

# SEER

## Systèmes Énergétiques et Énergies Renouvelables

### L'avenir du PV

Cellules tandem  
et matériaux biosourcés

### Agrivoltaïsme

Comment concilier  
environnement et énergie

### Blackout

Un risque énergétique  
grandissant



© Cyril FRESILLON - IPVF - CNRS Images



## Frédéric Ravel

*Directeur scientifique du secteur  
Energie, développement durable,  
chimie et procédés au Ministère  
chargé de l'Enseignement  
supérieur et de la Recherche*

# EDITORIAL

Le cadre général des enjeux de la recherche dans le domaine de l'énergie est la perspective de la transition vers la neutralité carbone, visée par la France en 2050 et inscrite dans la loi Energie Climat du 8 novembre 2019. Le mix énergétique français présente la particularité d'avoir une intensité carbone de la production électrique de 21,3 g équivalent CO<sub>2</sub> par kWh, l'une des plus faibles au monde. Ce résultat dû à des sources d'énergie diversifiées et bas-carbone (nucléaire, hydraulique et renouvelables, ces dernières représentant 28% de la production en 2024) ne doit pas faire oublier plusieurs points.

Le premier est le rôle toujours nécessaire de la recherche : l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) a clairement montré que, pour atteindre la neutralité carbone en 2050, la recherche et l'innovation ont un rôle très important à jouer dès aujourd'hui. Selon l'AIE, les technologies actuellement disponibles sur le marché peuvent permettre la réduction des émissions visée pour 2030. Par contre, le 50 % des réductions d'émissions nécessaires pour mettre le monde sur la trajectoire à 2050, dépendent de technologies qui sont au stade de la preuve de concept en laboratoire, de prototype ou de démonstrateur, et ne sont pas encore disponibles sur le marché. C'est là toute la raison et la nécessité d'être d'un PEPR tel que TASE.

Le deuxième point est, qu'au-delà des sujets classiques de recherche lorsqu'on parle de production d'énergie tels que l'augmentation du rendement d'une cellule photovoltaïque ou de la durée de vie

d'une éolienne *offshore*, le bilan présenté par le PEPR TASE montre que ses acteurs ont su s'emparer de nouvelles problématiques. Possédant la maîtrise des briques de base, la recherche doit désormais éclairer une vision systémique incontournable à l'échelle de notre pays. Regarder l'interaction avec de nouveaux usages comme l'agrivoltaïsme, travailler sur la prévision énergétique au sens large en dépassant le seul constat d'énergies non programmables, en s'appuyant sur des études liées à la flexibilité, introduire la notion d'impact environnemental au-delà du seul bilan carbone que ce soit pour les matières premières, la conception ou pour la recyclabilité, et enfin enjeu majeur pour un territoire ou un pays, contribuer par les résultats de la recherche à la résilience des réseaux énergétiques, rendus plus complexes par la diversification des sources, des vecteurs et des échelles. Voilà les sujets que vous découvrirez en lisant cette revue du PEPR TASE.

Dernier point que je voudrais souligner, un PEPR, celui-ci comme la cinquantaine d'autres que France 2030 a su judicieusement mettre en place, c'est avant tout une aventure de recherche au service de la société, une aventure qui réunit de nombreux laboratoires sur notre territoire, et qui repose sur des femmes et des hommes au service de la Science, que je voudrais ici saluer. Ce bilan montre leur engagement, leur diversité et leur jeunesse, le meilleur gage de compétences toujours renouvelées au service de la transition énergétique, enjeu majeur pour notre pays.

# CATALYSER L'INNOVATION POUR RELEVER LES DÉFIS DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Par Philippe Azais (CEA), Jean-François Guillemoles (IPVF, CNRS) et Nicolas Retière (UGA),  
co-directeurs du PEPR TASE "Systèmes énergétiques et énergies renouvelables"

À l'heure où la dépendance énergétique constitue un facteur de vulnérabilité, investir dans la recherche permet de reconquérir une autonomie technologique et d'anticiper les ruptures à venir. Conçus pour structurer la recherche dans des filières scientifiques et technologiques d'avenir, les PEPR offrent un cadre inédit pour accélérer vers l'innovation, mutualiser les compétences et aligner les efforts de recherche sur les grandes priorités nationales. Au-delà des financements significatifs que le PEPR TASE mobilise, c'est sa capacité à articuler recherche fondamentale et finalités industrielles qu'il illustre. Cette articulation permet de répondre à deux impératifs : garantir l'excellence scientifique de la France et assurer la compétitivité de ses filières stratégiques sur les systèmes énergétiques en transformation.

En mai 2023, Sylvie Retailleau, Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, lançait le PEPR TASE à Grenoble en présence de nombreuses personnalités. L'année qui a suivi a été déterminante pour le PEPR. Elle a permis de finaliser et de lancer l'ensemble des 15 projets de recherche qui constituent le programme. La diversité thématique du PEPR TASE en fait sa richesse. Elle ouvre à l'interdisciplinarité, indispensable face à la complexité des enjeux énergétiques. Ce numéro en est l'illustration et offre des points de vue qui marient approche

systemique, et dimensions technologiques, économiques, environnementales et sociales.

Deux ans après son lancement, le PEPR implique près de 90 laboratoires de recherche académiques issus de l'ensemble des grands organismes et universités concernées par l'énergie en France. Si le PEPR TASE se veut le premier maillon de la chaîne de la stratégie nationale d'accélération, il est aussi une opportunité unique de formation par la recherche et de préparer l'avenir par l'acquisition de compétences : au total le réseau du PEPR compte une centaine de jeunes chercheurs et chercheuses en thèse ou post-doctorat qui seront formés à l'horizon 2028 (voir pages 37 et 42).

Le PEPR s'est aussi doté d'outils de gouvernance et d'action, que ce soit en interne (comité de programme, dont nous remercions les membres pour leur contributions) ou en externe, vers les institutions parties prenantes, organismes de recherche et Universités, ou vers les entreprises et organismes de valorisation.

Pour les 15 projets scientifiques qui composent le PEPR « Systèmes énergétiques et énergies renouvelables », 2024 est l'année des premiers résultats avec près d'une vingtaine de publications scientifiques et d'articles de conférence signés par les membres du collectif et de nom-

breux autres en cours de soumission. On note également des effets structurants avec des financements acquis ou demandés pour compléter certains volets (en particulier des ERC) ainsi que le développement de collaborations avec des entreprises.

La communication a également été développée au sein du programme, avec le lancement du site internet ([www.pepr-tase.fr](http://www.pepr-tase.fr)) et un réseau LinkedIn début septembre. Ils permettent de retrouver une présentation destinée au grand-public des thématiques de recherche des différents projets, de leurs structures et objectifs, ainsi que ce magazine que vous tenez entre vos mains.

Ce premier numéro de SEER met en lumière les avancées récentes portées par le PEPR dans le domaine des systèmes énergétiques (voir pages 14 et

21), explorer leurs perspectives dans un contexte mondial fragile (voir pages 11, 34 et 40), et interroger leur capacité à transformer les résultats de la recherche en solutions concrètes (voir pages 7 et 18). Le dossier met l'accent sur l'absolue nécessité d'un système plus flexible et les solutions socio-techniques possibles (voir page 24) et la très grande actualité des sujets traités.

Face à l'urgence climatique, il ne s'agit plus seulement de chercher mais d'éclairer les chemins qui mènent à l'innovation. Il s'agira, dans les prochains mois d'accélérer le dialogue entre chercheurs, décideurs et industriels, afin de co-construire les trajectoires énergétiques de demain. Le PEPR TASE constitue une réponse structurante à cette exigence. Il n'est pas une fin en soi, mais un levier. À nous de le saisir pleinement.

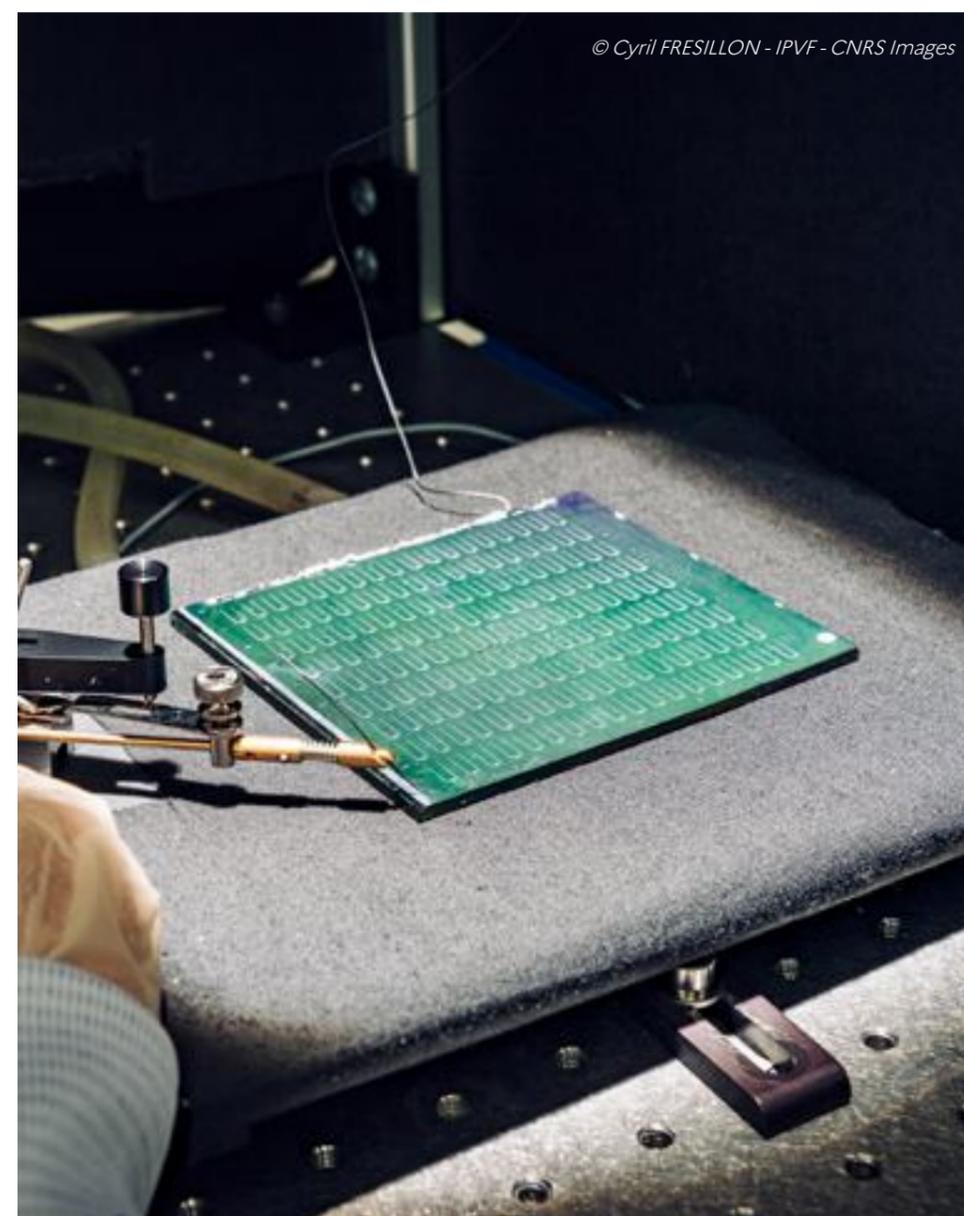


De gauche à droite : Jean-François Guillemoles, Philippe Azais et Nicolas Retière, co-directeurs du PEPR TASE, lors des journées annuelles du programme, les 9 et 10 juillet 2024 à l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Paris.

# SOMMAIRE

- 7 **L'avenir du PV : cellules tandem et matériaux biosourcés**  
Projets BioFlexPV et IOTA, Heliup
- 11 **Argent et indium, matériaux critiques cibles du photovoltaïque**  
Projet SOLSTICE
- 14 **Études multi-échelle pour un photovoltaïque durable**  
Projets MINOTAURE et HyMES
- 18 **L'apprentissage par renforcement**  
Projet AI-NRGY
- 21 **Agrivoltaïsme, concilier environnement et énergie**  
Projets Smart4Module et AgriPV-ER
- 24 **Dossier : La flexibilité énergétique**  
Projets FlexTASE, Flex-Mediation et Fine4Cast, PEPR SPLEEN
- 34 **Black-out, un risque énergétique grandissant**  
Projet PowDev
- 37 **Des réseaux électriques plus résilients et plus intelligents**  
Projet TASTING
- 40 **Quand l'ACV éclaire la transition énergétique**  
Projet LCA-TASE
- 42 **Portrait de chercheuse, la nouvelle génération du génie électrique**  
Projet DC-Architect

## L'AVENIR DU PV CELLULES TANDEM ET MATÉRIAUX BIOSOURCÉS



Conception de cellules photovoltaïques en CIGS (matériau à base de cuivre, d'indium, de gallium, de sélénium et de soufre) sous un simulateur solaire.

La production de masse de panneaux photovoltaïques (PV) engendre un défi environnemental et sociétal lié à la fin de vie des panneaux et aux déchets générés estimés à des millions de tonnes d'ici 2050.

Pour minimiser l'impact environnemental des technologies PV, les efforts devront essentiellement porter sur la réduction du poids des modules, leur démantèlement ainsi que leur éco-conception. Dans cet objectif, le développement de technologies intégrant des matériaux biosourcés est une voie particulièrement prometteuse qui, en plus de l'éco-conception, facilitera les procédés de recyclage.

En parallèle, les recherches visant à augmenter l'efficacité des cellules solaires continuent. L'objectif est de préparer la prochaine génération à haut-rendement, avec comme piste privilégiée la conception de cellules tandem, combinant différents types de matériaux.

## DES MATÉRIAUX DE PROTECTION BIOSOURCÉS...

Par Sylvain Chambon et Marie Gueunier-Farret (IMS Bordeaux), pilote et membre du projet BioFlexPV

Les modules en silicium cristallin (c-Si) représentent 98% du marché photovoltaïque. Cette technologie, mature sur le plan industriel, présente des records d'efficacité de 27,3% en cellule laboratoire et jusqu'à 25,4% en module (*données du NREL*). Très robustes, ces modules présentent une excellente durée de vie au-delà de 25 ans. Cependant, leur fin de vie est un enjeu majeur : comment recycler et valoriser au mieux leurs matériaux d'intérêt (verre, argent, silicium, acier...) ?

Les solutions d'encapsulation actuelles constituent une des plus grandes difficultés dans la récupération des matériaux et le recyclage des panneaux c-Si. En effet, la combinaison de l'EVA (copolymères d'éthylène et d'acétate de vinyle) et du verre, solution d'encapsulation efficace et la plus couramment utilisée, ne permet pas une séparation bien contrôlée des couches pour permettre la valorisation des différents éléments. Par ailleurs, le poids et le budget thermique du verre incitent à trouver des solutions d'encapsulation plus légères et moins coûteuses en énergie.

De nouvelles générations de modules PV ont émergé au fil des années : les technologies couches minces dont fait partie le CIGS (un alliage de cuivre, indium, gallium et sélénium) et, plus récemment, les technologies dites « perovskites » (à base de matériaux perovskites) et « organiques » (à base de semi-conducteurs organiques). En quelques années, ces deux dernières technologies ont montré une progression impressionnante de leurs performances PV avec des records respectifs certifiés de 26,7% et 19,2%.

Elles présentent plusieurs avantages dont la réduction du coût énergétique de fabrication des modules :

- D'une part l'absorbeur est une couche mince d'épaisseur inférieure au micron composée de matériaux abondants ;
- D'autre part, les procédés de fabrication sont des procédés basse température nettement moins complexes à mettre en œuvre que dans l'industrie silicium.

Pour les modules flexibles organiques et perovskites, la solution d'encapsulation couramment utilisée consiste à laminer un film barrière sur le module et à le sceller via différents types de résines encapsulantes. Le film barrière ainsi que le matériau de scellage sont tous deux issus de ressources non-renouvelables et représentent environ 2/3 du poids des modules. Ils sont en effet constitués de matières plastiques à l'origine de problématiques de pollution environnementale. Ainsi, pour le développement de ces nouvelles générations de panneaux PV, la réduction de leur impact sur l'environnement passe par le remplacement de ces films barrières petrosourcés par des solutions renouvelables.

Le projet BioFlexPV vise à amorcer cette transition de la filière photovoltaïque en améliorant la recyclabilité des panneaux et en développant des solutions d'encapsulation pérennes avec une empreinte environnementale réduite. L'objectif principal du projet est donc de développer de nouveaux matériaux d'encapsulation efficaces à partir de matières biosourcées ou abondantes pour minimiser la dépendance des filières PV à des ressources non renouvelables. Le projet rassemble 8 laboratoires répartis sur 5 sites en France. Il regroupe diverses compétences allant de la synthèse des matériaux, qui formeront les briques de base pour la construction des films barrières, à l'intégration de ces

films barrières dans diverses technologies PV (c-Si, organique, perovskite et CIGS). Les films d'encapsulation fabriqués dans le cadre du projet combineront des polymères issus de la biomasse, des couches denses inorganiques issues de ressources abondantes et devront présenter des propriétés barrières aux gaz élevées. Le projet intègre également des analyses de cycle de

vie des matériaux et des dispositifs, ainsi qu'une étude de démontabilité des panneaux.

En combinant ces différentes approches, le projet BioFlexPV ambitionne de développer des stratégies d'encapsulation à faible impact environnemental qui pourront être appliquées aux futures générations de modules PV.

## ... AUX CELLULES TANDEM À HAUT RENDEMENT

Par Stéphane Collin (IPVF), pilote du projet IOTA

L'efficacité des cellules solaires en silicium continue de progresser régulièrement et se rapproche du maximum théorique de 29,4 %. L'enjeu aujourd'hui est de préparer la prochaine génération de cellules solaires dont l'efficacité dépasserait les 30 %. L'approche privilégiée par la communauté scientifique repose sur une architecture tandem formée de deux cellules solaires juxtaposées. La cellule inférieure peut être en silicium, utilisée alors pour convertir uniquement la partie infrarouge du spectre solaire. La cellule supérieure doit être constituée d'un semi-conducteur à grande bande interdite, plus efficace pour convertir la partie visible de la lumière solaire, et transparente dans l'infrarouge. Il existe plusieurs matériaux, déposés en couches minces, qui peuvent jouer ce rôle.

Les combinaisons formées de perovskites hybrides sur silicium sont les plus étudiées actuellement : elles ont fait des progrès très impressionnants au cours de 15 dernières années, avec des efficacités qui ont maintenant dépassé 34 %. Néanmoins, elles ne parviennent pas encore à concilier faible coût, haut rendement et grande durée de vie. D'autres technologies de films minces, comme le CIGS (un alliage de cuivre, indium, gallium et sélénium), constituent des alternatives qui ont démontré de très bonnes stabilités et un potentiel industriel, mais avec des efficacités encore faibles lorsqu'elles sont utilisées comme cellu-

le supérieure d'une tandem. Associer perovskites et CIGS est également possible, avec un record récent supérieur à 30 %. Il n'existe donc pas encore de technologie conciliant bas coût, haut rendement, grande durée de vie et un potentiel d'industrialisation à grande échelle. Le point commun des différentes architectures, c'est un empilement complexe de matériaux, et une multiplication des interfaces qui complique le contrôle et l'absorption de la lumière, et la collection du courant.

L'objectif du projet IOTA, qui rassemble 16 laboratoires français, est de développer des solutions innovantes pour faciliter l'émergence et l'industrialisation des cellules tandems. Il s'attaque à plusieurs verrous, qui portent notamment sur le contrôle de la texturation des surfaces, le dépôt de couches adaptées à cette texturation, la recherche de nouveaux matériaux pour former les couches d'interface qui faciliteront le dépôt ou le collage des cellules, et le transport du courant. En s'appuyant sur les expertises variées présentes au sein de ce large consortium, le projet IOTA vise à la fois à développer des briques technologiques transversales adaptées à différentes combinaisons de matériaux (perovskites, silicium, CIGS...), mais aussi à intégrer ces solutions dans des cellules solaires tandem à l'état de l'art pour accélérer leur industrialisation future.

Crée en 2022, l'entreprise Heliup se base sur une technologie développée par le CEA, de panneaux solaires légers adaptés aux toitures sensibles.



© Heliup

## TROIS QUESTIONS À : HELIUP, fabricant de panneaux PV

Réponses de Julien GAUME, CTO et co-fondateur d'HELIUP

**Quelles sont selon vous les recherches prioritaires à mener dans les prochaines années en termes de photovoltaïque ?**

Les recherches sont multiples, mais pour donner quelques exemples, on peut notamment citer la réduction des matériaux critiques (argent, indium, plomb) dans la composition de la cellule. Une autre innovation intéressante serait de passer le cap des 30 % de rendement module avec des architectures tandem Si/perovskite, Si/CIGS ou tout autre rupture technologique à venir. Il est également essentiel de travailler à alléger et décarboner le module, à l'aide de substrats minces ou composites. Avec HELIUP, nous avons réussi à atteindre moins de 5 kg/m<sup>2</sup>, pour rendre le PV accessible aux toitures industrielles à faibles charges. Il faut cependant penser à l'aspect fiabilité et durée de vie, car s'il est relativement simple d'alléger un panneau, la difficulté réside dans la conservation de ses performances sur des durées de vie supérieures à 25-30 ans. Un autre sujet d'importance est l'encapsulation circulaire, tels que les films barrière biosourcés, les adhésifs réversibles ou une démontabilité sélective pour faciliter un recyclage et atteindre 100% de réutilisation. Enfin, avec le développement d'une surveillance et d'une fiabilité accélérées, à travers les jumeaux numériques et l'IA, il sera possible de démontrer en quelques mois des durées de vie supérieures à 30 ans.

**Quelles sont vos attentes sur les travaux de recherches de IOTA et BioFlex-PV en termes de développement des cellules photovoltaïques et de leur encapsulation ?**

Dans le cadre des travaux de IOTA, nous souhaiterions intégrer des cellules tandems sur notre panneau Stykon® sans surpoids et viser 25-27% de rendement module en 2028. Les travaux de BioFlexPV, pourraient quant à eux nous permettre de diviser par deux l'empreinte carbone du module et de garantir une recyclabilité proche de 100 %, tout en conservant une garantie produit de 25 ans.

**Comment les recherches du PEPR pourraient s'intégrer dans vos activités ?**

Nous pourrions travailler au co-développement d'un démonstrateur tandem Stykon léger pour application toiture et réfléchir à la production en série de ces panneaux avec encapsulation biosourcée, ainsi qu'un protocole de démontabilité adapté à leurs spécificités. Grâce à ces synergies, Heliup pourrait viser un rendement module supérieur à 25 % dès 2028. Ajouté à cela les améliorations en termes d'empreinte carbone et de recyclabilité, tout en conservant une signature produit « léger et rapide à poser » déjà validée sur le marché industriel.

# ARGENT ET INDIUM

## MATÉRIAUX CRITIQUES CIBLES DU PHOTOVOLTAÏQUE

L'argent et l'indium sont des éléments constitutifs essentiels pour le fonctionnement des cellules solaires à base de silicium. Cependant leur disponibilité et la pression sur ces ressources en font des métaux critiques. Le projet SOLSTICE propose de réduire drastiquement leur usage à l'aide de matériaux innovants et abondants.

Par Frédéric Jay (CEA) et Jean-Luc Deschanvres (CNRS - Grenoble INP-UGA), pilotes du projet Solstice

La recherche de nouveaux matériaux pour les technologies de cellules solaires photovoltaïques à base de silicium passe par l'interaction entre différents domaines ; les matériaux, les dispositifs photovoltaïques, la caractérisation fine des interfaces, ainsi que l'évaluation des risques liés au ressourcement des matières premières. C'est cette synergie qui anime le projet SOLSTICE autour du remplacement de l'indium et de l'argent.

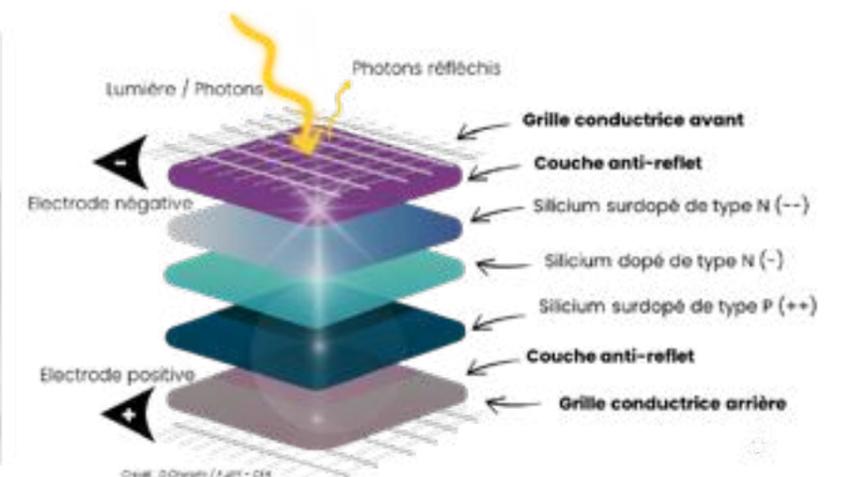
De nos jours, les technologies de cellules solaires qui dominent le marché (>95%) sont à base de silicium et

utilisent de l'argent. Et au cœur des structures de cellule de nouvelle génération à haut rendement on peut également trouver de l'indium. Ces deux éléments apparaissent comme critiques de par leur disponibilité et leur coût.

Bien que ces matériaux ne soient pas intégrés dans la liste des « matières premières critiques » par l'Europe, leur statut pourrait changer avec l'installation de Gigafactory de panneau solaire européennes. Le choix des matériaux de substitution doit donc se faire en faveur de matériaux abondants.

### Structure générique de cellule solaire utilisant de l'argent et de l'indium.

Le premier étant présent dans la grille conductrice et le second, au sein des couches antireflet.





## L'ARGENT UN MATÉRIAU PRÉCIEUX POUR LES CELLULES SOLAIRES

47  
Ag  
Argent  
107,87

Les grilles conductrices des cellules solaires, présentes sur chaque face, sont essentiellement composées d'argent.

- Ces grilles d'argent servent d'électrodes positives et négatives et donc participent à la collecte des charges électriques.
- Elles sont couramment déposées par sérigraphie à l'aide de pâtes d'argent, qui sont ensuite recuites pour supprimer toute trace de solvant et activer leurs propriétés de conduction électrique.
- La forte conductivité de l'argent permet l'utilisation de lignes fines, limitant d'une part l'effet d'ombrage lié à la réflexion de la lumière incidente par les lignes d'argent et d'autre part les pertes résistives dans le dispositif.

A l'heure actuelle, environ 30-35% de la consommation mondiale d'argent est dédiée à la production de panneaux solaires.

Dans le futur, l'augmentation des capacités de production de panneaux solaires nécessitera une division par quinze de la quantité d'argent utilisé dans les dispositifs.

### Plusieurs solutions sont déjà en cours de déploiement ou d'évaluation pour réduire la consommation d'argent:

Le remplacement des pâtes d'argent pur par des pâtes argent-cuivre permet une réduction de l'ordre de 40 à 60% de la quantité d'argent dans les cellules, avec des propriétés légèrement moins conductrices. Les développements portent sur l'amélioration de la conductivité et l'augmentation du ratio de cuivre dans les pâtes. Ce type de matériau permet de maintenir les procédés standards par sérigraphie, tout en gardant des rendements similaires. Cependant, à l'heure actuelle, une légère perte d'efficacité est observée (0,1-0,3%, suivant s'il est utilisé sur une ou deux faces de la cellule).

Le remplacement des grilles d'argent par des grilles de cuivre par méthode d'électrodéposition, nécessite des étapes additionnelles afin de permettre l'adhésion du cuivre sur la surface des cellules et de limiter la diffusion du cuivre dans le silicium. Le cuivre peut représenter une alternative intéressante, étant nettement plus abondant que l'argent (environ 1000 fois supérieur) et son utilisation en tant qu'électrode serait négligeable comparé aux autres applications. Il faut toutefois rester prudent car le cuivre est un matériau clé pour l'électrification de masse des sources d'énergie ; dans le futur le PV se trouvera en compétition avec d'autres technologies pour ce matériau.



## L'INDIUM UN MÉTAL RARE AUX PROPRIÉTÉS MULTIPLES

49  
In  
Indium  
114,82

L'indium est principalement utilisé dans les oxydes transparent conducteur (TCO) aux rôles multiples :

- Anti-réflecteur : il permet de capter une partie plus importante des photons en limitant leur réflexion à la surface des cellules.
- Transparent dans le spectre lumineux ultraviolet, visible et proche infrarouge.
- Transport latéral des charges depuis les couches sélectives des cellules vers les grilles de métallisation.
- Couche contact entre les couches sélectives et les métallisations, donc limite les pertes résistives verticales.
- Protection des couches sous-jacentes de la diffusion de contaminants métalliques (comme le cuivre) et de l'humidité.

Les TCO à base d'indium ont l'avantage de répondre à l'ensemble de ces critères, avec de très bonnes conductivités et des techniques de dépôt à forte cadence, généralement par pulvérisation cathodique.

Son utilisation dans le photovoltaïque correspond à moins de 10% de l'approvisionnement total de l'indium, en concurrence avec l'industrie des écrans plats, LEDs ou encore de la microélectronique et de la soudure. De plus, ce matériau est sujet à de fortes variations du cours du prix de la matière première. Dans les projections d'augmentation des capacités de production des cellules solaires, la quantité d'indium utilisée devra être réduite de 90%, voire complètement supprimée.

### Ces dernières années de nombreuses solutions ont été explorées, notamment :

- Diminution des quantités d'indium utilisées. Dans ce cas, la couche d'ITO est réduite à son rôle électrique de transport latéral/vertical des charges, la partie optique étant assurée par une autre couche. Ces solutions permettent de réduire jusqu'à 70% l'épaisseur des couches contenant de l'indium, mais impose une étape de procédé supplémentaire.
- Remplacement par des matériaux sans indium, tels que des matériaux à base d'oxyde de zinc avec différents dopages ou d'oxyde d'étain. Cependant, ces matériaux ont pour la plupart montré des performances électriques inférieures à celles des TCO à base d'indium et surtout une stabilité moindre sous condition réelle de fonctionnement (humidité), induisant une dégradation des performances à court terme.
- Remplacement des TCO par des couches de contact sous la métallisation avec un remplacement du TCO par un diélectrique pour la partie optique. Ces structures restent tout de même exploratoires avec des étapes de procédé complexes et montrent des performances moindres.

# ÉTUDES MULTI-ÉCHELLE

## POUR UN PHOTOVOLTAÏQUE DURABLE

L'intelligence artificielle est un outil puissant, au coeur des recherches de certains projets du programme. Le projet MINOTAURE associe techniques expérimentales, analyses théoriques et modélisations, assistées par IA, pour améliorer la fiabilité de nouvelles technologies photovoltaïques à haut rendement. Le projet HyMES de son côté tente de concilier la précision des modèles physiques avec la rapidité de calcul du *machine learning*.

Par James Connolly (IPVF) et Jean-Paul Kleider (LGEP), membre et pilote du projet MINOTAURE

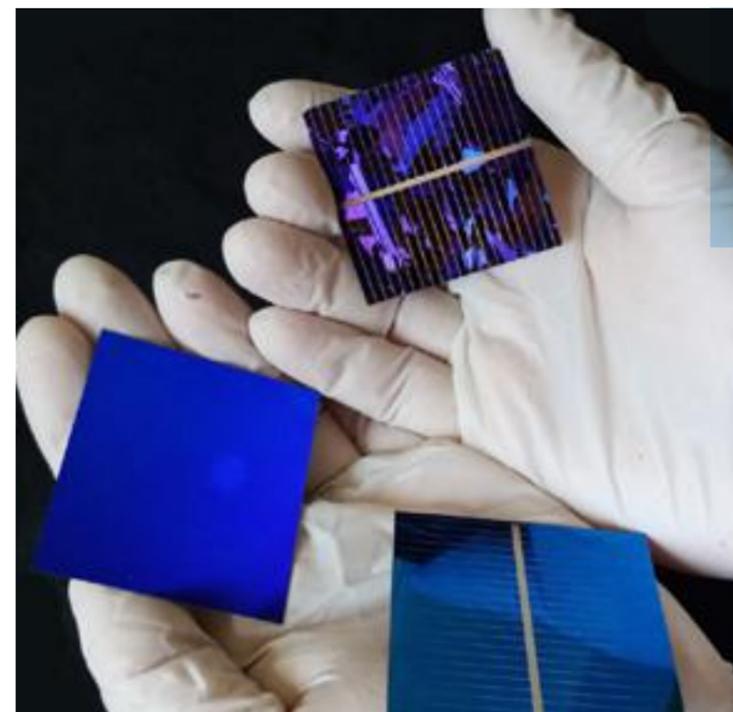
L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est aujourd'hui de plus en plus compétitive à travers le monde. Elle repose principalement sur des cellules utilisant du silicium comme matériau absorbeur de la lumière et convertissant les photons en porteurs de charges (électrons et trous). Des améliorations technologiques ont été apportées au cours des dernières années pour favoriser la collecte de ces porteurs et freiner leur recombinaison, comme par exemple dans les structures à hétéro-jonctions de silicium ou les structures Topcon. Ces améliorations ont permis d'atteindre des rendements de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique de l'ordre de 27 %, et proches de 25% dans des produits industrialisés. Une grande marge d'amélioration existe cependant pour accélérer le remplacement d'énergies non renouvelables dans le contexte de la crise climatique. Pour cela, des améliorations des cellules solaires sont étudiées du point de vue des matériaux et de la conception des cellules.

Une solution repose sur des technologies de cellules tandem. En associant par exemple une cellule en silicium à une cellule constituée d'un matériau semiconducteur possédant une bande interdite plus grande que celle du silicium, comme une pérovskite hybride halogénée, on peut limiter les pertes par thermalisa-

tion des porteurs photocréés, et ainsi envisager des rendements de conversion supérieurs à 40%. Un défi fondamental de ces nouveaux matériaux et nouvelles structures est d'assurer leur stabilité et leur durabilité.

Le projet MINOTAURE rassemble 8 partenaires industriels et académiques regroupant 22 laboratoires pour étudier l'origine des dégradations des technologies de cellules PV émergentes, prévoir leur évolution et permettre par la suite leur développement à l'échelle industrielle avec une fiabilité au moins égale à celle de cellules actuelles en silicium, qui offrent des garanties de fonctionnement de plus de 25 ans.

En premier lieu, le projet déploie un large panel de techniques pour caractériser les matériaux utilisés dans ces nouvelles cellules, ainsi que leurs interfaces. Le projet vise une compréhension fine des propriétés chimiques, physiques et électroniques, mais aussi de l'évolution de ces propriétés sous diverses excitations externes telles que des changements d'illumination ou de température, mais également d'impacts atmosphériques, tels que l'humidité ou des polluants. Certaines caractérisations permettent un suivi "in situ" sous dégradation accélérée ou des mesures "operando", c'est à dire dans des conditions rencontrées dans le fonctionnement des cellules.



Exemples de trois technologies photovoltaïques allant du silicium polycristallin (haut), cristallin avec contacts en face avant (droite), et une cellule de plus haut rendement à contacts en face arrière (gauche).

matériaux prometteurs ainsi que dans leur optimisation. Par ailleurs, les modélisations sont aussi mises à profit pour calculer des grandeurs accessibles par nos caractérisations ou pour simuler les techniques de caractérisations. Elles constituent alors une aide précieuse au diagnostic et à l'interprétation des mesures.

Les caractérisations couvrent un vaste ensemble allant de l'échelle atomique à l'échelle macroscopique de la cellule. Elles sont accompagnées par des analyses théoriques et des modélisations également multi-échelle. Des calculs dits "ab-initio" principalement basés sur des méthodes "density functional theory" (DFT) permettent l'évaluation de propriétés physiques à partir de la disposition d'atomes dans les matériaux. Les paramètres de matériaux issus de ces calculs théoriques à l'échelle atomique peuvent ensuite être introduits dans des calculs numériques à partir de méthodes de type éléments finis ou différences finies à l'échelle des dispositifs. Les équations régissant les concentrations des porteurs de charge (équations de continuité et de Poisson) sont résolues en tout point et les densités de courant sont calculées à partir des mécanismes de dérive/diffusion pour estimer les performances photovoltaïques dans différents types d'environnements ou d'applications.

Cette association de modélisations multi-échelles peut ainsi servir de guide dans le choix de nouveau

Ces approches traditionnelles de modélisation sont aujourd'hui complétées par des méthodes émergentes reposant sur l'intelligence artificielle (IA). Celle-ci peut intervenir particulièrement lorsqu'un grand nombre de données sont générées, que ce soit sur le plan expérimental ou sur le plan théorique. L'IA développe en lien avec le plan expérimental des méthodes d'analyse de données automatisées, permettant une accélération de leur traitement et de leur analyse, qui peut aider au développement beaucoup plus rapide de matériaux et dispositifs. La vraie innovation de ces techniques d'IA est la capacité d'identifier des motifs ("pattern" en anglais) dans de vastes domaines de données. Ceci passe par des méthodes dont la première est l'apprentissage pour identifier ces mêmes motifs, un sujet complexe que nous ne détaillerons pas plus ici. Ceci peut être particulièrement utile pour étendre ensuite les modèles d'IA vers des aspects prédictifs, notamment l'évolution du comportement des cellules en situation de fonctionnement et leur dégradation.

# ENTRE RAPIDITÉ ET PRÉCISION

Par Bruno Lacarrière (GEPEA) et Mathieu Vallée (CEA LITEN), pilote et co-pilote du projet HyMES

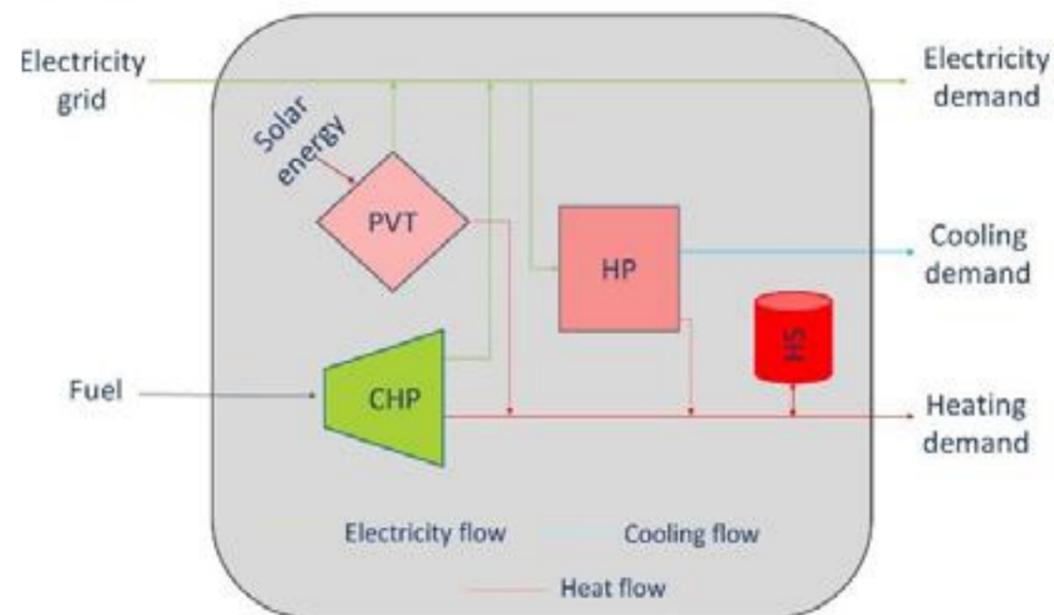
L'IA, et plus spécifiquement le Machine Learning (ML), peut également être utilisé en appui aux modèles mécanistiques des systèmes énergétiques pour lever les difficultés de leur résolution et accélérer les calculs. C'est l'objet du projet HyMES : *Hybrid Modeling for Multi Energy Systems* (MES) qui étudie les stratégies d'hybridation des modèles physiques et des modèles de ML, dans le cas du couplage des réseaux électriques et des réseaux de chaleur (réseaux eux même en interaction avec les systèmes de production et de stockage qui leur sont raccordés).

L'enjeu est de lever les difficultés inhérentes aux modèles physiques (précis mais lents) et aux modèles ML (rapides mais peu explicables et limités à leur es-

pace d'apprentissage) pour permettre un meilleur dimensionnement et un meilleur pilotage des réseaux multi-énergie, afin d'augmenter l'intégration des énergies renouvelables intermittentes, et accroître l'efficacité globale du système.

L'une des complexités des MES vient des différentes échelles à considérer : les échelles spatiales qui vont des systèmes de production locaux (ex : installation PV ou chaufferie) jusqu'aux réseaux qui assurent la distribution de l'énergie sur tout un territoire; les différentes échelles temporelles qui correspondent aux dynamiques propres des systèmes (ex : charge/décharge du stockage), aux horizons de temps visés (ex : dimensionnement, pilotage, contrôle) et aux pas de temps des modèles ; enfin les différents niveaux

## Case study



Un exemple de système multi-énergie

de complexité du MES en terme de nombre de systèmes énergétiques en interaction forte.

Ainsi, les verrous scientifiques de la modélisation physique des MES reposent sur la difficulté de choix de compromis entre rapidité de calcul et précision des modèles, compatibles avec les objectifs de dimensionnement et de pilotage des systèmes couplés. Les notions d'incertitudes (et leur propagation dans les modèles), d'explicabilité des résultats, de pertinences des modèles hybrides en dehors des plages d'apprentissage, de changement d'échelles (temporelles et/ou spatiales) sont pour leur part des verrous scientifiques des modèles ML.

## Les verrous scientifiques de la modélisation physique des MES reposent sur la difficulté de choix de compromis entre rapidité de calcul et précision des modèles.

Afin de lever ces verrous par l'approche hybride proposée, il est important d'établir et de catégoriser les différentes stratégies d'hybridation des modèles et de cibler l'utilisation du ML. Cette question est en soi un des objectifs du projet HyMES\*. Les choix d'hybridation peuvent ainsi être considérés au niveau des équations du modèle physique à traiter : apprentissage de résidus, substitution de non linéarités, identification de paramètres... Ces choix concernent également l'articulation entre les modèles physiques

et le ML : pre-processing des données par les modèles physiques préalable à l'apprentissage des modèles ML, accélération des modèles physique par le ML, apprentissage de données d'entrée des modèles physiques, association en parallèle des modèles ML et physiques, guidage du processus d'apprentissage ML par lois physiques... Cette articulation intervient également sur les modèles d'optimisation utilisés en complément des simulations pour élaborer des décisions sur les systèmes (dimensionnement, pilotage).

Les premiers travaux réalisés par les partenaires du projet HyMES montrent d'ores et déjà des résultats prometteurs qui confirment la pertinence de l'approche proposée. Ainsi, à titre d'exemple à l'échelle d'un système, des travaux comparant les performances d'un modèle hybride et d'un modèle de référence physique détaillé de stockage thermique latent, montrent une capacité des modèles hybrides à modéliser les phases dynamiques de charge et de décharge, avec une moyenne d'écart quadratique sur les températures de l'ordre de 10<sup>-2</sup>, pour un calcul accéléré de plus de 300 fois. Ces résultats complètent des conclusions similaires (travaux réalisés en amont du projet HyMES) pour la modélisation hybrides d'autres systèmes (PAC, stockage sensible, réseaux électriques).

Les résultats obtenus à l'échelle de système, sont encourageant quant à la pertinence de la démarche pour traiter les différents verrous scientifiques identifier et in fine considérer le système multi énergie dans son ensemble.

\*Le résultat de cette réflexion a fait l'objet d'une présentation à la conférence internationale : Mabrouk, M. T., et al, « Identifying opportunities for hybrid modeling approaches in Multi-Energy Systems », 38th International Conference on Efficiency, Cost Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2025), 29 June-4 July, Paris



## L'APPRENTISSAGE PAR RENFORCEMENT AU SERVICE DE L'OPTIMISATION DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES

Répondre aux contraintes majeures des réseaux énergétiques de demain, par la mise en place de solutions d'intelligence distribuée est l'objectif du projet AI-NRGY. Les travaux de thèse de Claire Bizon Monroc, doctorante au sein de ce projet, s'intéressent à l'optimisation de la production des parcs éoliens, en réduisant les "effets de sillage" provoqués par les turbines.

Par Ana Bušić, Claire Bizon Monroc et Jules Sintès (Inria), membres du projet AI-NRGY

La transition vers l'abandon des énergies fossiles demandera une augmentation significative de la production d'énergie renouvelable à l'échelle de la planète. Cet effort peut être soutenu par l'augmentation de l'efficacité des centrales de production d'énergie renouvelable, c'est-à-dire leur capacité à extraire de l'énergie à partir du vent ou du soleil. Par ailleurs, l'augmentation de la part du renouvelable dans notre mix énergétique, la multiplicité de ses sources de production et leur distribution à travers le réseau électrique posera de nouveaux challenges pour assurer

la stabilité du réseau. Au sein du projet AI-NRGY, nous travaillons à développer des solutions qui d'une part augmentent l'efficacité et la contrôlabilité des parcs de production, et de l'autre facilitent l'adaptation du réseau et la coopération entre producteurs.

### Améliorer l'efficacité des parcs éoliens

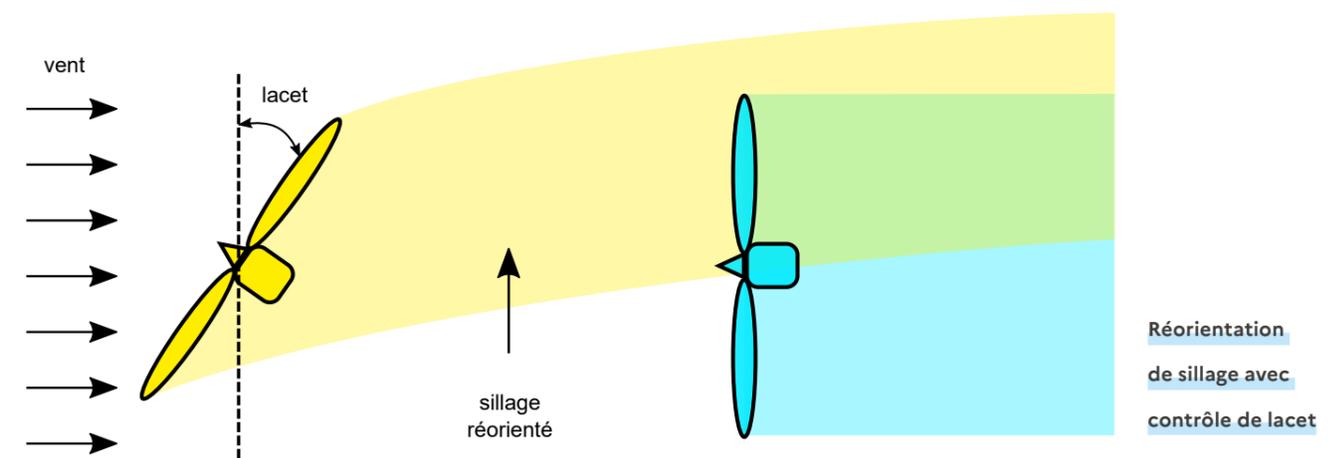
Des travaux de thèse effectués au sein du laboratoire commun entre Inria et IFP Energies Nouvelles se sont intéressés à l'amélioration de l'efficacité des parcs éo-

liens. Dans les grands parcs éoliens offshore, les effets de sillage sont à l'origine d'une diminution de la production d'énergie totale estimée à entre 10% et 20%: les éoliennes en amont dans le parc provoquent une diminution de la vitesse et une augmentation de la turbulence derrière leurs rotors, ce qui provoque des conditions de vent sous-optimales pour les éoliennes situées en aval (voir photo page précédente). Par ailleurs, ces sillages turbulents augmentent la charge sur la structure des éoliennes situées dans leur passage de 5% à 15%, ce qui peut raccourcir leur durée de vie et augmenter les coûts de maintenance. Pour atténuer leurs effets, les sillages peuvent être réorientés grâce au contrôle du lacet: c'est l'angle entre le rotor de la turbine et le vent incident. La redirection du sillage d'une éolienne par rapport aux turbines situées en aval peut augmenter la production de ces dernières, mais diminue sa propre production.

Trouver la combinaison de lacets qui maximise la production d'un parc est un problème d'optimisation difficile. Les stratégies de contrôle classiques nécessitent la modélisation d'interactions aérodynamiques complexes entre les turbines: les modèles sont trop simples pour donner des solutions optimales sur le terrain ou trop complexes pour passer

à l'échelle lorsque le nombre de turbines augmente. Une alternative consiste à exploiter des mesures collectées en temps réel dans le parc éolien: on cherche alors à concevoir des méthodes capables d'apprendre les lacets optimaux en observant uniquement la production correspondante en sortie. Nous travaillons sur des méthodes d'apprentissage par renforcement, qui apprennent des stratégies de contrôle optimales suivant une approche essai-erreur, et qu'une littérature grandissante applique au contrôle de parcs éoliens. Cette stratégie doit cependant relever plusieurs défis. D'abord, les temps de propagation du sillage créent un délai entre un changement de lacet et le moment où son impact sur la production du parc peut être observé. De plus, sur le terrain, il est difficile de mesurer la contribution exacte du changement de lacet de chaque turbine à la production totale. Enfin, ces deux problèmes - temps de propagation et attribution de la récompense - deviennent plus complexes lorsque le nombre d'éoliennes augmente, alors même que la taille de l'espace de recherche explose.

L'approche que nous développons recherche explicitement des politiques décentralisées, c'est-à-dire étant exécutées en parallèle par chaque éolienne



## CRÉATION D'UNE BIBLIOTHÈQUE

Pour faciliter les recherches futures dans l'application des méthodes d'apprentissage par renforcement au domaine de l'éolien, nous développons une bibliothèque logicielle appelée WFCRL, pour *Wind Farm Control with Reinforcement Learning* en anglais. Elle permet un interfaçage facile des outils de contrôle communément utilisés par la communauté de l'apprentissage par renforcement, avec les simulateurs de parcs éoliens de référence FLORIS et FAST. Farm. Tous deux développés par le Laboratoire National des Energies Renouvelables américain (NREL), ces simulateurs ont des niveaux de fidélité très différents: le but est de faire avancer la recherche sur l'exploitation de modèles peu précis, mais peu coûteux en ressources, pour guider l'apprentissage en conditions réelles.

en se basant sur des informations observées localement. Les politiques décentralisées sont particulièrement intéressantes pour notre problème, où les perturbations du champ de vent causées par une éolienne sont locales et n'affectent généralement qu'un ensemble variable d'éoliennes voisines. Nous formulons donc l'optimisation des lacets comme un problème d'apprentissage coopératif de politiques décentralisées, où chaque turbine est un agent contrôlant son lacet, et tous les agents doivent coopérer pour maximiser un objectif commun.

Les politiques obtenues sont ensuite évaluées dans des simulateurs de parcs éoliens sur des parcs comptant de 3 à 36 turbines et pour différents profils de vent. Elles permettent une augmentation de la production d'environ 2%, qui atteint 20% pour les cas de sillage les plus défavorables. Nous vérifions ainsi que notre approche décentralisée permet bien un passage à l'échelle facile pour les

grands parcs. Ces résultats encourageant doivent néanmoins être validés sur de vrais parcs éoliens !

### Agréger pour intégrer au réseau électrique

Pour faciliter leur intégration au réseau électrique, combiner différentes sources d'énergie renouvelables permet de diminuer l'incertitude sur la production totale, de mieux la répartir dans le temps et de la rendre plus flexible. Des agrégateurs peuvent ainsi servir d'intermédiaires entre de nombreuses sources d'énergie distribuées à travers le réseau et son gestionnaire. L'agrégateur fait une seule offre pour tous les producteurs sur le marché, et décompose le signal de production de façon à maximiser les bénéfices des participants en tenant compte de leurs multiples contraintes respectives. La multiplicité des producteurs et la diversité de leurs contraintes peut rendre ce problème très complexe, et motiver l'utilisation de méthodes d'optimisation distribuée.

#### Sources :

- Bizon Monroc, C., Bušić, A., Dubuc, D., and Zhu, J. (2023). Actor critic agents for wind farm control. In 2023 American Control Conference (ACC). IEEE. <https://hal.science/hal-04273716/document>
- Bizon Monroc, C., Bušić, A., Dubuc, D., and Zhu, J. (2024). WFCRL: A Multi-Agent Reinforcement Learning Benchmark for Wind Farm Control, NeurIPS 2024 Datasets and Benchmarks Track. <https://hal.science/hal-04864926/document>



Crédits photo : Energy 4 Climate - SIRTA

## AGRIVOLTAÏSME CONCILIER ENVIRONNEMENT ET ÉNERGIE

**Le domaine assez récent de l'agrivoltaïsme est un terrain fertile pour de nombreux projets de recherche, allant de l'optimisation de la production d'énergie à l'étude de son impact sur les ressources environnementales. A travers deux recherches menées parallèlement au XLIM et au LMD, les projets Smart4Module et AgriPV-ER du PEPR nous présentent leurs perspectives dans ce domaine.**

Par Romain Feilleux-Anginieur (CEA), pilote du projet Smart4Module

Le domaine de l'agrivoltaïsme (ou AgriPV) connaît un essor rapide depuis une dizaine d'années, passant d'une capacité installée initiale de 5 MW en 2012 à 2,8 GW en 2020, en raison de sa capacité à concilier l'utilisation des terres arables disponibles avec la production d'électricité à grande échelle grâce aux modules photovoltaïques.

Il existe différentes technologies photovoltaïques au sol qui constituent une vaste base de données de solutions pour les applications photovoltaïques agricoles. Elles

varient en fonction du type de structure porteuse (en hauteur, fixe ou équipée de systèmes de suivi du soleil), de la technologie des modules PV (silicium cristallin ou films minces, opaques ou translucides, monofaciaux ou bifaciaux), de l'espacement requis entre les structures ou de la hauteur par rapport au sol. Cependant, selon la technologie choisie, la synergie de la coproduction d'aliments et d'énergie sera plus ou moins optimisée.

L'implantation physique des modules dépend intrinsèquement de la technologie de cellule. L'intégra-

tion des modules PV doit prendre en compte la liberté de mouvement des agriculteurs et des machines, l'adaptation de la hauteur des structures aux cultures ou aux animaux, le microclimat sous les modules (apport solaire, régulation de la température de l'air ambiant), la régulation de l'évaporation et de l'évapotranspiration des cultures pour une meilleure gestion de l'eau, la protection contre les intempéries et les systèmes d'irrigation. L'emploi de technologies basées sur le silicium cristallin promet à ce jour les meilleurs rendements, particulièrement en couplage avec des systèmes de suivi du soleil. Cependant, l'opacité du silicium dans le spectre visible contraint l'intégration de ces modules et affecte le taux de couverture.

Les travaux de recherche de Camille Frouin, doctorante au XLIM sous la direction de Johann Bouclé, visent à développer les technologies photovoltaïques semi-transparentes, particulièrement pertinentes car elles peuvent offrir un taux de couverture de 100 %, contrairement aux technologies photovoltaïques

opaques. De plus, elles ont le potentiel d'assurer un environnement de croissance adapté en laissant passer le rayonnement photosynthétique tout en convertissant en électricité le spectre complémentaire absorbé.

En s'appuyant sur la littérature existante, le cœur scientifique de ces travaux est de co-optimiser spécifiquement l'efficacité de récolte d'énergie et l'efficacité photosynthétique par l'ingénierie de la transmission des dispositifs, via l'intégration de matériaux actifs de pointe, l'optimisation des électrodes semi-transparentes imprimables, ainsi que leur simulation optique et optimisation.

Cette approche multiphysique s'appuyera en particulier sur un indicateur de performance, l'efficacité photosynthétique (PE), pour co-optimiser la production d'électricité à partir des modules photovoltaïques organiques sélectifs semi-transparentes proposés sans compromettre la croissance utile des cultures, mais en limitant, dans la mesure du possible, la prolifération des plantes parasites.

## LE MODÈLE "ORCHIDEE"

*Par Lia Rapella, doctorante au LMD et membre du projet AgriPV-ER*

La technologie PV est au service de l'agriculture, en particulier vis-à-vis de l'adaptation au changement climatique et les enjeux de l'Agri-PV reposent dans la compréhension fine des comportements synergétiques entre production d'électricité et protection des cultures.

Le changement climatique dans la région euroméditerranéenne aggrave les conditions agricoles en rendant les terres plus vulnérables et en réduisant les ressources en eau. Face à ces défis, l'AgriPV émerge comme une solution prometteuse pour le nexus eau-énergie-alimentation-écosystèmes (EEAE). En

combinant production photovoltaïque et agriculture sur une même surface, il peut renforcer la résilience agricole, réduire la consommation d'eau et promouvoir les énergies renouvelables, tout en réduisant la compétition entre production énergétique et agricole pour l'usage des terres. Cependant, ses effets dépendent du climat, des cultures et du contexte géographique, et l'absence d'études à grande échelle limite la compréhension de ces variations.

Les travaux de recherche de Lia Rapella, doctorante à l'École Polytechnique sous la direction de Philippe Drob-



*Ferme agrivoltaïque du SIRTA (Palaiseau, France) utilisée comme référence pour le développement du modèle AgriPV.*

inski, visent à combler cette lacune. Dans le cadre du PEPR, elle a développé un modèle AgriPV à l'échelle régionale intégré aux modèles climatiques régionaux et au modèle de surface terrestre ORCHIDEE (Organisation du Carbone et de l'Hydrologie dans les Écosystèmes Dynamiques) de l'IPSL, utilisé pour la première fois pour simuler le fonctionnement d'un système AgriPV. Cette approche permet d'explorer les interactions entre le climat, l'AgriPV et les cultures dans le cadre du nexus EEAE, autant dans le présent que dans le futur.

L'application du modèle en péninsule Ibérique et aux Pays-Bas démontre sa capacité à saisir les nuances régionales, révélant le potentiel des systèmes AgriPV pour redéfinir les liens au sein du nexus EEAE, réduisant ressources et impacts environnementaux, surtout dans les régions vulnérables. Dans la région plus

sèche de la péninsule Ibérique - caractérisée par un rayonnement solaire abondant et peu de précipitations - l'AgriPV offre de nombreux avantages : augmentation de la productivité agricole, renforcement de la sécurité alimentaire et meilleure utilisation de l'eau et des terres, tout en produisant de l'énergie renouvelable. En revanche, aux Pays-Bas, caractérisés par des précipitations abondantes et un plus faible rayonnement solaire, l'AgriPV tend à réduire la productivité des cultures, et les gains en termes d'utilisation d'eau et des terres sont moins marquées.

Cela suggère que les bénéfices des systèmes AgriPV ne sont pas uniformément répartis à travers les différents contextes climatiques, soulignant la nécessité de compromis lors de leur mise en œuvre, car ces avantages peuvent varier d'une région à l'autre.



**Adream, un outil expérimental reconfigurable du Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS-CNRS) dédié à des travaux de recherche sur l'intelligence ambiante. Différents moyens de production d'énergie électrique sont intégrés à la facade du bâtiment, alimentant des recherches sur de nouveaux systèmes de conversion d'énergie.**

© Cyril FRESILLON - CNRS Images

## LA FLEXIBILITÉ ÉNERGÉTIQUE

**FlexTASE, Flex-Mediation et Fine4Cast, trois projets scientifiques parmi les quinze qui composent le PEPR TASE, répondent aux défis scientifiques relatifs à la flexibilité de la demande et au déploiement massif des énergies renouvelables.**

A la suite de l'Accord de Paris sur le Climat, une transformation énergétique majeure combinant une plus grande efficacité énergétique, l'électrification du transport et de l'industrie et le déploiement massif d'énergies renouvelables (ENRs) a été tracée par l'Union Européenne et les Etats. Ces orientations sont mises en oeuvre dans le cadre d'un marché européen de l'électricité portant sur la production et la fourniture dont les modalités opérationnelles sont définies et organisées par chaque Etat. Le déploiement massif de l'électricité renouvelable amplifie la multiplication des points de production et d'injection dans le réseau et la substitution d'énergie de stock (fossile - et fissile pour les pays nucléarisés) par des énergies de flux dont la source peut être intermittente (photovoltaïque) et varier selon la météorologie. La recherche d'une plus grande autonomie portée par des acteurs socio-économiques ou par des ménages s'étend désormais à l'énergie, ce qui rend encore moins prévisibles le soutirage et l'injection dans le réseau public de distribution. A la fois structurelles et systémiques, ces évolutions sont en cours et devraient s'amplifier quelles que soient les projections d'énergie nucléaire en France.

Or, l'équilibre permanent entre l'injection et le soutirage en toute section du réseau électrique est un impératif : définies depuis l'essor du réseau électrique, les fourchettes en termes de tension et de fréquence ne permettent pas au réseau électrique d'absorber les fluctuations d'électricité contrairement au réseau de gaz. Sur des temporalités très courtes, le risque est la coupure d'une partie du réseau, qui peut-être choisie (il s'agit alors de délestage) ou subie (il s'agit de phénomènes de type black-out), in-

duisant dès lors la cessation brutale de livraison des usagers d'un territoire voire de plusieurs pays. Sur le temps long, il importe de limiter l'ampleur des fluctuations de prix à la hausse (elles pénalisent les consommateurs) comme à la baisse (elles compromettent l'investissement dans la production d'électricité).

Les stratégies d'intégration de l'énergie renouvelable reposent communément sur trois piliers : le renouvellement et le développement de moyens productions pilotables décarbonés (centrale nucléaire ou biomasse), la mobilisation de stockages réversibles (par exemples, batterie électrochimique et réservoir hydro-électrique) et l'ajustement temporel du soutirage du réseau par ses utilisateurs consommateurs, autrement dit, la partie « demande » du marché de l'électricité. Opérée en aval du compteur, cette dernière, que l'on appellera « Flexibilité de la Demande », repose aussi bien sur la limitation ou le déplacement temporel des activités consommatrices que sur la gestion des stockages d'énergie et la mobilisation de sources alternatives. L'intégration massive des énergies renouvelables dans le mix électrique appellent un renouvellement conjoint du pilotage du réseau et des interactions entre fournisseurs, consommateurs et pro-sommateurs.

Les projets de recherche FlexTASE, Flex-mediation et Fine 4 cast portent sur les variabilités de la production et l'ajustement temporel flexible de la demande : ses déterminants météorologiques, ses pratiques individuelles et collectives, y compris celles ayant trait à l'organisation du marché de l'électricité et aux coopérations. Ils s'intér-

essent aussi aux médiations en direction des usagers et développent des outils de pilotage du réseau et d'appareils électriques. L'ensemble relève donc de ce que l'on appelle communément la flexibilité. Du point de vue du gestionnaire de réseau, la flexibilité qualifie le potentiel de modulation de la demande, c'est à dire du soutirage d'électricité par un ensemble d'utilisateurs finaux.

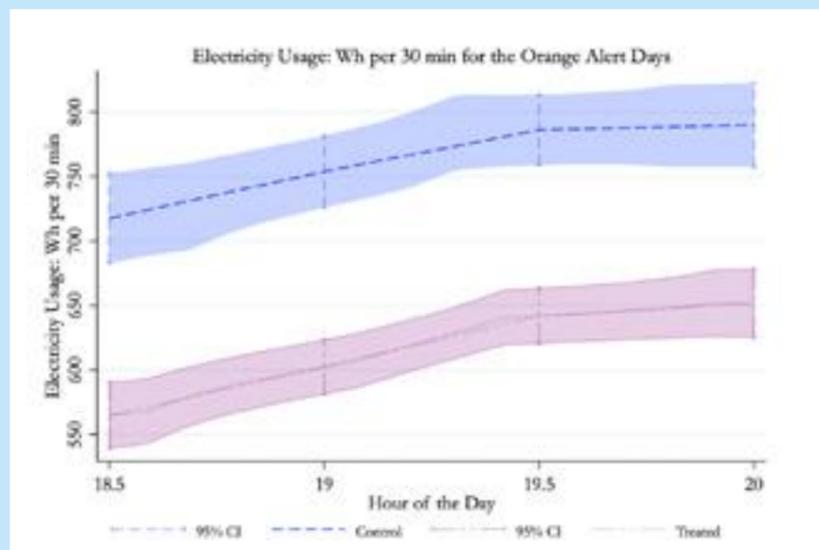
- FlexTASE focalise sur l'identification des réservoirs et des leviers de mobilisation des flexibilités directes (déléguées à des automatismes) et indirectes (passant par l'envoi de signaux incitatifs aux acteurs consom-

mateurs) et la mise au point d'outils pour quantifier, modéliser et mobiliser ces réservoirs de flexibilité..

- FLEX-MEDIATION analyse les actions de médiation menées par des organisations intermédiaires - telles que les agrégateurs et les communautés énergétiques - et les mutations ad hoc du cadre réglementaire
- Fine4-Cast travaille sur la question de la prévision des productions des énergies intermittentes pour permettre ensuite le déploiement d'une approche de flexibilité cohérente avec ces prévisions.

## NUDGE & EXPÉRIENCE PARTICIPATIVE

Un des objectifs scientifiques de FlexTASE est de tester de nouvelles politiques de flexibilisation de la demande d'électricité résidentielle. Une étude participative menée récemment, intitulée Expesigno, montre que le recours à des signaux d'alertes de pics de consommation et à un principe d'engagements volontaires concernant des actions de report de consommation permet d'avoir des résultats significatifs de report des usages (qui vont au-delà de mécanismes de tarification dynamiques).



Comme le montre la figure ci-contre, la consommation moyenne des ménages soumis à ce protocole expérimental entre 18h et 20h (courbe rose) est nettement inférieure à celle des ménages d'un groupe de contrôle (courbe bleue). La différence moyenne sur une série de 12 alertes est de l'ordre de 19,7 %, ce qui laisse entrevoir des opportunités importantes

pour la gestion des pics de consommation. Il s'agit maintenant d'élargir cette expérimentation à une plus grande échelle (sur l'ensemble du territoire national) et avec une plus grande finesse d'analyse (grâce à des dispositifs d'observation innovants comme le xKy).

## COMMENT DÉVELOPPER UNE APPROCHE SOCIALE ET TECHNIQUE DE LA FLEXIBILITÉ ?

Par Frédéric Wurtz (G2ELab) et Daniel Llerena (GAEL), co-pilotes du projet FlexTASE

Le projet FlexTASE travaille sur une approche et une définition socio-technique de la Flexibilité en distinguant la flexibilité directe (basée sur des systèmes techniques pilotables et modulables automatiquement de type batterie électrique, ballon d'eau chaude..) de la flexibilité indirecte (passant par l'envoi de signaux monétaires ou non, visant à induire une modification de demande passant par les comportements, les usages et les usagers). D'un autre point de vue, le projet sépare la flexibilité dite explicite (mesurée au compteur de livraison d'énergie, quantifiable et monnayables sur des marchés de flexibilité contractualisés), de la flexibilité implicite (une flexibilité à l'aval du compteur, incitée et/ou relevant d'un comportement volontaire du côté consommation, mais non directement rémunérée en tant que telle). Ces dimensions de la flexibilité sont donc à la fois techniques et sociales, et adressent les terrains qui sont autant résidentiels, tertiaires que industriels.

Pour ce faire, FlexTASE vise à observer et à mesurer (quantitativement & qualitativement) les dy-

namiques de flexibilité, en étant notamment alimenté par une recherche participative allant sur des living-labs et des terrains réels. Cette capacité est d'autant plus cruciale qu'il s'agit d'être in fine en mesure de proposer de nouveaux outils de conception, d'expérimentation et de simulation des potentiels de flexibilité au niveau de la demande.

Basé sur l'expertise de l'Observatoire de la Transition Énergétique, le consortium de chercheurs peut développer des analyses originales sur les réservoirs et les leviers de flexibilité sur la demande directe (basés sur des systèmes techniques) et indirectes (passant par les acteurs et l'envoi de signaux). Grâce à la maîtrise de la récupération des données de consommation et des comportements auprès des opérateurs comme ENEDIS, mais également à la mise en œuvre de dispositions innovantes comme le xKy (voir encadré ci-contre), FlexTASE est en mesure d'expérimenter de nouvelles politiques de flexibilisation de la demande d'électricité en présence d'intermittence (voir encadré page de gauche).

**Le dispositif xKy est mis à disposition du projet FlexTASE par l'Observatoire de la Transition Énergétique. Il permet de mesurer finement et en temps réel la consommation sur le compteur linky (35 millions de compteurs déployés en France), et permet ainsi le recrutement de panels de consommateurs pour faire des expériences de science participative de type Expesigno, pour mesurer les potentiels de Flexibilité sur des expériences à grande échelle (plusieurs centaines à plusieurs milliers de consommateurs).**



## COMMENT DES INTERMÉDIAIRES CONTRIBUENT À L'AJUSTEMENT TEMPOREL DES CONSOMMATIONS ?

Par Gilles Debizet (PACTE), pilote du projet Flex-Mediation

La perception croissante de la variabilité des énergies renouvelables commence à induire une évolution des pratiques au sein des espaces habités. Des ménages autoproducteurs de l'électricité programment des activités consommatrices pendant les périodes d'ensoleillement. Des coopératives citoyennes de production d'électricité sensibilisent leurs sociétaires à la variabilité de la production photovoltaïque et au déplacement temporel des consommations. De même, des collectifs partageant de l'énergie discutent des limites de leur production (Zaphiropoulo 2025). Ainsi, production et consommation sont considérées conjointement.

A l'échelle nationale, le risque de pénurie a été médiatisé pendant l'hiver 2022-2023, sous l'égide de RTE, le gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité français, via le bulletin télévisuel quotidien de « météo de l'énergie ». Sous contrainte de la crise du gaz russe, l'expérimentation a révélé une importante flexibilité de la demande ; la baisse de la consommation d'électricité des ménages les hivers suivants laissent supposer que des pratiques modifiées en 2023 perdurent encore en 2025 alors même que les prix ont sensiblement baissé. Des collectivités locales invitent leurs administrés à se rapprocher d'un agrégateur d'électricité en mobilisant un argumentaire civique (moindre recours à des centrales électriques carbonées pendant les pointes de consommation) et pécuniaire (rémunération de l'effacement des con-

sommations. Certaines s'engagent dans des actions de médiation auprès de ménages et des entreprises de leur territoire à l'instar du projet Inter-reg Smartcore porté en France par l'association Energie en Pays de Vilaine.

Ainsi, une variété d'acteurs mène des actions de médiations - à diverses échelles territoriales - afin que les utilisateurs ajustent temporellement le soutirage d'électricité. Le civisme entre les parties prenantes est invoqué, le plus souvent sans contreparties financières. La référence à une communauté ou un territoire est plus ou moins explicite. A son niveau, le particulier ou l'entreprise disposant de moyens de stockage (ballon d'eau chaude, batterie de véhicule électrique) arbitre entre stockage, soutirage/injection et l'organisation de ses activités. Si l'équation micro-économique peut être écrite sur la base de variation temporelle du prix de l'électricité ou d'une rémunération de l'effacement, elle est loin d'expliquer seule les changements de pratiques.

Flex-Mediation considère que les médiations comme leurs impacts sur les utilisateurs d'énergie s'inscrivent dans le temps long des organisations et des territoires et celui des relations (directives vs participatives, économiques vs civiques...). Elle s'intéresse aux intermédiaires énergétiques tels que les coopératives citoyennes, les collectifs d'autoconsommation (Debizet et Pappalardo 2021), les agrégateurs marchands, voire les institutions



Résidence multi-logements en autoconsommation collective

© Pappalardo

territoriales. Quatre questions guident la recherche (Pellegrino & Rupieka 2023) :

- Quelles sont les principales médiations – existantes et émergentes, marchandes ou communautaires – en direction des utilisateurs finaux ?
- Comment la variabilité des énergies renouvelables est-elle considérée dans ces médiations ?
- Les effets produits par les médiations varient-ils selon la nature des intermédiaires et des relations instaurées ?
- En quoi les réglementations cadrent les intermédiaires et les médiations ? Et comment la régulation du secteur de l'électricité évolue pour prendre en compte la variabilité des énergies renouvelables ?

## COMMENT RENDRE POSSIBLE LA PRÉVISION POUR LA FLEXIBILITÉ ?

Par Georges Kariniotakis et Simon Camal (Centre PERSEE), co-pilotes du projet Fine4Cast

Fine4Cast propose une approche holistique qui couvre toute la chaîne de valeur et de modélisation de la prévision énergétique, allant des données aux prévisions météorologiques et énergétiques, et incluant l'utilisation optimale des prévisions pour la prise de décision dans les systèmes électriques et le marché de l'énergie. Plusieurs objectifs du projet participent à une meilleure gestion des flexibilités, comme détaillé ci-dessous.

### Prévoir à des horizons multiples pour une gestion progressive des flexibilités

Les gestionnaires de réseau étagent leurs systèmes de réservation et activation des flexibilités le long d'une

série d'horizons temporels : d'abord contractualisation des offres de flexibilité la veille ou plusieurs heures à l'avance, puis notifications d'activation dans l'heure à venir et enfin activation (si flexibilité directe) ou demande de flexibilité (si flexibilité indirecte) durant les quelques minutes ou quelques heures où le potentiel de flexibilité est requis. Afin de bien aligner ces sollicitations de flexibilité avec les niveaux potentiels de production renouvelable et consommation, il est utile de disposer de prévisions énergétiques rejouées régulièrement afin d'utiliser l'ensemble des sources de données au fur et à mesure de leur mise à disposition. Par exemple, Météo France génère des prévisions météo numériques à 6 heures d'intervalle pour une plage d'horizons allant de

#### Sources :

- Zaphiropoulo J.. Le rôle des limites locales dans la sobriété énergétique : éclairages à partir du cas de l'autoconsommation collective en France. Lien social et Politiques, 2025, 93, pp.256-274.
- Debizet D., Pappalardo M.. Communautés énergétiques locales, coopératives citoyennes et autoconsommation collective : formes et trajectoires en France. Flux -2021/4 (126)
- Pellegrino M., Rupeka M.. Contribution des centrales électriques virtuelles à la résilience du réseau électrique. Flux 2023, 132.

quelques heures à quelques jours, tandis que les images satellites et les images du ciel prises par caméras hémisphériques informent sur la couverture nuageuse à un horizon plus court, des prochaines minutes aux prochaines heures. Ainsi FINE4CAST développe une approche continue de la prévision énergétique capable de prédire la production d'EnR et la demande locale à des horizons allant de quelques minutes à plusieurs jours et en tenant compte de toutes les sources de données disponibles.

### Prévision de la consommation à l'échelle locale avec informations contextuelles.

Les consommateurs individuels quelle que soit leur typologie (résidentiels, tertiaires, industriels) sont un maillon essentiel de la flexibilité des systèmes électriques. Or aujourd'hui si la consommation globale à l'échelle nationale est prévue avec un faible niveau d'erreur, la consommation locale est elle plus ardue à prévoir car moins lissée, et potentiellement influencée par des facteurs spécifiques. De plus cette consommation évolue avec les nouveaux usages de l'électricité (par ex. pompes à chaleur, véhicules électriques...). C'est pourquoi Fine4CAST s'attache à prédire la consommation à l'échelle locale en tenant compte des nouveaux usages, mais aussi en intégrant des données contextuelles et socio-économiques (actualités textuelles, réseaux sociaux, trafic, recherches news, etc.). L'analyse approfondie de ces données contextuelles est effectuée par traitement du langage naturel, intégrée à un modèle de prévision basé sur une intelligence artificielle adaptée à cette tâche.

Des prévisions qui anticipent les sollicitations de flexibilité par les gestionnaires de réseau. Au-delà de la

prévision des niveaux attendus de production EnR et de consommation, il est important pour les gestionnaires de réseau de connaître le potentiel de flexibilité d'un consommateur, d'un producteur ou d'un consomm'acteur, c'est à dire un consommateur auto-produisant. Les prévisions de production EnR doivent donc quantifier non seulement des intervalles de production attendus en fonctionnement normal, mais aussi le potentiel d'écrêtement de cette production, c'est-à-dire la quantité de puissance/énergie qui peut être réduite par rapport au fonctionnement nominal. De la même façon, les gestionnaires de réseau souhaitent connaître la capacité des consommateurs à réduire ou décaler leur consommation, et cette capacité dépend du mix de consommation attendu (par ex. chauffage/climatisation, eau chaude, électro-domestiques, recharge de batteries...).

Une prévision énergétique embarquant ce potentiel de flexibilité permet de mieux estimer la veille ou pour l'heure suivante le gisement de flexibilité potentiellement mobilisable. Il s'agira ensuite d'évaluer la réponse effective à une demande de flexibilité (par exemple via les nudges, voir plus haut) afin de vérifier la quantité de flexibilité effectivement fournie au cours des périodes de demande de flexibilité. Un enjeu important est de garantir de bonnes performances de prévision dans des scénarios d'activation de volumes importants de flexibilité, qui ne concernent que quelques heures dans l'année mais qui génèrent des dynamiques relativement complexes. Un grand nombre de consommateurs répartis sur différentes lignes voire quartiers seront concernés, avec de possibles contraintes en cascade sur la puissance disponible ou les niveaux de tension observés le long des lignes.



## UN CHANGEMENT DE PARADIGME

L'injection en de multiples points du réseau électrique et la possibilité d'autoproduire et d'auto-stocker de l'électricité constituent ensemble un profond changement de paradigme pour les utilisateurs finaux comme pour les gestionnaires de réseaux et les fournisseurs. La participation des utilisateurs finaux en termes d'ajustement temporel de la demande électrique apparaît de plus en plus nécessaire du point de vue du réseau alors même que de nombreux utilisateurs finaux accroissent leur autonomie vis-à-vis du réseau.

Les outils de prévision de la demande, particulièrement à l'échelle locale constituent une brique essentielle pour organiser les actions d'ajustement temporel de la demande. Une variété d'organisations et de solutions techniques sont susceptibles d'accompagner les util-

isateurs finaux, voire de suspendre automatiquement le fonctionnement d'une partie de leurs équipements. Qualifier les médiations de ces organisations - plus ou moins locales, plus ou moins inclusives, plus ou moins techniques - et leurs effets sur les représentations des utilisateurs finaux éclaireront les voies de l'action collective, publique ou privée à différentes échelles.

D'ores et déjà, il est possible et opportun d'évaluer l'impact de signaux sur le soutirage d'électricité en fonction de caractéristiques des utilisateurs finaux. De nouveaux outils de simulation optimisant la mobilisation de l'électricité renouvelable permettront aux gestionnaires de réseaux et aux organisations susnommées d'accompagner les utilisateurs voire d'activer par délégation les appareils consommateurs de l'électricité.

# LA FLEXIBILITÉ ÉNERGÉTIQUE

## UN LEVIER STRATÉGIQUE POUR LA DÉCARBONATION DE L'INDUSTRIE

**Pour cette première revue, la direction du Programme et équipements prioritaires de recherche pour la décarbonation de l'industrie (PEPR Spleen) nous présente sa perspective sur les enjeux de la flexibilité énergétique.**

*Par Fabrice Lemoine (LEMTA) et António Pires da Cruz (IFPEN), directeurs du PEPR Spleen*

Pour atteindre l'objectif de réduction de 81 % des émissions de gaz à effet de serre du secteur industriel d'ici 2050, une transformation en profondeur de l'industrie française est indispensable. L'électrification de ses procédés représente un levier stratégique pour réussir la transition écologique d'un secteur qui représente près de 20% des émissions nationales.

Le programme de recherche PEPR SPLEEN ambitionne de structurer cette mutation en développant des solutions innovantes pour des procédés industriels plus sobres en carbone. Ses axes de recherche sont :

- Le développement de nouveaux outils de prédiction et de suivi
- L'intégration des énergies bas-carbone et l'amélioration de l'efficacité énergétique
- La décarbonation et l'intensification des procédés
- Le stockage et la valorisation du CO<sub>2</sub>

Ce basculement vers une industrie davantage électrifiée soulève une question majeure : comment assurer une alimentation électrique durable sans fragiliser un réseau déjà fortement sollicité ? C'est dans ce contexte que la notion de flexibilité électrique prend tout son sens.

### La demande se pilote, à la hausse comme à la baisse

Le développement des énergies renouvelables – en particulier solaire et éolien – nécessite la prise en considération d'un paramètre essentiel : leur production est intermittente, dépendante des conditions climatiques. Résultat : il devient de plus en plus difficile de faire coïncider production et consommation en temps réel. Or, pour garantir la stabilité du réseau électrique, cet équilibre est essentiel.

La flexibilité électrique consiste à ajuster la consommation en fonction de la disponibilité de l'énergie. Cela signifie, pour un industriel, être capable de moduler (reporter, diminuer ou augmenter) certaines consommations



© PEPR SPLEEN

sur des plages horaires précises, souvent de quelques heures. Par exemple : démarrer un cycle de chauffe électrique en milieu de journée, au moment où les panneaux solaires produisent à plein régime.

### Flexibilité énergétique : des bénéfices concrets pour l'industrie

De nombreux procédés industriels présentent un potentiel de flexibilité important : fours électriques, broyeurs, systèmes de ventilation, groupes froids... Pour peu qu'ils disposent d'une certaine inertie thermique ou d'une capacité à être pilotés intelligemment, ils peuvent participer à l'équilibre du réseau.

Pour les industriels, la flexibilité électrique offre plusieurs avantages :

- Réduction des coûts énergétiques : en adaptant la consommation aux périodes où l'électricité est abondante et moins chère, notamment en journée lors des pics de production solaire.
- Nouveaux revenus : grâce à la participation aux mécanismes d'effacement, les

sites industriels peuvent être rémunérés pour leur capacité à réduire temporairement leur consommation.

- Amélioration de la résilience énergétique : en s'adaptant aux fluctuations du réseau, les industriels renforcent leur autonomie et leur capacité à faire face aux aléas énergétiques.

### Vers une industrie agile et sobre en carbone

La flexibilité électrique n'est plus un concept théorique ou réservé aux grands groupes. Elle s'impose comme un outil opérationnel, déjà disponible, pour accompagner la transition énergétique. Elle ne remplace pas la sobriété ou l'efficacité : elle complète ces deux démarches.

Les projets portés par les PEPR SPLEEN et TASE illustrent un élément fondamental : l'innovation se joue aussi dans l'articulation entre consommation, production et réseau. Ainsi, la transition vers une industrie bas carbone n'est pas uniquement engendrée par l'émergence de nouvelles technologies, elle est également favorisée par une intelligence d'usage, collective et coordonnée.

# BLACK-OUT

## UN RISQUE ÉNERGÉTIQUE GRANDISSANT

**La tempête Kirk de 2024 ou le récent blackout ibérique ont montré à quel point nos réseaux sont fragiles. Avec une intensification des aléas climatiques et la montée en puissance des renouvelables, le risque de panne systémique ne cesse d'augmenter. Au sein du PEPR, le projet PowDev vise justement à développer des solutions pour renforcer la résilience du système face à ces bouleversements.**

*Par Adrien Burq, Anastasia Akakpo-Numado et Greta Cazzaniga (LSCE), Ibtissem Khelifati (UMI SOURCE) et Xianyi Yang, Alicia Bassière et Anne Barros (LGI)*

Le 9 octobre 2024, la tempête post-tropicale Kirk a balayé le nord de l'Espagne et la France, privant 300 000 foyers en Espagne et 65 000 en France d'électricité, notamment dans les Pyrénées-Atlantiques, où certains sont restés coupés plusieurs jours malgré une réalimentation rapide pour 70 % d'entre eux. Six mois plus tard, le 28 avril 2025, un blackout ibérique d'origine encore mal élucidée a plongé dans le noir des millions de foyers en Espagne, au Portugal et dans le Sud-Ouest de la France pendant plus de douze heures, exposant brutalement la vulnérabilité de nos sociétés à une simple panne systémique. Ces événements montrent qu'un blackout peut avoir des conséquences majeures : hôpitaux privés de courant, industries à l'arrêt, communications interrompues... À l'heure où les réseaux intègrent massivement des énergies renouvelables tout en étant de plus en plus exposés aux extrêmes climatiques, étudier les blackouts n'est plus une option, mais un impératif pour garantir la sécurité énergétique.

Ces phénomènes (vagues de chaleur, tempêtes, sécheresses, inondations) étaient autrefois rares, mais le réchauffement climatique d'origine humaine les rend plus fréquents et plus intenses. L'air plus chaud aggrave les vagues de chaleur et les sécheresses tout en transportant plus d'humidité, ce qui renforce les fortes pluies. Le GIEC a confirmé que le changement climatique a déjà accru la probabilité de ces extrêmes.

Ces deux dynamiques - changement climatique et transition énergétique - interagissent et accentuent le risque de coupures massives. Les sources renouvelables, comme l'éolien et le solaire, peuvent être indisponibles précisément lorsque la demande est forte, tandis que les infrastructures du réseau deviennent plus exposées aux dommages physiques. Comprendre comment ces systèmes réagissent aux chocs climatiques extrêmes est essentiel pour garantir la sécurité énergétique et renforcer la résilience; c'est précisément l'objectif du projet PowDev, qui modélise

les risques de blackout dans des réseaux électriques à forte part d'énergies renouvelables.

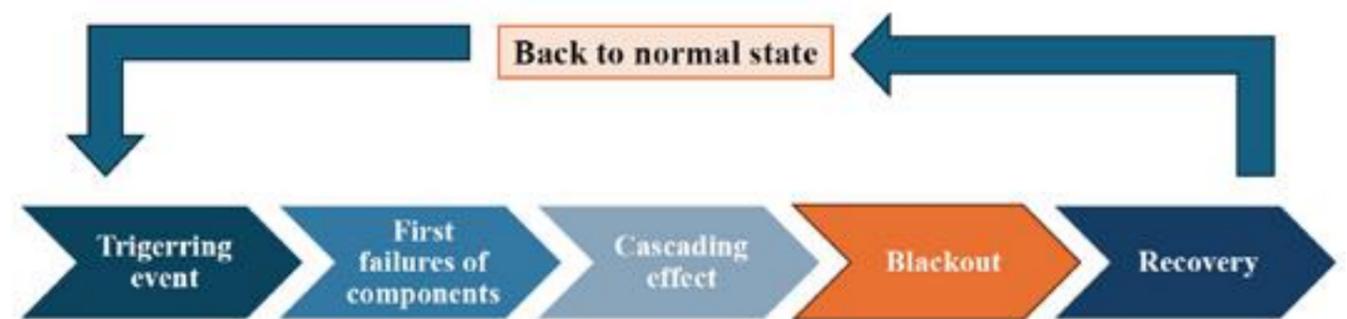
### Qu'est-ce qu'un blackout et comment se déclenche-t-il ?

Un blackout est une perte soudaine et à grande échelle de l'alimentation électrique, touchant des zones étendues, voire des régions entières. Parmi ses multiples causes, les événements climatiques extrêmes en deviennent une des plus fréquentes, notamment dans des systèmes de plus en plus alimentés par des énergies renouvelables. Ces systèmes reposent sur trois composantes principales : la production, le transport et la distribution, toutes exposées à différents types de risques climatiques. Les sources renouvelables sont particulièrement vulnérables, car elles dépendent des conditions météo : les panneaux solaires nécessitent du soleil, les éoliennes un vent constant, et l'hydroélectricité des débits stables. Mais ce sont les lignes de transport qui souffrent le plus : les lignes aériennes peuvent être endommagées par le vent, la chaleur ou le givre ; tandis que les câbles souterrains peuvent subir des infiltrations d'eau ou des inondations.

Lorsqu'une partie du réseau tombe en panne, l'électricité est automatiquement redirigée vers d'autres lignes. Comme l'eau dans un réseau de canalisations, elle cherche de nouveaux chemins. Mais cette redistribution peut surcharger les composants voisins, les poussant à leur tour à l'échec. Cet effet domino, appelé effet

de cascade, peut rapidement dégénérer en blackout : une perte systémique et généralisée d'électricité. La montée en puissance des énergies renouvelables complexifie encore les choses. Contrairement aux centrales traditionnelles, les sources renouvelables sont souvent petites, dispersées, et multipliant ainsi les composants et les connexions. Cela rend les flux plus difficiles à contrôler et la stabilité de la tension plus délicate à maintenir - augmentant les risques de pannes en cascade si le système n'est pas finement piloté.

Pour prévenir les coupures massives, les opérateurs peuvent isoler certaines zones du réseau ou déconnecter temporairement des secteurs non essentiels afin de soulager la charge. Les réseaux intelligents (smart grids) offrent des outils pour des réponses plus rapides et ciblées. Mais à mesure que l'électricité devient centrale dans des secteurs comme les transports, l'industrie ou le numérique, les enjeux augmentent. Par ailleurs, la complexité accrue des smart grids rend leur gestion plus délicate. Nos outils gagnent en efficacité, mais les risques, eux aussi, grandissent. Si ces protections échouent, les conséquences peuvent être immédiates et sévères. Un blackout peut survenir en quelques minutes, lorsque les défaillances se propagent plus vite que la capacité de réponse des opérateurs. Dans une économie fortement électrifiée, les impacts peuvent être profonds : hôpitaux et communications perturbés, production industrielle stoppée, mise en danger de la sécurité publique. Les répercussions sociales



Chaîne du black-out, projet PowDev

et économiques peuvent s'amplifier rapidement, faisant de la résilience une priorité absolue.

Si les protections échouent, un blackout peut survenir en quelques minutes, avec des conséquences sévères dans une économie très dépendante de l'électricité : hôpitaux et communications perturbés, activité industrielle stoppée, sécurité publique menacée. Le rétablissement est complexe : il faut d'abord évaluer les dégâts et lancer les réparations, souvent retardées par des routes impraticables, des inondations ou des conditions météorologiques défavorables, et le réseau peut subir d'autres dommages si sa stabilité n'est pas assurée. La remise en service doit être progressive : on démarre par les centrales capables de se relancer seules (hydraulique, batteries), puis on reconnecte les autres segments en priorisant les services vitaux comme les hôpitaux, tout en maintenant la stabilité globale. Les énergies renouvelables peuvent aider à la reprise, mais leur variabilité complique la coordination.

Enfin, le coût d'un blackout dépasse largement celui des réparations physiques. Les dommages directs aux infrastructures ne sont qu'une partie du problème. Les pertes économiques liées à l'arrêt des activités productives représentent souvent la plus grande part, surtout dans des économies où les secteurs sont fortement interconnectés. Si les blackouts deviennent fréquents, ils peuvent freiner durablement la croissance et le développement.

C'est pourquoi le projet PowDev adopte une approche globale de la résilience face aux blackouts. Il modélise toute la chaîne des événements - des aléas climatiques aux défaillances du réseau, de la logistique de réparation à la planification des infrastructures. Mais PowDev va plus loin : il intègre les impacts économiques, les réponses politiques, et les enjeux de justice sociale, car la résilience n'est pas seulement une question technique, c'est un défi collectif.

## DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES PLUS RÉSILIENTS ET PLUS INTELLIGENTS

**Le projet TASTING, piloté par un consortium scientifique français avec le soutien de RTE, vise à renforcer la sécurité et la performance des réseaux électriques. Coup de projecteur sur les travaux de jeunes scientifiques engagés dans le développement de solutions innovantes pour faciliter l'intégration des énergies renouvelables et moderniser les infrastructures.**

*Par Mathilde Berric (Grenoble INP-UGA), chargée de projet TASTING*

Dans un contexte de transition énergétique rapide, le modèle énergétique européen évolue sous l'effet conjugué des impératifs de durabilité, de la lutte contre le changement climatique et de la décentralisation. L'ouverture des marchés a engendré de nouveaux modes de production et de consommation, rendant la résilience des réseaux plus essentielle que jamais. Pour accompagner le développement des énergies renouvelables, il est crucial de déployer des technologies capables d'en maîtriser la variabilité. Les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) occupent une place centrale, malgré les défis posés par la digitalisation, la cybersécurité et l'exigence de flexibilité des systèmes.

Le projet TASTING répond précisément à ces enjeux. Grâce à l'expertise de RTE en matière de réseaux électriques et de transition numérique, il bénéficie d'un accompagnement stratégique et technique, notam-

ment à travers des cas d'usage concrets venant nourrir les recherches académiques. Il s'articule autour de quatre grands axes de recherche principaux :

### **Fiabilité et cybersécurité des infrastructures :**

Jonathan Bleuzen, ingénieur à l'Inria Grenoble (Ctrl-A), contribue à cet axe grâce à ses travaux de recherche sur l'amélioration d'outils de simulation existants pour favoriser l'expérimentation sur de telles infrastruc-

tures. Les outils ciblés sont les simulateurs d'infrastructure de calcul Batsim et SimGrid, pour lesquels il devient nécessaire de développer des mécanismes

## ETUDE DE CAS EN BRETAGNE

Modéliser l'ensemble du réseau électrique français serait à la fois ambitieux et particulièrement chronophage. Par ailleurs, chaque région présente des spécificités propres - en termes de ressources énergétiques, de conditions météorologiques et de vulnérabilités - qui influencent fortement leur trajectoire de transition énergétique. Travailler à une échelle plus restreinte permet également une meilleure prise en compte des données locales et facilite la validation des modèles. Dans cette optique, nous avons choisi de débiter par la modélisation et le calibrage de nos stratégies à l'échelle d'une région : la Bretagne. Ce territoire combine un fort potentiel de développement éolien - une filière dans laquelle la France accuse un certain retard - et une vulnérabilité marquée à des événements climatiques bien identifiés, comme les tempêtes et les inondations. L'objectif à terme est de développer des méthodes répliquables à d'autres régions et de renforcer notre expertise en modélisation territoriale.

de boucle de contrôle pour la gestion de ressources informatiques, ainsi que du rejeu d'évènement externes. Ces travaux seront menés conjointement avec Clément Mommessin dans l'axe « Optimisation du déploiement matériel » pour faciliter la mise en œuvre et l'expérimentation des algorithmes de prise de décision présentés ci-après.

#### Optimisation du déploiement matériel :

Clément Mommessin, Post-Doctorant à l'Inria Grenoble (Ctrl-A) travaille sur le déploiement auto-adaptatif de fonctions de protection et contrôle sur une infrastructure Cloud/Edge, en particulier pour le cas d'étude de la virtualisation de ces fonctions dans des postes de transformation RTE.



L'objectif est de garantir une exécution continue des fonctions de protection, en adaptant leur configuration et placement en fonction des ressources disponibles sur les différents serveurs intégrés à un poste. La disponibilité des ressources est régie par l'occurrence d'évènements externes et non contrôlés, comme la perte d'un serveur due à une panne matérielle ou une cyberattaque, ou encore une vague de chaleur limitant la performance des serveurs.

Un premier travail de modélisation d'un poste RTE avec les caractéristiques des serveurs de calculs et fonctions de protection à déployer est en cours, suivi de la conception d'algorithmes de (ré-)allocation des fonctions en réaction aux évènements

externes. Enfin, un travail de développement sera fait sur des outils de simulation existants, conjointement avec Jonathan Bleuzen dans l'axe « Fiabilité et cybersécurité des infrastructures », pour expérimenter différentes solutions de placement et de réaction aux évènements externe et étudier la robustesse des mécanismes d'adaptation proposés.

#### Jumeaux numériques pour les réseaux multi-énergies :

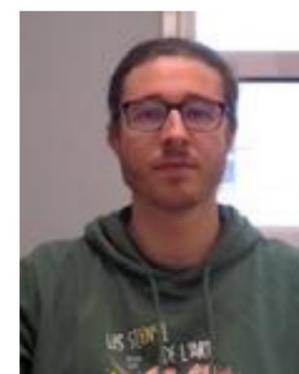
Sur cet axe, Jeanne Niyonteze, Doctorante au L2EP (Centrale Lille), se concentre sur la Modélisation hybride des systèmes énergétiques multi-énergies couplés, avec un focus sur le développement de jumeaux numériques hybrides. En raison de leur dynamique rapide, les turbines à gaz sont aujourd'hui utilisées comme des générateurs de secours flexibles dans les systèmes électriques. Les énergies renouvelables, fortement dépendantes des conditions météorologiques, génèrent des flux d'électricité intermittents qui perturbent les réseaux électriques.



Le couplage des réseaux gazier et électrique peut permettre d'augmenter la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique. L'enjeu est alors d'équilibrer le système électrique en gérant la conversion d'énergie électrique vers le réseau gazier, qui sert de stockage. Un défi scientifique majeur réside dans la modélisation précise de la dynamique du réseau de gaz, généralement simplifiée. Pour améliorer la précision des modèles, il

est essentiel d'intégrer les données mesurées en temps réel avec les modèles physiques. Le travail de Jeanne vise à allier la complexité des modèles à la performance en temps réel, en adoptant une approche hybride combinant modèles physiques et techniques d'apprentissage automatique. Cette recherche contribuera au développement de systèmes énergétiques plus intelligents et résilients, mieux adaptés à l'intégration des sources renouvelables intermittentes.

#### Architectures distribuées pour les systèmes cyber-physiques :



Face à l'intégration croissante des énergies renouvelables, dont la variabilité complexifie le pilotage du réseau, l'optimisation, historiquement centralisée, doit désormais évoluer. Pour anticiper, estimer et sécuriser le fonctionnement du réseau tout en respectant les contraintes physiques et les enjeux de confidentialité, une approche décentralisée s'impose. Thomas Omarini, doctorant à l'IETR-G2ELab réalise sa thèse sur la gestion optimale distribuée multi-pas de temps des boucles dans le réseau 63kv.

Sur ce même axe, Romaric Perthus Sallustre, doctorant au CEA LIST, mène sa thèse sur la reconstruction de la topologie d'un réseau ramifié, en exploitant des réflectogrammes simulés et des techniques d'apprentissage automatique. Ce projet s'appuie sur des outils informatiques avancés et des plateformes matérielles spécialisées en réflectométrie, permettant de confronter les simulations aux mesures réelles. L'objectif est de créer des bases de données de réflectogrammes pour alimenter les processus d'apprentissage des algorithmes de machine learning. Cela permettra de caractériser avec précision les paramètres du réseau électrique étudié, en utilisant des méthodes de réflectométrie mono- ou multicapteurs combinées aux techniques d'IA.

À travers ces différents axes et l'implication de ses jeunes chercheurs et chercheuses, TASTING entend fournir des solutions concrètes aux enjeux de la transition énergétique, en garantissant des réseaux plus résilients, intelligents et capables de répondre aux défis futurs.



# QUAND L'ACV ÉCLAIRE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

## ENTRETIEN AVEC GUIDO SONNEMANN

Professeur à l'Université de Bordeaux, Guido Sonnemann dirige le groupe CyVi (Cycle de Vie et Chimie Durable) à l'Institut des Sciences Moléculaires et coordonne le projet LCA-TASE. Grâce à son expertise et son engagement, est aujourd'hui une référence dans le domaine de l'analyse du cycle de vie et de la gestion durable des ressources.

Par Catalina Sanabria, chargée de projet LCA-TASE

Comment définiriez-vous l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) à la fois de manière rigoureuse et accessible ?

L'ACV est une méthode scientifique encadrée par des normes internationales (ISO 14040 et 14044) qui permet d'évaluer de manière globale, systémique et quantifiée les impacts environnementaux et de plus en plus souvent les aspects sociaux et économiques à travers l'Analyse de la Durabilité du Cycle de Vie (ADCV). Elle couvre l'ensemble de leur cycle de vie : de l'extraction des ressources, le raffinage à la fabrication, transport, l'usage, jusqu'à la fin de vie (recyclage, incinération, etc.).

L'ACV repose sur l'analyse de flux de matières et d'énergie, traduits en indicateurs d'impacts tels que le changement climatique, l'eutrophisation, la toxicité, etc. C'est un outil fondé sur des données scientifiques, qui vise à éviter les transferts des impacts environnementaux, en identifiant les « points chauds » d'un cycle de vie, elle guide l'écoconception, la recherche et les politiques publiques vers des solutions vraiment durables. En somme, c'est une boussole scientifique pour la transition écologique et durable (voir Figure 1).

Pourquoi l'ACV est-elle au cœur des enjeux de la transition énergétique ?

Toutes les technologies dites « vertes » ne sont pas forcément durables sur l'ensemble de leur cycle de vie. Un panneau solaire, par exemple, n'émet pas de CO<sub>2</sub> en fonctionnement, mais sa fabrication et son recyclage ont un impact. L'ACV permet d'évaluer objectivement la performance environnementale d'une technologie à long terme. Elle est essentielle pour développer des solutions réellement durables, notamment dans le secteur des énergies renouvelables, qui doit être exemplaire dans la décarbonation de l'économie.

Quel est l'objectif du projet LCA-TASE, et que représente son intégration dans un programme national ?

LCA-TASE vise à fournir aux acteurs français de la transition énergétique des méthodologies ACV de nouvelle génération. Cela inclut l'intégration de modélisations dynamiques et prospectives, la prise en compte des services écosystémiques, et l'analyse des technologies à toutes les étapes de leur cycle de vie, de l'échelle du laboratoire à celle industrielle.

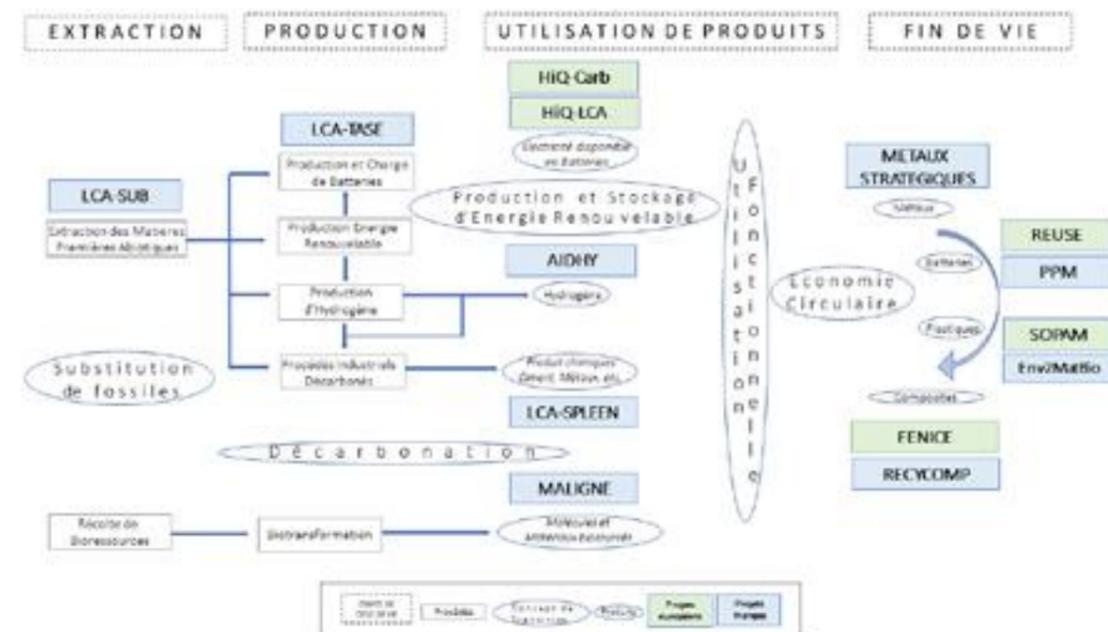


Figure 1. ACV et ADCV pour les multiples transitions énergétiques – projets de recherche du Cyvi Group.

Le fait d'intégrer ce projet dans le PEPR TASE lui confère une dimension stratégique : elle renforce la coordination entre chercheurs, industriels et parties prenantes à l'échelle nationale, et permet un alignement fort avec d'autres projets PEPR, notamment ceux sur l'hydrogène, les réseaux intelligents ou les batteries durables (voir figure 1).

### Avec qui travaillez-vous au sein du consortium ?

Le projet LCA-TASE s'appuie sur un consortium multidisciplinaire réunissant des centres de recherche et centres de formation comme le BRGM, le CEA, l'IFPEN, l'INRAE, l'ENSAM, Mines Paris, et l'Université de Bordeaux. Ensemble, ils abordent de manière intégrée les enjeux liés à la production, au stockage et à l'usage de l'énergie. Des contacts sont aussi établis avec des industriels comme RTE.

Nos approches dépassent les critères classiques de l'ACV, en intégrant des dimensions encore peu explorées, telles que la biodiversité, les services écosystémiques, la

circularité des matériaux et même le ressenti paysager, utiles pour mieux comprendre le rejet de certaines infrastructures comme les éoliennes terrestres.

LCA-TASE est également connecté à des initiatives sur le photovoltaïque biosourcé ou l'agrivoltaïsme. Cela permet de placer l'ACV au cœur des innovations liées à la transition énergétique et contribue à la formation d'une nouvelle génération de chercheurs — avec déjà 6 doctorants et 10 post-doctorants engagés dans cette dynamique.

### Quel est l'impact attendu ?

Nous allons fournir une collection de données ACV à l'échelle nationale sur les systèmes énergétiques renouvelables, au service des chercheurs, industriels et décideurs. Cela permettra à la France de disposer d'une vision claire et prospective des impacts de ses choix technologiques, pour garantir une transition énergétique souveraine et durable. Ce projet contribue aussi à structurer la communauté scientifique française en ACV, en renforçant sa visibilité et sa compétitivité à l'échelle européenne.

# PORTRAIT DE CHERCHEUSE

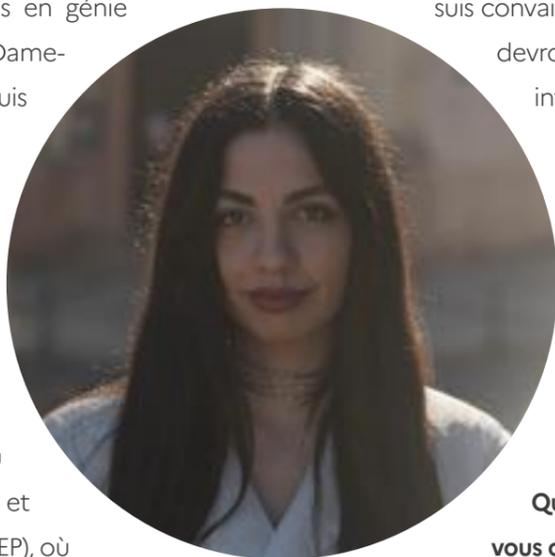
## LA NOUVELLE GÉNÉRATION DU GÉNIE ÉLECTRIQUE

**Diplômée en génie électrique et doctorante à Centrale Lille, Joey Youssef est spécialisée dans les réseaux électriques, notamment les architectures de réseaux en courant continu. Depuis novembre 2023, la jeune chercheuse réalise sa thèse au sein du projet DC-Architect, qui vise à concevoir des réseaux de distribution aptes à transporter l'énergie sous forme de courant continu.**

*Par Cristina Rigo, cheffe de projet DC-Architect*

**Pouvez-vous nous présenter votre parcours académique et professionnel ?**

J'ai commencé par des études en génie électrique à l'Université Notre-Dame-de-Louaizé au Liban, où j'ai acquis une solide formation technique en électronique et en systèmes électriques. J'ai ensuite poursuivi par le Master E2SD à Centrale Lille, axé sur l'énergie durable et les réseaux électriques. Durant ce Master, j'ai effectué un stage au Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique de puissance (L2EP), où



j'ai travaillé sur des projets concernant les réseaux en courant continu en basse et moyenne tensions. Cette expérience m'a conduite à entamer une thèse dans ce domaine par la suite.

**Qu'est-ce qui vous a motivé à étudier le génie électrique et les réseaux ?**

Ce qui m'a attirée dans le génie électrique, c'est l'importance fondamentale des réseaux électriques dans notre

quotidien, en particulier leur rôle crucial dans la gestion de l'énergie. Avec l'intégration croissante des énergies renouvelables et la transition énergétique en cours, je suis convaincue que les réseaux de demain devront être repensés pour être plus intelligents, robustes, fiables et durables. Cela m'a poussée à étudier ce domaine pour concevoir des solutions innovantes et durables, en lien direct avec les enjeux énergétiques de notre époque.

**Quel est votre sujet de thèse ?  
Quels sont vos objectifs et avez-vous obtenu des premiers résultats ?**

Le sujet de ma thèse porte sur la conceptualisation des extensions MVDC (Courant Continu à Moyenne Tension) des réseaux électriques existants. L'objectif principal est de développer un outil d'aide à la décision pour les liaisons MVDC, prenant en compte les éléments clés des systèmes électriques, tels que les câbles de puissance, les charges et la production distribuée. Je me concentre particulièrement sur l'analyse des scénarios où les réseaux MVDC peuvent offrir de meilleurs

performances par rapport aux systèmes MV AC (Courant Continu à Courant Alternatif) traditionnels. Mon travail vise à identifier ces scénarios et à quantifier les bénéfices opérationnels pour les gestionnaires de réseau, ainsi que les avantages matériels tangibles pour les utilisateurs finaux.

**"La thèse représente pour moi bien plus qu'une simple continuité d'études, c'est un défi stimulant qui me permet d'approfondir des problématiques complexes et d'apporter des solutions concrètes."**

À ce jour, j'ai réalisé des travaux préliminaires sur la modélisation des systèmes et des architectures d'intégration MVDC, et j'ai commencé à mener des simulations pour tester ces concepts. Une approche progressive est mise en place à partir du benchmark MVDC de CIGRE (Conseil international des grands réseaux électriques). Cette méthodologie sera déployée pour explorer plusieurs types d'intégration MVDC et sera formalisée sous la forme d'un cadre complet pour le choix de l'extension optimale MVDC des réseaux AC existants. Par ailleurs, un article a été publié lors du workshop CIREC 2024 à Vienne, et un article est en cours de préparation pour PowerTech.

**Qu'est-ce qui vous a poussé à faire une thèse ?**

C'est lors de mon stage au L2EP que j'ai découvert le potentiel de la recherche appliquée dans les réseaux électriques. La thèse représente pour moi bien plus qu'une simple continuité d'études, c'est un défi stimulant qui me permet d'approfondir des problématiques complexes et d'apporter des solutions concrètes. Elle me donne également l'opportunité de contribuer activement à l'innovation dans un domaine clé comme

les réseaux électriques, tout en soutenant la transition énergétique, qui est au cœur de mes aspirations professionnelles.

**Que vous apporte votre participation à un programme de recherche national ?**

Le programme PEPR TASE me permet de travailler avec des chercheurs de différentes institutions et d'avoir accès à des ressources et des expertises variées. Cela m'offre une perspective plus large sur les défis actuels des réseaux électriques. C'est aussi une excellente occasion d'élargir mon réseau professionnel et de perfectionner mes compétences en recherche.

**Comment voyez-vous la suite de votre parcours ?**

Je souhaite continuer à travailler dans la recherche. Mon objectif est de participer à des projets innovants autour des réseaux électriques et de la transition énergétique. L'enseignement m'intéresse également, car j'aimerais transmettre mes connaissances et aider à former les ingénieurs de demain, notamment dans les domaines de l'énergie durable et des technologies de l'avenir.

**Quel conseil donneriez-vous aux étudiants et étudiantes qui envisagent de s'engager dans la même voie ?**

Le doctorat, c'est une aventure à deux E : exigeante, mais incroyablement enrichissante. Considérez votre thèse comme un projet que vous pilotez vous-même. Soyez curieux, osez poser des questions et n'ayez pas peur de sortir de votre zone de confort. Entourez-vous de vos pairs en lisant des articles, en participant à des conférences ou en suivant des ateliers. Profitez aussi des plateformes comme LinkedIn pour échanger, collaborer et rester connecté aux dernières avancées de votre domaine. N'oubliez pas que chaque étape, même les défis, est une occasion d'apprendre et d'évoluer.



PROGRAMME  
DE RECHERCHE  
SYSTÈMES  
ÉNERGÉTIQUES  
& ÉNERGIES  
RENOUVELABLES



PLUS D'INFORMATIONS  
À VENIR SUR LE SITE  
DU PEPR TASE

# ÉCOLE D'AUTOMNE DU PEPR TASE

## DU 13 AU 17 OCTOBRE 2025

### VVF, OBERNAI

- **Axe « Intégration sociale et environnementale » :**  
*Sobriété énergétique, marchés de l'électricité, analyse de cycle de vie, grands enjeux autour des matériaux liés aux EnR...*
- **Axe « Anticipation » :**  
*Systèmes énergétiques du futur, utilisation de l'IA pour la modélisation et l'optimisation, impacts du changement climatique et modèles de prévision météorologique...*
- **Axe « Technologie » :**  
*Conception et fabrication des panneaux photovoltaïques, fiabilité et durabilité des cellules, modèles et fonctionnement des réseaux électriques...*

# Projets du PEPR TASE

## HyMES

Explorer les solutions de modélisation hybrides pour traiter de la complexité des systèmes et réseaux multi-énergie.

**Pilote :** Bruno LACARRIÈRE, Professeur, IMT Atlantique

**Référence ANR :** 22-PETA-0002

## DC-Architect

Concevoir les réseaux de distribution du futur, ainsi que leurs convertisseurs statiques.

**Pilote :** Dr. Vincent DEBUSSCHERE, Grenoble INP UGA

**Référence ANR :** 22-PETA-0003

## AI-NRGY

Architecture d'IA distribuée pour les systèmes énergétiques du futur intégrant un grand nombre de sources distribuées

**Pilote :** Pr. Thierry MONTEIL, INSA Toulouse – IRIT

**Référence ANR :** 22-PETA-0004

## IOTA

Nouvelles solutions à faible coût et à haut rendement pour des cellules solaires tandem.

**Pilote :** Stéphane COLLIN, Directeur de recherche, CNRS

**Référence ANR :** 22-PETA-0005

## Smart4Module

Réduire l'impact environnemental de la mise en module des cellules PV.

**Pilote :** Romain FEILLEUX-ANGINIEUR, Chef de laboratoire, CEA

**Référence ANR :** 22-PETA-0006

## AgriPV-ER

Etude pratique et modélisation d'agrivoltaïsme en région euro-méditerranéenne.

**Pilote :** Jordi BARDOSA, Ingénieur de recherche, Ecole Polytechnique

**Référence ANR :** 22-PETA-0007

## Fine4Cast

Prévoir la production et les besoins en énergies renouvelables à des échelles spatiale et temporelle fines.

**Pilote :** Georges KARINIOTAKIS, Directeur de recherche, Mines de Paris

**Référence ANR :** 22-PETA-0008

## FlexTASE

Etudier la flexibilité pour une insertion massive d'énergies renouvelables sous l'angle socio-technique.

**Pilotes :** Frédéric WURTZ, Directeur de recherche CNRS, G2ELab

Pr. Daniel LLERENA, GAEL, INRAe, CNRS, UGA, Grenoble-INP

**Référence ANR :** 22-PETA-0009

## LCA-TASE

Analyse du cycle de vie des technologies liées aux systèmes énergétiques avancés pour contribuer à la durabilité et à la souveraineté énergétique.

**Pilotes :** Guido SONNEMANN, Professeur, Université de Bordeaux

**Référence ANR :** 22-PETA-0010

## SOLSTICE

Réduire ou substituer l'Indium et l'Argent des cellules solaires à haut rendement.

**Pilote :** Frédéric JAY, ingénieur chercheur, CEA-Liten - INES

**Référence ANR :** 22-PETA-0011

## TASTING

Transformation numérique des réseaux d'énergies pour une meilleure résilience et flexibilité du système.

**Pilote :** Raphaël CAIRE, Enseignant Chercheur, Grenoble INP

**Référence ANR :** 22-PETA-0012

## BioFlexPV

Matériaux d'encapsulation biosourcés pour modules photovoltaïques flexibles.

**Pilote :** Sylvain CHAMBON, Chargé de recherche, CNRS

**Référence ANR :** 22-PETA-0013

## FLEX-MEDIATION

Analyser les intermédiations sociales et les régulations politiques relatives à la consommation d'électricité.

**Pilote :** Gilles DEBIZET, Maître de conférences, Université Grenoble Alpes

**Référence ANR :** 22-PETA-0014

## MINOTAURE

Caractériser et modéliser les mécanismes de dégradation des nouvelles générations de cellules

**Pilote :** Jean-Paul KLEIDER, Directeur de recherche CNRS

**Référence ANR :** 22-PETA-0015

## PowDev

Optimiser la résilience des systèmes électriques en présence d'évènements climatiques extrêmes.

**Pilote :** Anne BARROS, Professeure, CentraleSupélec

**Référence ANR :** 22-PETA-0016



## SEER - Systèmes énergétiques et énergies renouvelables

La revue du PEPR TASE, co-piloté par le CNRS et le CEA

### Direction de programme :

Philippe AZAIS, directeur de recherche, CEA-Direction des Energies (chargé de mission à l'APED)

Jean-François GUILLEMOLES, directeur de l'UMR CNRS de l'Institut Photovoltaïque d'Ile de France (IPVF)

Nicolas RETIERE, professeur à l'Université Grenoble Alpes et chercheur au G2ELab

### Comité opérationnel :

Françoise VAREILLE, secrétaire générale du PEPR TASE

Etienne MORISSEAU, chargé de communication du PEPR TASE

Contact : [dp@pepr-tase.fr](mailto:dp@pepr-tase.fr)