuve qui le contient. Il servira à optimiser les réservoirs de stockage de chaleur de type thermocline dual à matrice solide, qui utilisent un mélange de fluide caloporteur liquide et d'une matrice solide granulaire (billes de roche, de céramique...). Un modèle numérique de réservoir cylindrique rempli de billes sphériques subissant des cycles de chauffage/refroidissement a été développé, permettant de déterminer les contraintes en paroi liées aux interactions avec le milieu granulaire. Parallèlement, une installation expérimentale permettant de valider le modèle du réservoir soumis à des cycles thermiques a été construite. Ces outils seront utilisés pour mieux dimensionner les cuves en tenant compte de la contrainte accumulée lors des cycles de fonctionnement. □



*Le Liten a mis au point le premier outil d'étude de la poussée d'un milieu granulaire sur les parois de la cuve qui le contient*

## MISE EN ŒUVRE DE CYCLES DE RANKINE AVEC UN MÉLANGE DE FLUIDES

Les machines à cycles de Rankine à fluide organique (ORCs) permettent de convertir une énergie thermique en électricité, par l'intermédiaire de fluides subissant des cycles d'évaporation, détente, condensation et compression. Le Liten a comparé les performances d'un mélange de fluides non-azéotrope avec celles obtenues avec des fluides purs. Un mélange a été choisi par criblage sur des critères environnementaux, thermodynamiques, énergétiques, mécaniques et applicatifs. Mis en œuvre dans une installation existante, le mélange sélectionné\* a permis d'obtenir de meilleures performances que le fluide pur : le rendement de conversion est 10% plus élevé et la pression haute 10% plus faible, ce qui a des conséquences bénéfiques sur le coût et la sécurité de la machine. D'autres compositions vont être testées, en fonction des contraintes des applications visées. □

\*80% CF<sub>3</sub>CF<sub>2</sub>C(O)CF(CF<sub>3</sub>)<sub>2</sub> / 20% C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>OCH<sub>3</sub>



## DÉPLOIEMENT D'UN SYSTÈME DE GESTION DE L'ÉNERGIE SUR UN PARC ÉOLIEN COUPLÉ À DES BATTERIES AUX ANTILLES

La société VALOREM, qui exploite le parc éolien de Sainte Rose en Guadeloupe, a fait appel au Liten pour concevoir des outils de pilotage de la centrale. Le laboratoire a non seulement accompagné l'exploitant dans le dimensionnement du système de stockage couplé au parc éolien, mais aussi dans le développement conjoint VALOREM-CEA d'un système de gestion d'énergie (EMS) destiné à piloter l'ensemble en temps réel, de façon à respecter les diverses contraintes spécifiques aux territoires insulaires. Les décisions, prises en temps réel, prennent également en compte les données économiques. Testé à l'Institut National de l'Énergie Solaire (INES) sur une maquette de laboratoire au sein de la plateforme PRISMES, le système est déployé avec succès sur le site antillais, comprenant 8 éoliennes de 2MW chacune et deux batteries cumulant 5,2 MWh. □



*Le Liten a accompagné VALOREM dans le dimensionnement du système de stockage et dans le développement conjoint d'un système de gestion d'énergie.*

## LES OUTILS NUMÉRIQUES FONT DIALOGUER GAZ, CHALEUR ET ÉLECTRICITÉ

**Grâce à de nouveaux outils de simulation et de traitement de données, il devient possible de combiner plusieurs vecteurs (électricité, gaz, chaleur...) pour optimiser la fourniture d'énergie d'un territoire.**

Ces projets de convergence multi-réseaux sont portés à la fois par des industriels désireux d'enrichir leur offre et par des acteurs publics en charge d'un territoire. Ils se concrétisent à l'échelle de périmètres restreints (du quartier au département en passant par les métropoles), où il est plus facile de réaliser le couplage entre vecteurs. Le Liten développe des outils numériques et des méthodologies pour concevoir et exploiter ces systèmes : dimensionnement,

études de faisabilité et d'opportunité, algorithmes de pilotage, de contrôle et d'analyse, planification énergétique... Les difficultés résident dans le nombre et la diversité des technologies à associer. Certaines sont intermittentes (PV, éolien), d'autres continues, ce qui implique également des moyens de stockage ou de conversion entre les vecteurs ; ainsi, une production d'hydrogène peut être convertie en gaz, en chaleur ou en électricité. Aux études

sur les outils numériques eux-mêmes s'ajoutent des tests de prototypes de systèmes énergétiques intégrés, menés sur plateforme expérimentale. De plus, les chercheurs participent à des déploiements opérationnels, par exemple sur un site industriel ou sur un réseau de chaleur local. Plusieurs algorithmes et logiciels issus de ces travaux ont été brevetés ou déposés à l'APP\*. □

\*APP : Agence pour la Protection des Programmes





## PILES À COMBUSTIBLE : LE VIEILLISSEMENT ÉTUDIÉ SUR LE TERRAIN

40 Kangoo électriques du projet Hyway équipés d'un prolongateur d'autonomie via une pile à combustible ont été suivis pendant deux ans, sur un total de 280 000 km. L'un des objectifs était de déterminer des indicateurs d'état de santé et de maintenance de la pile. Les données réelles (courant, tension, température) enregistrées permettent après filtrage une analyse par méthodes statistiques. En particulier, un ensemble de données fait apparaître au cours du temps des modifications de distribution pouvant être interprétées comme des dégradations de la pile. Trois indicateurs ont été développés ; ils montrent que la dégradation n'est pas linéaire et s'opère différemment sur chaque véhicule. Un brevet a été déposé sur ces nouveaux algorithmes pour le diagnostic des piles à combustible. □

## LES CENTRALES PV SE PRÉPARENT AU RÉGLAGE DE FRÉQUENCE

Dans une perspective de déploiement massif de production photovoltaïque, le Liten a développé dans le cadre du projet FlexyPV une chaîne de contrôle pour la participation de centrales PV au réglage primaire de la fréquence du réseau électrique, en incluant les algorithmes d'engagement de la réserve. Ces outils ont été validés et évalués par simulation en laboratoire, puis déployés sur site. A travers un

système d'information, l'engagement de réserve pour les différentes centrales est réalisé la veille pour le lendemain sur la base des prévisions de puissance PV. En temps réel, et sur la base de son engagement, la production PV peut alors être contrôlée à la baisse lorsque la fréquence s'écarte à la hausse de sa valeur nominale. Les expérimentations, menées sur 25 centrales PV en France, se poursuivront jusqu'en 2020. □

## GRENOBLE TESTE UN RÉSEAU DE CHALEUR D'UN NOUVEAU GENRE

Après une phase d'étude et de simulation, un démonstrateur de réseau de chaleur innovant a été déployé dans le quartier ZAC-Flaubert de Grenoble. Il est en partie alimenté par les sources de chaleur exploitées par la CCIAG (déchets ménagers, biomasse, etc). Il sera bientôt également relié à un champ solaire thermique installé sur le toit du bâtiment « la Bifurk » à Grenoble. Une première. Pour améliorer la rentabilité et limiter la production de chaleur lors des pics de demande, des solutions de stockage faisant appel à des matériaux à changement de phase ont été également implémentées. Enfin, il est piloté par un programme intégrant une utilisation optimale des ressources en fonction de la demande et d'une prévision de l'ensoleillement. Un premier bâtiment a été raccordé au démonstrateur, et deux autres devraient suivre d'ici deux ans. □



## BATTERIES

La plateforme développe en particulier des batteries lithium-ion : matériaux, composants, assemblages des packs, intégration système, tests... Elle vise des applications dans les domaines du stationnaire et de l'embarqué, des fortes puissances jusqu'aux objets nomades. Sa concentration de moyens et d'équipements pré-industriels en fait un outil de R&D unique en Europe. □

## PILES À COMBUSTIBLE

La plateforme propose une approche unique de conception et d'optimisation des piles de type PEMFC qui couvre les matériaux, les assemblages membrane-électrode, les stacks et leurs tests en conditions représentatives. Son objectif est d'accélérer les transferts entre recherche et applications adossés à une stratégie de propriété intellectuelle volontariste. □

## 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 alimentent le retour d'expérience sur les performances, le cyclage et le vieillissement. □



## SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Développer la filière française du solaire, c'est la vocation de cette plateforme qui travaille sur l'ensemble des éléments constitutifs d'un système PV. Pour ce faire, elle innove au niveau matériaux, procédés et équipements pour développer des solutions PV à haut rendement. Sa ligne pilote est capable de fabriquer des cellules de la technologie hétérojonction à la cadence de 2400 plaques/heure de façon reproductible. □

## SYSTÈMES SMART GRID

La mission de cette plateforme est de dimensionner, piloter et optimiser des systèmes énergétiques comprenant des sources de production variables et des moyens de stockage électrique en mélangeant émulateurs et composants réels. Sa conception permet d'étudier des configurations variées, de tester des composants, de définir des stratégies de pilotage et de les tester. □

## BÂTIMENT & ÉNERGIE

La plateforme optimise l'intégration des apports solaires dans le bâtiment et adresse la convergence habitat-transport. Véritable outil d'expérimentation en grandeur réelle, elle permet aux constructeurs et aux équipementiers de tester des solutions innovantes pour la performance énergétique des bâtiments. □





## PRODUCTION ET STOCKAGE D'HYDROGÈNE

La plateforme a pour vocation d'exploiter l'hydrogène en tant que source d'énergie. Les travaux portent sur la technologie réversible d'électrolyse haute température (EHT) et son couplage possible avec des sources de production renouvelables. Avec son atelier pilote, le Liten développe et qualifie des démonstrateurs de taille significative, depuis le stack jusqu'au système complet. □



## 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 chaleur. □

## BIORESSOURCES

L'objectif de cette plateforme est de produire de l'énergie en valorisant des déchets, avec un rendement énergétique élevé. Ses activités couvrent le broyage, la torréfaction, la pyrolyse, la liquéfaction hydrothermale et la gazéification, à une échelle extrapolable à des procédés industriels. □

## 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. La préparation des poudres et leur mise en œuvre notamment par fabrication additive permet d'obtenir directement des pièces de forme complexe en limitant l'étape ultérieure d'usinage. □



## IMPRESSION GRANDE SURFACE

La plateforme développe des plastiques, papiers et textiles intelligents produits par impression de fonctions électroniques directement sur leurs surfaces flexibles, pour des dimensions de 320x380mm<sup>2</sup>. Parmi les applications potentielles se trouvent les interfaces homme-machine, l'éclairage intelligent, les écrans interactifs ou encore la surveillance de l'environnement. □



## 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. Son large spectre d'activités en fait un outil emblématique en France et en Europe. □

## NANOCARACTÉRISATION

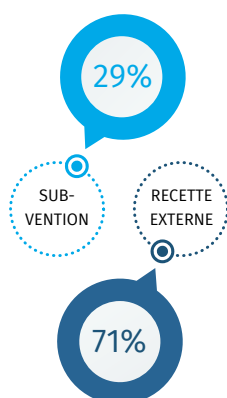
Pour élaborer matériaux et composants à l'échelle nanométrique, il faut connaître leur morphologie et leurs propriétés chimiques et physiques. C'est le rôle de cette plateforme qui compte une quarantaine d'équipements capables de scruter la matière en 2D ou 3D à une échelle proche de l'atome. Certains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

# CHIFFRES CLÉS

## RESSOURCES FINANCIÈRES

138

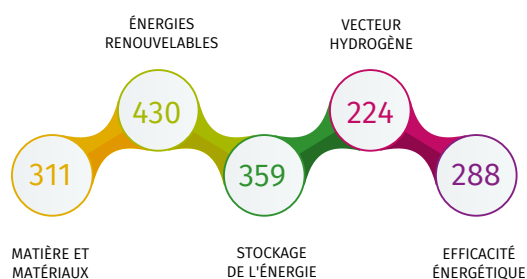
MILLIONS D'EUROS DE BUDGET



## RÉPARTITION DU PORTEFEUILLE

1612

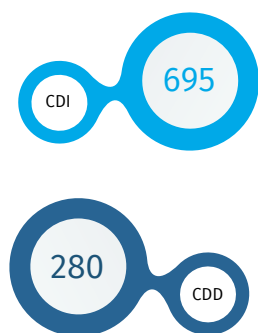
BREVETS CUMULÉS EN 2018



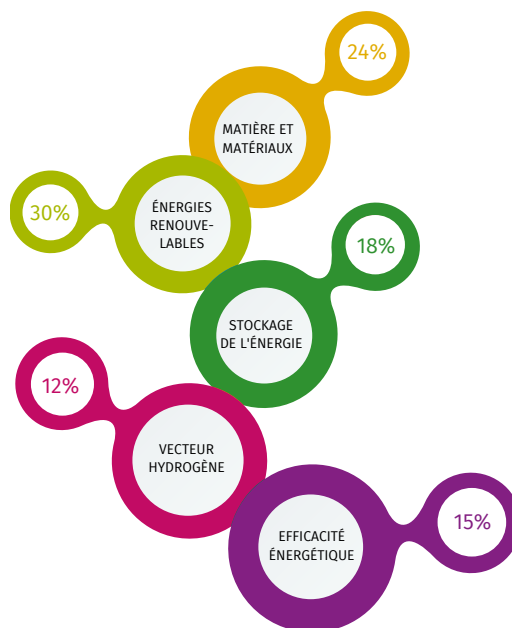
## EFFECTIF DU LITEN

975

EFFECTIF TOTAL



## EFFECTIF PROGRAMME R&D



[www.liten.cea.fr](http://www.liten.cea.fr)

