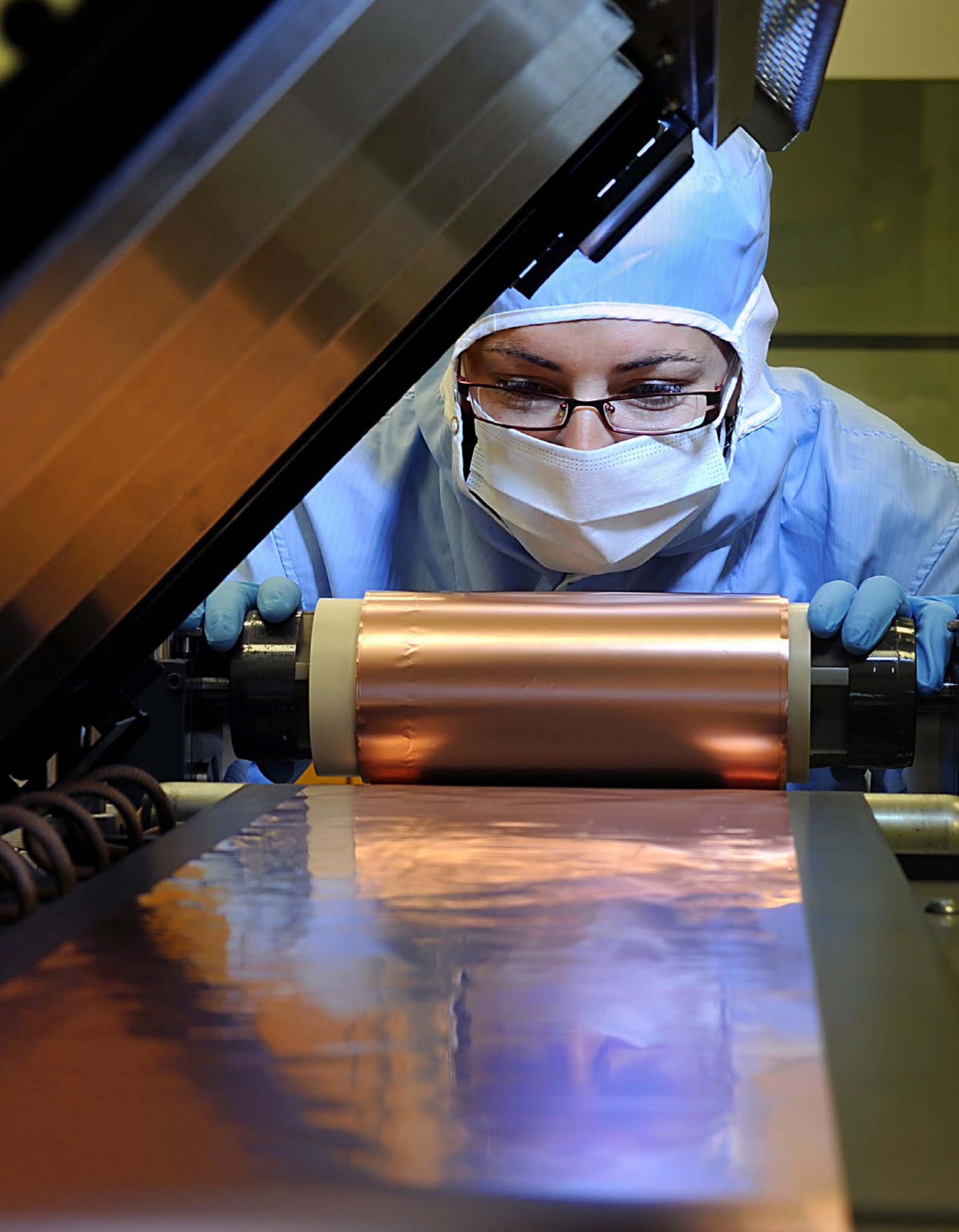


RAPPORT D'ACTIVITÉ 2019







Florence Lambert,
Directrice du Liten

Face à l'enjeu environnemental, la prise de conscience grandit et se concrétise par des initiatives d'ampleur en Europe appuyées par la publication de feuilles de routes climatiques. Cette année 2019 aura notamment été marquée par la mise en place du pacte vert pour l'Europe (Green Deal) par la Commission Européenne, qui vise une croissance durable assortie d'une vision économique juste et efficace pour atteindre la neutralité carbone en 2050.

Au regard de ces transformations, le Liten se positionne comme un accélérateur de la transition énergétique et ancre ses développements dans l'approche intégrée du système énergétique du futur portée par le CEA. Cette vision s'appuie sur la complémentarité des énergies bas carbone. En effet, le monde est confronté à de nouveaux challenges technologiques avec le retour de certaines industries (batterie et solaire PV) et l'émergence d'autres, comme la filière hydrogène qui en est un exemple emblématique.

La production d'énergies renouvelables, le pilotage des réseaux énergétiques et le stockage de l'énergie sont au cœur de nos recherches et nous intégrons la démarche d'économie circulaire dans tous nos développements technologiques en regard des impératifs d'une croissance durable.

Avec cette stratégie, 2019 aura été pour notre institut une année de records et de beaux résultats, que vous retrouverez dans ce document.

Ces résultats confirment la place importante du Liten parmi les organismes de Recherche les plus innovants au monde, et montrent sa capacité à créer de la valeur économique contribuant à la compétitivité de la France et de l'Europe. /

4 > 7

LE LITEN

8 > 13

PRODUCTION D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

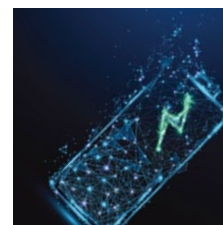
PV HAUT RENDEMENT	9
NOUVELLES GÉNÉRATIONS PV	11
SYSTÈMES PV	12
PV EVERYWHERE	13



14 > 25

PILOTAGE DES RÉSEAUX ÉNERGÉTIQUES

VISION INTÉGRÉE DE L'ÉNERGIE	15
PILOTAGE DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES	16
STOCKAGE THERMIQUE	18
BATTERIES	19
DÉPLOIEMENT DU VECTEUR HYDROGÈNE	22
PEMFC	24
TECHNOLOGIES SOFC – SOEC	25



26 > 32

DIMINUTION DU BILAN ÉNERGÉTIQUE GLOBAL

ÉCONOMIE CIRCULAIRE	27
RECYCLAGE	28
AIMANTS	29
FABRICATION ADDITIVE	30
ÉLECTRONIQUE IMPRIMÉE	31
FERMETURE DU CYCLE DU CARBONE	32

33 > 35

PLATEFORMES NUMÉRIQUES ET TECHNOLOGIQUES



LE LITEN, ACTEUR MAJEUR DE

Basé à Grenoble et Chambéry, 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.

www.liten.cea.fr



UNE STRATÉGIE DE RECHERCHE RÉAFFIRMÉE EN 2019

Face à l'urgence climatique et dans un contexte de transition énergétique, le Liten se positionne en tant que créateur de solutions innovantes pour répondre à ces enjeux sociétaux forts. Il se focalise sur la production d'énergies renouvelables (EnR), en particulier le photovoltaïque, mais également sur leur stockage, leur conversion et leurs usages. Du côté de la production, les efforts se concentrent sur des technologies photovoltaïques à très hauts rendements et sur l'intégration de solutions solaires sur tous types de structures (routes, bâtiments, véhicules...).

L'apparition de nouveaux usages de l'électricité, de même que l'intégration au mix énergétique des EnR dont la production est par nature intermittente et décentralisée, imposent des contraintes supplémentaires au réseau. Ce dernier doit être géré de manière plus réactive, grâce aux technologies du *smart grids* qui regroupent de nombreux outils. Le Liten, en association avec le List et le Leti, y contribue en développant des composants et des logiciels visant à assurer l'observation en temps réel du réseau par le biais de mesures (capteurs), à faire remonter et à traiter l'information, et enfin, à assurer l'équilibre « offre/demande » en optimisant les flux d'énergie. La flexibilité requise nécessite le pilotage

(convertisseurs, EMS...) de systèmes de stockage centralisé, via des batteries stationnaires ou par conversion de l'électricité en hydrogène par électrolyse haute température, ou distribué, comme les batteries de véhicules électriques qui contribueront à la stabilité du réseau de demain. Le couplage entre réseaux électriques, gaz et chaleur offre des flexibilités supplémentaires que le Liten investigate.

Tous les développements réalisés au Liten ont vocation à être transférés à l'industrie et déployés à grande échelle, impliquant des contraintes supplémentaires. Au-delà de sa performance, une technologie doit être compatible des prix du marché. Elle doit en outre répondre à un souci de durabilité et de soutenabilité impliquant la prise en compte, dès sa conception, de l'accessibilité des ressources, de la limitation de son empreinte environnementale depuis sa fabrication jusqu'à son recyclage en passant par son usage. Cela passe par exemple par le développement de procédés peu énergivores, non toxiques et économes en matière (fabrication additive). Et bien sûr, toutes ces technologies ainsi que leurs usages, doivent être pensés en tenant compte de leur appropriation par la société... /

LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

DES PROJETS SUR MESURES, HAUTE VALEUR AJOUTÉE POUR LES INDUSTRIELS

L'innovation au service du développement d'activités :

- Le Liten a acquis **une expérience approfondie multi secteur** (transport, énergie, industrie, environnement ...) 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.

Sécuriser et exploiter sa R&D

- **Confidentialité** assurée.
- **Exploitation exclusive possible** des résultats sur le domaine/produit.
- **Benchmark et analyse de marché** avant le lancement des études de R&D.

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.
- **Concrétiser des idées en innovations** : Réaliser des preuves de concept, disposer de prototypes fonctionnels.
- **Monter en compétences** rapidement par transfert de savoir-faire, outils.

Pour mener à bien ses missions, l'institut s'appuie sur ses 13 plateformes technologiques, son portefeuille de plus de 1700 brevets, et mobilise l'expertise d'un millier de chercheurs, techniciens et équipes supports.

CHIFFRES CLÉS



1000
EMPLOYÉS



BUDGET
160 MILLIONS
EUROS



210 BREVETS
ET 200 PUBLICATIONS
EN 2019



PLUS DE
250 PARTENAIRES
INDUSTRIELS

LE LITEN, MEMBRE FONDATEUR DE L'INSTITUT CARNOT ENERGIES 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



L'INSTITUT POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE, INES.2S

L'ITE porté par le CEA-INES est entré dans une nouvelle phase en 2019 avec une évolution de ses programmes et à changé de nom pour devenir INES.2S.



Par son savoir-faire unique en France en recherche, développement et transfert de technologies industrielles, l'Institut pour la Transition Énergétique INES.2S a vocation à ouvrir toutes les opportunités économiques générées par le développement du solaire à l'industrie française. C'est la raison du support par l'état dans le cadre des Investissements d'Avenir, sur la base de l'engagement des partenaires industriels dans un esprit de co-investissement et de partenariat multilatéral. Les industriels impliqués sont dans un premier temps 2CA, CNR, Colas, et Renault qui seront suivis d'entreprises associées, impliquées dans l'écosystème PV en France.

INES.2S se focalise sur l'intégration massive de l'énergie photovoltaïque au niveau technologique pour les applications émergentes, au niveau électrique et numérique pour les réseaux et systèmes, au niveau économique pour assurer la bancabilité des investissements dans le solaire.

INES.2S répond ainsi à ses engagements auprès de l'état : doter la France de filières économiques compétitives dans des secteurs d'avenir liés aux énergies décarbonnées. /

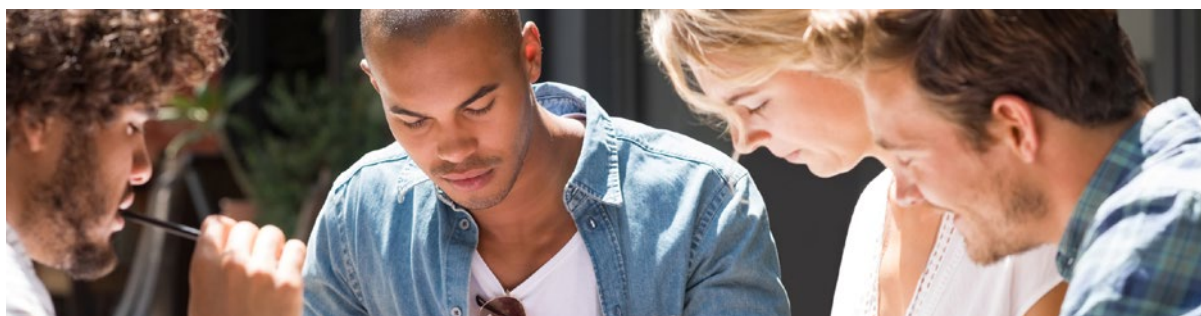


« La création d'Instituts pour la transition énergétique (ITE) est une initiative du gouvernement français dans le cadre de Plan d'Investissement d'Avenir »

DES START-UP SOUS LA LUMIÈRE

La création d'entreprise au CEA est une voie importante de valorisation des résultats issus des recherches de ses laboratoires. Dans ce cadre, l'institut Liten a mis en place un accompagnement spécifique des projets de start-up qu'il soutient et ce, depuis l'idée du projet jusqu'au lancement de l'entreprise. Il est réalisé en lien avec les équipes impliquées dans la création d'entreprise au CEA. Pour poursuivre la dynamique des années précédentes, de nouvelles actions, préfigurées en 2019, vont voir le jour en 2020, pour augmenter le

nombre de projets de création d'entreprise basé sur des technologies de l'Institut Liten : d'une part, en renforçant l'effort d'identification auprès de l'ensemble des laboratoires de l'institut, par des actions ciblées de sensibilisation ; d'autre part, pour accélérer l'émergence de ces projets, en renforçant l'accompagnement stratégique des projets, la constitution d'équipe entrepreneuriale, et en resserrant les liens avec les acteurs du financement.



Créé en 2013, **Steadysun** a pour objet la valorisation de l'énergie solaire, en particulier grâce à la fourniture de prévision de la production, qui permet une meilleure intégration du solaire dans les systèmes énergétiques. Le Liten et Steadysun poursuivent leur partenariat sur des sujets complémentaires à l'offre actuelle. L'année 2019 a vu la mise au point d'un outil de prévision de la consommation électrique, qui a été déployé sur le projet Cordees. /



Dans le cadre de la cérémonie de remise du prix EARTO de 2019 récompensant les meilleures innovations de l'année, le Smart Energy Hub a reçu le premier prix dans la catégorie "Impact attendu". Ce système hybride de stockage et de cogénération, capable de stocker sous forme d'hydrogène le surplus d'électricité produit en local, peut ainsi couvrir la majorité des besoins d'un bâtiment en énergie. Il est conçu par **Sylfen**, en utilisant la technologie rSOC, électrolyseur/pile à combustible à oxyde solide réversible du CEA. /



En novembre 2019, PowerUp a remporté le prix Cleantech Open France et a représenté la France au Global Forum à Los Angeles. Josselin Priour, CEO de **PowerUp**, a pu y présenter leur solution innovante basée sur le développement d'un système intelligent de charge des batteries, permettant de doubler leur durée de vie. /



Après l'obtention du marquage CE en 2018 de son dispositif médical actiTENS®, solution non médicamenteuse pour le traitement de la douleur chronique, **Sublimed** finalise une nouvelle levée de fond en janvier 2019 de 3M€ afin d'accélérer son développement commercial en France et à l'international. /

PRODUCTION D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

LE LITEN COUVRE L'ENSEMBLE DE LA CHAÎNE DE LA VALEUR DES COMPOSANTS PHOTOVOLTAÏQUES. IL UTILISE DES ÉQUIPEMENTS INDUSTRIELS POUR ATTEINDRE DES RENDEMENTS DE 25% SUR SILICIUM ET À TERME DÉPASSER LES 30% AVEC LES TECHNOLOGIES DITES TANDEM. AU-DELÀ DU COMPOSANT, DES ARCHITECTURES SYSTÈMES INNOVANTES SONT DÉVELOPPÉES POUR AMÉLIORER LA PRODUCTIVITÉ DES CENTRALES AU SOL MAIS ÉGALEMENT POUR GÉNÉRALISER LE PHOTOVOLTAÏQUE DANS LES BÂTIMENTS, LES ZONES INDUSTRIELLES, LES MOYENS DE TRANSPORT ET LE LONG DES VOIES DE COMMUNICATION.



VERS L'INDUSTRIALISATION DU PHOTOVOLTAÏQUE À HÉTÉROJONCTION

Depuis une quinzaine d'années, le Liten a une activité soutenue dans le domaine du photovoltaïque à hétérojonction (HET), travaillant à la fois sur les matériaux, le développement des cellules et leur mise en modules. Les innovations conjuguées dans ces trois domaines permettent de battre des records de rendement chaque année.

Doté d'importants moyens de caractérisation, le Liten travaille en lien étroit avec les fournisseurs pour sélectionner les meilleurs matériaux en fonction de leur qualité cristalline, de leur résistivité, de la durée de vie des porteurs et de la concentration et la nature de l'oxygène présent dans les plaques de silicium. L'innovation permanente des procédés de fabrication des cellules se traduit en outre par une amélioration continue de leur rendement de conversion. Fin 2019, des cellules HET busbarless de taille industrielle (244 cm²) ont été certifiées à des rendements de 24,63% et des cellules avec busbar ont affiché des rendements de 23,9 %. Ces performances ont été obtenues en optimisant notamment le dépôt par PECVD des films nanométriques de silicium amorphe, en améliorant les couches d'oxyde

transparent conducteur et en réduisant les dommages liés au transport robotisé des plaques durant la production.

Des cellules aux modules

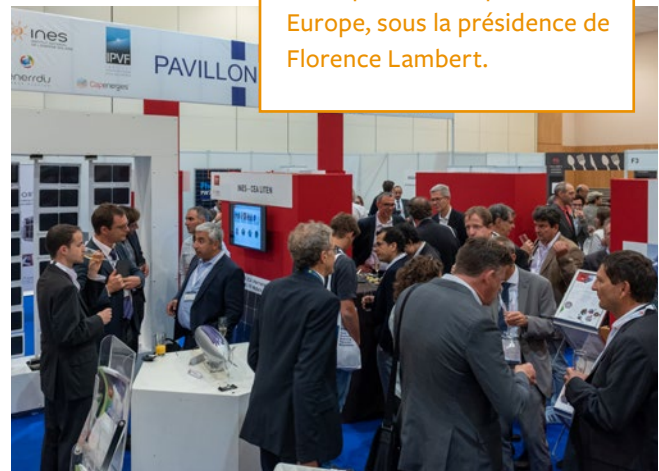
Les cellules sont ensuite interconnectées puis intégrées en modules. Si elles peuvent être assemblées en cellules entières, la tendance actuelle est de les assembler en demi-cellules. Le Liten innove également en développant des modules bifaciaux qui permettent d'augmenter le rendement en captant la lumière résultant de l'albedo du sol. Parallèlement, des innovations sont apportées aux matériaux constituant le module (verre, backsheet...) pour améliorer les rendements et augmenter la durée de vie. En 2019, le Liten a ainsi fabriqué des modules busbarless de 348 watt en demi-cellules (120 demi-cellules) et de 412 watt avec

6 busbars en 144 demi-cellules sur des plaquettes de taille M2. Le passage progressif à des plaques plus grandes de taille industrielle M6 augmentera encore la productivité des modules.

Des tests en environnement réel ont été effectués à Chambéry et à Cadarache, et d'autres sont en cours dans le désert d'Atacama au Chili. Les équipes poursuivent leurs efforts pour optimiser l'industrialisation de la technologie HET (réduction des coûts de fabrication, amélioration de la qualité et de la productivité), et viser à court terme un rendement de conversion de cellules de 25 %.

E U P V S E C

Eupvsec 2019 à Marseille, une très belle édition de la plus grande conférence sur le photovoltaïque en Europe, sous la présidence de Florence Lambert.



EN BREF

ENEL Green Power vient d'inaugurer la toute première ligne européenne de production industrielle de panneaux photovoltaïques hétérojonction dans son usine de Catane. Cette première européenne est le fruit d'un développement et d'une pré-industrialisation de la technologie issue de 15 ans de travaux au Liten. /



Le Liten participe à 5 des 10 projets H2020 sur l'énergie solaire mis à l'honneur par l'Union européenne, dans le cadre de son plan stratégique pour les technologies énergétiques : NextBase, DISC, AMPERE, PVSITES et CPVMatch. Ces projets portent sur la fabrication des cellules, le transfert de la technologie hétérojonction, le BIPV et le solaire à concentration. /



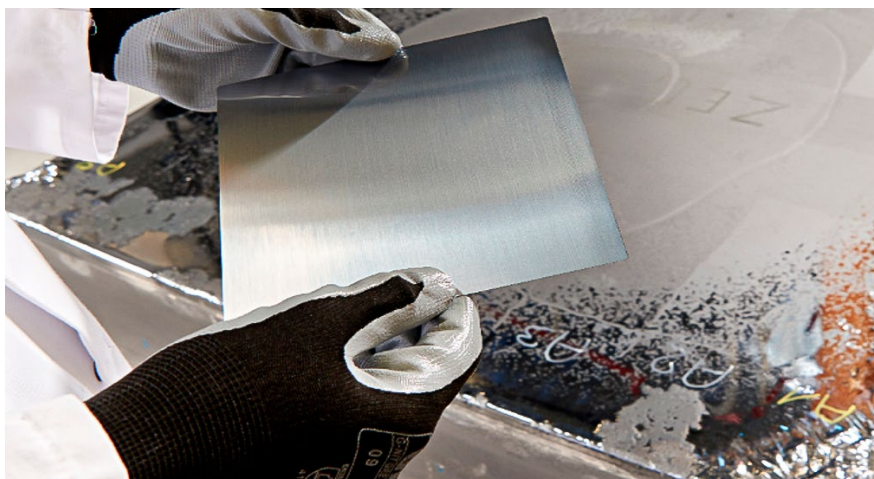
L'utilisation de substrats CRYSTALMAX™ amincis (soit par découpe, soit par voie chimique), combinée à un recuit à une température de 830°C a permis de réduire significativement les effets de la dégradation sous éclairage (LID) spécifique au silicium Monolike sur une architecture cellule de type PERC. /

CRISTALLISATION D'UN LINGOT MONOLIKE DE 1,3 TONNE À LA TAILLE G8

Un lingot en silicium quasi monocristallin (Monolike) au format G8 de 1,3 tonne a été réalisé sur l'équipement de solidification dirigée développé avec ECM Greentech. Le lingot obtenu présente une fraction monocristalline équivalente à celui des lingots obtenus dans les versions G6 (650 kg).

De même, la qualité du matériau Monolike G8 a été validée aux différentes étapes de la chaîne de valeur : il est compatible avec le procédé de sciage

diamant, les rendements de conversion PV sont au moins équivalents voire meilleurs que ceux obtenus avec la génération G6, et la dégradation sous éclairage des cellules de structure PERC est faible (2-3 % relatif maximum). Le procédé peut encore être optimisé pour augmenter la taille des lingots jusqu'à 1,5 tonne et réduire la teneur en défauts cristallins (dislocations), ce qui permettrait à terme de se positionner au niveau du silicium monocristallin. /



WAFERS: LEUR RÉSISTANCE MÉCANIQUE EST COMPRISE

Afin de mieux comprendre l'influence de l'épaisseur des wafers utilisés pour réaliser des cellules PV sur la résistance mécanique, des tranches de différentes épaisseurs (180, 160, 140 et jusqu'à 100 microns) ont été découpées dans plusieurs qualités de lingot de silicium (monolike, monocristallin et multi cristallin). La résistance à la flexion des plaques ainsi obtenues a ensuite été mesurée selon deux axes. Pour un même

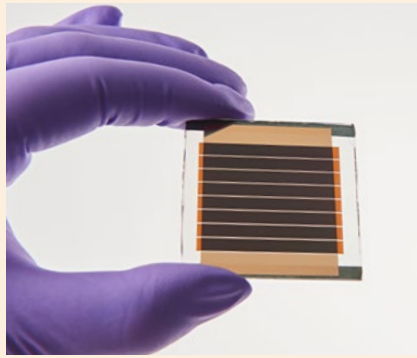
matériau, la contrainte maximale que peut supporter un wafer ne varie pas en fonction de son épaisseur, quel que soit le sens d'essai. En revanche, il s'avère que le silicium monocristallin résiste mieux que le monolike et le polycristallin, qui semblent subir des dégradations lors de la découpe. Les travaux se poursuivent pour identifier les autres mécanismes de fragilisation des wafers en lien avec les conditions de découpe. /

LE POTENTIEL DES CELLULES PÉROVSKITES, SEULES OU EN TANDEM

La technologie photovoltaïque à base de pérovskites présente des avantages compétitifs majeurs. Elle combine en particulier un potentiel de rendement élevé avec des matériaux et des procédés peu coûteux.

Le Liten, qui développe la technologie pérovskite depuis 2015, a atteint un record d'efficacité en produisant un module de 8 cellules en série combinant des techniques de dépôt de couches et de structuration par laser. Le rendement atteint 20,3 % sur une surface active de 11,2 cm² avec un facteur de remplissage géométrique de plus de 93 %. Il s'agit d'une des meilleures performances mondiales sur cette taille de cellules. Le laboratoire a par ailleurs optimisé le procédé, ce qui a permis de maintenir 90 % du rendement initial après 1200 heures

d'illumination continue, marquant une étape importante vers l'industrialisation de la technologie. /



VERS DES MODULES TANDEM

Mais la prochaine rupture technologique pourrait résulter des architectures tandem combinant cellules silicium et cellules pérovskite. Au Liten, des architectures silicium HET/pérovskite ont atteint des rendements de plus de 22 % sur 9 cm² de surface active. Parallèlement, et dans le cadre d'une collaboration avec NTU Singapour, le potentiel de la technologie HET en tant que cellule inférieure dans une configuration 4 terminaux a été évalué. Le rendement potentiel de l'architecture, somme de celui de la pérovskite et de celui de la HET filtrée, dépasse 25 %. Dans cette configuration, le courant produit par les cellules solaires tandem

est imposé par la sous-cellule limitante, c'est-à-dire celle produisant le moins de courant. Pour augmenter le rendement, il faut maximiser et équilibrer les courants produits par les deux sous-cellules en gérant le flux de photons pour minimiser les réflexions et les absorptions parasites. Des simulations optiques réalisées sur une structure standard de type NIP montrent qu'elle présente de fortes pertes par réflexion, qui limitent le courant à 15 mA/cm², mais a permis d'identifier plusieurs stratégies pour espérer dépasser les 19 mA/cm² et atteindre 30 % d'efficacité. /

PRODUIRE PLUS D'ÉNERGIE PV AVEC MOINS DE SILICIUM

Des cellules à hétérojonction de format industriel (244 cm²) ont été amincies jusqu'à des épaisseurs de 40 µm (au lieu des 150 µm standard) par abrasion mécanique ou attaque chimique, dans le but de réduire l'indicateur « gramme de silicium par Watt crête ».

Plusieurs lots de quelques centaines de cellules dans une gamme de 100 µm à 40 µm ont été produits. Les rendements de conversion obtenus sont supérieurs à 22% dans la gamme des 80 à 100 µm, et de près de 20% pour les cellules de 45 µm. Ainsi, la quantité de silicium nécessaire pour produire 1 Watt est inférieure à 1 g, et approche même les 0,5 g pour les cellules les plus fines, contre 1,5 à 2 g en moyenne. L'utilisation de wafers très fins, voire ultrafins, permet de diminuer le coût final des cellules dans lequel la ressource silicium compte pour 30 %, tout en offrant la possibilité de réaliser des modules légers et souples. /

EN BREF

Le fabricant japonais de produits à haute fonctionnalité Toyobo a entamé une collaboration avec le Liten pour développer des cellules et des modules photovoltaïques organiques innovants qui seront intégrés à des produits destinés au secteur du bâtiment pour diverses applications en extérieur et en intérieur. /



PROTOTYPAGE NUMÉRIQUE : MODÉLISATION ÉLECTRO-OPTIQUE DE MODULES PV

La mise en module des cellules photovoltaïques entraîne des pertes de puissance optiques ou électriques. Modéliser génériquement ces pertes permet de faire du prototypage numérique, et d'identifier rapidement en amont les architectures les plus prometteuses.

Le modèle mis au point considère chaque cellule sous la forme d'un circuit électrique équivalent dont les paramètres sont modifiés par la mise en module. Les effets de différents verres, encapsulants et backsheet, de différents types d'interconnexion (rubans ou shingle), de la découpe des cellules, ainsi que les pertes par déséquilibre lorsque les cellules ne sont pas identiques, sont modélisables. Cet outil a par exemple permis d'explorer les possibilités d'une architecture flip-flop, dans laquelle une cellule sur deux est retournée pour réduire la distance qui les sépare et maximiser la surface active du module. /

UN LOGICIEL POUR ANTICIPER LES PERTES DANS LES CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES

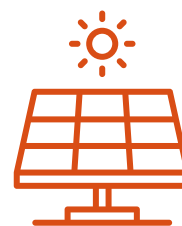
Le Liten développe un algorithme permettant d'identifier et de quantifier les différents types de pertes dans les centrales PV, depuis la réception des rayons du soleil jusqu'à l'injection d'électricité sur le réseau à partir de mesures effectuées sur une vingtaine de centrales instrumentées. Le logiciel est en cours de test afin de vérifier sa robustesse sur un panel de centrales de configurations différentes. Une fois couplé à la base de données CEA dédiée au monitoring,

il fournira des informations, sous forme de « diagrammes de pertes » par exemple, à partir desquels pourra être établi un diagnostic précis du fonctionnement de la centrale. L'évolution des diagrammes de pertes dans le temps donnera, en outre, une indication sur les dégradations apparaissant dans la centrale, en plus de la quantification du vieillissement naturel des installations. Ce logiciel sera ensuite mis à la disposition des exploitants. /



SURVEILLANCE EN TEMPS RÉEL D'UNE SOIXANTAINES DE CENTRALES PV

Dans le cadre des appels d'offre de la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE), les équipes du Liten réalisent le monitoring de près de 60 centrales photovoltaïques, représentant une puissance totale de 338 MWc, et collectent quotidiennement ces mesures sur des serveurs sécurisés. Ces données sont utilisées pour développer et valider des algorithmes d'évaluation de performances et de détection de défauts. Ces algorithmes permettent notamment de calculer des indicateurs de performance, d'estimer l'impact des salissures sur le rendement et de mettre en évidence des pertes de production. De nouveaux indicateurs permettant de détailler les pertes énergétiques dans les centrales sont également définis dans le but d'optimiser la maintenance des installations PV. /



338 MWc

MONITORÉS SUR 60 CENTRALES

DÉMONSTRATEUR BIPV : UNE FAÇADE ADAPTATIVE DYNAMIQUE

Un démonstrateur de façade adaptative permettant de contrôler l'apport solaire dans les bâtiments tout en optimisant la production photovoltaïque a été développé au Liten. Il repose sur une structure lamellaire brevetée utilisant des modules PV travaillant en torsion. Grâce à une double motorisation et à l'emploi de cellules HET bifaciales, le système contrôle l'apport solaire et le confort de l'occupant. Elle est, en outre, personnalisable et esthétique.

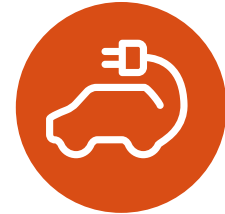
La fabrication de ces modules ne nécessite qu'une seule lamination, et des tests mécaniques dynamiques ont montré une résistance à la fatigue élevée. Ces modules ont été intégrés dans une structure représentative d'un usage réel et couplés à des moteurs pour créer une combinaison d'ouverture et de fermeture des ailettes. La stabilité mécanique de l'ensemble a été démontrée en utilisation intensive. /



BANCS DE TESTS POUR ACCÉLÉRER LE DÉPLOIEMENT DU BIPV

L'impact de la configuration et des conditions climatiques sur la température de fonctionnement de nouveaux concepts de modules PV pour l'intégration au bâtiment est étudié dans le cadre du projet BESMART. Des mesures comparatives seront réalisées durant une année et suivant un protocole de tests commun sur les sites de l'INES et de l'EPFL, ainsi que sur des implantations en Norvège et à Chypre. Les tests porteront sur deux types de modules PV bi-verres en silicium monocristallin qui se différencient par l'épaisseur des verres qui les composent. Les bancs d'essais permettent de tester l'intégration ou la non-intégration au bâti, sous différentes inclinaisons et suivant une norme (IEC TS 63126) bien adaptée à l'objectif. Une instrumentation permet de recueillir les données météorologiques et les modules sont instrumentés par des thermocouples. /

EN BREF



GAIN MOYEN

4 KM / JOUR

Des modules solaires sans verre, rigides et courbés ont été conçus et réalisés pour être intégrés à la carrosserie d'une voiture électrique.

Le gain moyen du solaire pour ce véhicule est estimé à plus de 4 km par jour, avec une forte variabilité entre l'été (> 10 km) et l'hiver (< 2 km). /

PILOTAGE DES RÉSEAUX ÉNERGÉTIQUES

LE LITEN CONÇOIT DE NOUVEAUX OUTILS MATÉRIELS ET LOGICIELS POUR PILOTER EN TEMPS RÉEL DES RÉSEAUX MULTI-ÉCHELLES POUVANT INTÉGRER LES ÉNERGIES RENOUVELABLES INTERMITTENTES. POUR ALLER VERS LES FORTS TAUX D'INTÉGRATION QUI REQUIÈRENT PLUS DE FLEXIBILITÉ, LE LITEN DÉVELOPPE DES SOLUTIONS DE STOCKAGE, EN PARTICULIER LES BATTERIES ET LE VECTEUR HYDROGÈNE. CES BRIQUES TECHNOLOGIQUES PERMETTENT DE PRÉFIGURER LA CONVERGENCE DES VECTEURS ET DES USAGES COMME CELUI DE LA MOBILITÉ PROPRE.



UNE VISION INTÉGRÉE DE L'ÉNERGIE DANS UN MONDE COMPLEXE

Questions à Hélène Burlet, Directrice-adjointe des programmes Energies du CEA

Qu'entend-on par vision intégrée de l'énergie ?

Dans un contexte de transition énergétique avec un objectif de neutralité carbone d'ici à 2050, nous avons réfléchi à ce que pourrait être le schéma énergétique de la France à cette échéance, en partant de l'existant. L'apparition de nouveaux usages, de nouveaux moyens de

production et le développement des énergies renouvelables, sans oublier la suprématie actuelle du nucléaire, donneront naissance à un système énergétique complexe, dans lequel tous les composants interagissent entre eux. Il est donc absolument nécessaire de raisonner sur la base d'une vision systémique, prenant en compte toutes les interactions possibles entre les éléments de notre futur système énergétique.

renouvelables. Le CEA, qui dispose de toutes les compétences nécessaires pour aborder ces enjeux dans cette vision systémique, est totalement légitime dans la construction de cet avenir. Cette vision intégrée de l'énergie est d'ailleurs issue d'un dialogue entre différentes branches du CEA : depuis un an, près de 1200 personnes ont réfléchi ensemble pour élaborer de nouveaux programmes de recherche issus de cette vision globale.

//////////

En France, le schéma énergétique de 2050 reposera forcément sur une alliance nucléaire - énergies renouvelables.

Quel rôle peut jouer le CEA, et le Liten en particulier, dans la construction de l'avenir énergétique du pays ?

En France, le schéma énergétique de 2050 reposera forcément sur une alliance nucléaire - énergies

Quelles sont les conséquences de ce raisonnement « intégré » pour le Liten ?

Certains programmes seront peu impactés comme ceux ayant pour objectif de développer les briques de base des énergies renouvelables. D'autres en revanche font leur apparition pour résoudre des problèmes nouveaux, et vérifier que les solutions envisagées ne sont pas contreproductives. Par exemple : quelle alimentation électrique pour des électrolyseurs destinés à produire de l'hydrogène industriel sans entraîner une surconsommation électrique, donc accentuer les contraintes sur le réseau, et au final risquer une hausse d'émission de gaz à effet de serre si le réseau recourt aux centrales thermiques ? Comment dimensionner une source de production EnR pour couvrir ce besoin ? Les exemples sont nombreux... /



UN OUTIL POUR DIMENSIONNER DES SYSTÈMES PV – DIESEL – STOCKAGE

Diesol, un outil de simulation et de dimensionnement de systèmes d'alimentation électriques dits hybrides (photovoltaïque, groupes diesel, stockage), a été développé et transféré à la société française Cap Vert Énergie, qui fournit ou exploite de tels systèmes. L'outil permet trois types de simulations : le dimensionnement technique du futur dispositif et sa stratégie de contrôle ; le comportement dynamique, pour valider la stabilité et la qualité des signaux électriques ; l'évaluation des coûts et du retour sur investissement sur la durée d'exploitation, comprise entre 20 et 30 ans.

Par rapport aux outils du marché, Diesol offre beaucoup plus de possibilités de paramétrage et de personnalisation. Il sera exploité par des ingénieurs d'études et pourra être ouvert à d'autres moyens de production d'énergie, après développement de modèles complémentaires. /

VÉHICULE ÉLECTRIQUE : VERS UN CONVERTISSEUR DE PUISSANCE MONOÉTAGÉ

Un convertisseur de puissance monophasé de 3 kW pour véhicule électrique a été développé avec le Leti puis testé en laboratoire à 1/3 de sa puissance. Doté d'une conversion monoétagée, contre deux ou trois habituellement, il parvient à concilier densité de puissance et rendement (95% à ce jour), répondant ainsi aux exigences d'un cahier des charges pour l'automobile. La simplification de la partie matérielle a pour contrepartie la complexité accrue de la commande. Celle-ci a été optimisée par simulation pour obtenir le meilleur rendement dans toutes les configurations de fonctionnement.

Ce convertisseur pourra être utilisé soit pour recharger le véhicule, soit pour transférer l'énergie de la batterie vers le réseau. Cinq brevets ont été déposés. /



3 kW
PUISSANCE DU CONVERTISSEUR
MONOPHASÉ

LE GaN DOPE LES PERFORMANCES DES MICRO-ONDULEURS POUR LE SOLAIRE

Un micro-onduleur 400 W pour module photovoltaïque a été développé pour le projet européen SuperPV. Basé sur des transistors GaN, il se distingue par sa densité de puissance (0,85 kW/litre) et sa fréquence de fonctionnement de 200 kHz. Des marges de progression existent pour améliorer le rendement total, aujourd'hui à 95,5%. Le choix d'une topologie de commutateur de courant contribue à la compacité du micro-onduleur, d'autant plus importante qu'il équipera des modules bifaciaux. Pour réduire les pertes par commutation, une architecture originale d'un *active clamp* a été conçue et brevetée. Les micro-onduleurs permettent d'optimiser individuellement chaque module, alors que la puissance d'une chaîne de panneaux reliés en série peut être pénalisée par la défaillance d'un seul d'entre eux. /



EnRSim, OUTIL DE CALCUL POUR LA PRODUCTION MULTI-ENR DE RÉSEAU DE CHALEUR



La première version fonctionnelle du logiciel EnRSim, qui vise à favoriser l'intégration de sources d'énergies renouvelables à un réseau de chaleur, a été livrée à l'ADEME. L'outil permet de calculer des mix énergétiques et de dimensionner les installations de production multi-EnR : biomasse, solaire thermique, pompe à chaleur et stockage thermique. EnRSim comprend un cœur de calcul dédié à la modélisation physique de la

centrale, des modules d'évaluation de la charge énergétique du réseau de chaleur et de la ressource solaire, d'analyse des résultats environnementaux, énergétiques et économiques, le tout supervisé par le biais d'une interface dédiée, conviviale et simple d'utilisation.

Il sera mis gratuitement à disposition des bureaux d'études et des collectivités via le site internet d'INES. /

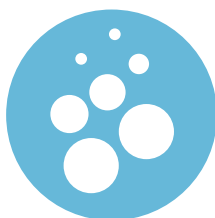
GESTION THERMIQUE : DES CELLULES FACTICES POUR OPTIMISER LES SYSTÈMES

Pour tester sans risque d'emballement des systèmes de refroidissement de cellules, le Liten avait développé et breveté des *fake cells* (cellules factices), de même conductivité thermique que les composants à valider mais dépourvues d'activité chimique. Elles peuvent supporter des températures jusqu'à 150°C. Elles ont été utilisées dans deux projets industriels. Le premier porte sur un pack batterie en fibre de carbone avec refroidissement direct des cellules par huile. Il a été caractérisé sur un banc d'essai conçu et opéré au Liten. Les cellules factices ont servi à valider les performances thermo-hydrauliques du système avant les essais sur cellules réelles. Le second projet est consacré au management thermique d'un pack de modules de batterie innovant, pour limiter la dépense énergétique nécessaire au maintien de sa température optimale de fonctionnement. Des configurations avec une isolation en laine de roche associée à un rupteur thermique en polymère et une isolation avec des panneaux isolants sous vide et des rupteurs thermiques en liège ont été caractérisées sous différents régimes de fonctionnement et analysées, toujours avec des cellules factices. Les activités de recherche sur la gestion thermique se sont élargies par ailleurs au spatial, à travers divers projets, qui ont permis des innovations sur les caloducs, et sur l'évaporateur d'une boucle diphasique pompée mécaniquement, pour le refroidissement de composants électroniques. /

STOCKAGE THERMIQUE : PREMIER ÉQUIPEMENT OPÉRATIONNEL SUR UN RÉSEAU DE CHALEUR URBAIN

RÉCUPÉRER LA CHALEUR FATALE DANS L'INDUSTRIE

Toujours en stockage thermique, le Liten a dimensionné, fait fabriquer et livré un stockage sensible avec thermocline à deux matériaux (graviers de quartzite et sel inorganique) de 400 kWh destiné à une usine de production secondaire d'aluminium. Objectif : récupérer la chaleur fatale de réacteurs de refonte, qui enchaînent 4 cycles de 6 heures par jour et la valoriser de façon continue dans le procédé. La chaleur récupérée a une température qui varie entre 400 à 800°C. Le retour sur investissement de ce dispositif s'effectuerait en quatre ans. Il est porté par le projet H2o2o Smartrec. /



**400
À 800 °C**

TEMPÉRATURE DE LA
CHALEUR RÉCUPÉRÉE

Un stockage de chaleur par matériau à changement de phase (MCP) conçu par le Liten a été mis en service en mars 2019, dans un éco-quartier de Grenoble où 450 logements sont en construction. Relié au réseau de chaleur urbain, ce stockage est dimensionné pour lisser les appels de puissance lors des pics de consommation d'eau chaude sanitaire du matin et du soir. Sa capacité est de 180 kWh, sa puissance de stockage/décharge de 60 kW. Basé sur la technologie tubes et calandre, il utilise comme MCP un alcool gras.

La mise en place de cet équipement dans le cadre du projet européen Cityzen est une première en France. Les performances opérationnelles dépassent les objectifs de dimensionnement. Le stockage thermique a démontré sa grande flexibilité : pics de puissance de 80 kW pendant 1h30 en charge, fonctionnement stable avec une température de l'eau en entrée instable et plus élevée que celle prévue... Son instrumentation permet des mesures en continu à des fins de R&D. /



METAL ORGANIC FRAMEWORK, UNE NOUVELLE VOIE POUR RÉUTILISER PLUS EFFICACEMENT LE COBALT

Une famille de molécules organiques a été identifiée comme permettant la réaction sélective du cobalt vis-à-vis d'autres éléments. Lorsqu'une solution de manganèse – nickel – cobalt entre en contact avec ce ligand organique, un matériau hybride (Metal-Organic Framework ou MOF), dont la partie inorganique est principalement composée de cobalt, est formé. Les autres éléments (nickel et manganèse) ne réagissent pas et sont éliminés par filtration. Le MOF ainsi formé est alors directement utilisable pour synthétiser des oxydes lamellaires lithiés pour les batteries Li-ion.

Démontré au départ en utilisant des solutions modèles, le procédé a été évalué en traitant une solution préparée à partir de batteries usagées. Le MOF obtenu grâce au ligand se présente comme une poudre qui, après lavage, contient 95 % de cobalt./



ÉLECTRODES POUR BATTERIES LI-ION : LA CHASSE AUX SOLVANTS EST OUVERTE

Fabriquer les électrodes de batteries Li-ion par extrusion, et non par enduction, aurait deux avantages : diviser au moins par quatre la quantité de solvant utilisée et réduire les coûts en limitant le séchage pour retirer ce solvant. Le Liten a obtenu sur ce sujet des résultats encourageants. Il a réalisé des électrodes extrudées fonctionnelles en nickel-manganèse-cobalt (NMC), contenant seulement 10% de solvant, tout en réussissant à convoyer et mélanger la matière dans l'extrudeuse. L'observation MEB montre que les particules de NMC sont bien dispersées, sans pour autant être endommagées. Plusieurs pistes d'optimisation sont à l'étude : augmenter le taux de matière active, éliminer le solvant tout en

préservant la porosité de l'électrode... Le laboratoire, déjà équipé de deux extrudeuses, en comptera deux supplémentaires en 2020./



EN BREF

Un outil de sélection de cellules et de dimensionnement de pack batteries s'appuyant sur la base ESTOR a été mis au point. Pour une application donnée, il propose une sélection de cellules en fonction de leur énergie spécifique, de leur puissance spécifique et de leur masse./

EMBALLLEMENT THERMIQUE DES BATTERIES : MIEUX VAUT PRÉVENIR QUE GUÉRIR

Deux dispositifs ont été développés pour détecter les signes avant-coureurs de l'emballement thermique de cellules Li-ion : une mesure de déformation par jauges de contrainte et l'interrogation acoustique à ultrason, bien connue en contrôle non destructif.

Ces techniques permettent de suivre la « respiration » discrète des batteries au cours des cycles de charge - décharge alors que les matériaux qui la composent connaissent une légère expansion. En cas d'anomalie, le gonflement inhabituel de la cellule peut être détecté plusieurs minutes à plusieurs heures avant que la batterie ne présente des risques pour la sécurité. Ces dispositifs ont été développés et évalués avec succès sur différents types et formats de batteries. À terme, ils pourraient équiper des batteries de tailles raisonnables (de l'ordre du kWh) ou sécuriser des applications à forte criticité. /

COMPRENDRE LES MÉCANISMES DE DÉGRADATION DES BATTERIES LITHIUM-ION

Le Liten multiplie les études visant à mieux comprendre les mécanismes conduisant à l'altération de l'électrode négative dans les batteries lithium-ion. La dynamique de formation de la couche de passivation se formant à la surface des électrodes négatives en fonctionnement (SEI) est entre autres particulièrement étudiée. Une méthodologie mettant en œuvre les deux isotopes stables du lithium a ainsi été développée : elle est fondée sur l'insertion de ces isotopes à des endroits clés du système électrochimique, et sur l'observation de leur dynamique respective par ToF-SIMS et par RMN du ^6Li et du ^7Li . Parallèlement, une méthodologie *operando* de caractérisation du lithium de cellules électrochimiques par RMN du ^7Li a été développée : elle permet de détecter la formation du lithium métallique à

l'électrode négative. L'ensemble de ces études permettra à terme, avec l'apport de modèles multi-physiques adaptés à différentes échelles, d'améliorer la nature et la composition des électrolytes, le design des électrodes et la gestion de la charge rapide (*Battery Management System*) afin de prolonger la durée de vie des batteries. /



PLONGÉE AU CŒUR DE LA MICROSTRUCTURE DES ÉLECTRODES DE BATTERIES

L'étude des propriétés microstructurales des électrodes de batteries est un moyen efficace pour en comprendre les phénomènes de dégradation, les modéliser et les maîtriser. Pour accéder à ces propriétés, une chaîne complète de caractérisation a été conçue et validée. Elle est basée sur des faisceaux d'ions couplés à de l'imagerie électronique FIB-SEM, avec des étapes amont et aval de processing. Il devient ainsi possible de mesurer

trois paramètres-clés pour les propriétés de transport, à une échelle de quelques dizaines de microns : la porosité de l'électrode, sa surface spécifique et sa tortuosité (résistance à la diffusion des espèces). Les valeurs relevées sont en accord avec celles de l'expérimentation : de quoi faire progresser également la modélisation des propriétés d'électrodes. Ces travaux précurseurs montrent l'intérêt du traitement poussé des images microstructurales. /

ASSEMBLER DES BATTERIES SPATIALES, TOUT UN ART

Un procédé innovant d'assemblage de batteries pour applications spatiales a été développé et transféré à un industriel. Conçu pour les modules de 1,5 kWh d'une constellation de satellites, il a aussi été utilisé pour les modules de satellites de communication (jusqu'à 3,5 kWh), ainsi que pour des batteries pour fusées.

L'objectif était de réduire le coût de fabrication des modules tout en répondant aux exigences d'une application spatiale. Le Liten a adapté deux techniques éprouvées issues des batteries automobiles : le collage automatisé des cellules

(76 à 240 par batterie) et le soudage laser des interconnexions électriques. Ces opérations sont réalisées à cadence élevée, avec une parfaite répétabilité. Elles contribuent à la fiabilité des batteries : certains satellites peuvent tourner autour de la terre en deux heures (durée du cycle) pendant six à sept ans.

Les batteries ont passé avec succès les tests de qualification spatiale. Elles ont équipé six microsatellites démonstrateurs lancés en février 2019, puis 34 autres lancés début 2020. Le Liten a déposé deux brevets sur ces procédés d'assemblage. /

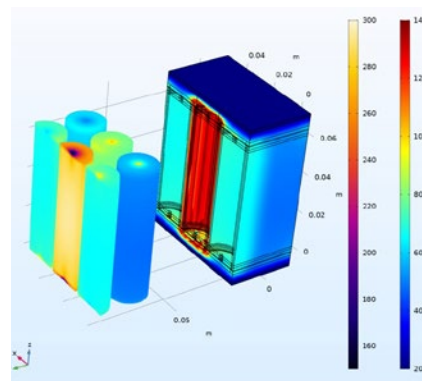


UN PACK BATTERIE POUR VÉHICULE ÉLECTRIQUE QUI MULTIPLIE LES INNOVATIONS

Un pack batterie Li-ion innovant destiné à la motorisation de véhicules a été conçu, maqueté et validé. Il utilise un système de refroidissement direct par huile diélectrique, celle-ci circulant entre les cellules, l'étanchéité étant assurée par un revêtement spécifique interne permettant l'évacuation des gaz en cas d'emballement. Côté sécurité, chaque cellule est dotée d'une protection contre les surcharges et d'une soupape d'évacuation de gaz pour parer au risque d'explosion. Le pack, réalisé avec des cellules commerciales, se distingue également par son carter en fibre de carbone, à la fois léger, rigide, résistant à la pression et ininflammable.

Enfin, des cartes électroniques munies de petits convertisseurs génèrent le 12 V nécessaire aux auxiliaires du véhicule (freins, direction, feux). Sept brevets ont été déposés. /

UN MODÈLE DE PROPAGATION D'EMBALLLEMENT THERMIQUE DES BATTERIES À L'ÉCHELLE DU MODULE



L'analyse de la propagation d'emballement thermique dans les batteries lithium-ion est un axe de recherche essentiel pour le déploiement de la technologie pour les applications transport et stationnaires. Le Liten, qui avait déjà mis au point un modèle multiphysique dédié à la modélisation de l'emballement de cellule cylindrique, a développé un premier modèle à l'échelle du module, décrivant la propagation du phénomène d'une cellule aux autres.

Couplant plusieurs modèles à différentes échelles, l'outil, qui est appelé à évoluer pour être plus prédictif, permettra à terme de réduire le nombre d'expériences nécessaires pour la conception et la validation de nouvelles architectures. Une première version de l'outil est disponible pour permettre aux ingénieurs en charge de la conception de le tester. /

H2LAB, LA RÉPONSE
FRANÇAISE AUX
BESOINS DE TESTS
ET D'ESSAIS

H2LAB

La plateforme française d'essais
au service
de la filière hydrogène

L'outil H2LAB, partenariat public-privé financé par la Banque Publique d'Investissement (Bpifrance), offre à ses adhérents un guichet d'accès unique et privilégié aux moyens d'essais les plus pertinents couplé à la meilleure expertise des laboratoires du CEA et du CNRS. H2LAB mutualise à ce jour une soixantaine d'équipements répartis sur quatre sites pour, dans un premier temps, répondre aux besoins de tests de performance et d'endurance des industriels dans les domaines de l'électrolyse (principalement à haute température), la pile embarquée PEMFC et les réservoirs sous pression d'hydrogène. /

UN SYSTÈME DE PILOTAGE INTELLIGENT POUR JUPITER 1000

Un système de pilotage intelligent a été développé pour optimiser le fonctionnement du démonstrateur de Power-to-Gas Jupiter 1000 en fonction de critères économiques (prix du gaz et de l'électricité). Tandis que l'outil POMMIER Vx mis en place par la CNR planifie le fonctionnement du démonstrateur (soutirage électrique du système, quantité d'H₂ et de syngaz à injecter) selon des opportunités économiques prévisibles (prévisions des prix SPOT de l'électricité et prévisions de production

du parc éolien CNR de Fos-sur-Mer) et une remontée d'état des équipements, jusqu'à 36 heures avec un pas de temps de 30 minutes, l'outil CALLISTO développé par le Liten décline cette planification transmise par l'outil CNR en consignes opérationnelles envoyées à un pas de temps plus fin (~5 minutes) aux différentes briques du système (électrolyseur, méthaneur) en fonction de leur état effectif et en se basant sur des modèles non linéaires permettant de simuler plus finement le système. /



LA COMPRÉHENSION DE LA FRAGILISATION PAR HYDROGÈNE, UNE EXPERTISE CLÉ

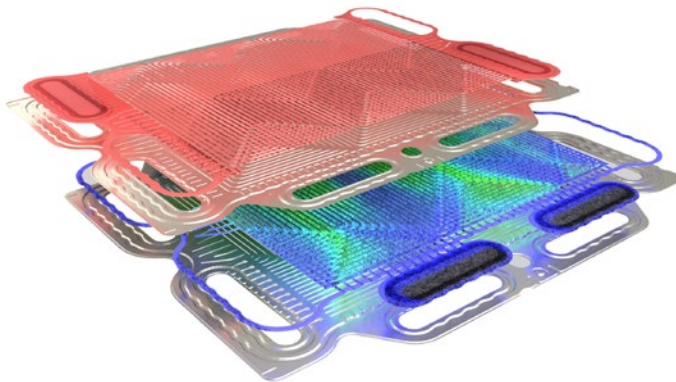
Afin de vérifier l'influence de la fabrication additive sur la sensibilité à la fragilisation par l'hydrogène et la tenue en fatigue oligocyclique de certaines pièces des moteurs de ses lanceurs en Inconel 718, ArianeGroup s'est tourné vers le Liten et le LaSIE*. Des observations MEB et MET ont dans un premier temps permis d'analyser finement la microstructure du matériau d'étude, ainsi que la taille et la répartition des

grains. La distribution de taille de grains bimodale est la seule différence notable par rapport au matériau forgé. Différentes analyses ont ensuite été réalisées pour étudier les mécanismes d'interaction de l'hydrogène avec le métal : une expérience de perméation gazeuse ainsi qu'une expérience de spectroscopie de thermodésorption ont permis d'étudier les types de piégeage de l'hydrogène dans le matériau.

La durée de vie en fatigue oligocyclique chute en raison de l'augmentation de l'activité plastique due aux interactions hydrogène/dislocations qui modifient les mécanismes de fragilisation. Le Liten étudie d'autres cas d'application, comme l'influence de la teneur en hydrogène sur les canalisations transport de gaz naturel de GRTgaz. /

* Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'environnement (Université de la Rochelle, CNRS)

PILES PEMFC : VERS UNE SIMULATION 3 D À TRÈS HAUTE RÉOLUTION



La simulation 3 D de piles PEMFC s'effectue aujourd'hui avec des modèles qui simplifient les représentations géométriques pour rester exécutables, mais au prix d'approximations et d'incertitudes. Pour dépasser ces limites, le Liten développe un outil 3 D de référence, Trust_FC, basé sur la plateforme thermo-hydraulique TRUST du CEA qui est adaptée au calcul haute performance et disponible en open source. Cet outil servira à mener des simulations

complètes à partir des données CAO et à évaluer les simplifications utilisées dans les modèles plus légers.

Les briques de base sont déjà opérationnelles. Elles couvrent les écoulements de fluides, le circuit de refroidissement, la diffusion de chaleur dans les plaques bipolaires et les canaux, les phénomènes de transport dans le cœur de pile. Les modèles Trust_FC pourront traiter plus d'un milliard de mailles et plus de dix variables par point de maillage. /

E N B R E F

Le premier démonstrateur Smarthyes de la start-up Sylfen a fonctionné pendant 2000 heures chez Engie. Il intègre un électrolyseur réversible à haute température, développé par le Liten, couplé à des batteries, un système de compression et de stockage de l'hydrogène et des panneaux PV. Ces travaux ont été présentés par Engie Lab Crigen à la conférence SOFC-XVI à Kyoto en septembre 2019. /



2000 H

DE FONCTIONNEMENT

PILES PEMFC : LES ATOUTS DE L'ARCHITECTURE "PING PONG"

Une architecture innovante de circuit anodique pour pile à combustible PEMFC a été étudiée dans le cadre d'une thèse. Elle est basée sur la commutation synchronisée de deux vannes d'alimentation en hydrogène, d'où son nom d'alimentation alternée ou "ping pong". Par rapport aux architectures classiques, elle améliore la gestion des fluides à l'anode tout en limitant la complexité du circuit fluide associé. Les essais réalisés sur un stack de 5 kW ont montré un rendement très supérieur à l'architecture "dead end anodique" et équivalent à celui de l'architecture "recirculation anodique". Le coût global du circuit est réduit de moitié. Le vieillissement est plus homogène, à l'intérieur des cellules et entre cellules. Une seconde thèse sur cette architecture "ping pong", brevetée par le Liten, a débuté. /

TRANSFERT DE SAVOIR-FAIRE ET DÉVELOPPEMENT D'UNE PILE DE 100 KW

Le CEA a transféré son savoir-faire sur la conception et la réalisation de stack, le cœur de la pile à combustible de type PEMFC, à l'entreprise Faurecia, dont ce pan d'activité a été très récemment transféré à Symbio*. Le projet de R&D associé a conduit au développement d'une nouvelle technologie de stack pour l'application automobile et transport en général. Les différentes étapes de validations expérimentales ont abouti à la réalisation

d'un stack de plusieurs centaines de cellules d'une puissance supérieure à 85 kW, ce qui a permis de démontrer les performances de cette technologie se situant au niveau du meilleur état de l'art européen. L'optimisation des circuits fluidiques des plaques bipolaires et le choix des composants permettent une amélioration des densités de puissances surfaciques et volumiques et une simplification du procédé de fabrication. /

*Symbio : une coentreprise détenue par Faurecia et Michelin

UN PREMIER STACK DE 1 KW EN COMPOSANTS IMPRIMÉS

Une première preuve de concept de stack pile à combustible PEMFC de 1 kW avec des composants imprimés a été réalisée. Les plaques bipolaires métalliques traditionnelles produites par emboutissage arrivant à leurs limites en termes de finesse de motifs, le Liten s'est tourné vers des techniques d'impression, plus versatiles. Un stack d'une puissance de 1 kW a été réalisé par assemblage d'une vingtaine de cellules comprenant des

motifs imprimés, obtenus par sérigraphie d'encre à base de carbone. Les performances atteintes en termes de densités de puissance sont similaires à ce que l'on observe avec des plaques bipolaires métalliques. Mais l'utilisation de ces technologies d'impression, brevetées par le laboratoire, ouvre des perspectives d'amélioration très importantes : en réduisant la taille des motifs, il sera notamment possible d'améliorer encore la densité de puissance. /



L'ATELIER PILOTE OPÉRATIONNEL AVEC UN PREMIER STACK SOC FONCTIONNEL

Un atelier pilote de fabrication de stacks SOC (Solid Oxide Cell) a été mis en place courant 2019 au Liten. L'objectif à terme est de faire passer la capacité de fabrication d'environ un stack par mois, à un à deux par semaine. Le schéma d'implantation des différentes zones de l'atelier, qui réunit en un même lieu l'ensemble des équipements nécessaires à la fabrication des composants des stacks, suit une logique « process » et préfigure la possible organisation d'une future ligne pilote de production. Les équipements ont été réceptionnés, connectés et validés. Un premier stack a été assemblé à partir de composants réalisés à l'atelier,

conditionné et testé. Le niveau de performance obtenu est conforme à ce qui est attendu. /



UNE PILE À COMBUSTIBLE EMBARQUÉE DANS UN NAVIRE DE CROISIÈRE

2022 marquera le premier embarquement d'une pile à combustible SOFC à bord d'un paquebot au GNL fabriqué par les Chantiers de l'Atlantique. Conçu par le Liten en collaboration avec les partenaires du projet ADEME PACBOAT, ce démonstrateur de 50 kW sera le premier système issu du laboratoire exclusivement en mode pile.

La technologie présente plusieurs avantages pour l'usage marin. Son niveau de température (700-800°C) autorise un reformage interne du combustible (méthane du gaz naturel) simplifiant le procédé vis-à-vis des piles concurrentes. Elle accepte, sans changement majeur, plusieurs combustibles (hydrogène, méthane, méthanol, ammoniac,...), facilitant, à disponibilité, la conversion aux

combustibles verts. Dotée d'un meilleur rendement électrique (cible PACBOAT : 60 %) que les groupes électrogènes actuels, elle minimise les émissions de GES à service identique. Elle produit de la chaleur aisément valorisable à bord. /



CELLULES À OXYDES SOLIDES : AMÉLIORER LA PERFORMANCE DES ÉLECTRODES

La microstructure d'une électrode O_2 LSCF-CGO* pour cellules à oxydes solides a été optimisée en couplant une approche numérique et une approche expérimentale. Les performances de l'électrode ont ainsi pu être améliorées pour atteindre les meilleurs niveaux de l'état de l'art. Ce résultat répond également à un objectif d'amélioration de la durabilité de ces électrodes, soumises à des températures de plus de 700°C et à de fortes polarisations.

L'optimisation numérique de la microstructure a été réalisée au Liten à partir d'une modélisation des processus électrochimiques mis en jeu. Elle a porté sur la composition de l'électrode, sa porosité et la distribution en taille des particules solides. D'autres pistes sont à l'étude pour améliorer encore sa durabilité. /

* Ferro-cobaltite de lanthane substituée au strontium - Cérine dopée à l'oxyde de gadolinium

DIMINUTION DU BILAN ÉNERGÉTIQUE GLOBAL

ACCOMPAGNEMENT INCONTOURNABLE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE, LA DIMINUTION DES BILANS ÉNERGÉTIQUES GLOBAUX IMPLIQUE DE PRENDRE EN COMPTE DE NOUVEAUX IMPÉRATIFS. PARMIS CEUX-CI, LE LITEN SE CONCENTRE SUR LA SOBRIÉTÉ MATIÈRE AVEC DES TECHNOLOGIES DE FABRICATION ADDITIVE ET D'ÉLECTRONIQUE STRUCTURELLE, SUR LA PROBLÉMATIQUE DE SUBSTITUTION DES MATÉRIAUX CRITIQUES, DE RECYCLAGE ET D'ÉCO-INNOVATION DANS LES FILIÈRES SUR LESQUELLES IL EST ACTIF, ET SUR LA VALORISATION DES BIORESSOURCES CARBONÉES PAR CONVERSION THERMOCHIMIQUE.



INTÉGRER L'INNOVATION EN ÉCOCONCEPTION AU CŒUR DU DÉVELOPPEMENT DES NTE

Financé par le Carnot Energie du Futur, le projet Eco Innov'NTE vise à proposer une méthodologie d'éco-innovation pour renforcer la performance environnementale des projets en amont.

Au Liten, cela s'est traduit dans un premier temps par la mise en place d'une démarche originale d'analyse du cycle de vie intégrée au processus d'innovation, afin de répondre aux nouvelles contraintes environnementales.

Pour faire en sorte que l'innovation en matière d'écoconception soit prise en compte sans délai dans le développement de nouvelles technologies de l'énergie, le Liten a

ensuite mis en place un réseau de référents écoconception par thématique de recherche et disposant des outils d'analyse. Des formations et des actions de sensibilisation des personnels sont désormais proposées. Ce travail en réseau a permis par exemple de déployer dans les laboratoires dédiés aux nouveaux matériaux et procédés un fonctionnement intégrant pleinement la philosophie de l'économie circulaire, de ses technologies et de ses méthodes. /

//////////

Le Liten structure son approche d'éco-innovation en amont de ses projets, grâce à un réseau de référents internes.



VALIDATION D'UN PROCÉDÉ DE RECYCLAGE DES BATTERIES LI-ION PLUS RENTABLE

Dans le cadre d'un projet avec ORANO, le Liten a développé une technique de recyclage par voie hydrométallurgique des batteries lithium-ion économiquement plus rentable que les procédés classiques. Tandis que les étapes d'extraction du manganèse représentent habituellement un verrou économique majeur, la nouvelle méthode permet simultanément de dissoudre les métaux de l'électrode positive (Ni, Co, Mn pour la chimie NMC) et de séparer le manganèse sous forme d'oxyde en réduisant à la fois le nombre d'étapes et la quantité de réactifs nécessaire. Le nouveau procédé a été mis en œuvre à l'échelle d'un réacteur 5 litres, et les rendements obtenus sont élevés et conformes aux attentes (entre 96 % et 100 %).

%
 Rendements
 obtenus : entre
96% et
100%
 //////////////

D'autres briques technologiques en rupture sont en cours de développement, dont la mise en sécurité des batteries Li-ion qui est cruciale et intervient en amont des étapes de recyclage par voie hydrométallurgique. /

EN BREF



La méthode optimisée de recyclage des batteries Li-ion développée au Liten a remporté le premier prix des Trophées d'Innovation Recyclage dans la catégorie innovation académique, organisés par Federec. /

UNE FILIÈRE DE VALORISATION DES PLASTIQUES TECHNIQUES EN FAIBLES VOLUMES

Une nouvelle filière de recyclage des plastiques à forte valeur ajoutée collectés en petites quantités a été étudiée dans le cadre du projet européen Display. Ces matériaux seront utilisés en fabrication additive de type « dépôt de matière fondue » après traitement mécanique et reconditionnement. La faisabilité du procédé a été testée à l'échelle du laboratoire sur de l'acide polylactique (PLA) : broyage,

modification de la formulation par ajout de charges de fonctionnalisation et de différents additifs (nanoparticules par exemple), et enfin extrudage sous forme de fil. La compatibilité de ce dernier avec les machines d'impression a été vérifiée. Les pièces produites à partir de cette matière recyclée présentent des propriétés mécaniques quasi identiques à celles produites à partir de matériaux vierges. /



DES AIMANTS PERMANENTS STRATÉGIQUES, ÉCONOMES EN MATÉRIAUX CRITIQUES GRÂCE AU STRIP-CASTING

Avec sa ligne pilote couvrant la préparation des alliages jusqu'à la mise en forme par métallurgie des poudres, le Liten mène ses développements sur les aimants permanents de type NdFeB dans une démarche de réduction de l'emploi des terres rares. Sur la plateforme Poudr'Innov, l'étape de préparation de l'alliage par coulée et solidification contrôlée (strip-casting) est parfaitement maîtrisée. De cette

étape-clé dépendent la composition, la microstructure et par conséquent les performances magnétiques de l'aimant final. Le Liten est ainsi en mesure de réaliser des études sur des coulées de 15 à 20 kilos pour les industriels désireux de travailler de nouvelles compositions appauvries en terres rares critiques, ou encore de valoriser des produits en fin de vie par des filières de recyclage en voie courte. /



POIDS DES COULÉES ÉTUDIÉES

DES AIMANTS INJECTÉS DANS UN ROTOR DE MOTEUR 150 KW

Dans le cadre du projet européen ModulEd, un moteur de 150 kW destiné à des véhicules électriques a été développé. Le Liten a contribué au développement d'un rotor à aimants injectés en remplacement des aimants frittés NdFeB. Les aimants injectés présentent l'avantage de ne pas contenir de terres rares lourdes (dysprosium, terbium, matériaux critiques) et offrent une plus grande liberté de forme.

Après avoir travaillé sur la géométrie des aimants afin d'en optimiser les performances mécaniques et magnétiques, les chercheurs ont conçu un moule d'injection dédié. Cet outil permet de fabriquer et de magnétiser l'ensemble des 66 aimants du rotor en une seule étape. Les performances du moteur à aimants injectés seront comparées à celle de son équivalent à aimants frittés en banc de test. /

//////////

EN BREF

Le Liten coordonne le projet UPGRADE financé par la EIT Raw Materials, qui réunit les principaux acteurs européens de la filière des aimants, dans le but d'améliorer la qualité microstructurale des alliages NdFeB. La teneur en matériaux critiques (Tb, Dy) utilisés pourra ainsi être réduite conduisant à la fabrication des aimants NdFeB avec des hautes performances magnétiques et teneur réduite en matériaux critiques. /

EN BREF

Un programme HSE (Hygiène Sécurité et Environnement) pour la fabrication additive a été lancé pour accompagner cette activité en partenariat avec plusieurs sociétés. Il a abouti à un ajustement des protocoles et des bonnes pratiques quant à l'utilisation des machines de fabrication additive. /



Le CEA présent sur les salons européens majeurs 3DPrint et Formnext



LA FABRICATION ADDITIVE AU SERVICE DE L'INDUSTRIE DE L'ÉNERGIE

Créée en partenariat avec la société AddUp (spécialisée dans les solutions industrielles de Fabrication Additive Métallique) et avec le soutien de la Région AuRA, la plateforme FAMERGIE ambitionne d'accélérer l'adoption de la fabrication additive métallique par la filière des composants pour l'énergie. Cette plateforme offre un accompagnement vers des ruptures technologiques, à partir de l'impression 3D métallique et notamment au moyen de designs inédits, de gains en performance et en masse.

Dans ce cadre, le LITEN et AddUp ont récemment concentré leurs efforts sur le développement d'un procédé 3D de fusion laser appliqué à un acier inoxydable 304L, un alliage habituellement mis en œuvre à l'aide de techniques traditionnelles de fonderie et d'usinage. L'optimisation des conditions opératoires, sur un équipement industriel, a permis la réalisation de pièces en 3D (des échangeurs de méthanation) et vient répondre à des exigences de tenue mécanique en statique en service et d'état de surface en sortie d'impression. /



UN DÉMONSTRATEUR DE CAPTEURS D'EMPREINTES EN ÉLECTRONIQUE IMPRIMÉE

Un démonstrateur de capteur d'empreintes digitales « quatre doigts » peu coûteux et flexible a été mis au point dans le cadre du projet européen PYCSEL. Constitué de composants électroniques organiques, il associe un capteur thermique actif innovant à base de PVDF (un matériau pyroélectrique sensible aux différences de température) capable d'injecter de la chaleur au niveau des pixels et une matrice de transistors IGZO TFT de 64 cm². Affichant une résolution de

500 dpi, il peut être utilisé pour la reconnaissance d'empreintes digitales : les crêtes d'un doigt en contact avec les pixels absorbent la chaleur, créant ainsi une différence de température avec les creux qui ne touchent pas le capteur.

PYCSEL a obtenu le prix du meilleur démonstrateur à la compétition OE-A (Organic and Printed Electronics Association) de la conférence européenne annuelle d'électronique souple LOPEC. /



500 DPI

RÉSOLUTION DU
DÉMONSTRATEUR



EN BREF



Afin de préparer l'installation d'une unité de production de pièces plastiques intégrant des fonctions électroniques (plastronique) sur son site de Bordeaux, la société SE2D a installé et qualifié une ligne d'impression par sérigraphie sur la plateforme PICTIC. Elle permet de réaliser des échantillons pour les clients de cette start-up. /

UN BIOCOAL* DE TORRÉFACTION POUR DES APPLICATIONS INNOVANTES EN MÉTALLURGIE

La métallurgie des matériaux non ferreux met en œuvre du charbon minéral cokéfié, utilisé comme source d'énergie et comme agent réducteur dans la réaction chimique du procédé métallurgique. Le remplacement de ce charbon par des ressources carbonées torréfiées est à l'étude pour réduire l'empreinte carbone de cette industrie dans le cadre du projet européen CIRMET.

Le Liten a participé à cette étude en définissant les conditions de torréfaction idéales (température et temps de séjour) de bois de chêne et de peuplier dans le four Centorré de la plateforme Génépi. Le biocoal obtenu par torréfaction à 350°C affiche des taux de carbone fixe conformes aux prérequis. La compatibilité de ce biocoal pour la fabrication de zinc à partir de déchets d'oxyde de zinc est en cours d'évaluation. /

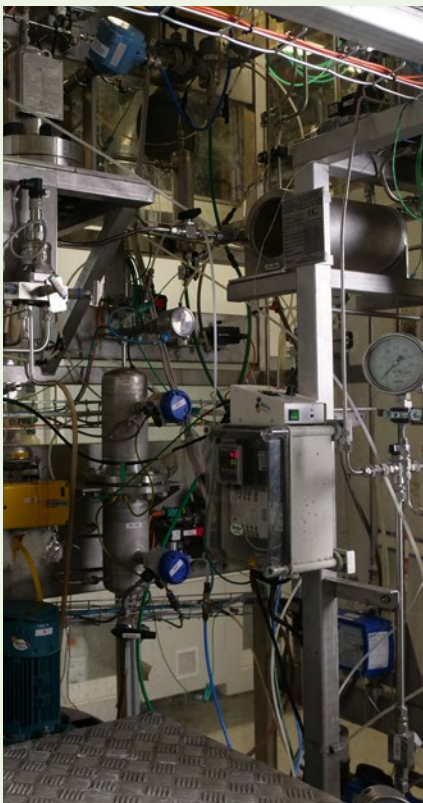
*le biocoal est à la torréfaction ce que le biochar est à la pyrolyse ou à la carbonisation.

EN BREF

Le projet CatVIC (Valorisation catalytique du carbone industriel) est une initiative franco-allemande visant à développer un système efficace pour la conversion à grande échelle d'énergies renouvelables intermittentes, basé notamment sur la production d'hydrogène vert en utilisant une technologie d'électrolyse à haute température. /

GAZÉFICATION HYDROTHERMALE DE CO-DIGESTAT DE MÉTHANISATION

Mené en partenariat avec VINCI Environnement, le projet CO-METHA a pour objectif de valoriser la Fraction Organique Résiduelle (FOR) des ordures ménagères du SYCTOM et les boues de station d'épuration du SIAAP. Dans ce projet, le Liten était chargé de valider la faisabilité du procédé de gazéification en eau supercritique du digestat obtenu après la co-méthanisation de FOR et boues pour produire du CH₄ injectable dans le réseau. Des expérimentations sur des pilotes de laboratoire, associées à un travail d'évaluation des procédés et d'intégration énergétique, ont permis de le valider et d'aboutir à la définition des conditions opératoires optimales pour cet intrant. Le travail commun avec VINCI Environnement a ensuite permis de conceptualiser ce que pourrait être une usine pilote de co-traitement de FOR et de boues intégrant une unité de gazéification en eau supercritique. /



//////////



Après trois ans de recherches, le projet Vascoz a permis de produire du gasoil à l'échelle du laboratoire à partir d'un biobrut issu de la liquéfaction hydrothermale de microalgues. Ces dernières étaient nourries par des fumées industrielles dans des bassins ouverts, ensemencés par des souches non sélectionnées n'ayant fait l'objet d'aucun traitement préalable. /

PLATEFORMES NUMÉRIQUES ET TECHNOLOGIQUES

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



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 aux niveaux 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.



4 équipements majeurs renouvelés pour la plateforme Modules PV

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 & ENERGIE

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.

POUR + D'INFOS, CONSULTEZ NOTRE PAGE WEB [HTTP://LITEN.CEA.FR/PLATEFORMES](http://LITEN.CEA.FR/PLATEFORMES)

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.

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.

BATTERIES

La plateforme développe en particulier des batteries lithium-ion : matériaux, composants, assemblage de 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.



La plateforme Batterie renforce ses moyens avec la mise en service de sa plateforme de test abusifs.



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.

La plateforme PEMFC monte en puissance avec l'acquisition d'un banc de test 100 kW.

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.

POUR + D'INFOS, CONSULTEZ NOTRE PAGE WEB [HTTP://LITEN.CEA.FR/PLATEFORMES](http://LITEN.CEA.FR/PLATEFORMES)

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.



Poudr'Innov renforce son pôle de fabrication additive avec la mise en service de l'équipement AddUp d'impression 3D métal.

BIORESSOURCES

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

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.



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 320x380mm². Parmi les applications potentielles se trouvent les interfaces homme-machine, l'éclairage intelligent, les écrans interactifs ou encore la surveillance de l'environnement.

L'équipement de thermoformage vient compléter les moyens d'impression grande surface pour le développement de l'électronique structurelle.

POUR + D'INFOS, CONSULTEZ NOTRE PAGE WEB [HTTP://LITEN.CEA.FR/PLATEFORMES](http://LITEN.CEA.FR/PLATEFORMES)

liten
cea tech

www.liten.cea.fr