

CARNOT ÉNERGIES DU FUTUR

# BILAN DES PROJETS DE RESSOURCEMENT

## 2016-2017





# ÉDITO



**F**ace à des enjeux climatiques de plus en plus prégnants, des efforts de recherche sans précédent aujourd'hui mettent l'accent sur les technologies à faibles émissions de carbone qui ont le potentiel d'offrir une amélioration rapide de la performance des systèmes énergétiques avec des coûts maîtrisés.

Les ambitions affichées sont d'atteindre, de façon rentable, une transformation fondamentale du système énergétique européen et mondial, en développant des moyens plus durables, plus sûrs et plus compétitifs pour fournir une énergie abordable aux consommateurs.

La Recherche et l'Innovation constituent les piliers essentiels de cette transformation. Au-delà d'une approche traditionnelle en « silo » il s'agit aujourd'hui de développer une approche intégrée de l'ensemble des systèmes énergétiques en misant sur l'expertise et l'interdisciplinarité.

Dans ce cadre, Énergies du futur développe et encourage la recherche partenariale pour faire émerger les innovations qui répondent aux besoins croissants de nouvelles énergies décarbonnées et aux besoins d'une plus grande maîtrise de l'efficacité énergétique, en particulier dans le secteur industriel.

Pour aboutir à ces partenariats porteurs d'innovations, il faut souvent des années de Recherche et Développement avant de transformer un concept en un prototype fonctionnel. La vertu du dispositif Carnot est d'initier, à cet effet, des projets de ressourcement pour préparer l'avenir.

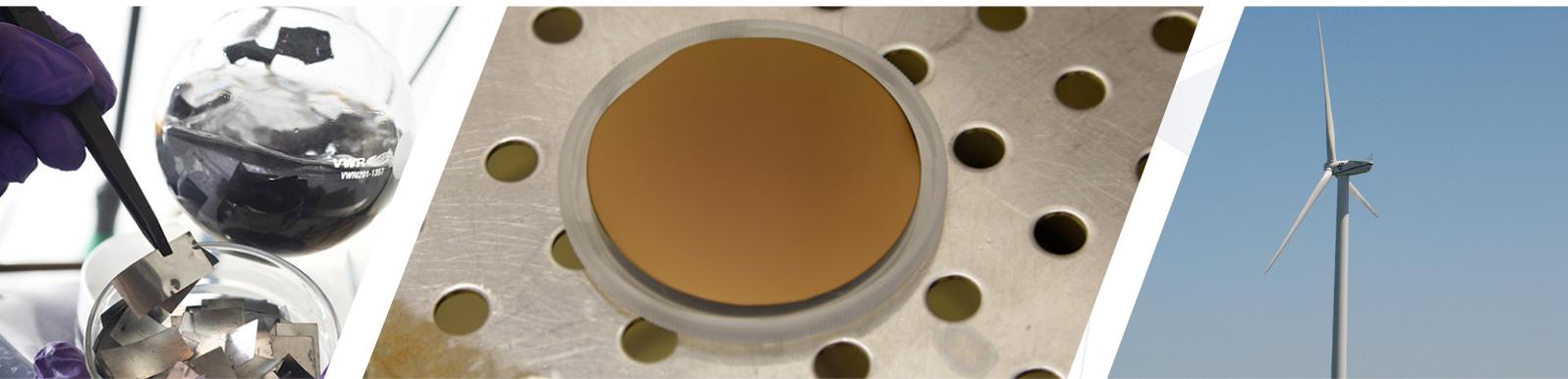
Nous présentons ici quelques projets de ressourcement porteurs dans nos laboratoires qui anticipent les besoins et les enjeux de demain.

- Avec des projets qui permettent de mieux comprendre les débits de fluide sur des génératrices hydrauliques, ou de suivre la cristallisation du silicium à la base des cellules solaires photovoltaïques, nos laboratoires de recherche visent à améliorer les rendements ou le fonctionnement des process « actuels ».
- Les développements matériaux portent sur des gains de matière et de volume en conservant l'efficacité des pièces réalisées. Un des projets porte sur les matériaux magnétiques. De même, l'amélioration des états de surface des pièces métalliques réalisées en fabrication additive contribue au développement de cette technologie qui est en plein essor.
- Dans le cadre du stockage de l'énergie, le développement de nouveaux matériaux de cathodes pour batteries lithium permettra d'augmenter la capacité des futurs accumulateurs. La conversion en bio-huile des boues industrielles permettra de mieux valoriser énergétiquement les déchets.
- L'étude de nouveaux matériaux et procédés vise à dépasser les rendements actuels de conversion photovoltaïque.
- Un des défis énergétiques est d'améliorer la valorisation de la chaleur. C'est l'objet d'une étude développant des cycles combinés : production de froid et d'électricité à partir de chaleur fatale.
- Énergies du futur a également initié un projet d'étude de perspectives énergétiques avec notamment la constitution d'un méta modèle qui permet de comprendre les paramètres clefs et les conditions de l'émergence des technologies de l'énergie dans la transition énergétique.
- Enfin, un dernier projet vise à transformer les contraintes environnementales en opportunités d'innovations sur différentes thématiques comme le stockage thermique ou l'efficacité énergétique des bâtiments.

J'espère que ces quelques « pépites » inspireront et seront le germe de nouvelles collaborations susceptibles de transformer notre paysage énergétique.

François Weiss  
Directeur de l'institut Carnot Énergies du futur

# CARNOT ÉNERGIES DU FUTUR



## CARNOT : UN LABEL, DEUX MISSIONS

Les laboratoires publics de recherche labellisés Carnot sont sélectionnés par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (MESR) sur des critères d'**excellence scientifique**, de **recherche partenariale** et de la dynamique associée. Le label Carnot est régulièrement évalué.

### L'EXCELLENCE SCIENTIFIQUE

Les chercheurs sont engagés dans des projets et collaborations de haut niveau. Carnot finance des projets sélectionnés pour renforcer le ressourcement et préparer les futurs transferts et partenariats à moyen terme (3-5 ans).

### LA RECHERCHE PARTENARIALE

Les laboratoires du Carnot sont engagés dans des partenariats avec l'industrie. Carnot renforce des moyens pour prospecter et construire des relations contractuelles claires notamment sur les coûts et la Propriété Intellectuelle.

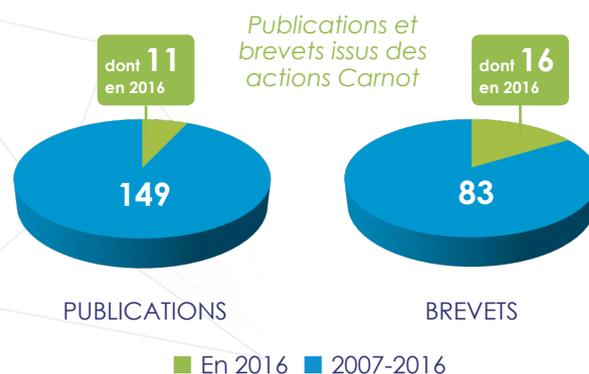
PRÉSENTATION

## L'ÉQUIPE CARNOT ÉNERGIES DU FUTUR

Une équipe opérationnelle dédiée.



## CHIFFRES-CLÉS



# SOMMAIRE

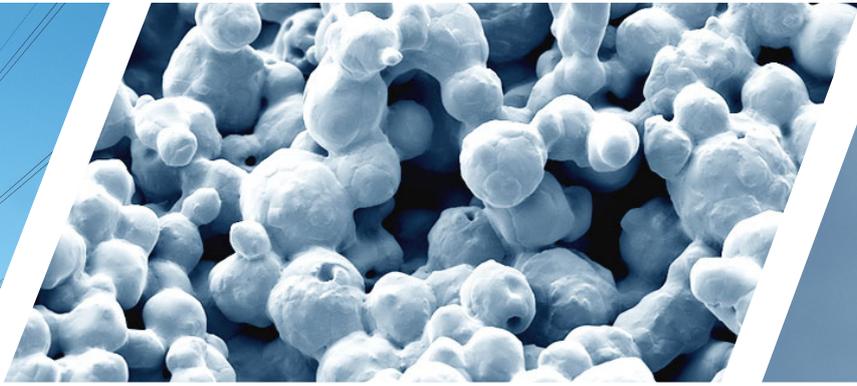
## BILAN 2017 DES PROJETS CARNOT

<b>ASDA</b> - ACOUSTIC SYSTEM OF DIPHASIC FLOW ANALYSIS .....	p.7
<b>AWINSI</b> - ACOUSTIC WAVE IN SILICON .....	p.10
<b>ECOFRIT</b> - ÉCONOMIE DE MATIÈRE ET CONTRÔLE DE LA PERFORMANCE PAR FRITTAGE SPS À LA FORME .....	p.12
<b>QUALISURF</b> - OPTIMISATION DES ÉTATS DE SURFACE EN FABRICATION ADDITIVE MÉTALLIQUE .....	p.16
<b>GEMINI</b> - GÉNÉRATION DE MATÉRIAUX ORIGINAUX PAR ÉCHANGE IONIQUE .....	p.19
<b>BEATLES</b> - BOUES DE STEP : VALORISATION ÉNERGÉTIQUE INCLUANT LA RÉCUPÉRATION DES SELS.....	p.22
<b>SI-PREMIUM</b> - MATÉRIAUX [...] POUR L'ÉLABORATION DE CELLULES TANDEM SILICIUM [...] .....	p.25
<b>TRICYCLE</b> - THERMODYNAMIC COMBINED CYCLE FOR COOLING AND ELECTRICITY PRODUCTIONS.....	p.28
<b>PROSPEN2</b> - PROSPECTIVE ÉNERGÉTIQUE .....	p.31
<b>ÉCO-INNOV'NTE</b> - ÉCO-INNOVER LES NOUVELLES TECHNOLOGIES DE L'ÉNERGIE .....	p.33

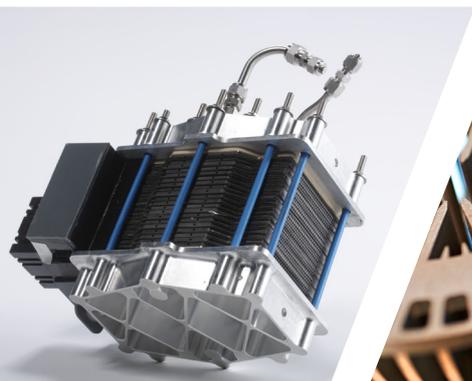
## PROJETS EN COURS

<b>LISTE DES PROJETS CARNOT</b> .....	p.37
---------------------------------------	------





PRÉSENTATION



# ASDA

ACOUSTIC SYSTEM OF DIPHASIC FLOW ANALYSIS

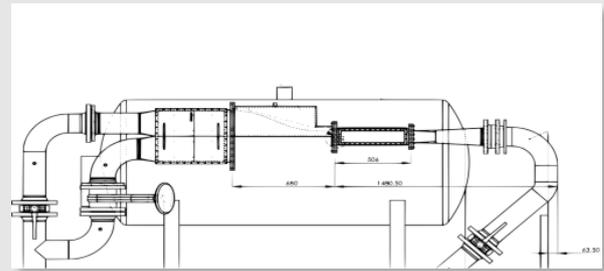
SYSTÈME ACOUSTIQUE POUR L'ÉTUDE DES ÉCOULEMENTS DIPHASIQUES

Laboratoires impliqués : LEGI, GIPSA-Lab

Auteur : H. DJERIDI

## L'ESSENTIEL

Le projet consiste à concevoir une installation hydraulique pour l'étude d'un écoulement turbulent derrière une marche descendante en régime cavitant (phase vapeur). Sur cette installation sera testé un nouveau concept de tomographie ultrasonique multivoie : système composé par plusieurs cordes d'émission/réception (constituées de transducteurs ultrasoniques à large bande).



Installation hydraulique : écoulement de marche descendante.

## BILAN

### RAPPEL DU CONTEXTE ET DES OBJECTIFS DU PROJET

En milieu industriel, la nécessité de détecter les dérives de certaines machines hydrauliques passe par une connaissance précise des débits de fluide. Cette précision est limitée lors d'emploi de systèmes non intrusifs en milieu industriel en particulier sur des conduites de grands diamètres. Pour des mesures en continu, l'incertitude sur la valeur du débit est liée aux hypothèses faites sur la forme du profil des vitesses et à sa variabilité.

La technologie de **tomographie ultrasonore** que l'on se propose de valider dans le cadre du présent projet permettra d'obtenir une chute drastique du prix de ce type d'installation et permettra donc de rentrer sur ce marché avec un avantage compétitif conséquent, utile dans le domaine de l'énergie.

Le champ des recherches concerne des écoulements complexes sur des problématiques qui peuvent être liées à des applications industrielles stratégiques. On s'intéresse à la mise en œuvre ainsi qu'à la validation d'une méthode de mesure basée sur la tomographie ultrasonore capable de résoudre spatialement à haute cadence, des champs de vitesse en écoulements multiphasiques et instationnaires. L'idée principale de ce projet est donc de valider, sur un écoulement académique, les performances et les limitations de cette technique de tomographie ultrasonore en la calibrant par rapport aux méthodes déjà utilisées au LEGI pour

ce type d'écoulements (champs de vitesse par LDV, PIV-LIF et champs de concentration par absorption RX et sondes optiques).

### DESCRIPTION DE L'ÉTAT D'AVANCEMENT DU PROJET

#### Construction de l'installation hydraulique

L'étude proposée vise à upgrader et développer une installation test dont l'ensemble des grandeurs physiques (débit, pertes de charge, pression, vitesse, turbulence, taux de vide) est connue. L'installation dont il est question (décrite sur les **Figures 1 et 2**) reproduit un écoulement de type marche descendante dans lequel sont générées des instabilités hydrodynamiques de type cisaillement intense, structures tourbillonnaires de grande dynamique, zone de recirculation, et qui peuvent se retrouver en configuration industrielle dans les conduites.

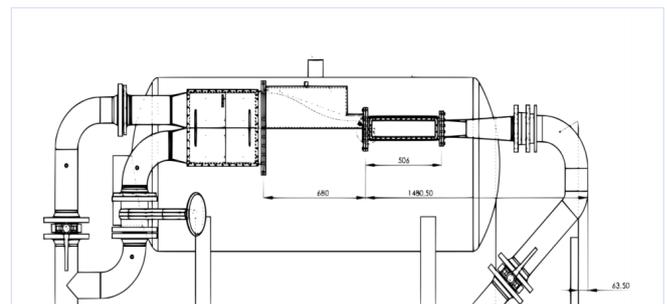
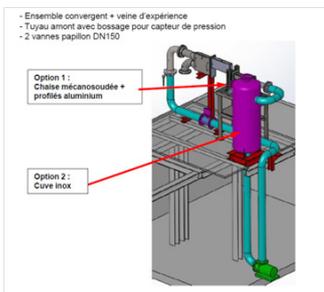


Figure 1 : Schéma de l'installation.





**Figure 2 :** Exemple d'écoulement de marche descendante cavitante obtenu (l'écoulement est de gauche à droite).

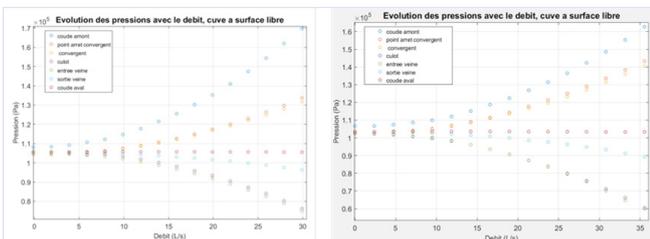


**Figure 3 :** Schémas et photos de l'installation.

### Calibration de l'installation

Mesures de débits et de pression

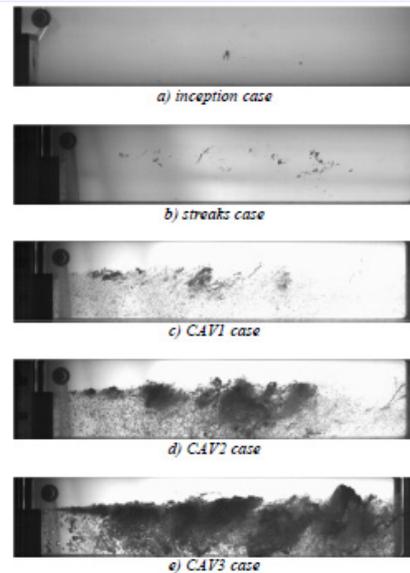
La première phase de calibration a consisté à mesurer les différentes pressions dans tout le circuit en fonction du débit de la pompe et ce afin de quantifier les pertes de charge du système hydraulique et de vérifier si celui-ci a bien été dimensionné. Les premières courbes sont présentées sur la **Figure 4**.



**Figure 4 :** Évolution des pressions circuit en fonction du débit avec un ou plusieurs nids d'abeille en amont.

La seconde étape du projet consiste à calibrer de manière fine l'écoulement par des techniques non-intrusives de type vélocimétrie Laser Doppler (LDV) pour la mesure en un point du champ de vitesse résolue en temps réel. Ces mesures permettent d'accéder par analyse spectrale à la dynamique de l'écoulement et de ses instationnarités. Ces mesures couplées à des

mesures du champ de pression pariétale synchronisées permettent également d'obtenir la dynamique spatio-temporelle des structures tourbillonnaires de l'écoulement.



**Figure 5 :** Visualisation de l'écoulement.

### Tests des capteurs acoustiques GIPSA-Lab

Cette dernière étape consiste à mettre en place la tomographie ultrasonore multivoie sur l'installation expérimentale précédemment calibrée. Cet outil consiste à utiliser pour émettre et recevoir des ondes ultrasonores des transducteurs « large bande » constitués d'un ensemble d'éléments pouvant être piloté de manière indépendante.

Une fois les mesures effectuées à l'aide du capteur ultrasonore et paramétrées par d'autres mesures optiques, il sera nécessaire d'effectuer un post-traitement par des outils de reconstruction algébrique itérative (ART). Ainsi la prise en compte de l'influence de l'écoulement turbulent sur les signaux propagés sera pleinement conduite en particulier concernant l'optimisation de la transition des ondes ultrasonores en milieu instationnaire.

L'ensemble doit permettre de définir une solution flexible et efficace de mesure de débits diphasiques en contexte non-stationnaire.

En ce qui concerne la précision de mesure, l'objectif est d'avoir une erreur inférieure à 5 %, tout en fournissant une centaine de mesures par secondes, en régime turbulent non-stationnaire (voire transitoire).

Une maquette de tomographie ultrasonique avec quatre cordes disposées sur la boucle de génération d'écoulements diphasiques du LEGI a été réalisée.

La **Figure 6** présente le principe de cette mesure.

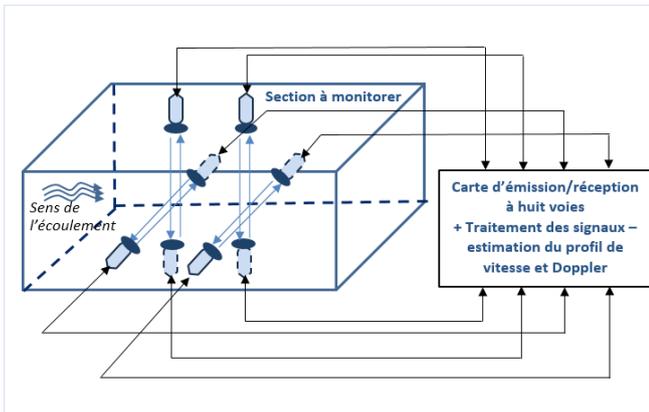


Figure 6 : Système de tomographie ultrasonique à quatre cordes bidirectionnelles.

Le traitement des signaux étudiés s'appuie sur l'analyse temps-fréquence à haute résolution avec pour objectif d'estimer les temps de vol ainsi que les déformations Doppler des signaux.

Les premiers essais montrent que, compte tenu des dimensions de la veine d'essais et du matériau utilisé pour les hublots, les transducteurs à 5 MHz semblent mieux adaptés pour l'installation. Les alignements pour les trajectoires des ondes dans l'écoulement sont en cours d'optimisation.

#### BILAN DE VALORISATION

##### Obtention d'une bourse de thèse

- Ce projet a permis de financer une installation sur laquelle nous avons décidé d'allouer une bourse doctorale que nous avons obtenue auprès de l'ED IMEP2.
- Ce projet a également permis de mettre en place une collaboration avec le GIPSA-Lab qui a ainsi pu obtenir un autre contrat avec l'institut Carnot LSI intitulé « UTHIM ». Ce contrat a permis d'intégrer des capteurs acoustiques de différentes gammes ainsi que des cartes d'acquisition spécifiques pour le projet.
- Cette collaboration a donné lieu au financement d'un Post-Doc au GIPSA-Lab travaillant sur la partie traitement du signal pour la tomographie ultrasonore.

#### PERSPECTIVES

##### SUITE DU PROJET

L'obtention d'une bourse de thèse MESR ainsi que l'arrivée en octobre 2017 d'un doctorant va permettre de mener à terme ce projet et de tester la faisabilité de la tomographie ultrasonore en écoulement turbulent.

La partie émergente et innovante de ce projet est relative à l'application de la tomographie ultrasonore en écoulement diphasique (ce qui est une première pour notre communauté).

##### NOUVELLES COLLABORATIONS

- GIPSA-Lab projet Carnot LSI.

##### ACTIONS DE VALORISATION À VENIR

- **Action 1** : Publication des premiers résultats de tomographie ultrasonore en écoulement turbulent.
- **Action 2** : Brevet sur la technique de tomographie.
- **Action 3** : Publication de l'extension de la technique de mesure aux écoulements diphasiques.



# AWINSI

## ACOUSTIC WAVE IN SILICON

Laboratoires impliqués : Liten-DTS / SIMaP

Auteurs : M. ALBARIC, V. BRIZÉ, V. BOTTON, S. MIRALLES, K. ZAIDAT

### L'ESSENTIEL

*Élaboration d'un guide d'onde acoustique permettant d'introduire des ultrasons dans un four de cristallisation de silicium pour les applications solaires photovoltaïques et de mesurer/contrôler la vitesse de cristallisation.*



Test en température du guide d'onde acoustique  
(Four Pégase – fusion SnSi 1000°C)

### BILAN

#### RAPPEL DU CONTEXTE ET DES OBJECTIFS DU PROJET

L'introduction d'ultrasons dans un four de solidification du silicium photovoltaïque constituerait une réelle rupture technologique. Les ultrasons sont un formidable outil de diagnostic (forme de l'interface solide/liquide, vélocimétrie) voire de brassage du silicium liquide. Cette innovation permettrait une réduction significative des coûts de production du Si cristallin tout en améliorant sa qualité. L'enjeu majeur consiste à assurer un brassage homogène du bain de silicium au cours de la solidification pour améliorer la ségrégation des impuretés à l'interface solide/liquide. Différentes solutions existent comme le brassage mécanique développé au CEA. Cette méthode a le désavantage d'être intrusive et est une source de contamination. Le brassage magnétique, étudié par le laboratoire SIMaP, est rendu difficilement utilisable du fait de son coût d'installation et des contraintes engendrées (sécurité, compatibilité matériaux). Des recherches préliminaires, ne concernant pas le silicium liquide, sur une solution de brassage basée sur l'utilisation d'ultrasons ont été initiées dans le cadre des thèses de W. Dridi [1] et B. Moudjed [2] co-encadrées par le LMFA (INSA Lyon) et le CEA. Elles ont montré à l'échelle du laboratoire le potentiel des ondes acoustiques comme source d'écoulement et comme moyen de réduire les instabilités des bains de métaux fondus. Un premier brevet [3] commun au CEA et au LMFA a été déposé en

2009 sur un dispositif de guidage d'ondes ultrasonores adapté à une utilisation dans un four de solidification dirigée du silicium. Un second brevet CEA/LMFA a été déposé sur la localisation par ultrasons de l'interface solide/liquide [4].

Si les solutions techniques sont ébauchées, le guide d'onde n'avait pas encore été développé. Les objectifs d'AWINSI concernent la conception du dispositif de guidage et sa mise en œuvre dans un four de solidification du silicium (~1400°C). Ces développements, en parfaite adéquation avec les feuilles de route du LITEN, permettraient de nombreuses possibilités de collaborations institutionnelles ou industrielles en lien avec la cristallisation (homogénéisation, position du front de solidification, diagnostic de défaut cristallin), la purification, voire le tirage de lingots par la méthode Czochralski.

[1] W. Dridi, «Influence de «l'acoustic streaming» sur les instabilités des écoulements chauffés latéralement», Université Lyon 1, 2008.

[2] B. Moudjed, « Caractérisation expérimentale et théorique des écoulements entraînés par ultrasons. Perspective d'utilisation dans les procédés de solidification du silicium photovoltaïque », INSA Lyon, 2013.

[3] « Dispositif de contrôle de l'état d'avancement de la cristallisation d'un bain de matériau fondu dans un procédé de solidification dirigée utilisant les ultrasons »,

J.-P. Garandet, V. Botton et Ch. Salvi, brevet EN 09 58523, déposé le 30/11/2009.

[4] « Dispositif de guidage d'ondes ultrasonores adapté à une utilisation dans un four de solidification dirigée du silicium », J.-P. Garandet, V. Botton, D. Camel et B. Drevet, brevet EN 09 58524, déposé le 30/11/2009.

## DESCRIPTION DE L'ÉTAT D'AVANCEMENT DU PROJET

Le projet AWINSI est terminé depuis le 31/12/2016. Le projet s'est déroulé en deux étapes : la conception du prototype et sa mise en œuvre dans un four de solidification du silicium.

### Conception du prototype et tests préliminaires

L'étape de conception a permis d'identifier le matériau compatible avec les procédés de solidification du silicium à savoir une résistance mécanique à des températures supérieures au point de fusion du silicium (~1420°C) et un matériau non polluant/contaminant vis-à-vis du bain de silicium. À ce stade, des enregistrements d'échos acoustiques dans l'air et dans un bain d'eau ont été réalisés pour vérifier la transmission des ondes acoustiques par le guide d'onde. Des essais de fonctionnement en température ont ensuite été réalisés dans le four « Pégase » de la plateforme «Matériau» du CEA. Le fonctionnement du guide d'onde a pu être vérifié dans un bain d'étain à ~300°C puis dans un mélange d'étain et de silicium à ~1000°C.

### Mise en œuvre du prototype

Après avoir pu vérifier la fonctionnalité du guide d'onde sur une série de tests préliminaires la mise en œuvre du prototype a été réalisée à l'échelle laboratoire (100g de Si) dans un four de fusion. La **Figure 1** présente une vue d'ensemble du four utilisé pour l'essai de faisabilité et les réponses acoustiques de la sonde enregistrées pour 3 positions (haut, intermédiaire et fond) dans le bain de Si liquide, ainsi que l'écho de la sonde en dehors du bain. On observe l'apparition et le déplacement des échos acoustiques renvoyés par la surface solide du fond de creuset. Lors du déplacement vertical de la sonde dans le bain, les échos renvoyés par la surface du fond de creuset apparaissent à des temps différents en fonction de la distance avec le fond du creuset.

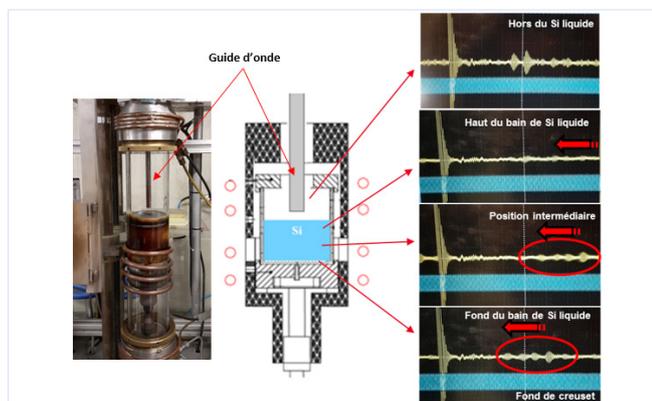


Figure 1 : Mise en œuvre du prototype dans le four de solidification « Béatrice » de la plateforme Matériau du CEA.

Ces résultats montrent le bon fonctionnement du guide d'onde dans un bain de silicium. L'objectif du projet AWINSI est donc atteint. Ils sont également particulièrement prometteurs car ils mettent en avant une fonctionnalité possible dédiée au suivi du front de solidification (liquide - solide) lors de la cristallisation de lingot de Si.

## BILAN DE VALORISATION

### Brevets

- « Sonde acoustique destinée à être utilisée dans un four de solidification du silicium et son procédé de fabrication », M. Albaric (CEA-Liten), V. Brizé (CEA-Liten), V. Botton (INSA Lyon), S. Miralles (INSA Lyon), FR1762042, déposé le 13/12/2017.

### Conférences internationales

- « An original moving mesh method for the simulation of crystallization and purification processes of photovoltaic silicon », V. Tavernier, S. Millet, V. Botton, D. Henry, M. Albaric, oral accepté à Thermec 2018, 8-13 juillet 2018, 2018, Paris.
- « Towards wall functions for the prediction of solute segregation in plane front directional solidification », V. Botton, M. Chatelain, M. Albaric, D. Pelletier, D. Henry, S. Millet, J.P. Garandet, oral accepté à Thermec 2018, 8-13 juillet 2018, 2018, Paris.

## PERSPECTIVES

### SUITE DU PROJET

- Poursuite des activités dans le cadre du projet inter-Carnot ASTRES (porté par le LMFA dans le cadre de l'institut Carnot Ingénierie@Lyon) : celles-ci sont principalement axées sur la caractérisation des écoulements générés par la sonde acoustique et la détermination précise du suivi de front de solidification (comparaison palpéage manuel/palpéage acoustique) via un traitement numérique des données collectées du guide d'onde.
- Intégration d'une tâche dans le projet AMI «CrystalMega20» soutenu par l'ADEME afin d'évaluer l'utilisation d'ondes acoustiques comme moyen de brassage d'un bain de silicium liquide.

### NOUVELLES COLLABORATIONS

- Expression d'intérêt pour le développement du brassage du bain de silicium liquide par ondes acoustiques de ECM Technologies, partenaire du Projet AMI « CrystalMEGA20 » soutenu par l'ADEME.

### ACTIONS DE VALORISATION À VENIR

- La publication des résultats des travaux initiés dans le projet AWINSI sont en préparation pour des journaux à comité de lecture.



# ECOFRIT

ÉCONOMIE DE MATIÈRE ET CONTRÔLE DE LA PERFORMANCE PAR FRITTAGE SPS A LA FORME

Laboratoires impliqués : Liten-DTNM

Auteurs : G. GAILLARD, G. DELETTE, G. FRAJER, J. LEFORESTIER

## L'ESSENTIEL

Le projet Carnot ECOFRIT a démontré l'intérêt de la mise en œuvre sur deux matériaux d'une technique avancée de fabrication par consolidation rapide de poudres : le frittage flash ou Spark Plasma Sintering (SPS).



Équipement de frittage SPS  
(FCT System HP D 25 - © CEA-Liten).

## BILAN

### RAPPEL DU CONTEXTE ET DES OBJECTIFS DU PROJET

La métallurgie des poudres est aujourd'hui considérée comme faisant partie des procédés les plus avancés de mise en forme des métaux. Elle se distingue des techniques conventionnelles (fonderie, forgeage) par :

- Des avantages techniques : obtention de formes proches des cotes finales, contrôle de la microstructure et de la porosité, large gamme de compositions ;
- Des avantages économiques : réduction des coûts d'usinage par réalisation de pièces proches des cotes, limitation des pertes de matière.

La métallurgie des poudres approvisionne de nombreux secteurs industriels : réalisations aérospace, industries de l'électrotechnique, de l'énergie nucléaire et, en particulier, l'industrie automobile (le plus gros client) en produisant en masse des pièces mécaniques (poulies, couronnes, composants d'amortisseurs...) et des coussinets autolubrifiants. Dans certains cas, la métallurgie des poudres est la seule voie possible pour la réalisation de pièces aux propriétés spécifiques. On peut citer les matériaux de friction réfractaires, les métaux durs (par exemple pour les outils de coupe), les aimants haute performance, etc.

Parmi les procédés existants, le Spark Plasma Sintering (SPS) ou frittage flash trouve sa place dans le cercle des nouvelles techniques avancées de fabrication. Il s'agit d'une méthode avantageuse de consolidation de poudres qui consiste à appliquer simultanément un courant électrique et un chargement mécanique à une masse de poudre logée dans un moule (**Figure 1**). Les durées de séjour dans l'équipement sont très courtes grâce aux vitesses de chauffage élevées atteintes (typiquement jusqu'à 600 °C/min). Cette caractéristique se traduit favorablement par la conservation d'une microstructure fine.

Cependant, la densification de formes complexes reste encore problématique du fait des hétérogénéités (de densité et de propriétés mécaniques) qui se développent au cours de la consolidation.

Des progrès sont donc attendus. La compréhension et la maîtrise du procédé doivent notamment être améliorées à l'aide de l'utilisation d'une simulation numérique.

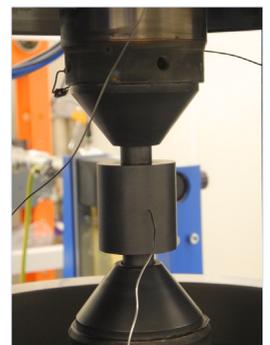


Figure 1 : Procédé SPS (montage en graphite).



C'est en s'appuyant sur ces constats que le projet ECOFRIT a été engagé :

- D'une part, avec un objectif de réalisation de pièces à microstructures contrôlées. Pour cela, le choix s'est fixé sur deux cas d'intérêt : un ferrite spinelle et des carbures de tungstène ;
- Et, d'autre part, avec un objectif de modélisation du procédé.

## DESCRIPTION DE L'ÉTAT D'AVANCEMENT DU PROJET

L'intérêt du frittage flash appliqué à un ferrite spinelle  $(\text{Ni,Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4$

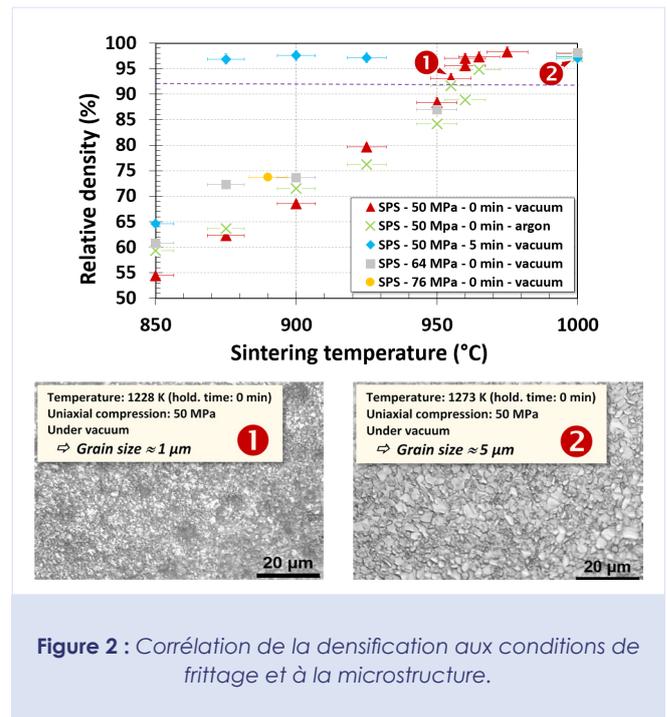
Les composants de l'électronique de puissance tendent vers un fonctionnement à haute fréquence dans le but de réduire le volume et la masse des sous-ensembles embarqués. Cette augmentation de la fréquence nécessite la production de matériaux magnétiques à faibles pertes.

Pour atteindre cet objectif, un meilleur contrôle de la microstructure des matériaux magnétiques doux polycristallins est prometteur, notamment si la taille des grains peut être maintenue, après frittage, à la dimension d'un domaine magnétique unique (1 à 2  $\mu\text{m}$ ) tout en limitant la porosité résiduelle (< 5 %). Or, dans le procédé conventionnel, ces deux conditions sont généralement antagonistes.

Les ferrites de structure spinelle  $(\text{Ni,Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4$  sont parmi les meilleurs candidats pour des applications à haute fréquence (> 1 MHz). Les performances (magnétiques, électriques et mécaniques) de ces matériaux magnétiques doux sont étroitement liées à leur composition et leur microstructure et, par conséquent, aux processus de synthèse des poudres et de fabrication des pièces densifiées. La consolidation de poudres de ferrite par une voie de métallurgie des poudres, pour produire des pièces denses tout en conservant une microstructure fine, est difficile à réaliser par les méthodes de frittage classiques. Une mise en œuvre par Spark Plasma Sintering (SPS ou frittage flash) est considérée comme une solution alternative puisque les durées de maintien en température, qui s'avèrent très courtes, inhibent les effets des mécanismes responsables de la croissance des grains.

Dans le cadre d'ECOFRIT, une poudre de  $\text{Ni}_{0.31}\text{Zn}_{0.47}\text{Co}_{0.02}\text{Cu}_{0.20}\text{Fe}_{1.86}\text{O}_{4-y}$  a été synthétisée par une méthode réactive à l'état solide [1] (procédé de synthèse issu du projet Carnot-MATGAN). Cette poudre a été densifiée avec succès par SPS sur une gamme étendue de températures et de pressions (respectivement de 825 à 1000 °C et de 50 à 75 MPa) afin d'analyser un large registre de caractéristiques microstructurales [2]. À 955 °C, la densification à 95 % est obtenue sans croissance des grains (taille de grain ~ 1  $\mu\text{m}$  - **Figure 2**), ouvrant la voie à des microstructures à faibles pertes en fréquence. Ce résultat est remarquable car les tailles de grains, pour ce niveau de densité, sont toujours

supérieures à 5-10  $\mu\text{m}$  dans le procédé conventionnel, ce qui entraîne des pertes excessives par déplacements de parois de domaine.



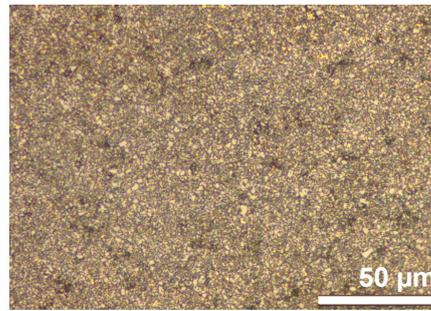
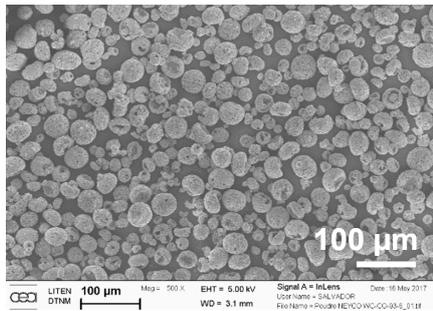
Par ailleurs, l'aimantation à 7 T est supérieure d'environ 5% par rapport aux résultats après frittage naturel. L'intérêt du frittage flash appliqué à un ferrite spinelle  $(\text{Ni,Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4$  est donc démontré. Le premier volet du projet ECOFRIT a débouché sur l'obtention d'un matériau magnétique dense et à structure fine, à l'aide du procédé SPS de consolidation rapide de poudres, s'accompagnant d'un gain sur les propriétés magnétiques intrinsèques au matériau.

Mise en œuvre du frittage flash pour la densification de poudres de carbure de tungstène (WC-6.5Co et WC)

Les carbures de tungstène sont mis en œuvre dans le monde industriel comme matériaux pour les outils de coupe. La densification des pièces en WC sans ajout (Co, Ni) est difficile à obtenir, même par un procédé de pressage à chaud et il a été démontré que le procédé SPS pouvait conduire à la densification de ce type de matériau.

L'objectif des travaux, réalisés dans le contexte du second volet du projet ECOFRIT, a été de valider un procédé de consolidation de poudres de carbures de tungstène par SPS et de corrélérer les conditions opératoires aux microstructures obtenues.

Au final, une densité relative supérieure à 98 % a été atteinte pour une poudre de WC-6.5 wt. % Co. Une poudre de WC a pu être elle aussi consolidée avec une densité relative finale supérieure à 99 %. Dans les deux cas, il n'a été observé aucun grossissement de grain anormal (**Figure 3**). L'intérêt du frittage flash a été validé et une gamme d'élaboration a été mise au point.



**Figure 3 :** Poudre de WC-6.5 wt.% Co et microstructure obtenue après consolidation par frittage flash.  
[© CEA-LITEN]

### Vers la maîtrise du procédé SPS par la modélisation

La compréhension et la maîtrise du procédé de frittage flash ne peut progresser sans une démarche de modélisation. Ce concept s'applique, en particulier, au cas de la réalisation de pièces à géométries complexes.

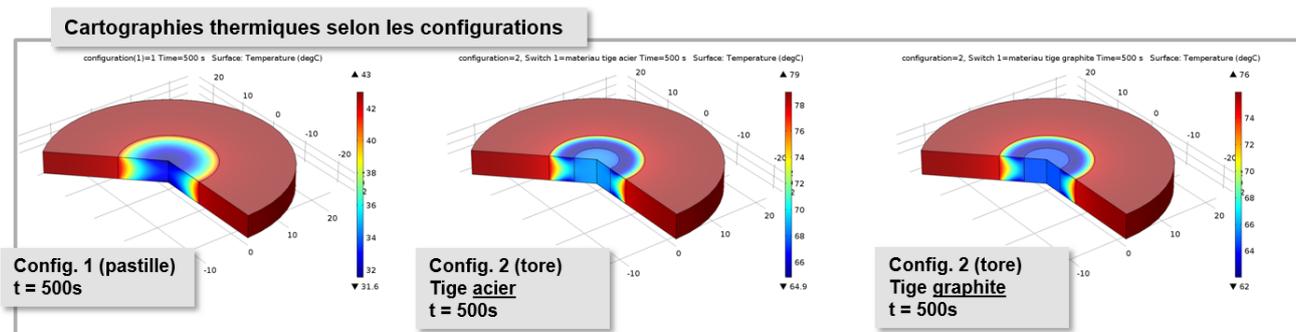
La notion de forme complexe en SPS revêt deux aspects :

- La complexité peut être liée à des épaisseurs variables de poudres à consolider au sein d'une même pièce. Il se développe alors des inhomogénéités de densification (le champ des déplacements étant non uniforme). La description des mécanismes mis en jeu passe par une modélisation de la densification d'un milieu poreux soumis à un chargement mécanique et à une température (modèle d'Abouaf, modèle d'Olevsky) ;
- La complexité découle de la volonté de réaliser des pièces creuses, à l'aide d'inserts massifs préalablement noyés dans la poudre et destinés à donner une forme prédéfinie à la pièce finale. Cette méthode, qui paraît simple à mettre en œuvre, génère des problématiques d'interactions entre des matériaux aux caractéristiques différentes et en contact les uns des autres. Une modélisation thermomécanique de la phase de refroidissement permet d'appréhender et contrôler ces phénomènes.

L'étude conduite au cours du projet ECOFRIT s'est attachée au second cas, en vue de la fabrication de tores. Le cas s'apparente à la modélisation d'une structure multicouche soumise à un refroidissement, tenant compte de la géométrie des outillages utilisés dans le procédé SPS.

Des calculs en régime transitoire ont été réalisés sous COMSOL® en faisant varier les dimensions ainsi que la nature des matériaux utilisés pour les outillages (graphite ou acier). Cette approche a permis d'avoir accès aux cartographies de températures et aux contraintes mécaniques qui se développent en différents instants et pour différentes configurations.

Finalement, l'outil mis en place permet d'optimiser les conditions opératoires du procédé sans avoir recours à de nombreuses campagnes expérimentales (**Figure 4**).



**Figure 4 :** Modélisation du procédé SPS et calculs en régime transitoire sous COMSOL® [© CEA-LITEN]



## BILAN DE VALORISATION

### Publications et congrès

- [1] G. Frajer et al., *Study of magnetic properties of NiZnCu ferrite synthesized by Pechini method and solid-state reaction*, AIP Advances 8 (4) (2018).
- [2] PMF2017, Congrès de la commission mixte de la Société Française de Métallurgie et de Matériaux (SF2M) et du Groupe Français de la Céramique (GFC). Mai 2016. « Cas du frittage SPS d'un ferrite Ni-Zn ».

## PERSPECTIVES

## ACTIONS DE VALORISATION EN COURS

Le projet ECOFRIT s'est soldé par un bilan très favorable pour le Liten/DTNM :

- Projet industriel.  
Les travaux sur les carbures de tungstène ont largement contribué à la mise en place d'un partenariat avec un fabricant français.
- Projet Européen H2020.  
Les solutions de modélisation développées pour les cas de géométries toriques pourront être transposées à des besoins de mise en forme de matériaux thermoélectriques dans le cadre du projet H2020 INTEGRAL (<http://www.integral-h2020.eu/>), qui vise une nouvelle architecture de pièces thermoélectriques sous la forme d'anneaux (pièces toriques) élaborées par un procédé SPS.



# QUALISURF

## OPTIMISATION DES ÉTATS DE SURFACE EN FABRICATION ADDITIVE MÉTALLIQUE

Laboratoires impliqués : G-SCOP / SIMaP

Auteurs : F. VIGNAT, R. DENDIEVEL, J. MAISONNEUVE

### L'ESSENTIEL

*Les procédés de fabrication additive génèrent des pièces dont la rugosité élevée peut limiter leurs propriétés en service. L'utilisation de la technique de grenailage ultrasonique a permis de réduire significativement la rugosité de surface des pièces obtenues en procédé lit de poudre Electron Beam Melting. Les premiers résultats de tenue mécanique des pièces traitées par ce procédé sont prometteurs.*



État de surface brut de fabrication et après traitement de grenailage ultrasonique.

### BILAN

#### RAPPEL DU CONTEXTE ET DES OBJECTIFS DU PROJET

La fabrication additive concerne l'ensemble des procédés qui permettent de créer un objet réel à partir de son modèle numérique en déposant la matière couche par couche. Ces technologies additives présentent un intérêt industriel croissant du fait des opportunités qu'elles offrent en termes de conception et de fabrication : délais de conception et fabrication réduits, design de pièces non atteignable par des technologies conventionnelles, etc.

Une des limitations actuelles des procédés de fabrication additive réside dans l'état de surface des pièces obtenues. Dans le cas du procédé lit de poudre « EBM - Electron Beam Melting » disponible sur le site universitaire Grenoblois, les pièces obtenues présentent des rugosités Ra de l'ordre de 25-45 µm, même en optimisant les stratégies de fabrication. L'aspect des pièces fabriquées ainsi que leurs propriétés en service sont directement impactés par ce mauvais état de surface (tenue en fatigue, tenue à l'usure, résistance à la corrosion, etc.).

Cette rugosité relativement importante rend les opérations de post-traitement plus longues que dans le cas des pièces obtenues en procédés conventionnels type usinage. En outre, compte-tenu des designs complexes rendus possibles par la fabrication additive, les surfaces rugueuses ne sont pas nécessairement atteignables par des opérations de post-traitements

classiques (usinage, tribofinition, microbillage, etc.). C'est notamment le cas des structures architecturées ou bien de pièces avec des structures internes tortueuses (par exemple : échangeurs thermiques de dernière génération).

Dans ce contexte, les laboratoires G-SCOP et SIMaP qui travaillent conjointement sur la fabrication additive depuis plus de 5 ans, ont souhaité s'équiper d'un équipement de finition de grenailage de précontrainte par ultrason. Ce procédé, à notre connaissance peu utilisé post fabrication additive, permet d'une part de compléter nos moyens existants (microbillage, usinage, polissage chimique), et d'autre part de conforter le positionnement du site Grenoblois sur cette technologie clef qu'est la fabrication additive métallique.

#### DESCRIPTION DE L'ÉTAT D'AVANCEMENT DU PROJET

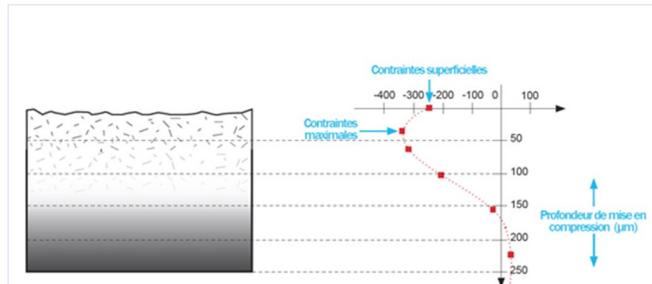
Suite à un état de l'art des procédés de finition existants (*drag finishing, abrasive flow machining, electro-polishing, vibratort finishing*, etc.), le procédé de grenailage de précontrainte par ultrason a été retenu. Ce procédé se distingue du grenailage conventionnel par la manière dont est apportée l'énergie cinétique aux billes impactant la surface de la pièce à traiter.

En effet, dans le cas du grenailage conventionnel, les billes sont mises en mouvement généralement par l'intermédiaire d'un flux d'air ou bien par gravité.

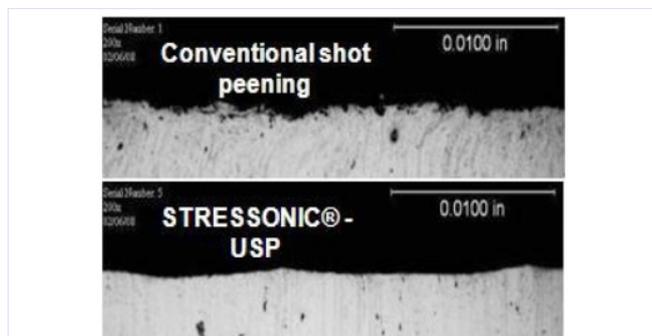
Dans le cas du grenaillage ultrasonique, un générateur émet un signal électrique sinusoïdal à une fréquence ultrasonore (20kHz). Ce signal est ensuite transformé en déplacement mécanique par l'intermédiaire d'un émetteur piézoélectrique, puis amplifié par une surface vibrante appelée sonotrode. Les billes acquièrent leur énergie cinétique grâce à l'accélération de la sonotrode et sont ainsi projetées vers la pièce à traiter dans une enceinte de traitement hermétique. Le mouvement aléatoire des billes ainsi que la mise en rotation de la pièce à traiter assurent un grenaillage homogène sur toute sa surface.

Les avantages de ce procédé comparé aux procédés conventionnels de finition sont les suivants :

- La durée de vie de la pièce en fatigue est prolongée du fait de l'amélioration de l'état de surface et de l'introduction de contraintes de compression en surface de la pièce (**Figure 1**) ;
- Les temps de cycle sont diminués de l'ordre de 20 à 50% par rapport à du grenaillage conventionnel (source SONATS).
- L'état de surface obtenu est supérieur à celui résultant d'un grenaillage conventionnel (**Figure 2**).



**Figure 1 :** Exemple de profil des contraintes résiduelles de grenaillage (source SONATS)

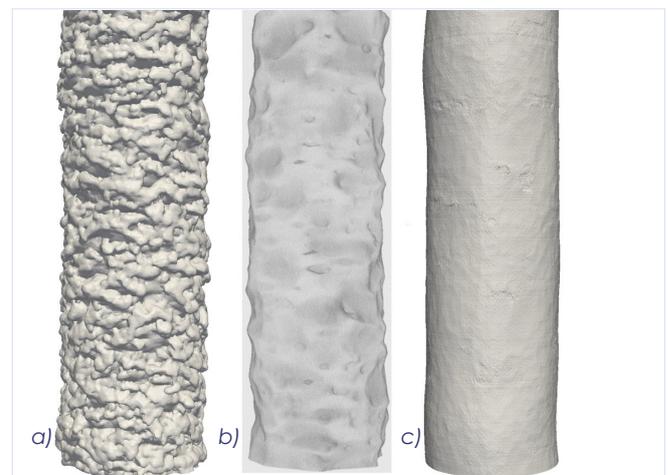


**Figure 2 :** Comparaison des états de surface obtenus en grenaillage conventionnel et grenaillage ultrasonique (source SONATS)

L'équipement de grenaillage ultra-sonique a été installé sur la plateforme AIP-Primeca Dauphiné Savoie en janvier 2018.

Les premiers essais réalisés ont permis de mettre en évidence une amélioration significative de l'état de surface des pièces traitées : la rugosité Ra obtenue après traitement de grenaillage ultrasonique est de l'ordre de 5µm alors que celle-ci s'élève à une quarantaine de microns pour le brut de fabrication EBM et à une vingtaine de microns pour le polissage chimique (**Figure 3**).

Par ailleurs, les premiers essais de fatigue menés dans le cadre du projet ANR FA<sup>2</sup>SCINAE ont démontré l'impact favorable du traitement de grenaillage ultrasonique sur la durée de vie des pièces traitées. Ces travaux feront l'objet d'une publication scientifique courant 2018.



**Figure 3 :** Comparaison des états de surface brut de fabrication EBM / Après traitement chimique / Après traitement de grenaillage ultrasonique

a) Brut de fabrication EBM grenaillage      b) Après polissage chimique      c) Après grenaillage US

## BILAN DE VALORISATION

### Publications et congrès

- G. Martin et al., "Enhancing the Fatigue Properties of EBM Ti-6Al-4V Thin Parts: Effect of Various Post-Treatments"; EBAM 2018, 2<sup>nd</sup> International Conference on Electron Beam Additive Manufacturing, Nuremberg, 11-13 avril 2018.
- T. Persenot et al., « Fatigue Properties of EBM as-built and post-treated parts », EMMC16, 16th European Mechanics of Materials Conference, Nantes, 26-28 mars 2018



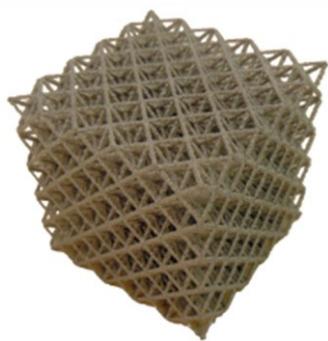
## SUITE DU PROJET

La machine de grenailage ultrasonique et les autres moyens de finitions seront utilisés dans l'ensemble de nos travaux de recherche concernant la fabrication additive ainsi que nos contrats de collaboration avec les entreprises du secteur.

Dans le cadre du projet ANR FA<sup>2</sup>SCINAE, les futurs travaux viseront à expérimenter le traitement de grenailage ultrasonique sur des structures treillis dites «lattice» (**Figure 4**). Les mesures de rugosité qui seront réalisées par tomographie aux rayons X permettront de s'assurer de l'homogénéité du traitement sur toutes les surfaces de la structure lattice. L'impact du traitement de grenailage sur la tenue mécanique ainsi que sur l'état de contraintes résiduelles en surface des ces structures sera par la suite évalué.

Plus généralement, l'enjeu sera de déterminer les topologies, les densités pour lesquelles le grenailage par ultra-sons sera pertinent ou non, notamment en termes d'homogénéité spatiale du traitement.

A noter également une interaction forte au sein même de la plate-forme AIP, car les enceintes utilisées sont propres à chaque type de pièces, et seront donc dimensionnées et réalisées grâce aux moyens humains et techniques (impression 3D polymère notamment) de la plateforme.



**Figure 4** : Exemple de structures « Lattice » sur laquelle sera appliqué le grenailage ultrasonique

# GEMINI

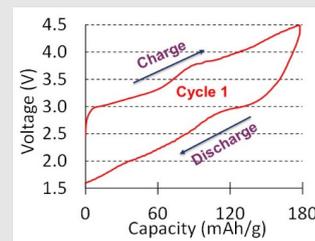
## GÉNÉRATION DE MATÉRIAUX ORIGINALS PAR ÉCHANGE IONIQUE

Laboratoires impliqués : Liten-DTNM / Liten-DEHT

Auteurs : D. PERALTA, C. BOURBON, T. GUTEL, M. CHAPUIS

### L'ESSENTIEL

Le projet GEMINI propose d'évaluer une nouvelle méthode de synthèse afin d'obtenir des oxydes lithiés en utilisant des oxydes de cuivre et de calcium comme précurseurs.



Courbes électrochimiques en demi pile obtenues après substitution du cuivre par du lithium dans une spinelle de formule  $Cu_{1,5}Mn_{1,5}O_4$ .

### BILAN

#### RAPPEL DU CONTEXTE ET DES OBJECTIFS DU PROJET

Afin de répondre à la demande d'augmentation de l'autonomie des applications hautes énergies (véhicules, spatial..) et vues les perspectives actuelles en termes de futurs matériaux de cathode, il devient nécessaire d'explorer de nouvelles structures de matériaux cathodiques, pour proposer des solutions en ruptures et non pas seulement incrémentales.

Le but de GEMINI est d'explorer une piste de recherche originale pour générer des nouvelles structures de matériaux de cathodes avec des structures cristallographiques inexploitées à ce jour dans le domaine des batteries Li-ion.

L'approche vise à synthétiser des carbonates mixtes de calcium-manganèse (calcite) ou cuivre-manganèse par précipitation. Des oxydes mixtes de type  $Ca_xMn_yO_z$  ou  $Cu_xMn_yO_z$  sont ensuite obtenus par calcination puis le cuivre ou le calcium sont ensuite échangés chimiquement ou électrochimiquement par du lithium (Figure 1).

La grande diversité structurale et la richesse des compositions des oxydes de calcium/cuivre laissent envisager la création de phases lithiées originales (par exemple  $Li_4Mn_3O_8$ , capacité théorique > 330 mAh/g).

Si les oxydes de calcium mixtes sont bien connus des géologues et de certaines spécialités de la catalyse, a contrario, seule une publication existe à ce jour sur l'échange calcium/lithium et son application pour les batteries Li-ion, laissant ainsi le champ libre pour la prospection de nouveaux matériaux.

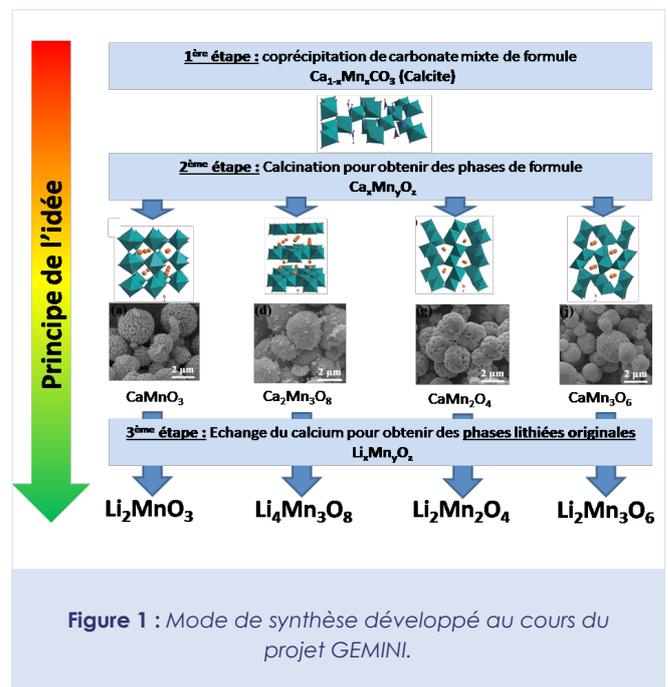


Figure 1 : Mode de synthèse développé au cours du projet GEMINI.

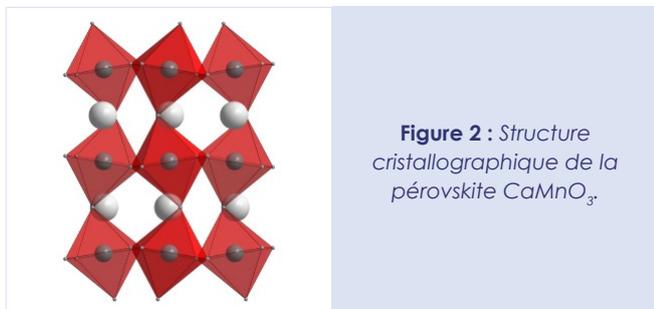
## DESCRIPTION DE L'ÉTAT D'AVANCEMENT DU PROJET

Au cours du projet GEMINI, deux sous familles d'oxyde ont été étudiées comme précurseurs pour la synthèse de nouveaux matériaux lithiés : les oxydes à base de calcium et les oxydes à base de cuivre. Plusieurs méthodologies de substitution ont été mises en œuvre afin de remplacer le cuivre et le calcium par du lithium.

### Utilisation d'un oxyde de calcium comme précurseur

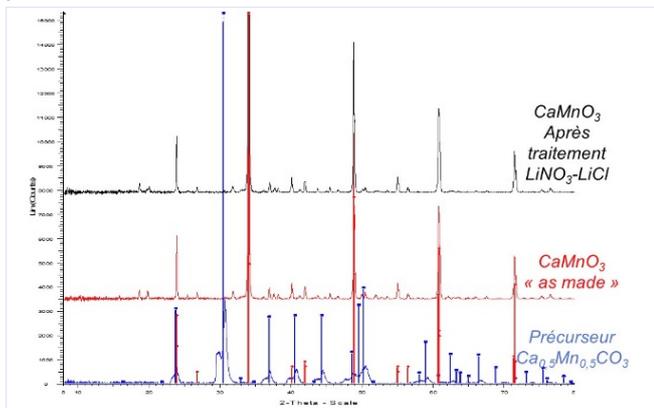
Synthèse de la pérovskite  $\text{CaMnO}_3$

Une pérovskite de formule  $\text{CaMnO}_3$  a été synthétisée grâce à une synthèse en deux étapes. Un carbonate mixte de  $\text{Ca}_{0,5}\text{Mn}_{0,5}\text{CO}_3$  est obtenu en précipitant une solution de nitrate de calcium et de manganèse avec une solution de  $\text{NH}_4(\text{H})\text{CO}_3$ . Le carbonate mixte est ensuite calciné à  $900^\circ\text{C}$  pendant 5h pour obtenir  $\text{CaMnO}_3$ . La structure cristallographique du matériau est représentée en **Figure 2**.



### Échange chimique du calcium par du lithium

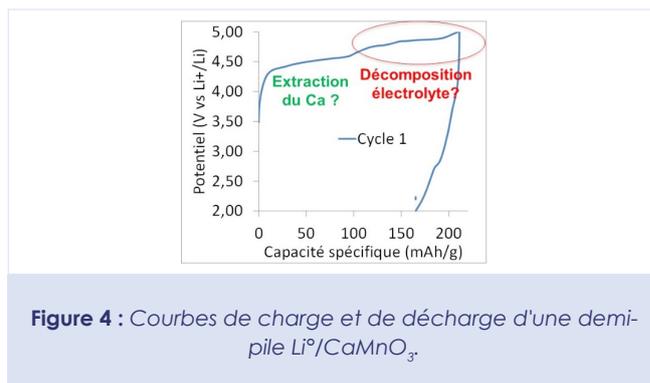
Le but de l'échange du calcium par du lithium est d'obtenir un matériau de formule  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  avec une structure différente des matériaux de composition  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  pouvant être trouvés dans la littérature (structure lamellaire). Pour ce faire, des post traitements chimiques utilisant des bains de sel fondus ont été utilisés. A titre d'exemple, la poudre de  $\text{CaMnO}_3$  a été immergée dans un eutectique de formule  $\text{LiNO}_3\text{-LiCl}$ . Malgré plusieurs tentatives, il n'a pas été possible de substituer le calcium. Les diffractogrammes présentés en **Figure 3** mettent en évidence que rien ne s'est passé.



**Figure 3 :** Diffractogrammes des phases à base de calcium synthétisées.

### Échange électrochimique du calcium par du lithium

Un essai a été mené afin de substituer le calcium par du lithium électrochimiquement. Pour ce faire, une demi-pile (pile bouton avec du lithium métal comme anode) est fabriquée en utilisant la pérovskite comme matériau de cathode. Le but est de désinsérer le calcium lors de la charge puis de réinsérer du lithium lors de la décharge. Pour ce faire une partie du manganèse doit être à l'état d'oxydation +III. **Figure 4** présente les courbes électrochimiques obtenues en mode galvanostatique.

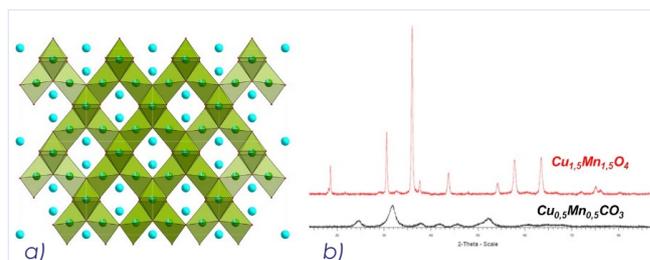


La fin de la charge met en évidence une décomposition de l'électrolyte qui peut expliquer la non réversibilité en décharge (potentiel électrochimique très élevé). De ce fait, il est difficile d'attribuer la première partie de la courbe de charge à une désinsertion du calcium car aucun lithium n'est réinséré en décharge. Compte tenu des faibles capacités spécifiques mises en jeu, nous avons arrêté de travailler sur la phase au calcium.

### Utilisation d'un oxyde de cuivre comme précurseur

Synthèse de la spinelle  $\text{Cu}_{1,5}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$

Une structure spinelle de formule  $\text{Cu}_{1,5}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$  a été synthétisée grâce à une synthèse en deux étapes. Un carbonate mixte de  $\text{Cu}_{0,5}\text{Mn}_{0,5}\text{CO}_3$  est obtenu en précipitant une solution de nitrate de calcium et de manganèse avec une solution d'hydrogénocarbonate d'ammonium  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ . Le carbonate mixte est ensuite calciné à  $900^\circ\text{C}$  pendant 5h pour obtenir  $\text{Cu}_{1,5}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$ . La structure cristallographique du matériau et les diffractogrammes des matériaux sont représentés en **Figure 5**.



**Figure 5 :** a) Structure cristallographique de la pérovskite  $\text{Cu}_{1,5}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$ ; b) Diffractogrammes de la phase carbonate et de l'oxyde de spinelle.



## Échange chimique du cuivre par du lithium

Le but de l'échange du cuivre par du lithium est d'obtenir un matériau de formule  $\text{Li}_2\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ . En fait, il est très difficile d'anticiper le résultat car le cuivre est sous deux degrés d'oxydation différents dans le matériau (sous forme +I et +II). Des premiers essais ont été menés en utilisant des bains de sel fondu ( $\text{LiNO}_3$ - $\text{LiCl}$ ) mais aucun échange n'a pu être mis en évidence. Un nouveau protocole d'échange mettant en œuvre de l'iodure de lithium sous vide a finalement été développé et a permis de mettre en évidence un changement de phase.

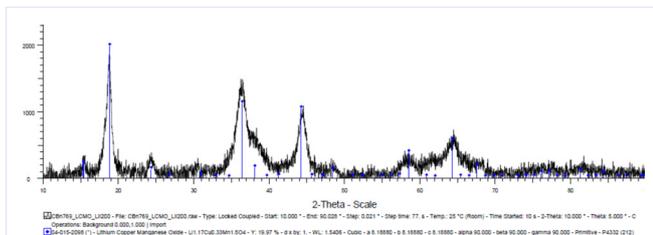


Figure 6 : Diffractogramme des rayons X du spinelle  $\text{Cu}_{1.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  après traitement avec  $\text{LiI}$  sous vide.

Le matériau obtenu a pu être indexé avec une structure spinelle de formule  $\text{Li}_{1.17}\text{Cu}_{0.33}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  (groupe d'espace P4332). En raison de la mauvaise qualité du diffractogramme enregistré, il est difficile de caractériser finement ce matériau. Néanmoins, le matériau a été testé en électrochimie pour valider que du lithium est bien présent dans le matériau. Des demi-piles sont fabriquées en disposant du lithium métal à l'anode et une cathode constituée du matériau synthétisé.

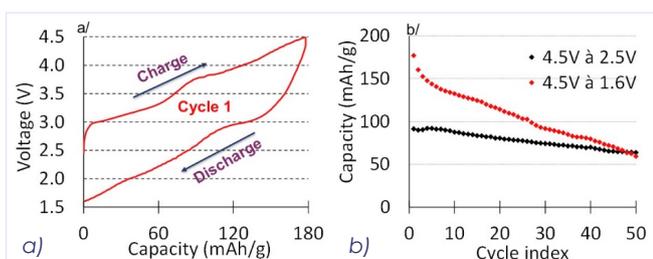


Figure 7 : Demi-pile  $\text{Li}^\circ/\text{Li}_{1.17}\text{Cu}_{0.33}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  a) courbes de charge et de décharge du premier cycle, b) cyclabilité en fonction des bornes de potentielles.

Les résultats électrochimiques montrent clairement une désinsertion et une réinsertion réversible du lithium dans le matériau. Le potentiel moyen des courbes montre bien qu'un mécanisme type « rocking chair » a lieu. De plus, la capacité spécifique de ce matériau n'est pas négligeable puisque 180 mAh/g est récupéré en décharge. Il est donc possible de conclure grâce à cette expérience que la preuve de concept du projet GEMINI est vérifiée. Il est donc possible de créer des oxydes lithiés à partir d'oxydes de cuivre.

## Échange électrochimique du cuivre par du lithium

Un essai a été mené afin de substituer le cuivre par du lithium électrochimiquement. Pour ce faire, une demi-pile (pile bouton avec lithium métal comme anode) est fabriquée en utilisant le spinelle  $\text{Cu}_{1.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  comme matériau de cathode. Le but est de désinsérer le cuivre lors de la charge puis de réinsérer du lithium lors de la décharge. La Figure 8 présente les courbes électrochimiques obtenues en mode galvanostatique.

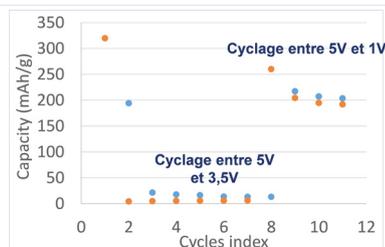


Figure 8 : Cyclage galvanostatique de l'oxyde spinelle  $\text{Cu}_{1.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  face au lithium métal.

Dans ce cas, le matériau présente un comportement différent de la phase échangée chimiquement. Dans le cas d'un échange électrochimique, toute la capacité est disponible aux bas potentiels ce qui est révélateur d'un matériau de conversion (difficilement utilisable dans les batteries Li-ion). L'échange électrochimique ne fonctionne donc pas et est donc moins efficace que l'échange chimique fait avec  $\text{LiI}$  sous vide.

## PERSPECTIVES

### SUITE DU PROJET

Le projet GEMINI a permis de montrer qu'il était possible d'échanger chimiquement le cuivre d'un oxyde par du lithium. Les matériaux générés peuvent être utilisés pour la création de batteries Li-ion. Au final, nous montrons qu'il est possible de générer des phases intéressantes en électrochimie en partant de matériaux ayant des structures/compositions différentes de celles normalement utilisées dans le domaine des batteries.

Des caractérisations sont toujours en cours au laboratoire. Le but étant bien sûr de publier les résultats obtenus sur la phase spinelle à base de cuivre qui a été traité avec de l'iodure de lithium.

### ACTIONS DE VALORISATION À VENIR

- Une publication est soumise.

# BEATLES

## BOUES DE STEP : VALORISATION ÉNERGÉTIQUE INCLUANT LA RÉCUPÉRATION DES SELS

Laboratoires impliqués : Liten-DTBH / Liten-DNTM

Auteur : G. HAARLEMMER

### L'ESSENTIEL

Le projet BEATLES a étudié la conversion hydrothermale des boues de station d'épuration (STEP). Les résultats de ce projet montrent qu'il est possible produire une biohuile à partir des boues de STEP.



Bio-huile Hydrothermale.

### BILAN

#### RAPPEL DU CONTEXTE ET DES OBJECTIFS DU PROJET

Les boues de station d'épuration (STEP) sont une ressource encombrante, très variable et riche en matière organique et minérale. Les boues sont actuellement valorisées comme engrais agricole, soumis à de plus en plus de contraintes à cause de la présence de polluants comme des métaux lourds et des pathogènes. La méthanisation réduit le volume de la matière sèche mais ne résout pas le problème des polluants qui restent dans le digestat. Les boues présentent une siccité<sup>1</sup> en moyenne de 10 à 20 % et le coût de séchage avant un usage énergétique est très élevé. Dans ce contexte, les boues n'apportent pas d'énergie mais leur incinération est une simple destruction très coûteuse. Il apparaissait donc judicieux de développer un procédé évitant cette étape de séchage. Les procédés hydrothermaux sont des transformations en eau pressurisée ou supercritique. La ressource est transformée dans l'eau pressurisée évitant l'étape de séchage. Les boues de station d'épuration sont particulièrement adaptées aux procédés hydrothermaux. La matière organique est stérilisée et transformée en biochar, biohuile et gaz combustible. La récupération de la charge minérale en phase aqueuse est possible.

Le projet nous a permis de mieux comprendre cette ressource complexe.

La partie minérale des boues est très riche en éléments et certains chercheurs prédisent une certaine valorisation possible de la matière par cette voie. Les boues de STEP sont une matière carbonée très intéressante pour un usage énergétique lorsqu'on peut s'affranchir de l'étape de séchage, très énergivore. L'objectif du projet est de proposer une valorisation sûre des boues de station d'épuration sans séchage qui ne génère pas de pollution secondaire. La technologie devrait être simple et adaptée à une station d'épuration des eaux usées. La rentabilité économique des procédés a été vérifiée par rapport aux voies exécutives actuellement existantes telle que l'incinération<sup>2</sup> et l'épandage agricole<sup>3</sup>.

#### DESCRIPTION DE L'ÉTAT D'AVANCEMENT DU PROJET

Le projet BEATLES a étudié la conversion hydrothermale de trois types de boues de station d'épuration de la région Grenobloise. Le projet s'est principalement intéressé à la carbonisation et à la liquéfaction hydrothermale. Les résultats expérimentaux de ce projet montrent que la carbonisation et la liquéfaction hydrothermale permettent de valoriser les boues de STEP pour un usage énergétique. Pour chaque transformation et pour chaque ressource, les conditions de la rentabilité économique ont été vérifiées à l'aide d'une simulation.

<sup>2</sup> ADEME Référentiel National des coûts du service public de gestion des déchets; 2015.

<sup>3</sup> Ferry, M.; Wiart, J., Coûts de la filière d'utilisation agricole des boues d'épuration municipales. Ingénieries - EAT 2002, 30, 59-69.

<sup>1</sup> Fraction de matière sèche.



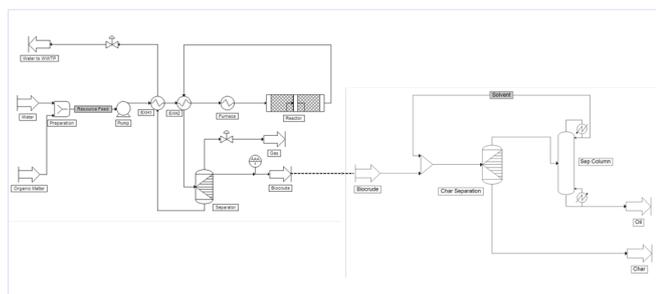
## Carbonisation Hydrothermale

La carbonisation permet de produire un biochar et permet de séparer facilement la matière organique de la phase aqueuse et de produire un combustible en réduisant les coûts de séchage du combustible. Le coût de production du biochar reste cependant supérieur à celui du charbon fossile. Le projet a montré qu'une taxe de traitement des boues d'environ 160 €/tonne de matière sèche assurera une rentabilité suffisante, inférieure aux coûts pratiqués actuellement.

## Liquéfaction Hydrothermale

La liquéfaction des boues ne produit pas un biocarburant mais un biocrude contenant une biohuile, du char et une phase aqueuse. Le procédé est assez simple dans sa conception comme présenté dans la **Figure 1**.

La récupération de chaleur est essentielle dans ce procédé pour garantir un rendement énergétique optimal. On peut distinguer deux étapes dans le procédé. La conversion primaire produit du biocrude (une huile chargée de particules de char). Ce biocrude peut ensuite être purifié en biohuile (huile lourde). La biohuile visera plutôt des applications en remplacement du fioul lourd. La biohuile peut être raffinée en biocarburant par un procédé catalytique dans une raffinerie.



**Figure 1 :** Schéma simplifié d'une installation de liquéfaction hydrothermale.

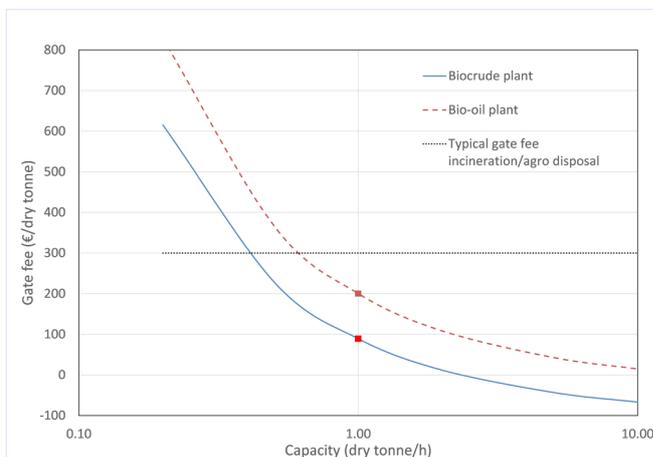
La valeur commerciale du biocrude reste très incertaine. Le projet a montré que avec une vente du biocrude au prix énergétique du pétrole fossile, une taxe de traitement des boues d'environ 120 €/tonne de matière sèche serait nécessaire pour assurer une rentabilité.

La liquéfaction des boues seules ne permet pas d'assurer la rentabilité de la production de biocarburant à l'échelle d'une STEP.

En séparant le biocrude en biohuile et biochar il serait possible de produire des combustibles comparables aux fiouls très lourds pour le transport maritime à des coûts compétitifs. La principale incertitude sera sur la possibilité de remplacer les fiouls lourds par une huile hydrothermale sans étape supplémentaire de post-traitement ou raffinage.

## Évaluation

Les boues sont une matière à « valeur négative », c'est-à-dire qu'on a l'habitude de payer pour les éliminer. Le projet BEATLES a démontré qu'une rentabilité économique peut être atteinte en appliquant une taxe de traitement des boues à une valeur qui est compétitive avec les filières existantes. La **Figure 2** montre qu'une usine de traitement simple, sans raffinage est le plus rentable. Le point rouge (■) indique la capacité d'une installation sur la STEP de Grenoble.



**Figure 2 :** La taxe de traitement à appliquer pour deux configurations d'usine pour différentes capacités.

Enfin, les analyses du contenu minéral des boues et des produits de liquéfaction en volume (taux de cendres) et en composition (ICP-OES) ont montré que le contenu est très diffus, c'est-à-dire qu'ils contiennent beaucoup d'éléments en faible concentration. Il est envisageable d'extraire certains éléments d'intérêt de manière sélective. Cependant, sans mesures incitatives ou contraintes réglementaires, ces technologies ont peu de chance d'être économiquement rentables.

## BILAN DE VALORISATION

### Congrès

- Geert Haarlemmer, Anne Roubaud, M. Déniel, J. Roussely. Hydrothermal Liquefaction of Wet Waste Streams. 16th International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula Italy, 2-6 October 2017.
- Geert Haarlemmer, Anne Roubaud, Julien Roussely. Hydrothermal liquefaction of municipal sewage sludge. 16<sup>ème</sup> Congrès de la Société Française de Génie des Procédés. Poster, Nancy, 11-13 July 2017.
- G. Haarlemmer, A. Roubaud, J. Roussely, M. Déniel. Hydrothermal Liquefaction of Wet Waste Streams. 5th International Conference on Sustainable Solid Waste Management, Athens, 21–24 June 2017.

### Publications en rédaction

- Geert Haarlemmer, Morgane Briand, Anne Roubaud, J. Roussely. Hydrothermal Liquefaction of Wet Waste Streams. Submitted to Detritus.

## PERSPECTIVES

### SUITE DU PROJET

Le projet nous a permis de mieux appréhender cette ressource complexe. Il s'avère que le potentiel de valorisation de la matière minérale est très limité et nous ne prévoyons pas de suite sur ce domaine.

Par contre, les boues de STEP sont une matière carbonée très intéressante pour un usage énergétique. La liquéfaction hydrothermale est bien adaptée pour les boues car le combustible obtenu est relativement pauvre en soufre. Les boues des stations d'épuration urbaines sont très riches en soufre, ce qui rend une valorisation par gazéification plus compliquée car nécessitant un traitement du gaz obtenu pour enlever le H<sub>2</sub>S.

La gazéification en réacteur batch à des températures relativement faibles ne donne pas de très bons résultats. Le laboratoire dispose d'un réacteur en continu avec une température de fonctionnement plus élevée. Nous envisageons des suites sur la gazéification des boues de différentes origines telles que les boues industrielles (industrie papetière par exemple), plus pauvre en soufre. Ces essais seront faits en réacteur continu, plus efficace a priori.

Nous prévoyons des nouveaux projets sur tout type de boues, en particulier sur les boues industrielles, moins contraignantes sur le plan sanitaire. Les méthodes d'analyses développées dans le projet et le retour d'expérience sur l'aspect sécurité seront très utiles dans un proche avenir.

### NOUVELLES COLLABORATIONS

Le travail sur les boues de stations d'épuration a permis de monter des projets Européens et industriels sur le sujet des boues industrielles et le digestat de ces boues.

### ACTIONS DE VALORISATION À VENIR

Deux articles ont été rédigés et soumis à des journaux internationaux.



## SI-PREMIUM

MATÉRIAUX ET PROCÉDÉS POUR  
L'ÉLABORATION DE CELLULES TANDEM  
SILICIUM A TRÈS HAUTE EFFICACITÉ

**Laboratoires impliqués** : Liten-DTNM /Liten-DTS / LMGP / Institut Jean Lamour (Carnot ICÉEL)

Auteurs : I. BULUT, F. ROUX, M. MANCEAU & S. BERSON

### L'ESSENTIEL

*Dans le cadre de Si-Premium, des modules de grandes dimensions à base de matériaux de type pérovskite avec des performances à l'état de l'art ont été réalisés.*



Photographie d'une couche de type pérovskite utilisée dans les dispositifs PV

## BILAN

### RAPPEL DU CONTEXTE ET DES OBJECTIFS DU PROJET

Le projet Si Premium vise à structurer des actions communes dans le domaine du photovoltaïque afin de dépasser la limite théorique de rendement atteignable avec une technologie à base du matériau silicium seul. L'objectif général est de mettre en place et fédérer les compétences autour des technologies multijonctions pour mieux couvrir l'absorption du spectre solaire et atteindre plus de 30% de rendement de conversion photovoltaïque. Dans ce but, quatre types de matériaux pouvant compléter efficacement la gamme d'absorption du silicium sont envisagés. Il s'agit d'une part, des **matériaux hybrides à base de pérovskites** étudiés à la fois par LITEN/DTS et LITEN/DTNM, des **matériaux semi-conducteurs à base de III-V** couverts par LITEN/DTS et LETI/DOPT, des **matériaux de type oxydes tel le  $\text{Cu}_2\text{O}$**  étudiés par LITEN/DTS avec le Laboratoire des Matériaux et du Génie Physique (LMGP, Grenoble), et des **matériaux de type  $\text{Zn-IV-N}_2$**  où l'élément IV choisi est l'étain, et dont les études ont débuté au LITEN/DTS en collaboration avec l'Institut Jean Lamour (IJL, Nancy) dans le cadre du projet inter-Carnot PVZEN. Tous ces matériaux sont de sérieux candidats pour la réalisation de cellules de type tandem, où une des deux jonctions est de type silicium, technologie au cœur de la R&D du LITEN/DTS. Le projet Si-Premium se structure en quatre lots correspondant aux quatre familles de matériaux envisagés.

Dans le présent rapport, les travaux relatifs aux matériaux de type pérovskite seront décrits, notamment concernant la maîtrise des procédés de dépôt en grande surface et l'élaboration de dispositifs.

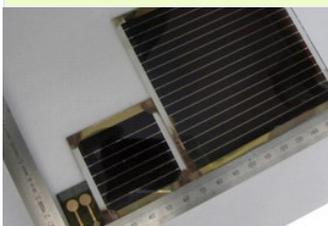
### DESCRIPTION DE L'ÉTAT D'AVANCEMENT DU PROJET

Au cours des dernières années, les dispositifs PV à base de matériaux de type pérovskite hybrides (Formule  $\text{APbX}_3$  ; A étant un cation ou un mélange de cations et X un halogène ou un mélange d'halogènes) ont suscité un engouement considérable et les rendements démontrés ont ainsi progressé de façon exponentielle, dépassant aujourd'hui les 22 %. Pour autant, un certain nombre de verrous doivent encore être levés afin que ces dispositifs puissent trouver des applications pratiques. Ainsi, si quelques groupes ont déjà pu démontrer des résultats sur des dispositifs de « grande dimension » (typiquement  $> 10 \text{ cm}^2$ ) la majeure partie de la recherche se concentre sur des cellules de taille extrêmement réduite (typiquement  $\ll 1 \text{ cm}^2$ ). Dans le cadre du projet Si-Premium, un procédé complet de réalisation de modules PV à base de matériaux de type pérovskite et de surface supérieure à  $10 \text{ cm}^2$  a donc été mis au point. Afin de passer de cellules unitaires de faibles dimensions ( $28 \text{ mm}^2$  dans notre cas) à des modules, plusieurs aspects doivent être pris en considération. Notamment la surface disponible doit être subdivisée en sous-cellules afin de limiter les pertes résistives (liées à la conductivité limitée d'une



des électrodes utilisées). La présence de ces sous-cellules qui seront ensuite connectées en série, impose *de facto* l'existence de zones d'interconnexion ne participant pas à la conversion photovoltaïque. Afin de maximiser la puissance délivrée à surface constante, il convient donc de limiter au maximum la largeur de ces zones mortes. C'est pourquoi, dans le cadre du présent projet nous avons choisi de développer un procédé de structuration laser des différentes couches. Grâce à la résolution offerte par ce procédé (typiquement de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$ ) la dimension des « zones mortes » peut être considérablement réduite. Une optimisation prenant en compte à la fois les aspects électriques (pertes résistives dans les électrodes et dans l'interconnexion) et optiques (pertes dues aux zones mortes) nous a permis de définir le design optimal du module et d'accéder à des taux de remplissage (GFF) supérieurs à 90 %. Une partie importante du travail a ensuite été consacrée à l'amélioration de la qualité des films déposés sur des surfaces plus grandes. Pour cela, la formulation des encres utilisées ainsi que les procédés de dépôt ont été adaptés. L'ensemble de ces développements ont permis la réalisation de modules de surface supérieure à 10  $\text{cm}^2$  présentant des rendements de conversion d'environ 10 % (voir **Figure 1 & Tableau 1**). Le procédé a également été transféré à des modules de surface supérieure à 50  $\text{cm}^2$  pour lesquels les rendements atteints sont de l'ordre de 7 %.

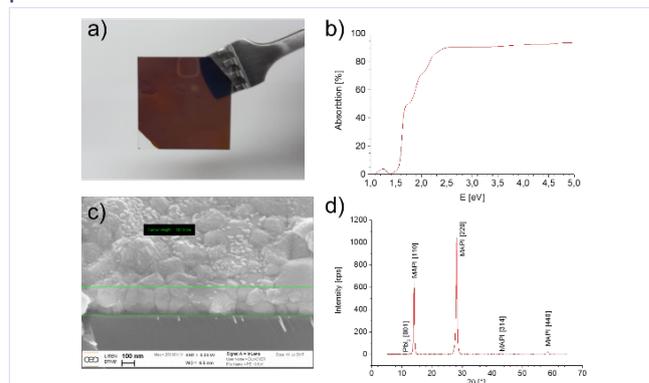
Dispositif	GFF (%)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ ( $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	FF (%)	PCE (%)
Cellule Réf	-	0.89	19.90	69.8	12.4
Mini-Module 3 cellules	93	2.62	6.60	70.2	12.2
Module 8 cellules	93	7.05	2.25	65.4	10.5
Module 27 cellules	93	20.9	0.58	56.9	6.9



**Figure 1** : Photographie et performances des dispositifs réalisés, de la cellule de 28  $\text{mm}^2$  au Module de 50  $\text{cm}^2$ .

Enfin, un développement important a été réalisé afin de mettre en place un procédé de dépôt de la pérovskite par évaporation. Ce dernier possède plusieurs avantages potentiels par rapport à un dépôt en voie solvant : une meilleure conformité des couches sur une surface texturée et une meilleure homogénéité en épaisseur sur de grandes surfaces. Un procédé de co-évaporation a donc été développé en optimisant les rampes de température, les températures d'évaporation et les temps de dépôts de chaque précurseur nécessaire à la formation de la pérovskite. Les résultats principaux sont présentés sur la **Figure 2**. Le gap du matériau est estimé à 1,6 eV, proche du gap théorique d'une pérovskite hybride (MAPI) stœchiométrique (1,56 eV).

La couche obtenue est compacte et possède une épaisseur d'environ 325 nm. Le composé obtenu cristallise dans le système tétragonal (groupe d'espace I4/mcm, JCPDS 01-083-7582). Ces couches seront prochainement évaluées au sein de dispositifs afin de comparer leurs performances à celles mises en œuvre par voie solvant.



**Figure 2** : Caractérisations d'une couche MAPI avec (a) photographie d'une couche déposée sur verre, (b) spectre d'absorption d'une couche déposée sur verre, (c) image MEB, à 45° d'inclinaison, d'une couche déposée sur substrat de Si, (d) diagramme de diffraction de rayons X d'une couche déposée sur verre.

## BILAN DE VALORISATION

### Brevets

- Brevet déposé en 2016 : « Dispositif photovoltaïque tandem comprenant une sous-cellule à base de pérovskite et une sous-cellule à base de silicium ».
- Brevet déposé en 2016 : « Cellule photovoltaïque pourvue d'une couche n composite ».
- Brevet déposé en 2017 : « Empilement multicouche utile à titre de couche p pour dispositif photovoltaïque ».

### Publications et congrès

- EUPVSEC 2016 EU PV Solar Energy Conference & Exhibition (1 oral)
- EUPVSEC 2017 EU PV Solar Energy Conference & Exhibition (1 poster)
- ABXPV 2017 International Conference on Perovskite Thin Film Photovoltaics (1 oral)
- HOPV 2017 International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics (1 poster)
- PSCO 2017 International Conference on Perovskite Solar Cells and Optoelectronics (1 oral & 1 poster)
- JPH 2017 Journées Pérovskites Hybrides (1 oral & 1 poster)
- JNPV 2017 Journées Nationales du Photovoltaïques (1 oral)
- ICMAT 2017 International Conference on Materials for Advanced Technologies (1 oral invité)

### SUITE DU PROJET

Afin de poursuivre les développements entamés dans le cadre de ce projet Carnot, plusieurs collaborations ont été nouées avec des partenaires français et étrangers actifs dans le domaine (voir ci-dessous).

Différents projets ont également été déposés, et notamment :

- Quatre projets en cours d'évaluation par l'ANR pour la campagne 2017-2018.
- Un projet H2020 accepté (APOLO ; démarrage prévu en avril 2018).

Des discussions sont également en cours avec des partenaires européens afin de soumettre des projets aux appels H2020 de la période 2018-2019.

### NOUVELLES COLLABORATIONS

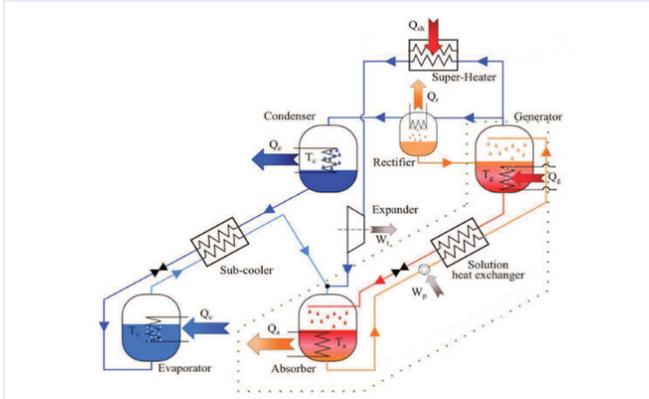
- Collaboration avec la *Nanyang Technological University* (NTU, Singapore) qui se matérialisera par 1 thèse en cotutelle (Démarrage prévu en Mars 2018).
- Collaboration avec le *Los Alamos National Laboratory* (A. Mohité) qui se traduit par la réalisation d'expériences croisées et l'échanges de compétences.
- Collaboration avec l'IPVF en préparation.

### ACTIONS DE VALORISATION À VENIR

- ABXPV 2018 *International Conference on Perovskite Thin Film Photovoltaics* (1 oral invité).
- Co-organisation des JPH 2018 (<https://jph2018.sciencesconf.org/>).



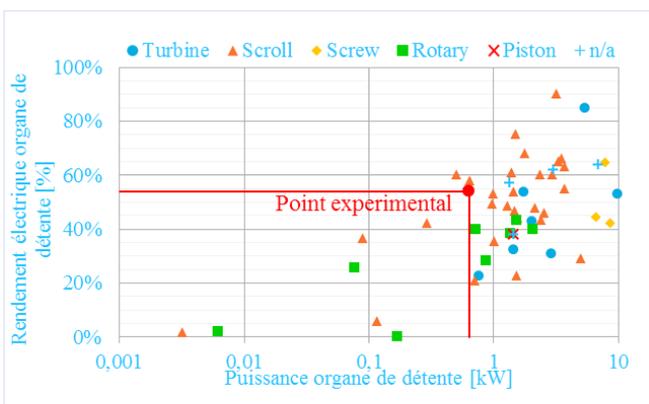
sur les performances du cycle a été mise en évidence. D'un point de vue exergetique, le fait de privilégier la production de froid au détriment du travail a un impact faible sur la performance du cycle. Dans un second temps, un modèle détaillé de l'expandeur a été développé, validé avec des données issues de la littérature et intégré au modèle global qui devra être expérimental.



**Figure 1 :** Cycle combiné de production de froid et d'électricité par procédé à absorption (configuration «parallèle»).

### Étude des technologies d'expander

A l'heure actuelle, il n'existe aucun organe d'expansion directement adapté au projet (compatibilité fluide et puissance). Afin d'identifier les technologies prometteuses, une analyse bibliographique et statistique a été réalisée et a permis la constitution d'une base de données (machines réellement testées, pour différents fluides et différentes technologies). Autour du kW électrique, la technologie volumétrique à spirales (« scroll ») est la technologie dominante. La technologie de type turbomachine (« turbine ») semble possible même si les performances restent à confirmer d'un point de vue quantitatif. Ces deux technologies sont testées et comparées dans le cadre du projet via la conception et la mise en œuvre de deux installations permettant chacune de tester une technologie.



**Figure 2 :** Superposition du point expérimental optimal obtenu et de la répartition des points de la base de données.

Les essais concernant la technologie turbomachine, comparés à ceux issus de la base de données, ont permis une première démonstration technologique de la possibilité de déploiement d'une turbomachine avec un rendement comparable à celui atteint sur une technologie dominante (scroll) à petite échelle.

### Étude de nouveaux composants pour le cycle à absorption

Modification et adaptation du prototype existant

La conception globale du prototype de machine à absorption  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$  existant (financé par ICF 2010) a été revue de manière à permettre l'intégration de nouveaux composants et de compléter ou mettre à niveau l'instrumentation en place. L'absorbeur a été remplacé et la réserve de solution associée augmentée en volume pour permettre une plus grande flexibilité d'utilisation. De nouvelles technologies de composants (détendeur thermostatique, pompe à solution à engrenage à entraînement électromagnétique, rectificateur brasé cuivre avec traitement de surface pour la compatibilité avec l'ammoniac) ont été mises en œuvre afin d'être évaluées expérimentalement. L'instrumentation en place a été ré-étalonnée et mise à niveau lorsque nécessaire. La future intégration d'un nouveau générateur de vapeur a été prévue en parallèle de l'ensemble actuel de génération de vapeur réadapté en conséquence.



**Figure 3 :** Prototype adapté de machine à absorption.

### Développement d'un nouveau générateur de vapeur

La performance des machines de production de froid par absorption  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$  dépend sensiblement de la pureté du réfrigérant ( $\text{NH}_3$ ) en entrée du condenseur. L'ensemble actuel de génération de vapeur (plaques noyées – séparateur – rectifieur à plaques) est une solution industrialisable compacte intéressante pour les températures réduites de source chaude, mais les performances se dégradent lorsque cette température augmente. L'utilisation d'un générateur à films ruisselant permettant une pré-rectification de la vapeur offre des perspectives intéressantes pour pallier ce problème,



notamment en termes de compacité. Un prototype a été conçu dans ce sens et les consultations lancées fin 2017 pour une fabrication en début d'année. Le montage, l'instrumentation et la caractérisation du composant est planifié au cours du premier semestre 2018.

En parallèle, un modèle numérique décrivant les transferts de masse et de chaleur au sein des générateurs à plaque et films ruisselants a été développé. Sa validation sur des configurations similaires est en cours. Différentes stratégies de calcul sont à l'étude pour permettre la convergence en présence de films liquides s'écoulant à contre-courant de la vapeur. Les résultats expérimentaux obtenus sur le prototype permettront de valider le modèle qui sera alors utilisé pour concevoir un composant optimisé.

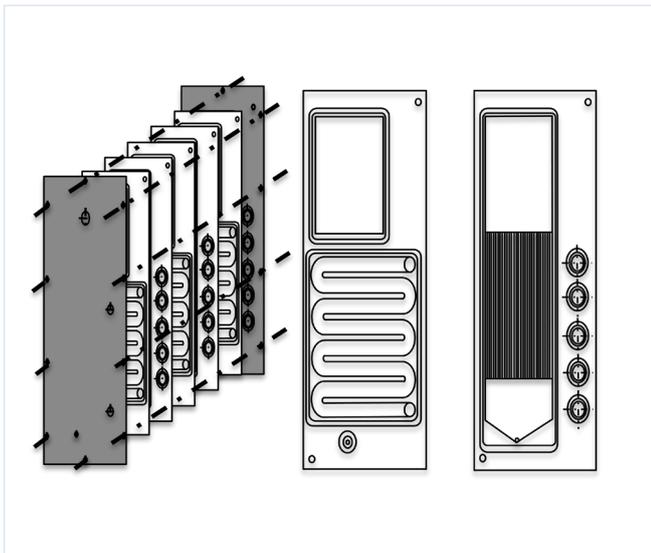


Figure 4 : Prototype de générateur à plaque et films ruisselants développé dans le cadre du projet.

## BILAN DE VALORISATION

### Brevets

- « Dispositif de régulation de la charge fluide en circulation dans un système basé sur un cycle de Rankine », demande de brevet n° 1757413, déposée le 02.08.2017, inventeurs : Arnaud LANDELLE & Nicolas TAUVERON.

### Publications et congrès

- Landelle A., Tauveron N., Haberschill P., Revellin R., Colasson S., Organic Rankine cycle design and performance comparison based on experimental database. Applied Energy 204, pp. 1172-1187
- Shyam, Le Pierrès N., Boudehenn F., Perier-Muzet M., Thermodynamic Analysis of Small Scale Cooling and Power Cogeneration Cycle Using Ammonia-Water Couple, présentation orale, conférence SDEWES2017, 4-8 octobre 2017, Dubrovnik, Croatie.

## PERSPECTIVES

### SUITE DU PROJET

Fort des travaux menés en 2017, le projet TRICYCLE a été prolongé jusqu'au 31/12/2018 avec pour objectif de réaliser l'analyse détaillée et combinée des travaux précédents de manière à établir les spécifications techniques nécessaires à la réalisation d'un prototype opérationnel. La réalisation et la caractérisation de ce prototype sont planifiées en 2019.

En 2018, il s'agira donc spécifiquement d'affiner la modélisation du cycle thermodynamique combiné, notamment en intégrant les enseignements (rendement de turbine, efficacité du générateur de vapeur, etc.) issus des résultats d'essais ; de dimensionner, spécifier, consulter et sélectionner l'ensemble des composants principaux (échangeur, organe de détente, pompe, etc.) nécessaires à la réalisation du prototype en 2019 et d'initier la conception du prototype en fonction de la sélection des composants. Le cas échéant, des essais complémentaires sur les organes de détente et le générateur de vapeur seront effectués pour compléter l'analyse.

### NOUVELLES COLLABORATIONS

- Thèse 2018-2021 : co-encadrée CEA-LOCIE : Purification du fluide frigorigène dans les machines à absorption par l'optimisation des transferts couplés de masse et de chaleur dans les films tombants de l'ensemble générateur/rectifieur.
- ANR CE05 : projet HERMESS (Hybridation de cycles thermodynamiques triThERMes couplant Expandeur et Systèmes à Sorption). PROMES, LOCIE et CEA, soumis le 26/10/2017.

### ACTIONS DE VALORISATION À VENIR

#### Publications et congrès à venir

- Tauveron N. et al., Interest of ammonia-water absorption chiller to enhance closed gas turbine performance during peak demand. Comparison with centrifugal chiller. 13th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, Valencia, 18-20/06/2018.
- Shyam et al., Exergoeconomic and enviroeconomic analysis of combined cooling and power cycle: A review. A soumettre à Renewable and Sustainable Energy Reviews.

# PROSPEN2

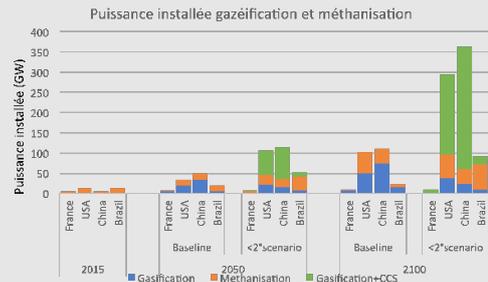
## PROSPECTIVE ÉNERGÉTIQUE

Laboratoires impliqués : LPSC, GAEL Axe énergie, Liten-DTBH

Auteur : A. BIDAUD

### L'ESSENTIEL

*L'étude des paramètres technico-économiques clés qui structurent l'évolution des mix énergétiques et la construction d'un outil pédagogique permettront à l'institut Carnot de mettre en avant ses compétences et sa propre « vision de prospective énergétique ».*



Effets des politiques climatiques sur les technologies de production de gaz renouvelables.

### BILAN

#### RAPPEL DU CONTEXTE ET DES OBJECTIFS DU PROJET

L'institut Carnot possède en son sein toutes les compétences et les outils nécessaires aux études de prospectives énergétiques. Il s'agit de consolider et de capitaliser sur l'outil d'optimisation de l'utilisation du parc électrique European Unit Commitment And Dispatching (EUCAD) déjà disponible dans les laboratoires LITEN/DTBH/L2ED, G2Elab de Énergies du futur et le laboratoire GAEL/EDDEN du site Grenoblois. Cet outil sera utilisé en lien avec les travaux de scénarisations menés avec le modèle POLES du laboratoire GAEL/EDDEN. Les modèles et les hypothèses utilisées dans ces outils seront enrichis par des interactions avec les spécialistes des très nombreuses technologies dont le développement est soutenu par l'institut Carnot.

L'extrême complexité des interactions entre les hypothèses et les variables calculées, liée aux possibilités de substitution entre énergies pour un même besoin et à la rétroaction des coûts sur les niveaux et les types de demandes, font que la **sélection d'un nombre réduit d'hypothèses et d'indicateurs et l'étude de l'impact des uns sur les autres** en vue de la constitution d'un méta-modèle est un projet de recherche en soi.

Le projet fournira une étude de prospective qui lui permette de comprendre les paramètres clés et les conditions permettant l'émergence des technologies de l'énergie dans la transition énergétique.

Le Carnot pourra mettre en avant sa vision de la prospective du système énergétique auprès de ses partenaires industriels et académiques et la rendre très visible grâce à un outil pédagogique grand public. Cette vision sera basée sur des études du meilleur niveau scientifique.

#### DESCRIPTION DE L'ÉTAT D'AVANCEMENT DU PROJET

Le point clef de l'année 2017 pour PROSPEN a été le démarrage de la thèse de Gabin Mantulet sur la question des compétitions et collaborations entre technologies de l'énergie, sur et entre les différents vecteurs de l'énergie. Assez rapidement, sur la base de l'amorce d'étude bibliographique, Gabin a choisi de prendre le vecteur gaz comme « fil rouge » pour sa thèse. Différentes études montrent que ce vecteur pourrait être assez largement décarboné par intégration de biogaz ou P2G (Power2Gaz). Comme il peut être utilisé pour les applications très carbonées aujourd'hui (mobilité et chaleur) et qu'il est connecté aux autres vecteurs (électricité et chaleur), c'est un bon candidat pour étudier les scénarios de « décarbonisation profonde<sup>1</sup> » et relier toutes les questions que nous nous posons dans le cadre de PROSPEN.

En pratique, le travail a consisté en une revue des chiffres (potentiels, rendements, coûts...) et des modèles de production de gaz « renouvelables » et des

<sup>1</sup> <http://deepdecarbonization.org>



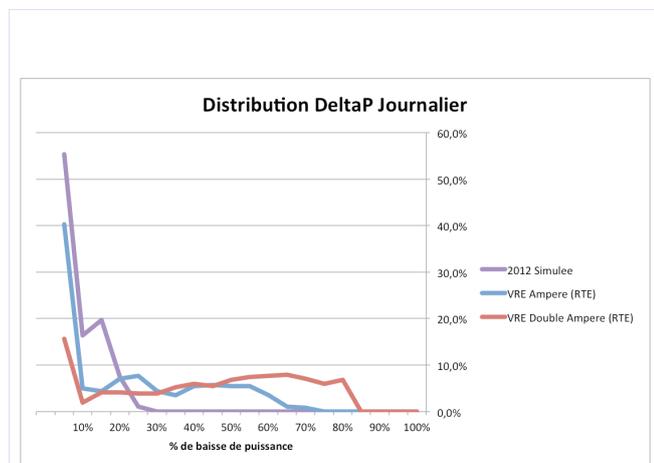
différentes connexions possibles et celles modélisées dans POLES.

L'apport du CEA-Liten, qui développe de nombreuses technologies sur différentes filières de production (méthanisation, gazéification, méthanation, production d'hydrogène, etc.) est essentiel ici. Un autre apport important est celui de GrDF avec qui nous avons amorcé des discussions, qui pourrait déboucher sur une collaboration plus formelle.

Une première étude de sensibilité aux paramètres dans POLES a été menée et fait l'objet d'une présentation<sup>2</sup> à Rome au symposium de l'AIEE : « Current and Future Challenges to Energy Security ».

Le projet NEEDS (élargi à un équipe d'économistes de l'énergie de l'Université de Nantes) s'est poursuivi. Le travail cette année porte sur la prise en compte de la variabilité de la production hydraulique et une nouvelle description de parcs 50% nucléaires comportant moins de centrales fossiles.

En 2017, l'équipe a contribué à donner des réponses à des appels à projet de l'IDEX grenoblois sur le périmètre énergie. Le projet de « Rayonnement Social et Culturel » sur la Transition Énergétique Rapide en Europe (TERE) n'a pas été retenu. Nous participerons par contre au Cross Disciplinary Program « Eco-SESA<sup>3</sup> », qui nous permettra de mieux comprendre la capacité des éco-quartiers à contribuer à la souplesse nécessaire à l'intermittence des renouvelables.



**Figure 1 :** Comparaison de la distribution des baisses de puissance demandée au nucléaire en 2012 ou à l'horizon 2030 avec la puissance de renouvelables variables envisagée dans l'image « Ampère » de RTE ou en la doublant. La demande dans ce scénario est quasiment stable, et le nucléaire réduit vers 50%. Comme la puissance hydraulique est supposée constante et celle des fossiles réduite par rapport à aujourd'hui, c'est le nucléaire qui s'adapte en faisant de plus en plus souvent des variations de charge « profondes ». De grandes quantités d'énergies renouvelables sont aussi inutilisées.

<sup>2</sup> Arbitrations for bioenergy use in the 21st century energy context: the significance of gasification and methanisation

<sup>3</sup> <https://ecosesa.univ-grenoble-alpes.fr>

## BILAN DE VALORISATION

### Contrat expertise

- Assistance MilanMultiphysics (TPE à Milan, Italie) pour son contrat auprès de ENTSOe (Mission 2j).

### Publications et congrès

- G. Mantulet et al. Arbitrations for bioenergy use in the 21<sup>st</sup> century energy context: the significance of gasification and methanisation, IAEE Symposium, Rome, Nov 2017.
- G. Mantulet et al. The importance of bioenergy and green gas technologies in decarbonisation of energy systems., Abstract accepté IAEE International Conference, Groningen, 2018.
- A. Bidaud et al. Requirements of load following by nuclear power plants as a function of variable renewable energies's developpement. Abstract submitted at 3<sup>rd</sup> Technical Workshop on Fuel Cycle Simulation.

## PERSPECTIVES

### SUITE DU PROJET

Pour préparer le travail prévu en 2018 sur la question de la faisabilité d'un méta-modèle qui serait au cœur de l'outil pédagogique présentant la vision prospective du Carnot, nous avons amorcé la recherche d'un stagiaire spécialiste des questions de fouille de données et de modélisation type réseaux de neurone (ou autres). Ce stage nous permettra de mieux préparer le recrutement d'un post doc sur 2018-2019, probablement à l'automne qui sera en charge de la préparation du méta-modèle et de la réflexion sur la mise en place d'un outil «pédagogique» mettant en évidence les résultats du projet et la «vision» prospective du Carnot.

### NOUVELLES COLLABORATIONS

- Intégration des actions de comparaison avec d'autres outils français d'allocation de moyens de production (ex. : EUCAD) dans un projet pluridisciplinaire d'étude des scénarios soutenu par le « défi » du CNRS NEEDS.
- Participation au projet IDEX EcoSesa sur les éco-quartiers, et collaboration initié avec l'ANR CLEF (potentiel de flexibilité associé au chauffage des bâtiments).
- Prise de contact avec GrDF Rhône-Alpes.

# ÉCO-INNOV'NTE

## ÉCO-INNOVER LES NOUVELLES TECHNOLOGIES DE L'ÉNERGIE

**Laboratoires impliqués :** Liten-DTS / Liten-DEHT, Liten-DTNM / Liten-DTBH / D-OIC

Auteur : E. MONNIER

### L'ESSENTIEL

*Transformer les contraintes environnementales en opportunités d'innovation pour les Nouvelles Technologies de l'Énergie.*

*Dans le cadre de ce projet, un appel à idées a invité plus de 4000 chercheurs et chercheuses à réfléchir sur l'éco-bâtiment de demain. En 4 semaines, près de 160 idées variées ont été proposées par 170 participants actifs. 82% des idées produites se sont intégrées dans une démarche d'éco-innovation.*



Une des séances de sélection des idées issues d'une démarche d'éco-innovation.

### BILAN

#### RAPPEL DU CONTEXTE ET DES OBJECTIFS DU PROJET

La recherche dans le domaine des Nouvelles Technologies de l'Énergie (NTE) vise à proposer des alternatives énergétiques techniquement pertinentes mais présentant également des bénéfices économiques, environnementaux et sociétaux. Il existe en effet un enjeu fort concernant la pérennité de notre modèle de société dans un monde aux ressources, matériaux et fossiles finies soumis à des problématiques de pollutions majeures.

Ce projet propose de concevoir une méthodologie d'éco-innovation adaptée à la recherche en NTE et d'en valider l'efficacité sur 2 exemples concrets. Cette méthodologie ambitionne de renverser les codes habituels de nos pratiques de recherche et d'utiliser dès le début du processus de développement l'écoconception et l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) pour générer de l'innovation et pour créer de la valeur en intégrant dans le cahier des charges les contraintes de réduction des impacts environnementaux. Les résultats attendus pour ce projet sont d'une part l'expression et la validation d'une méthodologie d'écoconception dédiée aux NTE et d'autre part la génération d'éco-idées directement exploitables par les équipes pour les quatre technologies retenues.

#### DESCRIPTION DE L'ÉTAT D'AVANCEMENT DU PROJET

##### Conception d'une méthode d'éco-innovation

L'objectif de ce projet est de transformer les contraintes environnementales en opportunités d'innovation pour les Nouvelles Technologies de l'Énergie. Pour cela il s'agira de mûrir une méthode d'éco-innovation adaptée au contexte de la recherche en nouvelles technologies de l'énergie depuis le principe de base (MRL<sup>1</sup>) jusqu'au prototype fonctionnel (MRL4).

Cette méthode doit :

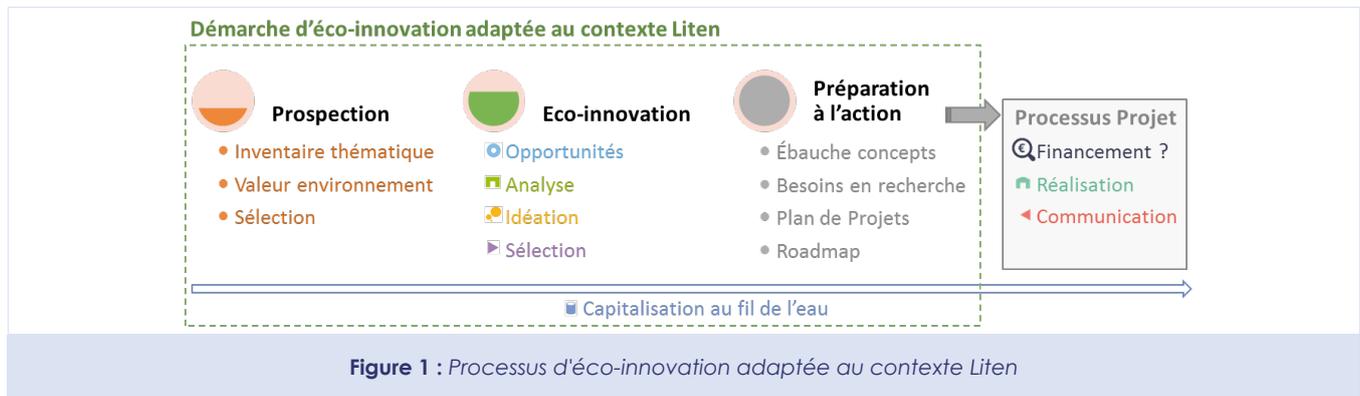
- Permettre la génération de projets innovants réduisant le ratio suivant :

$$\frac{\text{Impacts environnementaux}}{\text{Services rendus}}$$

- Être réactive pour se placer en amont ou en introduction des développements.
- Être perçue par les équipes comme une opportunité.

La **Figure 1** résume le processus d'éco-innovation proposé, structuré en trois phases, de prospection, d'éco-innovation et de préparation à l'action, la dernière phase s'interfaçant avec le processus classique de R&D.

<sup>1</sup> Échelle de fabrication : « manufacturing readiness level », semblable à l'échelle TRL, comportant généralement 10 niveaux.



Face à la multitude de sujets de recherche existants dans les laboratoires de recherche, une phase de **prospection** des sujets introduit la démarche d'éco-innovation afin d'**inventorier les thématiques** de l'entité souhaitant bénéficier de cette démarche et de **sélectionner** celles qui présentent une contrainte environnementale ayant une **valeur** aux yeux de nos clients.

La phase **d'éco-innovation** a pour objectif la génération de projets innovants permettant de réduire le ratio impacts environnementaux sur service rendu. Elle s'inspire partiellement de la méthode proposée par Hélène Teulon, dans son ouvrage *Le Guide de l'Éco-innovation*<sup>2</sup>.

La 1<sup>ère</sup> étape, « **Opportunités** », s'attache à définir le périmètre de l'étude (technologie, marché visé, parties prenantes...). Les objectifs et l'argumentaire justifiant de déployer une démarche d'éco-innovation sont précisés en vérifiant que l'amélioration des impacts environnementaux présente une valeur perceptible par le marché ou par les parties prenantes. La phase d'analyse consiste à explorer la problématique en s'intéressant aux services rendus par le sujet, à son cycle de vie, à ses bénéfices et impacts environnementaux, à ses composants, à son milieu environnant.

Cette étape **analyse** également les contraintes et les conditions d'innovation ainsi que l'idéalité pour les parties prenantes. Ce tour d'horizon permet d'aboutir à la reformulation du problème sous la forme d'une question d'éco-innovation qui sera le point de départ de la phase suivante d'**idéation**. Cette étape d'idéation produit avec des outils d'innovations classiques et des séances collectives de divergence, un grand nombre d'idées permettant de répondre à la question d'éco-innovation. Elle est suivie par l'étape de **sélection** qui consiste d'abord à rassembler et/ou trier les idées pour obtenir des concepts innovants distincts. Ensuite, ces concepts sont évalués selon des critères établis au préalable. La faisabilité technique ou économique, le gain environnemental, l'adéquation avec la stratégie de l'entreprise, la satisfaction des contraintes et conditions d'innovation en sont des exemples.

Une dernière phase consiste à **préparer** les équipes techniques **à l'action** afin que les concepts nés de la phase d'éco-innovation soient réellement mis en œuvre via notre processus habituel de gestion de projet. L'objectif de cette phase est de permettre aux équipes techniques de s'approprier suffisamment les nouveaux concepts afin qu'elles puissent les porter jusqu'à leur réalisation.

Une première étape permet de formaliser de manière précise les **concepts**, de les qualifier par rapport à des indicateurs comme sa contribution à un axe stratégique, son originalité, et de réfléchir à leur faisabilité, leurs avantages et leurs risques. Les **besoins en recherche** sont ensuite identifiés en mettant en regard les compétences et les usages existants avec ceux demandés par le concept. Cette démarche permet d'aboutir à des ébauches d'organigramme de projet mais aussi à des propositions de **roadmap** thématique en lien avec la résolution de la question d'éco-innovation traitée.

#### Expérimentation de la méthode

Afin de développer la démarche, quatre sujets couvrant les domaines d'activités de plusieurs laboratoires de l'institut Carnot Énergies du futur ont été sélectionnés pour expérimenter la démarche. Pour constituer des preuves de concept acceptables pour l'institut, les sujets d'expérimentation ont été sélectionnés pour couvrir la diversité en termes de thématique technologique et de niveau de maturité technologique. Ils se veulent également représentatifs de la nature et du niveau d'appropriation des défis écologiques par les chercheurs dans leurs pratiques. Enfin chaque sujet introduit un contexte de R&D différent en terme de question posée (soit très précise, soit très générique), de niveau de maturité de la technologie développée (soit au stade de la preuve de concept soit du prototype ou du process) et d'équipe impliquée (restreinte ou étendue à tout un service, avec ou sans partenaire extérieur).

Parmi les quatre projets technologiques sélectionnés, les deux premiers ont été traités ou sont en cours de finalisation. Les deux autres sont mentionnés ici à titre indicatif.

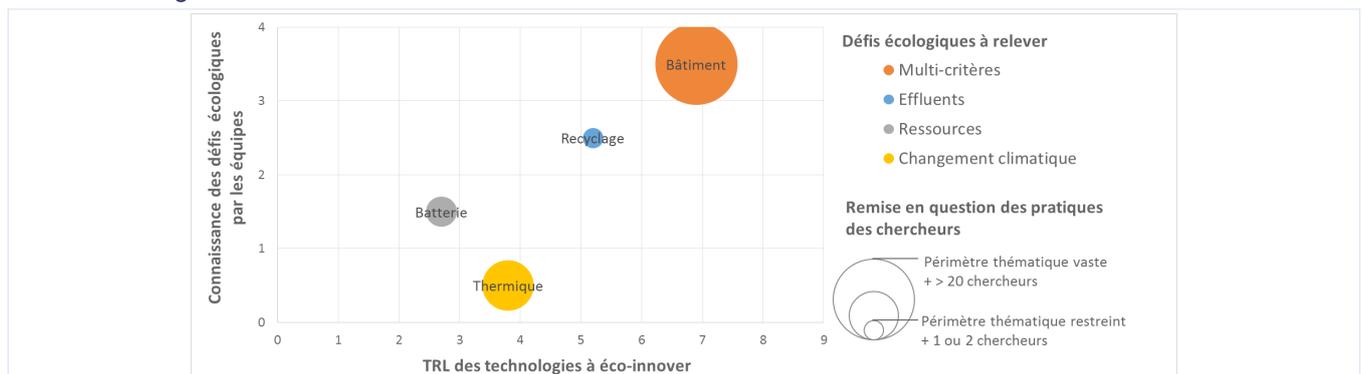
<sup>2</sup> Teulon, H. (2015). *Le guide de l'éco-innovation*. Paris : Groupe Eyrolles. ISBN: 978-2-212-55991-0



Ils ont été initiés en partant de la question : *Comment faire pour...*

1. Qu'un système de stockage thermique intelligent soit simple d'utilisation tout au long de son cycle de vie tout en étant efficace ? Il s'agit ici de compléter une technologie de maturité moyenne ayant des difficultés à rencontrer son marché en la rendant plus attractive grâce à l'aspect environnemental.
2. Qu'un bâtiment soit efficace en énergie tout en étant sobre en carbone ? Il s'agit ici de soutenir un service entier dans l'intégration d'un aspect environnemental à leur stratégie de recherche.
3. Qu'une batterie sodium-ion n'utilise que des matériaux à faible énergie grise ? Il s'agit ici d'anticiper un risque de verrou technique et environnemental pouvant remettre en question la pertinence d'une technologie de maturité faible.
4. Qu'un procédé de recyclage hydrométallurgique ne rejette aucun effluent ? Il s'agit ici de lever un verrou à la fois technique et environnemental majeur pour une technologie de maturité moyenne.

La **Figure 2** synthétise ces quatre sujets d'études sur une carte défi écologique vs niveau de TRL afin d'illustrer leur grande diversité.



**Figure 2 :** Positionnement des sujets choisis par rapport à leur maturité (TRL), au défi écologique à relever, aux connaissances existantes dans les équipes de ces défis et en fonction du nombre de chercheurs dont les pratiques évoluent.

Enfin, ces sujets permettent de tester l'apport de différentes réponses à une variété de besoins par une démarche d'éco-innovation et notamment sur les deux sujets d'intérêt traités ici :

- Le sujet stockage thermique : comment compléter une technologie de maturité moyenne ayant des difficultés à rencontrer son marché avec l'aspect environnemental ?
- Le sujet bâtiment : comment intégrer l'aspect environnemental dans la stratégie des équipes de recherche des laboratoires ?

### Principaux résultats obtenus

#### 1. Système de stockage thermique intelligent

Ce système permet de stocker de l'énergie en provenance ou à destination d'un réseau de chaleur urbain grâce à un matériau à changement de phase.

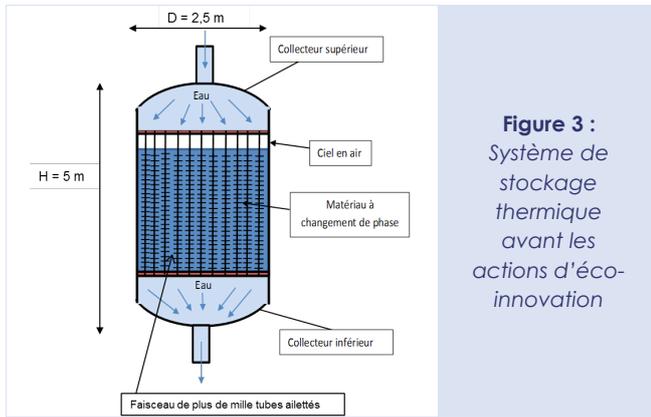
Il permet notamment de différer une production d'énergie thermique de sources renouvelables par rapport à sa consommation. Ainsi, il peut contribuer à réduire l'utilisation de sources fossiles par les exploitants de réseaux de chaleur afin d'assurer les pics de consommation journaliers. Le système présente des bénéfices environnementaux conséquents pendant son utilisation mais le reste de son cycle de vie (fabrication, installation, maintenance, fin de vie) génère des impacts environnementaux. L'exercice d'éco-innovation a consisté à trouver des idées permettant de maximiser les bénéfices à l'usage tout en réduisant ceux sur le reste du cycle de vie sans dégrader les fonctionnalités attendues sur l'ensemble de son cycle de vie.

En suivant la méthode d'éco-innovation documentée précédemment (**Figure 1**), 105 idées ont été générées. 17 nouveaux concepts de stockage thermique intelligents ont été proposés dont 2 ont fait l'objet d'un dépôt de brevets et seront testés à l'occasion de stages ou de projets de ressourcement par l'équipe. Ces concepts maximisent les bénéfices environnementaux obtenus pendant la phase d'usage sans augmenter les impacts environnementaux du reste du cycle de vie de la technologie.

Cette réflexion a notamment permis aux chercheurs d'ouvrir leur champ d'investigation tant sur le système, que sur son futur marché et son cycle de vie.

Les innovations principales concernent l'intelligence du système et son interfaçage avec les outils des exploitants de réseau, la forme physique du système en vue d'une installation simple, le maintien des performances du système par une maintenance autogérée.

Sur cette dernière thématique les équipes ont notamment prouvé techniquement en 2017 que le système pourrait s'auto-vérifier sans intervention extérieure et maintenir son niveau de performance dans le temps. Le verrou actuel concerne le passage de l'échelle laboratoire à une échelle supérieure. La suite de leurs projets les conduira à développer le produit (électronique et capteurs) qui permettrait de réaliser cette fonction supplémentaire.



**Figure 3 :**  
Système de  
stockage  
thermique  
avant les  
actions d'éco-  
innovation

## 2. Bâtiment efficace en énergie et sobre en carbone

Depuis de nombreuses années déjà, impulsé par la réglementation (RT2012, etc...) et les pouvoirs publics, la recherche en bâtiment a travaillé sur l'amélioration des impacts environnementaux de leurs solutions. Comme l'essentiel des impacts environnementaux provenaient de la consommation d'énergie pendant la phase d'usage des bâtiments neufs ou à rénover, les améliorations ciblaient essentiellement le besoin en énergie pendant la phase d'usage. Aujourd'hui, les solutions sur le sujet sont satisfaisantes et en cours de déploiement pour l'efficacité énergétique en phase d'usage des bâtiments neufs. Mais elles peuvent augmenter les impacts lors de la construction de l'habitat. Ces solutions ne sont pas non plus suffisantes pour atteindre la division par un facteur 4 des émissions de gaz à effet de serre pour l'ensemble secteur du bâtiment. Une démarche d'éco-innovation a donc été lancée pour ouvrir le champ des possibles et imaginer d'autres solutions en rupture.

Sur ce sujet, un appel à idée a été organisé sur la plateforme Idée-Clic de l'intranet du CEA Grenoble en mode « crowdsourcing<sup>3</sup> » le 14 Novembre 2017. La question posée était la suivante : *Comment agir sur la construction et la rénovation pour rendre les villes non-polluantes<sup>4</sup>* ? En 4 semaines, 796 personnes provenant de tous les laboratoires du site ont visité la campagne et plus de 160 invités ont permis de générer 159 idées, 351 commentaires et 315 votes. 72% des idées produites sont aujourd'hui soutenues par le comité transverse d'évaluation. 82% d'entre-elles se sont intégrées dans une démarche d'éco-innovation.

Ces 159 idées ont été regroupées en 12 champs d'innovation : enveloppe évolutive ; gestion de l'énergie ; confort ; modularité ; récupération d'énergie ; mesures ; bio-mimétisme ; réduction des pertes ; inertie & stockage ; gestion intelligente de l'eau ; végétalisation du bâtiment ; gestion et traitement de l'air.

<sup>3</sup> La production participative à grande échelle ou crowdsourcing est l'utilisation de la créativité, de l'intelligence et du savoir-faire d'un grand nombre de personnes pour produire un résultat.

<sup>4</sup> Neutre en émissions de gaz à effet de serre, avec une bonne qualité de l'air et économe en ressources

Après un travail de sélection sur le 1<sup>er</sup> trimestre 2018, les champs d'innovation seront intégrés à la feuille de route scientifique et technologique des équipes de recherche du bâtiment. Les premiers projets transverses issus des idées produites sont attendus au 3<sup>ème</sup> trimestre 2018.

## BILAN DE VALORISATION

### Publications et congrès

- Mise en place d'une démarche d'éco-innovation au sein d'un organisme de recherche technologique, Élise Monnier, Novembre 2017, Mémoire de certification FFP pour la formation CEGOS «Responsible Innovation»
- How LCA-based innovation approach can lead to breakthrough solutions, whatever the TRL?, Élise MONNIER, Hélène TEULON, présentation orale, avniR 2016, 8-9 Novembre 2017 Lille, France
- Using an original eco-innovation methodology to integrate LCM into the innovation processes of new energy technologies R&D: OpenGreen®, Élise MONNIER, Hélène TEULON, Quentin BEZIER, présentation poster, LCM 2017, 3-6 Septembre 2017, Luxembourg
- Eco-Innovate: LCT as an innovation partner, Using OpenGreen® for new energy technologies R&D, Élise MONNIER, Hélène TEULON, présentation poster, avniR 2016, 8-9 Novembre 2016 Lille, France

## PERSPECTIVES

### SUITE DU PROJET

L'expérimentation sur le sujet bâtiment a terminé la phase d'idéation via une campagne de crowdsourcing (4000 invités internes au CEA). Il s'agit désormais d'accompagner l'équipe cliente de 40 chercheurs dans la sélection des éco-idées les plus pertinentes pour figurer sur leur programme de recherche 2020-2030. La suite du projet verra également la formalisation de la méthode d'éco-innovation et des outils par un livrable. Les expérimentations donnent toutes naissances à une quantité d'idées nouvelles que les chercheurs responsables des thématiques doivent s'approprier et faire mûrir dans le processus projet habituel. À l'issue de l'expérimentation pour chaque sujet, nous pouvons attendre la création d'une multitude de projets intégrant un nouvel aspect environnemental et le dépôt de quelques brevets issus des éco-idées générées comme retombées du projet Carnot Eco-Innov' NTE.

### NOUVELLES COLLABORATIONS

- Partenaires industriels historiques et nouveaux intéressés par les résultats ou la démarche.

### ACTIONS DE VALORISATION À VENIR

- Eco-idées potentiellement brevetables par les équipes ayant bénéficiées d'une expérimentation d'éco-innovation.

# PROJETS 2017 DU CARNOT ÉNERGIES DU FUTUR

**19 actions de ressourcement** distribuées dans les 5 axes stratégiques sont en cours :

## Sources d'énergies (3 projets)

- Les projets **Si-PREMIUM** et **SOLAROX** portent sur des nouveaux matériaux pour cellules PV et visent à dépasser les rendements actuels.
- **AIRSTRIP** concerne le développement de structures architecturées de couches minces pour la conversion photovoltaïque intégrée à l'habitat.

## Vecteurs d'énergie (8 projets)

- **OLAF** porte sur les accumulateurs sodium ion fonctionnant à basse température.
- **NAEL** a pour objectif d'améliorer la cyclabilité de l'électrode de lithium métal des batteries li-ion.
- **REDBAT** porte sur le refroidissement des batteries par matériau diphasique.
- **MATGAN 2** vise à développer les convertisseurs de puissance à haut rendement.
- Les autres projets (**PRINTPAC2** ; **SHOCAPIK** ; **STATU QUEAU**) portent sur la réalisation de piles à combustible par techniques d'impressions, sur la caractérisation fine des couches actives et le développement de piles à combustible moyenne puissance.
- **SHYMPATHIC** porte sur le stockage hydrogène à base de nouveaux matériaux.

## Usages (2 projets)

- **COOL-STO** porte sur l'étude d'un système de refroidissement basé sur le couplage entre un échangeur sec et un réservoir de stockage de chaleur et d'humidité.
- **MODULO** cherche à développer des MEMS pour la détection immunologique, en se basant sur les propriétés magnétiques des matériaux.

## Transverses (6 projets)

- Deux projets (**MIMOSA** ; **DURASOC-ODIN**) étudient les Cellules à Oxyde Solide (SOC), qui fonctionnent soit en pile (production d'électricité) soit en électrolyseur (production d'hydrogène), et visent à augmenter les performances.
- **MAPPE** porte sur la recherche de nouveaux matériaux pour l'énergie par criblage haut débit de leurs propriétés intrinsèques (big data).
- **FAMERGIE** vise à réaliser des matériaux métalliques par techniques d'impression 3D pour des applications d'échangeurs de chaleur et connecteurs.
- **ECO-LED** porte sur le développement de matériaux pour l'éclairage à haute efficacité.
- **ARTEFACT** porte sur le nitrure d'aluminium comme matériau réfractaire pour capteurs solaires.

Les **10 actions de professionnalisation et développement de partenariats** concernent les axes stratégiques suivants :

## Sources d'énergies (2 projets)

- **TRICYCLE2** porte sur le développement d'un cycle thermodynamique de valorisation de la chaleur pour la production combinée de froid et d'électricité.
- **MICROFLEX** à pour objectif le développement d'un module souple à base de micro cellules III-V pour application spatiale.

## Vecteurs d'énergie (1 projet)

- **BDDSYS** porte sur la conception d'une base de données des technologies de stockage d'énergie pour capitaliser sur l'expertise acquise et améliorer la rapidité et l'acuité des réponses techniques aux partenaires.

## Usages (1 projet)

- **INTERREBAT** porte sur le développement d'une plateforme intégrant à la fois des modèles énergétiques du bâtiment, en lien avec la plateforme réseaux de chaleur.

## Transverses (2 projets)

- **ECO-INNOV'NTE** vise à proposer une méthodologie d'éco-innovation pour renforcer la performance environnementale des projets en amont.
- **PROSPEN2** porte sur la construction d'une vision de prospective énergétique pour avoir une meilleure idée de la place des différentes technologies dans le paysage énergétique.

## Réseaux (4 projets)

- **PPINTEROP2** vise à relier et inter opérer deux plateformes de réseaux d'énergies « intelligents » (smart grids) pour améliorer la compréhension de ces systèmes complexes et préparer les évolutions du secteur des énergies intermittentes.
- **COSIM-SG** envisage de nouvelles approches d'analyse et de validation d'un réseau électrique intelligent par les méthodes holistiques de co-simulation et de simulation temps réel.
- **TEMOIN** porte sur les travaux de modélisation et simulation à l'échelle d'un territoire des modèles énergétiques.
- **ECO SESA-EP** vise à réaliser un convertisseur «cluster» multidirectionnel communiquant permettant d'interconnecter, des réseaux DC, AC, du stockage et de la production.



**Carnot**, la recherche pour l'innovation des entreprises.

**Édition** : Carnot Énergies du futur, bâtiment GreEn-ER, 21 avenue des martyrs, CS 90624, 38031, Grenoble Cedex 1.

**Directeur de la publication** : François Weiss, Directeur du Carnot Énergies du futur.

**Conception & Graphisme** : Sarah Badji, chargée de communication.

**Crédits photos** : © CEA-Liten / © P.AVAVIAN / © D.GUILLAUDIN / © L.CHAMUSSY / Laboratoire SIMaP / © Laboratoire G2Elab - © A.CHEZIERES / © Spiral media - Fotolia.com / © Shutterstock.com - Alexander Rath.





[www.energiesdufutur.fr](http://www.energiesdufutur.fr)

Bâtiment GReEn-ER  
21 avenue des martyrs  
CS 90624  
38031 GRENOBLE Cedex 1  
FRANCE

—  
04 76 82 62 93

[contact@energiesdufutur.fr](mailto:contact@energiesdufutur.fr)

