

SEER

Systèmes Énergétiques et Énergies Renouvelables

Communautés d'énergie

Synchroniser production
et consommation

Modèles prédictifs

De la maintenance
aux performances

Indium et argent

Substituer ces matériaux
dans les cellules solaires



SOMMAIRE

- 4 **Montée en puissance du PEPR, acteur-clé de la transition énergétique française**
Avant-propos par la direction du PEPR TASE
- 6 **La maintenance prédictive au service de la résilience des centrales photovoltaïques**
Projet DC-ARCHITECT
- 10 **Le partage des données, catalyseur de la transition énergétique ?**
Projet AI-NRGY
- 14 **Complémentarité optoélectronique, caractérisation in situ pour le vieillissement accéléré**
Projet MINOTAURE
- 18 **Cellules tandem à l'épreuve : modélisation multiphysique du rendement extérieur**
Projet IOTA
- 22 **Films cellulotiques biosourcés pour le photovoltaïque flexible**
Projet BioFlexPV
- 25 **PV organique semi-transparent, une alternative prometteuse pour l'agrivoltaïsme**
Projet SMART4MODULE
- 28 **Modéliser la production photovoltaïque en situation agricole**
Projet AgriPV-ER
- 32 **Prévoir le couvert nuageux : comparaison des modèles de prédiction**
Projet Fine4Cast

- 35 **L'ACV appliquée aux éoliennes : modèles d'estimation pour une meilleure évaluation**
Projet LCA-TASE
- 38 **Au-delà de l'indium et de l'argent, vers des cellules solaires plus durables**
Projet SOLSTICE
- 41 **Communautés d'énergie : optimiser selon les caractéristiques des participants**
Projet FlexTASE
- 44 **Observer et accompagner l'émergence d'une communauté énergétique**
Projet Flex-Mediation
- 48 **Réseaux multi-énergies, modélisation à l'échelle quartier**
Projet HyMES
- 51 **Contrôle distribué du réseau, l'apprentissage automatique prend le relais**
Projet TASTING
- 55 **Vagues de chaleur et résilience : quand la chaleur rencontre le système électrique**
Projet PowDev
- 59 **MSNA-TASE et ExTASE : valoriser les résultats de recherche du PEPR**
Par les membres des consortia
- 62 **Présentation des 15 projets scientifiques du PEPR**

MONTÉE EN PUISSANCE DU PEPR

ACTEUR-CLÉ DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE FRANÇAISE

Par Philippe Azais (CEA), Jean-François Guillemoles (CNRS, UMR IPVF) et Nicolas Retière (UGA, G2Elab),
co-directeurs du PEPR TASE "Systèmes énergétiques et énergies renouvelables"

La transformation du système énergétique est une nécessité pour arriver à tenir les objectifs annoncés dans la troisième programmation pluriannuelle de l'énergie : accélérer l'électrification et renforcer la souveraineté énergétique de la France avec l'ambition d'une énergie plus décarbonée, plus sûre et plus juste. Pour cela, la France mise sur la sobriété et sur la résilience des systèmes énergétique, ainsi que sur l'innovation technologique issue d'une recherche portée collectivement par l'ensemble des acteurs académiques et industriels de l'énergie. C'est dans cet esprit que le PEPR TASE "Systèmes Énergétiques et Énergies Renouvelables" a été lancé il y a trois ans, avec l'objectif clair de structurer la recherche française autour des énergies renouvelables et des systèmes énergétiques de demain. Financé à hauteur de 45,1 millions d'euros sur six ans, ce programme ambitieux rassemble près de 90 laboratoires, du CEA au CNRS aux autres ONR, en passant par les universités, pour relever un défi de taille : rendre notre système énergétique plus résilient, plus flexible, plus souverain et moins dépendant des ressources fossiles ou critiques.

Aujourd'hui, le bilan est très positif. Le PEPR TASE a su créer une dynamique forte entre chercheurs, chercheuses, et acteurs socio-économiques comme en témoignent les chiffres suivants. 156 publications scientifiques, deux bourses ERC obtenues - reconnaissance par l'Europe de l'excellence de la recherche portée par des membres du PEPR - trois brevets déjà déposés alors que les premières thèses sont à peine

soutenues, et surtout, une communauté scientifique qui dépasse les frontières disciplinaires. Par exemple, le projet AgriPV-ER a développé une plateforme expérimentale de 700 m² pour étudier l'agrivoltaïsme, cette pratique qui consiste à produire de l'électricité solaire tout en cultivant des terres agricoles. Cette approche pour concilier production alimentaire, énergétique, et maîtrise de la ressource en eau associe des chercheurs et chercheuses d'horizon très divers, entre science des matériaux, ingénierie des systèmes, climatologie, météorologie et analyse des impacts environnementaux.

Autre exemple : le projet PowDev, qui a construit une base de données climatiques pour anticiper les risques liés aux événements climatiques extrêmes sur les réseaux électriques. Si le black-out ibérique de 2025, contrairement à celui du Texas en 2021, n'est pas dû à un événement météorologique extrême, il rappelle à quel point la résilience des systèmes énergétiques est cruciale, même en Europe où le réseau est traditionnellement considéré comme sûr.

Enfin, il ne faut pas oublier les collaborations industrielles, avec des partenariats concrets avec EDF, RTE ou TotalEnergies, et l'émergence de deux start-up issues directement des recherches menées dans le cadre du programme, outre les contacts avec de nombreux acteurs des filières concernées, et la participation aux consortium de maturation et prématuration, EXTASE et MSNA-TASE.

Pourtant, tout n'a pas été simple. La réduction budgétaire de 10 % fin 2023 a forcé le programme à revoir certaines de ses ambitions, et le recrutement de doctorants s'est parfois heurté à la forte attractivité de l'industrie pour les profils les plus recherchés, comme les experts en intelligence artificielle ou en électronique de puissance. Mais le PEPR TASE a su s'adapter pour permettre à ses membres de mener leurs travaux à bien.

Alors, que nous réserve l'avenir ? 2026 est une année charnière. Le lancement du PEPR FutuRE au printemps devrait prolonger et amplifier les travaux engagés en développant un volet expérimental autour des réseaux énergétiques qui n'a pas pu être couvert par TASE. Les liens avec les acteurs socio-économiques vont se renforcer, notamment grâce au Club des Partenaires Socio-Économiques, qui réunit déjà une quarantaine de membres. Les journées scientifiques TASE et l'école interdisciplinaire de cet automne continueront de fédérer les chercheurs et de stimuler les échanges. Enfin l'équipe de la direction de programme est maintenant au complet avec le recrutement d'une nouvelle chargée de programme (Dounia DEMS) et l'arrivée d'une in-

génieure de valorisation (Morgane DELTERAL) pour faciliter le transfert des innovations vers l'industrie.

Mais les défis restent nombreux. Comment mieux intégrer les sciences humaines et sociales dans des projets souvent très techniques ? Comment améliorer le partage des données entre les différents acteurs ? Comment rendre les carrières académiques plus attractives face à l'appel de l'industrie ? Comment mieux faire connaître et amplifier nos travaux à l'échelle européenne ? Autant de questions auxquelles le PEPR TASE devra répondre pour continuer à jouer un rôle clé dans la transition énergétique française.

Dans un contexte où la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE3) et la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) tracent la voie vers une économie décarbonée, le PEPR TASE a toutes les cartes en main pour devenir un acteur incontournable. Car la transition énergétique ne se décrète pas : elle se construit, pas à pas, grâce à la recherche, à l'innovation et à la collaboration. Et c'est précisément ce que nous espérons faire quotidiennement avec vous et ce programme.



De gauche à droite : Philippe Azais, Nicolas Retière et Jean-François Guillemoles, co-directeurs du PEPR TASE, lors des journées annuelles du programme, les 30 juin et 1er juillet 2025 au LAAS-CNRS



Chaque section d'une installation photovoltaïque est associée à un convertisseur de puissance, ces structures blanches disposées de façon régulière dans cette centrale de Dunhuang en Chine.

LA MAINTENANCE PRÉDICTIVE

AU SERVICE DE LA RÉSILIENCE DES CENTRALES PHOTOVOLTAÏQUES

Un plan de maintenance prédictive des convertisseurs de puissance embarqués par une centrale photovoltaïque permet de contribuer à la résilience de l'installation. Cette maintenance repose sur des outils algorithmiques capables d'évaluer l'état de santé des composants embarqués par les convertisseurs. Une approche dite « dissociée » est traditionnellement retenue pour construire ces outils, limitant leurs performances. Un changement de paradigme avec une approche dite « adaptative » est ici proposé pour répondre à ces enjeux.

Par Sanjiv Kumar, doctorant au laboratoire Ampère et membre du projet DC-Architect (voir page 62)

L'implantation d'une centrale photovoltaïque (PV) nécessite la mise en œuvre d'un réseau électrique local, afin de raccorder les différents postes de production PV au réseau de transport électrique. Les cellules PV produisent de l'énergie en courant continu faible tension (LVDC) tandis que le réseau de transport de l'énergie fonctionne en courant alternatif haute tension (HVAC). Le réseau électrique local doit ainsi mettre en œuvre plusieurs étages

d'adaptation de la tension via des convertisseurs de puissance pour assurer le bon raccordement des postes de production au réseau de transport.

Pour réaliser des opérations de conversion en courant continu, ces convertisseurs de puissance embarquent nécessairement des composants de puissance actifs à semi-conducteur : des diodes et des transistors de puissance. Cependant, l'utilisation de

La maintenance prédictive repose sur un outil de pronostic capable d'évaluer l'état de dégradation du composant critique et ainsi d'estimer sa durée de vie utile restante. Cette estimation permet alors de planifier le remplacement du composant, tout en maximisant sa durée d'utilisation.

ces composants implique des enjeux en matière de coût, de rendement et de fiabilité du convertisseur.

Maintenance préventive ou prédictive ?

A l'échelle de l'exploitant, mettre en œuvre un plan de maintenance planifiée est un moyen efficace de compenser la fiabilité limitée des convertisseurs de puissance d'une installation PV. La maintenance préventive est traditionnellement plébiscitée. Elle consiste à remplacer périodiquement le composant dit critique d'un système selon les recommandations de son fabricant. Cependant, étant donné le coût économique, environnemental et social de l'industrie du semi-conducteur, ce type de maintenance ne s'aligne pas avec des enjeux de développement durable, puisque le composant critique y est remplacé indépendamment de son état de dégradation. Par conséquent, un intérêt grandissant est porté aux méthodes de maintenances prédictives.

Construire un outil de pronostic requiert une étude de la dégradation du composant, autrement dit, comprendre sa physique de défaillance et/ou avoir accès à une base de données de mesures représentatives de la variation de l'état de santé de celui-ci au cours de son vieillissement. Un obstacle majeur se dresse alors : en conditions de vieillissement réel, les mécanismes de dégradation des composants actifs sont lents. Ces composants sont conçus pour fonctionner au moins une dizaine d'années, ce qui rend impossible, ou du moins extrêmement contraignant, l'étude de leur dégradation sur un tel horizon de temps.

Le vieillissement accéléré comme solution ?

Traditionnellement, l'étude de la dégradation de composants actifs se fait donc en conditions dites de vieillissement accéléré. Des bancs de tests dédiés permettent de soumettre ces composants à des facteurs de stress amplifiés afin d'accélérer artificiel-

43%

C'est la proportion de défaillances causées par les convertisseurs chargés de l'ondulation de la tension, observées sur 350 installations photovoltaïques durant 3 ans, selon l'étude « PV System Reliability: An Operator's Perspective ». Cela représente 2.34 GWh de production énergétique perdue.



Enceinte climatique permettant de réaliser des tests de vieillissement accéléré. Elle permet de faire varier des paramètres tels que la température, l'humidité et la luminosité.

© Cyril FRESILLON - IPVF - CNRS Images

lement leurs mécanismes de dégradation et donc leur défaillance prématurée. Au cours de ces essais, les composants sont instrumentés afin de collecter un ensemble de mesures permettant de construire une base de données de vieillissement accéléré. Une méthode dite dissociée est ensuite classiquement mise en œuvre : la base de données de vieillissement accéléré sert à construire un outil de pronostic. Ce même outil est ensuite utilisé pour évaluer l'état de santé des composants subissant un vieillissement réel à partir de mesures similaires. A ce jour et à notre

connaissance, aucune étude publique n'a été menée sur des composants subissant un vieillissement réel.

Un changement de paradigme nécessaire

Pour répondre à cet enjeu, nous proposons de changer de paradigme méthodologique en développant une méthode de construction adaptative d'outils de pronostic. L'idée est de combiner la base de données de vieillissement accéléré à des mesures en vieillissement réel afin de transposer au mieux le contenu in-

La représentativité des données de vieillissement accéléré vis-à-vis d'un vieillissement réel demeure donc une question ouverte. Par conséquent, il est impossible de garantir les performances d'une méthode dissociée pour construire un outil de pronostic sur de telles conditions d'extrapolation.

formationnel des essais de vieillissement accéléré sur un cas de vieillissement significativement différent.

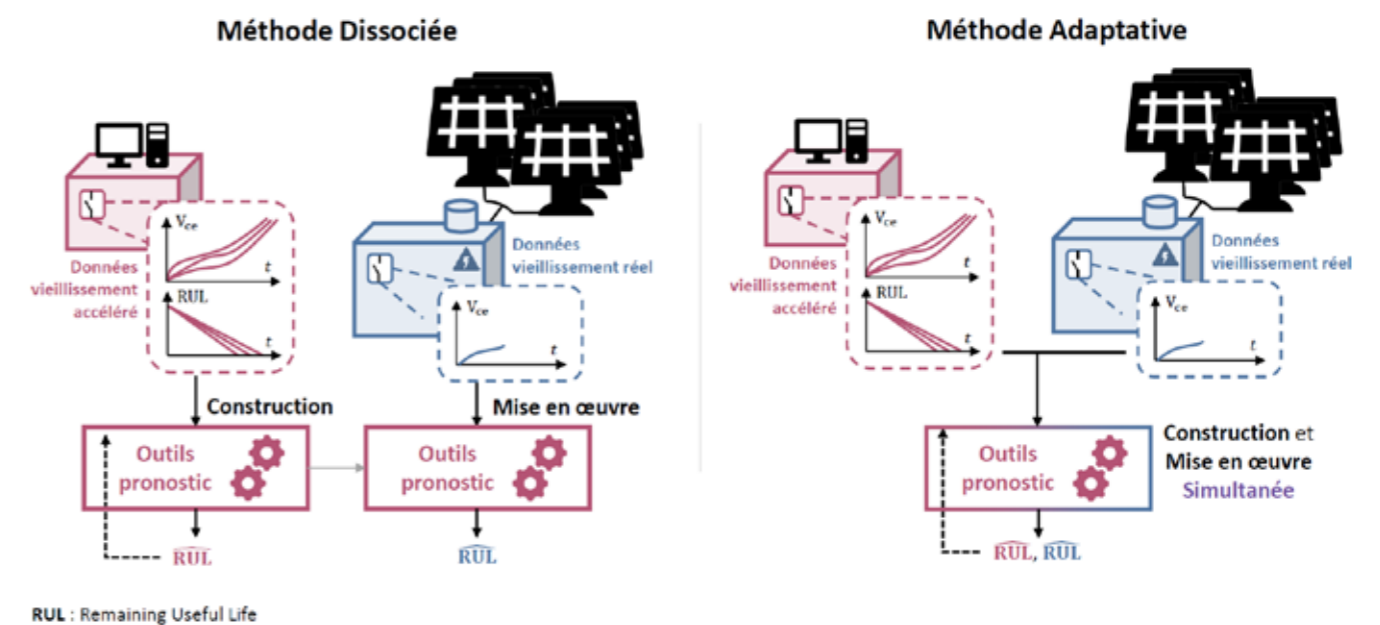
L'algorithme de pronostic que nous proposons repose sur l'utilisation d'un réseau de neurones. Des concepts avancés de Machine Learning reposant sur des mécanismes de transfert d'apprentissage par alignement de domaine, de même qu'une hybridation du réseau via des contraintes d'optimisation reposant sur des considérations issues de la physique de défaillance du composant, permettent de soutenir les capacités d'adaptation du réseau de neurones.

L'intérêt de cette approche adaptative a pu être évalué avec l'appui du laboratoire SATIE, où des essais de vieillissement accéléré sur des modules à transistors IGBT ont été mis en œuvre selon plusieurs conditions de vieillissement. A mi-vie, les prédictions

de la méthode adaptative réduisent en moyenne de 72.8% l'erreur d'estimation de l'état de santé des modules par rapport à la méthode dissociée, démontrant ainsi l'intérêt de cette approche et la robustesse de l'outil de pronostic proposé. De plus, notre méthode de pronostic permet une utilisation 30% plus longue des composants en comparaison à un plan de maintenance préventive équivalent.

Les résultats obtenus sont encourageants quant à la pertinence d'une méthode adaptative pour estimer l'état de santé de composants actifs de convertisseur de puissance. Cette approche permet de faire face au verrou de la représentativité du vieillissement accéléré vis-à-vis du vieillissement réel et ainsi soutenir efficacement un plan de maintenance préventive des convertisseurs de puissance d'une installation photovoltaïque.

PRINCIPE DE CONSTRUCTION DISSOCIÉ ET ADAPTATIF D'UN OUTIL DE PRONOSTIC



LE PARTAGE DES DONNÉES CATALYSEUR DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ?

L'intégration de sources d'énergie décentralisées et d'appareils intelligents permet un accès sans précédent à des données de haute résolution, pouvant améliorer les prévisions de la production énergétique. Cependant, ces données sont sensibles et impliquent le développement d'une IA respectueuse de la confidentialité, mais également explicable, selon les normes européennes dans ce domaine. Les travaux du projet AI-NRGY visent à répondre à ces deux critères, d'apparence contradictoires.

Par Lukas Stippel, ancien-doctorant à PERSEE et membre du projet AI-NRGY (voir page 62),
Carla Gonçalves, Simon Camal, Georges Kariniotakis (PERSEE)

© Sander Weeteling - Unsplash

Dans le contexte de la transition énergétique, les systèmes énergétiques connaissent une transformation dont les deux principaux moteurs sont le déploiement à grande échelle des ressources énergétiques distribuées et la numérisation des réseaux électriques à tous les niveaux.

L'idée derrière le partage des données est de combiner des informations provenant de différentes sources afin d'améliorer les performances dans diverses fonctions telles que la modélisation, la prévision ou l'optimisation des réseaux électriques. Aujourd'hui, le partage des données a également démontré son intérêt dans d'autres secteurs tels que la santé et la finance. Dans le secteur de l'énergie, un cas typique est celui de la prévision à court terme de la production des centrales d'énergie renouvelable.

Les avantages de cette approche ont été démontrés dans la littérature ; cependant, dans les applications courantes, ces données ne sont pas librement accessibles, soit parce que les entreprises ne souhaitent pas les partager pour des raisons de concurrence, soit, dans le cas des compteurs intelligents, parce qu'elles sont protégées par des lois sur la protection de la vie privée telles que le RGPD. Nous avons donc besoin de modèles capables de préserver la confidentialité pendant l'apprentissage et la prédiction. L'objectif est de divulguer le moins d'informations possible afin d'empêcher la reconstitution des données d'origine (voir exemples ci-contre).

Cependant, la confidentialité n'est pas le seul critère que nous souhaitons garantir. Il faut également développer un modèle faisant preuve de fiabilité et de

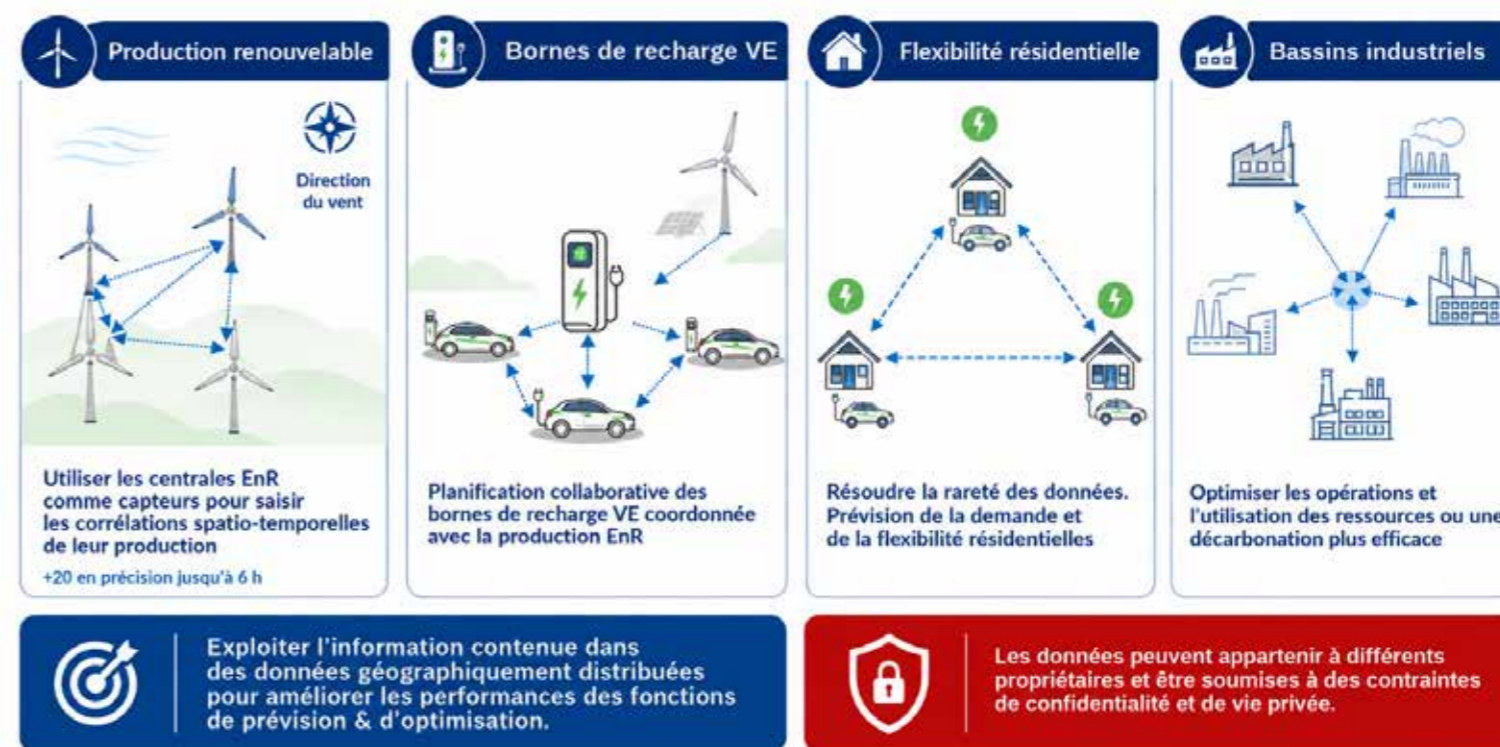
résilience, qui dans ce contexte signifie que les participants n'ont pas besoin de disposer de l'entièreté des données nécessaires à la prédiction.

Une première approche consiste à utiliser des arbres à gradient boosté (GBT) chiffrés. Ici, un ensemble d'arbres de décision est entraîné en ajoutant de nouveaux arbres, qui corrigent de manière additive les prédictions de l'ensemble actuel. Les GBT présentent deux avantages majeurs en ce qui concerne la résilience décrite ci-dessus. Par sa conception, l'algorithme des arbres ne tombe pas en panne si la fonction de perte, par exemple les critères de boosting, est bien choisie. De plus, on peut apprendre ou choisir une direction par défaut pour parcourir l'arbre si les informations nécessaires au choix de la direction font défaut. La confidentialité est préservée ici en répartissant les informations entre les par-

ties de manière à ce que toutes les parties doivent communiquer pour les exploiter.

Cependant, ces applications liées aux énergies renouvelables, qui concernent des infrastructures critiques, relèvent généralement du champ d'application de la loi européenne sur l'intelligence artificielle. Cette loi exige que les modèles d'IA utilisés dans ces cas soient explicables, la contribution de chaque composante doit pouvoir être identifiée.

Bien que l'approche présentée ci-dessus préserve la confidentialité et offre une certaine résilience, nous avons décidé de concevoir un modèle qui tente de répondre à la fois aux exigences de confidentialité, mais aussi d'interprétabilité. Enfin, il faut également prendre en compte un dernier aspect central : une



Exemples de cas d'utilisation du partage de données dans les réseaux électriques

© Lukas Stippel, Georges Kariniotakis et Simon Camal

plus grande précision des prévisions. L'objectif principal de ces travaux est de proposer un modèle capable de répondre à ces trois critères.

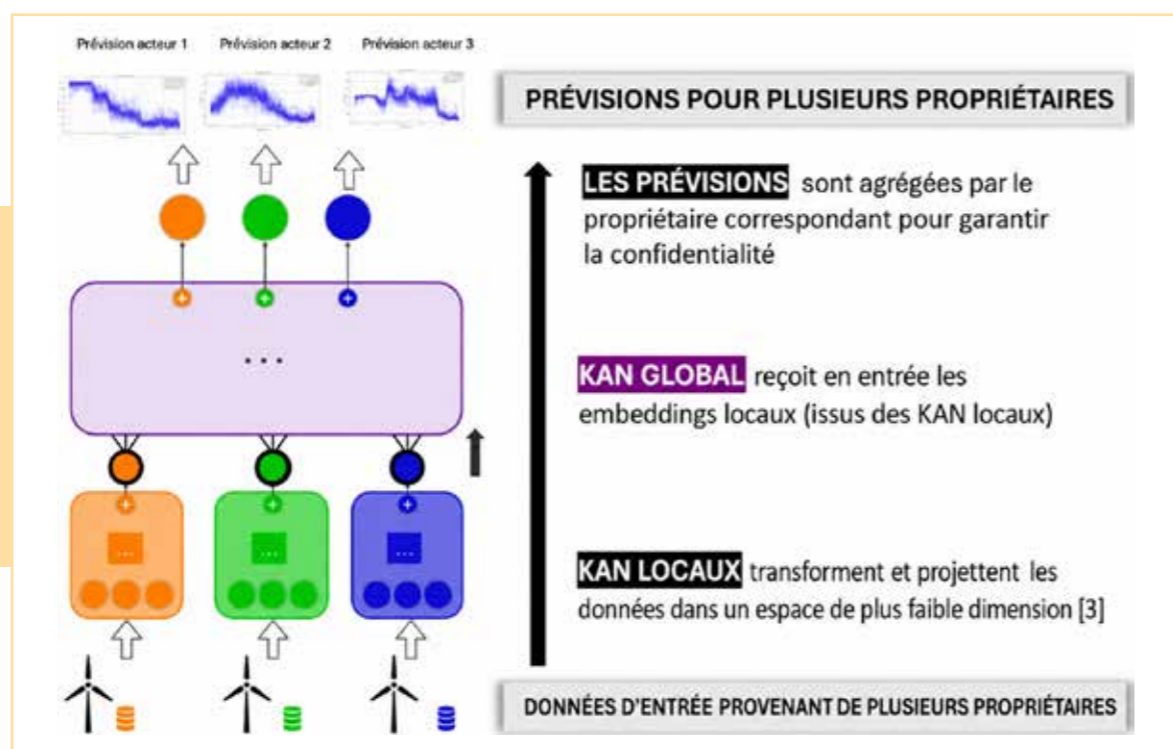
L'idée centrale du partage de données dans ce cas n'est pas de partager les données directement, mais plutôt de combiner des données prétraitées localement de manière à ce que les informations partagées ne puissent révéler aucune information privée. Cette stratégie est appelée fusion, et le prétraitement local peut être choisi de telle sorte qu'aucune information ne soit divulguée. Cette stratégie de préservation de la confidentialité permet, en soi, d'envisager un large éventail d'archétypes de modèles ; nous pouvons donc sélectionner celui qui répond à nos autres critères : haute précision, inter-prétabilité et confidentialité.

Un archétype de modèle relativement nouveau est ce qu'on appelle les réseaux de Kolmogorov-Arnold (KAN), des modèles d'apprentissage automatique complexes

mais explicables. Présentés lors de la conférence ICLR de 2025 par Liu et al., ceux-ci appliquent une approche différente de l'apprentissage profond par rapport aux réseaux neuronaux couramment connus. Les réseaux neuronaux appliquent des transformations simples aux arêtes de chaque couche et possèdent une fonction d'activation complexe à chaque nœud, où les arêtes sont agrégées. Les réseaux KAN inversent ce système : chaque arête est une fonction complexe et le nœud se contente de les additionner pour obtenir une sortie.

Les réseaux de Kolmogorov-Arnold (KAN) : des modèles d'apprentissage automatique complexes mais explicables

Nous devons donc démontrer la confidentialité de du système KAN. La question centrale est de savoir s'il est possible d'inverser le prétraitement pour accéder aux informations d'origine. Une projection



Système d'encryption du modèle KAN

© Carla Gonçalves, INESC TEC

UN PARTENARIAT EUROPÉEN

Ces travaux ont été menés en collaboration avec un laboratoire de l'INESC TEC (Portugal), dans le cadre du projet européen Enfield Open AI, financé par l'UE. Lukas Stippel a travaillé aux côtés de Carla Gonçalves, experte en apprentissage automatique respectueux de la vie privée pour les réseaux électriques. Les deux laboratoires ont ainsi pu mettre en commun leur expertise dans ce domaine.



© Enfield project

dans une dimension inférieure nous permet de démontrer qu'il n'existe pas d'inverse unique, mais au contraire un nombre infini d'inverses possibles, qui ne diminue pas avec le temps.

Dans un second temps, nous devons vérifier que ce modèle est aussi performant que les modèles de pointe de type « boîte noire » - dont le fonctionnement interne reste opaque - et s'il répond bien à nos autres critères. L'ensemble de données tirées du modèle KAN a donc été comparé à celles open source issu du défi GEFCOM 2014, qui fournit des observations historiques et des données de prévision numérique du temps (NWP) pour 10 parcs éoliens en Australie. En termes de performances, nous observons que le meilleur modèle de référence n'atteint qu'une précision supérieure de 1 % à celle du

modèle KAN, ce qui s'inscrit dans la fourchette de performances attendue.

Cette approche nous permet donc de faire un premier pas vers un apprentissage automatique collaboratif fiable et respectueux de la vie privée. Elle permet d'évaluer la valeur de la coopération et de vérifier les limites des prédictions, ce qui présente un intérêt pour la cybersécurité. L'exploitation de l'intégration de multiples sources de données peut s'avérer très bénéfique pour la transition énergétique. Les travaux de Lukas Stippel vont à présent se poursuivre en collaboration avec la chercheuse Claire Bizon-Monroc, dans le cadre des projets AI-NRGY et FlexTASE (voir page 64), afin d'étudier les incertitudes et le partage de données et d'énergie dans les communautés multi-énergétiques.



**Contrôle visuel d'une
couche de pérovskite
cristallisée**

*© Cyril FRESILLON - IPVF -
CNRS Images*

COMPLÉMENTARITÉ OPTOÉLECTRONIQUE CARACTÉRISATION IN SITU POUR LE VIEILLISSEMENT ACCÉLÉRÉ

Les cellules solaires à base de pérovskite constituent une technologie émergente prometteuse dans le domaine du photovoltaïque. Cependant, leurs performances élevées sont actuellement contrebalancées par des problèmes d'instabilité. Dans cet article, nous examinons comment l'utilisation simultanée de plusieurs méthodes de caractérisation peut permettre de mieux comprendre les causes de l'instabilité des pérovskites, et nous montrons comment ces techniques permettent de localiser précisément les zones endommagées au sein des cellules solaires.

Par Daniel Mc Dermott, doctorant à l'IPVF et membre du projet MINOTAURE (voir page 66)

Le terme « pérovskite » désigne une large famille de matériaux dont la structure cristalline suit un schéma ABX_3 , dans lequel un cation chargé positivement (site A) est entouré d'un métal, généralement du plomb (site B), qui est lui-même entouré d'halogénures (site X). Ces matériaux, dont les premiers représentants ont été documentés par Lev Perovski en 1839, sont courants dans la nature et certaines pérovskites sont connues depuis longtemps pour leurs propriétés optoélectroniques. Au tournant des années 2010, des pérovskites à base d'halogénures de plomb sont apparues comme des matériaux particulièrement prometteurs pour les appli-

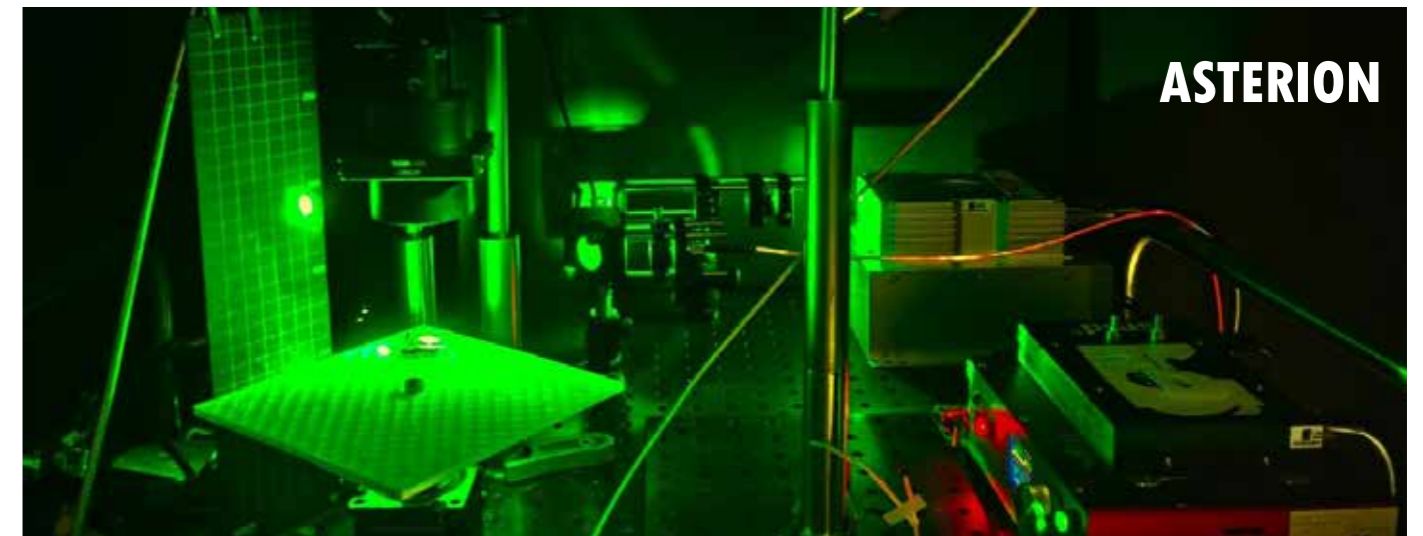
cations photovoltaïques. Depuis, elles concentrent une part majeure de la recherche dans le domaine.

Les pérovskites constituent des matériaux absorbants particulièrement intéressants pour les cellules solaires en raison de leurs coefficients d'absorption élevés et de leur bande interdite ajustable. Les pérovskites absorbent la lumière environ 1000 fois plus efficacement que le silicium - ce qui permet de réaliser des dispositifs 1000 fois plus fins. La bande interdite des pérovskites peut être ajustée en changeant légèrement la composition du matériau ; et les méthodes de fabrication et de dé-

position des pérovskites sont peu contraignantes. L'ensemble de ces propriétés en font un candidat matériaux particulièrement prometteur pour réaliser de structures "tandem", dans lesquels une cellule à base de pérovskite est fabriquée au-dessus d'une cellule à base de silicium, combinant les deux systèmes en série. Cependant, les pérovskites présentent un inconvénient de taille : elles sont très sensibles à la lumière, à la chaleur, à l'humidité et aux tensions électriques. En bref, toutes les conditions auxquelles une cellule solaire doit résister. Dans leur état actuel, les cellules solaires en pérovskite ne peuvent durer qu'environ 1 an en extérieur en France, bien moins que les 30 ans des cellules solaires en silicium.

Il est donc essentiel de comprendre précisément comment et pourquoi ces facteurs environnementaux endom-

magent les cellules solaires en pérovskite. Pour y parvenir, il faut suivre l'évolution des paramètres clés du dispositif au fur et à mesure de sa dégradation. Cependant, ces mesures peuvent prendre plusieurs semaines, et doivent potentiellement être répétées à chaque changement dans la composition de la pérovskite, dans l'architecture de la cellule solaire, ou dans les conditions d'utilisation (agrivoltaïsme, PV flottant...). Pour accélérer ces études, il est courant d'exposer les dispositifs à des conditions bien plus rudes (telles que 80°C et 80% d'humidité relative (HR)). Ces conditions peuvent accélérer les mécanismes physico-chimiques responsables de la dégradation, ce qui permet faire advenir le vieillissement en quelques heures seulement. Mais pour étudier et comprendre les mécanismes à l'œuvre, il est nécessaire de suivre de près l'évolution du système pendant cette période.



Afin de suivre l'évolution des performances optiques et électriques des cellules solaires au fur et à mesure de leur vieillissement, le Accelerated Solar-cell Test-bench with Electrical and Radiative In-situ ObservatiON (ASTERION)* a été mis au point. Ce banc intègre un dispositif complet de photoluminescence et un outil complet de caractérisation électrique, tous deux capables de traiter et de suivre l'évolution de 4 échantillons à la fois, dans une chambre climatique permettant d'imposer températures et des taux d'humidité élevés (80°C et 80% HR). La capacité à suivre plusieurs échantillons au cours d'un même cycle de mesure est cruciale pour extraire des informations significatives sur le vieillissement des cellules solaires en pérovskite et pour effectuer toute analyse statistique.

**Asterion était un autre nom donné au Minotaure dans la mythologie grecque.*

Techniques de caractérisation

Il existe de nombreuses méthodes pour étudier les propriétés des matériaux et des dispositifs liés à la dégradation des cellules solaires en pérovskite. Les travaux présentés ici ont choisi de se concentrer sur deux aspects essentiels au fonctionnement d'une cellule solaire performante : l'absorption de la lumière et la production d'électricité. Nous nous concentrerons donc sur la caractérisation par photoluminescence et par des mesures courant-tension. Ces mesures sont toutes deux réalisées in situ, c'est-à-dire pendant le vieillissement du dispositif, afin de mieux comprendre les mécanismes qui influencent la dégradation.

Photoluminescence



La photoluminescence est une technique de caractérisation optique particulièrement puissante, qui consiste à analyser la lumière réémise par l'échantillon en réponse à une illumination. Chaque photon absorbé dans le matériau excite un électron, qui conserve un certain temps l'énergie qu'il a reçu avant de se désexciter. Plusieurs voies de désexcitation sont possibles ; en particulier, l'électron peut réémettre un photon, générant ainsi un signal optique facilement mesurable.

L'intensité du signal de photoluminescence ainsi émis dépend de la concentration des électrons excités ; cette concentration est également liée à la tension électrique générée par l'effet photovoltaïque aux bornes de la cellule. Ainsi, la photoluminescence permet de réaliser une estimation purement optique de la tension interne du dispositif sous une illumination donnée.

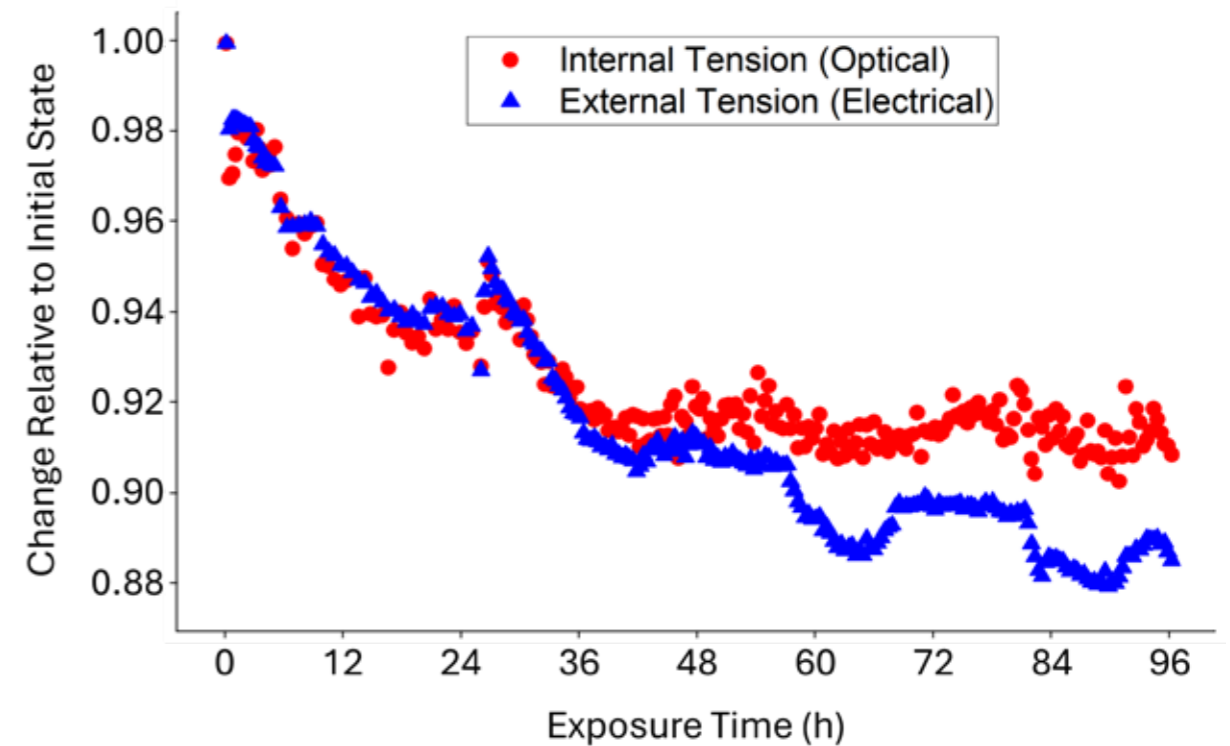
Courant-Tension



La caractérisation courant-tension (IV) est l'analyse la plus courante réalisée sur un dispositif photovoltaïque. Elle consiste à polariser le dispositif par l'application d'une tension électrique à ses bornes, et à mesurer le courant induit par ce forçage. Cette technique permet notamment d'estimer l'efficacité de conversion (PCE) de la cellule, en comparant la puissance électrique maximale produite par le dispositif à la puissance reçue sous forme radiative. La limite théorique pour les cellules conventionnelles s'établit à environ 30%, tandis qu'une architecture tandem permet d'atteindre 40%.

Le paramètre électrique sur lequel nous nous concentrons ici est la « tension en circuit ouvert » (VOC). Ce paramètre correspond à la tension de polarisation appliquée à laquelle aucun courant n'est prélevé sur le dispositif ; en d'autres termes, il s'agit de la tension maximale qui peut être produite par le dispositif. Cela revient essentiellement à définir VOC comme la limite électrique supérieure de l'énergie utile pouvant être extraite de la cellule solaire.

Si l'on compare l'évolution de la tension interne (déterminer via l'intensité de photoluminescence) et du VOC (déterminé électriquement), on compare en substance les limites supérieures du travail effectué au sein du matériau pérovskite lui-même et celles de l'ensemble du dispositif. La manière dont ces deux paramètres évoluent l'un par rapport à l'autre au fil du temps peut donc fournir des informations utiles sur les mécanismes responsables de sa dégradation.



Variation relative de la tension interne mesurée par voie optique (cercles rouges) et de la tension externe mesurée par voie électrique (triangles bleus).

Avant la mise en œuvre des mesures multi-échantillons, le vieillissement d'une cellule solaire en pérovskite a été réalisé à l'aide d'ASTERION dans une chambre climatique à 80°C et 80% d'humidité relative. La valeur de la tension interne a été extraite des spectres de photoluminescence, et la tension VOC a été extraite des courbes IV pour chaque cycle de mesure. Les variations relatives de ces deux valeurs par rapport à leurs valeurs initiales ont été représentées graphiquement en fonction du temps et sont présentées dans la figure 2. On constate sur la figure 2 que, pendant les 60 premières heures du suivi, la dégradation optique et électrique évolue de la même manière. Cela suggère que la dégradation observée pendant cette période est due à des modifications du matériau absorbant à base de pérovskite lui-même. Après 60 heures, cependant, la tension interne cesse de varier, mais une légère dégradation est encore observée au niveau du VOC. Cela indique

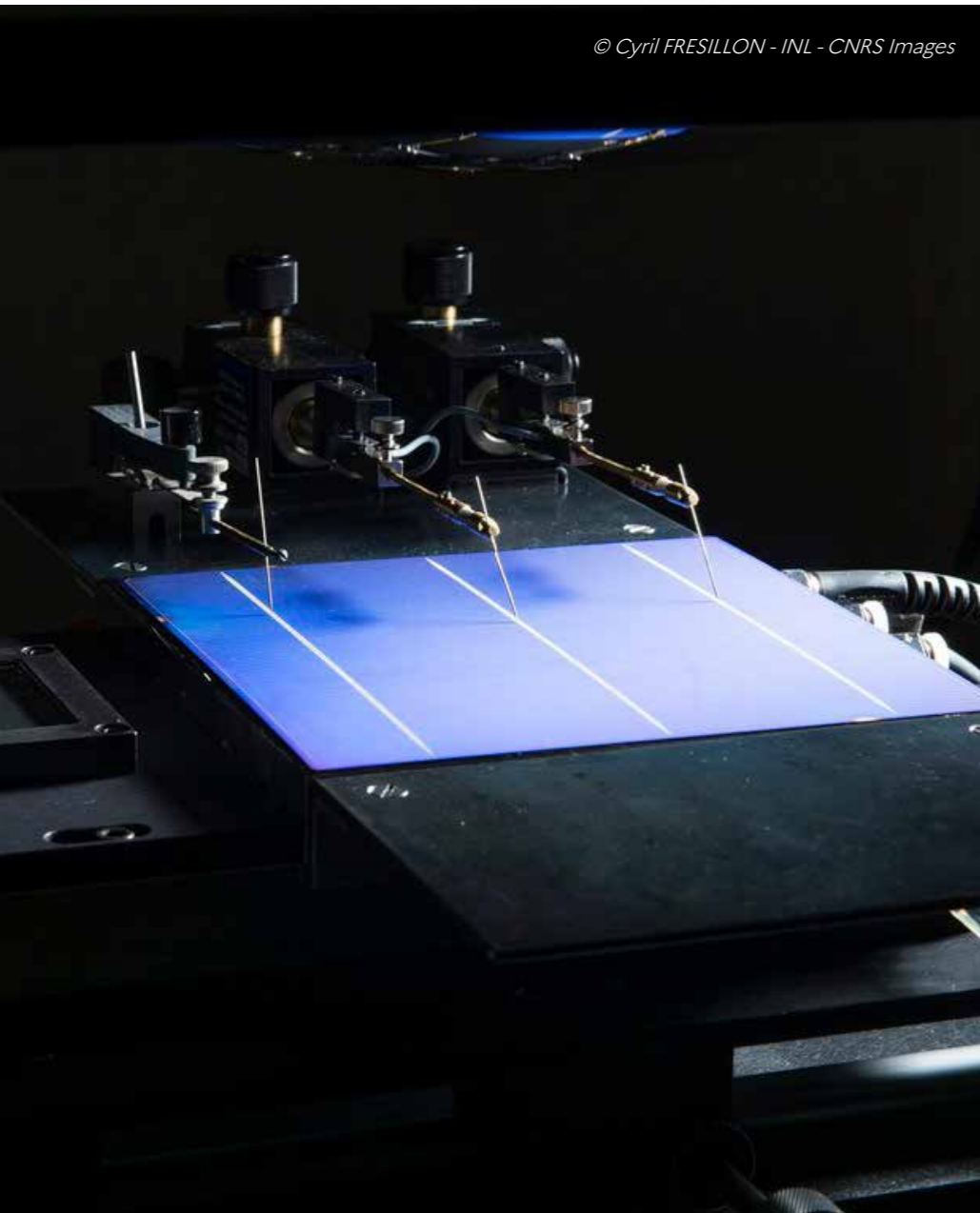
que toute dégradation survenant à ce moment-là était confinée à d'autres zones du dispositif, telles que les contacts des couches de transport.

Il apparaît clairement que le recours à la fois à des mesures optiques et électriques permet de déterminer avec précision les causes et les zones de dégradation dans les cellules solaires en pérovskite. Ces travaux peuvent ensuite être approfondis sur deux fronts, à l'aide du système ASTERION à échantillonnage multiple, afin d'étudier plus en détail les causes de la dégradation. D'une part, en procédant à une caractérisation approfondie des dispositifs avant et après l'essai afin d'identifier les signatures de vieillissement in situ correspondant à des phénomènes microscopiques particuliers ; d'autre part, cela permettra d'effectuer une comparaison statistiquement significative entre les essais de vieillissement accéléré en laboratoire et la dégradation observée en extérieur, dans des conditions réelles.

LES CELLULES TANDEM À L'ÉPREUVE

MODÉLISATION MULTIPHYSIQUE DU RENDEMENT EXTÉRIEUR

Par Marion Gonçalves, doctorante à l'INL sous la direction de Mohamed Amara et Emmanuel Drouard, membre du projet IOTA (voir page 63)



© Cyril FRESILLON - INL - CNRS Images

Simulateur solaire pour la caractérisation de cellules photovoltaïques, permettant de calculer le rendement de conversion des cellules photovoltaïques.

Les cellules tandem, sujet de recherche du projet IOTA, comptent parmi les technologies photovoltaïques les plus prometteuses pour améliorer la conversion de l'énergie solaire en électricité. Si leurs rendements sont généralement évalués en laboratoire dans des conditions standardisées, leurs performances réelles dépendent des variations d'ensoleillement et de température auxquelles elles sont soumises en extérieur.

Dans quelle mesure ces fluctuations modifient-elles l'énergie délivrée par ces cellules ? Pour répondre à cette question, un modèle multiphysique, qui couple les phénomènes optiques, électriques et thermiques peut être développé afin d'estimer l'énergie produite au cours du temps en fonction des conditions climatiques locales.

Les cellules photovoltaïques en Silicium cristallin dominant largement le marché. Leur rendement de conversion record, tant en laboratoire qu'à l'échelle industrielle, se rapproche de plus en plus du maximum théorique, établi à 29 %. Le principal phénomène qui restreint leurs performances est la thermalisation : l'excès d'énergie des photons incidents par rapport à l'énergie de bande interdite du Silicium est dissipé en chaleur. En effet, la bande interdite d'un semi-conducteur correspond à l'énergie minimale nécessaire pour faire circuler un électron, mais elle fixe aussi la quantité maximale d'énergie électrique récupérable par photon.

Une nouvelle architecture de cellules appelées « tandem » permet de dépasser ce rendement limite théorique. Elle combine deux cellules photovoltaïques l'une sur l'autre. Chaque sous-cellule est optimisée pour convertir une partie différente du spectre solaire, ce qui réduit la thermalisation. La sous-cellule supérieure (de bande interdite élevée) absorbe les photons de grande énergie, tandis que la sous-cellule inférieure capte les photons de plus faible énergie, non absorbés par la sous-cellule supérieure. Le gain en efficacité provient principalement d'une meilleure conversion du rayonnement en électricité, et non d'une absorption d'une plus grande partie du spectre solaire.

Tandem Pérovskite/Silicium : la configuration la plus étudiée de nos jours

La sous-cellule inférieure est généralement composée de Silicium cristallin, technologie la plus produite dans le monde. Pour la sous-cellule supérieure, les pérovskites hybrides halogénées sont des matériaux prometteurs. Leur bande interdite plus élevée que celle du silicium cristallin, est ajustable via leur composition chimique. Ce sont des couches minces (épaisseur inférieure au micromètre), qui offrent la

perspective d'une fabrication à faible coût grâce à des procédés de dépôt relativement simples. Mais des challenges persistent : ces matériaux sont encore peu stables dans le temps. Il est également difficile d'avoir un maintien de leurs performances sur des surfaces de cellules à taille réelle.

Configuration électrique des cellules tandem

Dans les cellules tandem, plusieurs schémas de connexion électrique existent :

- Les sous-cellules sont connectées en série, architecture dite à « Deux-terminaux ». Cela nécessite que les courants produits par les sous-cellules soient proches pour garantir des performances élevées. Généralement, la sous-cellule supérieure est directement déposée sur la sous-cellule inférieure, et une couche d'interconnexion les relie.
- Chaque sous-cellule possède un circuit électrique indépendant, architecture dite à « Quatre-terminaux ». Le plus grand nombre de couches de cette structure augmente les pertes par absorption parasite de la lumière. Les sous-cellules sont fabriquées séparément et assemblées mécaniquement. Leur fabrication requiert plus d'étapes, mais serait plus facilement intégrable dans l'industrie des modules en c-Si.
- Une architecture dite à « Trois-terminaux » permettrait de lever les verrous des deux technologies précédentes. L'intérêt pour cette configuration est grandissant, mais cette solution est encore émergente.

La configuration électrique la plus étudiée actuellement est celle à 2 terminaux ou 2T (moins de pertes optiques et coûts de fabrication plus faibles). Le rendement record des cellules photovoltaïques tandem Pérovskite/Silicium 2T dépasse les 35 %,



ce qui est bien supérieur à la limite théorique des cellules conventionnelles en Silicium cristallin.

Effacité en conditions de test standard VS Production d'électricité en conditions réelles

Le rendement est mesuré dans des conditions de laboratoire appelées conditions de test standard (STC). Elles correspondent à un éclairage constant de 1000 W/m² sous un spectre de référence nommé AM1.5 (représentatif de l'ensoleillement moyen annuel des régions soumises à un climat tempéré), et à une température de cellule fixée à 25°C. L'efficacité des cellules tandem 2T, contrainte par l'équilibre des courants des sous-cellules, est optimisée sous ces conditions spécifiques.

Or, les cellules photovoltaïques produisent en réalité de l'électricité en extérieur, où l'éclairage et la température varient à la fois au cours de la journée et des saisons, et selon la localisation. Ces fluctuations perturbent l'équilibre des courants obtenu sous STC : il est possible qu'une des sous-cellules produise plus de courant que l'autre. Cela diminuerait certainement la puissance totale générée. Pour quantifier le gain réel de performances des cellules tandem par rapport aux cellules photovoltaïques standard, ce travail, qui s'inscrit dans

le projet IOTA, s'intéresse au productible (électricité délivrée par la cellule sur un an à un endroit donné), plutôt qu'au rendement sous STC.

Estimation du productible des cellules tandem grâce à la modélisation multiphysique avancée

Notre travail consiste à développer un modèle multiphysique pour simuler la production d'électricité des cellules tandem sur un an, à une localisation choisie. Ce modèle est composé de plusieurs briques qui interagissent ensemble :

- Un algorithme qui détermine la position du Soleil pour chaque heure, afin d'avoir l'angle d'incidence de la lumière dans le plan de la cellule photovoltaïque ;
- Un modèle d'irradiance spectrale qui estime la puissance du rayonnement solaire reçue par la cellule, en fonction de la longueur d'onde des photons, à chaque heure ;
- Un modèle optique qui détermine l'absorption de la lumière dans chaque sous-cellule, en fonction de la longueur d'onde également. Ses données d'entrée sont l'angle d'incidence et les propriétés des matériaux qui composent la cellule, et de ceux qui la protègent en extérieur. En associant ce spectre d'absorption avec l'ir-

radiance spectrale, il est possible de connaître la part du rayonnement solaire absorbée par chaque sous-cellule ;

- Un modèle électrique qui quantifie la part de lumière absorbée convertie en électricité. Pour cela, un modèle dit « à diodes » est utilisé : il s'agit d'une représentation largement répandue d'une cellule photovoltaïque via un circuit électrique équivalent. Il permet d'obtenir une relation entre le courant de la cellule et sa tension, afin de trouver le point de fonctionnement optimal (MPP) où la puissance produite est maximale. Chaque sous-cellule a son propre circuit électrique équivalent, et pour une architecture tandem à deux terminaux, ils sont reliés en série. Les caractéristiques électriques (puissance, courant, tension) au MPP sont ainsi obtenues.
- Un modèle thermique qui estime la température de la cellule photovoltaïque, via un bilan détaillé entre les puissances émises et reçues par la cellule. Elle influe sur les performances électriques.

La puissance maximale produite à chaque pas de temps horaire permet d'estimer le productible annuel de la cellule tandem à un endroit donné.

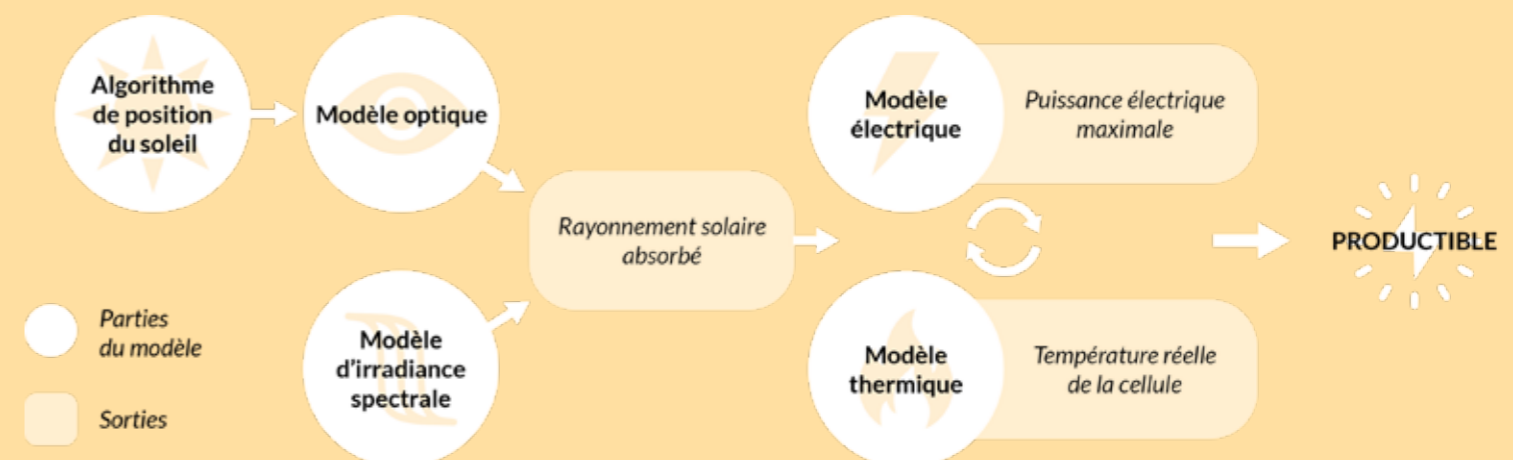
Plusieurs analyses sont possibles à partir de ces résultats :

- Analyser l'impact de la contrainte d'équilibre des courants entre les sous-cellules sur la production d'électricité en conditions réelles de la cellule tandem 2T selon les zones géographiques. Bien que le déséquilibre des courants soit accentué en conditions réelles par rapport aux STC, les pertes de production d'énergie qui en résultent peuvent être inférieures à celles observées sur le courant total de la cellule ;
- Comparer l'énergie produite à celle d'une cellule en Silicium cristallin, afin de quantifier les gains réels de production d'électricité apportés par les cellules tandem ;
- Enfin, donner des clés pour optimiser l'architecture de la cellule tandem afin de maximiser la production d'énergie selon la localisation, et non le rendement sous STC.

Ce modèle a vocation à être appliqué aux dispositifs développés dans le cadre du projet IOTA, et a pour objectif plus lointain de devenir un outil pour la communauté qui travaille sur les cellules tandem.

CALCULER LE RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE

La simulation est réalisée sur une année, à pas de temps réguliers, afin d'estimer le productible.



FILMS CELLULOSIQUES BIOSOURCÉS

POUR LE PHOTOVOLTAÏQUE FLEXIBLE

Face à l'usage encore majoritaire de films pétrosourcés pour la protection des modules photovoltaïques flexibles, le projet BioFlexPV explore une alternative biosourcée à base de cellulose modifiée. Menés par le LCPO et l'IMS, ces travaux conduisent à des films transparents, hydrophobes et flexibles, préparés selon un procédé plus durable et transposable par extrusion réactive.

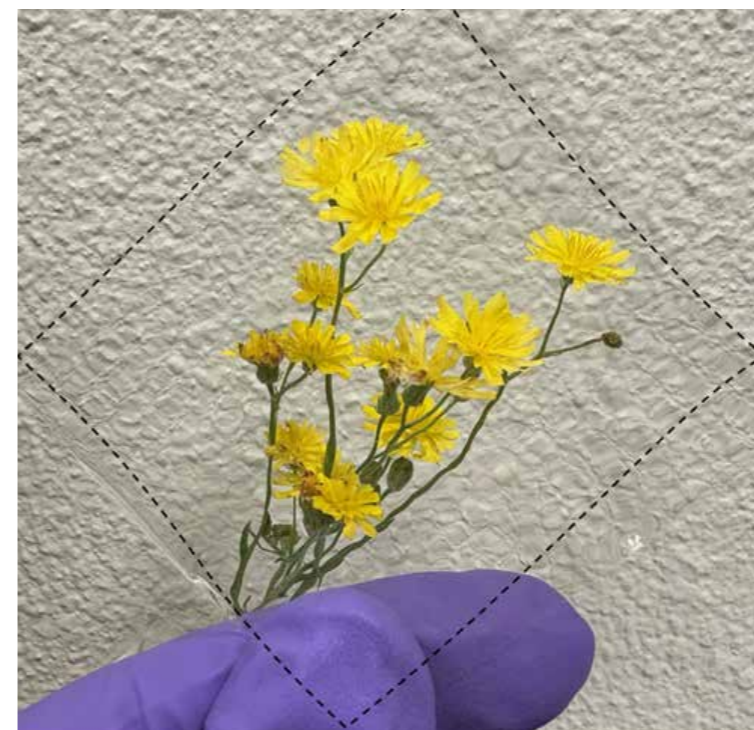
Par Mohamed Aouay, Thomas Vidil, Stéphane Grelier, Adèle Gapin, Eric Cloutet et Henri Cramail (LCPO), et Sylvain Chambon (IMS), membres du projet BioFlexPV (voir page 65)

Le développement du photovoltaïque flexible ouvre de nouvelles perspectives pour produire de l'énergie solaire sur des supports plus légers, plus fins et plus faciles à intégrer que les modules classiques. Ces nouvelles architectures peuvent trouver des applications sur des surfaces où les panneaux conventionnels sont difficiles à installer : bâtiments à faible portance, objets nomades, dispositifs souples ou surfaces courbes. Mais cette flexibilité impose aussi de nouveaux défis. Les cellules solaires doivent être protégées de l'humidité, de l'oxygène et des contraintes mécaniques, tout en conservant une bonne transmission de la lumière. Les films barrières (ou films de protection en face avant) jouent donc un rôle clé dans la durée de vie des modules. Aujourd'hui, ces films sont encore majoritairement issus de ressources pétrosourcées. Leur remplacement par des matériaux plus durables constitue un enjeu important pour réduire l'impact environnemental des futures générations de modules photovoltaïques.

Dans les modules photovoltaïques flexibles, les films de protection situés sur la face avant des panneaux jouent un rôle essentiel : ils doivent préserver les cellules de l'humidité, de l'oxygène et des contraintes mécaniques, tout en restant légers, transparents et

souples. Aujourd'hui, une grande partie de ces films repose encore sur des matériaux issus de ressources non renouvelables. Dans le cadre du projet BioFlexPV, le consortium cherche à développer ces films de protection pour les faces avant à partir de matériaux biosourcés ou issus de ressources abondantes. Pour ce faire, des chercheurs du LCPO et de l'IMS développent de nouveaux films biosourcés à base de cellulose modifiée. L'objectif est de préparer des matériaux transparents, imperméables et flexibles, compatibles avec des procédés de mise en forme plus proches de l'échelle industrielle.

Dans ce contexte, le projet BioFlexPV vise à développer des solutions d'encapsulation plus légères, plus facilement démontables et à plus faible empreinte environnementale. Les matériaux biosourcés, et en particulier la cellulose, représentent une piste intéressante. Abondante, renouvelable et déjà largement étudiée, la cellulose possède un fort potentiel pour concevoir de nouveaux films fonctionnels comme support pour les films barrières en face avant. Toutefois, sous sa forme native, elle reste trop hydrophile et difficile à mettre en forme pour répondre directement aux exigences des modules photovoltaïques.



Films de laurate de cellulose obtenus par réaction de transestérification (la ligne en pointillé délimite les bords du film transparent)

Les premiers films obtenus présentent une bonne transparence, une surface hydrophobe et une meilleure aptitude à la déformation que la cellulose non modifiée. Ces propriétés constituent une première étape vers des supports biosourcés capables d'entrer dans la composition de films barrières en face avant pour modules photovoltaïques flexibles.

Modifier la cellulose pour la rendre plus adaptée

L'un des objectifs de nos travaux est de transformer la cellulose en un matériau plus compatible avec les besoins du photovoltaïque flexible. Pour cela, nous avons développé une stratégie de modification chimique permettant de greffer de longues chaînes alkyles sur la cellulose. Le matériau obtenu, appelé cellulose laurate, combine plusieurs propriétés recherchées : il devient plus hydrophobe, plus flexible et peut être mis en forme de film transparent autosupporté.

Cette modification agit comme une forme de plastification interne : les chaînes greffées apportent de la mobilité au matériau sans devoir ajouter un plastifiant externe.

Ce point est important, car les additifs peuvent parfois migrer dans le temps et affecter la stabilité du matériau. Ici, la flexibilité est directement introduite dans la structure de la cellulose modifiée.

Un procédé plus durable et plus évolutif

Au-delà des propriétés du matériau, un autre enjeu majeur concerne le procédé de fabrication. Les modifications chimiques de la cellulose sont souvent réalisées en solution, dans des conditions diluées, avec des temps de réaction longs. Ces approches sont utiles pour comprendre et optimiser la chimie, mais elles restent difficiles à transposer à grande échelle.

Pour répondre à cette limite, nous avons transféré la réaction vers un procédé d'extrusion réactive. Cette approche permet de combiner la transformation chimique et le mélange mécanique dans un procédé continu, plus proche des outils utilisés industriellement dans le domaine des polymères. L'un des résultats importants de ce travail est la possibilité de travailler à haute teneur en cellulose, jusqu'à 60 % massique par rapport au solvant, tout en conservant des propriétés proches de celles obtenues en solution.

Ce passage de la synthèse en solution à l'extrusion ne représente pas seulement un changement d'échelle. Il permet aussi de réduire le temps de procédé, la quantité de solvant utilisée et la consommation énergétique associée.

Des films pour les futures architectures PV

Les films de cellulose laurate obtenus ne constituent pas encore, à eux seuls, des films barrières complets. Ils représentent plutôt une première brique matérielle : un support biosourcé, transparent, hydrophobe et flexible, qui pourra ensuite être associé à d'autres couches fonctionnelles pour améliorer les propriétés barrières à l'oxygène et à la vapeur d'eau.

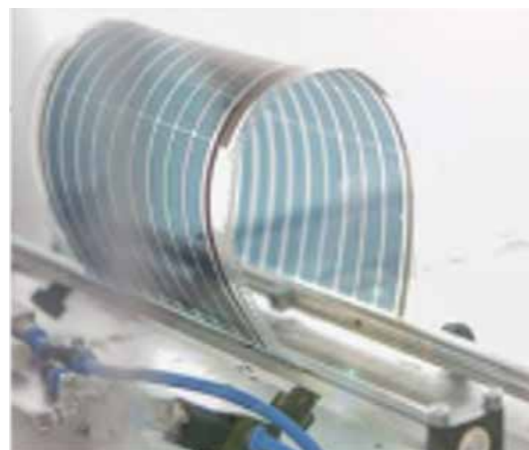
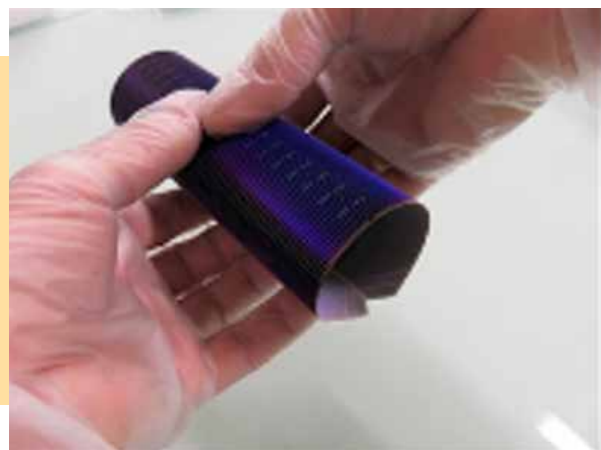
La suite du projet consistera donc à intégrer ces films dans des architectures multicouches adaptées aux contraintes du photovoltaïque et, en particulier, en y déposant des couches denses inorganiques et/ou hybrides. Les performances devront être évaluées à plusieurs niveaux : propriétés optiques, résistance mécanique, stabilité thermique, résistance à l'humidité, propriétés barrières et compatibilité avec les modules photovoltaïques.

Ces travaux s'inscrivent dans une logique plus large d'éco-conception. L'objectif n'est pas seulement de remplacer un matériau par un autre, mais de repenser l'ensemble de la chaîne : origine des ressources, procédé de transformation, intégration dans le module, durée de vie, démontabilité et fin de vie. À terme, ces films pourraient contribuer au développement de modules photovoltaïques flexibles plus légers, plus durables et plus facilement recyclables.

60%

C'est la réduction de l'impact global du procédé en extrusion réactive que souligne une première évaluation par l'outil DOZN™, par rapport à l'approche en batch.

L'objectif n'est pas seulement de remplacer un matériau par un autre, mais de repenser l'ensemble de la chaîne.



Intégration du film dans des modules PV

© CEA INES / Asca



Ferme agrivoltaïque expérimentale et sa parcelle témoin
© Energy 4 Climate - SIRTÀ

PV ORGANIQUE SEMI-TRANSPARENT UNE ALTERNATIVE PROMETTEUSE POUR L'AGRIVOLTAÏSME

L'agrivoltaïsme permet de concilier production agricole et conversion d'énergie solaire sur une même surface. Nos équipes travaillent à développer des cellules et mini-modules photovoltaïques organiques semi-transparents fabriqués entièrement par voie liquide. Ceux-ci laissent passer une partie du rayonnement utile pour la photosynthèse des plantes tout en produisant de l'électricité.

Par Camille Frouin (XLIM/CINaM) et Parwaz Asif (XLIM), doctorants du projet SMART4MODULE (voir page 63), encadrés par Johann Bouclé (XLIM), Olivier Margeat (CINaM) et Sylvain Vedraïne (XLIM)

Et si les mêmes mètres carrés de terre servaient à la fois à faire pousser des tomates et à produire de l'électricité renouvelable ? C'est l'enjeu de l'agrivoltaïsme (ou Agri-PV), une approche qui combine agriculture et photovoltaïque sur une même parcelle.

Le concept d'Agri-PV connaît une croissance spectaculaire : de 5 MW de capacité installée en 2012 à 18.4 GW en 2024. Cependant les installations actuelles reposent majoritairement sur des modules photovoltaïques en silicium opaques, disposés en rangées avec des espacements importants pour ne pas priver les cultures de lumière. Cette contrainte limite le po-

tentiel de la surface disponible, ne permettant pas de couvrir à 100 % la parcelle agricole.

La technologie OPV (organic photovoltaic) quant à elle, permet l'obtention de dispositifs semi-transparents par le choix des matériaux qui la composent. Cette technologie présente des performances en constante évolution, un poids spécifique réduit, une durée de retour énergétique limitée et une flexibilité importante. Ainsi, même si d'autres technologies photovoltaïques semi-transparentes peuvent être pertinentes pour l'application, l'OPV apparaît comme une alternative particulièrement intéressante par rapport au cahier des charges de l'Agri-PV.

LE PHOTOVOLTAÏQUE ORGANIQUE

Le photovoltaïque organique (OPV) repose sur des semi-conducteurs à base de molécules carbonées, polymères conjugués et petites molécules, capables de convertir la lumière en électricité. Contrairement au silicium, les matériaux organiques sont déposés en couches minces par des techniques d'impression compatibles avec des substrats flexibles et des solvants verts. L'intérêt majeur de l'OPV pour l'agrivoltaïsme réside dans la possibilité d'exploiter le concept de « sélectivité spectrale ». En effet la sélection des matériaux qui composent l'architecture (couche active, électrodes transparentes, interfaces) est cruciale car ils doivent absorber une partie du rayonnement solaire pour la conversion énergétique, et laisser passer le rayonnement photosynthétiquement actif afin que cette lumière atteigne la plante.

Innover des cellules aux électrodes

C'est dans ce contexte que s'inscrit la collaboration de quatre laboratoires partenaires au sein du projet SMART4MODULE :

- Le XLIM (Limoges) prend en charge le développement des cellules OPV et des électrodes transparentes innovantes.
- Le CINaM et l'IM2NP (Marseille) apportent respectivement leur savoir-faire en technologies d'impression grande surface et en modélisation optique des architectures.
- Le LAPLACE (Toulouse) se consacre à la définition des facteurs de caractérisation pour l'application de l'Agri-PV.

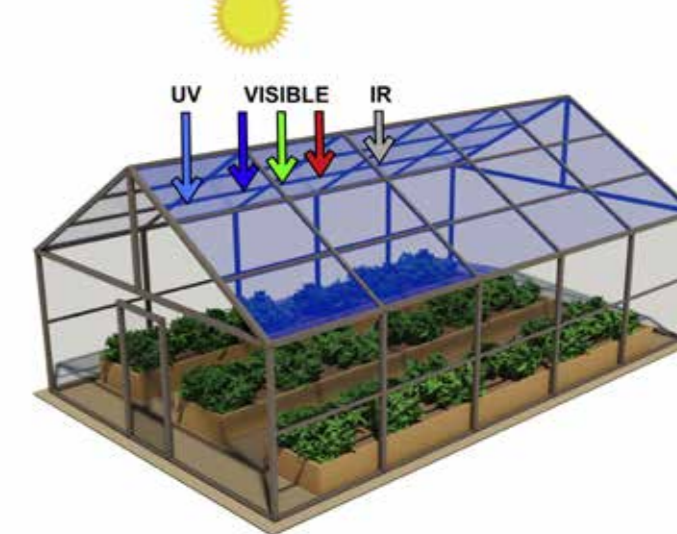
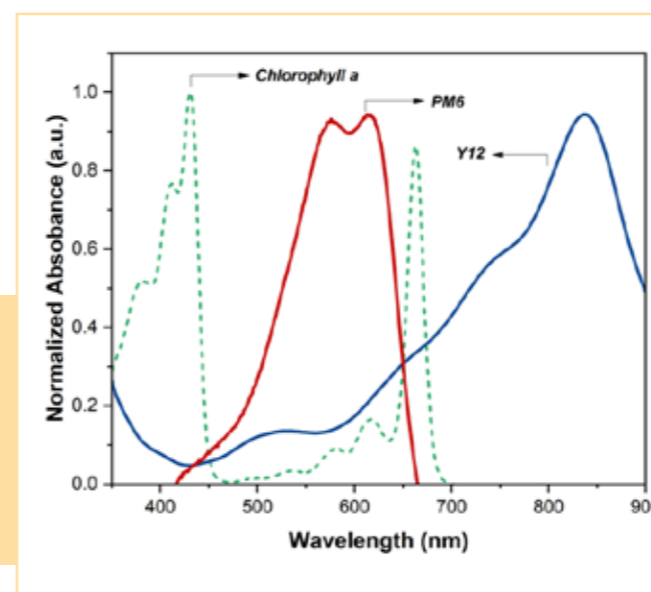
Ces laboratoires exploitent ainsi une couche active à base du mélange PM6:Y12. Ce sont ces matériaux qui assurent la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique tout en répondant au critère de sélectivité spectrale. En effet Y12 absorbe majoritairement dans le proche infrarouge, restant relativement transparent aux longueurs d'ondes nécessaires à la croissance des plantes. De même, le polymère PM6 absorbe majoritairement autour de 580nm, correspondant au minimum d'absorption du rayonnement photosynthétiquement actif (ou PAR). La couche active PM6:Y12 est donc tout à fait complémentaire de l'absorption de systèmes photosynthétiques comme la chlorophylle-a (figure 2), et permet d'assurer à la fois une conversion d'énergie et une transmission de la lumière pour la croissance des plantes.

Module photovoltaïque organique de référence, surface active de 20cm²



Les électrodes d'une cellule photovoltaïque organique semi-transparente sont également des couches cruciales : elles doivent extraire efficacement les charges photo-générées et laisser passer la lumière qui n'est pas absorbée par la couche active. Ce double impératif constitue un verrou technologiques majeurs de l'OPV semi-transparent, notamment pour l'agrivoltaïsme. Afin d'établir des dispositifs de référence reproductibles nous avons fait le choix d'une électrode d'argent évaporé thermiquement de 20nm d'épaisseur. Dans ces conditions, le film d'argent reste conducteur et laisse passer une fraction significative de la lumière.

Cette première approche a permis de réaliser un mini-module semi-transparent référence ayant un rendement de conversion énergétique de 6.9%, pour une surface active de 20cm² (surface comprenant les cellules seulement). En prenant en compte la surface totale du mini-module, incluant les cellules photovoltaïques ainsi que les bandes transparentes d'interconnexion, ce mini-module transmet effectivement 25% du spectre utile aux plantes et fournit une puissance maximale de 140mW, pour donner un ordre de grandeur, un mètre carré de tels modules pourrait générer environ 40 W. Ces premiers résultats démontrent un premier mini-module semi-transparent référence adapté à l'Agri-PV.



Aperçu d'une serre intégrant des modules photovoltaïques organiques semi-transparentes

Parvenir à de l'OPV 100% imprimable

L'évaporation thermique de l'électrode d'argent présente deux limites : d'une part, l'épaisseur minimale de percolation limite sa transmission, d'autre part, cette technique n'est pas compatible avec des technologies d'impression. Pour dépasser ces verrous, nous explorons une approche alternative basée sur les nanofils d'argent. Ces nanofils déposables par voie liquide forment un réseau conducteur et offrent une excellente conductivité ainsi qu'une transparence élevée (85% à 550nm).

Les prochaines étapes consistent à optimiser les paramètres de dépôt, l'objectif étant de démontrer un gain significatif en transmission (visant une transmission effective du spectre utile aux plantes supérieure à 30%) tout en maintenant des performances photovoltaïques comparables aux modules de référence. Cela ouvrirait ainsi la voie à des modules OPV entièrement imprimables pour l'agrivoltaïsme.

Comparaison des zones d'absorption de la couche active PM6:Y12 (en rouge et bleu) et de la chlorophylle-a (en vert) : les matériaux organiques absorbent l'énergie solaire dans les régions du spectre inutilisées par les plantes.

MODÉLISER LA PRODUCTION PV

EN SITUATION AGRICOLE

Le projet AgriPV-ER vise à améliorer la connaissance des impacts réciproques des productions simultanées photovoltaïque et agricole sur une même parcelle, en accordant une attention particulière à l'impact sur les plantes. En particulier il cherche à améliorer la modélisation d'une installation photovoltaïque en prenant en compte l'impact des cultures sur la production d'électricité, en produisant les cartes d'éclairement reçues par les cultures pour optimiser la localisation des capteurs d'éclairement et en cherchant une commande de la position des modules permettant d'assurer un compromis optimal entre production agricole et production photovoltaïque.

Par Moira I. Torres Aguilar, post-doctorante au GeePs et membre du projet AgriPV-ER (voir page 63)

L'amélioration rapide de la technologie photovoltaïque (PV) a permis un déploiement accéléré et une baisse du coût des modules PV au cours des 20 dernières années, entraînant une forte augmentation de la capacité installée mondiale. De plus, les progrès technologiques ont non seulement permis d'améliorer le rendement des cellules solaires, mais aussi de capter de l'énergie sur les deux faces de la cellule (bifaciale) plutôt qu'uniquement sur la face avant (monofaciale).

Pour évaluer correctement la viabilité des projets solaires et accélérer l'intégration du photovoltaïque dans les réseaux électriques, il est nécessaire d'estimer et de prévoir avec précision la puissance photovoltaïque produite en un lieu et à un moment donné. À cette fin, des modèles photovoltaïques de complexité variable simulent le fonctionnement des modules en conditions réelles, en tenant compte de différentes variables physiques et météorologiques, dont les plus importantes sont l'éclairement inci-

dent sur les deux faces de la cellule bifaciale, la température du module, le spectre solaire, etc.

Pour modéliser l'éclairement incident, les modèles de haute précision utilisent souvent le tir de rayons, une méthode de simulation précise qui consiste à suivre le trajet des rayons lumineux individuels entre le ciel et la surface des cellules solaires, en tenant compte de leurs interactions avec l'environnement. C'est une méthode de Monte-Carlo qui nécessite le tirage au hasard de millions de trajets optiques. L'un de ses inconvénients est son coût de calcul élevé. À l'inverse, le modèle à facteurs de forme peut sacrifier une certaine précision en calculant les facteurs de forme entre toutes les surfaces, aux approximations géométriques 2D des modules PV près. Son coût de calcul est bien moindre, ce qui le rend adapté à la plupart des analyses. Malgré sa moindre complexité, certaines variables clés, comme le coefficient de réflexion du sol (albédo), peuvent être ajustées avec précision, permettant ainsi son utilisation pour la modélisation d'installations agrivoltaïques bifaciales.

Impact de l'agrivoltaïsme sur la production photovoltaïque

Les modules PV monofaciaux ont longtemps dominé le marché. Cependant, la technologie bifaciale s'est progressivement imposée au cours de la dernière décennie, avec une part de marché projetée à 95 % en 2035, grâce à leur rendement énergétique accru et à leur adaptabilité à différents climats, orientations et applications. La capacité de produire de l'énergie sur les deux faces des modules, et non plus sur une seule, leur permet de tirer parti du

rayonnement direct et diffus réfléchi à la fois par le sol et par les modules adjacents.

C'est là que la présence des cultures intervient. La quantité d'éclairement réfléchi par une surface dépend de son albédo. Ce coefficient varie entre une surface totalement absorbante (0) et une surface totalement réfléchissante (1). Pour l'herbe ou les cultures agricoles, on observe généralement un coefficient compris entre 0,2 et 0,25, tandis que pour un sol nu, il est proche de 0,17. Le graphique de la page suivante illustre la variation de l'albédo journalier d'une instal-

L'AGRIVOLTAÏSME

En situation de changement climatique global et de croissance rapide de la population humaine l'agrivoltaïsme s'avère une solution potentielle au besoin croissant d'utiliser les terres arables pour la production alimentaire et la production d'électricité. En effet, il peut présenter des avantages réciproques au sein du nexus eau-énergie-alimentation : protection thermique des cultures, réduction de la consommation d'eau grâce à une évapotranspiration diminuée et répartition optimisée du rayonnement solaire sur les cultures. Coté photovoltaïque, la présence de cultures crée un microclimat sous les modules, favorisant un refroidissement par convection qui abaisse la température des modules PV et améliore ainsi le rendement électrique.

Il existe différentes architectures d'installation PV sur un champ agricole qui peuvent être associées à une grande variété de cultures en fonction du climat local afin d'optimiser la double utilisation des terres. L'objectif est d'avoir une production double avec un impact négatif minime ou même un impact positif sur les cultures. Par exemple, lorsque des cultures poussent entre et sous les rangées de modules PV transparents, elles peuvent capter le rayonnement solaire non absorbé qui les traverse, bénéficier de l'ombrage et être protégées des aléas climatiques tels que le fort ensoleillement, la chaleur, la sécheresse et la grêle.

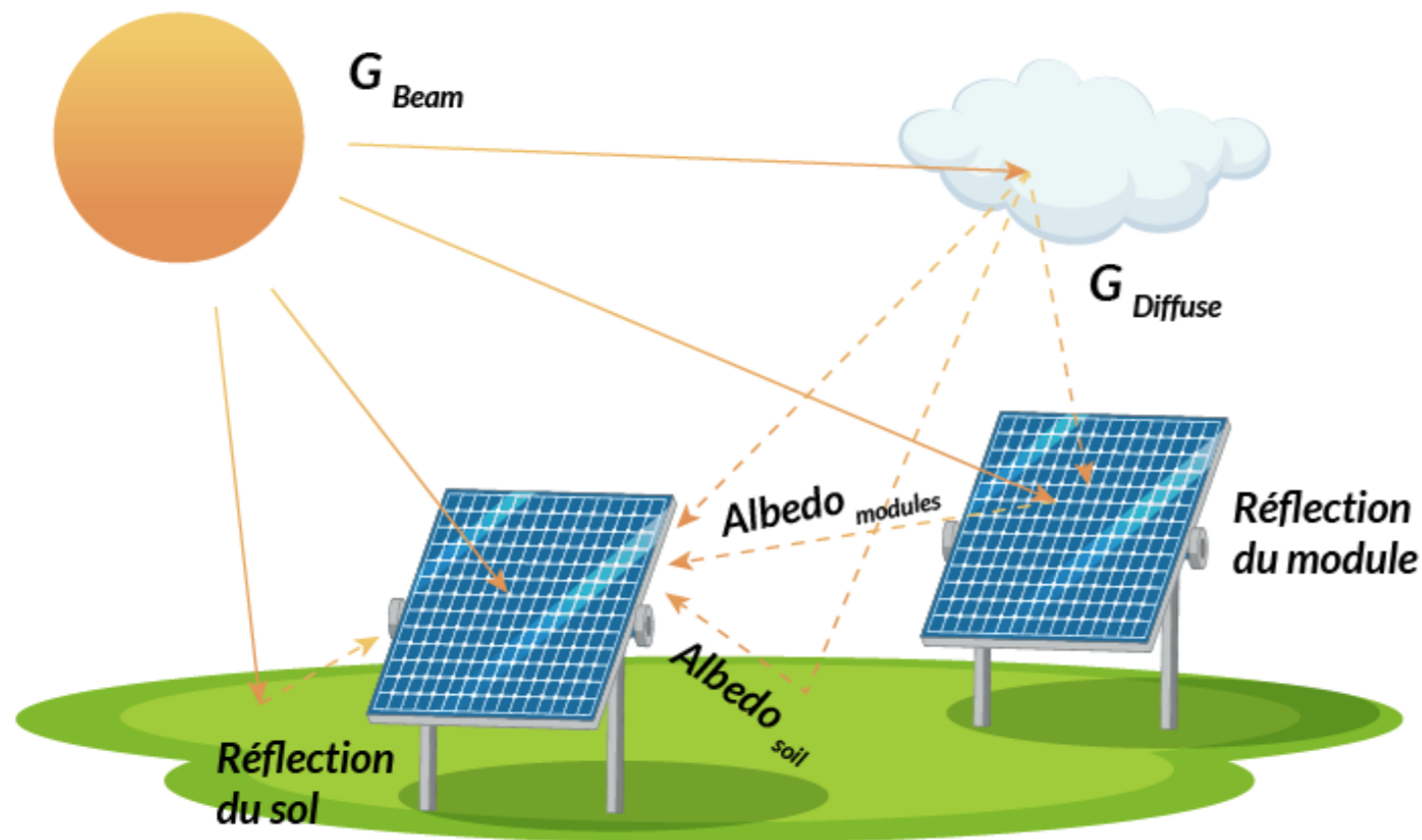
Bien que le blé soit l'une des cultures les plus étudiées, il existe plusieurs autres exemples tels que la luzerne, les tomates, la laitue et divers fruits et légumes, entre autres.



Ferme agrivoltaïque expérimentale à Palaiseau

© Energy 4 Climate - SIRTA

Schéma illustrant les composantes directe (G_{beam}), diffuse (G_{diffuse}) et réfléchie de l'éclairement incident sur des modules bifaciaux élevés



l'installation agrivoltaïque influencé par la présence et de la croissance de la culture, ici la luzerne. Lorsque le sol est nu, l'albédo est à son niveau le plus bas et, vers le milieu du cycle, il atteint sa valeur maximale en raison de l'abondance de surfaces réfléchissantes. Cette installation bifaciale avec trackers solaires mono-axiaux est orientée nord-sud et se situe sur le Site Instrumental de recherche pour télédétection (SIRTA), sur le campus de l'École Polytechnique en Palaiseau, France.

Modélisation de l'éclairement et production photovoltaïque en tenant compte de la présence de cultures

Les travaux menés par Moira Torres Aguilar, post-doctorante au GeePs, sont axés sur l'estimation de la puissance de sortie d'une installation agrivoltaïque en te-

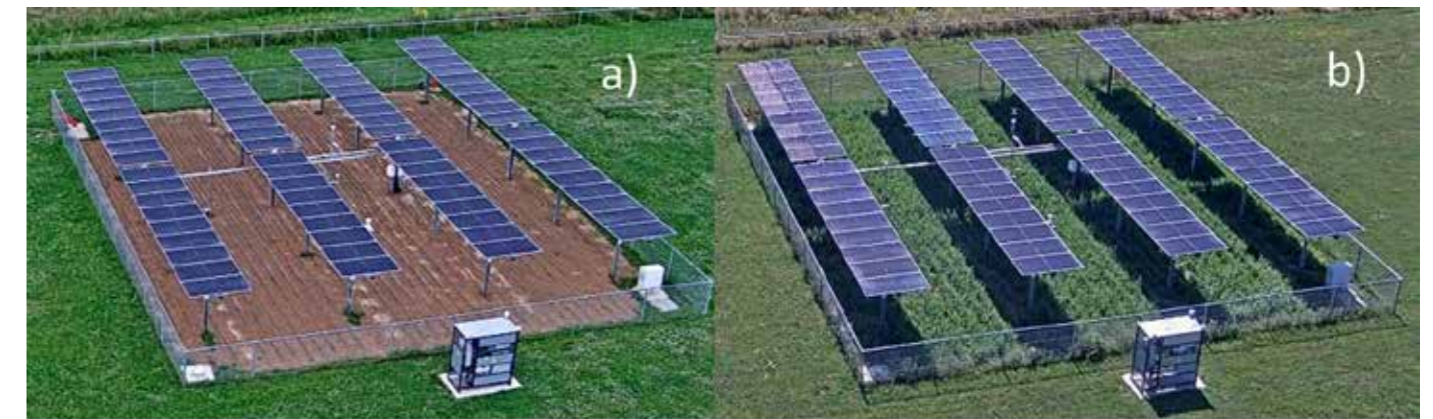
nant compte à la fois des mesures sur site et des valeurs modélisées de l'irradiance et de la température des modules PV pour des périodes en position horizontale et en suivi solaire. L'amélioration de la modélisation qu'elle propose consiste à prendre en compte la croissance des plantes par l'intermédiaire d'un albédo variable, comme illustré sur le graphique ci-contre, et ainsi l'éclairement calculé au niveau de la face arrière des modules sera plus juste. Cela permettra ainsi une modélisation plus précise de la production photovoltaïque

Les premiers résultats ont montré une amélioration non uniforme de l'erreur de biais moyenne pouvant atteindre 3 % en fonction de la position des modules et des conditions atmosphériques (ensoleillé ou nuageux). L'amélioration de la précision du modèle est légèrement

plus importante pour la position horizontale, car le module PV peut absorber une plus grande partie de l'éclairement réfléchi sur sa face arrière, et pour les conditions nuageuses en raison d'une distribution plus homogène de l'éclairement. De plus, la prise en compte d'un albédo variable conduit à des résultats comparables à ceux obtenus à partir de mesures d'éclairement in situ, un aspect important compte tenu du manque de telles mesures dans certaines régions du monde.

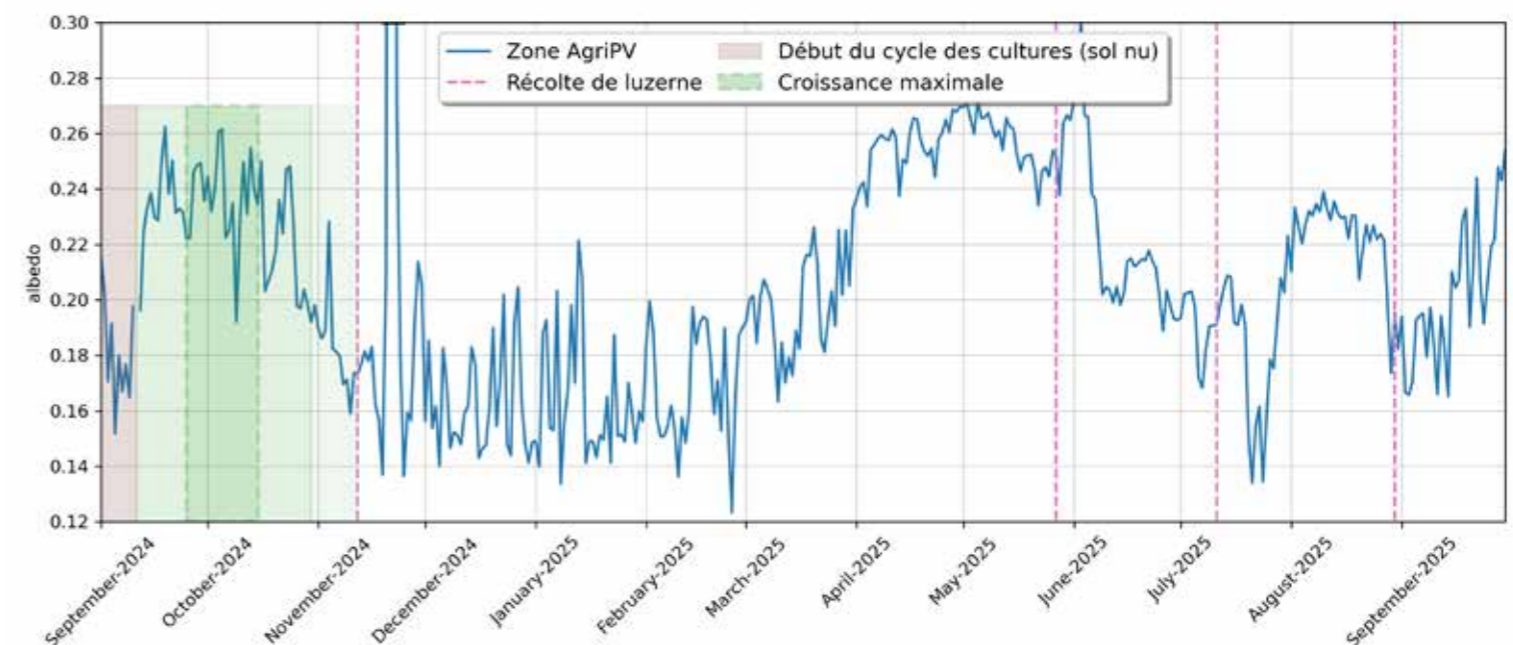
Parallèlement, Kylian Minck, doctorant au GeePs, a développé un environnement de travail Python nommé

Agricast qui a pour objectif de permettre la simulation de l'ensemble de l'installation agrivoltaïque via la création de classes représentatives de chacune des parties de l'installation (parcelle, structure PV, ciel, etc.), et aussi l'analyse des résultats de simulation et leur utilisation pour l'optimisation des performances. Certaines applications incluent une commande permettant de faire un bon compromis entre production agricole et production photovoltaïque. Il est également possible d'obtenir les cartes d'éclairement afin de déterminer des zones à éclairage similaire, et ainsi positionner des capteurs météorologiques dans des agrégats différents.



Ci-dessus : Photo de l'installation agrivoltaïque au début du cycle de la luzerne (à gauche) et au pic de croissance (à droite).

Ci-dessous : Variation journalière de l'albédo sur un an. La ligne rose indique la date de récolte de la luzerne et le début du cycle suivant. Le rectangle marron représente un sol nu et celui de couleur vert foncé, la croissance maximale des plantes.



PRÉVOIR LE COUVERT NUAGEUX

COMPARAISON DES MODÈLES DE PRÉDICTION

L'intégration croissante de la production photovoltaïque intermittente pose de nouveaux défis pour assurer la stabilité de la grille. L'analyse de différents modèles de prédiction montre des difficultés à anticiper l'évolution des nuages dans des situations météorologiques complexes, soulignant l'importance de concevoir des méthodes de prévision mieux adaptées à ces situations critiques.

Par Valentin Duchemin, ingénieur de recherche au LMD - SIRTÀ et membre du projet Fine4Cast (voir page 64)

La production d'électricité photovoltaïque est hautement dépendante de la trajectoire du Soleil qui est précisément connue à l'avance. Cependant, le passage de nuages au-dessus des centrales solaires induit une forte variabilité. Si ces fluctuations de production sont mal anticipées, elles peuvent déstabiliser le réseau électrique et provoquer des coûts importants pour le démarrage en urgence de centrales d'appoint fortement carbonées.

Une prévision fiable de ces événements est également indispensable pour les différents acteurs du réseau électrique. Les gestionnaires du réseau ont besoin d'anticiper la contribution des énergies renouvelables variables pour équilibrer offre et demande, fixant un prix sur les marchés à court terme. Les producteurs d'électricité peuvent vendre au meilleur moment en ajustant leurs moyens de production et de stockage. Enfin, les producteurs-consommateurs en micro-réseaux obtiennent des informations permettant d'exploiter la

flexibilité de la demande et de mieux programmer l'utilisation des batteries.

Depuis les années 2010, la littérature abonde de méthodes pour prévoir la production d'électricité photovoltaïque. Les modèles sont généralement validés en confrontant des historiques pluriannuels de prévisions avec des mesures ponctuelles à l'aide de métriques moyennées. Cette approche encourage une modélisation adaptée aux situations les plus courantes en filtrant statistiquement les erreurs extrêmes. Toutefois, les publications ne précisent que rarement la capacité de leur modèle à anticiper l'évolution des nuages dans des situations météorologiques plus rares et critiques pour la stabilité du réseau électrique.

L'analyse des prévisions passées effectuées par le gestionnaire français du transport d'électricité (RTE) a permis d'identifier des événements ayant causé d'importantes erreurs d'anticipation de la production photovoltaïque nationale.

L'évolution des nuages multi-couches, la formation et la dissipation des nuages se démarquent fréquemment comme situations incorrectement représentées par les modèles de prévision. Trente-cinq événements survenus entre 2023 et 2024 ont été sélectionnés pour créer un cadre d'évaluation commun des méthodes de prévision lorsqu'elles sont confrontées à des conditions atmosphériques complexes. Pour chaque cas d'étude, des cartes d'éclairement global solaire au sol ("Global Horizontal Irradiance"

ou GHI) ont été réalisées à partir d'un traitement d'image du satellite météorologique géostationnaire Meteosat-10. Ces cartes sont des observations du GHI et servent de référence pour l'évaluation des modèles. Les données de prévisions sont également comparées aux mesures ponctuelles du rayonnement solaire au sol à l'observatoire du SIRTÀ à Palaiseau. L'étude se concentre sur un nombre restreint de situations afin de produire une analyse détaillée du comportement de chaque méthode.

Les différents modèles de prévision

Les modèles de prévision numérique du temps reproduisent les processus physiques de l'atmosphère en trois dimensions en résolvant une version discrétisée des équations fondamentales de la mécanique des fluides. Ils sont connus pour produire des prévisions fiables jusqu'à plusieurs jours à l'avance et permettent une approche probabiliste en générant plusieurs scénarios physiques de l'évolution des nuages.

Néanmoins, chaque simulation nécessite plusieurs heures de calculs sur des superordinateurs. Ceci est particulièrement pénalisant pour produire des prévisions quelques heures à l'avance puisque le retard entre l'initialisation du modèle et l'obtention des résultats allonge l'horizon de prévision effectif ; les informations précises des mesures initiales sont rapidement perdues par les processus itératifs de la simulation. Enfin, ces modèles sont dépendants de paramétrisations imparfaites des processus atmosphériques à petite échelle comme la convection nuageuse dont les erreurs peuvent se propager graduellement.

L'analyse du déplacement des nuages à partir d'images de satellite météorologique géostationnaire est particulièrement appropriée pour générer des prévisions à courtes échéances temporelles jusqu'à 4 à 6 heures à l'avance. Elle permet d'obtenir des résultats plus précis et pour un coût de calculs inférieur à un modèle classique de prévision numérique du temps. Deux méthodes sont fréquemment développées :

Des algorithmes dits de flot optique analysent deux images consécutives pour produire un champ de vecteurs de mouvements nuageux. Ce dernier est utilisé pour extrapoler le déplacement des nuages et anticiper leurs futures positions. Si ces modèles représentent correctement l'advection, ils sont structurellement incapables de prévoir la formation ou la dissipation des nuages.

Des modèles de deep learning reproduisent des motifs de l'évolution des structures nuageuses par analyse des données historiques. Leur entraînement est long, coûteux et nécessite du matériel spécialisé, mais leur inférence est ensuite très rapide et sobre en énergie. Cependant, les résultats sont difficilement interprétables et certains algorithmes tendent à flouter leurs sorties pour lisser les erreurs. Ces comportements réduisent la possibilité d'anticiper des changements rapides et localisés de la production photovoltaïque.

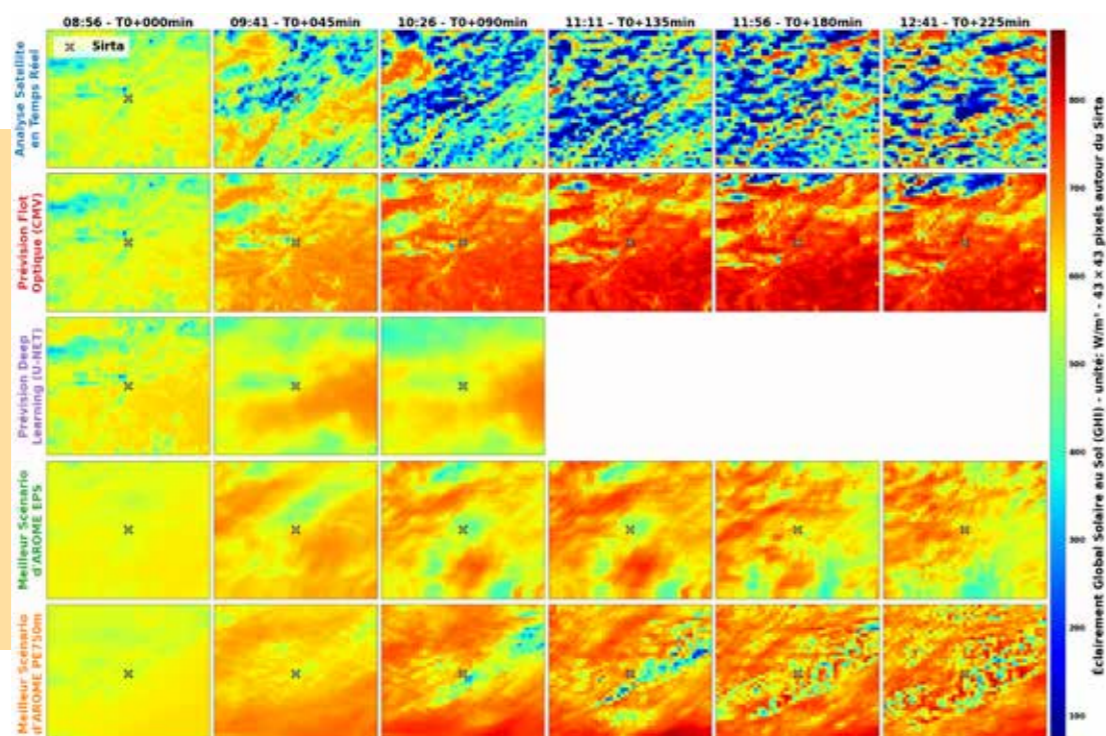
L'événement de formation de nuages épars du 22 avril 2024 à partir de 08h45, illustré sur le graphique ci-dessous, est représentatif des limitations de ces différentes méthodes. L'observation par satellite (première ligne) montre le développement rapide de gros nuages opaques (représentés en bleu) dû aux mouvements convectifs provoqués par le réchauffement matinal du sol par les rayons solaires. Le modèle de flot optique (deuxième ligne) anticipe un ciel clair, à l'exception des quelques nuages déjà formés avant l'initialisation de la simulation. Le modèle de deep learning déterministe (troisième ligne) prévoit un rayonnement qui diminue légèrement avec le temps ; il anticipe la formation de nuages. Néanmoins, ce modèle génère des structures nuageuses floues et semi-transparentes. Enfin, les meilleurs scénarios prévus par les deux versions du modèle de prévision numérique du temps AROME de Météo-France (lignes 4 et 5) ont tendance à sous-estimer l'étendue et l'opacité des nuages ainsi que la rapidité de leur formation.

Bien que différentes méthodes de prévision de production de l'énergie photovoltaïque aient fait leurs

preuves avec de bonnes performances moyennes pour les opérations courantes dans des conditions météorologiques communes, cette étude a montré que plusieurs situations atmosphériques complexes pénalisent fortement leurs résultats. La méthode du flot optique échoue le plus souvent à anticiper les événements sélectionnés. Les modèles de prévision numérique du temps sont limités par leur représentation imparfaite de l'atmosphère couplée à leur initialisation prématurée. Le modèle de deep learning déterministe floute la variabilité et les valeurs extrêmes. La mise en place de modèles de deep learning génératifs, capables de produire des scénarios réalistes d'évolution de la couverture nuageuse, permettrait la réalisation de prévisions ensemblistes plus fiables.

Le cadre d'évaluation proposé met en lumière les faiblesses des méthodes actuelles face à des situations critiques pour garantir la stabilité du réseau électrique. Ce référentiel exigeant motive le développement de méthodes de prévision plus fiables dans le but d'intégrer une part croissante d'énergie photovoltaïque dans le mix énergétique en toute sécurité.

Observation et prévisions de l'éclairement global solaire au sol (GHI) par plusieurs modèles lors d'un événement de formation de nuages épars dans la région parisienne le 22 avril 2024 entre 08h45 et 12h45.



L'ACV APPLIQUÉE AUX ÉOLIENNES DES MODÈLES D'ESTIMATION POUR UNE MEILLEURE ÉVALUATION

Symbole de la transition énergétique, l'éolienne est souvent perçue comme une source d'énergie propre. Mais que sait-on réellement de son impact sur l'environnement, de sa construction à son démantèlement ? Face au manque de données disponibles, de nouvelles approches permettent aujourd'hui d'évaluer plus finement son cycle de vie et d'éclairer les choix futurs en matière d'énergie renouvelable.

Par Nour Hamda et Nicolas Rogy (IFP Énergies nouvelles), membres du projet LCA-TASE (voir page 64)

Les éoliennes sont-elles vraiment "vertes" ?

Les éoliennes sont souvent présentées comme une solution énergétique propre, capable de produire de l'électricité sans émissions directes de gaz à effet de serre pendant leur fonctionnement. Dans le contexte actuel de transition énergétique, elles jouent un rôle majeur dans le développement des énergies renouvelables. Cependant, l'impact environnemental d'une éolienne ne se limite pas à sa phase de production d'électricité. Sa fabrication nécessite d'importantes quantités de matériaux comme l'acier, le béton ou les composites. Le transport des composants, l'installation, les opérations de maintenance ainsi que la fin de vie génèrent également des impacts environnementaux qu'il est nécessaire de prendre en compte.

Pour évaluer ces impacts potentiels de manière globale, il est possible d'utiliser une méthode appelée Analyse du Cycle de Vie (ACV), qui permet d'étudier un système depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa fin

de vie. Pour une éolienne, cela signifie que l'on ne regarde pas seulement la phase de production d'électricité renouvelable. On étudie aussi les matériaux utilisés pour fabriquer la tour, les pales, la nacelle ou les fondations. On prend également en compte les procédés industriels, les distances de transport, les opérations d'installation et les scénarios de fin de vie.

Cette vision globale est essentielle, car elle permet d'éviter les conclusions trop rapides. Une technologie peut sembler propre pendant son utilisation, mais nécessiter beaucoup de ressources lors de sa fabrication. L'ACV permet donc de faire émerger les vrais leviers d'amélioration en identifiant les phases du cycle de vie qui impactent potentiellement le plus l'environnement.

Le défi principal : le manque de données

La réalisation d'une ACV repose sur une étape centrale : la construction de l'inventaire du cycle de vie. Ce-

lui-ci rassemble toutes les données nécessaires pour décrire le système étudié. Il contient par exemple les quantités de matériaux, les consommations d'énergie, les transports, les émissions et les déchets associés à chaque étape du cycle de vie.

Dans le cas des éoliennes, ces données sont souvent difficiles à obtenir. Les fabricants publient généralement quelques informations générales, comme la puissance nominale, le diamètre du rotor ou la hauteur de la tour. En revanche, les masses exactes des composants, les détails des matériaux ou les procédés de fabrication restent souvent indisponibles. Ces informations sont souvent confidentielles, et sont donc simplement absentes de la documentation publique. Ce manque de données représente un obstacle important pour les études ACV. Sans

inventaire détaillé, il devient difficile d'évaluer précisément les impacts environnementaux d'une éolienne ou de comparer plusieurs technologies entre elles.

Construire un modèle d'estimation à partir de la puissance nominale d'éolienne

Pour répondre au manque de données disponibles, nous avons développé un modèle d'estimation appliqué aux éoliennes onshore (terrestres). L'objectif est de construire l'inventaire du cycle de vie lorsque les données de fabrication ne sont pas accessibles.

L'idée principale est de partir d'une donnée généralement disponible : la puissance nominale de l'éolienne. À partir de cette information, le modèle permet d'estimer plusieurs

caractéristiques techniques importantes, par exemple, la masse de la tour, du rotor, de la nacelle ou encore des fondations. Ces résultats permettent ensuite d'alimenter l'inventaire du cycle de vie et de calculer les impacts environnementaux potentiels associés. Cette approche permet de construire une représentation cohérente du système à partir d'un nombre limité d'informations. Cependant, un modèle d'estimation basé seulement sur la puissance nominale ne peut pas reproduire parfaitement toutes les différences entre les éoliennes réelles. Deux turbines ayant la même puissance nominale peuvent présenter des dimensions différentes selon le fabricant, les matériaux utilisés ou les choix technologiques.

Pour cette raison, notre modèle intègre également les incertitudes associées aux relations d'estimation. Au lieu de fournir uniquement une valeur fixe, il permet de représenter une plage de valeurs possibles pour les données d'inventaire du cycle de vie. Cette approche reflète mieux la variabilité réelle des éoliennes et permet d'obtenir des résultats ACV plus robustes et plus réalistes. L'intégration des incertitudes aide également à identifier les paramètres les plus sensibles et à mieux comprendre les limites des résultats obtenus. Dans un contexte où les données sont souvent incomplètes, cette démarche renforce la crédibilité de l'évaluation environnementale.

Vers un modèle pour les éoliennes offshore

Après le développement du modèle onshore, l'objectif est maintenant d'étendre cette approche aux éoliennes offshore (en mer). Ces systèmes présentent des caractéristiques plus complexes que les éoliennes terrestres.

Ils nécessitent des fondations spécifiques, des câbles sous-marins, des navires spécialisés pour l'installation et des opérations de maintenance plus difficiles.

L'éolien offshore offre toutefois un potentiel important, car les vents en mer sont généralement plus forts et plus réguliers. Les turbines offshore sont aussi de plus en plus puissantes, ce qui peut améliorer leur production d'électricité. La complexité technique de ces systèmes couplées à l'évolution de ces technologies rend l'évaluation environnementale plus difficile, surtout lorsque les données d'inventaire détaillées sont indisponibles.

Une approche régionalisée à l'échelle française

Au-delà du développement des modèles onshore et offshore, nos travaux s'orientent également vers une approche régionalisée de l'ACV. En effet, les impacts environnementaux potentiels d'un parc éolien varient par exemple selon les conditions climatiques locales, qui vont affecter la production d'électricité, ou les lieux de mise en forme des composants, qui vont utiliser différents mix énergétiques.

Cette régionalisation de l'ACV des éoliennes combinées aux modèles d'estimation de l'inventaire du cycle de vie, pourrait donc aider à identifier les zones où certaines technologies sont plus adaptées, à comparer différentes stratégies de déploiement et à mieux accompagner les décisions liées au développement des énergies renouvelables en France.

L'ACV, UN OUTIL VISANT À L'EXHAUSTIVITÉ

L'Analyse du Cycle de Vie est une méthode scientifique et normée (ISO 14040/44) qui permet d'évaluer les impacts environnementaux potentiels d'un produit, d'un procédé ou d'un service sur l'ensemble de sa chaîne de valeur. Ainsi, l'ACV prend en compte toutes les étapes du cycle de vie, de l'extraction des matières premières à la fin de vie.

L'ACV est aussi une méthode multicritère, permettant d'évaluer différents types d'impacts environnementaux potentiels associés aux ressources naturelles, à la santé humaines et aux écosystèmes. Elle permet d'identifier les transferts d'impacts : les réductions des perturbations environnementales sur une catégorie d'impact qui entraînent une augmentation sur une autre.



AU-DELÀ DE L'INDIUM ET DE L'ARGENT

VERS DES CELLULES SOLAIRES PLUS DURABLES

Avec l'essor mondial des technologies solaires, leur dépendance à des matériaux rares comme l'indium et l'argent soulève de nouveaux défis. Dans le cadre du projet SOLSTICE, nous explorons des matériaux alternatifs tels que l'iodure de cuivre, afin de développer des dispositifs photovoltaïques plus durables et adaptables à grande échelle.

Par Saraf Khan, doctorant à iCube et à l'IJL, et membre du projet SOLSTICE (voir page 65)

L'énergie solaire est largement considérée comme une solution clé pour la transition énergétique mondiale. Grâce aux progrès technologiques et à l'augmentation des volumes de production, les cellules solaires deviennent très performantes et abordables. Cependant, ce déploiement à grande échelle soulève une question cruciale : les matériaux utilisés pour fabriquer les cellules solaires sont-ils réellement durables ?

Minimiser la dépendance aux matériaux critiques

Dans les cellules solaires, certaines couches doivent remplir simultanément deux fonctions : laisser passer la lumière tout en collectant les charges électriques. Ce sont des matériaux conducteurs transparents, essentiels au bon fonctionnement des dispositifs.

Classiquement, ces couches sont composées de composés à base d'indium ou d'éléments métalliques comme l'argent. L'indium et l'argent sont tous deux largement utilisés en photovoltaïque et en optoélectronique en raison de leurs remarquables propriétés

électriques. L'indium est un composant essentiel de l'oxyde d'indium-étain (ITO), tandis que l'argent est couramment utilisé pour les électrodes conductrices. Cependant, l'approvisionnement et le coût de ces deux matériaux posent problème. Par exemple, l'indium est relativement rare car il est obtenu comme sous-produit de l'extraction du zinc, tandis que la demande croissante d'argent dans les architectures de cellules solaires soulève des inquiétudes quant à sa disponibilité à long terme et aux coûts de fabrication. Ces difficultés ont encouragé la recherche d'alternatives telles que l'iodure de cuivre (CuI) pour des applications photovoltaïques durables.

Le remplacement de ces matériaux est donc un objectif majeur de la recherche. Cependant, trouver des alternatives appropriées n'est pas chose aisée. En particulier, les matériaux conducteurs de charges positives, appelés matériaux de type p, sont beaucoup moins courants que les autres. Développer des matériaux de type p transparents et performants représente donc un défi scientifique majeur.

Iodure de cuivre : une alternative prometteuse

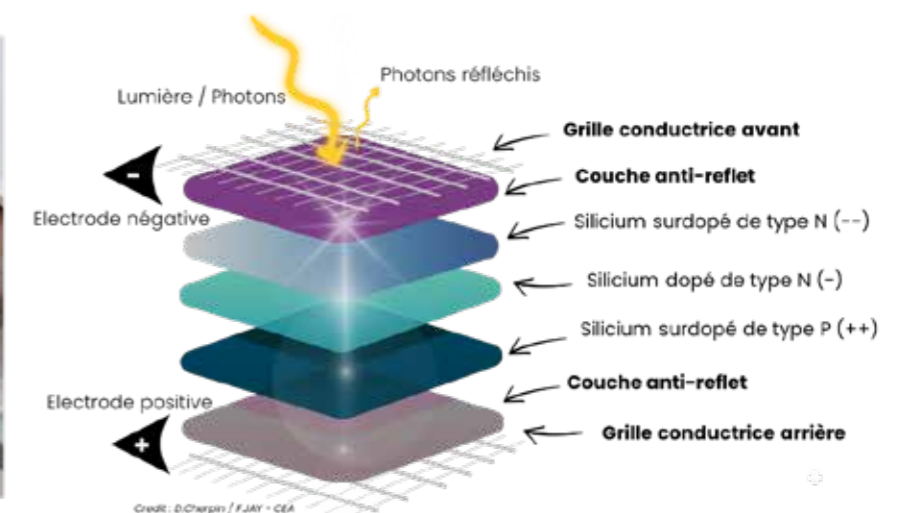
Parmi les matériaux étudiés au sein du consortium SOLSTICE, l'iodure de cuivre a suscité un vif intérêt grâce à la combinaison de plusieurs propriétés qui le rendent particulièrement adapté aux applications photovoltaïques.

Tout d'abord, sa transparence élevée (environ 70 à 90 %) dans le visible permet à la lumière du soleil d'atteindre les couches actives de la cellule solaire. Parallèlement, sa conductivité (10 à 100 S.cm⁻¹) assure la conduction des charges électriques, essentielle au bon fonctionnement du dispositif. De plus, sa composition à base d'éléments relativement abondants en fait une option plus intéressante que les matériaux à base d'indium.

Ces caractéristiques font de CuI un candidat potentiel pour une utilisation comme couche conductrice transparente, notamment dans les cellules solaires à base de silicium. Sa capacité à assurer à la fois les opérations optiques et électriques ouvre de nouvelles perspectives pour la conception de dispositifs plus efficaces et moins dépendants des matières premières critiques.

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

La grille conductrice (avant et arrière) est à base d'argent, tandis que la couche anti-reflet (avant et arrière) et l'électrode transparente de collecte de charge sont à base d'indium.



La prochaine étape de nos recherches consiste à intégrer ces couches développées dans des architectures de cellules solaires complètes. Cette étape est importante pour évaluer leurs performances dans des dispositifs réels et confirmer leur compatibilité avec les technologies conventionnelles. Cependant, la stabilité sous humidité et sous éclairage demeure une question cruciale pour les couches de CuI développées avant leur intégration complète dans les cellules solaires. Nos études initiales sous humidité et sous éclairage n'ont pas révélé la formation de phases d'oxydes ou d'hydroxydes de cuivre supplémentaires, ce qui est très encourageant. Néanmoins, une diminution de la cristallinité a été observée, suggérant que le matériau peut encore évoluer sous contrainte environnementale.

Outre la question de la stabilité, certains défis techniques doivent également être pris en compte pour l'intégration dans les dispositifs. Il s'agit notamment des interactions chimiques potentielles aux interfaces, telles que les réactions impliquant l'iode, ainsi que des dommages possibles aux couches sensibles lors du dépôt. De plus, l'obtention d'une faible résistance électrique à l'interface CuI et la prévention de la diffusion du cuivre dans le silicium sont des facteurs essentiels qui doivent être contrôlés avec soin.

Par conséquent, relever ces défis sera essentiel pour garantir des performances fiables à long terme et faciliter l'intégration réussie du CuI dans les architectures photovoltaïques de nouvelle génération.

Vers des technologies photovoltaïques plus durables

Malgré des résultats initiaux prometteurs, des travaux supplémentaires sont nécessaires pour optimiser pleinement le matériau et assurer sa stabilité à long terme. L'intégration de nouveaux matériaux dans les procédés industriels demeure une tâche complexe qui exige une évaluation précise. Parallèlement, des recherches sont menées pour explorer d'autres alternatives potentielles. Par exemple, nos travaux actuels portent également sur l'oxyde d'étain dopé à l'azote (SnOx:N) comme autre matériau conducteur transparent potentiel. Ces stratégies complémentaires visent à élargir la gamme des solutions existantes pour les futures technologies solaires.

En minimisant la dépendance aux matières premières critiques et en développant des options plus durables, SOLSTICE offre des alternatives pour rendre l'énergie photovoltaïque non seulement efficace, mais aussi économiquement viable à l'échelle mondiale.

COMMUNAUTÉS D'ÉNERGIE

OPTIMISER SELON LES CARACTÉRISTIQUES DES PARTICIPANTS

Les communautés d'énergie permettent à des consommateurs de bénéficier d'une électricité vendue à un tarif attractif par des producteurs locaux, et les incitent ainsi à synchroniser au mieux leur consommation avec la production disponible. Quelle composition et quelle envergure doit-on envisager pour ces communautés, au regard de la quantité et de la diversité de participants possibles ?

Par Youen Froger, Anthony Roy, François Auger, Salvy Bourguet et Jean-Christophe Olivier (IREENA, Nantes Université) membres du projet FlexTASE (voir page 64)

Les communautés d'énergie, en particulier les opérations d'autoconsommation collective, sont identifiées comme un moyen de mettre en relation directe les producteurs et les consommateurs, tout en incitant les consommateurs à adapter leur consommation à la production renouvelable locale disponible. La notion de proximité géographique entre les participants est une caractéristique des communautés, permettant de contribuer à l'équilibre du réseau et de renforcer l'implication des participants. Pour les opérations d'autoconsommation collective, le cadre légal français impose une distance maximale à ne pas dépasser entre les deux participants les plus éloignés (2 km, jusqu'à 20 km dans certains cas). Par ailleurs, face à la hausse des coûts de l'énergie et aux enjeux de décarbonation des usages, de plus en plus de consommateurs sont intéressés pour intégrer ou former une communauté afin de bénéficier d'une électricité décarbonée produite localement, à un tarif attractif. Néanmoins, une communauté avec une quantité élevée (plusieurs dizaines par exemple) de participants - consommateur, producteur ou les deux - peut en complexifier la gestion et diminuer les bénéfices obtenus par chaque participant, en comparaison avec des communautés de plus faible taille.

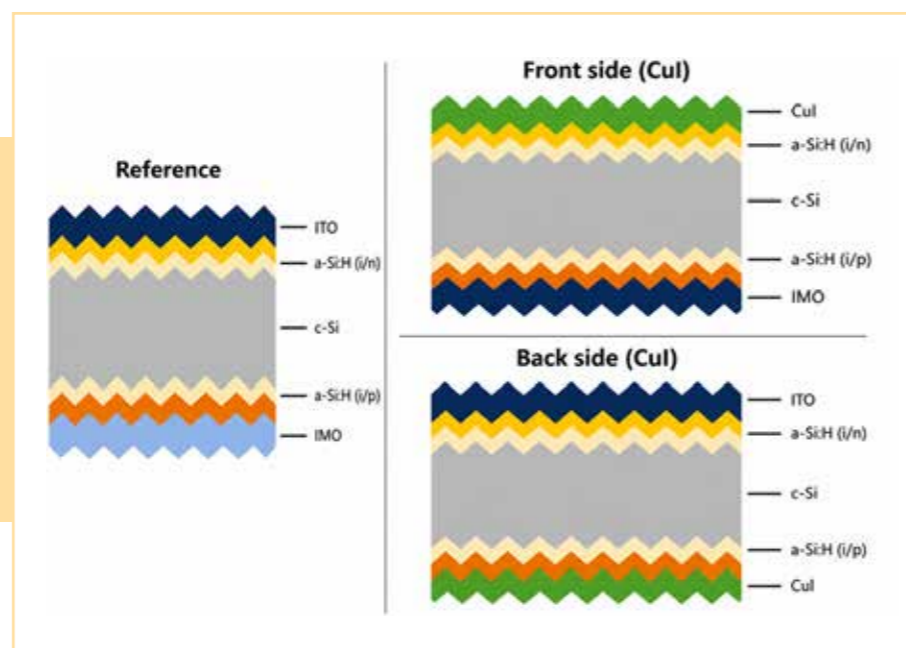
Ces différents constats amènent plusieurs questions et problématiques. Quelle est la composition optimale d'une communauté en termes de quantité et de caractéristiques de participants ? Pour un ensemble d'acteurs intéressés, est-il préférable de former une seule ou plusieurs communautés ? Faut-il prendre en compte la flexibilité des consommateurs lors de la conception de ces communautés, et si oui, comment ?

Parmi les travaux du projet FLEXTASE, les chercheurs de l'IREENA développent un ensemble de méthodes et d'outils d'aide à la décision permettant d'optimiser la répartition de participants flexibles et non flexibles parmi plusieurs communautés possibles dans une zone géographique donnée, par exemple un quartier d'une ville. Ces outils fournissent également des préconisations concernant les échanges énergétiques à réaliser et l'utilisation de la flexibilité des différents acteurs.

Comment optimiser ? Par rapport à quels critères ?

Plusieurs critères peuvent être considérés pour définir la composition optimale d'une communauté ainsi que les échanges d'énergie, par exemple le taux

Illustration schématique des architectures de référence et d'hétéro-jonction intégrant CuI, montrant les configurations face avant et face arrière de CuI.





d'autoconsommation, les bénéfices réalisés, et ce au niveau individuel ou au niveau global (l'ensemble des acteurs). Dans ces travaux, deux critères sont considérés et comparés, séparément :

- Le premier critère est la maximisation des gains économiques de tous les acteurs considérés par rapport à la situation initiale sans communauté.

- Le second critère est la maximisation des gains économiques de l'acteur qui en réalise le moins. Ce critère a été choisi afin de limiter les inégalités entre les acteurs.

Afin d'identifier des facteurs d'influence et montrer l'intérêt de la démarche développée, le problème est testé sur un ensemble de cas d'études, générés de manière à couvrir une diversité de quantités et de types

d'acteurs ainsi que de situations de flexibilité. Ces cas d'études, fictifs mais plausibles, intègrent des données de consommation des secteurs résidentiel et tertiaire, certaines ayant été collectées et mises à disposition par l'Observatoire de la Transition Énergétique (OTE) dans le cadre du projet (données EtudeELEC).

Les résultats obtenus dans ces travaux montrent que les communautés formées, et les bénéfices économiques qui en découlent, dépendent principalement de la complémentarité entre les acteurs, celle-ci étant influencée par deux facteurs :

- Le premier facteur est l'autoconsommation naturelle, c'est à dire la consommation qui, sans faire usage de la flexibilité, a déjà lieu en même temps que la production. Par exemple, le solaire photovoltaïque produisant durant la journée, il est plus intéressant, du

point de vue de l'autoconsommation, qu'il alimente en priorité des entreprises qui consomment durant la journée plutôt que des particuliers qui consomment principalement le matin et le soir.

- Le second facteur est celui de la flexibilité des consommateurs. En effet, répartir les acteurs flexibles entre les différentes communautés permet de maximiser leur impact en augmentant le taux d'autoconsommation (part de l'énergie produite utilisée localement). La quantité de flexibilité disponible pouvant varier au cours de la journée, il est intéressant d'avoir des profils qui sont flexibles lorsque le groupe en a besoin.

Le temps nécessaire à la résolution de ce problème d'optimisation est également étudié afin de montrer la complexité calculatoire des méthodes développées et les limites, en termes de quantités d'acteurs et de données pouvant être traitées. Cet aspect pourrait être considéré dans une étude à plus grande échelle, par exemple pour étudier l'impact d'un développement massif de communautés au niveau national.

L'apport des sciences humaines et sociales

Afin de fonctionner, les outils discutés précédemment nécessitent des modèles comportementaux

des participants qui composent les communautés, afin de considérer leurs habitudes de consommation. Dans le cadre de ce travail dédié au développement d'un formalisme d'optimisation, des modèles simples ont été considérés (courbe de consommation totale de chaque consommateur) afin d'être utilisables en pratique et de limiter la complexité calculatoire du problème à résoudre. Une incertitude existe donc sur ces modèles, certains comportements de consommation pouvant être difficiles à prévoir, en particulier sur des effectifs réduits tels que ceux des communautés d'énergie. Le fait d'être membre d'une communauté peut également modifier les habitudes de consommation et être un levier indirect de flexibilité.

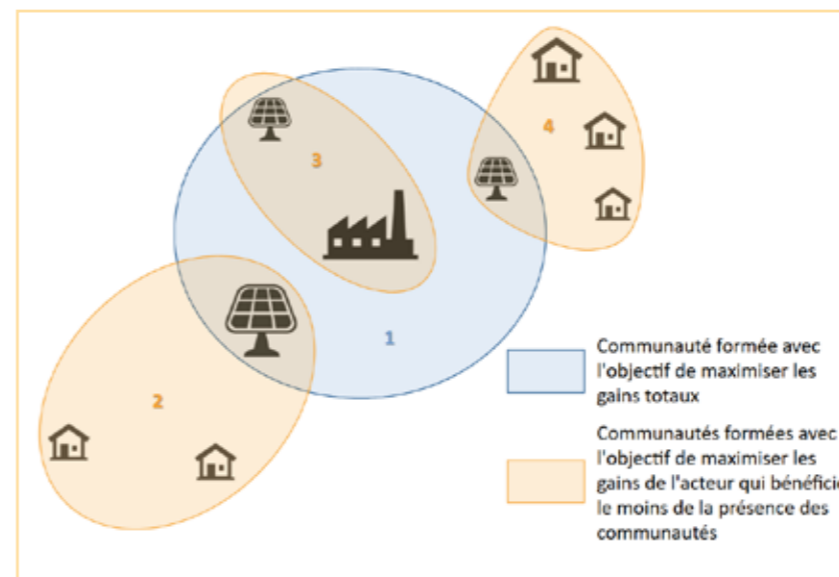
Dans le cadre de FlexTASE, des échanges avec des scientifiques du domaine des sciences humaines et sociales et des sciences économiques ont permis de réfléchir au choix des objectifs à considérer, aux facteurs incitant des consommateurs à rejoindre une communauté et à ceux pouvant freiner leur constitution et leur fonctionnement. Le choix d'un critère économique global, tel que celui considéré dans ces travaux pour illustrer la démarche, peut être en contradiction avec les attentes de certains participants, elles-mêmes pouvant être hétérogènes entre les participants, complexifiant d'autant plus la modélisation. Le choix des acteurs auxquels attribuer l'énergie est également important. Il peut constituer un moyen

de lutter contre la précarité énergétique. La notion d'équité et certaines contraintes apportées par la flexibilité (charge mentale, fatigue de réponse) sont également des points sur lesquels une collaboration avec les sciences humaines et sociales est souhaitable afin de considérer au mieux ces aspects dans la démarche développée.

LA FLEXIBILITÉ ÉNERGÉTIQUE

La flexibilité est la possibilité pour un système énergétique de s'adapter aux écarts entre la demande et la production. Elle peut être effectuée par la production ou par la consommation.

- La flexibilité sur la production consiste à modifier la puissance produite par les sources, à la hausse ou à la baisse selon le type de source. Le recours au stockage fait également partie des solutions possibles.
- La flexibilité sur la consommation s'effectue en décalant ou en supprimant certains usages. Elle peut être soit directe (l'appareil est directement piloté, comme c'est le cas des chauffe-eau), soit indirecte (le consommateur choisit de s'adapter ou non en fonction d'un signal, comme c'est le cas pour les heures pleines et heures creuses), soit mixte (l'utilisateur met à disposition un de ses usages pour qu'il soit planifié de manière optimale en prenant en compte ses contraintes).



Communautés obtenues selon l'objectif considéré

OBSERVER ET ACCOMPAGNER L'ÉMERGENCE D'UNE COMMUNAUTÉ ÉNERGÉTIQUE

À Badevel (Doubs), des membres du projet Flex-Mediation ont accompagné, par une recherche-action, l'émergence d'une opération d'autoconsommation collective inscrite dans un projet municipal de transition énergétique et de transformation ambitieuse de la commune. Les échanges avec un groupe pilote ont permis de préciser les conditions techniques, organisationnelles et les valeurs du partage local d'énergie. Cette recherche a mis en évidence l'importance de la phase d'émergence, où se décident les dimensions cruciales de l'action collective énergétique.

Par Sébastien Dassé, doctorant à l'institut FEMTO-ST et membre du projet Flex-Mediation (voir page 66)

Badevel. Petit village rural de 800 habitants, niché entre Belfort, Montbéliard et la frontière suisse, la commune est marquée par une proportion importante d'habitants retraités et sans emploi, un habitat ancien majoritairement occupé par ses propriétaires, et une quasi-absence de commerces, de services et d'activités économiques. Les usages de l'énergie y restent fortement structurés par le fioul, le bois et, plus marginalement, l'électricité. La question énergétique concerne donc la vie quotidienne : chauffage de logements souvent mal isolés, déplacements dans une commune rurale mal desservie par les transports publics et coût élevé de l'énergie pour les habitants comme pour la municipalité.

Depuis 2024, Badevel est engagée dans un projet municipal de transition énergétique, écologique et numérique dans le cadre du projet Living Lab H2 Bois, lauréat de l'AMI « Démonstrateur de la Ville Durable » du programme France 2030. Ce projet articule plusieurs volets : rénovation des bâtiments publics, réflexion sur l'utilisation des ressources locales en bois-énergie, développement du photovoltaïque, de l'hydrogène, mais aussi numérique, formation à l'innovation, jardin partagé et connecté...

Ce projet foisonnant inclut la mise en place d'une communauté énergétique. La municipalité envisageait une opération d'autoconsommation collective patrimoniale, visant à installer des panneaux photovoltaïques sur des bâtiments municipaux puis à utiliser le réseau pour distribuer également l'électricité produite vers d'autres bâtiments municipaux. Cependant, le projet restait ouvert à d'autres configurations possibles de communauté énergétique, avec un périmètre plus large, notamment en termes d'usagers.

C'est à ce niveau qu'intervient la recherche-action menée par une équipe du projet Flex-Mediation. Elle a accompagné l'émergence de la communauté énergétique pour en définir collectivement les principales caractéristiques.

Un processus par étapes

La recherche-action s'est organisée en plusieurs temps. Un protocole a d'abord été élaboré pour définir le périmètre des personnes à associer à la démarche, les sujets à aborder et les informations à recueillir, les modalités de participation, la temporalité

L'enjeu de la recherche-action est de rouvrir les possibles, de confronter les points de vue, et de mesurer ce qui pouvait, localement, devenir à la fois désirable, tenable et praticable.

de la démarche. Un questionnaire a ensuite été diffusé dans la commune afin de recueillir des données pour un premier diagnostic et pour inviter à une réunion publique qui a permis de présenter la démarche et de constituer un groupe pilote d'habitants.

Ce groupe s'est réuni lors de plusieurs ateliers consacrés au diagnostic énergétique local, aux types d'énergie jugés souhaitables, aux formes possibles de communautés énergétiques, à son périmètre, aux valeurs associées au projet de partage d'énergie. Les séances visaient à rouvrir les possibles, confron-

ter les points de vue et mesurer ce qui pouvait, localement, devenir désirable, tenable et praticable. Elles ont aussi conduit à exprimer un choix collectif. Finalement, une restitution a été faite à l'ensemble des habitants de la commune et alentours dans une deuxième réunion publique.

Tout au long du processus, l'équipe de recherche a recueilli différents matériaux : réponses au questionnaire, observations lors des ateliers, traces produites par le groupe pilote et entretiens individuels menés à la suite des séances. Ces matériaux permettent de

LA RECHERCHE-ACTION

Un projet de recherche-action met en présence des parties prenantes engagées dans un changement social et des chercheurs. Son objectif est double : transformer la réalité et produire des connaissances sur ces transformations. Il ne s'agit pas d'apporter une solution clef en main, mais de créer les conditions d'une élucidation collective : partager un diagnostic, éprouver des hypothèses, mettre en discussion des formes possibles d'organisation et d'action. Cette posture suppose que le chercheur assume les effets de son intervention, tout en suivant un protocole garantissant la rigueur scientifique qui en garantit la rigueur scientifique.

Pour aller plus loin : Allard-Poesi, F., & Perret, V. (2003). *La recherche-action. Conduire un projet de recherche, une perspective qualitative*, pp-85.



© Sébastien Dassé, Flex Mediation - PEPR TASE

suivre la formation progressive du collectif, ses hésitations et ses arbitrages.

Ce que les ateliers déplacent

Le travail mené avec le groupe pilote confirme la place centrale du photovoltaïque dans le projet communal. À Badevel, il demeure la solution énergétique jugée la plus crédible à court terme, car elle paraît techniquement réalisable et économiquement maîtrisable. Les ateliers déplacent toutefois la focale :

l'enjeu devient celui de la définition du collectif appelé à prendre part au projet, de son organisation et de ses valeurs.

Le projet initial privilégiait une forme d'autoconsommation patrimoniale. Les discussions ont conduit à ne pas opter pour une coopérative citoyenne locale qui aurait été développée en parallèle du projet municipal (tout en l'incluant à terme) mais à envisager une forme plus ouverte à partir de l'autoconsommation patrimoniale, dans laquelle le surplus pourrait bénéficier à des habitants intégrés à l'opération, selon une clé de répartition et un tarif à définir.

Une troisième forme a également été discutée : l'autoconsommation collective ouverte intero-

pérée. Dans ce cas, certains habitants équipés de panneaux photovoltaïques pourraient contribuer au partage en distribuant une partie de leur surplus de production. L'opération associerait alors, autour d'un même cadre, la municipalité, des ménages producteurs ou consommateurs voire même d'autres acteurs locaux (entreprises par exemple), y compris en dehors de la commune.

Les ateliers ne substituent donc pas une solution technique à une autre. Ils rendent visibles les choix collectifs que suppose le déploiement d'une communauté énergétique : forme de la communauté, degré d'ouverture, responsabilités, modalités de répartition de l'énergie, recherche d'un équilibre entre rentabilisation des investissements et réduction de la facture pour les usagers.

mobilisables, les règles de partage et la répartition des bénéfices attendus.

La recherche-action permet aussi de suivre ce moment d'émergence avant que le projet ne soit entièrement stabilisé. Elle révèle les conditions qui influent sur le résultat, y compris dans le cadre d'une démarche participative (la composition du groupe pilote, la montée en compétences du collectif, l'aversion plus ou moins grande pour le risque...). La phase d'émergence a ainsi permis de redéfinir les contours, les règles, les formes d'engagement du projet initial et de construire une communauté plus large autour d'un dessin énergétique partagé. La communauté énergétique n'apparaît ainsi pas comme une forme déjà donnée, mais comme un processus en cours, fait d'apprentissages, d'arbitrages et de compromis provisoires.

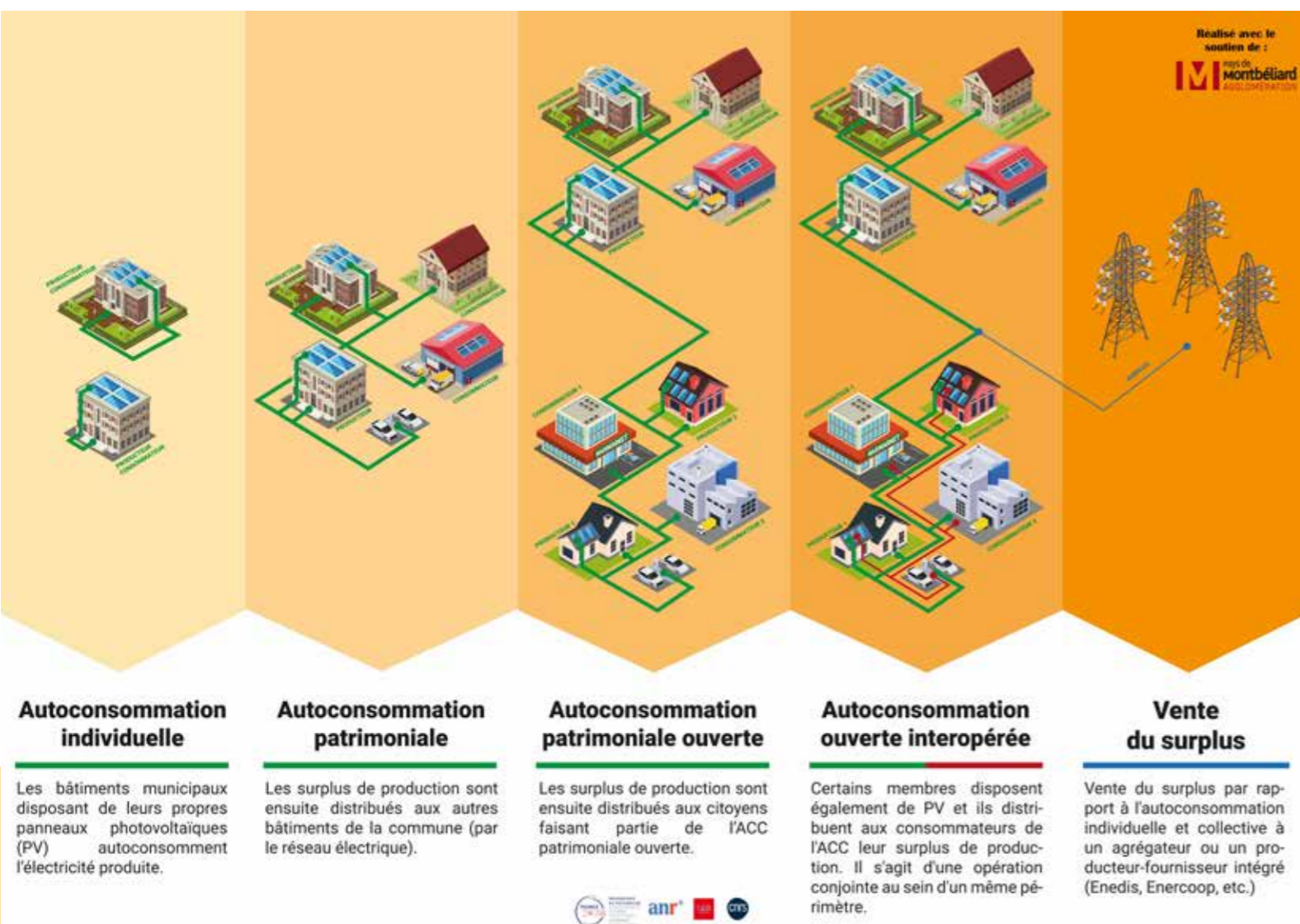
La démarche participative a permis de restituer toute la complexité du projet.

Ce que le cas de Badevel permet de saisir

Le cas de Badevel conduit à déplacer le regard sur la transition énergétique locale. Celle-ci ne se résume ni au choix d'une technique jugée plus vertueuse, ni à l'application locale d'un modèle déjà disponible. Elle se construit aussi dans la manière dont un territoire définit les acteurs concernés, les ressources

Ce cas s'ancre et prolonge les travaux antérieurs attentifs à la fabrique des communautés énergétiques locales, notamment ceux développés par les membres du projet Flex-Mediation. Son intérêt propre est de montrer, à partir d'une recherche-action, l'intérêt et les limites d'un processus participatif pour définir les dimensions importantes d'une communauté énergétique et ses implications en termes de justice énergétique.

Membres de l'équipe Flex-Mediation pour Badevel : Sébastien Dassé, Nathalie Kroichvili, Lydie Laigle, Marion Native.



Forme de la communauté énergétique et son évolution pour Badevel et alentours.
Proposition du groupe pilote de citoyens (février-juillet 2025)

RÉSEAUX MULTI-ÉNERGIES

MODÉLISATION À L'ÉCHELLE QUARTIER

L'intégration massive des énergies renouvelables et la diversité des usages à l'échelle du quartier complexifient la conception des systèmes énergétiques. Pour y répondre, les approches multi-énergies et multi-échelles permettent de mieux exploiter les synergies entre vecteurs, mais introduisent une forte complexité de modélisation et de pilotage.

Par Camille Caby, doctorante au LAPLACE et au G2Elab, et membre du projet HyMES (voir page 62)

Ces dernières années, l'intégration massive d'énergies renouvelables comme le solaire ou l'éolien a complexifié la conception de systèmes. Leur production intermittente et non coordonnée avec les pics de consommation, impose l'ajout d'un dispositif de stockage dans les systèmes énergétiques afin d'équilibrer l'offre et la demande pour chaque vecteur énergétique et de limiter ainsi le stress sur les réseaux.

Une approche multi-énergies permet de profiter de synergies entre différents vecteurs énergétiques (électricité, chaleur, gaz, ...) et d'améliorer les performances globales des systèmes. En contrepartie, cette approche multiplie les contraintes et les dynamiques propres à chaque vecteur énergétique.

À l'échelle du quartier, la diversité des usages : résidentiels, tertiaires, commerciaux ou industriels, contribue à foisonner les demandes énergétiques et favorise les interactions entre acteurs, notamment

via la revalorisation de ressources comme la chaleur fatale au sein de réseaux de chaleur. La centralisation des systèmes énergétiques permet de concevoir des systèmes qui sont mieux dimensionnés, piloter de manière plus efficace tout en réduisant les impacts économiques et environnementaux. En contrepartie, cette échelle complexifie fortement la conception des systèmes en multipliant les interactions possibles ainsi que les contraintes propres à chaque usage.

Cette complexité est encore renforcée par la dimension temporelle des problématiques étudiées. Dans nos travaux, les investissements sont envisagés sur des horizons de 20 à 30 ans, ce qui impose de considérer les évolutions du système sur de multiples échelles de temps, notamment des temps longs liés au vieillissement des composants, à l'évolution de la demande ou encore celle du coût des technologies. Dans une approche de co-design, où dimensionnement et ges-

tion énergétique sont étudiés conjointement, le modèle doit ainsi représenter des dynamiques allant du pilotage court terme jusqu'à l'évolution long terme des systèmes. Cette double complexité, spatiale et temporelle, rend nécessaire le recours à des approches de simulation avancées.

Parmi elles, la co-simulation permet d'intégrer au sein d'un ensemble de modèles les couplages physiques ainsi que les différentes échelles de temps et d'espace avec une bonne fidélité. Toutefois, ces modèles deviennent rapidement coûteux en calcul et peu adaptés à une utilisation industrielle. L'hybridation de modèles, qui consiste à remplacer certaines briques par des modèles d'apprentissage (Machine Learning), permet alors d'accélérer les temps de simulation tout en conservant une précision suffisante pour l'étude.

OMEGAAlpes : Un outil d'aide à la décision pour les systèmes énergétiques

Ces méthodes seront utiles à un panel varié d'acteurs de la transition énergétique. Les collectivités en lien avec les bureaux d'études pourront utiliser nos résultats pour concevoir ou réhabiliter des quartiers et des écoquartiers en intégrant davantage d'énergies renouvelables alors que les gestionnaires de réseau pourront anticiper les évolutions de consommation et évaluer leurs impacts sur la stabilité du réseau. Pour faciliter l'utilisation de ces méthodes pour des profils d'acteurs variés, nous allons ajouter nos contributions à l'outil d'aide à la décision open-source OMEGAAlpes. Il permet de modéliser des systèmes énergétiques grâce à une interface graphique puis génère automatiquement un problème d'optimisation puis le résout afin de déter-

UNE SYNERGIE ENTRE VECTEURS ÉNERGÉTIQUES ?

La synergie est la capacité d'un système à coordonner des vecteurs énergétiques initialement conçus de manière indépendante. La synergie peut être réalisée à différentes échelles : localement au sein d'un foyer ou globalement au sein d'un quartier.

À l'échelle du foyer, un exemple courant est la recharge des ballons d'eau chaude. Pour limiter les pics de consommation aux périodes où la production électrique est plus contrainte, les gestionnaires de réseau ont historiquement mis en place la tarification heures pleines/heures creuses, avec des tarifs avantageux la nuit pour mieux équilibrer la demande. La recharge nocturne du chauffe-eau permet ainsi d'utiliser la capacité de stockage du vecteur thermique pour absorber une surproduction électrique, sans recourir à l'installation de nouvelles batteries aux coûts économiques et environnementaux importants. Avec le déploiement massif du PV, la production électrique augmente désormais lors des périodes de fort ensoleillement, ce qui a conduit à une évolution des heures creuses, dont une partie est désormais située l'après-midi.

À l'échelle du quartier, le problème se complexifie avec l'ajout de nouveaux vecteurs, technologies et interactions possibles, comme le montre le schéma. Néanmoins, le principe reste identique : adopter une vision globale du système afin de limiter les pertes entre vecteurs et d'améliorer l'efficacité énergétique globale.

miner une solution optimale de co-design couplant dimensionnement et pilotage énergétique.

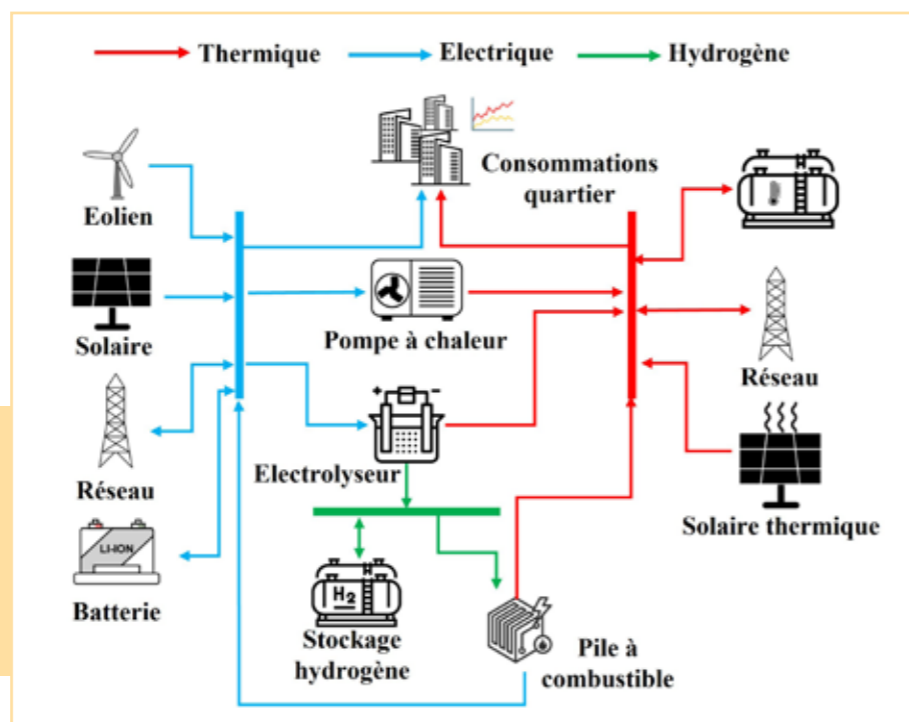
Une première étude a été réalisée avec l'outil OMEGAlpes portant sur le pilotage optimal de pompe à chaleur à l'échelle d'un quartier. A travers cette étude, nous nous sommes intéressés à l'aspect multi-vecteurs et multi-échelles spatiales du sujet. En couplant le vecteur thermique et électrique, nous avons pu définir une stratégie de pilotage qui maintient le confort thermique des habitants en s'appuyant sur l'inertie thermique des bâtiments et qui réduit la consommation électrique et notamment le pic de demande, avec une diminution pouvant atteindre 31 % sur une période hivernale.

Un cas d'étude générique pour les systèmes énergétiques multi-vecteurs à l'échelle du quartier

Afin d'étudier les systèmes énergétiques multi-énergies à l'échelle d'un quartier, un cas d'étude générique a été développé à partir du quartier Cambridge à Grenoble. Ce cas d'étude repose sur 15 bâtiments, principalement résidentiels, comprenant également des résidences étudiantes et quelques surfaces commerciales et tertiaires situées à proximité d'un réseau de chaleur.

Cet écoquartier constitue une base pertinente pour explorer différents scénarios de mix énergétique, de stockage et de gestion de la demande car il possède encore un potentiel d'intégration d'énergies

Représentation schématique d'un système multi-énergétiques et des synergies entre les différents vecteurs.



CONTRÔLE DISTRIBUÉ DU RÉSEAU L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE PREND LE RELAIS

Face à la montée en puissance des énergies renouvelables et à l'électrification des usages, le contrôle des réseaux électriques devient de plus en plus complexe. Les approches traditionnelles centralisées atteignent leurs limites face à des milliers de ressources distribuées. Les travaux menés au L2EP dans le cadre du projet TASTING explorent l'utilisation de l'intelligence artificielle distribuée pour coordonner batteries et communautés énergétiques afin de contribuer à la stabilité du réseau électrique.

Par Antoine Jedrezak, Ferréol Binot et Bruno François (L2EP), membres du projet TASTING (voir page 65)

Le 28 avril 2025, le réseau électrique ibérique s'effondre en quelques secondes. Espagne, Portugal, sud-ouest de la France : des millions de foyers plongent dans le noir. En moins de cinq minutes, des surtensions en cascade ont propagé l'incident à l'échelle d'un continent.

Ce blackout illustre l'importance de la résilience de nos réseaux électriques. Ceux-ci reposent sur une règle d'or : la production doit être strictement égale à la consommation, cet état est physiquement représenté par une fréquence de 50Hz. Historiquement, cette règle était facile à respecter grâce aux grandes centrales thermiques pilotables. Aujourd'hui, ces centrales cèdent la place aux nombreuses sources d'énergies renouvelables (photovoltaïques et éoliens) ; une énergie propre et décarbonée, mais par nature intermittente et incontrôlable.

Pour répondre à l'électrification massive de nos usages (véhicules électriques notamment), le projet TASTING invente de nouvelles méthodes de contrôle pour maintenir la stabilité du réseau. Plus particulièrement, les recherches menées au L2EP (Lille) développent un modèle d'apprentissage automatique capable d'assurer le contrôle distribué et la coordination de ressources énergétiques, afin de disposer d'une réserve de puissance mobilisable à la dynamique des flux d'énergie observé (réglage secondaire).

Pourquoi le contrôle traditionnel ne suffit plus

Historiquement, les gestionnaires de réseau (RTE en France) pilotent l'équilibre du réseau depuis un point central : ils collectent l'ensemble des données du système, résolvent des problèmes d'optimisation à grande échelle,

puis envoient des ordres de contrôle. Ce modèle fonctionne bien avec quelques grandes centrales pilotables mais il atteint ses limites face à des milliers de sources dispersées non connectées au réseau de RTE. Sans connaissance locale fine, les décisions prises depuis un centre unique peuvent être sous-optimales. S'y ajoutent des goulets d'étranglement computationnels et des latences incompatibles avec la rapidité du contrôle fréquentiel, sans oublier la vulnérabilité d'un point central unique face aux cyberattaques et aux défaillances physiques.

Face à ces limites, pourquoi ne pas s'appuyer sur des modèles physiques actuels? Parce que modéliser et contrôler précisément des milliers de sources intermittentes et d'usages variables est illusoire. L'apprentissage automatique offre une alternative : il apprend directement depuis les données, prend des décisions locales en temps réel, et s'adapte naturellement aux conditions changeantes du réseau.

Les solutions algorithmiques

Deux grandes familles d'approches en apprentissage automatique permettent de répondre à ce défi : le contrôle en temps réel et le contrôle par prédiction.

- **L'apprentissage par renforcement multi-agent (MARL)** transforme chaque ressource du réseau (batterie, panneau solaire, véhicule électrique) en un agent autonome capable de prendre des décisions locales. L'entraînement fonctionne par essais-erreurs : à chaque décision, les agents reçoivent une récompense dépendant de s'ils ont contribué à leur objectif. À force d'interactions, ils apprennent quelle action adopter dans chaque situation, tout en coopérant ou non avec leurs voisins pour atteindre leurs objectifs. Par exemple, avec un objectif commun qui est de maintenir l'équilibre du réseau. Concrètement,

plusieurs agents "batterie" apprennent collectivement à se charger quand la production solaire est excédentaire et à se décharger lors des pics de consommation, en se coordonnant entre eux sans jamais attendre un ordre. Cette approche est complexe à entraîner, mais elle permet un contrôle entre différents agents distribués en réactions aux événements.

- La seconde approche mise sur la prévision. Pour prédire précisément l'état futur du réseau, les algorithmes ont besoin de données, mais ces données sont sensibles. C'est ici qu'intervient **l'apprentissage fédéré** : chaque entité entraîne son propre modèle local, puis partage uniquement ses paramètres. Un processus d'agrégation fusionne ces contributions en un modèle global, renvoyé à tous les participants. Concrètement, un modèle local entraîné sur la consommation d'un bâtiment peut, une fois agrégé avec des centaines d'autres, anticiper un pic de demande à l'échelle d'un quartier entier. Ce paradigme permet de combiner intelligence collective et confidentialité des données.

Ces deux approches peuvent être complémentaires : le MARL réagit aux événements en temps réel, tandis que l'apprentissage fédéré permet d'anticiper et d'adapter le contrôle avant que l'événement ne se produise.

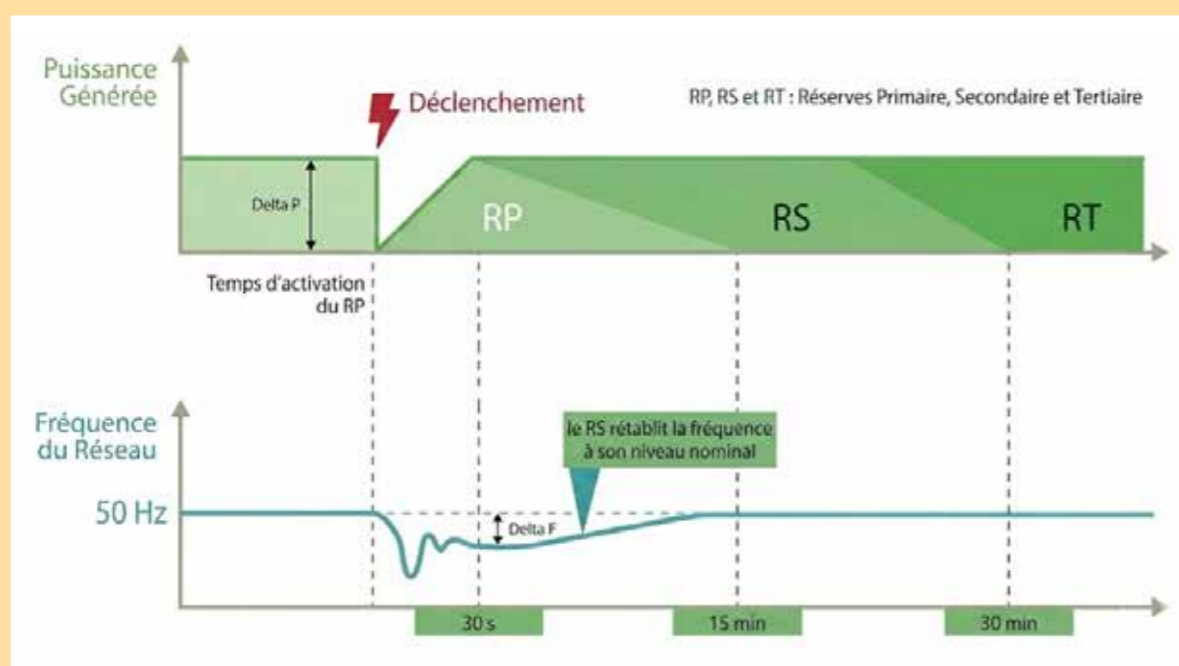
Vers des communautés énergétiques au service du réseau

Pour illustrer ces approches algorithmiques, nous prenons l'exemple d'une communauté énergétique : un ensemble de bâtiments, de panneaux solaires et de batteries connectés entre eux et au réseau de RTE ou d'un gestionnaire de réseau de distribution (DSO). Cette communauté produit et stocke sa propre électricité, mais elle ne se contente pas de gérer ses propres besoins.

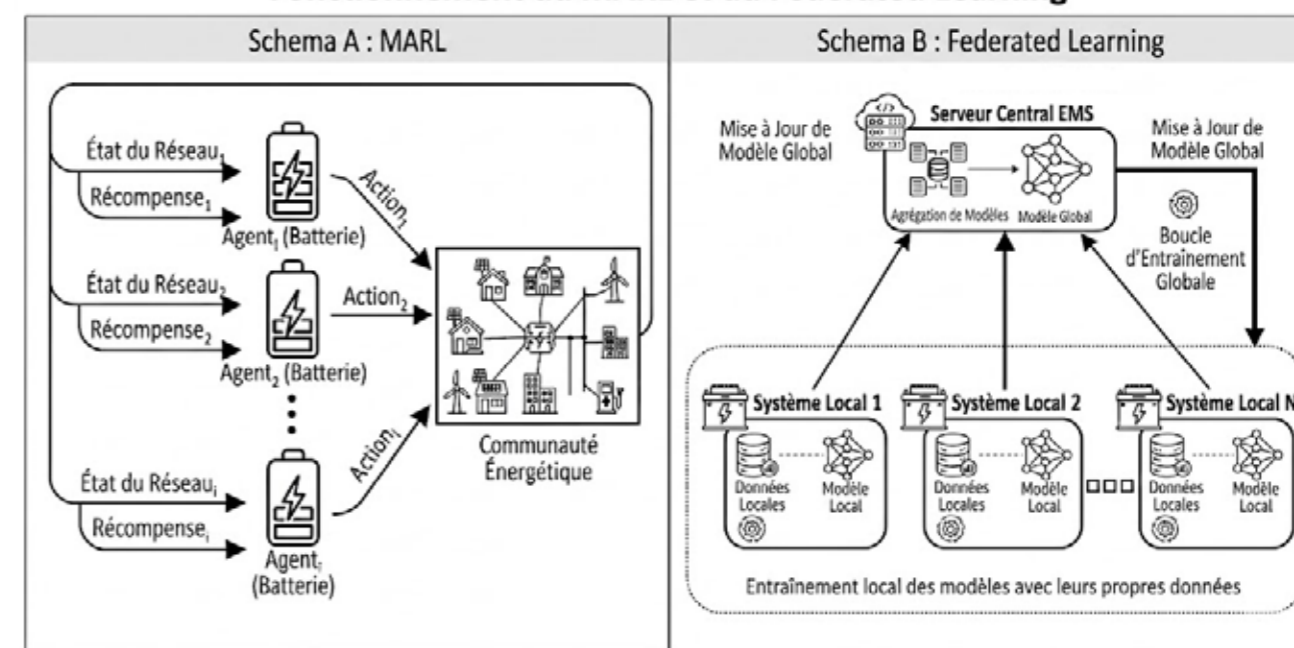
L'algorithme de contrôle poursuit deux objectifs simultanés. Le premier est interne : maximiser les gains économiques et environnementaux de la communauté, en consommant en priorité l'énergie locale et en limitant les achats sur le réseau. Le second est tourné vers l'extérieur : faire de cette communauté un élément de

RÉSERVE DE PUISSANCE SECONDAIRE

Lorsqu'un incident de déséquilibre de puissance survient sur le réseau, des mécanismes de réserve se déclenchent automatiquement. La réserve secondaire intervient entre 30 secondes et 15 minutes après l'incident pour ramener l'équilibre et donc la fréquence du réseau à sa valeur nominale de 50 Hz.



Fonctionnement du MARL et du Federated Learning



flexibilité pour le réseau, capable de mobiliser ses ressources de stockage pour contribuer à la réserve de puissance secondaire en cas de déséquilibre.

La communauté énergétique devient ainsi un acteur à double rôle : autonome dans sa gestion locale, mais coopératif vis-à-vis du réseau national.

Enjeux industriels du réseau électrique de demain

Ces approches ouvrent des perspectives pour un réseau dont l'intelligence est distribuée. Les énergies intermittentes, jusqu'ici subies comme une contrainte, deviennent des ressources pilotables. À plus grande échelle, cette transformation contribue à la souveraineté énergétique de la France, en valorisant la produc-

tion locale décarbonée et en réduisant la dépendance aux importations lors des pics de consommation et exportation lors des surproductions.

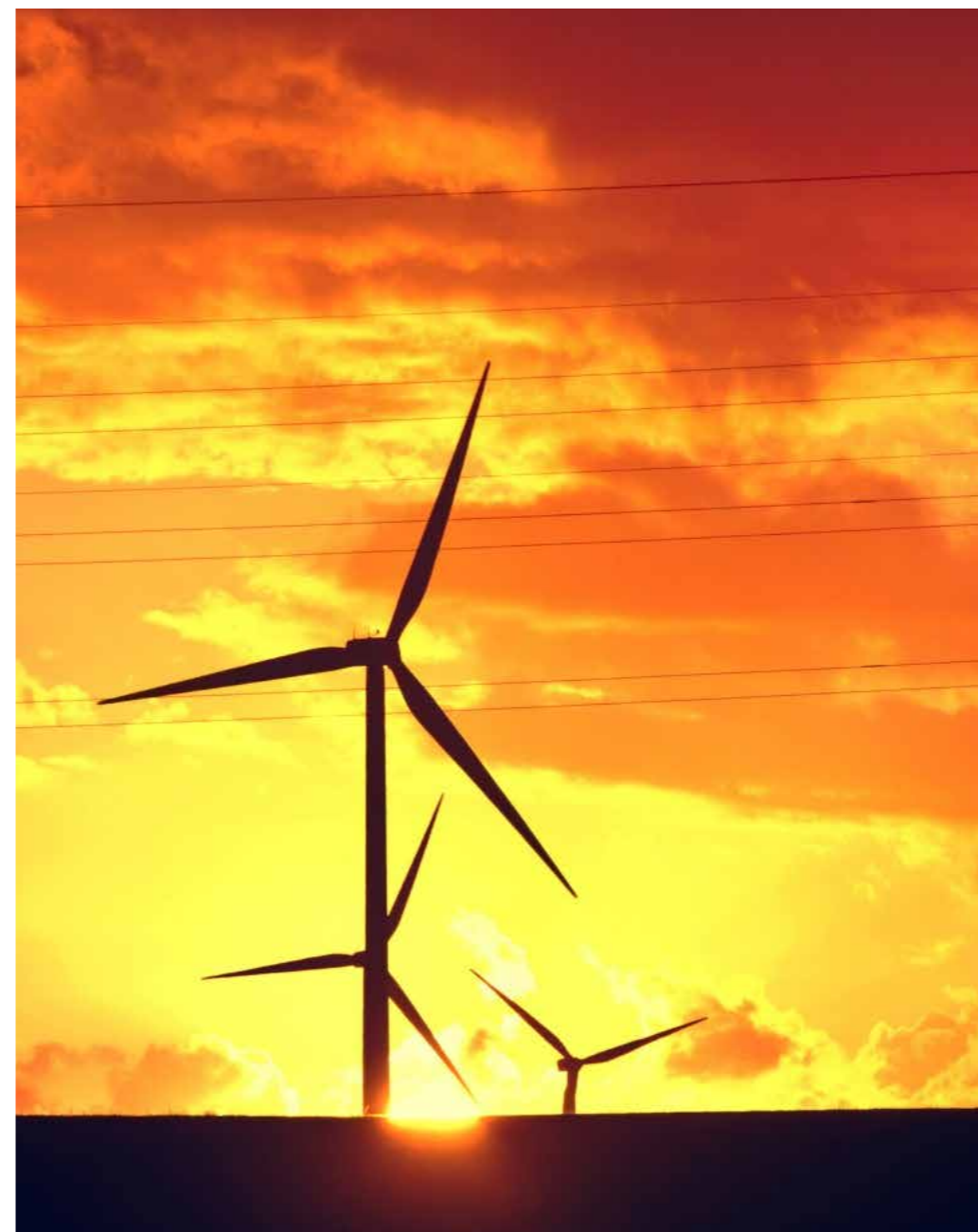
Ces recherches répondent aussi aux besoins des opérateurs comme RTE, qui font face à des défis quotidiens : absorber les surplus photovoltaïques l'après-midi, compenser la chute de production solaire en soirée, ou mobiliser des ressources en quelques minutes. RTE a déjà franchi un premier pas avec les Nouveaux Automates de Zone Adaptatif (NAZA), un automate qui réduit ponctuellement la production des sites éoliens et photovoltaïques pour éviter la saturation du réseau.

Nos approches distribuées basées sur l'IA vont plus loin : bâtiments intelligents, batteries, communautés énergétiques pourraient demain fournir de la réserve secondaire, effacer leur consommation sur signal, ou gérer localement les congestions de manière autonome.

VAGUES DE CHALEUR ET RÉSILIENCE

QUAND LA CHALEUR RENCONTRE LE SYSTÈME ÉLECTRIQUE

Par Alicia Bassière et Anne Barros (LGI), Théotime Coudray et Ibtissem Khelifati (UMI SOURCE), Anastasia Akakpo-Numado (LSCE) et Grace Domaya Nekouanodji (G2ELAB), membres du projet PowDev (voir page 66)



Les frontières du risque climatique se déplacent en France. L'été 2022 a montré à quel point la pression peut être sévère : les températures ont dépassé 40 °C, Météo-France a émis des alertes rouges répétées, et une combinaison de perturbations d'approvisionnement en gaz et de maintenance nucléaire a poussé les prix de gros de l'électricité à dix fois leurs niveaux historiques.

Mais la chaleur n'est plus seulement un problème estival. Les vagues de chaleur de juin 2025, et plus récemment de mai et juin 2026 ont prouvé que ces événements frappent désormais en dehors de la trêve estivale traditionnelle, lorsque les demandes industrielles et commerciales sont encore élevées.

Cette évolution soulève des questions cruciales sur la façon dont la demande d'électricité réagit aux vagues de chaleur dans différentes conditions de marché.

Causées par le changement climatique d'origine anthropique, les vagues de chaleur en Europe se sont intensifiées et multipliées depuis les années 1980, mettant à l'épreuve simultanément la demande, l'offre et les marchés de l'électricité.

La réaction des ménages et des entreprises à la chaleur ne dépend pas uniquement de la température. Elle dépend également du revenu, de la qualité du bâti, des équipements de climatisation et du climat local auquel les ménages sont habitués. Comprendre les dynamiques de la consommation d'électricité lors des vagues de chaleur nécessite donc de s'interroger sur qui est exposé, avec quels moyens, et sur quel territoire.

Ces questions sont capitales pour l'avenir. En effet, le GIEC prévoit des vagues de chaleur plus fréquentes, plus longues et plus intenses, tandis que l'électrification des transports, de l'industrie et du chauffage, associée à l'adoption croissante de la climatisation, transforme la demande d'électricité. Or, du côté de l'offre, ces événements contraignent les infrastructures de transport et de production. Pourtant, la plupart des recherches évaluent la relation température-demande de manière isolée, en omettant la distinction entre pic de températures élevées et vague de chaleur. L'axe Vagues de chaleur et résilience du système électrique du projet PowDev contribue à combler ce manque selon quatre dimensions.

Modélisation des vagues de chaleur et attribution au changement climatique

Avant de s'interroger sur les effets des vagues de chaleur sur le système électrique, le projet doit d'abord caractériser leur fréquence, leur durée et leur intensité, et la façon dont ces caractéristiques évoluent sous l'effet du changement climatique. Le projet utilise de longues séries historiques de données de température en grille (réanalyses) ainsi que des projections climatiques pour caractériser les épisodes de vagues de chaleur en France, en se concentrant d'abord sur la région PACA. L'objectif est double : décrire comment les épisodes récents se comparent aux décennies passées, et estimer comment leurs caractéristiques pourraient évo-

luer dans les scénarios climatiques futurs.

L'analyse d'attribution ajoute un deuxième volet à ce travail. L'approche par narration de l'attribution climatique prend un événement observé spécifique comme donné et cherche à caractériser comment ses propriétés physiques (intensité, durée, étendue spatiale) ont été modifiées par le forçage anthropique, en posant la question : « en quoi cet événement particulier aurait-il été différent dans un monde plus frais ? ». Cela constitue une base quantitative pour affirmer que les vagues de chaleur du type de celles observées en 2003, 2022 ou 2023 ne sont plus des anomalies rares. Elles deviennent une caractéristique typique de l'été français. Ce premier bloc pose le cadre pour le reste du projet. Il définit les événements climatiques dont les conséquences sur le système électrique sont ensuite étudiées dans les autres lots de travail.

Quantification de la surconsommation d'électricité lors des vagues de chaleur

Une fois les vagues de chaleur correctement définies, la question suivante est celle de la demande supplémentaire en électricité qu'elles engendrent. Pour cela, le projet s'appuie sur un modèle statistique ajusté sur des données historiques de consommation pour la région PACA sur la période 2013–2024. Le modèle est conçu pour répondre à deux objectifs : expliquer la consommation passée avec une résolution temporelle fine et produire des prévisions fiables sous différents scénarios de température. Il distingue deux effets : la réponse standard à la température, heure par heure, et l'effet supplémentaire spécifiquement associé aux vagues de chaleur conçues comme des événements persistants.

Les résultats montrent que, en plus de la réponse habituelle à la température, les vagues de chaleur génèrent une demande supplémentaire de l'ordre de plusieurs centaines

de MWh en PACA à n'importe quelle heure d'un épisode. Sur les événements les plus intenses, la surconsommation cumulée atteint plusieurs centaines de gigawattheures.

Sur les événements les plus intenses, la surconsommation cumulée atteint plusieurs centaines de gigawattheures

Cet excédent n'apparaît pas comme un pic plus prononcé. Il relève l'ensemble de la charge journalière, y compris la nuit. Ce comportement est cohérent avec des systèmes de refroidissement fonctionnant en continu tout au long de l'épisode plutôt qu'étant activés brièvement pendant les heures les plus chaudes. Ce résultat a des implications directes sur la manière dont le système doit être dimensionné et exploité.

Conséquences système et dimensionnement des infrastructures

Quantifier le choc de demande ne représente qu'une partie du problème. La capacité du système à l'absorber dépend de sa faculté à produire et à acheminer suffisamment d'électricité au même moment. Les vagues de chaleur mettent sous tension les deux côtés de cette équation, créant une vulnérabilité cumulative précisément lorsque le réseau électrique est le plus sollicité.

Au cours de ces épisodes prolongés, les infrastructures physiques du système électrique sont confrontées à de sévères limites d'exploitation. Les centrales thermiques voient leur rendement diminuer lorsque l'eau de refroidissement est plus chaude. De plus, les réglementations environnementales strictes relatives à la température des eaux fluviales ainsi que la baisse des débits

imposent souvent une réduction de leur production afin d'éviter des dommages écologiques, retirant ainsi du réseau une part importante de la production. Dans le même temps, les lignes de transport d'électricité peuvent acheminer moins d'énergie lorsque la température de l'air augmente. Cette contrainte physique, connue sous le nom de déclassement thermique (thermal derating), crée du stress sur le réseau et limite sa capacité à importer de l'électricité depuis les régions voisines pour compenser les déficits locaux.

Les sources d'énergie renouvelable présentent également des comportements spécifiques lors de ces événements. Les systèmes anticycloniques et les conditions atmosphériques stagnantes caractéristiques des dômes de chaleur entraînent souvent des sécheresses énergétiques, c'est-à-dire des périodes durant lesquelles la production éolienne chute fortement. Parallèlement, la production solaire reste généralement élevée grâce à un ciel dégagé, mais son rendement de conversion se dégrade sensiblement sous l'effet de températures ambiantes extrêmes.

La cartographie de ces contraintes simultanées est donc essentielle pour évaluer le dimensionnement des infrastructures futures, dans ce contexte où la combinaison d'une production de base restreinte, de goulots d'étranglement sur le réseau de transport et des pics de demande soutenus observés de jour comme de nuit dans la région PACA engendrent une fragilité systémique.

Déterminants socio-économiques de la consommation et réponses politiques

Une vague de chaleur est aussi un moment où les inégalités économiques et sociales deviennent visibles. La distribution du risque thermique et de ses effets entre les ménages n'est ni aléatoire ni uniforme ; elle suit les contours du revenu, de la qualité du logement et de la géographie territoriale.



Quels facteurs expliquent les disparités de consommation électrique lors des extrêmes thermiques ?

La consommation électrique lors des extrêmes thermiques est façonnée par des disparités structurelles : l'exposition climatique, le parc immobilier, l'activité industrielle et les inégalités socio-économiques. L'effet d'îlot de chaleur urbain aggrave encore cette vulnérabilité, les centres-villes denses pouvant être plusieurs degrés plus chauds que les zones rurales environnantes, ce qui génère une demande de climatisation disproportionnée chez les citoyens. Au niveau des ménages, les comportements de consommation reflètent l'accès au capital et aux infrastructures. La propriété immobilière, la superficie du logement, la qualité de l'isolation et la présence d'un système de climatisation sont tous positivement corrélés au revenu. Les ménages aisés, concentrés dans certains territoires, sont ainsi mieux armés pour moduler leur consommation face au stress thermique. Cela peut créer un schéma que notre étude cherche à documenter : les ménages les plus capables de se protéger de la chaleur (même sans climatisation) sont aussi ceux qui génèrent les hausses les plus fortes de la demande globale en période de pointe, contribuant aux tensions sur le réseau et à la volatilité des prix qui affecte la collectivité. Les disparités territoriales en matière d'infrastructure énergétique peuvent amplifier ces dynamiques : les zones rurales et péri-urbaines peuvent faire face à une capacité de réseau plus faible, une plus grande exposition au risque de coupure et un accès limité aux solutions collectives de rafraîchissement.

Qui consomme et qui paie ?

Les températures extrêmes soulèvent des questions d'équité que notre projet cherche à documenter empiriquement. L'été 2022 a offert une illustration saisissante de la façon dont les vagues de chaleur transforment des événements climatiques en crises socio-économiques. Alors que les températures dépassaient 40 °C dans plu-

sieurs régions françaises, les prix de gros de l'électricité ont atteint des sommets historiques sur les marchés européens. Notre approche vise à mesurer l'ampleur de ces effets différenciés : dans quelle mesure les inégalités de dotation matérielle se traduisent-elles en inégalités de consommation, d'exposition et, en dernier lieu, de coût énergétique ? Les ménages sans climatisation (souvent les plus modestes, les personnes âgées ou celles vivant dans des logements insalubres) ont fait face aux risques sanitaires les plus élevés avec le moins de moyens pour y faire face. Dans le même temps, les ménages équipés de climatisation ont augmenté la demande précisément quand elle était la plus contrainte, contribuant à des pics de prix de gros qui, via les tarifs réglementés ou indexés, se répercutent in fine sur les prix de détail pour l'ensemble des consommateurs. Le résultat est une forme de double exposition pour les plus vulnérables : un risque physique plus élevé face à la chaleur, et une plus grande exposition financière aux conséquences tarifaires des comportements d'adaptation des autres.

De l'exception à la norme

Ce projet montre que les vagues de chaleur ne sont pas seulement un enjeu climatique ou sanitaire : elles constituent aussi un défi majeur pour les systèmes électriques. En affectant simultanément la consommation d'électricité, le fonctionnement des infrastructures énergétiques et les conditions de vie des populations, elles révèlent la forte interdépendance entre climat, énergie et société.

Dans ce contexte, les stratégies d'adaptation concernant les bâtiments, les réseaux, les technologies ou encore les usages, deviendront aussi importantes que les efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les épisodes de chaleur exceptionnellement précoces observés en France rappellent d'ailleurs l'urgence de se préparer à un avenir dans lequel les canicules ne seront plus des événements exceptionnels, mais une nouvelle réalité climatique.

MSNA-TASE ET EXTASE VALORISER LES RÉSULTATS DE RECHERCHE DU PEPR

Les principaux acteurs de la filière « Technologies Avancées pour les Systèmes Énergétiques » – institutionnels, financeurs, industriels, start-ups et bien sûr chercheurs – démontrent bien que le photovoltaïque, l'éolien flottant et les réseaux énergétiques sont des filières essentielles pour décarboner notre avenir énergétique. Les développer, c'est ainsi renforcer et consolider la position de leader de la France dans ces technologies d'avenir.

C'est précisément dans cette perspective qu'ont été conçus et lancés les consortia EXTASE et MSNA-TASE sur les phases de prématuration et de maturation des résultats de recherche. Relais des « Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche (PEPR) » (TRL 1-4), dispositifs structurants de soutien à la recherche dédiés à l'énergie solaire photovoltaïque, à l'éolien flottant et à l'émergence de réseaux d'énergie flexibles et résilients, le programme de prématuration – maturation offre un financement et un accompagnement exceptionnels pour l'innovation issue des universités et organismes de recherche nationaux afin d'accélérer le transfert vers les entreprises. Le PEPR et le programme prématuration – maturation sont des initiatives complémentaires de soutien à l'innovation sur des enjeux prioritaires pour l'économie française, portées par France 2030.

Le consortium MSNA-TASE c'est 5 SATT partenaires, structures de transfert de technologies et spécialistes de la valorisation des innovations issues de la recherche publique. C'est un territoire de 6 régions représentées (Occitanie, Bretagne, Pays de la Loire, Hauts-de-France, Bourgogne-Franche-Comté et Grand Est), 74 établissements de recherche dont 24 universités, 3 I-SITE et 9 PUI, comptant environ 38 000 chercheurs (un tiers de l'effectif de recherche au niveau national). La coordination du MSNA-TASE est assurée, par la SATT Toulouse Tech Transfer (prématuration) et la SATT AxLR (maturation).

Le consortium EXTASE c'est 9 universités partenaires, 1 organisme nationale de recherche et 7 SATT partenaires, structures de transfert de technologies et spécialistes de la valorisation des innovations issues de la recherche publique. C'est un territoire de 5 régions représentées (Auvergne-Rhône Alpes, Grand Est, Île de France, Nouvelle Aquitaine et Provence Alpes Côte d'Azur). La coordination d'EXTASE est assurée, par l'Université Grenoble Alpes (prématuration) et la SATT Linksium (maturation)

Cette concentration remarquable de moyens, rendue possible grâce au soutien de l'État (France 2030), vise à répondre aux priorités de la Stratégie

Nationale d'Accélération TASE dédiée aux énergies renouvelables et, par conséquent, aux ambitions françaises et européennes en la matière.

énergétiques intelligents pour améliorer la performance, la durabilité et l'intégration de l'énergie dans des environnements industriels, marins et urbains.

Les consortia, créées en 2023, disposent d'un budget total de 20M€ à investir sur projet d'ici mi 2031 pour accompagner les phases de prématurations et maturations. 22 projets de prématurations et 24 projets de maturations ont jusqu'à ce jour été soutenus. A date, les projets labellisés par les 2 consortiums sur la filière concernent des innovations technologiques combinant capteurs avancés, photovoltaïques, solutions de contrôle et systèmes

Vous faites partis du PEPR TASE ? Vous êtes intéressés pour poursuivre des développements R&D avec vocation de transfert industriel ?

Contactez-nous :

MSNA-TASE (msna-tase@satt.fr)

ExTASE (extase.premat@univ-grenoble-alpes.fr, manel.boumegoura@linksium.fr)

MORGANE DELTERAL

CHARGÉE DE VALORISATION - COMITÉ DE PILOTAGE DU PEPR TASE

De formation ingénieure, j'ai débuté dans le secteur des énergies renouvelables, avec un focus particulier dans les projets hybrides, combinant production photovoltaïque et solutions de stockage dans les Zones Non Interconnectées (ZNI). Ces territoires présentent des contraintes particulières en raison de réseaux électriques moins robustes, ce qui impose d'intégrer des solutions de stockage aux installations photovoltaïques afin de garantir la stabilité du système électrique et d'optimiser l'utilisation de l'énergie produite.



J'ai ensuite poursuivi dans les projets hybrides en France et en Europe. Si les problématiques étaient différentes, elles n'en étaient pas moins complexes. Les développeurs sécurisent aujourd'hui du foncier pour accueillir de nouvelles installations de production, mais les contraintes de raccordement au réseau deviennent de plus en plus importantes. Dans ce contexte, les systèmes de stockage prennent une place croissante, non seulement pour faciliter l'intégration des énergies renouvelables, mais aussi pour apporter de la flexibilité au système électrique.

Aujourd'hui, en tant que chargée de valorisation, mon rôle consiste à accompagner les chercheurs et chercheuses du PEPR TASE dans l'identification et la valorisation de leurs résultats, de favoriser le développement de collaborations avec les acteurs socio-économiques, et de contribuer au transfert des connaissances pour favoriser l'émergence de projets innovants à fort impact. Enfin, ma mission implique également de faire le lien avec les programmes de prématurations et de maturations.

Contact : morgane.delteral@cnsr.fr

LES PARTENAIRES DES CONSORTIA

MSNA-TASE

Chef de file pré-maturation

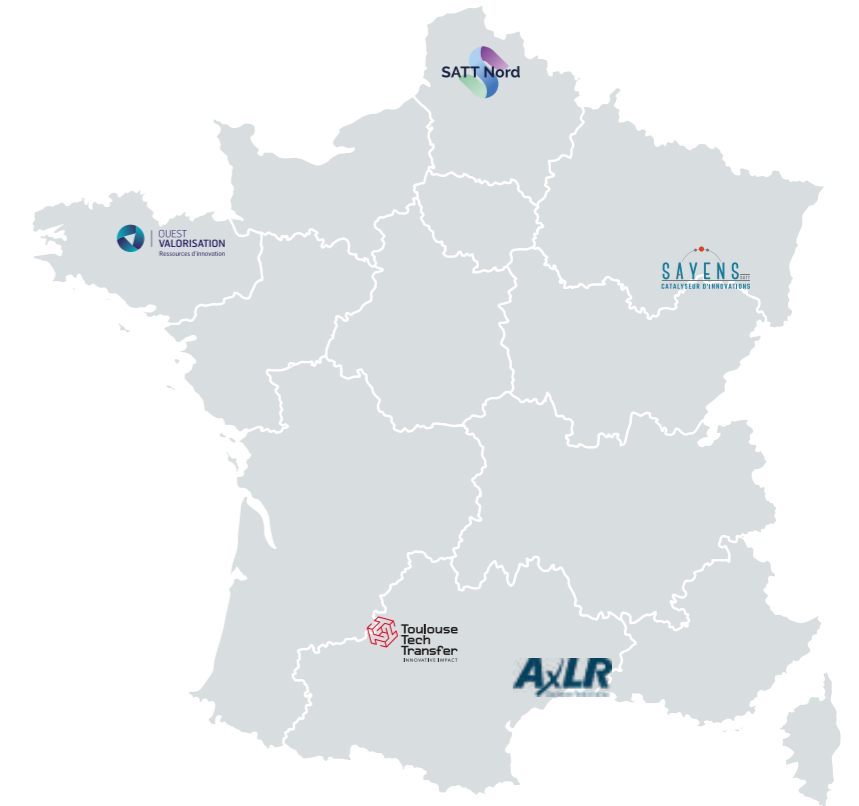


SATT Toulouse Tech Transfert

Chef de file maturation



SATT AxLR



ExTASE

Chef de file pré-maturation



Université Grenoble Alpes

Chef de file maturation



SATT Linksium



HyMES

Le projet HyMES vise à explorer les solutions de modélisation hybrides pour traiter de la complexité des systèmes et réseaux multi-énergie (dynamiques de temps différentes selon les vecteurs énergétiques, non-linéarités dont le traitement classique limite la représentation réelle des phénomènes physiques, accès limité à certains paramètres des systèmes, nécessité de prendre en compte certaines incertitudes de description des systèmes...) La modélisation hybride s'entend comme la combinaison de modèles physiques et de modèles à base de données à plusieurs niveaux de modèles et selon différentes formes : modèles de données assistés par les modèles physiques, estimation de paramètres de modèles physiques par apprentissage, chaînage de modèles de natures différentes et cosimulation, etc.

Pilote : Bruno LACARRIÈRE, Professeur (IMT, GEPEA)

Référence ANR : 22-PETA-0002

DC-Architect

L'objectif principal du projet DC-Architect est de concevoir des réseaux de distribution aptes à transporter l'énergie sous forme de courant continu. Les recherches porteront sur la conception des architectures de ces réseaux, incluant le choix des niveaux de tension, ainsi que sur la conception des principaux convertisseurs électroniques de puissance. Ceux-ci doivent être imaginés pour la conversion de courant continu/alternatif ainsi que pour le fonctionnement du système hybride AC-DC (points de connexion). L'ambition et la principale nouveauté de ce projet sont d'aborder simultanément les problématiques de conception des modules CEP et des besoins opérationnels du réseau de distribution (évoluant en raison de l'intégration des modules CEP).

Pilote : Vincent DEBUSSCHERE, Maître de conférences (Grenoble INP-UGA, G2Elab)

Référence ANR : 22-PETA-0003

AI-NRGY

L'objectif d'AI-NRGY est de répondre aux contraintes majeures des réseaux énergétiques de demain (fortement distribués, dynamiques, hétérogènes, critiques et parfois volatiles) en contribuant à la mise en place de solutions d'intelligence distribuée tirant parti de différentes méthodes de calcul (edge, fog et cloud computing), et en proposant une architecture logicielle ainsi que les méthodes, modèles et algorithmes nécessaires à la mise en œuvre de solutions d'intelligence distribuée susceptibles d'accélérer la digitalisation des réseaux d'énergie.

Pilote : Thierry MONTEIL, Professeur (INSA, IRIT)

Référence ANR : 22-PETA-0004

IOTA

IOTA développe de nouvelles solutions à faible coût et à haut rendement pour des cellules solaires tandem. Le projet se concentre sur les cellules solaires tandem en couches minces sur silicium afin de tirer parti de la technologie du silicium industriellement mature pour la cellule inférieure. Il explore plusieurs solutions pour la cellule supérieure en utilisant des matériaux déjà disponibles dans la communauté. L'objectif est d'atteindre des rendements de conversion supérieurs à 30% avec des procédés industrialisables à faible coût, en proposant des solutions de rupture. Des briques technologiques transversales sont développées (gestion de la lumière, dépôt de matériaux, couches d'interface, procédés d'intégration). Elles seront versatiles et compatibles avec différentes architectures de cellules et différents types de couches minces afin de tirer parti des derniers développements.

Pilote : Stéphane COLLIN, Directeur de recherche, (CNRS, C2N)

Référence ANR : 22-PETA-0005

Smart4Module

Le projet Smart4Module explore plusieurs pistes susceptibles de réduire l'impact environnemental de l'industrie du photovoltaïque. Spécifiquement, l'effort est porté sur le développement de matériaux et procédés pouvant réduire l'utilisation des matériaux critiques utilisés et/ou faciliter leur recyclage. Par extension, la question de l'occupation des sols est également traitée via l'intégration à des surfaces déjà artificialisées. Ce projet apporte des contributions centrées sur la mise en module de diverses technologies de cellules. De ce fait, une attention particulière sera portée à la fiabilité et la durabilité des solutions proposées lorsqu'elles le permettront. Les sujets traités se répartissent selon les trois axes de fabrication des modules : interconnexion, encapsulation et intégration.

Pilote : Romain FEILLEUX-ANGINIEUR, Chef de laboratoire (CEA)

Référence ANR : 22-PETA-0006

AgriPV-ER

Le projet AgriPV-ER étudie la solution agrivoltaïque (AV) avec des implications prometteuses pour la production alimentaire, les économies d'eau et la production d'énergie renouvelable. Beaucoup de travail est encore nécessaire pour évaluer les avantages et les limites de l'AV à travers le nexus eau-énergie-alimentation, minimiser ses impacts environnementaux négatifs et maximiser ses externalités positives. La zone euro-méditerranéenne est un endroit clé où des mesures d'adaptation drastiques doivent être prises rapidement pour faire face à la pénurie d'eau et à la demande alimentaire croissantes, et pour développer les énergies renouvelables pour la production d'énergie.

Pilote : Jordi BARDOSA, Ingénieur de recherche (École Polytechnique, LMD)

Référence ANR : 22-PETA-0007

Fine4Cast

L'objectif principal du projet Fine4Cast est d'améliorer la prévision à court terme (quelques minutes à quelques jours) de la production d'énergies renouvelables (EnR) et de la consommation à une échelle géographique fine (centrales de production, consommateurs, territoires). L'émergence de nouveaux acteurs et cas d'usage se traduit par un besoin de nouveaux produits. Les prévisionnistes sont confrontés à de nouveaux défis en raison de la prolifération des sources de données, et des menaces et contraintes de confidentialité qui y sont liées. 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.

Pilote : Georges KARINIOTAKIS, Directeur de recherche (Mines Paris -PSL, PERSEE)

Référence ANR : 22-PETA-0008

FlexTASE

La flexibilité énergétique - qui permet d'orchestrer un équilibre entre production et consommation - est un enjeu qui appelle des innovations techniques mais aussi sociales pour aller vers une implication/appropriation de tous les acteurs de la chaîne énergétique. Le projet FLEXTASE a ainsi pour objectif de développer une nouvelle approche paradigmatique d'ordre technique et sociale pour adresser deux types de flexibilité : celle indirecte (ou implicite) mobilisant les acteurs sur des solutions techniques et organisationnelles par le biais de l'envoi de signaux (tarifaires ou non); et celle directe (ou explicite) passant par le pilotage de systèmes de production, de consommation, ou de stockage, dont la gestion est assurée directement par des algorithmes, des systèmes, et des acteurs (du type agrégateurs).

Pilotes : Frédéric WURTZ, Directeur de recherche (CNRS, G2ELab)

Daniel LLERENA, Professeur (Grenoble INP-UGA, GAEL)

Référence ANR : 22-PETA-0009

LCA-TASE

LCA-TASE a pour ambition de fournir aux acteurs français de la transition énergétique des méthodologies avancées de l'analyse du cycle de vie (ACV) pour avoir des métriques fiables quant aux impacts environnementaux, sociaux et économiques des énergies renouvelables (EnR). La méthodologie de l'ACV inclura les services écosystémiques et la biodiversité, de nouveaux indicateurs (circularité ou ressenti aux paysages), et des modélisations dynamiques et prospectives en tenant compte des enjeux spatiaux, temporels ou de mises à l'échelle des technologies EnR. Le projet a une large envergure car il comprend aussi bien des technologies émergentes que d'autres plus matures, pour la production, le stockage et les usages de l'énergie.

Pilotes : Guido SONNEMANN, Professeur (Université de Bordeaux, ISM)

Référence ANR : 22-PETA-0010

SOLSTICE

SOLSTICE vise à fortement diminuer, voire supprimer, l'utilisation des matériaux critiques que sont l'indium et l'argent pour la production des cellules solaires à échelle industrielle. Les technologies photovoltaïques visées sont celles à base de silicium permettant d'obtenir de hauts rendements de conversion (hétérojonction de silicium, Topcon-like, Tandem Pérovskite/Silicium) tout en limitant les coûts de production. Les matériaux de substitution développés durant ce projet ont été sélectionnés pour leur potentiel de propriétés opto-électriques, mais également en fonction de leur abondance et de leur facilité d'accès. Les structures des cellules finales devront faire preuve de performances élevées et d'une soutenabilité accrue en ce qui concerne la provenance des matériaux.

Pilote : Frédéric JAY, Ingénieur de recherche (CEA-Liten, INES)

Référence ANR : 22-PETA-0011

TASTING

Les infrastructures énergétiques, en particulier électriques, connaissent un bouleversement majeur dit révolution 4D pour Décarbonisation, Décentralisation, Digitalisation et Démocratisation. TASTING propose de nouvelles solutions technologiques, cyberphysiques ou numériques, fiables et sûres pour répondre à ces enjeux majeurs. Il aborde les grands défis liés à la modernisation et la sécurisation des systèmes électriques avec la dimension du continuum cloud/edge. Les défis scientifiques ciblés sont liés à l'infrastructure des TIC en tant que facilitateur clé et fournisseur de solutions face aux changements profonds auxquels nos infrastructures énergétiques seront confrontées dans les prochaines décennies.

Pilote : Raphaël CAIRE, Maître de conférences (Université Lyon 1, Ampère)

Référence ANR : 22-PETA-0012

BioFlexPV

Le projet BioFlexPV vise à développer de nouveaux matériaux d'encapsulation efficaces à partir de matériaux biosourcés ce qui permettra de réduire la dépendance des filières PV à des ressources non renouvelables et, par conséquent, leur impact environnemental. En combinant des polymères issus de la biomasse et des couches denses inorganiques issues de ressources abondantes, nous visons à fabriquer des films d'encapsulation ayant des propriétés barrières aux gaz élevées. Ces nouveaux matériaux d'encapsulation seront intégrés dans différents types de modules PV flexibles et leur durée de vie sera étudiée et analysée en détails. En associant cette approche avec l'analyse du cycle de vie, le projet BioFlexPV ambitionne de développer des stratégies d'encapsulation à faible impact environnemental qui pourront être appliquées à différentes familles de modules PV flexibles.

Pilote : Sylvain CHAMBON, Directeur de recherche (CNRS, IMS)

Référence ANR : 22-PETA-0013

FLEX-MEDIATION

La relation fournisseurs-consommateurs est fortement encadrée par l'État selon des principes de marché fixés par l'Union Européenne. La recherche FLEX-MEDIATION fait un pas de côté : elle se focalise sur les actions de médiation menées par des organisations tierces - auprès des utilisateurs finaux - telles que les collectifs d'autoconsommation, les coopératives citoyennes et les agrégateurs d'électricité. Les analyses pluridisciplinaires des organisations tierces et de leurs effets sur les utilisateurs finaux, ainsi que de la régulation et des formes contractuelles, construisent une compréhension sociotechnique et transcalaire de la flexibilisation de la demande d'électricité en France.

Pilote : Gilles DEBIZET, Professeur (Grenoble INP-UGA, PACTE)

Référence ANR : 22-PETA-0014

MINOTAURE

MINOTAURE vise à répondre aux problèmes de fiabilité et de durabilité des nouvelles technologies de cellules photovoltaïques, qui constituent un enjeu majeur pour leur industrialisation et leur pénétration sur le marché. Le projet réunit un ensemble de partenaires possédant des expertises complémentaires dans différents domaines de caractérisation et de modélisation et prévoit de déployer ces expertises dans une approche globale et multimodale pour appréhender les mécanismes de dégradation des cellules, les analyser et les comprendre, pour ensuite pouvoir les contourner ou les éliminer.

Pilote : James CONNOLLY, Ingénieur de recherche (CentraleSupélec, GeePs)

Référence ANR : 22-PETA-0015

POWDEV

L'objectif principal de POWDEV est d'évaluer et d'optimiser la résilience des systèmes électriques dans le cadre d'une insertion massive d'énergies renouvelables, en considérant les événements extrêmes dans les climats actuels et futurs, ainsi que la complexité des réseaux et des scénarios socio-économiques. Les scénarios de changement climatique doivent être pris en compte dans l'analyse de la résilience car les événements extrêmes (sécheresse, tempêtes, orages) peuvent avoir de sérieux impacts. Les défaillances en cascade doivent être analysées avec une intégration appropriée des sources d'énergies renouvelables et du changement climatique. La chaîne de valeur sociétale et économique doit aussi être prise en compte. La résilience sera optimisée par des décisions appropriées en matière d'exploitation et de conception du système électrique.

Pilote : Anne BARROS, Professeure (CentraleSupélec, LGI)

Référence ANR : 22-PETA-0016



SEER - Systèmes énergétiques et énergies renouvelables

La revue du PEPR TASE, programme issu de la stratégie France 2030, co-piloté par le CNRS et le CEA

Direction de programme :

Philippe AZAIS, directeur de recherche au CEA, à la Direction des Énergies (chargé de mission à l'APED)

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

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

Comité opérationnel du PEPR TASE :

Dounia DEMS, cheffe de projet

Morgane DELTERAL, responsable partenariats et valorisation

Etienne MORISSEAU, chargé de communication

Contact : dp@pepr-tase.fr

Les images non-créditées sont libres de droit et proviennent de la banque d'images Magnific