



## **LES TEMPS FORTS**

**2019-2024**

6 années de recherche et d'innovation  
au service de la transition énergétique



L'Institut pour la Transition Energétique INES.2S est reconnu par l'État français et bénéficie d'une aide dans le cadre de France 2030 (ANR-10- IEED-0014-01).

# INSTITUT POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE DÉDIÉ AU SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Les Instituts pour la Transition Energétique (ITE) sont des plates-formes interdisciplinaires dédiées aux énergies décarbonées, unissant les compétences de l'industrie et de la recherche publique, dans une logique de co-investissement public-privé et de collaboration étroite entre les acteurs. Les 7 ITE et 8 Instituts de Recherche Technologique (IRT) français forment le réseau FIT (French Institute for Technology).

Porté par le CEA, L'ITE INES.2S a vocation à ouvrir toutes les opportunités économiques générées par le développement du solaire, avec un objectif : favoriser l'intégration massive de l'énergie photovoltaïque et contribuer ainsi à la transition énergétique. Cette intégration massive se fera aux conditions d'une triple réussite :

- des technologies solaires adaptées aux contraintes de leur usage,
- de l'optimisation de l'intégration électrique et numérique au sein des systèmes et réseaux,
- et de l'attention de tout instant à leur durabilité, fiabilité et rentabilité afin d'assurer la viabilité économique et industrielle.

Accompagner cet objectif, c'est aussi partager les connaissances et développer les compétences par la formation.



Photo Gil Lebois / photothèque CNR

« CNR est très satisfaite de son partenariat stratégique avec INES.2S qui a permis, depuis 2019, de bénéficier des compétences de l'ITE dans un cadre collaboratif avec les autres membres industriels et académiques. C'est un véritable accélérateur de notre innovation qui a déjà abouti à plusieurs démonstrateurs et transferts internes en phase de commercialisation »

**Frédéric STORCK, Président de l'ITE INES.2S  
Directeur Transition Énergétique et Innovation CNR**

## EN CHIFFRES



**87** Partenaires  
**84** industriels



**96** Brevets



**35** Projet européens



**18** Thèses



**42** Publications scientifiques  
à comité de lecture

# SOMMAIRE

## 01

L'institut

## 02

Photovoltaïque pour le bâtiment, les infrastructures et la mobilité

## 03

Solutions pour l'intégration massive du solaire aux réseaux électriques

## 04

Intégration économique et environnementale du solaire

## 05

Formation et rayonnement

# O1

L'institut

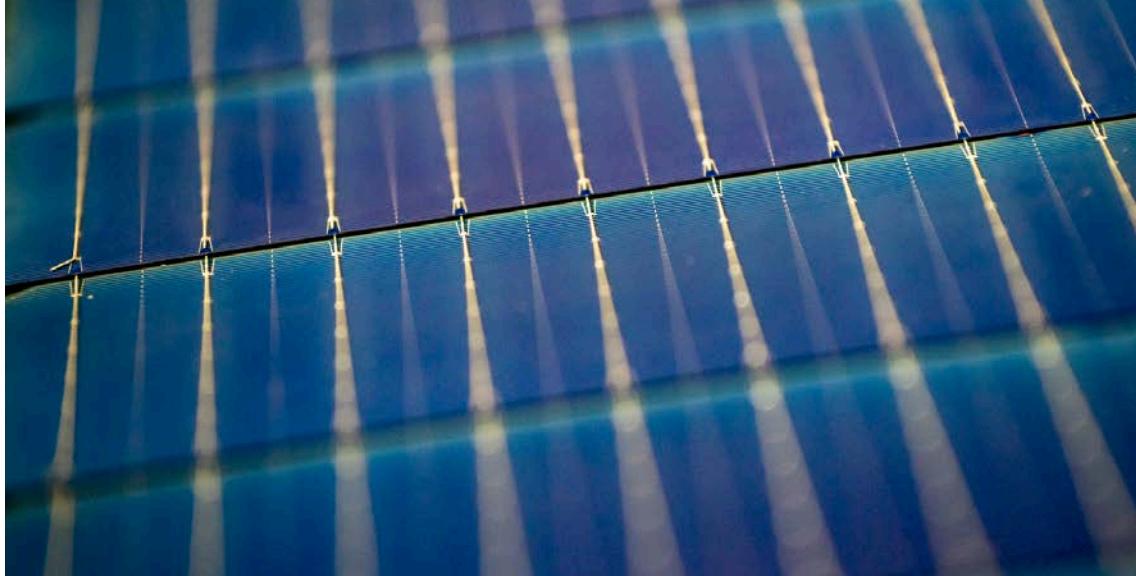


Photo LGODART / CEA

## MISSION

*Soutenir le développement de la filière photovoltaïque française, en développant une R&D multi partenariale publique-privée au meilleur niveau mondial, favorisant ainsi le transfert des technologies développées vers les acteurs industriels.*

- **LA DIFFUSION ACCÉLÉRÉE DES TECHNOLOGIES AVANCÉES MAIS ÉGALEMENT DE L'ENVIRONNEMENT ÉCONOMIQUE (FORMATION, DISSÉMINATION)**
- **UN RÔLE DE LIANT ENTRE TOUS LES ACTEURS ISSUS DE DIVERSES FILIÈRES AUTOUR DE LA QUESTION DE L'INTÉGRATION DU SOLAIRE**
- **UNE STRATÉGIE DE DIFFÉRENTIATION PAR L'INNOVATION**
- **L'ÉTUDE ET LE DÉVELOPPEMENT DE NOUVELLES APPLICATIONS ET USAGES.**

## AXES STRATÉGIQUES

Renforcer la part du solaire dans le mix électrique national, à l'horizon 2035, est une ambition qui implique de tenir compte de divers aspects de l'intégration du solaire photovoltaïque :

- son intégration physique au sein des applications et des territoires
- son intégration électrique au sein des systèmes et réseaux
- son intégration économique et environnementale.

# PARTENAIRES

« Renforcer la filière photovoltaïque française pour soutenir la transition énergétique nationale »

L'énergie photovoltaïque connaît une très forte dynamique dans le monde et intéresse de nombreux usages, comme les bâtiments, zones industrielles, infrastructures, ou encore tout type de mobilité, permettant de les fonctionnaliser et/ou de réduire leur impact environnemental.

Fin 2024, INES.2S peut compter sur un écosystème riche de 86 partenaires issus de divers secteurs de l'industrie et du service.



La gouvernance de l'institut s'organise au sein d'un consortium qui réunit :

- Les acteurs industriels : CNR Compagnie Nationale de Rhône, Colas, Renault, QUOS Group et DeltaDore, rejoints par Certisolis en 2025
- l'Université de Savoie Mont Blanc,
- l'association INES Plateforme Formation et Evaluation,
- et le CEA, porteur de l'ITE et opérateur de recherche,

# ENJEUX

*Le solaire photovoltaïque est la source d'énergie la plus installée sur la planète, et elle figure parmi les plus vertueuses d'un point de vue environnemental. La diminution de son impact sur notre planète est donc un levier de compétitivité à actionner pour l'industrie, et un axe d'innovation indispensable pour assurer le rythme de croissance du secteur, et répondre aux enjeux sociétaux auxquels nous devons faire face.*

## **SOUTENIR LA RELOCALISATION DE LA FILIÈRE INDUSTRIELLE EN FRANCE ET EN EUROPE :**

pour bénéficier de conditions de fabrication plus respectueuses de l'environnement et d'un mix énergétique adapté, et pour notre souveraineté industrielle.

## **AMÉLIORER LE RENDEMENT, LA FIABILITÉ ET LA DURÉE DE VIE DES PRODUITS :**

par exemple, la technologie photovoltaïque hétérojonction développée avec 3SUN est plus performante que certaines des meilleures technologies PERC. Après 18 mois de mesure dans le désert d'Atacama, les panneaux de 3SUN montrent un meilleur rendement et une meilleure résistance en température.

## **DÉVELOPPER LES COMPOSANTS POUR TENDRE VERS DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES OPTIMISÉS EN CONCEPTION ET EN OPÉRATION :**

nos solutions visent à produire une électricité toujours moins chère, à la stocker, à la raccorder au réseau, et à la piloter avec des composants toujours plus fiables et robustes. Elles permettent aussi de multiples applications dans divers secteurs industriels.

## **RÉDUIRE LES QUANTITÉS DE MATIÈRES UTILISÉES, REMPLACER LES MATÉRIAUX CRITIQUES, AMÉLIORER LES PROCÉDÉS :**

par exemple, en combinant une métallisation cuivre-argent des cellules avec leur interconnexion par un adhésif conducteur à faible teneur d'argent, nous visons d'abaisser drastiquement la consommation d'argent à 3 mg/Wp à l'échelle du panneau (contre 35 actuellement).

## **PLACER LE RECYCLAGE AU CŒUR DES DÉVELOPPEMENTS :**

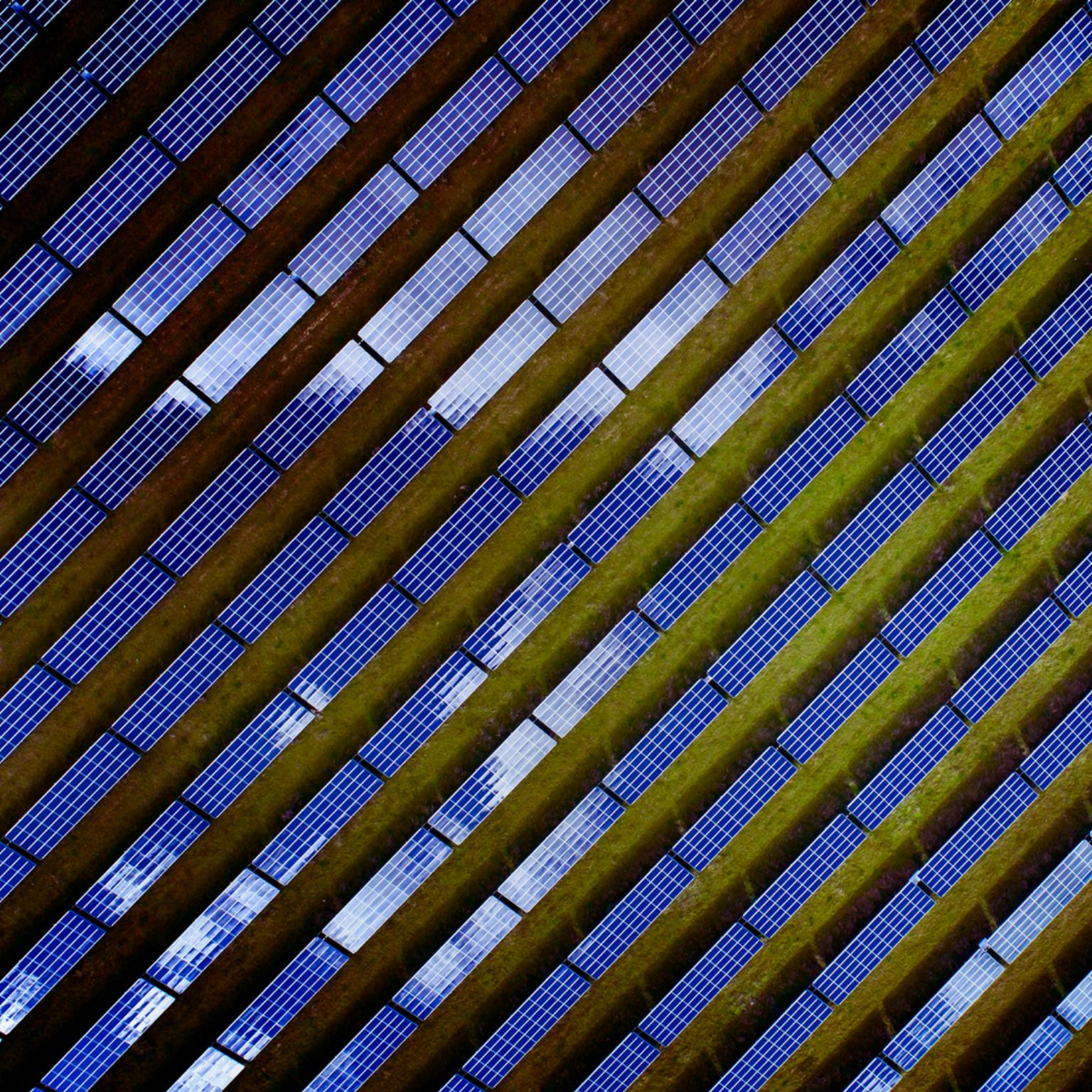
à la fois pour accompagner la mise en place de la filière de recyclage et pour anticiper des futures problématiques. Donner une seconde vie aux modules PV est également une préoccupation importante pour laquelle nous apportons plusieurs innovations.

## **DÉVELOPPER LES OUTILS MANQUANTS, HARMONISER LES MÉTHODES DE CALCUL DE L'EMPREINTE ENVIRONNEMENTALE :**

après EcoPV, un outil d'évaluation pour l'écoconception des panneaux photovoltaïques, et EcoSS, son jumeau pour les systèmes de stockage par batteries, EcoSPV, est le nouvel outil dédié à l'analyse de cycle de vie des centrales photovoltaïques

## **FORMER LES TALENTS :**

en soutenant l'offre nationale de formation continue et initiale.



# 02

Photovoltaïque pour le bâtiment,  
les infrastructures et la mobilité

## INTÉGRATION DU PHOTOVOLTAIQUE AUX APPLICATIONS ET TERRITOIRES



Plateforme modules photovoltaïques

Photos L.GODART / CEA

### PANNEAUX DÉDIÉS AUX APPLICATIONS

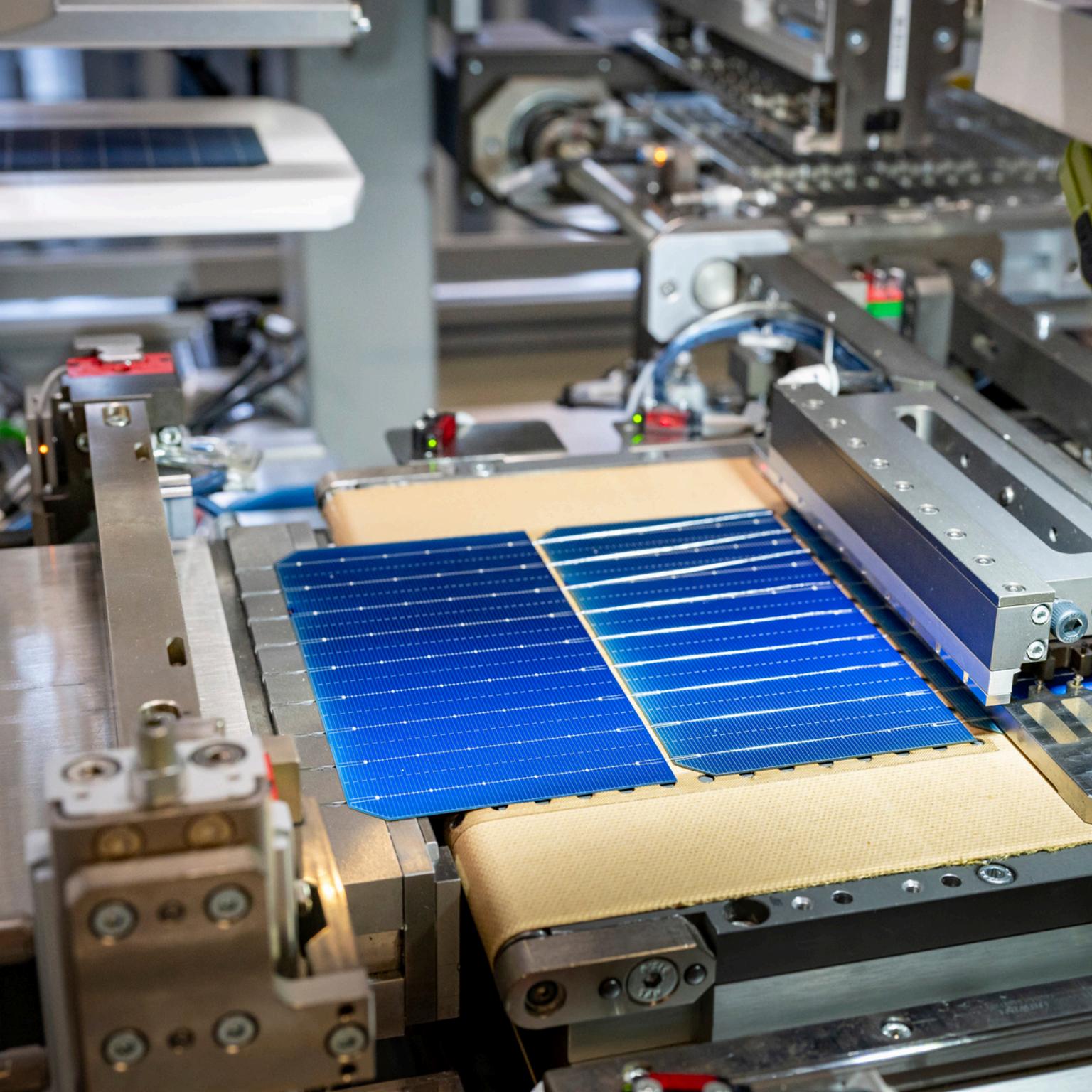
Accélérer le développement des capacités de production d'énergie solaire tout en prenant en compte de façon renforcée les enjeux environnementaux, de faisabilité locale, de conflits d'usages, notamment en développement des composants solaires dédiés au bâtiment et aux infrastructures.

### ECO-CONCEPTION

L'écocoception et la réduction constante de l'impact environnemental des technologies par l'intégration de nouveaux matériaux notamment bio-sourcés, par une meilleure recyclabilité et/ou l'allongement de la durée de vie des dispositifs

### MOBILITÉ SOLAIRE

Favoriser le développement de la mobilité électrique en augmentant l'autonomie des véhicules par la "solarisation" des véhicules de tout type, en augmentant la part de l'énergie solaire utilisée dans le transport, etc.





## PREMIÈRE MONDIALE

Crédit -Oscar Timmers - Wattway

### LES DALLES PHOTOVOLTAÏQUES WATTWAY CERTIFIÉES CONFORMES

Wattway est une innovation française, fruit de plusieurs années de R&D menées conjointement par Colas, un leader mondial des infrastructures de transport, et les laboratoires du CEA, au sein de l'ITE INES.2S. Premier revêtement photovoltaïque circulable au monde, il permet de produire de l'électricité renouvelable en s'installant sur des chaussées existantes. La version actuelle de la dalle Wattway a été certifiée en 2024 selon les normes IEC en vigueur dans le secteur du photovoltaïque, comme tout panneau solaire standard, un résultat enthousiasmant et une première mondiale pour un module circulable.

Quelques années en arrière, le développement d'un module photovoltaïque apte à recevoir la circulation de véhicules était une idée fort audacieuse. Il aura fallu beaucoup de persévérance et de compétences pour trouver comment concevoir et développer des modules photovoltaïques spécifiques résistants à une circulation et aux intempéries, ainsi que les moyens de les poser à même l'enrobé routier. Mais le résultat est là, avec plus d'une centaine de sites équipés à travers le monde (Europe, Japon, USA...).

Et ce n'est pas tout ! Les dalles Wattway ouvrent la voie vers d'autres fonctionnalités pour une route plus sûre avec la gamme Flowell, signalisation lumineuse au sol pour les zones à risques, comme les carrefours ou les passages piétons.

02

Photovoltaïque pour le bâtiment, les infrastructures et la mobilité

*Les applications du solaire dans la mobilité suscitent interrogations et engouement, principalement de la part des fabricants automobile, comme RENAULT. Associer le photovoltaïque à la voiture électrique semble être naturel. Pourtant, l'automobile, avec sa demande en énergie, ses normes, ses règles, ses habitudes, et ses contraintes apporte son lot de freins potentiels à l'intégration efficace d'une telle source d'énergie aux véhicules légers.*

## MOBILITÉ SOLAIRE

Nos études accompagnent nos partenaires industriels dans ce domaine avec des travaux couvrant plusieurs aspects comme le développement de procédés permettant l'intégration du photovoltaïque sur des éléments de carrosserie de forme complexe, l'utilisation de procédés et matériaux proche de l'industrie automobile, l'intégration système au véhicule, et l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) d'une telle option solaire.

Ainsi, nous supportons leurs développements de prototypes, essais caractérisation et/ou simulation, tout en préparant le futur.



Photo CEA

### KIT DE SOLARISATION

*Prototype préfigurant une solution non intrusive et compatible avec tout véhicule rechargeable.*

Il comprend un panneau photovoltaïque qui s'installe grâce à une face arrière magnétique, une batterie et une interface électronique. Testé sur un modèle Renault Zoé, la remontée des données à distance a permis de montrer un gain possible de 4 km par jour pour une journée très ensoleillée de juillet 2022, en Savoie, avec un kit solaire de 145Wc soit environ 1m<sup>2</sup>, et une consommation de 150Wh/km.

En France, 35,7% des trajets domicile travail sont inférieurs à 5 km aller simple.

## **DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES COMPOSITES LÉGERS DESTINÉS NOTAMMENT À LA MOBILITÉ SOLAIRE.**



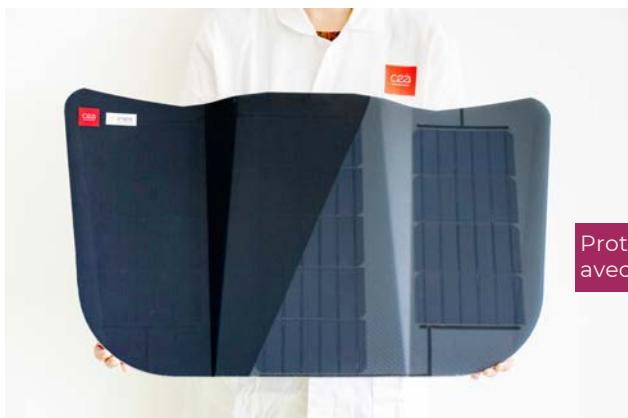
La presse sur la Plateforme modules photovoltaïques

Photos L.GODART / CEA

La presse LIT™ RAPID SOLAR, développée en partenariat avec la société Roctool, offre des conditions de température et de pression qui ouvrent le champ des possibles vers de nouveaux matériaux pour les modules photovoltaïques.

Cette presse de thermocompression permet de travailler à des températures bien supérieures aux équipements de lamination habituellement utilisés pour l'assemblage des panneaux photovoltaïques. Elle assure également un refroidissement dans une même chambre, sans rupture de la pression appliquée.

*Ces conditions permettent la mise en œuvre de nouveaux matériaux polymères thermoplastiques ainsi que des composites à matrice polymère pour l'étape de l'encapsulation, matériaux pertinents dans l'automobile et pour les enjeux de recyclage..*



Prototype de capot automobile solaire réalisé en partenariat avec Stellantis et Roctool et exposé au CES Las Vegas 2023

## START-UP HELIUP

Il aura fallu plus de deux ans de recherche et développement avant qu'Heliup lance sur le marché des panneaux photovoltaïques ultralégers et simples à poser. Ils sont adaptés aux limitations structurelles des bâtiments à ossature métallique, un marché potentiel de 500 millions de m<sup>2</sup> en France.

Les panneaux photovoltaïques pour toiture-terrasse d'Heliup pèsent 5 kilos/m<sup>2</sup> installés, contre 15 kg/m<sup>2</sup> pour des installations utilisant des panneaux classiques. Le gain de poids est dû notamment au remplacement du cadre en aluminium et du verre épais (3,2 mm) par un verre ultra-mince qui conserve la protection mécanique et physico-chimique des cellules photovoltaïques. Tout l'enjeu est d'utiliser un tel composant tout en assurant le même niveau de garantie, notamment la résistance à la grêle.

L'innovation réside aussi dans un système de pose qui ne rajoute pas de poids supplémentaire, les panneaux étant fixés directement sur le revêtement d'étanchéité de la toiture-terrasse par exemple.

## PANNEAUX ULTRALÉGERS POUR GRANDES TOITURES INDUSTRIELLES ET COMMERCIALES

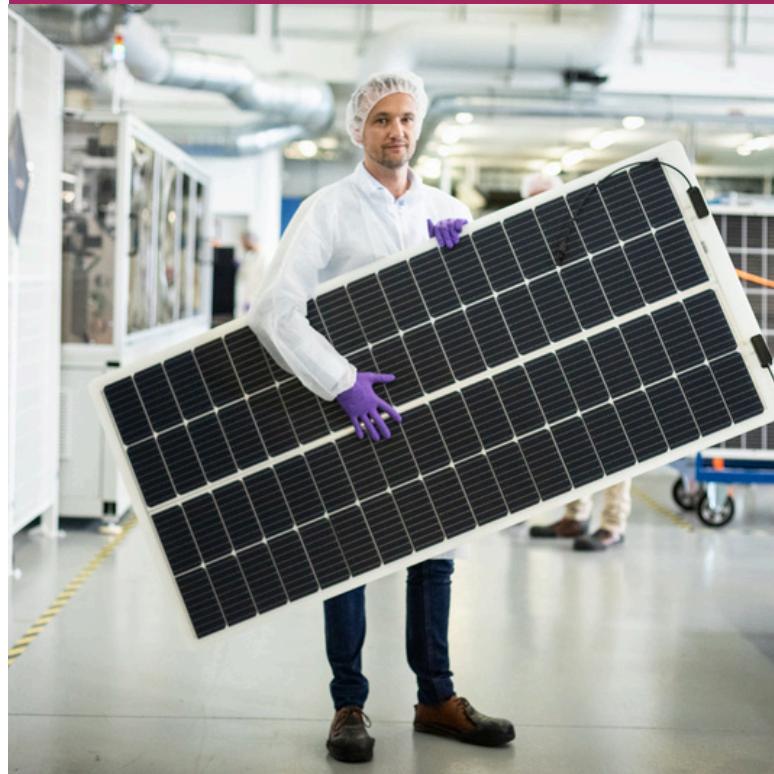


Photo A.BAUD / HELIUP

*Après une première levée de fonds de 10 M€, Heliup a lancé sa première usine en 2024 et commercialise auprès des grands acteurs du bâtiment et d'énergéticiens. Elle poursuit sa R&D avec INES.2S pour optimiser ses panneaux, évaluer leurs performances, qualifier de nouveaux matériaux et mener des analyses de leur cycle de vie.*

02

Photovoltaïque pour le bâtiment, les infrastructures et la mobilité

# 03

Solutions pour l'intégration massive de l'énergie solaire aux réseaux

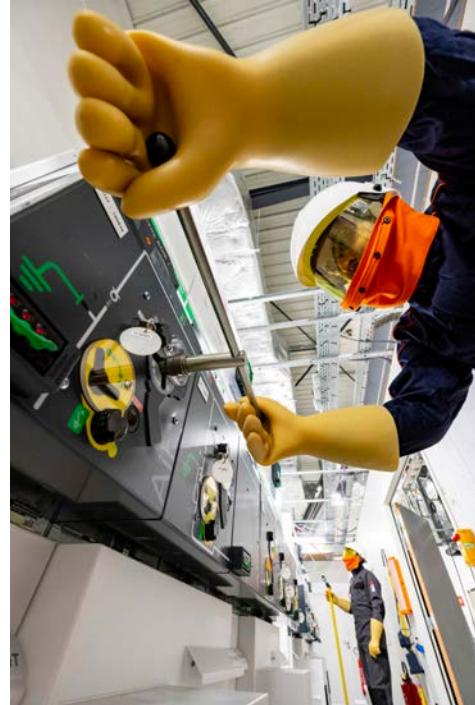
## INTÉGRATION ÉLECTRIQUE AU SEIN DES SYSTÈMES ET RÉSEAUX

**STOCKAGE STATIONNAIRE  
ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE / CONVERSION  
TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES DE PILOTAGE**

Le deuxième programme vise le développement de solutions pour l'intégration massive du solaire aux réseaux électriques. Il concerne notamment les technologies de stockage de l'électricité, la conversion, et les technologies numériques pour un pilotage intelligent des systèmes et réseaux.

Il concourt notamment à stabiliser les réseaux électriques, sans les renforcer, en aidant à acquérir une flexibilité suffisante pour faire face aux variations de production, et en cherchant à réduire la variabilité de l'offre et de la demande à court terme.

Ses actions de recherche portent sur le stockage stationnaire (connecté au réseau), sur l'algorithmie, les logiciels permettant le dimensionnement, la simulation et le pilotage intelligent, activités pour lesquelles il rassemble un grand nombre de partenaires industriels de valorisation.



Plateforme smartgrid

Photo L.GODART / CEA

## STABILITÉ DES RESEAUX ÉLECTRIQUES

### LES POMPES A CHALEUR PARTICIPENT A L'AUTOREGULATION RAPIDE DU RÉSEAU

*Nos réseaux électriques se transforment. Ils s'adaptent à l'arrivée en force de sources de production décentralisées et variables comme les énergies renouvelables, notamment photovoltaïque, de l'électrification des usages telles que la mobilité et aux évolutions technologiques.*

Pour les gestionnaires de réseaux, il est essentiel d'assurer la stabilité du réseau électrique en utilisant le plus intelligemment et frugalement possible les forces en présence.

Parmi les solutions disponibles, les Pompes À Chaleur (PAC) offrent un potentiel intéressant pour l'autorégulation rapide de la consommation, lors d'événements sur le réseau électrique. Avec RTE, nous avons étudié et mesuré ce potentiel pour en vérifier la faisabilité.

*Nous pouvons redonner une sensibilité à ces appareils afin de participer à l'équilibre du réseau électrique, en termes de tension et de fréquence, à l'échelle de quelques secondes.*

Les pompes à chaleur sont ressorties de notre analyse comme particulièrement intéressantes. Le parc installé en France devrait représenter environ 11 millions d'unités d'ici 2030 et ces PAC possèdent en général un variateur de puissance qui peut être l'actionneur de flexibilité.

L'expérimentation réalisée a montré la faisabilité et l'intérêt de la solution pour la stabilité du réseau électrique, sans effet sensible sur le confort de l'usager.

### QUEL POTENTIEL ?

Les capacités de flexibilité des PAC utilisées pour le chauffage et la climatisation sont estimées à :

- une baisse maximum de **-11GW en début de matinée en hiver**
- **-7,5GW en fin d'après-midi en été,**
- et minimum de **-500MW en fin d'après-midi en intersaison et en été.**

Auxquelles s'ajoutent -600 MW pour les PAC destinées à l'eau chaude sanitaire en chauffage de stock.



Centrale photovoltaïque flottante  
sur le lac de La Madone - Rhône (Photo CNR)

## CNR, PARTENAIRE STRATÉGIQUE DEPUIS 2019

*CNR, 1er producteur français d'électricité exclusivement renouvelable, produite à partir d'énergies météorologiques (hydraulique au fil de l'eau, éolien et photovoltaïque), s'appuie depuis 2019 sur INES.2S pour accélérer ses innovations et les amener rapidement à maturité industrielle et commerciale.*

De nombreuses thématiques ont été abordées grâce au positionnement large d'INES.2S sur l'intégration massive du solaire tant au niveau technologique qu'au niveau électrique, numérique et économique. On peut citer en particulier : la production photovoltaïque linéaire via des modules bifaciaux verticaux, les performances énergétiques de l'agrivoltaïsme, le pilotage optimisé du Rhône conjointement avec les EnR et des moyens de flexibilité et stockage grâce à un EMS, le solaire léger ou l'optimisation de l'exploitation et de la maintenance des parcs

## GESTION MULTI-ECHELLE DE L'ÉNERGIE

*La plateforme expérimentale mise en place en 2024 va permettre de tester les briques développées telles que l'EMS, et une solution Vehicle-to-Grid.*

Ce « démonstrateur multi-échelle » vise à développer un système de gestion de l'énergie (EMS) évolutif permettant le déploiement, l'essai et l'analyse des performances à différentes échelles de démonstration : Résidentiel, Quartiers et centres commerciaux et industriels :



- Réduire la consommation énergétique: programmer son chauffage pour un meilleur confort, optimiser l'éclairage, couper la veille de ses appareils électriques;
- Maximiser l'autoconsommation en décalant ses charges pour favoriser la consommation d'une énergie renouvelable produite localement;
- Minimiser la facture d'énergie en décalant des consommations aux heures où l'électricité est moins chère.

## AJOUTER DE L'ÉNERGIE SOLAIRE DANS LA MOBILITÉ ÉLECTRIQUE PAR LE SMART CHARGING



## EXPÉRIMENTATION GRANDE ÉCHELLE EN PARTENARIAT AVEC RTE

Le CEA dispose à Cadarache près d'Aix-en-Provence, d'une infrastructure de recharge de véhicules électriques de plus de 100 points de charge. Elle subvient à la recharge de près de 400 véhicules. C'est l'une des infrastructures privées les plus importantes de la région PACA et un formidable terrain d'expérimentation et de démonstration.

C'est ici que RTE et INES.2S expérimentent à grande échelle, avec 24 points de recharge, un système de supervision et de gestion de la recharge des véhicules électriques des employés du centre. Cette gestion se fait en temps réel et doit allier la satisfaction de l'utilisateur par le respect de ses préférences, et la synchronisation de la puissance consommée avec la production d'une centrale solaire photovoltaïque.

*Les résultats montrent, sur une période d'expérimentation de plusieurs mois, qu'il est possible d'augmenter la part solaire dans l'énergie utilisée par les bornes de 34 à 90 % grâce au pilotage de la recharge des véhicules, tout en respectant les préférences des utilisateurs.*



Photo DRIVECO

## STRATÉGIES DE PILOTAGE EN ACTION

### EN 2023, DRIVECO LÈVE 250 MILLIONS D'EUROS POUR DEVENIR UN DES LEADERS EUROPÉENS DE LA RECHARGE DE VÉHICULES ÉLECTRIQUES

Driveco est l'un des partenaires historiques du CEA et de l'ITE INES.2S avec lesquels il a mené des développements technologiques notamment en matière de systèmes de gestion de l'énergie avancés (EMS ou Energy Management System), aujourd'hui embarqués dans ses solutions de recharge de véhicules électriques couplées à la production d'énergie solaire. Les EMS sont des outils logiciels qui permettent d'appliquer des stratégies de pilotage et d'optimisation des systèmes énergétiques. Ils sont clés pour gérer les nouveaux besoins des systèmes et réseaux électriques.

Cette levée de fonds vient soutenir la vision long terme de Driveco avec des objectifs ambitieux d'ici 2030 :

- Renforcer son maillage territorial pour consolider sa position en France,
- Accélérer l'expansion internationale de manière à proposer 60 000 points de charge au sein de 7 pays européens. L'objectif est de permettre l'ensemble des recharges de plus de 1,2 million de véhicules par an et d'éviter ainsi l'émission de 3 millions de tonnes de CO2
- Consolider la stratégie d'innovation technologique visant à proposer l'expérience-client la plus simple sur la station et sur son application mobile.

03

Solutions pour l'intégration massive de l'énergie solaire aux réseaux

## PROLONGER LA VIE DES BATTERIES



Zone d'essais des batteries

Photo D. GUILLAUDIN / CEA

## STOCKAGE STATIONNAIRE

INES.2S développe des méthodologies et outils de gestion des systèmes de stockage stationnaires. Sur la base des résultats d'essais de près de 500 références de batteries, nos laboratoires développent, entre autres, des technologies avancées pour évaluer les indicateurs d'état des batteries (charge, santé) pour optimiser leur pilotage et améliorer leur performance et durée de vie.

Les batteries lithium ion offrent actuellement les plus grandes densités d'énergies et sont donc une technologie de choix pour de nombreuses applications (véhicules électriques, stockage d'électricité pour les réseaux etc.). Elles présentent, en revanche, une dégradation de leurs performances – et notamment de leur capacité et résistance – avec le temps, même pendant les périodes de non utilisation. Pour suivre les performances des batteries en vieillissement, des indicateurs tels que le SOH (State Of Health) peuvent être mis en place.

Parmi les approches développées actuellement, la communauté scientifique et industrielle cherche à élaborer les meilleures stratégies de pilotage, en tenant compte de la dégradation de la durée de vie de la batterie qu'elle induit.

Il faut savoir que le dimensionnement initial d'un système de stockage stationnaire est fait de manière à assurer les besoins de service de chaque application, et ce même après un certain nombre d'années d'utilisation. Il prend donc en compte un facteur de vieillissement pour une durée de vie et un profil d'utilisation définis. Dans la plupart des cas, la batterie est ainsi surdimensionnée par rapport au besoin d'énergie.

Toujours dans la plupart des cas, et sans optimisation de sa gestion, la batterie est ramenée en permanence à pleine charge après utilisation, donc elle fonctionne à haut état de charge. Or il est connu que cela a pour conséquence un vieillissement prématûr, donc une perte accrue de l'énergie restituée par la batterie.

*Nos chercheurs ont développé une méthode permettant la prise en compte de l'état de santé d'une batterie dans la gestion du seuil maximum de charge, afin de mettre en place une gestion optimale permettant d'assurer le service rendu par l'accumulateur, tout en minimisant sa dégradation et donc en prolongeant sa durée de vie de façon drastique (près du double).*

# 04

Intégration économique et environnementale du solaire

## ÉCONOMIE, IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Bancs de tests de longue durée

Photo L. GODART / CEA

### RENTABILITÉ ÉCONOMIQUE

Renforcer la fiabilité des centrales solaires ou encore améliorer leur maintenance, c'est augmenter la rentabilité. Pour cela l'ITE développe des méthodes avancées de diagnostic.

### RÉDUCTION D'IMPACT

Il contribue également à faciliter le développement de capacités de production solaire tout en prenant en compte, de façon renforcée, les enjeux environnementaux, de faisabilité locale, de conflits d'usages. Le programme axe ses recherches sur les nouvelles centrales utilisant des surfaces agricoles (en co-exploitation), les surfaces déjà artificialisées (dont les délaissés ou berges, sur de grandes longueurs), ou d'autres encore comme les centrales flottantes.

### ECO-CONCEPTION & ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Enfin INES.2S consacre une partie de son activité aux technologies qui vont améliorer encore l'empreinte environnementale à travers le développement d'une expertise et d'outil d'analyse de cycle de vie des technologies et systèmes, l'allongement de la durée de vie, la seconde vie et le recyclage. De notables avancées en matière d'outils et de savoir-faire sur l'Analyse de Cycle de Vie et l'écoconception ont été obtenues dans ce cadre.



## ANALYSE DU CYCLE DE VIE ET ÉCO-CONCEPTION

Connaître l'impact environnemental des technologies photovoltaïques permet de travailler plus efficacement à sa réduction. Beaucoup d'efforts de recherche sont donc consacrés à caractériser cet impact, notamment par l'Analyse de Cycle de Vie (ACV).

L'ITE développe depuis plusieurs années des outils d'analyse d'impact environnemental dont EcoPV, un outil d'évaluation et d'amélioration dédié à l'écoconception des panneaux photovoltaïques, et EcoSS, un outil similaire dédié aux performances environnementales des systèmes de stockage par batteries. C'est un axe fort de l'ITE INES.2S, au service de la filière solaire.

Son dernier né : ECOSPV, un outil d'analyse d'impact dédié aux centrales, couplé à une base de données intégrant des données régulièrement mise à jour. Il doit permettre d'obtenir des résultats d'impacts plus précis, cohérents et personnalisés, sans faire appel, ou très peu, à du temps d'expert.

L'impact d'une centrale photovoltaïque est l'addition de celui des panneaux, majoritaire dans le cas de l'impact carbone ou celui sur la couche d'ozone, et de celui de ce qu'on appelle le « BOS » pour Balance of System. Le BOS est constitué de tous les composants d'une centrale ou d'un système photovoltaïque, autres que les panneaux photovoltaïques : des câbles, des interrupteurs, du système de montage, d'onduleurs, du stockage.

La participation significative du BOS à certains impacts environnementaux, comme ceux liés à l'écotoxicité ou à la toxicité humaine, rend l'étude de ce domaine particulièrement importante. D'autant que l'impact des panneaux photovoltaïques se réduit lui au fil des années, avec pour effet de faire augmenter la proportion d'impact environnemental due au BOS dans les centrales.



Centrale MEGASOL - Cadarache

Photo L. GODART / CEA

## TRANSFERT DE TECHNOLOGIES DE DIAGNOSTIC AVANCÉ DES CENTRALES SOLAIRES À ENER-PACTE

Une technologie novatrice de diagnostic avancé couplant imagerie et mesures électriques a été transférée à la PME lyonnaise en 2022. La solution permet la classification des défauts identifiés sur les chaînes photovoltaïques et l'évaluation des pertes associées.

La solution logicielle complète développée avec ENER-PACTE embarque le résultat de travaux initiés dès 2014 dans le cadre de l'ITE INES.2S.

Les deux logiciels prototypes, baptisés Aspire et IV-Diag, présentent désormais un degré de maturité qui permet la prise en main rapide par l'entreprise et leur intégration dans l'environnement cible. Ils contribuent à renforcer l'offre d'Ener-Pacte visant à sécuriser, optimiser les productions et garantir la rentabilité des centrales photovoltaïques.

La société a levé 2.6 M€ fin 2023 pour financer son développement dans ce domaine.

**DÉTECTOR ET IDENTIFIER LES DÉFAUTS, QUANTIFIER LES PERTES**

## NOUVELLE MÉTHODE POUR L'OPTIMISATION DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES

### UNE ALTERNATIVE PROMETTEUSE À LA COURBE COURANT-TENSION

Un groupe multidisciplinaire de chercheurs en ingénierie électrique, informatique et mathématiques, issus de nos laboratoires et d'unités de recherche universitaires partenaires, crée une nouvelle méthode pour l'analyse des systèmes photovoltaïques.

Cette méthode innovante apporte une alternative pleine de promesses à la fameuse et incontournable courbe courant-tension ou courbe I-V qui est communément utilisée pour caractériser les panneaux photovoltaïques.

*L'avancée a été publiée dans la prestigieuse revue scientifique Solar Energy en 2024, dans un article intitulé "On the Parameter Domain of the Single-Diode Model".*

## RÉPARER ET DONNER UNE SECONDE VIE

## SOLREED, LA START-UP QUI PROLONGE LA VIE DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

*Chaque année en France des dizaines de milliers de panneaux défaillants sont envoyés en recyclage. Selon l'IRENA (International Renewable Energy Agency), cela représenterait 6 millions de tonnes de déchets d'ici 2040 à l'échelle européenne. On estime en outre que 50% des panneaux solaires en cours de recyclage pourraient être réparés.*

C'est de ce constat que naît SOLREED.

Nous avons travaillé avec les équipes SOLREED au développement de protocoles permettant d'identifier les défaillances techniques et de juger la réparabilité des panneaux, avec la préoccupation de pouvoir industrialiser ces méthodes.

- Proposer une unité technique mobile pour réparer sur place les panneaux défaillants des parcs solaires. Cette unité opérera un cycle complet de maintenance démontage-diagnostic-réparation-remontage sans quitter la centrale solaire. Un gain de temps et de coûts face aux solutions actuelles de remplacement ou de sur-mesure ;
- Permettre une seconde vie à des panneaux orientés à tort vers des filières de recyclage
- Améliorer encore l'empreinte environnementale de l'énergie produite, en prolongeant la durée de vie autant que possible, au-delà des 20-25 ans actuels.

ENGIE Green s'est associé très tôt à la démarche en mettant, par exemple, à disposition des panneaux défectueux de différents modèles pour permettre une démonstration à grande échelle. Une centaine de panneaux ont ainsi déjà pu être traités, analysés et réparés, démontrant la pertinence de l'approche et sa reproductibilité.

*Incubée au CEA, SOLREED est désormais en route et a été officiellement créée en 2024.*

**04** Intégration économique et environnementale du solaire



## TRANSMETTRE LES COMPÉTENCES, ANIMER LA FILIÈRE

Plaforme pédagogique de formation

Photo INES PFE

### FORMATION

Au rythme des avancées de la recherche et des besoins des industriels, l'objectif est de renforcer, diversifier et qualifier l'offre de formation ayant attrait aux différents sujets traités par l'ITE INES.2S.

Cela signifie une modernisation permanente des plateaux techniques et pédagogiques afin de mettre à disposition des apprenants, les outils les plus adaptés et les plus performants, toujours au plus près des dernières avancées technologiques présentes sur le marché. C'est aussi un travail continu d'ingénierie afin de mettre à jour et compléter l'offre de formation.

### EXPERTISE

Le développement, le déploiement et l'amélioration continue des outils de calculs, de dimensionnement et de mesures a permis un fort retour d'expérience, et une base d'outils

pédagogiques au plus près des réalités du terrain.

Le succès grandissant d'AUTOCALSOL, au sein de la filière, atteste de la pertinence de ces outils.

### RAYONNEMENT

Au-delà des outils classiques de communication, l'ITE déploie son propre cycle de conférences et accueille des événements scientifiques internationaux. En 2024, notre cycle de conférences a réuni plus de 2000 experts et professionnels du secteur solaire à l'échelle mondiale.

Ce sont autant d'occasions de participer à l'animation de la filière française et internationale.



## **FORMER AUX MÉTIERS**

Ce sont en moyenne 1000 à 1500 personnes par an qui viennent se former sur le solaire photovoltaïque auprès de notre partenaire membre INES Plateforme Formation et Evaluation.

L'ITE INES.2S a permis de développer les outils et infrastructures comme le plateau technique et pédagogique qui accueille les stagiaires; et de faire évoluer le catalogue de formation proposé par INES PFE, en fonction des demandes et besoins du marché tout en s'adaptant aux différents profils de stagiaires avec :

- la mise à jour des formations existantes
- la création de nouvelles formations

En 2024, nous avons débuté le projet d'essaimage de nos formations afin de labéliser d'autres centres de formations, parmi ceux certifiés Qualiopi, pour diffuser nos formations les plus demandées.



Le plateau permet la pratique du bon geste en situation

Le plateau technique et pédagogique est valorisé et expérimenté à grande échelle durant les nombreuses sessions de formation depuis 5 ans. Le développement de nouvelles maquettes sur ce plateau constitue une avancée significative dans le domaine de la formation et de l'expertise au sein du centre. Ces maquettes ont été conçues dans le but d'aider les stagiaires à comprendre, expliquer et diagnostiquer les problèmes rencontrés en expertise.

Autre temps fort de ces 5 années : la création de la formation "PV LONG" d'une durée de 6 mois permettant d'accéder au métier de "photovoltaïste: Conseiller, concevoir, installer, exploiter et maintenir les systèmes solaires photovoltaïques".

Une première session a ouvert avec succès en 2024, avec de très bons retours des 8 stagiaires.

## AUTOCALSOL POURSUIT SON DÉVELOPPEMENT ET INTÈGRE L'AUTOCONSOMMATION COLLECTIVE

Autocalsol est un logiciel de prédimensionnement pour les installations solaires photovoltaïques en autoconsommation. Il permet de réaliser rapidement des études techniques et économiques fiables.

### BÉNÉFICES

- *Apporter un soutien technique aux professionnels pour conseiller leur client : calculer la rentabilité d'un projet en vente totale et en autoconsommation, déterminer le profil de consommation, réaliser une étude environnementale*
- *Proposer des calculs de production fiables et des visuels pertinents pour valoriser l'autoconsommation : taux d'autoconsommation et d'autoproduction*

Développé dès 2019, l'outil intègre des améliorations et nouveautés en permanence comme, dernièrement, la possibilité d'évaluer des opérations en autoconsommation collective.

Avec ces plus de 2000 licenciés en 2024, c'est l'un des outils d'aide à la décision de référence en France pour les professionnels et leurs clients.

## DIMENSIONNER LES INSTALLATIONS SOLAIRES EN AUTOCONSOMMATION



Salle de contrôle du Grid Control Lab

Photo L.GODART / CEA



Les valeurs de l'agrivoltaïsme partagées  
Edition 2024 - Photo INES PFE

## CYCLE DE CONFÉRENCES ET COLLOQUES

*Au cœur de sa mission de dynamisation de la filière solaire, INES.2S soutient un cycle de conférences qui a réuni, chaque année, plus de 2000 experts et professionnels du secteur à l'échelle mondiale. Ces rendez-vous sont l'occasion unique pour les expertes et experts de présenter leurs avancées en matière de recherche et d'innovation. Nous accueillons aussi des événements scientifiques internationaux d'envergure.*

Organisées en collaboration étroite avec des partenaires institutionnels et professionnels, ces conférences et colloques offrent une plateforme d'échange stratégique permettant notamment aux chercheurs de partager leurs travaux, détecter de nouveaux prospects et communiquer leurs perspectives auprès d'un public expert et des médias.

## PROGRAMME 2024

- Solaire photovoltaïque flottant : avancées et perspective en France
- Journée filière industrielle Solaire Photovoltaïque
- Enjeux et perspectives du stockage stationnaire face aux marchés de l'électricité en France
- SPECIAL PV Workshop 2ème ed. - (Space Photovoltaics for Energy Conversion in extra-terrestrial environment Workshop)
- Les enjeux des règles environnementales pour la filière PV

- Les valeurs de l'agrivoltaïsme partagées - Conférence annuelle
- Tendances et opportunités des Power Purchase Agreements (PPA)
- Journées Pérovskites Halogénées 2024
- Silicon PV + BifiPV and nPV Workshops
- 12th Metallization and Interconnection Workshop for Crystalline Solar Cells
- Eco-design via LCA : The key toward sustainable Tandem Perovskite Technologies



Photo Guerrini / CEA

## **INES.2S, dynamique d'innovation pour le développement de l'énergie photovoltaïque en France**



*Venez nous rencontrer, au cœur de l'INES,  
le centre d'excellence du solaire en Savoie - France,  
pour savoir quelle valeur nous pouvons vous apporter.*



Photo D.Guillaudin / CEA



50 avenue Lac Léman  
73375 Le Bourget-du-Lac  
FRANCE

[www.ines2s.org](http://www.ines2s.org)