

BILAN DES PROJETS DE RESSOURCEMENT SCIENTIFIQUE

2018•2019







L'impact mondial de la pandémie a bousculé les marchés de l'énergie et, de façon inattendue, démontré les conséquences positives que le déploiement des énergies à faible empreinte carbone peut avoir sur l'environnement. Dans ce contexte du retour progressif vers une situation « stabilisée », la recherche apparaît plus que jamais comme essentielle à la préparation de l'avenir. Pour construire notre futur dans un environnement préservé, grâce à des modes de communication et de mobilité basés sur des énergies bas carbone, des systèmes énergétiques intégrant des matériaux et des composants dont le cycle de vie a été anticipé dès la conception, les laboratoires du Carnot Énergies du Futur transforment toutes ces volontés en projets de recherche innovants qui construiront le monde de demain.

La vocation de nos laboratoires est ensuite de transformer les résultats de ces projets de recherche en innovations, au travers de partenariats industriels et grâce au support de nos plateformes expérimentales et numériques.

Cette montée progressive vers la maturité technologique prépare les

transferts vers l'industrie et l'entrée de nouvelles technologies sur le marché.

L'aboutissement de ce continuum de recherche allant du concept au démonstrateur puis à la commercialisation nécessite de cultiver en amont des projets de ressourcement permettant d'explorer les idées de ruptures potentielles.

Ce bilan des projets de ressourcement 2018-2019 présente les synthèses des projets aboutis sur la période, dans les cinq axes thématiques du Carnot Énergies du Futur : Production d'énergies renouvelées ;

- Stockage, conversion et distribution d'énergie ;
- Nouveaux usages à haute efficacité énergétique ;
- Réseaux d'énergies intelligentes ;
- Technologies transverses.

Engagées dans une démarche scientifique d'excellence, avec une production annuelle de plus de 700 publications et 200 brevets, les équipes du Carnot Énergies du futur préparent un monde durable avec une énergie bas carbone et des usages plus efficaces.

POUR ALIMENTER LE PROCESSUS D'INNOVATION, ÉNERGIES DU FUTUR ENGAGE DES PROJETS AMONT À DOUBLE IMPACT : SCIENTIFIQUE D'ABORD ET INDUSTRIEL ENSUITE.

CHRISTIAN SCHAEFFER

Directeur de l'institut Carnot Énergies du futur

FLORENCE LEFEBVRE-JOUD

Directrice Adjointe de l'institut Carnot Énergies du futur



Réparti entre Grenoble et Chambéry, le Carnot Énergies du futur agit pour favoriser l'innovation dans le domaine des nouvelles technologies de l'énergie à faible empreinte carbone.

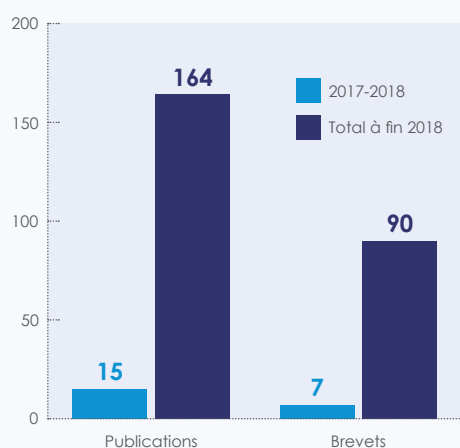
L'institut Carnot Énergies du futur se positionne comme un acteur majeur de la recherche dans le domaine de la transition énergétique. Au-delà de l'intégration d'énergies renouvelables, c'est avec l'anticipation des nouveaux usages de l'énergie et en considérant la globalité de la chaîne de valeur, que les nombreux laboratoires s'impliquent pour être en capacité de proposer de futurs partenariats industriels.

Pour mieux appréhender ces évolutions, les activités de recherches de l'institut Carnot Énergies du futur sont réparties suivant cinq axes stratégiques :

- **Production d'énergies décarbonnées** (solaire photovoltaïque et thermique, bioressource, hydrolien...)
- **Stockage conversion et flux de vecteurs d'énergies** (multivecteurs énergétiques)
- **Réseaux d'énergies intelligents**
- **Nouveaux usages à haute efficacité énergétique** (bâtiment, transport, industrie)
- **Technologies transverses** (modélisation, cycle de vie, matériaux, économie de l'énergie).

Pour ces cinq axes, les projets de ressourcement visent à développer des sujets innovants, soutenir des preuves de concept, ou encore réaliser des démonstrateurs ou renforcer des actions existantes en vue de les faire progresser pour déboucher sur des solutions technologiques innovantes.

PUBLICATIONS ET BREVETS



CHIFFRES-CLÉS 2018-2019

1490 Personnels de recherche

1762 Brevets en portefeuille

761 Publications annuelles

40 M€ Recettes partenariales directes

DEUX MISSIONS

L'excellence scientifique

Les chercheurs du Carnot Énergies du futur sont engagés dans des projets sélectionnés pour renforcer le ressourcement scientifique 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.

SOMMAIRE

AIRSTRIP • Architected structures for building integrated photovoltaics	p.06
BDDSYS2 • Base de données systèmes de stockages	p.09
CAZTS • Substitution du cuivre par l'argent dans les alliages kesterites pour les cellules tandem sur silicium	p.11
COOLSTO • Stockage [...] pour optimisation des points froids des systèmes de conversion électrique [...]	p.13
COSIM-SG • Réseaux smart grids	p.16
ECO-INNOV'NTE • Eco-innover les nouvelles technologies de l'énergie	p.19
GOLF • Graphene avec pores ultimes pour filtration gazeuse.....	p.22
ELEGAN • Conception, développement, [...] de matériaux passifs pour l'électronique de puissance sur GaN.....	p.25
HPC-PROOF • Preuve de concept d'une hydrolienne à pas contrôlé	p.27
Liste des projets en cours • Projets de ressourcement 2019-2020.....	p.29

AIRSTRIP

ARCHITECTURED AND FLEXIBLE
STRUCTURES FOR BIPV TECHNOLOGY

Laboratoires impliqués :

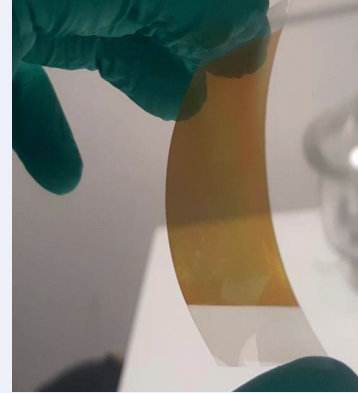
- LMGP/IMEP-LaHC/SIMAP

Auteurs :

- A. SEKKAT
- A. KAMINSKI-CACHOPO
- G. CHICHIGNOUD
- D. MUÑOZ-ROJAS

L'ESSENTIEL

Les objectifs principaux de ce projet visent à optimiser le dépôt de cellules photovoltaïques à couches minces pour des applications (en intérieur et en extérieur), y compris sur des surfaces non planes. À cette fin, les travaux ont porté sur trois aspects fortement corrélés : la sélection et le dépôt des matériaux, la modélisation des dispositifs proposés, la fabrication et la caractérisation des dispositifs. L'écosystème du projet IDEX EcoSESA permet d'établir un lien fort avec les sciences sociales et humaines pour estimer comment les caractéristiques des cellules proposées (couleur, poids, flexibilité, coût, matériaux, technologie, problématique du recyclage, etc.) peuvent affecter le potentiel du marché photovoltaïque, par exemple en modifiant les habitudes de consommation.



Cellule solaire flexible et semi-transparente à base d'oxyde cuivreux déposée par SALD

BILAN

Rappel du contexte et des objectifs du projet

Les objectifs principaux de ce projet visent à optimiser le dépôt de cellules photovoltaïques à couches minces pour des applications tant en intérieur qu'en extérieur, y compris sur des surfaces non planes. À cette fin, les travaux porteront principalement sur trois aspects fortement corrélés : la sélection et le dépôt des matériaux, la modélisation des dispositifs proposés, la fabrication et la caractérisation des dispositifs. L'écosystème du projet IDEX EcoSESA permet d'établir un lien fort avec les sciences sociales et humaines pour estimer comment les caractéristiques des cellules proposées (couleur, poids, flexibilité, coût, matériaux, technologie, problématique du recyclage, etc.) peuvent affecter le potentiel du marché photovoltaïque, par exemple en modifiant les habitudes de consommation.

Les technologies photovoltaïques intégrées au bâti (Building Integrated PhotoVoltaics ou BIPV) innovantes connaissent un fort développement depuis que le secrétariat de la plateforme européenne de technologie et d'innovation photovoltaïque a déclaré en 2016 que 70 % de la consommation énergétique mondiale provenait des villes et produisait par conséquent 40 % à 50 % des émissions de gaz à effet de serre. En fait, le BIPV a évolué assez rapidement depuis que la capacité totale installée est passée de 1,5 GW en 2014 à 6,7 GW en 2018 (augmentation de 78 %) et il est prévu qu'il monte jusqu'à 11,1 GW en 2020, ce qui représente 87 % d'augmentation par rapport à 2014 et plus de 50 % en seulement 2 ans.

Dans ce contexte la motivation principale derrière ce travail est d'étudier et de développer des convertisseurs photovoltaïques à base de films minces pour des applications en BIPV. Par ailleurs les films minces offrent des avantages en termes de coût et flexibilité, aspect important car il permettrait une meilleure pénétration du PV au sein des éco-quartiers. Ces technologies à base de films minces fournissent ainsi des performances potentiellement améliorées en termes de propriétés ainsi que de paramètres de sortie. En particulier, l'oxyde de cuivre (I) représente un matériau très intéressant pour les applications PV. Le Cu_2O a une absorption optique élevée et la théorie de Shockley – Queisser prédit que l'efficacité théorique des cellules solaires à base de Cu_2O est supérieure à 20 % sous un éclairage solaire AM1,5.

Différentes techniques de dépôt ont déjà été utilisées pour la croissance de couches minces de Cu_2O , telles que le dépôt chimique en phase vapeur métal-organique et la pyrolyse par pulvérisation qui nécessitent un dépôt en température autour de 350 °C. Cependant, d'autres techniques nécessitent une température de dépôt encore plus élevée, entre 500 °C et 700 °C sous vide, ce qui est le cas de la radiofréquence et de la pulvérisation magnétron en courant continu. De même, l'ALD conventionnel est utilisé pour le dépôt de Cu_2O , mais cette technique est limitée par la faible vitesse de dépôt ainsi que par la nécessité de travailler sous vide. L'utilisation d'AP-SALD (Atmospheric pressure-apatial atomic layer deposition), une technique utilisée et développée au sein du groupe FunSurf du LMGP, est un choix séduisant car cette technique représente un outil

innovant et prometteur pour le dépôt rapide d'oxydes très conformes avec un rapport coût-efficacité attractif à très basse température et à pression atmosphérique et ce, jusqu'à 260 °C. En effet l'AP-SALD est une approche alternative à l'ALD conventionnelle dans laquelle les précurseurs sont séparés dans l'espace plutôt que dans le temps, permettant des taux de dépôt rapides par rapport à l'ALD conventionnelle (jusqu'au nm/s dans certains cas).

Description de l'état d'avancement du projet

Des études précédentes montrent que la température de dépôt, ainsi que la pression partielle d'oxygène, peuvent avoir un effet sur les propriétés de transport des couches minces de Cu₂O. Mais la nature des défauts, et leur quantité, donnant lieu à la variation des propriétés de transport n'ont cependant pas été étudiées en détail.

Nous avons ainsi réalisé une étude systématique dans laquelle nous avons utilisé différentes températures et pressions partielles d'O₂ (Figure 1). Nous avons obtenu des échantillons avec une gamme de propriétés de transport, à savoir une concentration de porteurs de 10¹⁴ à 10¹⁸ cm⁻³, une résistivité de 0,4 à 3 10⁴ Ω.cm et une mobilité de 6 à 91 cm².V⁻¹.s⁻¹ en conséquence. Les valeurs de **mobilité élevée et de faible résistivité** obtenues sont comparables à celles obtenues pour le Cu₂O monocristallin et n'ont jamais été obtenues dans des films minces déposés à basse température sur des substrats amorphes. Nos études montrent que la température et la pression partielle d'O₂ ont un effet sur la résistivité des films.

Parallèlement à l'étude et à l'optimisation du dépôt de couches minces de Cu₂O de type p, la mise en œuvre de celle-ci sur des dispositifs a également été lancée. Par conséquent, des films minces en ZnO de type n, déjà développés en laboratoire par AP-SALD, ont été combinés avec des films minces en Cu₂O pour fabriquer des cellules solaires intégralement oxyde et exclusivement fabriquées par cette technique.

Cette approche expérimentale a été complétée par une simulation numérique à l'aide des logiciels wxAMPS

et SCAPS permettant d'évaluer les caractéristiques de sortie de cette cellule solaire. Différents paramètres ont été étudiés, tels que l'effet de l'épaisseur, de la concentration du support et du défaut au niveau du film mince et de l'interface.

Bilan de valorisation

Publications et Congrès

- In progress: "**Tunable Electrical Properties of Cu₂O Deposited via Atmospheric Pressure Spatial Atomic Layer Deposition towards High Mobility Thin Films**" - Abderrahime Sekkat,^{1,2,3} César Arturo Masse De La Huerta,¹ Viet Huong Nguyen,¹ Daniel Bellet¹, Anne Kaminski-Cachopo², Guy Chichignoud³, and David Muñoz- Rojas*,¹
- **ORAL**: "Cu₂O based thin film deposited via AP-SALD towards PV applications" Abderrahime Sekkat, Viet Huong Nguyen, Cesar Masse de la Huerta, Daniel Bellet, Anne Kaminski-Cachopo, Guy Chichignoud, David Muñoz-Rojas. **47th IUPAC World Chemistry Congress - IUPAC 100, Paris, France, 9/7/2019**
- **ORAL and POSTER** in **Institute Carnot « Énergies du futur »** "AIRSTRIP – Architected and Flexible Structures for Building Integrated Photovoltaics"
- **POSTER: EU PVSEC 2019**, the 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition: September 2019, Marseille "Oxide Solar Cell Devices Based Cu₂O/ZnO Deposited via Open Air Spatial Atomic Layer Deposition towards Building Integrated Photovoltaic Application"
- **ORAL** "Deposition of Cu₂O Thin Films with tunable transport properties via Atmospheric Pressure Spatial Atomic Layer Deposition", RALFAL 2019
- **ORAL** accepted EMRS 2020 "P-type semiconductor Cu₂O deposited via spatial atomic layer deposition: a step towards low-cost photovoltaic solar harvesters". Abderrahime Sekkat, Daniel Bellet, Anne Kaminski-Cachopo, Guy Chichignoud, David Muñoz-Rojas

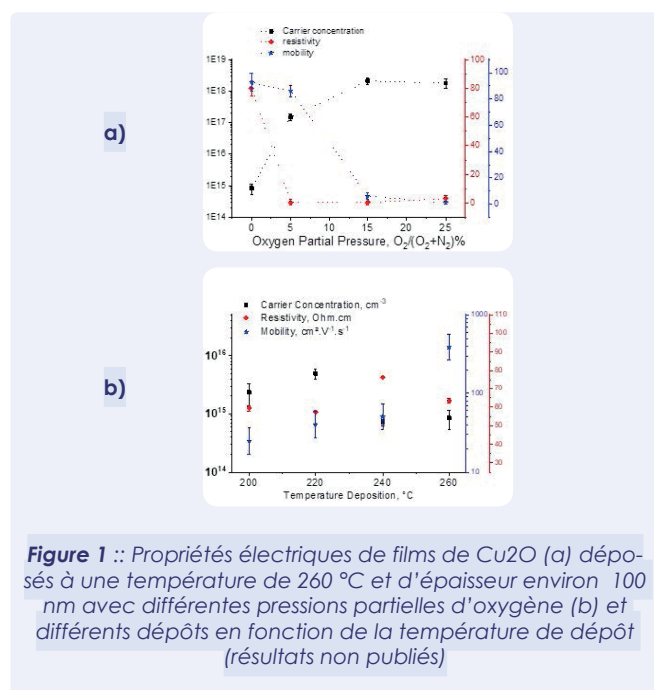


Figure 1 :: Propriétés électriques de films de Cu₂O (a) déposés à une température de 260 °C et d'épaisseur environ 100 nm avec différentes pressions partielles d'oxygène (b) et différents dépôts en fonction de la température de dépôt (résultats non publiés)

PERSPECTIVES

La suite du projet portera sur une caractérisation avancée de la couche de Cu₂O en utilisant différentes techniques telles que XPS, UPS, Positron annihilation spectroscopy, et réflectométrie aux rayons X pour définir également la densité, la rugosité et l'épaisseur.

De plus l'intégration des couches de Cu₂O étudiées sera envisagée dans des cellules solaires à hétérojonction avec différentes quantités d'oxygène et d'épaisseur incorporées à la couche de ZnO et à d'autres semi-conducteurs de type n tels que TiO₂ par exemple ou même du silicium.

L'aspect dopage du Cu₂O sera également étudié afin d'augmenter encore les propriétés de transport électrique et d'améliorer la formation des lacunes de cuivre / interstitiels d'oxygène : AgCuO₂, CuZnO₂ et CuMgO₂.

Afin d'évaluer le spectre d'applications en BIPV de cette technologie et tout particulièrement la flexibilité qui permet de proposer des cellules non planes, des tests mécaniques sur la couche de Cu₂O et les dispositifs seront réalisés en testant l'effet du dépôt du film mince sur différents substrats : silicium mince, PET, PEN et ITO flexible.

Enfin la simulation numérique des dispositifs sera plus approfondie afin de corrélérer les résultats obtenus avec les expériences menées sur les cellules à base de couches minces.

BDDSYS2

BASE DE DONNEES POUR LES SYSTÈMES DE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

Laboratoires impliqués :

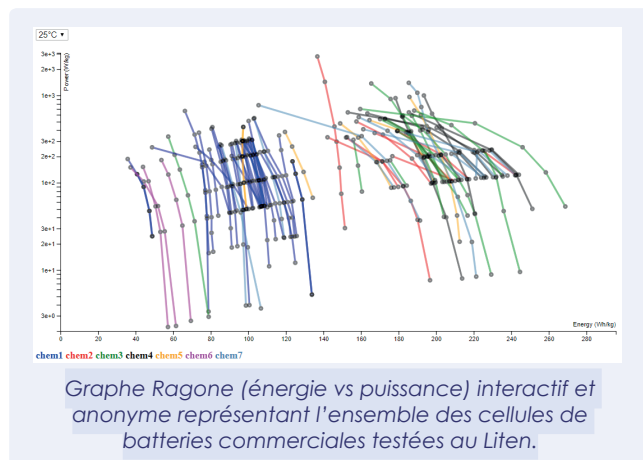
- CEA-Liten (DEHT/STB/LM, DTS/S2E/LSEC, DEHT/SAMA/LAP, DEHT/SAMA/LAEH, DEHT/STP/LSP, DTBH/SCTR/LST, DTNM/SERE/LRVM)

Auteurs :

- F. PERDU
- R. TESSARD
- B. BERSENEFF,
- L. DANIEL,
- C. DESMOULINS
- S. FIETTE
- Y. FOURNERON
- C. GALLET
- G. LARGILLER
- G. LAVIALLE
- L. LONARDONI
- E. MONNIER
- L. DE PAOLI
- E. PINTON
- S. ROSINI

L'ESSENTIEL

Le projet BDDSYS, triennal, a permis de fédérer dans une même base de données des connaissances et des résultats de tests de différents systèmes de stockage d'énergie de façon transverse entre laboratoires.



Graphique Ragone (énergie vs puissance) interactif et anonyme représentant l'ensemble des cellules de batteries commerciales testées au Liten.

BILAN

Rappel du contexte et des objectifs du projet

L'objectif du projet est de doter le CEA d'une base de données des systèmes de stockage d'énergie, nommée ESTOR, regroupant les informations disponibles dans les différentes unités. Ce projet a été impulsé par le CEA, dans le but de disposer d'une synthèse des systèmes existants, de leurs performances et, par comparaison aux besoins applicatifs, de pouvoir définir les axes de recherches pertinents. L'existence d'une base de données permet la capitalisation des connaissances dans le domaine du stockage (sauvegarde de l'information). Par ailleurs, la centralisation des informations sous un même format permet d'échanger les données entre activités. Ainsi pour une même technologie, les données sont plus facilement échangées entre les équipes qui conçoivent des composants, celles qui les testent, celles qui les modélisent, celles qui les utilisent dans un système...

Ces deux objectifs internes imposent des contraintes différentes au développement de la base de données : d'une part elle doit permettre de disposer de données macroscopiques sur un large éventail de technologies, d'autre part elle doit permettre de capitaliser et d'échanger des données précises sur les technologies d'intérêt des différentes équipes.

Vis-à-vis de l'extérieur, la base de données doit permettre d'améliorer les réponses aux partenaires, mais aussi de se positionner en tant qu'expert objectif sur les technologies de stockage d'énergie, et non pas seule-

ment en tant que fournisseur de solutions technologiques. Par ailleurs, une ouverture partielle des données dans le respect de la confidentialité, peut être le catalyseur pour des échanges enrichissants avec des partenaires privilégiés.

Description de l'état d'avancement du projet

Structure de la base

Afin de répondre à l'ensemble des objectifs ci-dessus, la base de données a été conçue selon un modèle hiérarchique, au sens d'un arbre d'objets de plus en plus spécialisés. La base peut être vue selon n'importe quel point de l'arbre représenté en figure 1. À chaque fois que l'on descend d'un cran dans l'arbre, on se restreint à une famille plus petite d'objets, mais on voit plus d'information sur ces objets. En effet, si on ne regarde que des cellules de batteries, alors la tension de fin de charge est un attribut pertinent, tandis que si on veut comparer des batteries à du stockage thermique ou gazeux, ce paramètre n'a pas de sens. En revanche la densité d'énergie est pertinente pour l'ensemble des stockages. On peut donc avoir une vue large et grossière (beaucoup d'objets, peu d'attributs), ou une vue rapprochée et fine (peu d'objets, beaucoup d'attributs). Il est également rapidement apparu qu'on ne pouvait représenter le stockage sans représenter également la conversion d'énergie. Les piles à combustible par exemple ne sont qu'un convertisseur, et doivent être associées à l'électrolyse et au stockage d'hydrogène pour faire un stockage électrique.

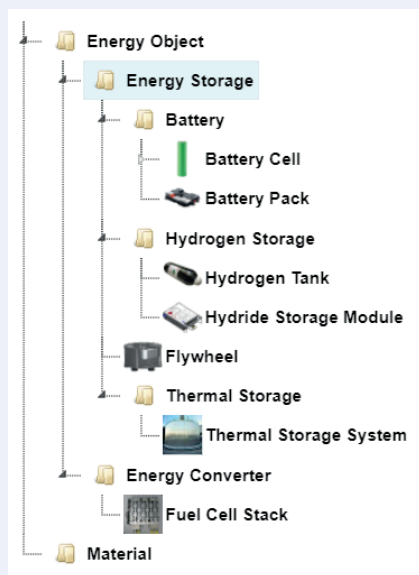


Figure 1 : hiérarchie de classes de la base de données

Pour tous ces types d'objets, des listes d'attributs ont été définies, permettant de représenter leur caractéristiques globales (telles masse, volume coût), leurs performances initiales dans diverses conditions de fonctionnement, leur vieillissement, leur impact environnemental... Des tables supplémentaires permettent de stocker les résultats de tests spécifiques. Une attention particulière a été portée à la traçabilité des données. Au total, près de 500 attributs sont définis pour les différents types d'objets, allant d'une simple valeur à un graphique dépendant de plusieurs variables.

Alimentation de la base

À la fin du projet, la base est riche de plus de 1000 fiches, dont 500 décrivant des cellules de batteries, 100 décrivant des stacks de piles à combustible, et 200 correspondant à des tests particuliers (tels que des tests abusifs ou de stabilité thermique). Certaines fiches sont également disponibles sur les packs batteries, le stockage d'hydrogène, le stockage thermique, le supercondensateurs...

Interopérabilité de la base

L'implémentation de la base a été réalisée avec le logiciel Granta MI, qui permet un accès par un portail web relativement convivial, l'import ou export par des fichiers EXCEL mais aussi un accès entièrement automatisé par Python. Cela ouvre la possibilité d'import automatique de données, comme cela a été fait pour les stacks de piles à combustible, ou de traitement automatique des données, dont le graphe Ragone dans la page de titre est un exemple. Un autre exemple est l'interfaçage de l'outil de dimensionnement du laboratoire SAMA/LAEH, qui utilise les données de performance des cellules pour optimiser le dimensionnement d'un pack batterie connaissant le profil de puissance demandé par l'application.

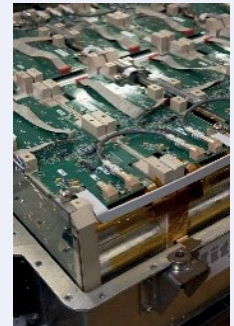
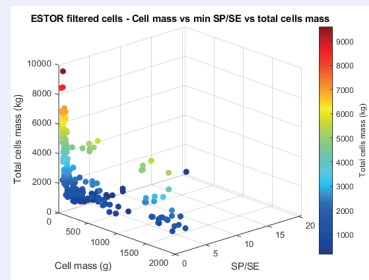
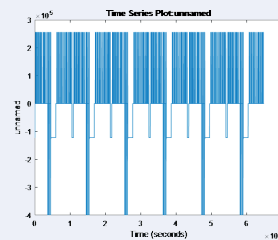


Figure 2 : Recherche automatique de dimensionnement optimal à partir des cellules de la base de données : profil applicatif / ensemble des dimensionnements optimaux / vers la conception-réalisation du pack.

Bilan de valorisation

Publications et congrès

[1] F. Perdu et al., « ESTOR: A versatile and wide spectrum database for energy storage technical data », IEEE International Energy Conference (ENERGYCON, 2018)

PERSPECTIVES

Suite du projet

La somme des connaissances mises à disposition permet de renforcer la conception des systèmes énergétiques complexes ainsi que les axes de recherche pour les prochains systèmes de stockages d'énergies. La base de données réalisée garde tout son sens au-delà de la durée du projet Carnot. Afin de pouvoir continuer à la faire vivre et à l'alimenter, il est indispensable d'inclure des actions concernant la base de données dans les projets relevant du stockage d'énergie. Deux premiers exemples de projets européens démarrés sont listés ci-dessous.

Nouvelles collaborations

- Projet européen TEESMAT : Ce projet est un hub de caractérisation de matériaux pour le stockage d'énergie et notamment les batteries. Il regroupe une trentaine de techniques de caractérisation, et des cas d'usages venant de différents industriels. La base de données ESTOR est utilisée pour tracer l'ensemble des échantillons et des tests réalisés dans le projet et capitaliser l'ensemble des résultats.
- Projet européen DEFACOTO : Ce projet porte sur la modélisation des batteries, et une action concerne la centralisation dans notre base de données des paramètres nécessaires aux modèles des différents partenaires.

CAZTS

SUBSTITUTION DU CUIVRE PAR L'ARGENT DANS LES ALLIAGES KESTERITES POUR LES CELLULES TANDEM SUR SILICIUM

Laboratoires impliqués :

- CEA / Liten/ DTNM / SCSF / LCH
- CNRS / Institut Néel / NPSC
- CEA / IRIG / NPSC

Auteurs :

- R. ANDRE
- J. BLEUSE
- Y. CURE
- F. EMIEUX
- L. GRENET
- H. MARIETTE
- S. PERRET
- S. POUGET

L'ESSENTIEL

Cu₂ZnSn(S,Se)₄-based solar cell performances are limited by band-tailing due to a large amount of CuZn antisite defects. We replace the Cu atoms by larger Ag ones to significantly reduce the prevalence of these defects. We demonstrate the possibility of synthesizing (Cu_{1-x}Ag_x)₂ZnSnSe₄ absorbers with various Ag contents by vacuum-based processes. The bandgap value and the bandtail extension are obtained by optical spectroscopy. For instance the dependence of the bandgap versus silver content exhibits a very small bowing, which is a hint for weak localization in these silver-based alloys. The integration of (Cu_{1-x}Ag_x)₂ZnSnSe₄ absorbers in thin-film photovoltaic devices exhibit similar performance compared to efficient pure Cu₂ZnSnSe₄-based solar cells.

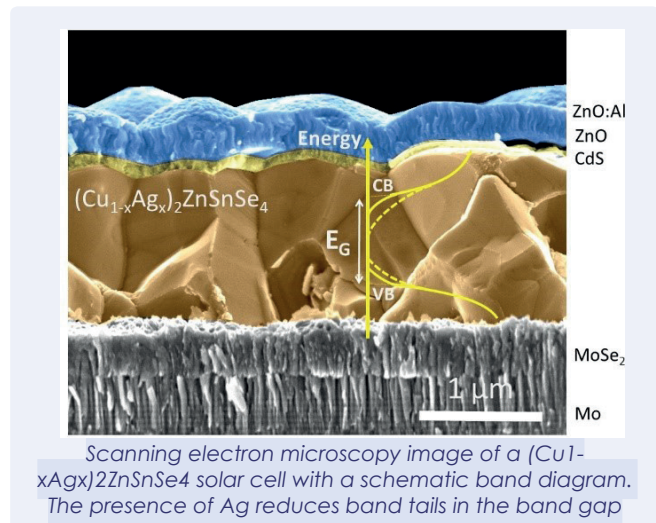
BILAN

Rappel du contexte et des objectifs du projet

Cu₂ZnSn(S,Se)₄ (CZTSSe) absorbers have attracted a considerable attention in the past few years due to their favorable opto-electronic properties for thin film photovoltaic applications without using critical raw materials. However, the maximum Power Conversion Efficiencies of kesterite-based solar cells is limited to 12.6 %, which is far from the 23.4 % achieved by the chalcopyrite-based ones (M.A. Green et al., Prog Photovoltaics 2019, 27 (1), 3-12). The main difference between these cousin technology lies into a much smaller Open Circuit Voltage (VOC) for the CZTSSe-based solar cell. This VOC deficit can be partially attributed to band tails in the kesterite absorber, which arises from a large amount of CuZn antisites in the lattice (L. Grenet, et al. ACS Applied Energy Materials 2018, 1, 2103). Based on DFT calculations, replacing part of the Cu atom by Ag has been proposed as a solution to significantly reduce the cation antisites concentration, consequently the band tails in the absorber, and thus the VOC deficit.

The goal of the project was twofold:

- Testing and analyzing the silver incorporation into CZTSe and demonstrating the possibility of synthesizing (Cu_{1-x}Ag_x)₂ZnSnSe₄ absorbers with homogeneous and graded alloying profiles by vacuum processes
- To determine the evolution of the bandgap and the



bandtail in these alloys as a function of silver concentration in order to evaluate this new material for a tandem cell compatible with silicon technology.

Description de l'état d'avancement du projet

Sample fabrication and device processing

- Polycrystalline thin films and solar cells: a CAZTSe synthesis has been developed using a two-step selenization process of metallic precursors stack sputtered onto a Mo coated SLG substrate. This study demonstrates the possibility of synthesizing (Cu_{1-x}Ag_x)₂ZnSnSe₄ absorbers with homogeneous and graded alloying profiles by vacuum processes. In the first case, well controlled solid solutions are obtained in the depth of the absorber for Ag content up to 50%. These CAZTSe absorbers reveal good morphologies with large grains and without evidence of secondary phases except for the highest Ag content. However, homogeneous incorporation of Ag in kesterite absorbers does not lead to better performances of the photovoltaic devices. In the second case, absorbers with graded (Cu,Ag) alloying have been fabricated with Ag content increasing significantly at the interfaces. More specifically, the continuous Ag-rich (Cu_{1-x}Ag_x)₂ZnSnSe₄ layer close to the Mo back contact helps to collect the carrier at this interface and improve current in the devices.

- Mono-crystalline epilayers: a Molecular Beam Epitaxy machine was optimized for AZTSe layers by changing the copper effusion cell with a silver one. This obtained by using InAs substrates that have the smallest lattice mismatch with the lattice parameter of AZTSe (0.605 nm), and by adjusting the growth temperature (460 °C) following two criteria, (i) no minor phase in the epilayer, and (ii) the control of the sticking coefficients for all the cations.

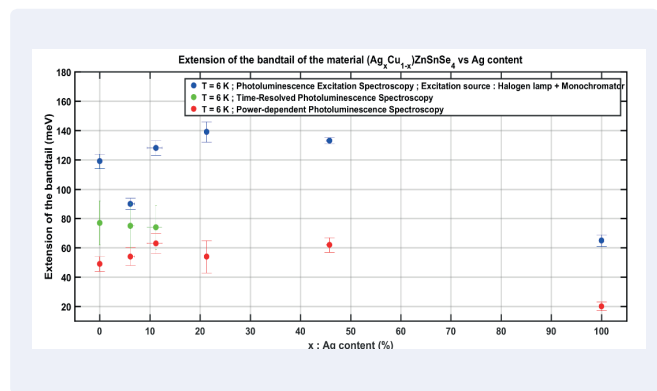
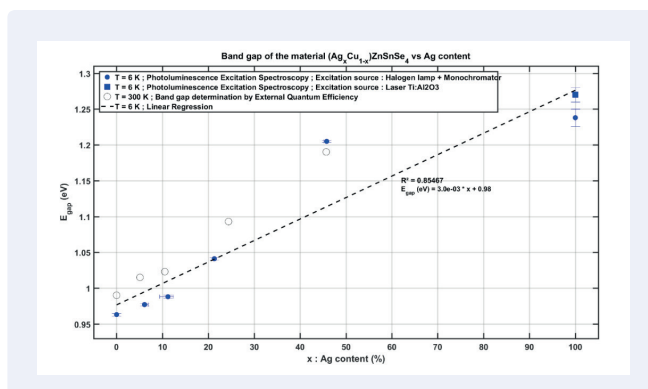
Optical characterization

A 6-month internship (09/19 to 02/20) for a M2/Engineer student from the Université Technologique de Troyes (S. Perret) was financed through this project. This student strongly contributed to the systematic optical investigation of the samples. This investigation combines three types of spectroscopy measurements that allow us to determine the band gap of the alloys as well as the extension of their band tail of localized states: (i) the power and temperature dependences of the photoluminescence spectra (PL), (ii) the photoluminescence excitation spectra (PLE), and (iii) the time resolved photoluminescence spectra.

The variation of the gap as a function of Ag content x has been obtained at low temperature with these measurements (see the methodology developed for CZTSe by Bleuse et al. (J. Electronic . Materials, 47, 4282 (2018)). , and at room temperature by measuring the external quantum efficiency (L. Grenet et al see below (2020)). The extension of the band tail was obtained by comparing the energies of the PL emission with the one of the PLE (Stokes shift), by using the power dependence of the PL emission band, and by measuring the evolution in time and energy of this emission after a pulse excitation.

All these data allow us to show that:

- (i) The evolution of the bandgap as a function of silver content exhibits a very small bowing which is a hint of a weak localisation in these silver-based alloy.
- (ii) The band tail of these localized states is significantly reduced in alloy with Ag content $x=1$ compared to all other CAZTSe alloys.



Bilan de valorisation

Publications et Communications

- Homogeneous and graded Ag alloying in $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_2\text{ZnSnSe}_4$ solar cells, Louis Grenet, Fabrice Emieux, Frédéric Roux Phys. Stat. Sol. (a), 2020. <https://doi.org/10.1002/pssa.202000040>
- Investigation of the bandgap and band tail at low temperature in $\text{Ag}_2\text{ZnSnSe}_4$ epitaxial film S.Perret, J. Bleuse, Y. Curé, L. Grenet, R. André, H. Mariette, submitted to Appl. Phys. Lett
- II-VI Semiconductors and derivated kesterites structures for photovoltaic conversion, R. André, J. Bleuse, Y. Curé, F. Ducroquet, L. Grenet, A.A. Suzon and H. Mariette, invited paper at the International Conference « Frontiers of Physics in 21st Century » Ioffe Institute, San Petersburg, Nov. 2018
- Study of band tails in $(\text{Ag,Cu})_2\text{ZnSnSe}_4$ thin films by optical spectroscopy Joel Bleuse, Yoann Curé, Stephanie Pouget, Louis Grenet, Fabrice Emieux, Henri Mariette, 10th Int. Workshop on CIGS solar cell technology, Ecole Polytechnique, Palaiseau, May 2019
- Investigation of band gap and band tailing in $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ag}_x)_2\text{ZnSnSe}_4$ thin films alloys. Sylvain Perret, Joël Bleuse, Yoann Curé, Fabrice Emieux, Frédéric Roux, Régis André, Louis Grenet and Henri Mariette, 37th European PV Solar Energy Conference, Lisboa, 7 11/09/20

PERSPECTIVES

Suite du projet

The CEA & CNRS joint team will go on with optimizing the epitaxy of pure $\text{Ag}_2\text{ZnSnSe}_4$ layers, thanks to a new epitaxy reactor that was recently restarted. Then, in collaboration with IPVF (Institut Photovoltaïque d'Île-de-France), photovoltaic devices will be fabricated, starting from our epitaxial layers and taking advantage of all the technical knowledge developed for CIGS-based solar cells by the IPVF team.

COOL-STO

STOCKAGE COUPLÉ DE CHALEUR ET D'HUMIDITÉ POUR L'OPTIMISATION DES POINTS FROIDS DES SYSTÈMES DE CONVERSION ÉLECTRIQUE UTILISANT UN AÉRORÉFRIGÉRANT SEC

Laboratoires impliqués :

- CEA-Liten/DTBH/SCTR/LST

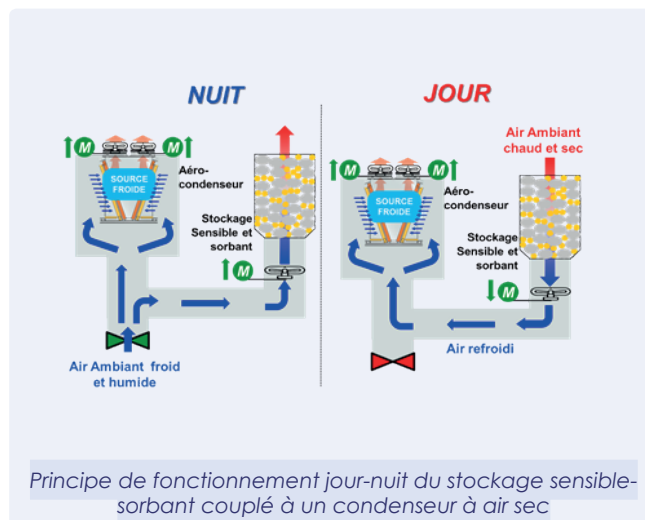
Auteurs :

- S. ROUGÉ
- O. SORIANO
- G. LARGILLER
- A. BRUCH
- J. BENTIVOGLIO

L'ESSENTIEL

La consommation d'eau pour le refroidissement des centrales électriques sera rédhitoire dans un futur proche dans les régions chaudes et arides et le recours au refroidissement à l'air devra se généraliser. Cependant l'air ambiant dans ces régions entraîne **une réduction de la production électrique de 1% par °C**.

Le concept COOLSTO permet d'**abaisser la température de l'air ambiant de plusieurs degrés au plus chaud de la journée au moyen d'un stockage journalier innovant de froid et d'humidité nocturne**.



BILAN

Rappel du contexte et des objectifs du projet

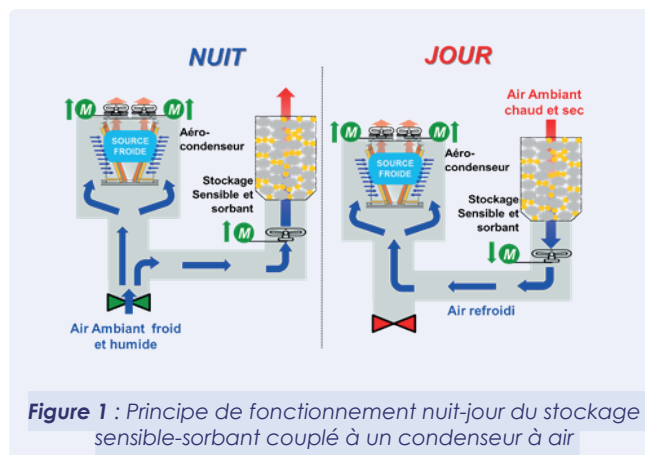
Contexte

La plupart des systèmes de conversion de l'énergie thermique en électricité sont refroidis à l'eau, entraînant une consommation d'eau de **1 à 4 m³/MWh, soit 90 à 95 % de la consommation totale** de la centrale. L'utilisation d'un refroidissement dit « sec » devra être privilégié dans les régions arides en raison d'une pénurie croissante d'eau et de compétitions d'usage. Cependant l'air ambiant présente de grandes variations journalières et saisonnières de température, ce qui induit une **baisse de production électrique de l'ordre de 1 % par degré supplémentaire**. De nombreux projets de R&D, par exemple le projet ARID aux USA, s'intéressent donc à l'amélioration du refroidissement des centrales thermiques, les stratégies étudiées étant multiples, depuis l'amélioration des performances des échangeurs jusqu'au refroidissement par rayonnement nocturne ou diurne. **La solution proposée dans le cadre de COOL-STO est originale et innovante par rapport à ces études.**

Objectifs du projet COOL-STO

Le projet COOL-STO a pour but l'étude d'un système de refroidissement à l'air sec innovant basé sur le couplage entre un aérocondenseur « classique » et un réservoir de stockage de froid et d'humidité au sein d'un milieu granulaire. Ainsi, durant la nuit, le réservoir est chargé (phase de stockage) en diminuant la température du matériau de stockage et en augmentant son humidité (voir **Figure 1**). Durant la journée, lors des heures les plus chaudes de la journée, le réservoir permet de refroidir

et d'humidifier l'air (phase de déstockage) alimentant l'aérocondenseur pour compenser ses pertes de performances. Le projet COOL-STO porte sur l'étude et la caractérisation expérimentales à échelle significative (de l'ordre de 1 m³) d'un tel système, couplées à des modélisations des phénomènes physiques mis en jeu.



Le projet COOL-STO s'articule autour de 4 grands axes qui ont été menés à terme durant le projet :

- Le développement et la validation d'un modèle couplé de stockage sensible et de sorption,
- La conception et la réalisation d'un dispositif d'essai en air humide et d'un module de stockage associant matériau sensible et matériau sorbant,
- La constitution d'une banque de données expérimentale pour la validation du modèle,

- La conception d'un matériau innovant plus adapté à la problématique visant à fixer le sorbant sur le matériau sensible au moyen d'un substrat perméable à la vapeur d'eau.

Description de l'état d'avancement du projet

Développement d'un modèle couplé sensible-sorption

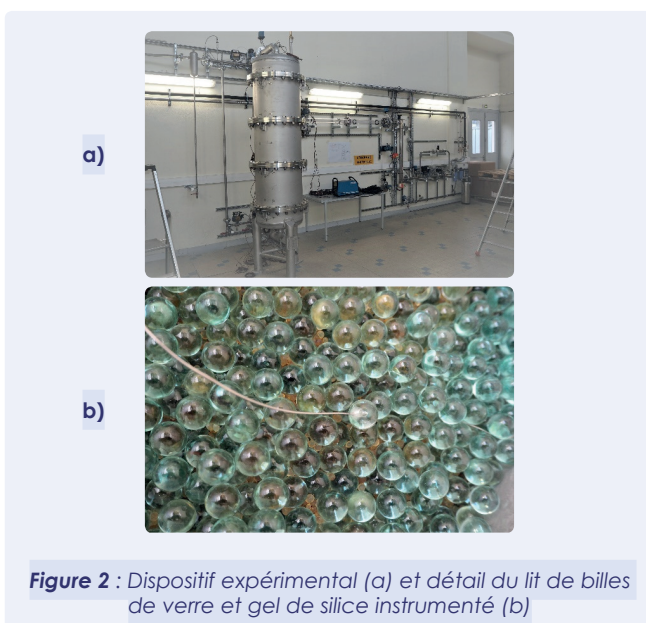
Le modèle couplé de sorption et de stockage de chaleur sensible est basé sur un modèle de stockage purement sensible précédemment développé au laboratoire LST. La prise en compte du phénomène de sorption a demandé de traiter le transfert de masse entre l'air humide et le sorbant ainsi que les propriétés chimiques du sorbant et la chaleur de réaction. Le modèle 1D de stockage couplé de chaleur et d'humidité développé dans COOLSTO traite séparément les équations de conservation de masse et d'énergie des différents constituants, (air sec, vapeur d'eau dans l'air, sorbant sec, eau adsorbée, matériau sensible et paroi du module).

Installation expérimentale

Un générateur d'air humide et un module de stockage couplé contenant un lit tassé homogène de billes de verre (simulant le matériau sensible) et de grains de sorbant ont été construits durant le projet COOLSTO (voir **Figure 2**).

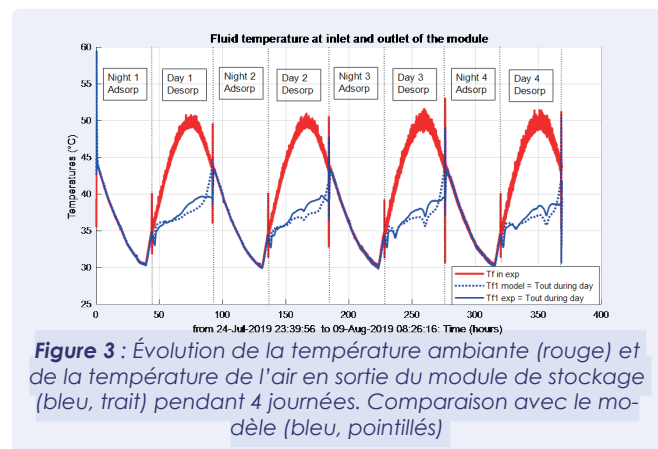
La gamme de fonctionnement ayant servi à dimensionner l'installation est issue d'une étude climatique sur 7 sites chauds et arides au moyen de l'outil MeteoNorm ayant permis de définir que la température de l'air pouvait varier entre 15 et 45 °C avec une amplitude diurne de 12 à 20 °C et que la fraction molaire de vapeur variait de 0,007 à 0,02 avec une très faible amplitude journalière.

Le critère principal pour le choix d'un sorbant commercial était sa capacité à désorber en dessous de 50 °C ce qui est inhabituel. Un choix réduit de 3 sorbants a pu être établi, un gel de silice Regular Density de Bayer et deux zéolithes Z02 et Z05 de Mitsubishi. Le gel de silice, plus facile à mettre en œuvre car se présentant sous forme de grains de 3,5 mm de diamètre, a servi pour le projet.



Constitution d'une banque de données expérimentales

Quatre types d'essais ont été réalisés sur l'installation expérimentale, des essais de stockage sensible sans sorption, des essais analytiques ne faisant varier qu'un paramètre (soit la température, soit l'humidité de l'air) et des essais « réalistes » de sorption pour lesquels la température de l'air varie continuellement suivant un profil journalier. Ce type d'essai permet de visualiser l'abaissement de la température au cours de la journée pour une stratégie de charge et décharge donnée. La comparaison avec le modèle montre un accord correct, encore perfectible, comme illustré en **Figure 4** pour un essai dit « réaliste ».



Conception d'un matériau de stockage innovant

La configuration testée lors de la campagne d'essai avec de petits grains de sorbant venant combler les porosités d'un lit de matériau sensible présente une perte de charge trop élevée, ce qui peut être rédhibitoire pour un dispositif fonctionnant à l'air. Une idée de matériau hybride sensible/sorbant, basé sur des billes de matériau sensible recouvert d'une fine couche de sorbant ($\approx 100 \mu\text{m}$) a donc été développée au sein de COOLSTO. Les principales difficultés résident dans l'adhérence entre les matériaux sensible et sorbant lors des cyclages thermiques et la définition d'un substrat perméable à la vapeur d'eau. La procédure de dépôt a été mise au point lors du projet, en particulier le choix du liant, la fraction massique du sorbant dans le liant, la méthode d'enrobage, la température et la durée de séchage.

Bilan de valorisation

Brevets

- Refroidissement d'air diurne au moyen d'un dispositif de stockage de froid et d'humidité d'air.

Publications et congrès

- S. Rougé, A. Bruch, O. Soriano, G. Largiller, An hybrid sensible-sorption storage system for water saving on power plants in arid regions, SHC Task58-ECES Annex 33 public seminar, 01-03 mai 2019, Ottawa, Canada.
- A. Bruch, S. Rougé, O. Soriano, G. Largiller, F. Mure-Ravaud, Novel Coupled Heat/Moisture Energy Storage – Experimental Characterization And Numerical Predictions, SolarPaces, 01-04 octobre 2019, Daegu, Corée du Sud.

PERSPECTIVES

Suite du projet

- Un concept de matériau sensible enrobé d'une couche mince chargée en sorbant a été proposé et développé au cours du projet COOL-STO. Ce concept sera validé expérimentalement en 2020-2021 sur le dispositif d'essai construit pour COOL-STO. 600 kg de billes de verre enrobées de 25 kg de zéolithe Z05 constitueront la charge du lit tassé ;
- Validation et amélioration du modèle numérique 1D de stockage couplé de chaleur et d'humidité sur la base des données de la littérature et des essais spécifiques réalisés sur l'installation COOLSTO ;
- Application du concept COOLSTO sur des cas réels de centrale de conversion thermique/électrique pour illustration et quantification des gains associés ;
- Première évaluation technico-économique du concept de stockage couplé de chaleur et d'humidité

Nouvelles collaborations

- Thèse 2019-2022 : en collaboration avec le CETHIL à Lyon. « Stockage couplé de chaleur et d'humidité pour l'optimisation des systèmes utilisant un aéroréfrigérant sec ».

Actions de valorisation à venir

- **Publication 1** : Water saving on thermodynamic power plants in arid regions thanks to coupled sensible and sorption heat and moisture storage – Experimental proof-of-concept
- **Publication 2** : Water saving on thermodynamic power plants in arid regions thanks to coupled sensible and sorption heat and moisture storage – Numerical simulation and Model validation
- Demande de production de froid pour des applications autres que la transformation thermique/électrique
- Participation à un projet européen permettant d'atteindre un TRL 5 à 6.

COSIM-SG

DÉVELOPPEMENT DES NOUVELLES APPROCHES D'ANALYSE ET DE VALIDATION D'UN RÉSEAU ELECTRIQUE INTELLIGENT PAR LES MÉTHODES HOLISTIQUES DE CO-SIMULATION ET DE SIMULATION TEMPS RÉEL

Laboratoires impliqués :

- G2Elab, CEA-Liten/DTS/S3E/LSEI

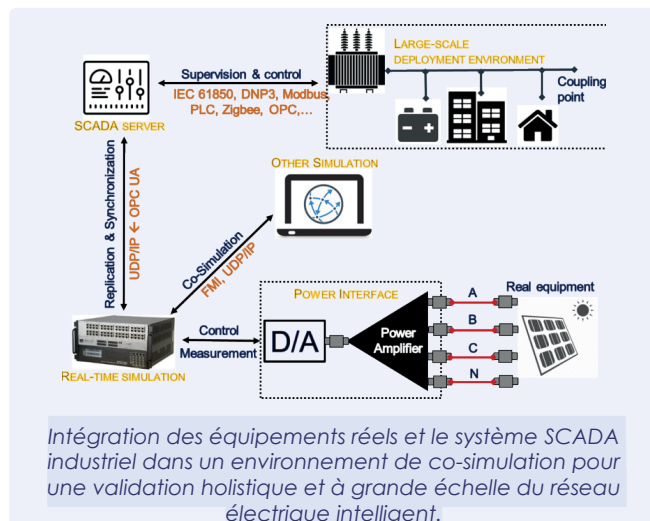
Auteurs :

- Q. TRAN
- V. NGUYEN
- Y. BESANGER
- M. LE

L'ESSENTIEL

« CoSIM-SG » développe les méthodes innovantes de co-simulation pour la recherche et la validation du réseau électrique intelligent (smart-grid), se composant d'un grand nombre de domaines solidement intégrés : électrique, thermique, ICT (Technologies de l'information et de la communication), marché, etc. A travers le projet, le système SCADA, les équipements électriques réels sont aussi intégrés dans la plateforme de co-simulation holistique pour créer un environnement complexe et réaliste pour la validation des solutions smart-grid.

Les résultats font objets de plusieurs publications scientifiques dans des revues et des conférences internationales réputées.



BILAN

Rappel du contexte et des objectifs du projet

Le réseau électrique intelligent (smart-grid) se compose d'un grand nombre de domaines solidement intégrés : électrique, thermique, ICT, marché, etc. L'évaluation et la validation d'un tel système cyber-physique nécessitent une plateforme de simulation hétérogène basée sur une grande diversité de modèles de simulation, des équipements électriques réels. De plus, leurs interactions sémantiques devraient être intégrées.

Ce projet porte sur le développement des nouvelles approches d'analyse et de validation d'un réseau électrique intelligent par les méthodes holistiques de Co-simulation et de Simulation temps réel (COSIM). Ce projet porte sur le développement des nouvelles méthodologies de co-simulation et des approches de simulation temps réel (notamment PHIL-Power Hardware in the Loop-) pour la validation d'une configuration de smart grid dans le contexte d'intégration des ressources d'énergie renouvelable. Il porte également sur le développement des modèles FMU (Functional Mockup Units), de l'interface FMI (Functional Mock-up Interface) et de la synchronisation, la stabilité et la compensation d'interface de la simulation temps réel PHIL. La capacité d'interfaçage entre les différents logiciels de simulation, entre les différentes couches (électriques, communications, informations, fonctionnalités et marchés) et des applications dynamiques par une communication ontologique imposera également un certain degré d'interopérabilité des intra-plateformes et inter-plateformes.

Description de l'état d'avancement du projet

Démarche scientifique et technologique

Le système d'énergie cyber-physique (i.e. smart grid) requiert une coordination de manière holistique et cohérente de l'infrastructure physique et cyber-physique informatique pour assurer une fonctionnalité efficace et fiable. La plateforme holistique développée dans le projet COSIM se constitue des nouvelles méthodologies de co-simulation et des approches de simulation temps réel (notamment Power-hardware-in-the-loop), pour la validation d'une configuration de smart grid dans le contexte de la forte intégration des ressources d'énergie renouvelable.

Les travaux planifiés dans le projet sont :

- Étudier l'état de l'art sur la co-simulation et identifier les verrous pour l'application de smart-grid
- Développer les modèles d'interface FMI (modèles PV, Batteries, production décentralisée...)
- Étudier la possibilité d'utilisation MOSAIK pour synchroniser les différents logiciels
- Développer une plateforme de Co-simulation en tenant compte de simulation de communication en utilisant Ns-3¹
- Valider avec la simulation temps réel (OPAL-RT) avec les différents logiciels et composants (Communications, SCADA, Clouds, Agents, Matlab, Python, Eurostag, Spider, Power Factory...)
- Simuler des applications de gestion et de contrôle d'un microgrid réel.

¹ Network simulator, www.nsnam.org

État d'avancement du projet

Dans un premier temps, nous avons mené une recherche bibliographique sur la co-simulation pour formuler les défis de recherche pertinents, une liste des exigences concernant la fonctionnalité de co-simulation et pour déterminer les verrous pour l'application de smart grid.

Une bibliothèque de modèles ICT et des ressources d'énergie distribuées, conformément à de la norme Functional Mock-up Interface – FMI (l'interopérabilité dans la co-simulation) a été développée. La simulation du réseau de communication dans NS-3 a été considérée et nous avons réussi l'exportation du modèle du réseau sous forme FMU. Cette bibliothèque interopérable nous permet de configurer des scénarios du réseau énergétique cyber-physique complexe d'une manière « plug-and-play ». La gestion des dépendances cycliques entre les simulateurs et la synchronisation basée signal sont également étudiées. Une condition de synchronisation générique est donc proposée comme base pour établir la cohérence temporelle dans un cadre de co-simulation. Cette étude conduit à l'établissement d'une stratégie d'implémentation avec l'algorithme maître par Mosaik.

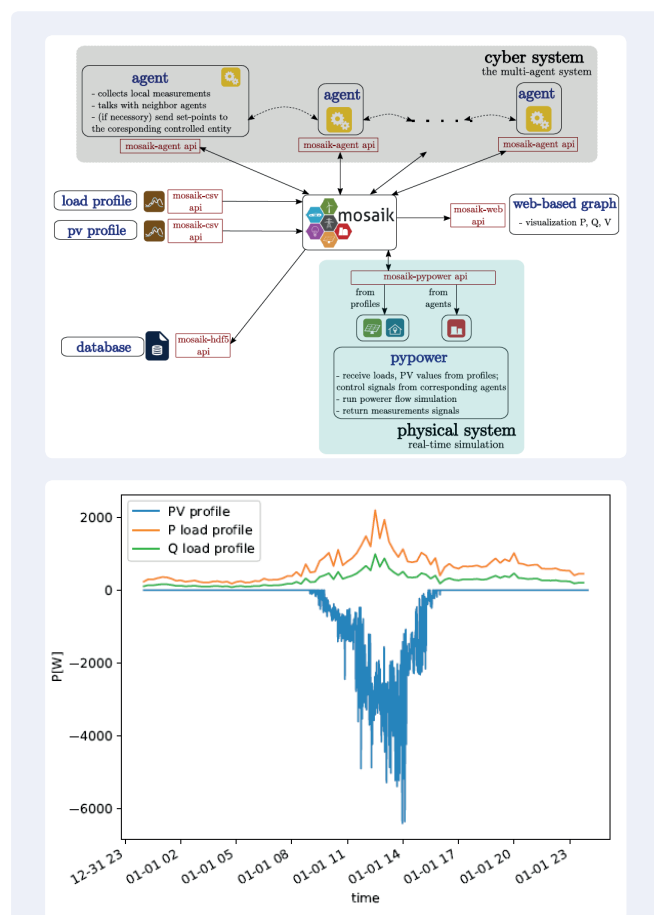


Figure 1 : Implémentation et le résultat de co-simulation d'un cas d'étude de contrôle distribué

De plus, en raison de la complexité croissante et du développement rapide d'éléments nouveaux et intelligents CPES (Cyber-Physical Energy Systems), il devient de plus en plus difficile de caractériser pleinement ces éléments avec des modèles de simulation. La nécessité d'inclure des éléments physiques dans un cadre de co-simulation (réseau HIL-Comm) pour une

considération holistique apparaît comme l'un des axes les plus importants du développement de la co-simulation. Il est également souligné par le manque d'outils et de méthodes d'évaluation du réseau de communication industriel, du contrôle et du système SCADA en général. Pour faire face au défi qui se pose, une méthode pour inclure du matériel ou une partie du système SCADA avec des protocoles de communication réels dans un cadre de co-simulation holistique a été explorée dans le projet COSIM pour réaliser une évaluation réaliste de l'impact de la communication industrielle sur la performance de CPES dans un environnement mixte physico-virtuel.

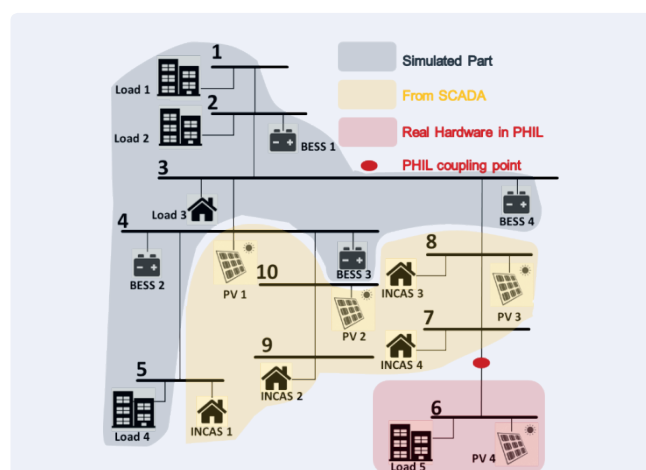


Figure 2 : Implémentation d'un contrôle de tension par optimisation multicritère sur un réseau combiné physico-virtuel utilisant une combinaison de deux plateformes PREDIS/PRISMES et le système SCADA OPC UA

Les résultats de ces développements méthodologiques et techniques sont démontrés via plusieurs cas de test des fonctionnalités avancées du smart-grid (i.e. contrôle distribué (Figure 1), optimisation multicritère (Figure 2), etc.), qui font objets des publications scientifiques dans des revues et des conférences internationales réputées.

Bilan de valorisation

Publications et congrès

- V.H. Nguyen, Q.T. Tran, T.L. Nguyen, Y. Besanger; Synchronization conditions and Real-time constraints in co-simulation and Hardware-in-the-Loop techniques for Cyber-Physical Energy System assessment, Elsevier Sustainable Energy, Grids and Networks, vol 20, pp100252, 2019.
- V.H. Nguyen, T.L. Nguyen, Q.T. Tran, Y. Besanger ; Integration of SCADA services in cross-infrastructure holistic tests of cyber-physical energy systems, soumis à IEEE Transactions on Industrial Applications
- M.T. Le, T.L. Nguyen, Q.T. Tran, Y. Besanger, T.T. Hoang, V.H. Nguyen ; A co-simulation approach for validating agent-based distributed algorithms in smart grid, 20th IEEE Mediterranean electrotechnical conference MELECON 2020, Palermo, 2020.
- Q.T. Tran, T. Le, M.T. Le, F. Bourry, F. Al-shakarchi; Voltage control in grids with high PV-Penetration, In Proceeding of the EU PVSEC conference 2019, Marseille, 2019.

PERSPECTIVES

Suite du projet

Pour la suite du projet, le cadre co-simulation sera renforcé avec les simulations temps réel et les infrastructures physiques pour créer un environnement à grande échelle, plus sophistiqué et plus réaliste pour la validation du réseau smart grid, notamment pour les applications de type cyber-sécurité.

Nouvelles collaborations

- Collaboration dans le cadre de projets européens : ERIGrid II (2020-2024), United Grid (2018-2022)
- Collaboration avec l'Université Nanyang Singapour
- Collaboration dans le cadre du projet régional IRICE

Actions de valorisation à venir

- Un article de conférence envisagé pour la conférence IEEE EEEIC 2020

ÉCO-INNOV' NTE

ÉCO-INNOVER LES NOUVELLES TECHNOLOGIES DE L'ÉNERGIE

Laboratoires impliqués :

- CEA-Liten, DTS, DEHT, DTNM, DTBH

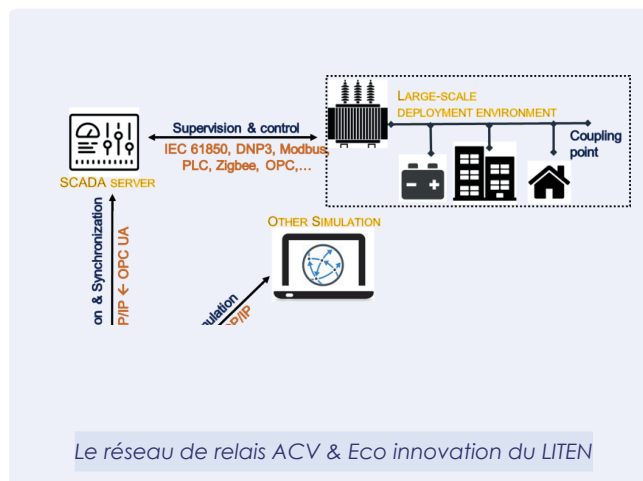
Auteurs :

- E. MONNIER,
- E. COR

L'ESSENTIEL

« Comment intégrer l'éco-innovation à la même vitesse que le processus d'innovation et de conception d'un RTO ? »

Le programme de travail 2019 a permis la mise en place d'un réseau de relais éco-innovation au sein de 4 départements de recherche technologique du LITEN. Chaque département a défini une stratégie d'éco-innovation et un plan d'action. Parmi les moyens déployés, une formation de sensibilisation en ACV et éco-innovation a été mise au point et dispensée pour amorcer l'autonomisation des équipes.



BILAN

Rappel du contexte et des objectifs du projet

La recherche en Nouvelles Technologies de l'énergie (NTE) ambitionne de répondre aux grands enjeux de demain ; notamment la pérennité de notre société dans un monde avec des ressources matériaux et fossiles finies et des problématiques de pollutions globales à éviter ou auxquelles remédier. L'enjeu pour cette recherche consiste à proposer des alternatives énergétiques d'abord techniquement viables mais aussi présentant des bénéfices économiques, environnementaux et sociaux.

Après la conception d'une méthodologie d'éco-innovation adaptée à la recherche en NTE, ce projet proposait de transférer les savoirs et outils nécessaires aux équipes pour qu'elles intègrent les aspects environnementaux à leurs pratiques de recherche et d'innovation. Les savoirs sont l'ensemble des qualifications et quantifications d'impacts environnementaux des technologies déjà réalisées par des experts ACV. Les outils sont des méthodes comme l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), l'écoconception et l'éco-innovation ou des logiciels adaptés aux pratiques de conception des équipes ainsi que l'expérience de leur mise au point, utilisation et maintenance.

Ce transfert a été réalisé dans un premier temps dans quelques équipes de recherche en matériaux et procédés pour l'énergie, en énergie pour la mobilité, pour le bâtiment, en énergie solaire, hydrogène ou thermique. Ce projet proposait concrètement de mettre en place les actions suivantes :

- L'animation du sujet par un réseau interne à plusieurs niveaux

- L'intégration et la démocratisation des outils d'experts en développement durable
- La diffusion de la culture via management du changement

Les résultats attendus pour ce projet étaient d'une part la diffusion de ces savoirs et outils fiabilisés dans les équipes de recherche formées ainsi que leur autonomisation et l'adoption du changement de pratique. D'autre part, la concrétisation d'actions d'éco-innovation en autonomie par les équipes soutenues.

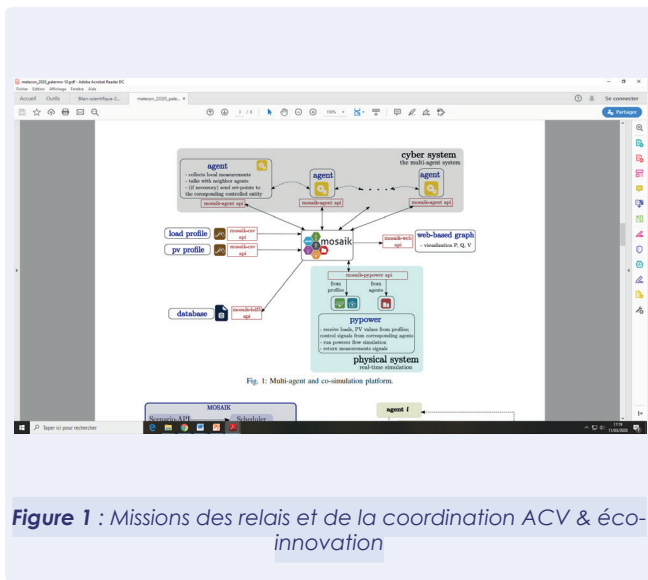
Description de l'état d'avancement du projet

La coordination d'un réseau de relais ACV au Liten

Afin d'intégrer et de pérenniser de manière systématique les aspects environnementaux dans les pratiques de recherche et d'innovation au LITEN, un réseau d'ambassadeurs en Analyse de Cycle de Vie et en éco-innovation a été créé en 2019.

Il est composé de quatre relais environnementaux rattachés à quatre départements de recherche et animé par l'équipe d'experts ACV et éco-innovation du DTNM/STDC/LMSE : Stéphanie Desrousseaux (économie circulaire), Fabien Perdu (électromobilité), Nouha Gazbour et Fabrice Claudon (photovoltaïque), Julie Cren (systèmes énergétiques), et enfin Élise Monnier ainsi qu'Emmanuelle Cor (coordination, transitions énergétique et circulaire).

Les principales missions des relais et de la coordination sont explicités dans la figure 1.



Des outils ont été identifiés par la coordination et développés pour un usage par les relais dans leur montée en compétences. Par exemple, une formation à l'ACV et à l'écoconception a été créée et diffusée. Ou encore, des logiciels et bases de données d'experts utilisables pour le calcul d'impacts environnementaux ont été mis en commun. Enfin des réunions régulières entre relais, animées par la coordination ont été organisées pour animer le partage d'expériences et d'expertise.

Résultats

Ce travail a permis de lancer des actions dans différents secteurs de recherche :

- Une équipe mettant au point des matériaux et des procédés pour l'énergie intègre progressivement la philosophie de l'économie circulaire à leurs programmes et pratiques de recherche. [Monnier, Desrousseaux, Cor et al., 2019¹]
- Une autre équipe mettant au point des solutions photovoltaïques réalise en autonomie des ACVs et de l'écoconception dans certains de ses projets en utilisant leur propre outil d'écoconception adapté à leurs pratiques.
- L'équipe de recherche en couplage de systèmes énergétique a, quant à elle, bien avancé dans l'intégration de l'aspect environnement dans un outil de dimensionnement et d'optimisation technico-économique [Sharma, Monnier et al., 2019¹].
- Enfin, l'équipe de recherche en électromobilité connaît aujourd'hui suffisamment les enjeux environnementaux des technologies de batteries (figure 2) pour les intégrer dans leurs réflexions de feuille de route technologique [Monnier, Perdu, 2020¹].

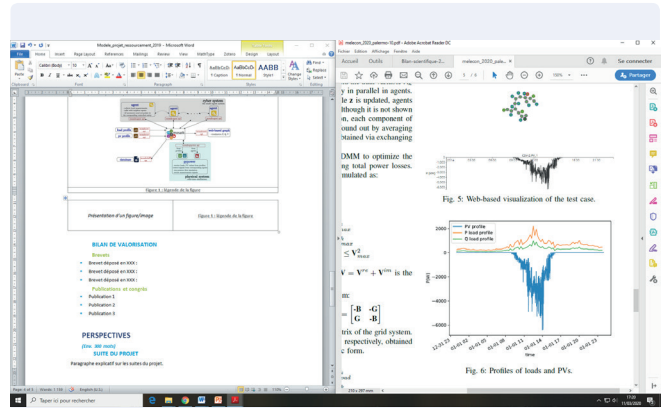
Le projet a permis la diffusion de savoirs par le transfert de connaissances, la formation et l'animation d'un réseau de relais pour l'évaluation et l'amélioration des impacts environnementaux de technologies.

Avant le projet, la majorité des équipes ciblées avaient un fonctionnement de délégation de cette tâche à l'équipe experte en ACV & éco-innovation. Suite à ce projet, elles sont passées à un fonctionnement semi-autonome de leur relai avec un besoin de compagnonnage par les experts en ACV & éco-innovation pour les méthodes, les questions techniques

¹ Voir la liste des publications dans le paragraphe valorisation

pointues et les premières réalisations.

Certains des relais construisent ou utilisent aujourd'hui des outils afin d'évaluer et d'améliorer leurs technologies en autonomie.



Bilan de valorisation

Publications et congrès

- H. Sharma, É. Monnier, G. Mandil, P. Zwolinski, et S. Colasson, « Comparison of environmental assessment methodology in hybrid energy system simulation software », *Procedia CIRP*, vol. 80, p. 221-227, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.01.007.
- É. Monnier, S. Desrousseaux, E. Cor, M. Chapuis, et C. Deguet, « Application of experimental standard xp x30-901 on circular economy to a research department in new materials, process and components », présenté à Congrès international [avniR] 9e édition, Villeneuve d'Ascq, 2019.
- É. Monnier et F. Perdu, « Impacts environnementaux et analyse du cycle de vie (ACV) des batteries Li-ion », in *Batteries Li-ion: du présent au futur*, EDP Sciences, 2020

PERSPECTIVES

Suite du projet

Afin de poursuivre le travail d'intégration de l'éco-innovation au sein de chaque département, il est important de poursuivre l'action de coordination de la stratégie et de formation des équipes techniques. À court-terme, les objectifs sont les suivants :

- Continuer à apporter de l'expertise en ACV et éco innovation au réseau de relai par de l'accompagnement à l'autoformation et de la coordination ;
- Formaliser les besoins et les priorités du LITEN sur les thématiques environnementales par la définition d'une stratégie d'éco-innovation moyen-terme pour chaque département.
- Intégrer tous les outils d'experts environnementaux au sein des équipes ;
- Autonomiser les relais par la coordination de l'équipe ACV du L2EV.

Un moyen de financement pour la suite de ces actions est activement recherché. À court terme, le succès de cette suite permettrait de passer d'un état de veille au statut de 1er RTO européen à intégrer une démarche d'éco-innovation variée au sein de son processus d'innovation. À moyen terme, le rayonnement conséquent permettrait de nous positionner solidement sur cet aspect pour les projets collaboratifs H2020 mais aussi d'envisager la création d'un écolabel « éco-innovant » pour certaines des technologies du Liten et valorisable auprès de nos partenaires industriels.

Nouvelles collaborations

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

- RTE
- Orano
- Renault
- SAFT
- Isorg
- ...

Actions de valorisation à venir

- H. Sharma, G. Mandil, P. Zwolinski, E. Cor, H. Mugnier, S. Colasson, E. Monnier, « Integration of life cycle assessment with energy simulation software for polymer exchange membrane (PEM) electrolysis », *Procedia CIRP*, to be published in 2020.
- Soutenance de la thèse de Hemant Sharma en 2020.
- Démarrage d'une thèse sur l'écoconception de technologies émergentes de batteries en 2020 également.

GOLF

GRAPHENE AVEC PORES ULTIMES POUR FILTRATION GAZEUSE

Laboratoires impliqués :

- CEA Liten / DTNM / SCSF / LCH

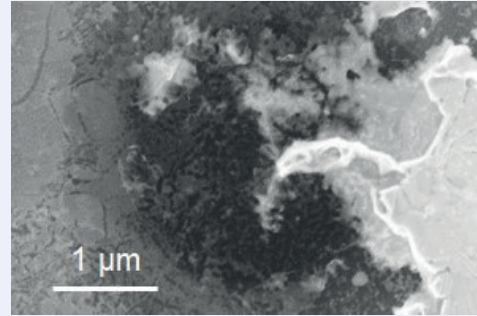
Auteurs :

- H. LE POCHÉ
- A. FOURNIER
- S. LITAUDON
- T. CHARVOLLIN
- R. RAMOS

L'ESSENTIEL

Démonstration d'une brique de base technologique innovante à base de graphène CVD mono-couche suspendu sur un substrat de Si percé, dans le but de réaliser un dispositif de filtration membranaire de l'hydrogène aux performances ultimes.

Développement d'un procédé de fabrication en rupture compatible grande surface, sans étape de transfert du graphène



Mono-couche de graphène continue et intacte, décorée de résidus de Pt, suspendue au-dessus d'un trou de 3 µm de diamètre

BILAN

Rappel du contexte et des objectifs du projet

L'hydrogène (H₂) est considéré comme un vecteur énergétique incontournable de la révolution énergétique mondiale. Le projet GOLF s'inscrit dans le cadre de la séparation ou de la purification de H₂, qui constitue un enjeu majeur pour des domaines applicatifs liés à sa production, sa distribution ou son utilisation comme carburant des piles à combustibles. Par rapport aux technologies industrielles de séparation existantes, l'utilisation de dispositifs membranaires est particulièrement recherchée, notamment pour le gain attendu en terme d'efficacité énergétique mais les performances en termes de perméabilité et de sélectivité restent aujourd'hui limitées. Le graphène mono-couche apparaît comme un matériau membranaire idéal : son épaisseur ultime mono-atomique couplée à son imperméabilité devrait permettre de réaliser des dispositifs de filtration aux performances inégalées. La réalisation expérimentale de tels dispositifs nécessiterait dans un premier temps de savoir suspendre sur un substrat percé à fort taux d'ouverture une mono-couche de graphène étanche aux molécules de H₂, c'est-à-dire une couche de graphène dite « intacte », sans trous, fissures ou déchirures de dimensions supérieures au nanomètre. Dans un second temps, il s'agirait de pouvoir contrôler la génération de pores sub-nanométriques en densité suffisante dans le graphène suspendu, tout en conservant l'intégrité du matériau en dehors de ces zones

poreuses. Ces 2 aspects constituent des verrous technologiques particulièrement difficiles à lever liés au caractère fragile du graphène mono-couche. Les démonstrations expérimentales à base de graphène mono-couche restent aujourd'hui anecdotiques, aux performances améliorables, et les procédés de fabrication proposés ne sont pas compatibles avec une fabrication collective en grande surface.

Le projet GOLF devait initialement s'attaquer aux 2 challenges technologiques précédemment mentionnés. Il s'agissait de montrer la faisabilité d'un procédé de fabrication en rupture d'un dispositif de filtration de H₂ à base de graphène mono-couche, élaboré par CVD (« Chemical Vapor Deposition »), suspendu sur un substrat de silicium (Si) percé, sans recourir à l'étape classique de transfert du graphène. En effet, afin d'adresser une future fabrication industrielle, le procédé à développer se devait d'être de plus compatible avec la fabrication collective de plusieurs dispositifs en parallèle à l'échelle de la tranche de silicium, en utilisant des technologies classiquement utilisées dans l'industrie de la micro-électronique sur Si.

Description de l'état d'avancement du projet

Le projet GOLF s'est déroulé au sein du CEA-LITEN/DTNM, en collaboration avec les équipes de la plateforme technologique amont du CEA (PTA) en utilisant certains de leurs équipements. Au final, le travail s'est focalisé uniquement sur le 1er verrou technologique : la fabrication d'une brique de base technologique étanche aux molécules de H₂, à base d'une mono-couche de

graphène suspendue sur un substrat de Si percé.

Optimisation de la croissance de graphène en grande surface.

Le projet a tiré parti d'un procédé d'élaboration de graphène mono-couche par CVD, maîtrisé en début de projet au CEA-LITEN / DTNM sur substrats de Si massifs de petites dimensions (quelques cm²), dans un réacteur industriel conçu pour pouvoir traiter des wafers jusqu'à 200 mm de diamètre. La croissance était réalisée à 800 °C, à partir d'un mélange gazeux précurseur constitué de méthane (CH₄) et de H₂, à la surface d'un film catalytique de platine (Pt) de 200 nm d'épaisseur déposé par évaporation e-beam.

Dans le cadre du projet, la croissance a été optimisée à l'échelle de tranches de 100 mm de diamètre. Pour pouvoir caractériser le graphène par spectroscopie RAMAN, des échantillons de 1 cm² ont dû être clivés à partir de la tranche initiale puis transférés sur substrats Si recouverts d'une couche d'alumine (Al₂O₃), selon un procédé connu de transfert par voie humide maîtrisé au laboratoire. L'observation des échantillons après transfert par microscopie électronique à balayage (MEB) et les analyses RAMAN (**Figure 1**) ont permis de démontrer la croissance d'un film de graphène mono-couche continu et homogène à l'échelle de la tranche initiale, ponctués localement d'îlots de graphène multi-couches. Le taux de défauts du matériau perfectible (rapport Raman D/G à réduire) pouvait être en partie potentiellement induit par l'étape de transfert susceptible d'endommager le matériau après croissance.

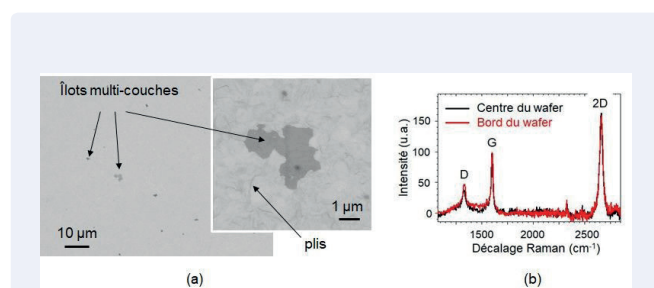


Figure 1 : Observations MEB et spectres RAMAN à 633 nm de graphène supporté, transféré sur substrats Si/Al₂O₃ après croissance sur un wafer de Si massif de 100 mm de diamètre.

Fabrication de la brique de base technologique à base de graphène suspendu

La brique de base technologique développée qui présente une architecture très innovante, ainsi que le procédé de fabrication en rupture sans transfert du graphène fait l'objet d'une procédure de dépôt de brevet. L'idée consistait à réaliser la croissance du graphène in-situ par CVD, en adaptant et améliorant le procédé existant, après le dépôt de la couche cataly-

tique de Pt sur un substrat de Si percé de micro-trous, fabriqué dans le cadre du projet. Il s'agissait ensuite de suspendre le graphène dans les zones à l'aplomb des micro-trous. Toutes les étapes technologiques ainsi que les équipements qui ont été mis en œuvre sont communément utilisées dans l'industrie de la micro-électronique : gravures plasma de Si, dépôts par CVD et évaporation e-beam, gravures chimiques...

En définitive, comme en témoigne les images MEB et les spectres RAMAN associés (Figure 2), la suspension d'une mono-couche de graphène continue et intacte (sans trous, fissures ou déchirures visibles), de qualité cristalline hautement améliorée (pic Raman D lié aux défauts négligeable), a pu être démontrée avec succès au-dessus d'ouvertures circulaires de 3 µm de diamètre. La validation de la faisabilité de l'ensemble des étapes du procédé de fabrication porte la technologie évaluée au stade de preuve de concept (TRL3). Pour un réseau de trous de 3 µm de diamètre, régulièrement répartis au pas de 13 µm sur une zone circulaire de 1 mm de diamètre, les meilleurs résultats préliminaires de suspension prometteurs laissent néanmoins encore 12 % de micro-trous ouverts, ce qui laisse l'opportunité de travailler sur l'étanchéité du système de filtration.

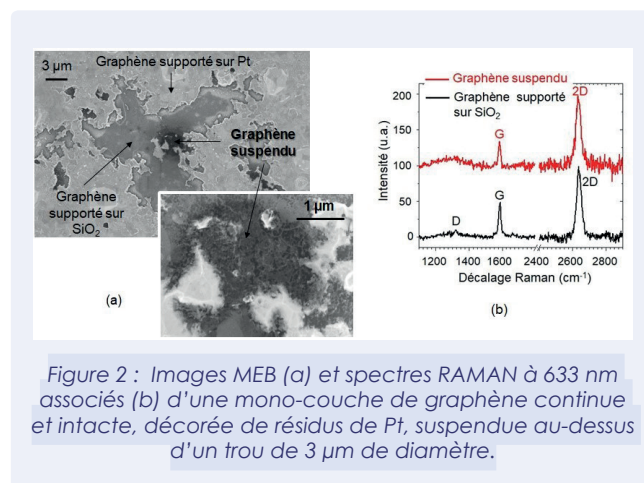


Figure 2 : Images MEB (a) et spectres RAMAN à 633 nm associés (b) d'une mono-couche de graphène continue et intacte, décorée de résidus de Pt, suspendue au-dessus d'un trou de 3 µm de diamètre.

Bilan de valorisation

Brevets

- Procédure de dépôt de brevet en cours : brevet CEA / Grenoble INP, H. Le Poche, A. Fournier, S. Litaudon « Procédé de fabrication collectif de membranes de graphène suspendues sans transfert » (2020).

PERSPECTIVES

Suite du projet

Les travaux décrits constituent une avancée majeure vers une fabrication industrielle de dispositifs à base de graphène mono-couche suspendu. Outre l'application visée, la brique de base technologique développée, qui devra être étanche, pourrait aussi entrer dans la fabri-

cation de dispositifs de filtration pour des molécules ou ions de tailles variées en milieu gazeux ou liquide : par exemple, pour la purification de l'eau, le séquençage de l'ADN... Elle pourrait aussi servir à la réalisation de capteurs de pression. De façon moins contraignante, sans être nécessairement étanche, la brique pourrait aussi entrer dans la fabrication de capteurs chimiques, biologiques ou de MEMS (« Micro Electro Mechanical Systems »).

Dans le cadre de la filtration de H₂, l'étape finale de suspension du procédé de fabrication de la brique technologique doit être optimisée et fiabilisée. La génération contrôlée de pores sub-nanométriques dans le graphène fera l'objet d'une étude par approches plasma au travers d'un travail collaboratif mené avec le CEA-IRIG et le CNRS-LTM dans le cadre d'une thèse financée par le CEA.

Actions de valorisations à venir

- Conférence internationale Graphene 2020, 19-22 Oct. 20, Grenoble (France).
- Publication envisagée dans Nanotechnology.

ELEGAN

DÉVELOPPEMENT DES ELEMENTS PASSIFS POUR CONVERTISSEURS GAN

Laboratoires impliqués :

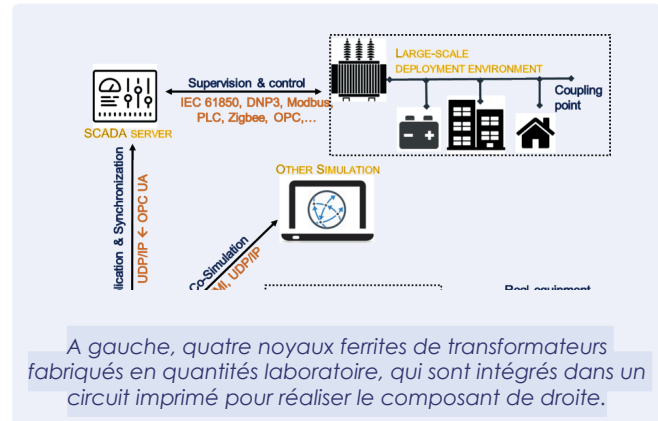
- CEA-Liten/DTNM/SA3D/LMCM et Leti/DACLE/LGECA

Auteurs :

- M. BOHNKE
- U. SOUPREMANIEN
- C. DELAFOSSE
- G. DELETTE
- S. PHILIPPE

L'ESSENTIEL

Le projet ELEGAN a permis de fiabiliser le procédé de moulage par injection de poudre (PIM) pour la fabrication de noyaux de transformateurs planaires. Un modèle magnéto thermique a également été établi et validé afin de prédire les niveaux de pertes fer et cuivre, et les échauffements à la surface de ces noyaux.



BILAN

Rappel du contexte et des objectifs du projet

L'objectif du projet ELEGAN est de contribuer au développement des technologies permettant de réaliser les composants passifs répondant aux nouveaux besoins d'intégration de l'électronique de puissance. Il répond à la volonté industrielle de proposer des alimentations universelles et adaptatives des équipements électroniques, fonctionnant jusqu'à 100 W par le protocole USB-Power Delivery. Un chargeur unique pourra reconnaître l'appareil à alimenter, et adapter sa charge. Cette alimentation doit être de faible volume de façon à pouvoir être intégrée dans des prises murales 220 V traditionnelles et doit proposer un fort rendement (typiquement 98 % à 100 W). Le gain d'énergie unitaire est à multiplier par le nombre de chargeurs utilisés pour l'électronique grand public.

L'amélioration de la densité de puissance et du rendement des convertisseurs passe par le travail sur les éléments actifs (passage au GaN au lieu du Silicium) et sur les éléments passifs comme les inductances, les transformateurs. En effet, dans ces chargeurs, les composants passifs occupent plus de 40 % du volume total.

Ce dernier volet est abordé par différents aspects sur l'origine des pertes magnétiques des matériaux magnétiques, l'optimisation des géométries à travers les dimensionnements et modélisations électriques, magnétiques et thermiques, l'intégration de composants ou son architecture.

Le projet Carnot MATGAN 2 avait comme objectif la mise en forme d'un matériau faible perte, et sa mise en forme dans un circuit imprimé ultra plat. Ce circuit a été testé, et il a été montré qu'il dissipait [1]. Par la suite, ELEGAN avait pour objectif d'établir un modèle rendant compte des températures observée sur le composant,

et de réaliser des prototypes fiables en travaillant sur la robustesse du procédé de moulage par injection de poudre (PIM).

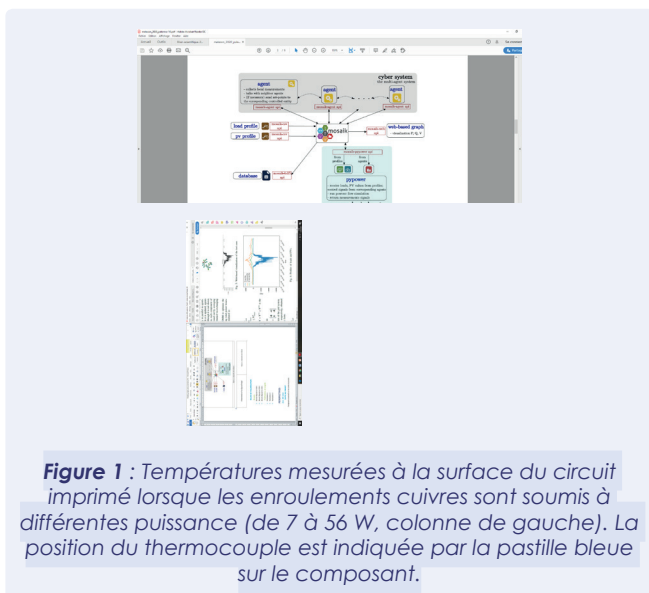
[1] BOHNKE Marc, DELETTE Gérard, DE CARVALHO Hamilton, PERICHON Pierre, BERGOGNE Dominique, RADO Cyril, DELAFOSSE Céline. Prototyping and testing embedded transformer for 100 W 1 MHz GaN converter

Description de l'état d'avancement du projet

Modélisations des composants magnétiques intégrés

Sur ce volet, le laboratoire a travaillé sur un modèle magnéto-thermique à partir des résultats des essais électriques du transformateur planaire présenté sur la **figure 1** ci-dessous, et a optimisé la géométrie grâce aux outils de simulation mis en place.

Lors des caractérisations, nous avons montré que le transformateur chauffait. Le tableau de la **Figure 1** ci-dessous donne les températures mesurées à la surface du composant. Nous mesurons près de 160 °C à 56 W. Afin d'utiliser une nuance de ferrite plus adaptée, et d'améliorer les enroulements, nous avons cherché à anticiper ces résultats par calculs. Le modèle repose sur deux choses : la simulation thermique, qui permet d'évaluer les pertes magnétiques grâce à la formule de Steinmetz, et le modèle magnétique qui tient compte des effets de peau et de proximité entre les conducteurs à la fréquence d'utilisation de 1 MHz (fréquence typique dans le convertisseur GaN).



Le modèle thermique qui a été établi rend compte des températures observées ; il donne de très bons résultats pour les faibles puissances. En outre, à 56 W, la température simulée est de 118 °C, soit environ 40 °C de moins que la mesure car notre modèle de pertes ne tient pas compte de la dépendance des pertes avec la température, celles-ci augmentant au fur et à mesure que le composant chauffe. Le modèle est maintenant une brique disponible qui nous aide pour la conception de prototypes répondant au cahier de charges des end-user (Leti) ; il nous permet de définir les niveaux de pertes attendus sur d'autres géométries. Sur le nouveau design de transformateur faisant l'objet d'un brevet, elles sont estimées à environ 2 %, les pertes fer étant majoritaires (1,7 %).

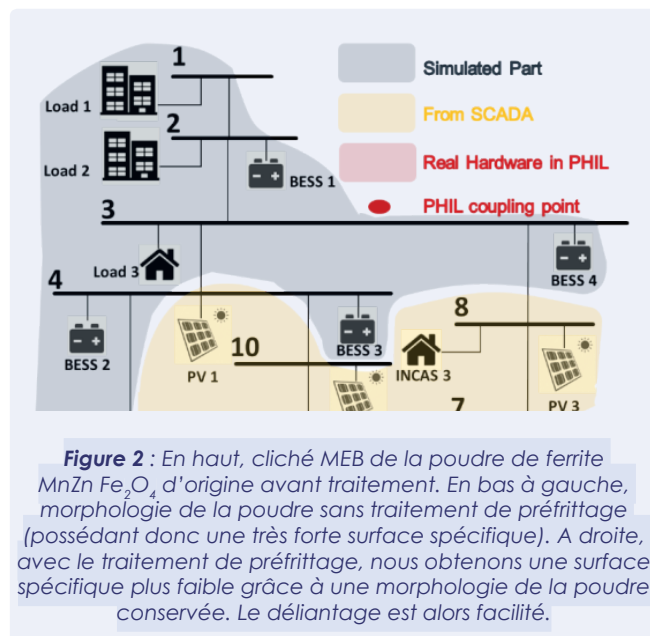
Poursuite des développements d'un composant PIM

L'objectif de ce travail était de fiabiliser le procédé de moulage par injection de poudre (PIM) des mélanges ferrites $MnZnFe_2O_4$ et polymères (appelés feedstocks), car celui-ci conduisait à une variabilité des masses des pièces injectées de plus de 10 %. Nous expliquons ces défauts par une hétérogénéité de répartition des charges dans ces pièces. Par suite, la différence de concentration en charges conduit à des retraits différentiels, et donc à des fissurations lors de l'étape de frittage. Il était donc important de mener un travail de compréhension de ces phénomènes.

La caractérisation des poudres et du feedstock, et un suivi des masses des pièces en fonction des temps de mélange, nous ont permis de réduire la variabilité des masses des pièces à un niveau acceptable de 1,3 %.

La caractérisation des matériaux ferrites $MnZnFe_2O_4$ nous a permis également de comprendre l'impact d'un mélange sur la morphologie des agrégats, et de définir un protocole de préfrittage des poudres plus approprié pour le PIM. Les clichés MEB de la **Figure 2** ci-contre illustrent les résultats obtenus.

Ce traitement de frittage partiel et préalable au mélange avec les polymères permet de conserver une faible surface spécifique de grains, réduisant la quantité de polymère nécessaire à un bon écoulement, et améliorant le procédé de déliantage (car il y a alors moins de polymère à éliminer).



Bilan de valorisation

Brevets

- Brevet déposé le 19/01/2020, sous la demande CEA n° DD19713, « dispositif électromagnétique de conversion d'énergie », Marc BOHNKE, Léana CIOBANU, Gérard DELETTE, Ulrich SOUPREMANIEN.

Publications et congrès

- Un projet de publication est en cours : « Process Analysis for fabrication of passive components by Powder Injection Molding », Marc BOHNKE, Ulrich SOUPREMANIEN, Myriam DALMASSO, Stéphane GENEVRIER.

PERSPECTIVES

Le projet ELEGAN a contribué à envisager un possible transfert industriel de notre ligne pilote PIM vers un industriel. Après des échanges de pièces en été 2019, les discussions sont en cours avec celui-ci.

La suite des développements des composants à proprement parler concerne l'aspect prototypage avec plusieurs jalons. L'un d'eux consiste à modifier le noyau magnétique pour satisfaire à des valeurs d'inductances séries demandées par le LETI. Pour atteindre cet objectif, nous travaillons dans le cadre d'un stage sur la formulation des feedstocks et le procédé d'injection (surmoulage). En parallèle, le projet MAGETS12 piloté par le LETI/DACLE et sur lequel le LMCM est impliqué, consiste à tester des noyaux du commerce pour mieux nous positionner et mieux cibler nos développements futurs.

HPC-PROOF

PREUVE DE CONCEPT D'UNE
HYDROLIENNE À PAS CONTRÔLÉ

Laboratoires impliqués :

- LEGI
- G2ELAB

Auteur :

- T. MAITRE

L'ESSENTIEL

Essai de l'hydrolienne sur un dispositif de test simulant un courant d'eau.

Les rendements trouvés figurent dans la fourchette haute des rendements des machines visant les mêmes applications (canaux, rivières et fleuves).

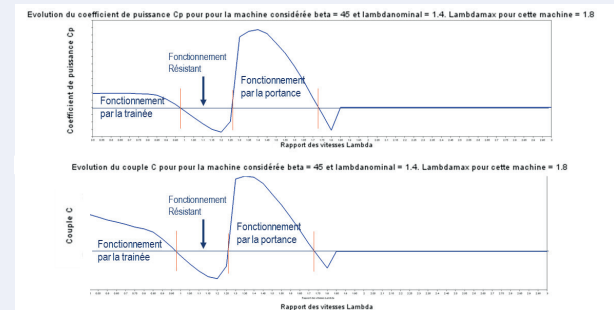


Figure 1 : Étude des efforts au démarrage de la machine

BILAN

Rappel du contexte et des objectifs du projet

Le présent projet vise à faire la preuve de concept d'une **hydrolienne de rivière à flux transverse** car il apparaît que ces machines sont intéressantes lorsque l'on désire optimiser l'exploitation de la veine de courant, soit par l'utilisation au sein d'une même machine de plusieurs rotors sur un même arbre de rotation soit pour juxtaposer des machines élémentaires pour en faire une plus grosse, soit pour les habiller avec des carénages plus simples à réaliser que dans le cas axial. L'idée consiste à s'affranchir du rotor Darrieus classique (flux transverse), qui génère des charges cycliques et présente un rendement plus faible que le rotor axial, pour le remplacer par un système de pales en translation suivant un parcours triangulaire. Les avantages potentiels de ce concept sont les suivants :

- Une machine plus simple car sans moyeu, la rotation se situe en périphérie ;
- Une transmission par chaîne en périphérie de machine qui entraîne les poulies à vitesse de rotation élevée non décroissante avec la taille de la machine (cas des turbines axiales et transverses standards) ;
- Les parcours rectilignes permettent un fonctionnement stationnaire des pales à leur meilleure finesse (rendement potentiellement identique au flux axial) ;

- Moins de fluctuations d'effort sur les pales (moins de fatigue) ;
- Une puissance délivrée plus continue.

Description de l'état d'avancement du projet

Suite aux études effectuées, l'hydrolienne a été construite au LEGI à l'automne 2019. Les essais sur la plaque Coriolis ont été faits en 2 temps. D'abord avec un angle de pales correspondant à une machine dite « rapide » mais la difficulté au démarrage nous a fait abandonner cette option. Nous avons donc adopté un angle de pales conduisant à une machine dite « lente ». Cela a résolu le problème de démarrage. Nous avons réalisé des collines de performances avec une vitesse de courant $V_0 = 1$ m/s (vitesse périphérique de la plaque Coriolis) en variant la vitesse U de déplacement des pales contrôlée par la génératrice. On a ainsi déterminé expérimentalement le meilleur ratio U/V_0 . Ceci a été fait pour trois variantes de fonctionnement de l'hydrolienne :

- Parcours supérieur (horizontal) des pales émergées
- Parcours supérieur (horizontal) des pales immergées
- Parcours supérieur (horizontal) des pales immergées avec un déflecteur amont

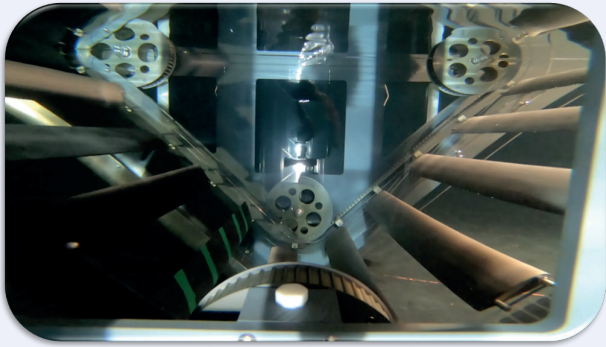


Figure 1 : vue de côté - pales en fonctionnement

Bilan de valorisation

Brevets

- Brevet déposé en 2018 : Thierry Maître, Kenny Bernard, Hugues Filiputti. Centrale hydroélectrique - N° et date de dépôt : PCT/FR2018051767 - 2018-07-12
- Brevet déposé en 2017 : Thierry Maître, Kenny Bernard, Hugues Filiputti. Centrale hydroélectrique - N° et date de dépôt : FR1756637 - 2017-07-12
- Brevet déposé en 2017 : Hugues Filiputti, Jean-Marc Cannia, Thierry Maitre. Turbine - N° et date de dépôt : FR1756638 - 2017-07-12

PERSPECTIVES

Suite du projet

Le LEGI travaille sur une évolution de cette hydrolienne afin de pouvoir l'équiper d'un carénage.

Actions de valorisation à venir

Construction de projets en cours pour réaliser et tester cette version carénée de l'hydrolienne.

Projets de ressourcement en cours (2019-2020)

Les **26 actions de ressourcement** réparties dans les 5 axes stratégiques sont :

Sources d'énergies (1 projet)

- Nouveaux matériaux pour cellules photovoltaïques (cellules Tandem Silicium) et vise à augmenter les rendements de conversion.

Vecteurs d'énergies (9 projets)

- Refroidissement des batteries par matériau diphasique.
- Développement de nouveaux matériaux de batteries par calcul haut débit.
- Développement des composites pour le stockage thermique en collaboration avec l'institut Carnot MICA.
- Développement de la récupération d'énergie par des générateurs d'énergie qui convertissent l'énergie mécanique ambiante en électricité.
- Développement
- Valorisation énergétique des bioressources. Le premier sur l'équilibre thermodynamique pour adapter les mélanges aux procédés, le second sur le concept de valorisation énergétique de matière organique.
- Développement du stockage de l'hydrogène dans des molécules organiques.
- Réalisation de piles à combustible innovantes, bas coût et hautes performances.
- Développement des composants passifs innovants pour la conversion très haute fréquence.

Usages (3 projets)

- Gestion multivecteurs de la demande dans une approche par co-simulation.
- Optimisation des ressources et consommation des « bâtiments intelligents » pour améliorer l'efficacité énergétique.
- Valorisation des sources thermiques à l'échelle du territoire pour produire de l'hydrogène.

Réseaux (3 projets)

- Développement des capteurs associés compatibles avec des systèmes de récupération d'énergie sur substrat souple.
- Analyse les retards dans les « smartgrids » interopérables.
- Développement d'une analyse physique

innovante des réseaux intelligents.

Technologies transverses (10 projets)

- Étude de pulsations hydrauliques et d'amélioration du diagnostic de stabilité.
- Réalisation des matériaux par techniques d'impressions 3D pour des applications d'échangeurs de chaleur et connecteurs avec des poudres fonctionnalisées ou des mélanges de poudres polymères.
- Amélioration des cellules solaires par remplacement d'éléments.
- Développement de la modélisation des processus de génération de silicium cristallin.
- Recherche de nouveaux matériaux pour l'énergie par criblage haut débit de leurs propriétés intrinsèques (big data) et sur la composition d'alliages multi-caloriques.
- Développement des aimants frittés anisotropes.
- Étude des matériaux de composants hybrides pour l'électronique de puissance.
- Développement des compétences technologiques en couches minces de matériaux pour l'énergie.
- Étude de l'écoconception en électronique de puissance multicellulaire.
- Observation et étude fine de la matière dans le domaine de matériaux utilisés en photovoltaïque et stockage par couplage de techniques d'analyse et traitement des données associées.

Projets de ressourcement en cours (2019-2020)

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

Sources d'énergies (1 projet)

- Un projet a pour objectif de développer des architectures de modules innovantes à base de cellules micrométriques et flexibles.

Usages (3 projets)

- Le premier projet traite de la modélisation dynamique des bâtiments et de leurs systèmes thermiques pour leur connexion et interopérabilité avec les réseaux de chaleur.
- Le second porte sur le développement de nouveaux composants constructifs à faible impact carbone.
- Le troisième projet porte sur l'étude d'un modèle collectif et solidaire de gestion de l'énergie solaire au niveau des logements et territoires.

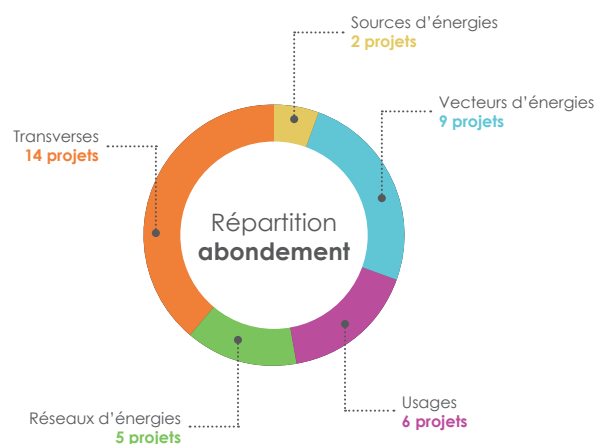
Réseaux (2 projets)

- Un projet porte sur les travaux de modélisation et de simulation des modèles énergétiques à l'échelle d'un territoire.
- Le second projet vise à réaliser un convertisseur « cluster » multidirectionnel et communiquant, permettant d'interconnecter des réseaux DC, AC, du stockage et de la production.

Transverses (4 projets)

- Une première action vise à renforcer des moyens de caractérisation pour des matériaux d'intérêts utilisés dans des composants allégés.
- Un second projet, cherche à réaliser une preuve de concept de la conversion photo électrochimique pour produire du biocarburant.
- Un autre projet porte sur le développement, l'évaluation et l'intégration des capteurs imprimés dans des batteries Li-ion.
- Un projet vise à développer une stabilisation par champ magnétique des bains fondus en fabrication additive.

Pour ce qui se rapporte à l'**intégration du dispositif Carnot**, les actions identifiées sont d'une part la participation au budget de l'association des instituts Carnot et l'animation et la gestion du dispositif.





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

04 76 82 62 93

contact@energiesdufutur.fr • www.energiesdufutur.fr



@CarnotEF



Institut Carnot Énergies du futur

