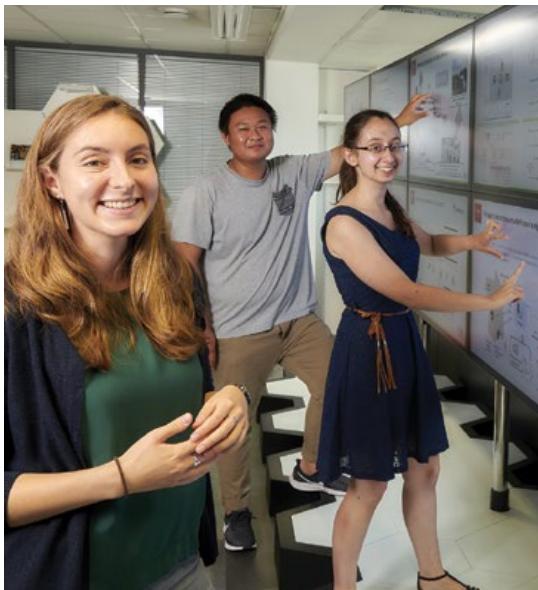
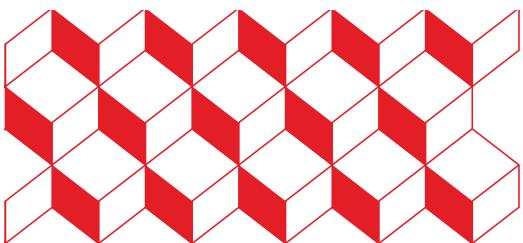


The CEA logo is displayed on a red square background. It consists of the lowercase letters "cea" in white, with a horizontal line underneath.The word "liten" is written in a large, bold, red sans-serif font. A red bracket-like shape is positioned to the right of the letter "n".

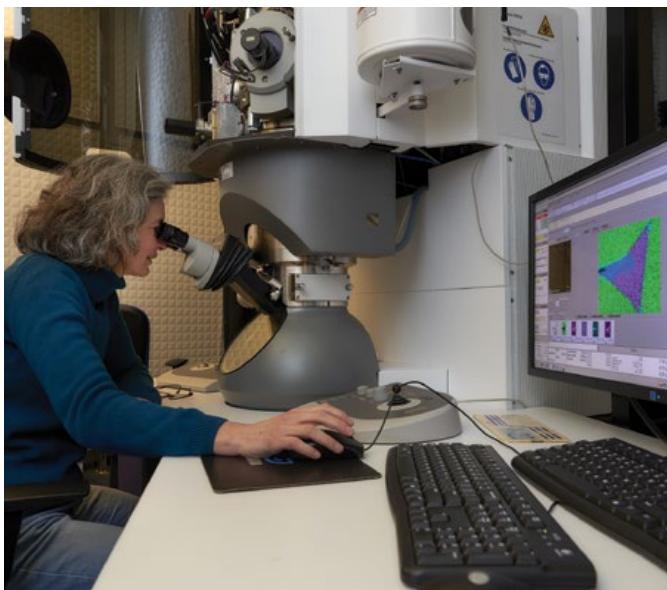
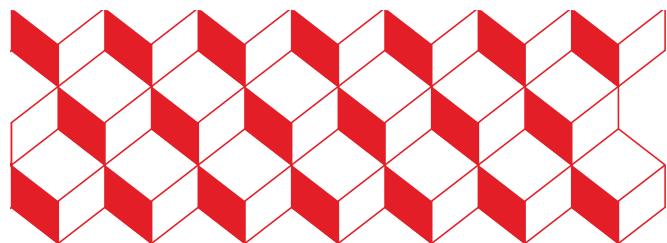
RAPPORT ANNUEL 2022



La France et l'Europe font face à une double crise climatique et énergétique. Dans ce contexte, toutes les technologies à faible empreinte carbone sont nécessaires pour rapidement et drastiquement réduire notre consommation d'énergies fossiles. Il est donc indispensable de continuer à innover, pour soutenir l'effort industriel français et européen visant à maîtriser les chaînes de valeur de nouvelles technologies de l'énergie compétitives et respectueuses de l'environnement. C'est précisément le rôle et la mission d'un institut de recherche et développement comme le Liten.

Pour mener à bien ses missions de transfert vers l'industrie, le Liten s'appuie sur ses atouts : l'expertise de ses équipes, son interaction avec les écosystèmes scientifiques et industriels, sa propriété intellectuelle, et ses infrastructures de recherche. Pour le Liten, cela s'illustre en 2022 par la construction avec le CNRS des Programmes et Equipements Prioritaires de Recherche (PEPR) sur l'hydrogène, les batteries, et les technologies avancées des systèmes énergétiques, par un investissement de 20 millions d'euros dans de nouveaux équipements et infrastructures, ou encore par une participation active au programme européen Horizon Europe. Cette stratégie a notamment permis de consolider nos thématiques majeures telles que les batteries, l'hydrogène et le solaire photovoltaïque, mais aussi d'amplifier d'autres thématiques comme par exemple l'économie circulaire du carbone ou les aimants et d'intégrer une approche d'eco-innovation à l'ensemble de nos développements. Cela s'est traduit par la confiance renouvelée de plusieurs de nos partenaires industriels historiques, par la mise en place de programmes ambitieux avec de nouveaux partenaires, par la création de start-ups issues de nos projets de recherche et enfin par une visibilité accrue dans les grands salons et conférences ainsi que dans les médias.

Ce document présente les réalisations marquantes de 2022, une année riche en coopérations scientifiques, progrès technologiques, et en évènements fédérateurs comme la première édition des Liten Days. Il reflète comment notre expertise et nos innovations nous permettent d'offrir à l'industrie française et européenne des solutions de pointe pour relever les défis de la transition énergétique.



Sommaire

LE LITEN

- Acteur majeur de la transition énergétique 4
- 1ère édition des Liten Days 5
- Témoignages de partenaires 6
- PEPR : les technologies-clés pour la transition écologique 7
- Investissements 2022 – 2023 8

LA PRODUCTION D'ÉNERGIE DÉCARBONÉE

- Le photovoltaïque à haute performance 10
- Les nouvelles générations photovoltaïques 12
- La production photovoltaïque massive 13
- Le « PV everywhere » 14

STOCKAGE ET SOLUTIONS DE FLEXIBILITÉ

- Électrolyse haute température 16
- Les Piles PEMFC à combustible 18
- Stockage et transport d'hydrogène 20
- Les batteries 22

SYSTÈMES, RÉSEAUX ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

- Gestion de l'énergie thermique 26
- Systèmes & Réseaux énergétiques 28
- Des convertisseurs de puissance 30

ÉCONOMIE CIRCULAIRE

- Économie circulaire de la matière 32
- Matériaux & procédés éco-innovants 34
- Économie circulaire du carbone 39
- Les nouvelles start-up du Liten 42

LE LITEN, ACTEUR MAJEUR DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Le CEA-Liten, membre de l'institut Carnot Énergies du futur, implanté sur les centres du CEA-Grenoble et d'INES (Chambéry), est dédié à la transition énergétique. Ses activités se concentrent sur plusieurs domaines clés : l'énergie solaire, le pilotage des réseaux, le stockage dont les batteries et l'hydrogène dans une logique d'efficacité énergétique et d'économie circulaire. Il adresse de nombreuses applications dans les marchés de la production et la distribution d'énergie, des transports, des procédés industriels, et de l'environnement. Fort de son positionnement au sein du CEA, le Liten est un acteur majeur de la recherche technologique en développant des solutions complémentaires, compétitives et plus respectueuses de l'environnement afin de déployer une stratégie énergétique multi-vecteurs, multi-échelles et multi-temporalités.

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

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



CHIFFRES-CLÉS
2022

1000
SALARIÉS

180
DOCTORANTS

160
MILLIONS € DE
BUDGET ANNUEL

> 1900
FAMILLES DE BREVETS
EN PORTEFEUILLE

> 200
PUBLICATIONS/AN

> 200
PARTENAIRES
INDUSTRIELS

> 200
PROJETS
INSTITUTIONNELS

12
PLATEFORMES

LA RECHERCHE ET L'INDUSTRIE SE RENCONTRENT À L'OCCASION DE LA 1ÈRE ÉDITION DES LITEN DAYS



Organisés le 30 novembre et 1^{er} décembre 2022 à Minatec, les Litén Days ont rassemblé plus de 200 participants qui ont salué la richesse des échanges et la qualité des interventions de cette première édition.

Regroupant les leaders scientifiques, industriels et les autorités publiques, les Litén Days visent à stimuler l'innovation, à créer des liens et à inspirer de nouveaux projets qui favoriseront la transition vers un avenir durable.

Convaincu que la recherche et l'innovation ont un rôle prépondérant à jouer face aux enjeux climatiques et environnementaux, nous avons construit le programme sous le thème « Accélérer la transition vers l'énergie durable grâce à l'innovation ». En ouverture, une table ronde a

rassemblé nos partenaires qui ont partagé leur vision sur les ruptures nécessaires pour saisir les opportunités de marché et lever les verrous pour accélérer la transition énergétique. Les conférences sur l'électrification de masse de l'énergie, l'industrie zéro carbone ou encore la nouvelle électrochimie pour une mobilité propre, ont donné l'occasion aux participants de découvrir les dernières avancées technologiques portées par le CEA.

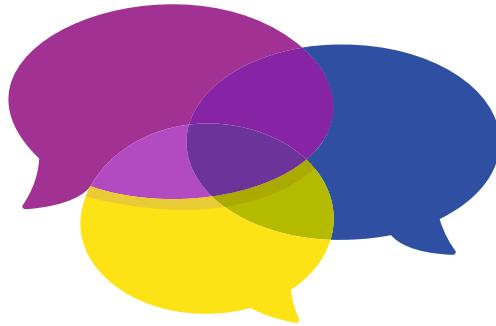
La visite des infrastructures de recherche du site de Grenoble, les discussions avec les chercheurs et les rencontres individuelles avec les responsables du développement partenarial du CEA-Liten ont enrichi l'évènement. Ces échanges se sont poursuivis dans un cadre plus festif lors d'une soirée de networking.

Cet événement a enfin été l'occasion de célébrer, avec les collègues académiques, les 15 ans du label d'excellence « Carnot Energies du Futur », récompensant la capacité du CEA-Liten avec l'écosystème de recherche grenoblois à innover pour l'industrie. Les laboratoires publics labélisés Carnot mettent en œuvre une politique volontariste d'excellence scientifique et technologique en faveur de la création de valeur et de la recherche partenariale avec le monde socio-économique.



TÉMOIGNAGES DE PARTENAIRES

Quelques partenaires clés du CEA-Liten nous parlent de leur collaboration avec les équipes de recherche de l'institut :



“

Yves Van Rompay

Senior Vice President

corporate R&D at Umicore

Nous travaillons avec le CEA depuis environ 12 ans, et notre collaboration porte principalement sur le développement de matériaux pour les batteries. Il s'agit à présent d'une collaboration très fonctionnelle qui va bien au-delà des matériaux pour batteries. Dans le cadre du RISE 2030 d'Umicore, l'ambition d'Umicore est d'être un véritable partenaire du changement pour ses clients, en les guidant dans leur transition vers une plus grande durabilité et circularité. Umicore vise à accélérer la transition globale vers une mobilité décarbonée, et a inauguré une giga-usine de production de matériaux pour batteries en Pologne, la première de ce type en Europe ! Nous allons poursuivre notre coopération avec le CEA pour relever les défis liés à la rareté des matériaux et au développement de nouveaux matériaux, mais aussi de nouveaux systèmes. Je pense que le CEA est le parfait partenaire pour nos futurs projets.”

“

Cosimo Gerardi

Head of innovability, CTO – 3SUN gigafactory, Enel Green power

Nous avons noué depuis longtemps une solide collaboration avec le CEA. Depuis 2015, le CEA à l'INES nous a soutenus pour rendre compétitives et industrialisables des technologies très innovantes. Les perspectives sont très bonnes, car nous ambitionnons d'accroître le développement de nouvelles cellules solaires à hautes performances. En effet, Enel fait de grands investissements en Europe, et nous pensons aussi nous développer aux États-Unis. Les bons résultats obtenus grâce au fort soutien technique des équipes du CEA sont très prometteurs et nous permettent d'être perçus comme un concurrent des géants du secteur photovoltaïque.”

“

Gavin Rennick

Président - SLB New Energy

Le CEA a toujours été un excellent partenaire. Ensemble, nous avons investi dans GENVIA, qui est une société conjointe unique, avec un énorme potentiel. Grâce à la parfaite combinaison entre la recherche, des collaborateurs intelligents et talentueux, et une organisation industrielle, nous développons des technologies pouvant avoir un grand impact et être mises en œuvre à grande échelle. C'est un réel plaisir de travailler avec le CEA, et ce n'est que le début de notre collaboration avec, en perspective, de nombreux développements passionnants.”

En tant que RTO, une de nos premières missions est d'accompagner nos partenaires dans leurs développements technologiques et industriels.

PEPR : LES TECHNOLOGIES-CLÉS POUR LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE AU CŒUR DES STRATÉGIES NATIONALES



Le plan France 2030 prévoit d'investir massivement dans les technologies innovantes pour soutenir la transition écologique. A ce titre, dans le cadre du volet *Financement des investissements stratégiques*, la recherche la plus fondamentale est financée par les Programmes et Equipements Prioritaires de Recherche (PEPR).

Acteur majeur de la recherche, le CEA-Liten prend une part active dans plusieurs projets comme coordinateur ou contributeur des PEPR Hydrogène, Batteries, Technologies Avancées sur les Systèmes Energétiques (TASE), Décarbonation de l'industrie et Recyclage. Le CEA est copilote des trois premiers.

Les enjeux des PEPR

Au cœur des stratégies nationales et européennes, les PEPR visent à construire ou consolider un leadership dans les domaines scientifiques prioritaires, qu'ils soient liés à une transformation technologique, économique, sociétale, sanitaire ou environnementale.

Comment ? L'Etat lance une stratégie nationale globale et coordonnée – normative, financière et fiscale – et le PEPR doit permettre la levée des barrières et verrous scientifiques liés à cette stratégie.

France 2030 finance deux types de PEPR :

- **Les PEPR adossés aux stratégies nationales d'accélération** qui accompagnent une transformation déjà engagée.
- **Les PEPR exploratoires** pour financer les transformations émergentes, à leurs prémices.

Dans le PIA4 – quatrième Programme d'Investissement d'Avenir – l'Etat a ainsi validé plusieurs stratégies en lien avec des technologies clés pour la transition énergétique : l'hydrogène, les batteries, les réseaux électriques, l'énergie photovoltaïque et la décarbonation de l'industrie.

Déployer les systèmes hydrogène en levant les verrous technologiques et freins socio-économiques

Pour exemple, le PEPR Hydrogène vise à soutenir une filière hydrogène en France portée par des leaders industriels qui puissent exporter leurs produits et savoir-faire et au final créer des emplois. A cette fin, il s'est vu attribuer 83,1 M€.

Ses travaux de recherche concernent plus précisément les thématiques de :

- production d'hydrogène décarboné par électrolyse et photo-électro-catalyse
- stockage dans des milieux liquide (H₂ cryogénique, LOHC, ammoniac), solide, ou gaz
- conversion dans des piles à combustible et combustion thermique.

Un projet sera également dédié aux analyses socio-technico-économiques et études des cycles de vie de tous ces systèmes hydrogène.

Les implications du CEA dans les PEPR Hydrogène, Batteries et TASE

- **Le PEPR Hydrogène** dispose aujourd'hui d'un portefeuille de dix-neuf projets. Le CEA-Liten en coordonne trois et est impliqué dans cinq autres.
- **Le PEPR Batteries** copiloté par le CNRS et le CEA et doté d'un budget de 45,66 M€ démarre avec un portefeuille de cinq projets ciblés et deux projets d'équipements. Le Liten en coordonne deux (dont un d'équipement) et est contributeur dans les quatre autres projets ciblés.
- Enfin, le CEA copilote, toujours avec le CNRS, le **PEPR TASE sur les Technologies Avancées sur les Systèmes Energétiques** et est impliqué dans d'autres programmes sans en être pilote, comme le PEPR sur la décarbonation de l'industrie.

INVESTISSEMENTS 2022-2023

En tant que RTO, nous disposons de solides atouts : notre expertise, notre portefeuille de brevets et nos plateformes technologiques de classe mondiale. Le maintien à l'état de l'art de ces dernières, aussi bien en termes d'infrastructures que d'équipements, s'avère donc essentiel. Dans cet objectif, le CEA-Liten a mis en place un plan pluriannuel d'investissements décliné en fonction de nos axes stratégiques de recherche. Le maintien à l'état de l'art de ces dernières, aussi bien en termes d'infrastructures que d'équipements, s'avère donc essentiel. Dans cet objectif, le CEA-Liten a mis en place un plan pluriannuel d'investissements décliné en fonction de nos axes stratégiques de recherche. Les fonds engagés en 2022 ont permis de lancer plusieurs projets prometteurs dont :



20 M€ investis en 2022 dans des programmes de recherche majeurs

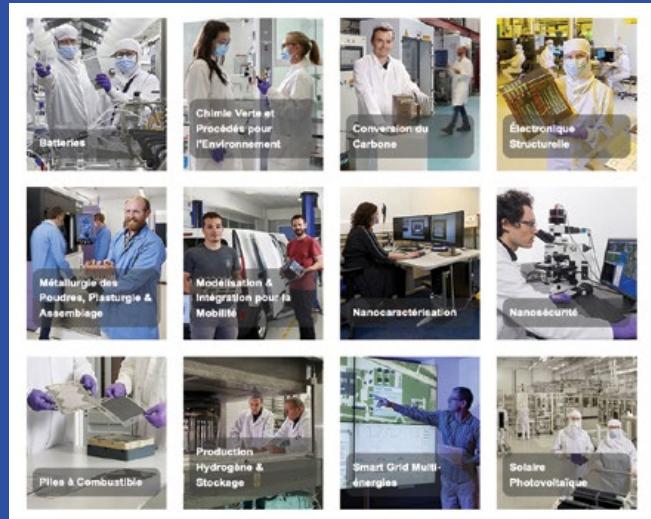
Investissements 2023 : une montée en puissance des axes stratégiques de R&D

Dans cette optique de financement de recherches déterminantes pour la réduction de l'empreinte carbone, les investissements 2023 porteront sur :

- Les réseaux énergétiques et les smartgrids
- La métallurgie des poudres
- Les piles à combustible et la production massive d'hydrogène par la technologie d'électrolyse haute température
- La plateforme de caractérisation, en soutien de l'ensemble de nos axes de recherche et en collaboration avec les Grands Instruments ainsi que nos autres partenaires de l'écosystème grenoblois.

Ces investissements seront réalisés en partie sur fonds propres et en partie avec l'aide de nos partenaires institutionnels : la région Auvergne-Rhône-Alpes et le plan d'investissement France 2030.

Découvrez les 12 plateformes technologiques du Liten sur notre site internet : <https://liten.cea.fr>



plateforme **batteries**

plateforme **chimie verte et procédés pour l'environnement**

plateforme **conversion du carbone**

plateforme **électronique structurelle**

plateforme **modélisation et intégration pour la mobilité**

plateforme **nanocaractérisation**

plateforme **nanosécurité**

plateforme **piles à combustible**

plateforme **procédés pour la métallurgie des poudres, la plasturgie et l'assemblage**

plateforme **production et stockage d'hydrogène**

plateforme **smart grid**

plateforme **solaire photovoltaïque**

LA PRODUCTION D'ÉNERGIE DÉCARBONÉE

Le photovoltaïque (PV) est amené à prendre une part décisive dans le mix énergétique mondial car il permet de produire une électricité à faible empreinte carbone, bon marché et au plus près des consommateurs. Le Liten soutient son essor en développant des technologies qui permettent une augmentation des rendements de conversion, comme l'hétérojonction ou les tandems silicium/pérovskite, qui dépasseront les 30%. Il adresse dans ses recherches les problématiques des centrales photovoltaïques au sol pour optimiser leur productivité, d'intégration du PV sur diverses infrastructures pour minimiser l'empreinte au sol, et d'autonomie énergétique de tous types d'objets nomades, depuis la montre connectée jusqu'au satellite.



1 Le photovoltaïque à haute performance

La cellule solaire est au cœur de tout système photovoltaïque. L'objectif ultime, c'est le rendement à un coût maîtrisé ! La mise en module est également une étape clef, qui combine deux défis : la connexion des cellules entre elles pour réaliser un composant d'une puissance significative et la recherche d'une enveloppe transparente et étanche permettant de protéger les cellules de l'environnement extérieur. Les développements menés au Liten sur ces sujets, qui ont donné lieu à un premier transfert industriel réussi vers Enel Green Power, ont pour objectif d'accompagner les industriels vers la mise en place d'une chaîne de valeur stratégique contribuant à l'indépendance énergétique française et européenne.

EN CHIFFRES



20

PUBLICATIONS

400

BREVETS

30

DOCTORANTS

200

SALARIÉS

Record de rendement pour une cellule HET de taille industrielle

L'obtention de hauts rendements de conversion pour les cellules à hétérojonction implique que les wafers de silicium utilisés soient de très haute qualité, le choix par excellence se portant sur les wafers de type N obtenus par tirage Czochralski (Cz). Les wafers de type P, les plus utilisés dans le monde, bénéficient d'un coût inférieur mais pâtissent de performances électroniques diminuées par des phénomènes de dégradation sous lumière. Une nouvelle voie de fabrication utilisant un dopage au gallium (Ga) s'est récemment déployée à grande échelle, les rendant insensibles à ces phénomènes : les cellules à hétérojonction de type P pourraient ainsi devenir compétitives par rapport au type N !

Dans le cadre du partenariat entre le CEA à l'INES et Enel Green Power pour l'industrialisation de la technologie de cellules à hétérojonction (HET) en Europe, l'utilisation de wafers dopés

Ga a permis d'atteindre un nouveau jalon : l'obtention d'un record mondial à 24,47 % pour une cellule HET de silicium de type P de surface industrielle, certifié par ISFH Caltec. Cela en utilisant les mêmes procédés de réalisation que le type N.

Rendement de conversion
24,47%
Record mondial

Vers des panneaux photovoltaïques très bas bilan carbone

Le CEA est engagé dans une démarche de réduction de l'impact environnemental de la filière photovoltaïque. Une étude de sensibilité d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) a été réalisée sur la technologie hétérojonction, qui a permis d'optimiser les aspects les plus critiques pour le bilan carbone : diminution de l'épaisseur des plaques de silicium, optimisation des procédés de métallisation et d'interconnexion pour limiter la consommation d'indium et d'argent, utilisation d'un verre plus fin en face avant et substitution du cadre en aluminium par un cadre en matière végétale. L'approche favorise l'utilisation de composants fabriqués en Europe. Les encapsulants thermoplastiques et backsheet sans fluor sélectionnés favoriseront le recyclage. Le panneau PV démonstrateur réalisé au CEA (photo) suite à cette étude présente un très bas bilan carbone de 317 kg CO₂éq/kWc (comparé au standard de 700 à 800 kg CO₂éq/kWc) pour une puissance de 566 Wp, et place l'institut parmi les leaders au niveau européen.



Panneau démonstrateur éco-conçu, 317 kg CO₂ éq/kWc, fabriqué par les équipes du CEA

2 Les nouvelles générations photovoltaïques

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

Des modules solaires flexibles pérovskites encapsulés de 11,6 cm²

L'usage de substrats flexibles pour la technologie solaire pérovskite (PK) ouvre la voie vers des procédés d'impression à haute cadence et à basse température, avec pour défi de réaliser des dispositifs sur de plus grandes surfaces avec des stabilités suffisantes. Dans le cadre du projet européen APOLO, le CEA à l'INES a réalisé des modules PK flexibles d'une surface de 11,6 cm² avec un rendement de conversion de puissance de 18,95 %, sur substrat bas coûts (PET), avec une structure composée de seulement 5 couches.

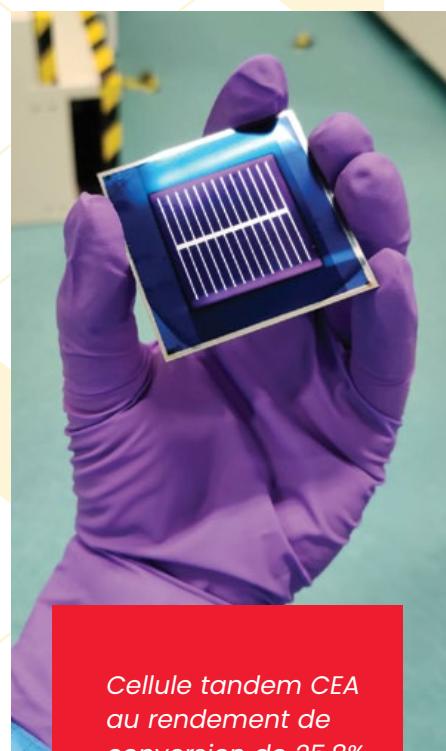
La stabilité des dispositifs en conditions de chaleur humide atteint plusieurs centaines d'heures - 400 à 800 h selon encapsulation considérant un objectif de la norme à 1000 h. Testés à l'institut Fraunhofer ISE pour des applications en intérieur, les modules des rendements de conversion de puissance allant jusqu'à 24,5 % à très faible illumination (500 lux).

caractérisation de cellules tandems est également un prérequis pour améliorer la quantification des performances optiques du dispositif de façon plus fiable. Il s'agira ensuite de transposer les résultats obtenus avec des méthodes de dépôt compatibles grande surface.

Technologie tandem Si/PK : rendement record pour une architecture PIN

Le CEA à l'INES, en collaboration avec Enel Green Power et sa filiale 3SUN de Catane, développe la technologie tandem Si/PK (Pérovskite-Silicium) sur deux terminaux avec l'objectif d'atteindre de hauts rendements aux formats classiques du PV, avec des procédés industrialisables. Les travaux initiés en 2021 sur l'architecture de type PIN ont permis d'obtenir un nouveau rendement de conversion record de 25,8 % sur une surface de 9 cm², avec correction d'ombrage.

La course vers des cellules Tandem Si/PK d'architecture PIN à plus forts rendements (> 30 %), sur grandes surfaces texturées et industrialisables, demandera encore des efforts dans les années à venir. Le développement de la



Cellule tandem CEA au rendement de conversion de 25,8 % sur 9 cm²

3 La production photovoltaïque massive

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

Une technologie de diagnostic avancé pour centrales solaires

Dans un marché photovoltaïque en pleine croissance, le diagnostic des centrales à l'aide de méthodes intelligentes est un domaine de recherche très actif. En partenariat avec la société Ener-Pacte, le CEA a développé une solution logicielle complète de diagnostic avancé couplant imagerie et mesures électriques. Elle intègre le résultat de travaux initiés dès 2014 dans le cadre de l'ITE INES.2S*. Elle utilise des images thermographiques acquises par drone, pour l'inspection des défauts et l'estimation des pertes sur les chaînes photovoltaïques. Les deux logiciels prototypes ont été amenés à un degré de maturité permettant une utilisation opérationnelle performante par Ener-Pacte.

36 convertisseurs prototypes DC/DC MPPT ont été installés sur un site démonstrateur du CEA à Cadarache, pour réaliser les tests en condition réelle de fonctionnement

Étudier plus efficacement le vieillissement des panneaux solaires

Les panneaux solaires doivent résister au moins 25 années en opération. Dans le cadre de l'ITE INES.2S*, le CEA développe une méthode de vieillissements accélérés/combinés qui permet de révéler les mécanismes de dégradation des modules PV en limitant la durée et le nombre de tests. Elle permet de sonder certains effets que ne permettent pas de révéler la norme IEC 61215 actuelle, dans un temps réduit.

* L'ITE INES.2S, porté par le CEA à l'INES, est cofinancé par le gouvernement français dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir (ANR-10-IDEE-0014-01).

Un « berger électronique » pour panneaux solaires

Enel Green Power et le CEA développent des panneaux PV bifaciaux haut rendement, destinés entre autres à des applications en grandes centrales au sol. Dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique de ces centrales, les deux partenaires ont développé une solution électronique de type DC/DC MPPT (Maximum Power Point Tracker) d'une puissance maximum de 500 W, au niveau du module (photo). Elle permet d'augmenter le nombre de panneaux dans une chaîne afin d'augmenter la puissance globale, dans le domaine de la basse tension (< 1500 Vdc), et de réduire l'impact du déséquilibre de production entre panneaux connectés en série.



4

Le « PV everywhere »

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

Un système photovoltaïque en soutien du secteur ferroviaire

La SNCF et SNCF Réseau ont noué une collaboration avec le CEA à l'INES pour développer des systèmes PV capables de fonctionner à des tensions allant jusqu'à 9000 Vdc. L'objectif est double ; proposer des panneaux PV dédiés pour adresser un réseau continu à 3 k Vdc, 6 k Vdc et 9 k Vdc tout en optimisant les coûts d'opération, et améliorer la durabilité de ces technologies.

Le marché actuel ne propose pas de panneaux pour des tensions supérieures à 1500 Vdc, aussi la SNCF va bénéficier des compétences du CEA qui a déjà développé des technologies tenant la gamme de tension de 3000 Vdc. Une centrale expérimentale de 3000 Vdc est également en cours d'installation à l'INES dans le cadre du projet Européen H2020 Tigon.



Ce projet valorise les travaux de l'ITE INES.2S, cofinancé par le gouvernement français dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir France 2030 (ANR-10-IEED-0014-01).

Rouler à l'énergie solaire

Le CEA développe depuis plusieurs années des concepts avancés d'intégration du photovoltaïque dans le véhicule électrique. Parmi ces travaux, il a présenté un prototype de capot solaire au CES de Las Vegas en 2023. Les panneaux composites intègrent des cellules solaires haute performance à hétérojonction de silicium. Légers, avec moins de 5 kg/m², à la forme du véhicule comme pièce de carrosserie, ces panneaux présentent également une faible empreinte environnementale grâce à l'utilisation de matériaux thermoplastiques recyclables. Ils sont fabriqués en utilisant un procédé par thermocompression compatible avec une production de masse.



Technologie d'interconnexion pour les cellules photovoltaïques de type n avec réduction de la consommation d'Ag

Contexte

Historiquement, l'augmentation de l'efficacité des modules a été largement due à l'amélioration des rendements des cellules photovoltaïques. Au cours des 3-5 dernières années, les innovations dans les domaines de la technologie d'interconnexion et des matériaux des modules ont changé la donne. Alors que le déploiement du PV a atteint l'échelle du TerraWatt, des considérations environnementales telles que l'utilisation de matières premières critiques sont devenues depuis peu un nouvel élément clé pour les modules PV. Plus précisément, la réduction de la consommation d'Ag est essentielle pour garantir une croissance durable alors que déjà 10% de l'approvisionnement mondial ont été consacrés au PV en 2020^[1].



Approche & Résultats

Le CEA-Liten a présenté ses toutes dernières recherches dans un article^[2] sur les modules haute puissance avec des cellules hétérojonction type n, à l'intersection des matériaux et des procédés, avec le développement du procédé d'interconnexion basse température basé sur l'utilisation d'un adhésif conducteur d'électricité (ACE) et de rubans sans plomb. Pour éviter une détérioration importante de la passivation de surface des cellules, les procédés de métallisation et d'interconnexion des cellules solaires à hétérojonction (SHJ) doivent être réalisés à des températures inférieures à 200°C, et la technologie tandem à deux terminaux avec une sous-cellule

photovoltaïque à pérovskite impose une réduction encore plus importante des températures de procédé avec un maximum de 130°C.

Tout d'abord, la démonstration d'une impression par sérigraphie basée sur un dépôt d'ACE avec une précision accrue de seulement 100 µm a été présentée sur un outil à échelle pilote. Ce niveau de précision est l'un des moyens les plus importants pour réduire encore la quantité d'ACE déposée et diminuer l'usage d'Ag^[1,2].

De plus, l'étude de la compatibilité des matériaux d'un type innovant d'ACE et de rubans d'interconnexion à faible teneur en Ag ou à mélange Ag/Cu a permis de réduire la consommation

globale d'Ag tout en maintenant la performance et la fiabilité du dispositif.

Pour soutenir ces développements la cinétique de réticulation des ACEs est obtenu à partir d'une analyse par calorimétrie différentielle à balayage. Nous avons pu démontrer la faisabilité d'une interconnexion à des températures inférieures à 130°C avec une adhésion suffisante (> 0.8 N/mm) du ruban sur la métallisation de la cellule.

Conclusion

Ces avancées permettent de définir une feuille de route technologique visant une consommation d'Ag < 25 mg/Wp à court terme, chiffre qui pourrait atteindre un niveau durable inférieur à 5-10 mg/Wp^[3] sur le moyen terme.

De plus, la diversification des technologies des modules représente un changement de s'imposer. Une revue des technologies de pointe en matière d'interconnexion et de leurs combinaisons avec des matériaux innovants est présentée dans un livre prochainement édité^[4].

Références

- [1] - Y. Zhang et al., "Design considerations for multi-terawatt scale manufacturing of existing and future photovoltaic technologies: challenges and opportunities related to silver, indium and bismuth consumption", *Energy Environ. Sci.*, vol. 14, no 11, p. 5587-5610, (2021)
- [2] - R. Monna et al., "Latest advances of ECA-based tabbing and stringing at CEA-INES", *Photovoltaics International*, E. 48 (2022)
- [3] - E. Voroshazi et al., "Sustainable Silicon PV Cell and Module Materials and Technologies", 48th IEEE PVSC, plenary invited presentation (2022)
- [4] - V. Barth et al., "Chapter 4.4: Advanced module concepts", *n-Type Crystalline Silicon Photovoltaics:Technology, applications and economics*, EIT, ISBN 978-1-83953-176-7 (2022)

STOCKAGE ET SOLUTIONS DE FLEXIBILITÉ

Le stockage de l'énergie est un enjeu majeur pour accompagner l'essor des énergies renouvelables et leur utilisation dans les différents secteurs applicatifs (transport, industrie, bâtiment).

Le Liten travaille sur deux solutions principales :

les batteries et le vecteur hydrogène. Nos développements sur les batteries répondent aux demandes de densité d'énergie croissante tout en garantissant leur fiabilité et leur sécurité. Concernant le vecteur hydrogène, le Liten a une approche globale, de la production par électrolyse, au stockage et transport, jusqu'à la conversion par des piles à combustible.



1 L'électrolyse haute température

Le développement massif de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique nécessite une production décarbonée de cet hydrogène par des procédés émettant peu de gaz à effet de serre. Le CEA développe depuis plus de 15 ans un procédé de production d'hydrogène par électrolyse de la vapeur d'eau à haute température (EHT) basé sur la technologie SOC (solid oxide cell). Cette technologie présente un rendement de conversion supérieur de 15 points par rapport aux autres technologies d'électrolyse conventionnelle. De plus, elle présente également la spécificité d'être réversible, pouvant ainsi fonctionner en mode pile à combustible, en produisant de l'électricité (et de la chaleur) à partir de différents types de combustible dont des gaz à faible empreinte carbone, comme l'ammoniac par exemple.

EN CHIFFRES

50
PUBLICATIONS

750
BREVETS

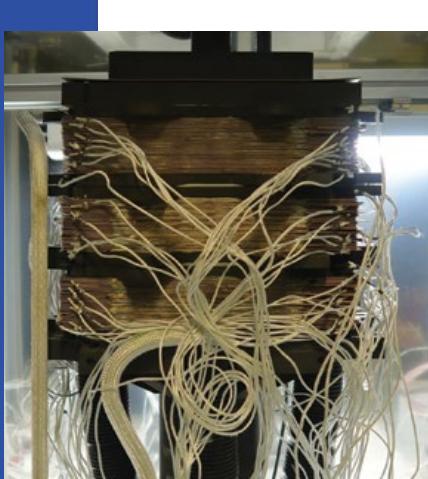
70
DOCTORANTS

400
SALARIÉS

Augmentation de la taille des stacks

L'Europe vise une production massive d'hydrogène en 2030 pour répondre à ses objectifs de décarbonation et de souveraineté énergétique. L'installation de capacités d'électrolyse de l'ordre de la centaine de GW sera nécessaire, nécessitant des travaux de montée en maturité et en échelle de ces briques technologiques. L'augmentation de la taille des composants individuels est un point clé. Le CEA-Liten a intégré avec succès des cellules plus grandes – 200 cm² de surface active, deux fois plus que des cellules de référence de 100 cm², dans des empilements (stacks) de taille « standard » de 25 cellules. Dans le cadre du partenariat avec Genvia, deux voies ont alors été explorées pour développer des stacks comportant un plus grand nombre de cellules. Dans un premier temps, un empilement « monolithique » constitué de 50 cellules de 200 cm² a été assemblé et testé. Une densité de courant de 0,9 A/cm² à 1,3 V et 700 °C a été mesurée, similaire aux résultats obtenus sur l'empilement de 25 cellules de 100 cm² de référence.

Stack 75-200
formé de
l'assemblage de
3 sous-stacks
25 -200



Dans un second temps, trois sous-stacks constitués de 25 cellules de 200 cm² ont été assemblés pour former un empilement de 75 cellules grâce à des plaques de liaison intersous-stacks.

Vers une durabilité accrue des stacks

Dans le cadre du projet européen MULTIPLHY, qui vise le développement et l'installation d'un électrolyseur à oxyde solide de plusieurs mégawatts (~2,4 MW), un protocole de test harmonisé a été développé pour comparer les performances de deux technologies de stacks d'électrolyse haute température : CSS (cathode support) et ESS (électrolyte support). Dans ce cadre, un test de durabilité d'une durée totale de 6800 heures sur un stack CSS de 25 cellules de 100 cm² a été réalisé au CEA. La stratégie de pilotage mise en œuvre a permis de conserver sans perte de performance la production d'hydrogène visée tout au long de cet essai.



Conférence

Julie Mougin, adjointe au directeur du Liten, en charge des technologies hydrogène, et Jérôme Laurencin, expert-senior SOC au CEA-Liten, ont présidé la 15^{ème} édition du forum EFCF (15th European SOFC and SOE forum) dédié aux piles à combustibles et électrolyseurs à oxyde solide, qui s'est tenu en Suisse, à Lucerne, du 5 au 8 juillet 2022. Cette conférence, la plus importante au niveau international sur les technologies à oxydes solides, établit le lien entre la recherche scientifique et les applications électrolyse (SOE), pile à combustible (SOFC) et réversible (rsoc).



2 Les piles à combustible PEMFC

Le CEA travaille depuis 25 ans au développement de piles à combustible à membranes échangeuses de protons (PEMFC). Cette technologie est particulièrement adaptée à certains types de transports lourds ou intensifs, pour lesquels le poids et l'encombrement des batteries restent pénalisants. Associée à un stockage sous une pression de 700 bars aux standards internationaux, la technologie PEMFC devient concurrente des véhicules thermiques tant vis-à-vis de l'autonomie que du temps de recharge. Les travaux de recherche se poursuivent pour abaisser les coûts de production des piles, tout en améliorant leurs performances, et en allongeant leur durée de vie.

Une PEMFC pour la mobilité lourde

La température maximale de fonctionnement des PEMFC commerciales, de 80 °C, est actuellement un frein au déploiement de la technologie pour décarboner l'application de transport lourd.

Dans le cadre d'un projet ANR collaboratif CEA/CNRS, le Litén doit développer un Assemblage Membrane Electrodes (AME) pour pile PEMFC performant à une température nominale de 95 °C. Les équipes ont démarré des essais à partir de matériaux commerciaux, optimisé la formulation et la mise en œuvre des encres de cathode ainsi que la composition de l'électrode. Les essais réalisés en cellule de 25 cm², en conditions représentatives du système opérationnel, montrent que l'AME CEA est jusqu'à 30 % plus performant à 95 °C que les meilleurs AME commerciaux, et ce, à un rendement de 60 %.



Laboratoire de chimie pour les piles PEMFC



Un nouvel acteur de pile à combustible haute puissance

Le projet initial GEN Z, mené par le CEA avec Mike Horn, consistait à développer une chaîne de traction complète pour un véhicule de rallye raid intégrant une technologie innovante de pile PEMFC. Ce projet a pris un tournant décisif en 2022 avec la création d'INOCEL. L'entreprise a vocation à industrialiser des systèmes performants et compétitifs sur le marché mondial avec des solutions clés en main de chaînes énergétiques hydrogène, notamment des piles à combustible basse température innovantes. La société vise les marchés de la mobilité lourde, maritime, terrestre, les véhicules haute performance à vocation sportive et la production d'énergie. Pour poursuivre l'intégration de technologies innovantes, INOCEL poursuit une collaboration de long terme avec le CEA.

Étude des hétérogénéités de l'eau liquide dans les piles à combustible de grande dimension à membrane échangeuse de protons en utilisant un modèle de flux de Darcy diphasique dans un code multiphysique^[1]

Contexte

Une gestion efficace de l'eau liquide et de la chaleur produites dans les piles à combustible à membrane échangeuse de protons est essentielle pour augmenter leurs performances et leur durabilité. L'eau est présente dans toutes les couches^[2] de la pile à combustible en raison de l'humidification des gaz d'entrée, de la production d'eau par la réaction électrochimique et du déplacement de l'eau à l'intérieur de la pile. Trouver un équilibre entre l'assèchement de la membrane (réduction de la conductivité électrique) et la saturation des cellules (baisse de la concentration en réactifs) est une tâche difficile, mais nécessaire pour une bonne gestion de l'eau.

Approche & Résultats

Un modèle d'écoulement diphasique multi-constituants, appelé modèle à deux fluides (2-F) est développé avec le logiciel COMSOL Multiphysics® pour étudier les hétérogénéités de l'eau liquide dans les piles à combustible à membrane échangeuse de protons de grande dimension, en prenant en compte les champs d'écoulement réels de la plaque bipolaire. En effet, un modèle 3D complet n'est, pour le moment, pas adapté à la simulation d'une pile complète présentant une conception réaliste pour des applications de transport, en raison du temps de calcul nécessaire pour des piles à combustible de telles dimensions. Une approche macroscopique multicouche pseudo-3D a donc été choisie.

Un modèle à un fluide (1-F) a été auparavant développé et validé par comparaison avec la température, la densité de courant^[3] et la quantité d'eau liquide obtenues à partir de mesures d'imagerie neutronique^[4]. Il combinait une formulation d'écoulement monophasique avec un modèle de condensation utilisé dans un processus de post-traitement. De bons résultats numériques ont été obtenus pour plusieurs applications automobiles de faible puissance, mais une mauvaise capacité de prédiction a été observée pour des conditions de fonctionnement à de plus hautes puissances.

Le nouveau modèle 2-F a nécessité le développement d'une méthode spécifique de calcul de moyenne volumique locale et d'une formulation en pseudo-3D des équations de conservation (Fig. 1). Les résultats numériques sont comparés aux résultats d'un modèle 1-F et aux mesures de l'eau liquide pour plusieurs conditions de fonctionnement et les résultats numériques sont examinés pour chaque composant de la pile à combustible, montrant des épaisseurs d'eau très hétérogènes à la surface des cellules.

Conclusion

Alors que les résultats numériques du modèle 1-F surestiment

considérablement la quantité d'eau liquide et ne peuvent pas représenter correctement sa répartition, le nouveau modèle 2-F correspond plus précisément aux mesures. En outre, le modèle 2-F peut identifier les zones sèches et les zones saturées de chaque couche de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (canaux, électrodes de diffusion des gaz, etc.), information qui ne peut être obtenue par l'expérimentation. Par exemple, le modèle prédit une sortie d'air sec (admission d'hydrogène) seulement dans les électrodes de diffusion de gaz et les canaux de gaz côté anode (Fig. 2).

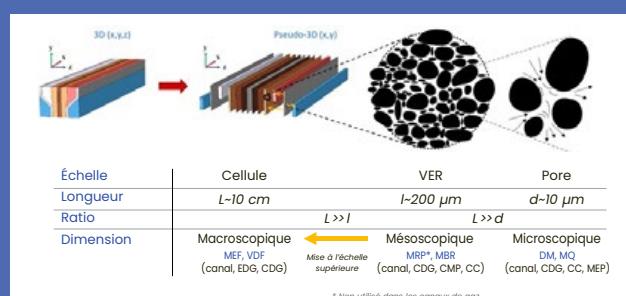


Figure 1 :
D'un modèle 3D complet à un modèle pseudo-3D et les différentes échelles de modélisation d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons.

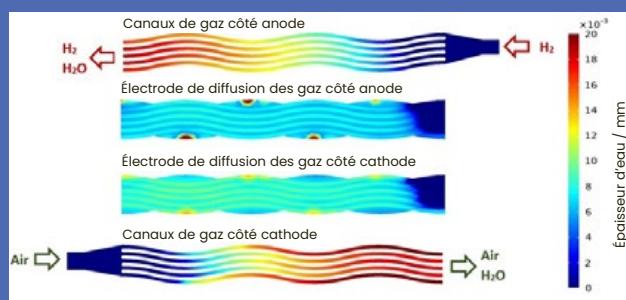


Figure 2 :
Répartition de l'épaisseur d'eau dans les canaux de gaz côtés anode et cathode et dans l'électrode de diffusion des gaz

Références :

- [1] E. Tardy et al., Int J Hydrogen Energ, vol. 47 (91), 38721-38735, 2022
[2] G. Zhang et al., J Power Sources, vol. 391, 120-133, 2018

- [3] F. Nandjou et al., Int J Hydrogen Energ, vol. 41 (34), 15573-15584, 2016
[4] E. Tardy et al., Int J Heat Mass Tran, vol. 45, 118720, 2019

3 Stockage et transport d'hydrogène

Le Liten étudie les infrastructures de transport et de stockage de l'hydrogène, en évaluant le comportement des matériaux en présence d'hydrogène. Plus récemment, il a initié des activités sur le stockage de l'hydrogène en milieu liquide à l'aide de molécules organiques de type LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers).

Des molécules pour stocker l'hydrogène en phase liquide

Le CEA développe une technologie de transport et de stockage de l'hydrogène en phase liquide, basée sur des vecteurs innovants (Liquid Organic Hydrogen Carrier : LOHC). Dans le cadre d'un projet Carnot, les équipes ont identifié le couple de molécules GBL-BDO* comme étant prometteur. Des catalyseurs développés pour les réactions d'hydrogénéation/déshydrogénéation montrent des performances supérieures à celles des catalyseurs commerciaux, en réacteurs batch. Un modèle cinétique a été établi pour décrire ces réactions. En parallèle, un banc de test de réacteurs continus a été conçu pour étudier ces réactions avec le couple GBL-BDO, et les résultats expérimentaux ont permis de valider un modèle de réacteur complet. Enfin, avec l'appui des modèles développés, une technologie de réacteur innovante a été imaginée, pour laquelle un brevet a été déposé.



Stockage de l'hydrogène par une réaction d'hydrogénéation / déshydrogénération

Vers un stockage sous-terrain de mélanges GN/H₂

Dans un contexte d'un recours croissant à l'hydrogène comme vecteur d'énergie dans l'industrie, STORENGY (filiale d'Engie) souhaite utiliser ses capacités de stockage sous-terrain de gaz naturel (GN) pour stocker du mélange GN+H₂. Ce partenaire a sollicité le CEA-Liten pour comprendre et caractériser le comportement des aciers de son réseau en présence de différents mélanges GN+H₂. Les dispositifs d'essais ont été adaptés pour mener des campagnes de tests représentatives des stockages souterrains de GN, via des mesures des propriétés de ténacité, de propagation de fissure par fatigue et de fatigue oligocyclique. Les premiers résultats permettent de dégager de tendances sur l'effet de la vapeur d'eau sur la sensibilité des aciers à l'hydrogène.

* gamma-butyrolactone (GBL) / 1,4-butanediol (BDO)



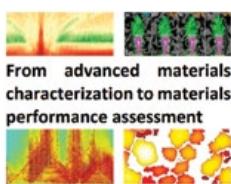
Lisa Blanchard a reçu le prix « Young Scientist Award » pour ses travaux au CEA-Liten sur la fragilisation par l'hydrogène gazeux des alliages métalliques, à l'occasion de la Semaine de l'Hydrogène organisée à Bruxelles en octobre 2022.

Des techniques de caractérisation avancée au service des développements technologiques

Le développement de nouveaux matériaux aux fonctionnalités améliorées pour la transition énergétique mais aussi celles numérique ou médicale nécessite des moyens de caractérisation de plus en plus sophistiqués, aux limites des résolutions spatiales et temporelles. Le Conseil Scientifique de la Direction de la Recherche Technologique du CEA (DRT) se réunit annuellement pour évaluer les résultats obtenus sur une thématique donnée, en les comparant aux meilleurs standards internationaux. Le thème choisi en 2022 concernait les techniques de caractérisation avancées mises en œuvre pour améliorer les performances et la durabilité des systèmes développés dans les laboratoires du CEA. Le rapport rédigé conjointement avec les instituts CEA-Leti et CEA-List a permis de mettre en avant non seulement les travaux de grande qualité réalisés auprès de la plateforme de nanocaractérisation (PFNC) et des grands instruments, mais aussi les développements instrumentaux et méthodologiques en cours pour pousser encore plus loin les limites des mesures au regard des applications visées.

2022

Technological Research Division
SCIENTIFIC COMMITTEE



Couverture du rapport scientifique de la DRT pour l'année 2022



Localisée sur la Presqu'île grenobloise, la PlateForme de NanoCaractérisation (PFNC) regroupe une cinquantaine d'équipements de caractérisation avancée, et collabore avec les Grands Instruments pour élargir le champ des possibles.

Le comité constitué de personnalités de haut niveau issues du monde académique et industriel¹ en charge de l'évaluation du rapport et des présentations associées (14-17 Novembre 2022) a souligné des travaux de classe mondiale autour de la caractérisation operando des systèmes énergétiques et par microscopie électronique. Parmi nos points forts, le comité a notamment relevé la compétence de nos chercheurs, l'excellent niveau du soutien des caractérisations aux programmes en cours, l'adéquation de la PFNC à répondre aux défis posés par les applications et notre prise en compte de la difficulté à gérer les données massives issues de la caractérisation.

1 - Dr. Paul Friedel (Directeur de IMT Atlantique), Dr. François Monnet (Président de l'association de chimie Plant), Prof. Subashish Mitra (Université de Stanford), Dr. Patrick Gros (INRIA), Dr. Gema Martínez Criado (Directeur de recherche ESRF), Dr. Delphine Le Cunff (Ingénieur principale STMicroelectronics), Prof. Kristina EDSTROM (Université d'UPPSALA), Prof. Rafal Dunin Borkowski (FZ Jülich), Dr. Emmanuel Dubois (Directeur de recherche CNRS-IEMN), Dr. Mickaël Dolle (Directeur Technique SAFT).

4 Les batteries

Les batteries sont indispensables au développement de la mobilité décarbonée, et jouent également un rôle comme source de flexibilité en soutien au réseau électrique. Fort de son expertise sur l'ensemble de la chaîne de valeur des batteries (matériaux, cellules et systèmes), le Liten conduit ses travaux en visant à améliorer plusieurs critères essentiels, notamment les performances (densité d'énergie et de puissance), la durabilité, la sécurité, l'empreinte environnementale et le coût. Il travaille au développement de nouvelles générations de batteries, plus sûres et performantes, notamment « tout solide », et à plus long terme, sur d'autres voies alternatives.

Batteries K-ion : vers un système complet sans métaux critiques !

Le Liten mène des travaux amonts sur des technologies alternatives au Li-ion, notamment dans le but de s'affranchir à terme des matériaux critiques présents dans cette dernière (nickel, cobalt, cuivre, lithium). Dans le cadre d'un travail de thèse portant sur le développement d'un système complet potassium-ion, la synthèse par précipitation d'un matériau d'électrode positive de type « blanc de prusse » ($K_2Mn[Fe(CN)_6]$) est étudiée et optimisée. L'ajout d'un agent chélatant dans les solutions de précurseurs permet de ralentir la cinétique de précipitation et d'améliorer la cristallinité du blanc de prusse. Des premiers essais menés en demi-pile avec des électrolytes à base de KPF6 ont permis d'atteindre 125 mAh.g⁻¹ (à 3,9 V vs K/K⁺) de capacité réversible.



Un Comité d'Orientation Stratégique sur les matériaux pour batteries

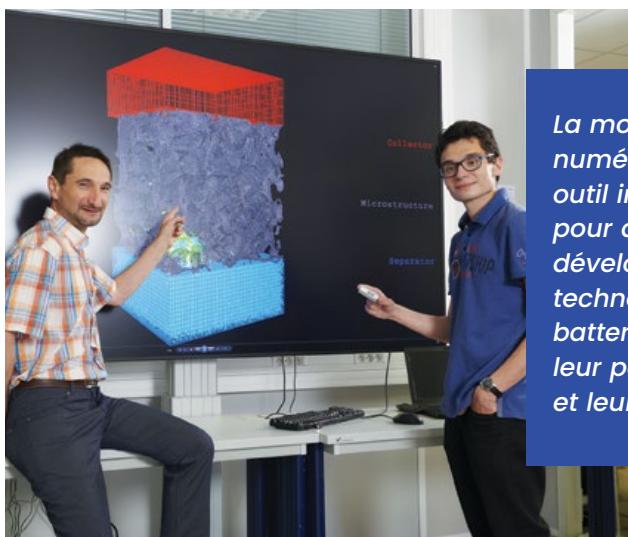
Dans le cadre du Comité d'Orientation Stratégique du Carnot Energies du Futur 2022, le CEA-Liten et le LEPMI (UMR 5279) ont présenté leurs activités sur les matériaux pour batteries à un comité externe d'experts, composé à parts égales de membres académiques et industriels. Objectif : émettre des recommandations concernant les axes de recherche à privilégier à l'avenir, au moyen des financements de l'institut Carnot. Le comité a souligné la pertinence de la méthodologie employée, permettant de démontrer un excellent positionnement de ces travaux basé notamment sur un environnement très riche (moyens techniques, accès aux grands instruments, plateforme de caractérisation, outils avancés de modélisation, expertises complémentaires sur tous les niveaux de TRL, etc.).

Stellantis et le CEA collaborent sur la modélisation numérique des batteries

Au printemps 2022, les équipes de Stellantis et du CEA ont présenté les premières avancées de leur collaboration en matière de modélisation numérique des batteries. Ces modèles, qui permettent d'analyser les stratégies de temps de charge et les mécanismes de dégradation des batteries, ont pour but d'accroître leur durée de vie pour les clients, et de mieux maîtriser les impacts environnementaux des différentes technologies de batteries dans les 5 ans à venir.

“

Le CEA est fier de mettre à disposition de Stellantis sa maîtrise technologique, en considérant toutes les étapes du cycle de vie du produit, de sa conception jusqu'à sa fin de vie, a déclaré Stéphane Siebert, Directeur de la Recherche Technologique du CEA en 2022.



La modélisation numérique, un outil indispensable pour accélérer le développement des technologies de batteries, en améliorant leur performance et leur durabilité.

Soutenir l'innovation afin de développer les futures générations de batteries

Piloté par le CEA et le CNRS pour le compte de l'Etat, le programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) « Soutenir l'innovation pour développer les futures générations de batteries » a été lancé le 10 janvier 2023. Financé dans le cadre de France 2030, il s'inscrit dans la stratégie nationale d'accélération sur les batteries qui a pour objectif d'aider au développement de l'offre et la demande des batteries.

“

Ce PEPR représente une formidable opportunité de renforcer les liens au sein de la communauté des chercheurs travaillant dans le domaine des batteries innovantes. L'animation scientifique qui nous est confiée favorisera les synergies entre les différents projets pour produire un maximum de connaissances dans un délai court. Nous aurons à cœur de les diffuser auprès des acteurs de la filière pour faciliter leur transfert vers le monde économique, explique Hélène Burlet, copilote CEA du PEPR.

Une collaboration entre les experts du CEA et le SDIS 73 pour la sécurité des batteries stationnaires

À l'initiative de la Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion des Crises (DGSCGC) et du SDIS 73, un groupe interdisciplinaire d'experts a été constitué pour mieux appréhender les risques liés à l'usage des systèmes de stockage par batteries stationnaires dans des espaces confinés. Objectif : comprendre les phénomènes observables lors d'événements accidentels pour adapter la réponse opérationnelle des services d'incendie et de secours. Le CEA-Liten a pris part aux 4 ans de travaux de ce projet, et a participé à la rédaction d'un rapport mis à disposition des filières concernées.

En 2022, les batteries du CEA sont à l'honneur dans la presse !



**Industrie & technologies,
N° 1056, octobre 2022**
« Le CEA Liten relève le défi du tout-solide »

Au moins 80% de nos programmes touchent de près ou de loin au tout-solide, dont environ 20 % dédiés au développement des matériaux d'électrolyte solide et à leur mise en oeuvre,
estime Sébastien Patoux du CEA-Liten.

**Sciences & Avenir, N° 908,
septembre 2022**
« L'avenir tout solide des batteries »

40 millions d'euros vont être accordés aux laboratoires publics dans le cadre du plan France 2030 pour développer de nouvelles batteries,
se félicite Hélène Burlet, experte en nouvelles technologies de l'énergie au CEA.

TF1
Le Journal de 20 heures
02/11/2022, Reportage sur les transports de demain avec le CEA

Le problème de la voiture électrique: ses batteries. Elles sont très lourdes, et leur fabrication n'est pas encore assez propre. Mais ici [au CEA], ils y travaillent ! explique Florence de Juvigny, journaliste chez TF1, en introduction de son reportage dans les laboratoires du CEA Grenoble.

**Sciences et Vie, N° 1262
Novembre 2022**

« Technologies : l'espoir de la batterie nouvelle génération »

Dans le domaine des batteries, il faut compter environ dix ans entre le moment où la solution se concrétise dans les laboratoires et où elle arrive sur le marché,
indique Fabien Perdu du CEA-Liten.

L'usine nouvelle, mai 2022
« Pourquoi les batteries à anodes au silicium intéressent-elles tant start-up et grands groupes? »

Le graphite affiche 372 milliampères-heures par gramme, contre 3579 pour le silicium. Cela signifie que le silicium peut stocker 10 fois plus de lithium, donc d'augmenter l'autonomie de la batterie de 20 à 50 % !,

détaille Cédric Haon, chercheur en sciences des matériaux au CEA-Liten.

Traçage isotopique du lithium, de la mine à la fabrication des matériaux de cathode

Contexte

La fin des ventes de véhicules thermiques à l'horizon 2035 va engendrer une augmentation du besoin annuel en lithium (x 44 d'ici 2030)^[1] et se traduira par une augmentation des activités de minage avec l'impact environnemental associé à l'activité. Afin d'améliorer la transparence de la provenance et de l'impact du mode d'extraction/purification du lithium, une méthode basée sur le traçage isotopique du lithium a été validée au travers d'une publication conjointe entre le BRGM, EDF et le CEA.^[2]

Approche & Résultats

La chaîne logistique de l'industrie des batteries Li-ion fait intervenir de nombreuses sociétés ayant des activités et des localisations (à l'échelle mondiale) différentes. Il est donc difficile de s'assurer que l'approvisionnement en éléments critiques est fait de manière éthique et sans fraude. Afin de responsabiliser les sociétés productrices et dans le but d'éviter toute fraude, une méthode basée sur le traçage isotopique du lithium a été développée. La composition isotopique en lithium ($\delta^7\text{Li}$) est exprimée en partie par millier où le ratio relatif ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$ d'un échantillon est rapporté au même ratio d'un standard de lithium

$$(\delta^7\text{Li} = \left[\frac{({}^7\text{Li}/{}^6\text{Li})_{\text{sample}}}{({}^7\text{Li}/{}^6\text{Li})_{\text{standard}}} - 1 \right] \times 1000).$$

Il est connu de la littérature que les échantillons naturels ont un $\delta^7\text{Li}$ compris entre - 15 % et + 45 %, et la valeur dépend du lieu d'extraction (figure 1). Quatre précurseurs de lithium de différentes origines ont été livrés au CEA par le BRGM dans le but de synthétiser des matériaux de cathode (figure 2).

Les résultats des analyses isotopiques menées par le BRGM sur les matériaux synthétisés par le CEA montrent une parfaite correspondance entre les compositions isotopiques des précurseurs de lithium et les matériaux de cathode associés. Le procédé de synthèse des oxydes lamellaires (calcination à haute température) ne modifie pas le ratio isotopique du lithium. Les analyses menées par spectrométrie de masse permettront d'identifier/confirmer la provenance du lithium contenu dans une batterie.

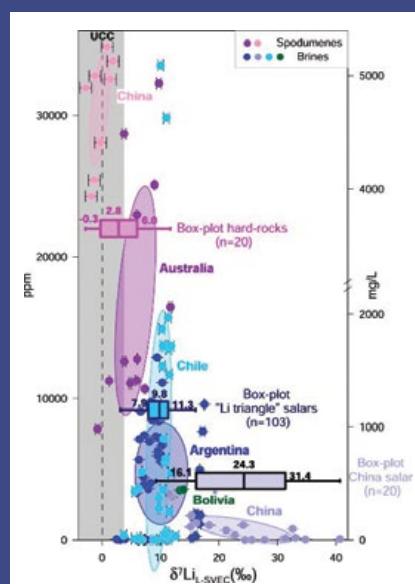


Figure 1 : Concentration de lithium en fonction de $\delta^7\text{Li}$ pour différents gisements

Perspectives

L'utilisation massive d'éléments critiques dans les batteries Li-ion nécessite le développement d'outils permettant le suivi des éléments de la mine jusqu'à la fin de vie de la cellule. Les résultats obtenus montrent que le ratio isotopique du lithium n'est pas modifié malgré les étapes d'extraction, purification, transformation et calcination à haute température nécessaires pour la synthèse du matériau de cathode. L'étude se poursuivra en étendant ce concept au cobalt et au nickel.

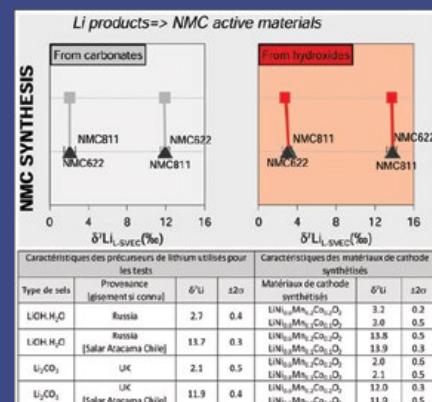


Figure 2 : Comparaison des compositions isotopiques entre les précurseurs de lithium et les matériaux de cathode synthétisés

Références :

- [1] C. Thies, K. Kieckhäfer, T.S. Spengler, M. S. Sodhi, Assessment of social sustainability hotspots in the supply chain of lithium-ion batteries, Procedia CIRP 80, 292–297 (2019)
[2] A.M. Desaulty, D. Monfort Clément, G. Lefebvre, A. Cristiano-Tassi, D. Peralta, S. Perret, A. Urban, C. Guerrot, Tracing the origin of lithium in Li-ion batteries using lithium isotopes, Nature communication, 13, 4172 (2022)

SYSTÈMES, RÉSEAUX ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

Au-delà de l'amélioration des briques technologiques (photovoltaïque, batteries, électrolyseurs, piles à combustible, etc.), un enjeu majeur pour la transition énergétique réside dans l'intégration optimale de ces briques pour concevoir des systèmes répondant à des exigences fortes notamment en matière d'efficacité énergétique, de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de coût. Pour répondre à cet enjeu, le Litén développe des outils numériques pour optimiser le dimensionnement et le pilotage de systèmes énergétiques à différentes échelles (véhicules, bâtiments, parcs industriels, réseaux d'énergie), ainsi que des composants indispensables à la gestion de l'énergie électrique (électronique de puissance) et de la chaleur (production solaire, stockage, transfert et conversion).



1 Gestion de l'énergie thermique

La chaleur représente une part majeure (~50%) de la consommation d'énergie finale des secteurs industriels, tertiaires et résidentiels. Nos travaux de recherche se concentrent sur la production de chaleur par solaire thermique pour répondre aux besoins des procédés industriels, sur le stockage thermique pour apporter de la flexibilité aux systèmes et réseaux énergétiques, et aussi sur les échangeurs de chaleur et les machines thermodynamiques pour valoriser la chaleur fatale.

EN CHIFFRES



70
PUBLICATIONS

350
BREVETS

30
DOCTORANTS

180
SALARIÉS

Une machine à absorption pour produire du chaud

Dans le cadre d'un projet EasyPOC soutenu par la région Auvergne-Rhône-Alpes, le CEA-Liten et l'industriel Clauger ont développé une preuve de concept de machine à absorption pour la production de chaleur nécessaire à la production d'eau chaude sanitaire. La machine utilise l'ammoniac comme réfrigérant et l'eau comme transporteur - des fluides naturels, sans impact CO₂. Elle permet de produire de la chaleur > 65°C à partir des rejets de chaleur basse température de l'ordre de 30°C, en utilisant comme énergie primaire des sources de chaleur fatale ou issues des énergies renouvelables. Résultat: 50% de gain en performance par rapport à l'utilisation directe de l'énergie thermique, et un besoin en énergie électrique 30 fois inférieur par rapport à l'utilisation d'une compression mécanique de vapeur dans un cycle classique.

Vers une production industrielle d'électricité décarbonée

Le projet européen DECAGONE a débuté mi-2022, avec pour objectif principal de solutionner la baisse de performances de la technologie ORC (Cycle Organique de Rankine) de conversion de la chaleur perdue en énergie au cours de son cycle de vie, et de proposer des approches innovantes pour maintenir une performance élevée sur 15-20 ans d'exploitation. Un démonstrateur composé d'un ORC et d'un système de stockage d'énergie thermique sera installé sur le site sidérurgique de Trinac. La viabilité de la solution sera étudiée selon différents cas d'usage, comme dans les secteurs de la sidérurgie, du gaz naturel, du verre, etc. Pour ce projet, le CEA-Liten est essentiellement impliqué dans l'identification de fluides et mélanges potentiellement pertinents

pour leur utilisation comme fluide de travail pour l'ORC, la définition de l'instrumentation du démonstrateur DECAGONE, et le développement du système de stockage d'énergie thermique.

Une solution de stockage de chaleur compacte et modulaire

Dans le cadre d'un projet EasyPoc, le CEA-Liten et le groupe GRIMS ont développé une solution de stockage de chaleur latente, composée d'un échangeur thermique à structure Lattice, associé à un matériau à changement de phase (MCP) bio-sourcé (photo). Cette solution nommée GRIMSBOX® est trois à quatre fois plus compacte qu'un stockage de chaleur en eau, modulaire en taille et en forme, et répond à la contrainte d'espace réduit des sous-stations des réseaux de chaleur urbains. Elle fait l'objet d'un projet de démonstrateur à échelle 1:1, qui sera exploité en conditions réelles sur un réseau de chaleur urbain géré par Energies du Sud sur le territoire de la Métropole de Montpellier.



L'originalité de cet échangeur thermique repose sur une matrice alvéolaire métallique intégralement moulée autour des tubes traversés par le fluide caloporteur.

2 Systèmes & réseaux énergétiques

Pour intégrer les énergies renouvelables dans le mix énergétique et décarboner les différents secteurs applicatifs, les systèmes et réseaux énergétiques doivent être repensés. Les équipes du CEA sont mobilisées aux côtés de leurs partenaires industriels pour concevoir des systèmes multi-vecteurs prenant en compte les contraintes d'efficacité énergétique, d'empreinte carbone, tout en répondant aux besoins spécifiques des usages visés. Pour cela, le Liten développe des outils d'optimisation du dimensionnement et du pilotage des systèmes et des réseaux, avec une approche combinant simulation numérique, tests semi-virtuels en environnement représentatif, et démonstration et monitoring en environnement réel.

Mieux dimensionner les systèmes énergétiques pour mieux planifier la production

Afin d'intégrer au mieux les énergies renouvelables dans le mix énergétique, le CEA-Liten a développé et testé une méthode de pilotage plus réaliste des systèmes de production de chaleur et d'alimentation électrique pour le quartier Cambridge de la Ville de Grenoble. Après avoir représenté le fonctionnement énergétique du quartier à chaque instant de l'année et au pas de temps de l'heure, l'objectif était de déterminer dans quelle mesure la nouvelle méthodologie permettait l'introduction de modèles plus représentatifs des contraintes d'opérations à court terme du système, tout en optimisant son opération à l'échelle de l'année, sans compromettre la faisabilité même de la simulation avec des modèles trop complexes.

Avec les méthodologies classiques, les systèmes de production et de stockage apparaissent sous-dimensionnés, et on observe un recours excessif aux énergies fossiles (ici le fioul). La nouvelle méthodologie proposée par le CEA-Liten permet quant à elle de piloter le système de manière presque aussi performante qu'en ayant eu connaissance en avance de la demande à l'année (écart de 1 à 2 %) tout en conservant une forte capacité d'adaptation aux évolutions de la demande réelle par rapport aux prévisions. Elle présente par ailleurs une capacité d'adaptation forte si la demande réelle évolue par rapport aux prévisions.



Ajouter de l'énergie solaire dans la mobilité électrique

RTE et le CEA ont expérimenté un système de supervision et de gestion de la recharge de véhicules électriques (VE) sur le centre CEA de Cadarache. L'objectif était de coupler 24 bornes de recharge à une centrale solaire et à un système de gestion et de pilotage intelligent

développé par le CEA à l'INES, afin d'augmenter la part d'énergie solaire dans la mobilité électrique. Les bornes ont été en partie approvisionnées par la centrale solaire PV Mégasol située à proximité du CEA, et les taux d'autoproduction obtenus avec et sans pilotage ont été comparés pendant 5 mois. L'étude révèle que la part du solaire dans l'énergie utilisée par les bornes peut augmenter de 34 à 90 %, grâce au logiciel de pilotage. Cela confirme que le couplage de la production solaire et de la gestion intelligente de la recharge est une réelle opportunité !



Recharge de véhicules électriques sur le centre CEA de Cadarache.

L'expertise du Liten au service de la réduction des consommations énergétiques des centres CEA

“

Je contribue depuis deux ans au programme Synergie Liten Centre qui a pour objectif de développer des projets entre les centres du CEA en France et le Liten, dans le domaine de l'efficacité énergétique, de l'intégration des énergies renouvelables et de la décarbonation.

La direction du CEA a identifié des enjeux forts au niveau de l'énergie dans les différents centres pour lesquels le Liten a un rôle à jouer dans l'optimisation de l'efficacité énergétique. L'idée est de mettre à profit l'expertise du Liten au service des infrastructures du CEA, pour améliorer le confort des salariés et réduire les émissions de CO₂ des sites. Plusieurs laboratoires travaillent conjointement pour amener des solutions pratiques qui peuvent être déployées rapidement. Ces travaux portent notamment sur l'implémentation de panneaux photovoltaïques ou encore les réseaux de chaleur. Le projet avance bien, les résultats en termes d'économie d'énergie sont prometteurs. Les premières études portaient sur 4 centres, aujourd'hui nous allons étendre la démarche vers d'autres centres pour continuer à mettre en pratique, directement dans nos sites, les solutions que nous développons avec nos partenaires industriels.

Bernard Thonon, responsable programme réseaux et systèmes énergétiques au CEA-Liten

3 Des convertisseurs de puissance performants

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

Des noyaux magnétiques compacts pour une recharge bidirectionnelle des véhicules électriques

Le projet SMARTIE vise à développer des noyaux compacts intégrant au moins deux fonctions (i.e. transformateur, inductance) sur une même plateforme magnétique. Ce type de noyau permettra une réversibilité du transfert d'énergie vers et depuis la batterie d'un véhicule électrique. Les équipes du CEA-Liten de Grenoble et de RENAULT ont revu la conception du composant magnétique traditionnel afin d'obtenir des gains significatifs de volume et de masse. En plus de la fonction de base d'un transformateur, ce noyau magnétique intègre deux inductances aux bras du primaire et également du secondaire. La configuration retenue permet une automatisation de l'étape de

bobinage, un assemblage simple de l'ensemble, ainsi qu'une meilleure gestion thermique grâce aux surfaces développées à cet effet et à l'ajout d'une encapsulation qui améliore le refroidissement des bobinages. La solution imaginée est aujourd'hui transférée chez un fabricant de composants pour l'évaluer et engager, en cas de réponse favorable, les étapes de fabrication à grande échelle du composant.

Un convertisseur intégré à une pile PEMFC

Le CEA-Liten a développé une solution technologique qui intègre directement le convertisseur électrique continu-continu sur la plaque bipolaire terminale du stack d'une pile PEMFC, en mutualisant une partie de la mécanique et du circuit de refroidissement (photo).

Dans le cadre du projet européen Flhsafe, un convertisseur de courant d'entrée maximal de 175 A a ainsi été développé en intégrant l'ensemble des contraintes systèmes des différentes physiques mises en jeux (électroniques de puissance et de commande, automatique, mécanique et thermique) dans un volume très limité. Ce convertisseur atteint un rendement compris entre 96% et 97% sur une large plage de puissance de sortie (entre 7,5 kW et 30 kW) et pour une température de refroidissement élevée (65°C). Le sous-ensemble stack/convertisseur a pu fournir une puissance électrique d'environ 6 kW sur le banc d'essai du CEA. L'intégration au sein du système complet est en cours.



Convertisseur et stack assemblés.

This project has received funding from the Clean Hydrogen Partnership under Grant Agreement No 779576. This Joint Undertaking receives support from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation programme, Hydrogen Europe and Hydrogen Europe Research.

Optimisation de la conception et du pilotage des systèmes énergétiques multi-vecteurs au niveau d'un quartier

Contexte

En France, environ 40% de la consommation d'énergie est utilisée pour le chauffage des bâtiments^[1]. Alors que le passage des combustibles fossiles à l'électricité est considéré comme une priorité^[2], plusieurs problèmes se posent quant au rythme de rénovation des bâtiments, à la disponibilité d'une électricité à faibles émissions de CO₂, et au rendement énergétique global. En effet, des scénarios réalisistes exigent non seulement l'électrification, mais également un meilleur couplage des secteurs, en particulier entre les réseaux électrique et thermique, ce qui peut apporter une plus grande robustesse et flexibilité.

Approche & Résultats

L'étude^[3] compare deux systèmes différents de fourniture d'énergie à un quartier résidentiel. **Le système A** utilise uniquement l'énergie électrique, avec des pompes à chaleur décentralisées chauffant chaque immeuble individuellement. **Le système B** envisage un réseau de chauffage urbain avec des unités centralisées de production de chaleur. La comparaison est basée sur une optimisation multi-objectifs technique-économique/ environnemental, qui calcule les dimensions et les coûts optimaux du système selon une hypothèse de contrôle optimal. L'étude de cas s'inspire d'un quartier existant de Grenoble (France) qui comprend 13 immeubles, avec un total d'environ 500 logements. Des données significatives ont été recueillies de différentes sources afin que l'étude soit représentative d'un cas réel.

La figure 1 (à gauche) montre le front de Pareto obtenu en optimisant les coûts pour les deux systèmes en fonction de la variation de la contrainte d'émissions de CO₂. Alors que le coût est presque équivalent sans contrainte (cas le plus à droite), le coût du système A piloté à l'électricité augmente de manière exponentielle lorsque la contrainte augmente.

La figure 1 (à droite) montre la sensibilité des résultats obtenus à la variation de plusieurs paramètres et souligne la forte sensibilité et la faible résilience du système A fonctionnant seulement à l'électricité, en particulier lorsqu'il s'agit du COP* de la pompe à chaleur, qui est en effet un facteur très incertain (on observe souvent en pratique une grande différence entre la conception et l'exploitation).

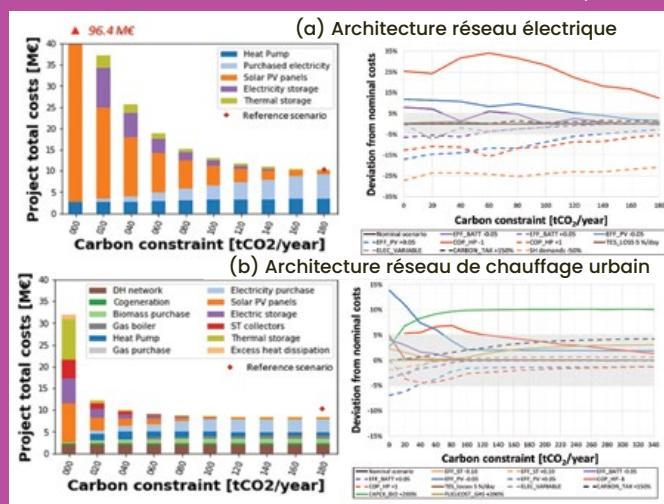
*COP : Coefficient de Performance

Conclusion

Cette étude illustre deux propriétés communes à de nombreuses études menées au Liten. D'abord,

une combinaison optimale des vecteurs énergétiques à un fort potentiel de réduction des coûts globaux du système, en particulier lorsque des contraintes supplémentaires sont appliquées. Deuxièmement, et sans surprise, la combinaison des vecteurs énergétiques offre davantage de flexibilité et de robustesse face aux incertitudes. Pour gérer ces systèmes plus complexes, la plateforme TRILOGY développée au CEA offre des outils logiciels clés pour concevoir et piloter efficacement des systèmes énergétiques. Les recherches en cours visent à intégrer davantage de critères ACV**.

**ACV : Analyse du cycle de vie



À gauche : front de Pareto coûts / émissions de CO₂ pour les deux systèmes (a)
(a) Architecture Réseau électrique ;
(b) Réseau de chauffage urbain.
Pour chaque cas, les barres de couleur empilées indiquent les coûts de chacune des technologies utilisées.

À droite : sensibilité des deux systèmes aux paramètres sélectionnés

Références :

- [1] Ürge-Vorsatz et al., "Heating and cooling energy trends and drivers in buildings," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41 (2015)
- [2] RTE, "Energy pathways 2050 - key results" (October 2021)
- [3] Fitò et al., "Robustness of district heating versus electricity-driven energy system at district level: A multi-objective optimization study," *Smart Energy*, vol. 6 (2022), doi: 10.1016/j.segy.2022.100073

ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Pour minimiser l'impact de la transition énergétique sur la consommation de matières premières, l'éco-circularité doit être au cœur de l'innovation technologique. Le Liten mène des travaux de recherche pour répondre aux enjeux de l'économie circulaire de la matière « Réduire, Réutiliser, Recycler », notamment avec l'éco-conception et le recyclage des nouvelles technologies de l'énergie, et développe des matériaux et procédés éco-innovants comme la fabrication de pièces *near-net-shape*, les assemblages complexes, ou encore les matériaux bio-sourcés. Par ailleurs, le Liten conçoit des matériaux, procédés et systèmes pour l'économie circulaire du carbone, ce qui permet de convertir des ressources carbonées en molécules d'intérêt pour l'énergie ou la chimie.



1 Économie circulaire de la matière

Dans ce contexte de transition énergétique, il est capital d'adopter un modèle d'économie circulaire basé sur les 3 R (Réduire, Réutiliser, Recycler), afin de limiter la consommation de matières premières et valoriser les matières secondaires, réduire l'impact sur l'environnement, et garantir une relative souveraineté sur l'accès à ces matériaux. Les travaux de R&D portent sur la substitution des matériaux critiques tels que l'argent ou l'indium de la filière PV, du cobalt ou du nickel dans les batteries, du platine dans les PEMFC. Ils s'appliquent d'autre part à des filières industrielles émergentes en France et en Europe, nécessaires à la transition énergétique, en particulier la filière des aimants permanents.

EN CHIFFRES



50
PUBLICATIONS

450
BREVETS

50
DOCTORANTS

230
SALARIÉS

Favoriser le recyclage des batteries des voitures électriques en Europe

Le projet RESPECT, coordonné par Orano Mining du groupe Orano, est financé par l'Union Européenne (UE) et par Horizon Europe. Il regroupe 18 partenaires internationaux autour d'un objectif commun : contribuer au renforcement de l'autonomie stratégique de l'Europe vis-à-vis des matériaux des batteries. L'enjeu est de développer un procédé de recyclage innovant en boucle fermée suffisamment flexible pour traiter tout type de batterie Li-ion, qui couvre les aspects de logistique, tri, récupération des matériaux, valorisation, mais aussi la sécurité pour l'ouverture et la désactivation des modules et l'hydrométallurgie. Le CEA-Liten, qui travaille depuis plus de 10 ans sur le développement de procédés de recyclage par voie hydrométallurgique ou électro-chimique (photo), est en charge de la coordination technique et scientifique du projet. Ses équipes sont fortement impliquées sur toutes

les étapes de développement du procédé de recyclage, et notamment sur le recyclage direct avec la re-fabrication de matériaux actifs.



FOR A COMPETITIVE, CIRCULAR AND SUSTAINABLE EUROPEAN BATTERY MANUFACTURING INDUSTRY.

Technologie PV : réduire les quantités d'argent utilisées pour les cellules

L'un des enjeux de l'amélioration de l'empreinte environnementale de l'industrie photovoltaïque est de réduire la consommation de certains matériaux tel que l'argent, déposé lors de l'étape de métallisation des cellules. Les experts du CEA-Liten ont réussi à réduire la largeur des lignes de métallisation, en utilisant des écrans de sérigraphie aux ouvertures plus fines que le standard, tout en assurant le transfert de la pâte d'argent et une faible résistance de ligne. Les cellules à hétérojonction

ainsi réalisées au format M2 - 6 busbars, présentent un ratio argent consommé par watt atteint de 19,2 mgAg/W, au lieu de 24,58 mgAg/W (ITRPV 2022). Cela correspond au niveau de consommation de matière attendu par la communauté internationale à l'horizon 2026 pour cette technologie !

Recycler les emballages en plastique multicouches

Le projet européen MERLIN vise à concevoir des solutions innovantes pour le recyclage et la valorisation des matières plastiques. Son objectif : développer des procédés pour réutiliser le polyéthylène (rPE) et le PET (rPET) recyclés issus du délamination des emballages alimentaires rigides et flexibles pour l'un, et des emballages flexibles pour l'autre. Le rôle du CEA consiste à améliorer les propriétés mécaniques et la stabilité de ces matériaux en vue de leur réutilisation, par ajout de charges, d'additifs et d'antioxydants par extrusion réactive. L'augmentation de l'affinité et de l'adhésion des multicouches rPET/rPE permettrait d'utiliser des adhésifs plus respectueux de l'environnement, voire de s'en affranchir.

Equipement pilote semi-continu pour le recyclage des batteries



Vers une filière de fabrication des aimants en France

Les aimants permanents, éléments clefs pour la transition énergétique, contiennent plus de 30% de terres rares, considérés comme matériaux critiques du fait du quasi-monopole de la Chine sur leur production. Dans ce contexte, la France et l'Europe ont un enjeu majeur à réduire leur dépendance vis-à-vis de leur approvisionnement en terres rares. Le projet MAGNOLIA réunit 5 partenaires industriels et institutionnels sur la filière des aimants permanents haute performance : Orano, Valeo, PAPREC, DAIMANTEL France et le CEA. Ses principaux objectifs, d'ici 2025 :

- Développer des technologies de fabrication d'aimants frittés en France et les déployer sur des lignes de fabrication pilote et préindustrielles. Le lancement de lignes industrielles se décidera à partir de 2025;

- Préparer en France une filière de collecte, de démantèlement et de valorisation des moteurs électriques. À un prix compétitif et stable, tout en sécurisant les approvisionnements et la production d'aimants;

- Réduire l'impact environnemental des procédés: recyclage d'aimants, réduction des déchets de fabrication, valorisation des terres rares et éco-conception de machines électriques favorisant le démantèlement.

Le CEA-Liten aura plus spécifiquement en charge d'étendre à une capacité de 4 tonnes l'atelier pilote existant sur sa plateforme Métallurgie des Poudres, et de développer et monter en maturité des briques technologiques visant à réduire ou substituer la quantité de matières premières critiques utilisées pour la fabrication des aimants. Ses objectifs ciblent donc une utilisation plus efficace des matières premières critiques, une optimisation du procédé de mise en forme pour améliorer les rendements

matières, ainsi que les aspects d'économie circulaire avec notamment le recyclage d'aimants frittés usagés par une voie poudre innovante.



« La collaboration entre le CEA-Liten et Orano, déjà riche, a trouvé avec le projet MAGNOLIA un nouveau débouché dans l'industrialisation des procédés de recyclage et de fabrication d'aimants permanents NdFeB frittés. Cet axe de développement stratégique est engagé par le groupe Orano depuis 2 ans et trouve ici sa première matérialisation concrète.

L'année 2022 a été importante, avec le gréement des équipes respectives, l'analyse de la maturité technique de chacun des procédés à développer dans Magnolia, et la rédaction des cahiers des charges des futurs équipements à installer au CEA-Liten, afin de mettre en œuvre un ambitieux programme de R&D. Ces travaux permettront de disposer à terme d'une installation de recherche à la pointe de la technologie.

Pour Orano, l'expertise technique accumulée par le CEA-Liten est fondamentale pour crédibiliser et accélérer son positionnement dans ce secteur d'avenir. Malgré les multiples défis qui s'offrent à nous, l'excellente qualité de ce partenariat pluriannuel permet d'envisager avec confiance l'atteinte de l'objectif affiché d'une plus grande souveraineté économique à l'échelle européenne. »

Benoit RICHEBE, Directeur de projets Aimants et Terres rares chez ORANO

Un projet soutenu dans le cadre du Programme « France relance »



2 Matériaux & procédés éco-innovants

L'enjeu est de concevoir des solutions permettant d'améliorer la soutenabilité des technologies pour les systèmes énergétiques décarbonés, tant au niveau des matériaux utilisés que des procédés mis en œuvre. Le Liten développe des procédés économes en matière pour la fabrication de composants à haute valeur ajoutée de type *near-net-shape* grâce à la métallurgie des poudres et la fabrication additive, ainsi que des procédés d'assemblage pour les composants multi-matériaux complexes. Plus récemment, il explore l'utilisation de matériaux biosourcés. Les développements technologiques intègrent une approche d'éco-conception, qui oriente les choix selon des critères environnementaux tout en tenant compte des impératifs économiques.

Vers l'éco-conception des panneaux photovoltaïques

Des développements sont en cours au CEA à l'INES pour alléger les panneaux photovoltaïques en remplaçant le verre utilisé en face avant, et le verre ou la feuille polymère fluoré en face arrière. Plusieurs combinaisons de matériaux éco-composites pourraient permettre de réduire l'empreinte environnementale de cette technologie. Pour pallier la grande variabilité des données et la faible maturité des résultats de l'état de l'art sur ce type de matériaux, les équipes du CEA ont développé un outil générique d'analyse environnementale de la chaîne de valeur d'un panneau photovoltaïque.

Une base de données de référence spécifique aux matériaux composites a été constituée. Les études préalables ont permis d'identifier des matériaux encore non connus dans le domaine photovoltaïque comme alternatives prometteuses aux matériaux traditionnels, parmi lesquels les résines de type thermoset époxy bio-sourcées ou thermoplastiques de type polypropylène, les fibres de verre, de lin ou encore de basalte.

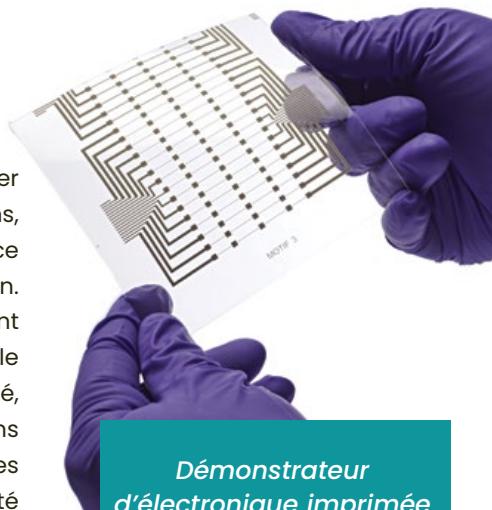
Les analyses réalisées montrent notamment que pour l'ensemble des critères étudiés, l'impact environnemental des matériaux composites dépend principalement du choix de la résine, du choix de la fibre et de la quantité de ces matériaux consommée par panneau. Le gain environnemental varie de 5% à 15% en fonction des combinaisons et proportions retenues. La solution la plus prometteuse fera l'objet d'une Analyse de Cycle de Vie (ACV) complète pour confirmer son intérêt environnemental.



Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de l'ITE INES.2S, cofinancé par le gouvernement français dans le cadre du Programme d'Investissements d'Avenir (ANR-10-IEED-0014-01). Lancé en 2019, INES.2S est un institut de la transition énergétique (ITE).

Des films en polymère biosourcé pour l'électronique souple

Les films minces biosourcés ou biodégradables commencent à émerger pour substituer certains films minces flexibles petrosourcés. Néanmoins, ils sont majoritairement produits et commercialisés en Asie à ce jour, ce qui crée des difficultés d'approvisionnement pour le marché européen. La question de leur approvisionnement est donc un verrou important dans le développement stratégique de l'électronique organique souple biosourcée à l'échelle européenne. En vue d'en assurer la souveraineté, dans le cadre du projet européen INN-PRESSME, le CEA a investi dans une ligne de fabrication de films par extrusion. Après optimisation des paramètres du procédé, des substrats d'épaisseur contrôlée ont été produits à partir d'acide polylactique (PLA). Un premier démonstrateur d'électronique souple fonctionnel a été réalisé sur ce substrat biosourcé et biodégradable, avec le dépôt de pistes conductrices par sérigraphie. Le report de composants (LEDs) a permis de finaliser le prototype.



Démonstrateur d'électronique imprimée fonctionnel sur substrat biosourcé produit au CEA-Liten

La plastronique au service des applications automobiles

Le CEA et Symbiose, start-up créée en 2014 et spécialisée dans la fabrication de films pour pièces plastiques connectées, collaborent au développement de la filière plastronique pour l'industrie automobile.

L'un des objectifs de Symbiose est de développer les briques technologiques pour la réalisation d'interface hommes-machine tactiles, qui soient surmoulables. Le Liten a mis au point des solutions innovantes pour imprimer des capteurs piézoélectriques et capacitifs sur films thermoformables d'une part, et pour intégrer d'autres fonctionnalités par report de composants d'autre part. Les performances optiques des dalles plastroniques ont été optimisées. Le partenaire souhaite également développer une approche éco-circulaire des composants plastroniques développés au sein de son unité de production. Un projet européen initié en septembre 2022 vise à étudier

l'utilisation pour des applications automobiles de nouveaux matériaux ayant un impact environnemental réduit. Le Liten apporte son expertise pour optimiser les procédés de fabrication de composants plastroniques à partir de ces nouveaux matériaux, et développe des protocoles de tests spécifiques pour évaluer les performances des dispositifs qui les intègrent.

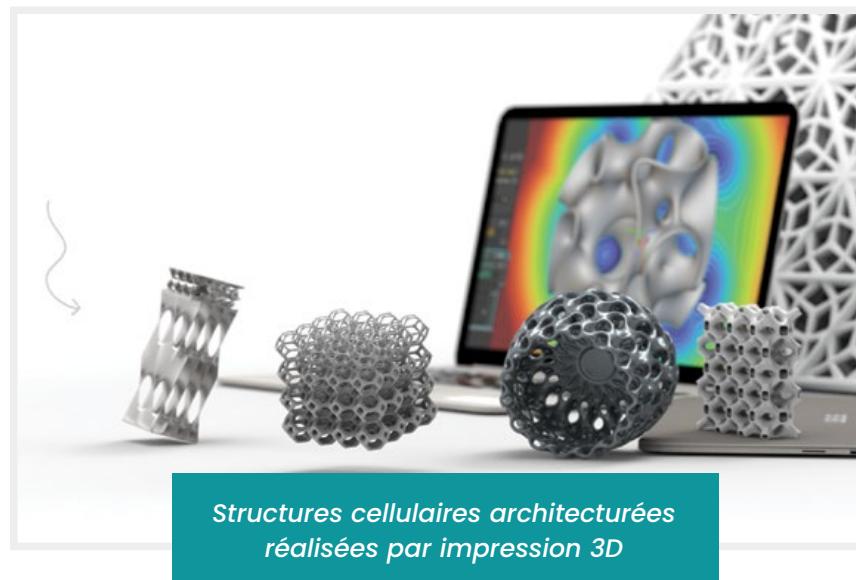
En mai 2022, la start-up s'est installée dans son nouveau site de production à Pugnac (Gironde) grâce à une levée de fonds d'un montant de 6,5 millions d'euros.



Plateforme de recherche sur l'électronique imprimée du CEA-Liten

Impression 3D : une approche innovante avec les structures cellulaires

Dans le cadre du HUB3D print, le CEA-Liten et ses partenaires industriels expérimentent l'impression 3D pour répondre à des problématiques de nombreux secteurs applicatifs, avec par exemple le développement de structures cellulaires architecturées pour des applications de dissipation d'énergie mécanique ou réaliser des structures à comportement mécanique contrôlé. La fabrication additive permet en effet de réaliser des architectures complexes par impression, offrant un allégement des structures combiné à une économie de matière. Les propriétés mécaniques de ces structures architecturées sont donc remarquables, permettant d'atteindre des rapports résistance/masse élevés pour tous types de sollicitations. A cette fin, des méthodes de conception avancées telles que la conception algorithmique et le design implicite sont employées en conjonction de règles de DFAM (Design For Additive Manufacturing) en guise de leviers d'innovation par le design, car permettant l'obtention de géométries jusqu'alors impossible à générer. Enfin, l'automatisation de certaines briques de la chaîne numérique permet d'identifier de façon efficace les modèles de structure et les paramètres procédés permettant d'optimiser les designs de pièces aux propriétés mécaniques visées. Les projets aboutissent à la réalisation de démonstrateurs fonctionnels, réalisés



Structures cellulaires architecturées réalisées par impression 3D

sous forme de préséries en des temps très courts, afin d'accélérer les étapes de développement en vue d'une commercialisation.

Une longue expertise en Compression Isostatique à Chaud

Le CEA a une expertise de près de 40 ans en Compression Isostatique à Chaud (CIC), pour fabriquer des composants complexes par assemblage de pièces massives ou par compaction de poudres métalliques. Cette technique permet de produire des pièces aux géométries complexes et/ou alliant différents matériaux, de tailles très variées, et d'atteindre des propriétés mécaniques excellentes.

En réduisant les étapes d'usinage ou de soudage, elle offre également la possibilité de réaliser des économies de matière. Aujourd'hui, le CEA-Liten est partenaire du projet EQUIPEX+ CALHIPSO*, coordonné par Université Bourgogne Franche-Comté (UBFC), qui propose une approche globale d'expérimentation, de modélisation et de simulation visant à définir des solutions CIC sur mesure pour répondre aux besoins des industriels. CALHIPSO a pour ambition de favoriser le développement des industries métallurgiques en France avec l'émergence d'un réseau français d'acteurs de la technologie CIC, des emplois à haute valeur ajoutée dans des segments stratégiques tels que l'aéronautique, l'automobile, le ferroviaire, l'énergie et la défense.

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

Matrices de capteurs pyroélectriques imprimés pour la détection de proximité destinées aux applications robotiques.

Contexte

Les évolutions de la cobotique (collaboration homme machine) nécessitent l'intégration de nombreux capteurs qui doivent être adaptés aux divers facteurs formes et configurations d'usage. Alors que les systèmes existants sont rigides, épais et contraints par les connectiques, l'électronique structurelle permet de fabriquer des capteurs pyroélectriques (détection de chaleur) ainsi que l'électronique de commande par impression sur un substrat très fin, flexible et conforme. Un atout considérable pour aller vers la réalisation de « peau de robot » intelligentes [1,2].

Approche & Résultats

L'université d'Eindhoven, partenaire historique du Liten pour le développement de circuits flexibles, a évalué le potentiel de l'électronique imprimée pour réaliser un capteur flexible qui permette la détection de mouvement et la reconnaissance de gestes. Publiée dans la revue *Nature Electronics* [3], cette démonstration s'appuie sur l'intégration de capteurs fabriqués à partir de polymères organiques PVDF-TrFe* connus pour leur propriétés piézo- et pyroélectriques. Ces capteurs sont documentés dans la littérature, mais l'intégration multi-pixels est particulièrement complexe car elle demande beaucoup de connectiques qui limitent l'intégration et la qualité des signaux mesurés.

Pour pallier à ces limitations, l'équipe de recherche a co-intégré ici sous la surface flexible des capteurs des circuits de transistors organiques imprimés (OTFT**). Cette dernière technologie a été développée avec succès par le CEA et ses partenaires dans le cadre du projet européen ATLASS (H2020 2015-2019) et une ligne pilote a été mise en place pour le prototypage à l'échelle système. L'utilisation de circuits actifs dans le pixel permet d'obtenir ici l'amplification du signal (amélioration du rapport Signal sur Bruit et distance de détection x10) et la possibilité de multiplexage pour le matriçage des capteurs permettant ici la reconnaissance de gestes humains à une distance de 40 cm à la fréquence de 100 images/seconde.



La matrice de 50 capteurs imprimés enroulée sur la surface du bras robotisé permet de détecter les gestes et risques de collisions jusqu'à 40 cm à 100 fps

Perspectives

Cette démonstration qui se distingue de l'état de l'art est bien soulignée par l'article qui détaille les performances électriques de circuits fabriqués et les excellents rendements de la technologie développée par le CEA et ses partenaires. Elle illustre le potentiel d'innovation apporté par l'électronique structurelle, le savoir-faire du CEA dans le domaine des circuits de transistors organiques et plus largement, la capacité du Liten à porter une technologie amont jusqu'à la démonstration de prototypes systèmes.

Références :

[1] - <https://www.equip-prod.com/equipement/rapprocher-les-robots-de-lhomme-en-leur-offrant-une-peau-aux-pouvoirs-etendus/>

[2] - Y. Dai and S. Gao "A Flexible Multi-Functional Smart Skin for Force, Touch Position, Proximity, and Humidity Sensing for Humanoid Robots" *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 21, NO. 23, DECEMBER 1, 2021

[3] - Fattori, M., Cardarelli, S., Fijn, J. et al. "A printed proximity-sensing surface based on organic pyroelectric sensors and organic thin-film transistor electronics." *Nat Electron* 5, 289–299 (2022).

* PVDF-TrFE : polyvinylidene fluoride-co-trifluoroethylene

** OTFT Organic Thin Film Transistor

3 Économie circulaire du carbone

Un grand nombre d'industries stratégiques ne peuvent se défaire des molécules carbonées, qui sont au cœur de leurs activités (mobilité lourde, chimie, etc.). Pour elles, la transition énergétique passera par la mise en place d'une économie circulaire du carbone, qui permettra de ne plus rejeter de CO₂ d'origine fossile dans l'atmosphère. La stratégie du Liten s'articule autour du développement de systèmes complexes de type « power-to-X » et « power-and-biomass-to-X » pour convertir du CO₂ et autres ressources carbonées en molécules d'intérêt grâce à de l'hydrogène produit à partir d'électricité bas carbone. Cette approche s'applique non seulement au gaz (méthane), mais aussi à des molécules liquides (méthanol, carburants de synthèse pour l'aviation, etc.).

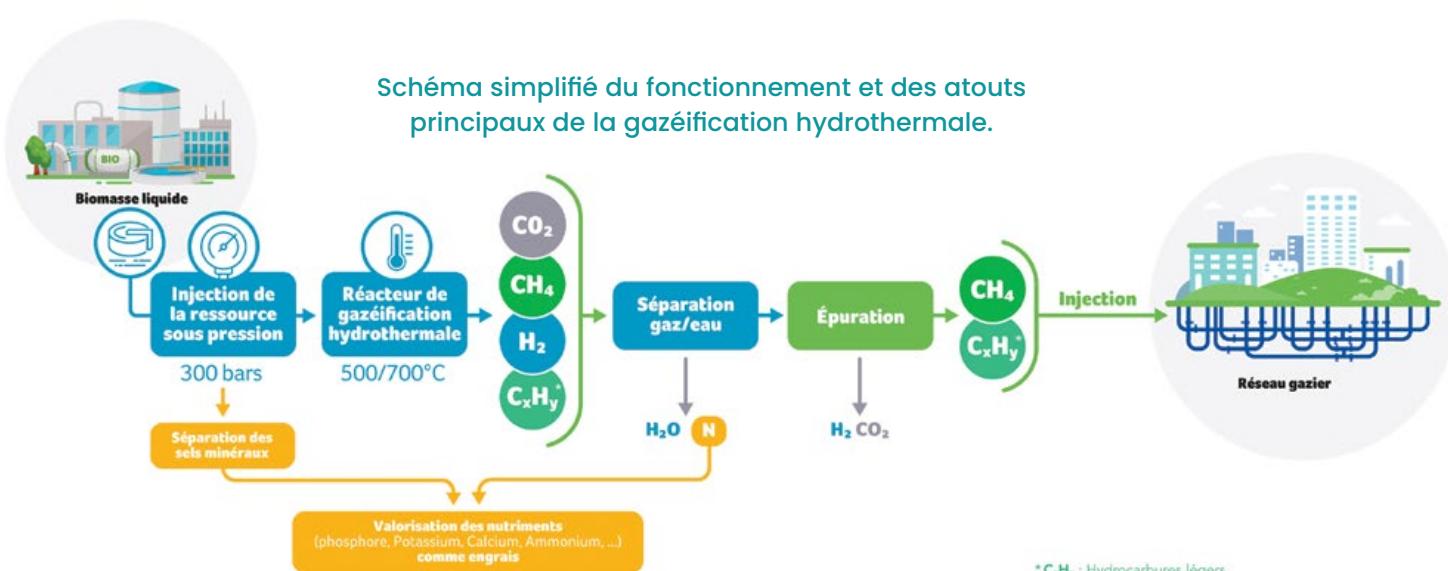
Le CEA et GRDF soutiennent l'émergence de la gazéification hydrothermale

Dans le cadre du projet Gazhyvert 2, lancé en janvier 2022, le CEA et GRDF se sont associés dans un objectif commun de développement des briques de base et du socle des connaissances nécessaires à l'émergence d'une filière française de gazéification hydrothermale (GHT) pour la production de biométhane, sans concurrence d'usage des intrants. Cette technologie permet de produire du gaz renouvelable à haut contenu énergétique, à partir de matière organique humide mal valorisée ou dont le retour au sol n'est pas possible.

Une étude préliminaire menée en 2021 par les deux partenaires avait démontré la faisabilité et la rentabilité d'une production de méthane par GHT à partir de boues de station d'épuration. Cette nouvelle étape a pour objectif de définir les adaptations nécessaires à la montée en maturité du procédé, permettant la conception d'un ou plusieurs démonstrateurs industriels. Objectif : une industrialisation du procédé à horizon 2025.

Forte d'une expertise de plus de 10 ans sur cette thématique, l'équipe du CEA s'appuie sur sa plateforme expérimentale équipée de bancs d'essais pouvant fonctionner en mode batch (lots) ou en mode continu, sur ses moyens d'analyses physico-chimiques et ses outils de simulation pour contribuer au succès de ce projet.

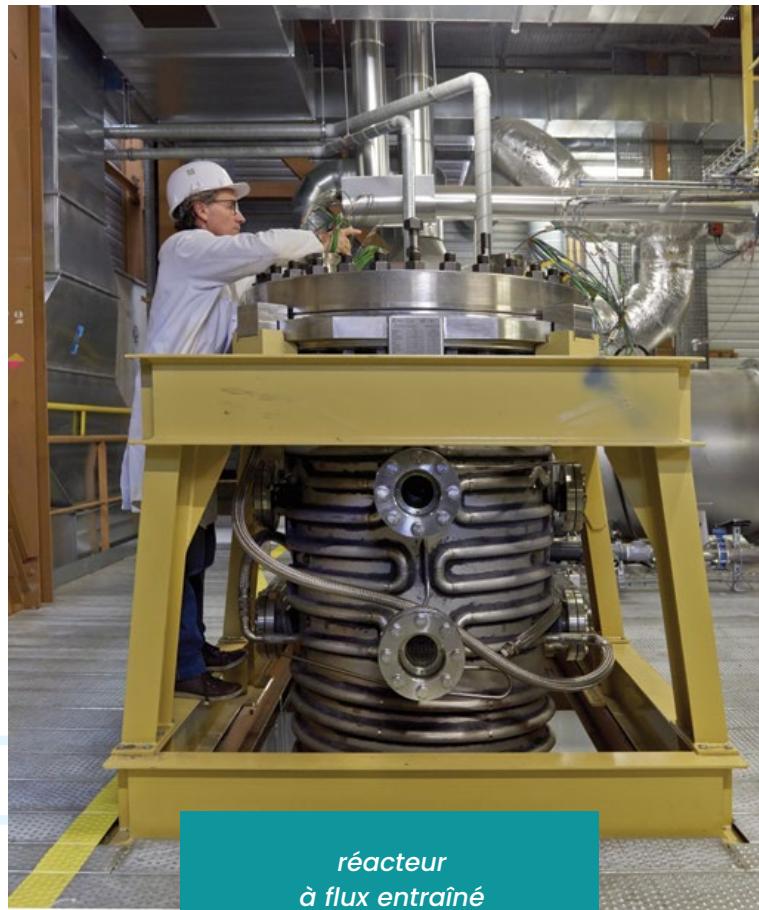
Schéma simplifié du fonctionnement et des atouts principaux de la gazéification hydrothermale.



* C_xH_y : Hydrocarbures légers

Valorisation alternative de pneus usagés pour la production de gaz

Parmi les différentes filières étudiées par GRDF pour synthétiser du méthane et décarboner son activité, la pyrogazéification permettrait de valoriser entre autres les pneus usagés. De son côté, ALIAPUR, société en charge de la collecte des pneus usagés, souhaite développer des voies de valorisation alternatives à la combustion de ces déchets. Ces deux partenaires ont fait appel au CEA pour réaliser des essais de gazéification de poudre de pneus sur son réacteur à flux entraîné pilote. En optimisant les conditions opératoires de température et de pression, la conversion du carbone du pneu atteint 96 %, et la production d'hydrocarbures (autre que méthane) est limitée. La pertinence de la gazéification pour la conversion des pneus usagés est démontrée, avec une estimation en 2022 du coût de méthane produit proche de celui du biométhane.



réacteur à flux entraîné

Vers une production innovante de biométhane

Le projet européen METHAREN rassemble 17 partenaires et a comme objectif premier d'augmenter significativement la rentabilité de la production de biométhane sur les sites d'usines de biogaz existantes. Le projet vise à développer un système innovant de production de biométhane à partir de déchets ménagers, en valorisant le CO₂ biogénique et les résidus de déchets mis au rebut jusqu'à présent. Ce procédé innovant, basé sur plusieurs technologies de valorisation et de conversion, représente une voie prometteuse pour la production de biométhane en visant une augmentation du rendement global de 150% et une réduction du coût global de production de 20%. Le CEA-Liten intervient sur deux briques technologiques dans ce procédé METHAREN. La première concerne la carbonisation hydrothermale. La seconde concerne la méthanation, avec l'objectif de réaliser un démonstrateur qui intégrera un réacteur innovant développé au CEA-Liten, et de le tester en conditions réelles.

Le CEA organise un workshop pour construire une filière nationale et fédérer les acteurs institutionnels et industriels



Le 30 novembre 2022, le CEA-Liten organisait un workshop dédié à l'Economie Circulaire du Carbone (ECC), qui réunissait 60 participants, pour majorité des industriels et des institutionnels externes au CEA.

La matinée était dédiée à des keynotes sur le rôle de l'économie circulaire du carbone dans la réponse aux changements climatiques, ses enjeux, un état des lieux de la réglementation, ainsi qu'aux témoignages de mise en œuvre concrète de solutions ECC par les industriels Technip Energies et GRDF.

L'après-midi fut l'occasion de travailler en sous-groupes, dans 3 ateliers :

Le 1^{er} atelier était intitulé « Ressources vs ambitions, quelles solutions ? »

Si aujourd'hui l'ambition est forte pour dé-fossiliser les secteurs de l'industrie et du transport qui ne pourront se passer de molécules organiques/carbonées, avec une réglementation qui ne cesse de s'affiner, la question se pose de la disponibilité des ressources. Faisant le constat qu'il n'y aurait pas assez de ressources pour tous les besoins, les participants ont exprimé la nécessité de mettre en place des méthodologies d'évaluations des indicateurs clés de performances tels que l'ACV (Analyse de Cycle de Vie), le coût, ou encore la souveraineté, afin de guider les feuilles de route. La pertinence des études multicritères technico-économiques et environnementales a été soulignée.

Le 2nd atelier était intitulé « Pour une filière française influente et collaborative : quelle implication de l'État nécessaire ? »

Bien qu'en France de nombreux projets sur le sujet de l'ECC soient à des niveaux de maturité technologique élevés (TRL 6 à 7), le manque de visibilité de la filière sur le plan réglementaire rend aujourd'hui complexe et risqué le passage à l'échelle industrielle et commerciale en France. Les participants ont identifié le « Plan national hydrogène » comme étant un modèle à suivre pour engager le dialogue avec les politiques, définir les roadmaps, mutualiser les initiatives. Ils ont exprimé leur volonté de créer une structure similaire pour l'ECC, afin notamment de parvenir à un échange constructif avec les représentants de l'état pour parvenir à l'émergence de cette filière en France.

Le 3^{eme} atelier était intitulé « Verrous technologiques, opportunités de symbioses industrielles ? »

L'objectif était de lister les verrous technologiques restant à lever pour les différents procédés qui permettent l'Economie Circulaire du Carbone (réacteurs catalytiques, thermoconversion, Fischer Tropsch, etc.). La question d'une solution française/européenne collective, impliquant une collaboration entre les différents acteurs du domaine pour lever ces verrous a été abordée. Le CEA a identifié la brique RWGS (conversion du CO₂ en CO) commune à de nombreuses voies/usages/produits comme étant clé. Le développement de réacteurs innovants et performants pour la RWGS est d'ores et déjà dans la feuille de route ECC du CEA.

L'évènement a généré beaucoup d'intérêt et d'enthousiasme. Le CEA propose des actions concrètes pour répondre aux conclusions des différents ateliers, certaines ayant déjà démarré.

Les nouvelles

STARTUP du Liten

“ La parole aux porteurs de projets ”



DistrictLab Digital twin for energy grids

« **DistrictLab** (<https://www.districtlab.eu/>) porte une solution d'ingénierie assistée par ordinateur, qui vise à optimiser le design et l'opération des réseaux thermiques urbains. Nous proposons une solution logicielle qui accompagne les clients dans leurs missions d'efficacité énergétique et leurs choix d'investissements. Elle s'appuie sur des programmes de R&D menés au CEA entre 2010 et 2020, en collaboration avec des entreprises opérateurs de réseaux de chaleur et des actions d'industrialisation entreprises dans le cadre du programme d'incubation CEA-MAGELLAN. »

Roland Bavière (CEO et CTO)
& Abdelhamid LARBI (CCO)

Heliup

« **Heliup** a pour ambition de permettre le déploiement rapide et à grande échelle de moyens de production d'énergie électrique en développant des panneaux solaires légers pour couvrir les grandes toitures de bâtiments (commerciaux, industriels, agricoles). Actuellement, les panneaux solaires conventionnels induisent des surpoids trop importants pour une grande majorité de ces bâtiments. On a lancé Heliup pour répondre à ce problème en proposant des solutions allégées, compétitives sur le plan économique et avec un niveau de performance élevé sur des durées supérieures à 25 ans. Notre ambition c'est de devenir un acteur industriel européen majeur et d'atteindre l'échelle du gigawatt de production annuelle dans les cinq prochaines années. »

Yannick Veschetti & Julien Gaume



SolReed

« **Solreed** c'est une idée qui part d'un constat : il y a énormément de panneaux photovoltaïques aujourd'hui qui partent en déchetterie alors qu'ils fonctionnent encore. On s'est posés la question : comment valoriser ce gisement de modules et créer une filière française, puis européenne, de modules de seconde vie ? On arrive à une société qui tient sur trois piliers : économique, environnemental, avec des produits complètement décarbonés, et social car nous avons choisi de confier toutes les opérations de re-certifications et de contrôle des modules par des personnes en insertion. »

Luc Federzoni



Comité de rédaction, rédaction : CEA-Liten

Conception, rédaction, réalisation : Cap Interactif

Traductions : Cap Interactif.

© Crédits photos : CEA, D. Guillaudin, P.Jayet, Aurore Baron SNCF, Mondragon Assembly,
Alain Doucé, L. Godart, Heliup, Districtlab, DR, Vendredi 4, Shutterstock, GRDF, F. Ardito