TASE ‘24

Projet Ciblé « HyMES »

Hybrid modeling of Multi Energy Systems

Lacarrière B[1], Vallée M[2], Gallinari P[3], Sareni B[4] , Delinchant B[5] , Martinez F[6] , Grieu S[7]

[1] IMT Atlantique, GEPEA UMR 6144 , Nantes [2] CEA/DRT/LITEN, Grenoble, [3] Sorbonne Université, ISIR UMR 7222, Paris, [4] INP-ENSEEIHT, Laplace UMR 5213, Toulouse, [5] Université de Grenoble Alpes (CNRS - Grenoble-INP - UGA), G2ELAB UMR 5269, Grenoble [6] Université de Montpellier - CNRS - UMR 5214, Montpellier, [7] Université de Perpignan Via Domitia, PROMES UPR8521, Perpignan

Contexte

Dans un contexte de décentralisation croissante de la production d'énergie, les **Systèmes Multi Energies** (SME) sont considérés comme une famille de technologies prometteuses pour la transition énergétique car elles visent à favoriser la symbiose entre les différents vecteurs énergétiques, l'intégration des énergies renouvelables et l'amélioration de l'efficacité énergétique territoriale.

Description

- Etude des principes et méthodes de la **modélisation hybride**
- Analyse de la pertinence et des performances de différentes solutions d’hybridation des modèles en fonction de l’échelle traitée
- **Dynamiques temporelles** (systèmes et réseaux) prises en compte pour un objectif de contrôle commande
- Echelles spatiales considérées :
  - Echelle des **systèmes énergétiques** : technologies de conversion ou de stockage de l’énergie
  - Echelle des **réseaux de distribution** (thermiques et électriques)
  - Interactions multiples entre les réseaux via un ensemble de **technologies de couplage**

Systèmes Multi Energie = couplage dynamique entre réseaux de vecteurs différents

Modélisation hybride = couplage modèles physiques et Machine Learning

Enjeux :

- Les SME permettent une gestion pertinente du surplus de production renouvelable non contrôlable.
- Les caractéristiques distribuées des SME rendent l'optimisation des ressources locales plus efficace

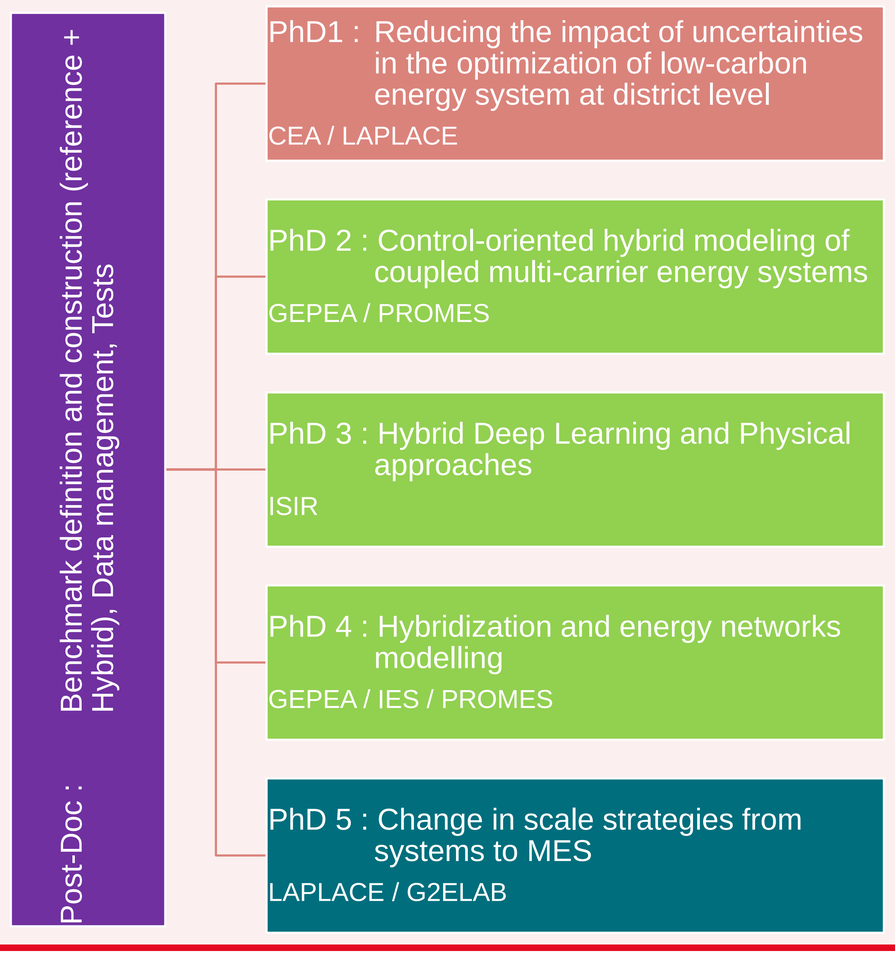
Verrous :

- Méthodes et outils de modélisation capables de refléter la réalité du fonctionnement des SME à chaque échelle (systèmes et réseaux)
- Prise en compte des complexités physiques habituellement écartées (non linéarités, aspects dynamiques)
- Modèles hybrides alliant précision et rapidité pour un objectif de contrôle commande des SME

Mots clés

- **Systèmes et réseaux multi-énergie**
- **Modélisation hybride**
- **Optimisation**
- **Benchmark**
- **Réseaux électriques et thermiques**
- **Contrôle commande**

Organisation des travaux



Résultats attendus

- Développement d’un modèle de référence de réseau multi-énergie (**Benchmark SME**)
- Documentation du cas d’étude (technologies, systèmes, réseaux), de l’ensemble de **données qualifiées** utilisées et des solutions de modélisation hybrides retenues
- Etudes des **performances des modèles hybrides**
- Test du modèle de référence pour un usage d’évaluation de l’intégration de nouvelles technologies dans les réseaux multi-énergie

Website : www.pepr-tase.fr Contact : bruno.lacarriere@imt-atlantique.fr

PROGRAMME DE RECHERCHE
SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES & ÉNERGIES RENOUVELABLES

TASE '24

AI-NRGY

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

O. Amal[1], A. Busic[4], S. Camal[2], S. Garcia-Rodriguez[3], K. Hallak[3], N. Hernandez[1], G. Kariniotakis[2], O. Kem[3], T. Monteil[1], J. Rodez[1], K. Scaman[4], G. Srithar[4], L. Stippel[2], S. Stolf[1]

[1] IRIT, France
[2] MINES Paris - PSL, Centre Persee, France
[3] CEA List, France
[4] INRIA Paris, France

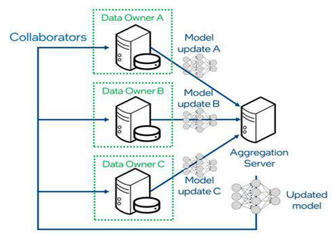
Contexte

Du fait de leur nature fortement distribuée, dynamique, hétérogène et parfois volatile, ainsi que de leur statut d'infrastructure critique, les réseaux multi-énergies ne pourront s'appuyer sur les paradigmes informatiques existants: calcul local et calcul centralisé.

Objectif : mise en place de solutions d'intelligence distribuée, tirant parti des différentes méthodes de calcul (edge, fog et cloud computing) afin de répondre aux contraintes majeures des réseaux électriques de demain.

Etat de l'art :

- L'**apprentissage fédéré** (*Federated Learning*) permet un traitement local et collaboratif des données par les modèles d'IA, mais doit être adapté aux contraintes opérationnelles du monde de l'énergie: données de types hétérogènes, variabilité spatio-temporelle, garanties de robustesse nécessaires, …
- **Distribuer l'optimisation et le contrôle** assure la faisabilité du calcul dans des environnements dynamiques, mais nécessite des développements spécifiques pour la participation aux marchés ou la fourniture de services aux réseaux.



Enjeux et verrous :

Scalabilité et **performance** des modèles IA et d'optimisation pour l'analyse et le contrôle de nombreux intervenants gérant des ressources énergétiques distribuées (batteries, prosumers, véhicules électriques, pompes à chaleur), avec *fortes hétérogénéités statistiques*

La *volatilité* des ressources connectées (par ex. véhicules électriques) et leurs *variabilités temporelles* génèrent une dégradation des modèles (**concept drift**). Les données problématiques et situations extrêmes créent un besoin de **robustesse** aux incertitudes multiples y compris d'origine cyber.

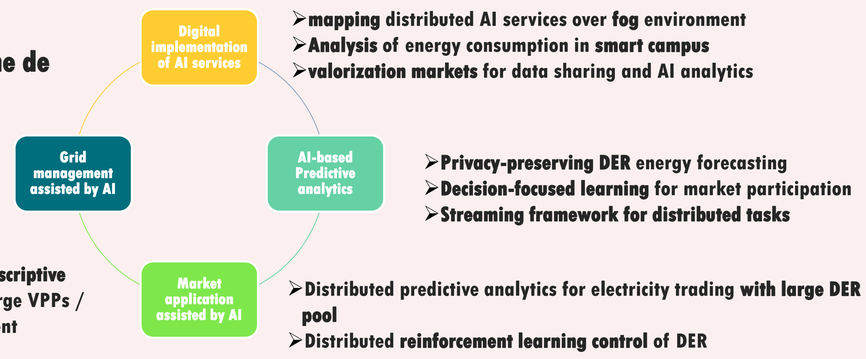
La **confidentialité** des données énergétiques et des paramètres sensibles des modèles doit être assurée.

Interprétabilité des modèles IA et besoin de simplifier les chaînes de modélisation afin d'assurer l'adoption par les acteurs de l'énergie.

L'exécution des services d'IA distribuée doit satisfaire des **contraintes de qualité de service**

Cas d'usage et données open source (WP2)

10 cas d'usage, sur l'ensemble de la chaîne de modélisation



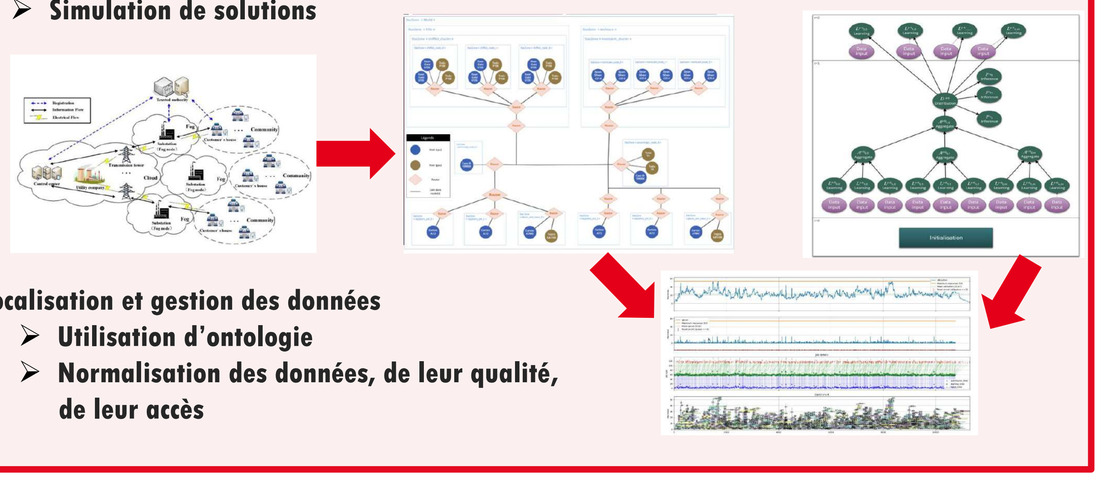
- **mapping** distributed AI services over **fog** environment
- **Analysis** of energy consumption in **smart campus**
- **valorization markets** for data sharing and AI analytics
- **Privacy-preserving DER** energy forecasting
- **Decision-focused learning** for market participation
- **Streaming framework for distributed tasks**
- Distributed **reinforcement learning control** of DER
- Distributed predictive analytics for electricity trading **with large DER pool**
- Distributed **prescriptive analytics** for large VPPs / grid management
- **resilient distributed** grid control

Architecture Dynamique distribuée (WP3)

Utilisation d'architecture Mist-Fog-cloud

Déploiement des services d'IA distribuée sous des contraintes de Qualité de Service

- Energie consommée, temps de réponse, mobilité, intermittence de connexion, etc
- Algorithme de placement des services
- Simulation de solutions

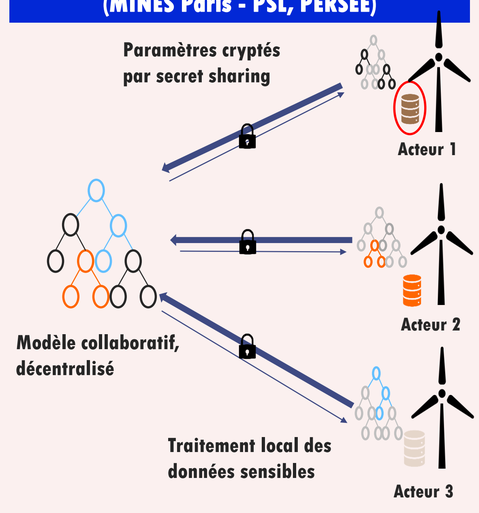


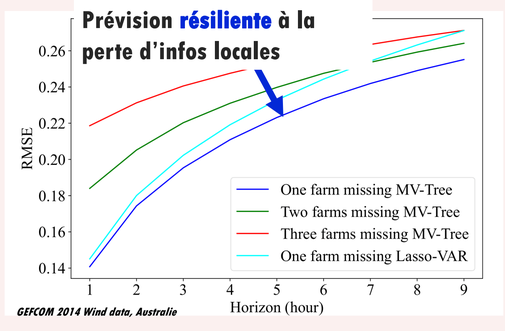
Localisation et gestion des données

- Utilisation d'ontologie
- Normalisation des données, de leur qualité, de leur accès

IA distribuée pour les prévisions énergétiques (WP4)

Arbre de prévision énergétique spatio-temporelle préservant la confidentialité [1] (MINES Paris - PSL, PERSEE)



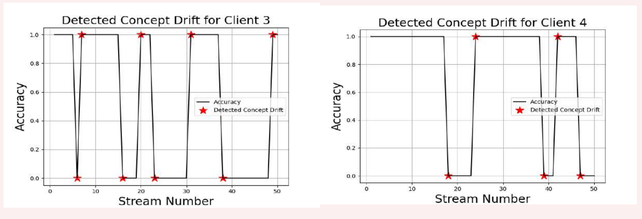


Apprentissage fédéré adaptif pour des flux de données énergétiques (CEA - List)

Flux de données Véhicules Electriques

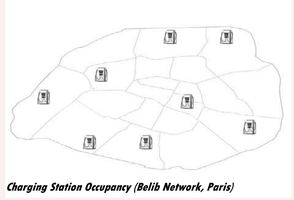
- **Error Rate Monitoring**
- **Statistical Test**
- **Ensemble Methods**

Détection du Concept Drift



Analyze Drift

- **-Sudden Drift**
- **-Gradual Drift**
- **-Incremental Drift**
- **-Recurring Drift**



Charging Station Occupancy (Belib Network, Paris)

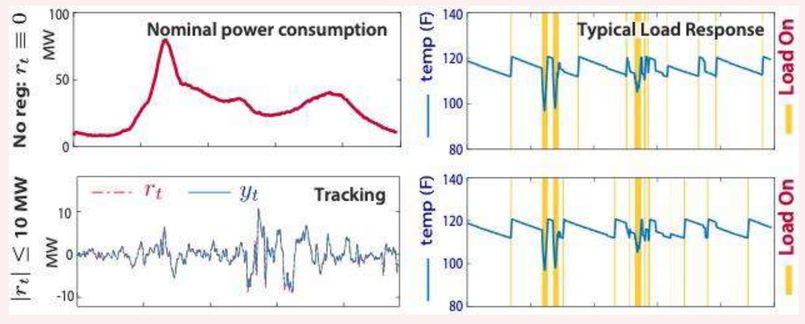
Drift Adaptation

- **-Windowing Techniques**
- **-Dynamic Weighted Majority (DWM)**
- **-Personalized models**
- **-Incremental Learning**

IA distribué pour l'optimisation et la commande (WP5)

Contrôle champs moyen d'un ensemble d'agents [2] :

- Prise en charge des contraintes physiques des agents
- Possibilité de considérer la dépendance d'un processus externe (e.g. météo)
- Une nouvelle formulation adaptée à des approches de l'apprentissage par renforcement



Conclusion

- Les cas d'utilisation ont été définis
- Des premiers algorithmes d'IA distribuée pour la prévision l'optimisation et la commande ont été développés
- Le simulateur Batsim a été étendu pour simuler sur une architecture mist-fog-cloud le déploiement et l'exécution d'application d'IA distribuée

[1] Lukas Stippel, Simon Camal, Georges Kariniotakis. Multivariate Federated Tree-based Forecasting Combining Resilience and Privacy: Application to Distributed Energy Resources. Electric Power Systems Research, inPress. hal-04533274
[2] N Cammardella, A Busic, SP Meyn. Kullback–Leibler-Quadratic Optimal Control. SIAM Journal on Control and Optimization 61 (5), 3234-3258.

Website : www.pepr-tase.fr

Contact : thierry.monteil@irit.fr

PROGRAMME DE RECHERCHE
SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES & ÉNERGIES RENOUVELABLES

TASE '24

AI-NRGY

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

O. Amal[1], A. Busic[4], S. Camal[2], S. Garcia-Rodriguez[3], K. Hallak[3], N. Hernandez[1], G. Kariniotakis[2], O. Kem[3], T. Monteil[1], J. Rodez[1], K. Scaman[4], G. Srithar[4], L. Stippel[2], S. Stolf[1]

[1] IRIT, France
[2] MINES Paris - PSL, Centre Persee, France
[3] CEA List, France
[4] INRIA Paris, France

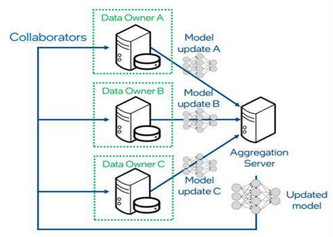
Contexte

Du fait de leur nature fortement distribuée, dynamique, hétérogène et parfois volatile, ainsi que de leur statut d'infrastructure critique, les réseaux multi-énergies ne pourront s'appuyer sur les paradigmes informatiques existants: calcul local et calcul centralisé.

Objectif : mise en place de solutions d'intelligence distribuée, tirant parti des différentes méthodes de calcul (edge, fog et cloud computing) afin de répondre aux contraintes majeures des réseaux électriques de demain.

Etat de l'art :

- L'**apprentissage fédéré** (*Federated Learning*) permet un traitement local et collaboratif des données par les modèles d'IA, mais doit être adapté aux contraintes opérationnelles du monde de l'énergie: données de types hétérogènes, variabilité spatio-temporelle, garanties de robustesse nécessaires, …
- **Distribuer l'optimisation et le contrôle** assure la faisabilité du calcul dans des environnements dynamiques, mais nécessite des développements spécifiques pour la participation aux marchés ou la fourniture de services aux réseaux.



Enjeux et verrous :

Scalabilité et **performance** des modèles IA et d'optimisation pour l'analyse et le contrôle de nombreux intervenants gérant des ressources énergétiques distribuées (batteries, prosumers, véhicules électriques, pompes à chaleur), avec *fortes hétérogénéités statistiques*

La *volatilité* des ressources connectées (par ex. véhicules électriques) et leurs *variabilités temporelles* génèrent une dégradation des modèles (**concept drift**). Les données problématiques et situations extrêmes créent un besoin de **robustesse** aux incertitudes multiples y compris d'origine cyber.

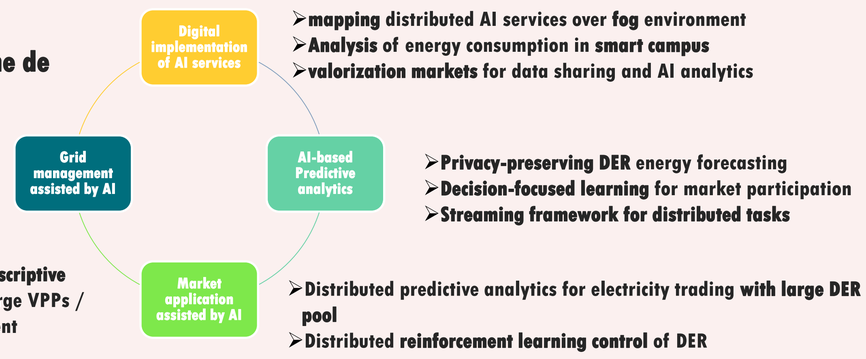
La **confidentialité** des données énergétiques et des paramètres sensibles des modèles doit être assurée.

Interprétabilité des modèles IA et besoin de simplifier les chaînes de modélisation afin d'assurer l'adoption par les acteurs de l'énergie.

L'exécution des services d'IA distribuée doit satisfaire des **contraintes de qualité de service**

Cas d'usage et données open source (WP2)

10 cas d'usage, sur l'ensemble de la chaîne de modélisation



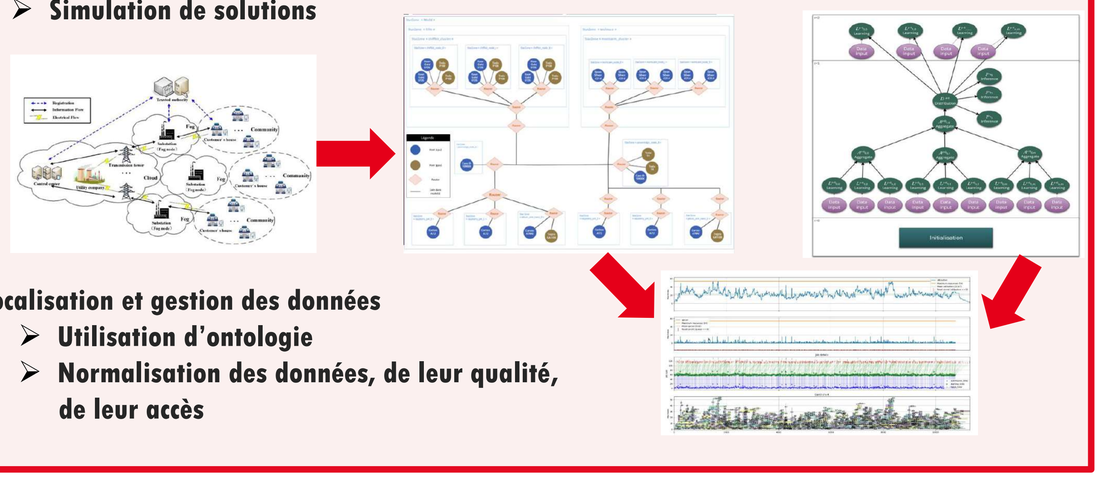
- **mapping** distributed AI services over **fog** environment
- **Analysis** of energy consumption in **smart campus**
- **valorization markets** for data sharing and AI analytics
- **Privacy-preserving DER** energy forecasting
- **Decision-focused learning** for market participation
- **Streaming framework for distributed tasks**
- Distributed **reinforcement learning control** of DER
- Distributed predictive analytics for electricity trading **with large DER pool**
- Distributed **prescriptive analytics** for large VPPs / grid management
- **resilient distributed** grid control

Architecture Dynamique distribuée (WP3)

Utilisation d'architecture Mist-Fog-cloud

Déploiement des services d'IA distribuée sous des contraintes de Qualité de Service

- Energie consommée, temps de réponse, mobilité, intermittence de connexion, etc
- Algorithme de placement des services
- Simulation de solutions

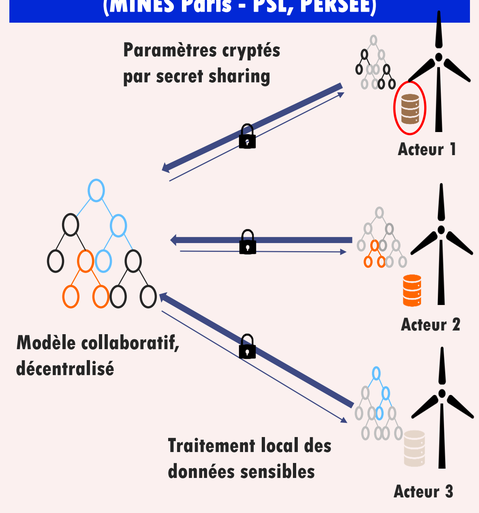


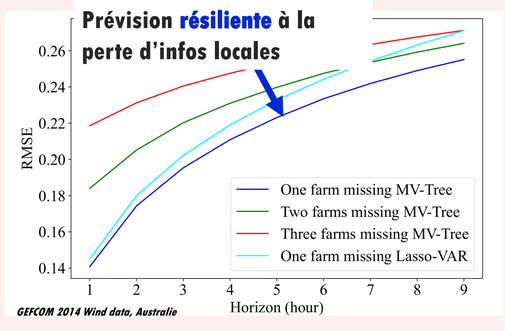
Localisation et gestion des données

- Utilisation d'ontologie
- Normalisation des données, de leur qualité, de leur accès

IA distribuée pour les prévisions énergétiques (WP4)

Arbre de prévision énergétique spatio-temporelle préservant la confidentialité [1] (MINES Paris - PSL, PERSEE)



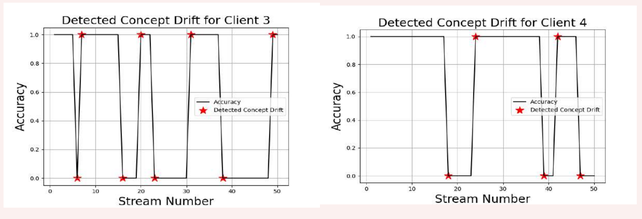


Apprentissage fédéré adaptif pour des flux de données énergétiques (CEA - List)

Flux de données Véhicules Electriques

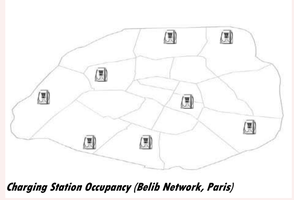
- **Error Rate Monitoring**
- **Statistical Test**
- **Ensemble Methods**

Détection du Concept Drift



Analyze Drift

- **-Sudden Drift**
- **-Gradual Drift**
- **-Incremental Drift**
- **-Recurring Drift**



Charging Station Occupancy (Belib Network, Paris)

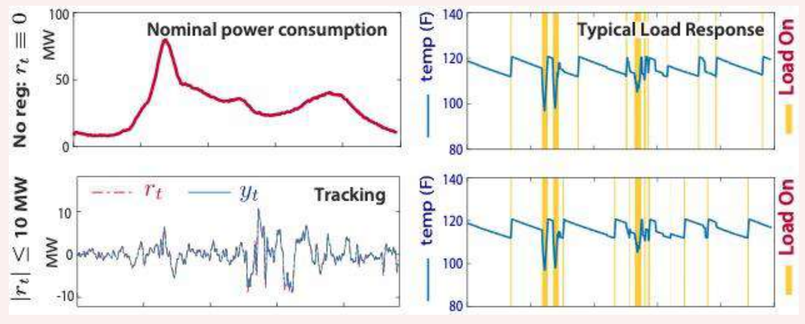
Drift Adaptation

- **-Windowing Techniques**
- **-Dynamic Weighted Majority (DWM)**
- **-Personalized models**
- **-Incremental Learning**

IA distribué pour l'optimisation et la commande (WP5)

Contrôle champs moyen d'un ensemble d'agents [2] :

- Prise en charge des contraintes physiques des agents
- Possibilité de considérer la dépendance d'un processus externe (e.g. météo)
- Une nouvelle formulation adaptée à des approches de l'apprentissage par renforcement



Conclusion

- Les cas d'utilisation ont été définis
- Des premiers algorithmes d'IA distribuée pour la prévision l'optimisation et la commande ont été développés
- Le simulateur Batsim a été étendu pour simuler sur une architecture mist-fog-cloud le déploiement et l'exécution d'application d'IA distribuée

[1] Lukas Stippel, Simon Camal, Georges Kariniotakis. Multivariate Federated Tree-based Forecasting Combining Resilience and Privacy: Application to Distributed Energy Resources. Electric Power Systems Research, inPress. hal-04533274
[2] N Cammardella, A Busic, SP Meyn. Kullback–Leibler-Quadratic Optimal Control. SIAM Journal on Control and Optimization 61 (5), 3234-3258.

Website : www.pepr-tase.fr

Contact : thierry.monteil@irit.fr

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté Égalité Fraternité

FRANCE 2030 — PROGRAMME DE RECHERCHE — *SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES & ÉNERGIES RENOUVELABLES*

TASE '24

IOTA

Architectures tandem innovantes

Comité de pilotage: Mohamed AMARA, Nicolas BARREAU, Solenn BERSON, Stéphane COLLIN (resp. scientifique), James CONNOLLY, Erik JOHNSON, Negar NAGHAVI, Inès REVOL, Charles ROUX

Contexte

- **Scénarios à l'horizon 2050** : production PV française 5 à 14 fois la production 2022.
- **Technologie photovoltaïque commerciale bas coût déployée aujourd'hui à grande échelle:**

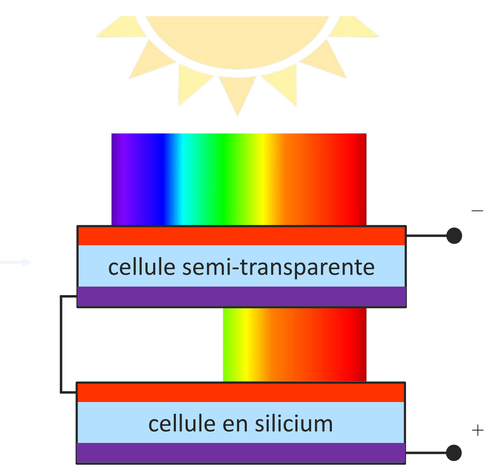
  + cellule solaire simple jonction en silicium (Si) avec une efficacité de 22-23%,
  + qui augmente de +0,5% par an,
  + mais limitée théoriquement (Si) à environ 29%.

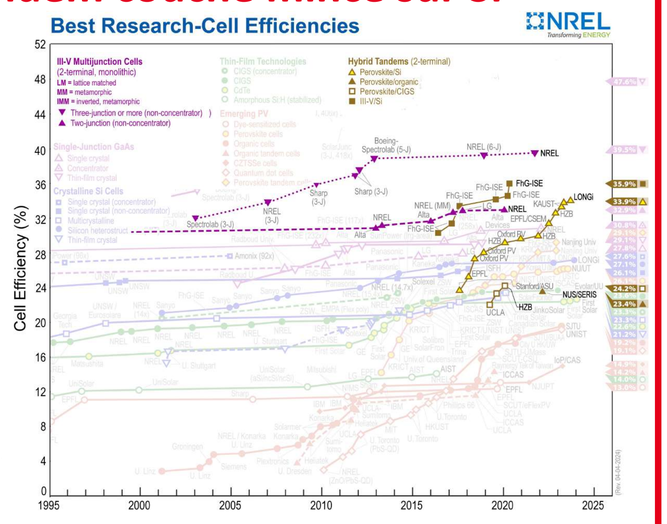
- **Enjeu majeur : développer la prochaine génération de cellules solaires** pour

  1. atteindre et dépasser une efficacité de 30%,
  2. à bas coût,
  3. à longue durée de vie (25 ans),
  4. avec des technologies industrialisables à grande échelle.

Les meilleures cellules solaires tandem de laboratoire dépassent 30% d'efficacité (pérovskite/Si, III-V/Si), mais elles ne remplissent pas encore les conditions nécessaire pour un développement industriel.

État de l'art : cellules tandem couche mince sur Si





- Tandems III-V sur Si : record à 36.1% (Fraunhofer ISE), fiable mais coûteux
- Tandems pérovskite sur Si : record à 34.6% (Longi), mais le passage à grande échelle et la fiabilité restent à démontrer
- Tandems CIGS ou organique sur Si : bas coût et fiable, mais faible efficacité

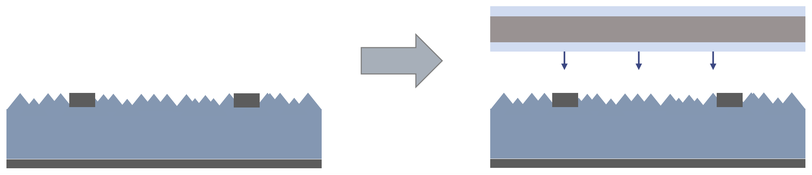
Enjeux, positionnement et verrous :

Objectif (5 ans) : nouvelles solutions technologiques pour des cellules solaires tandems en couche mince / silicium, avec des procédés à faible coût et industrialisables :

- **De nouvelles architectures** versatiles, ouvertes à l'ensemble des matériaux actuels et futurs.
- **Un prototype de cellule tandem** à 2 terminaux >30% (TRL 4-5)

→ accélérer le transfert vers la filière industrielle française

Cellule solaire conventionnelle en silicium
Efficacité < 30 %

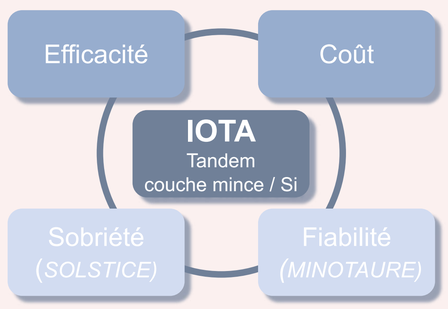


Cellule tandem couche mince / silicium
Efficacité > 30 %

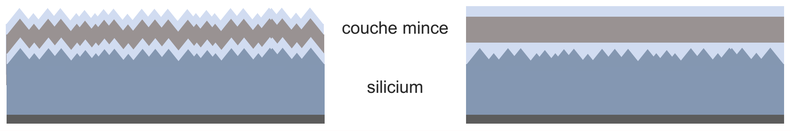
- Dépôt des couches
- Structuration
- Gestion de la lumière
- Interfaces

→ **Intégration**

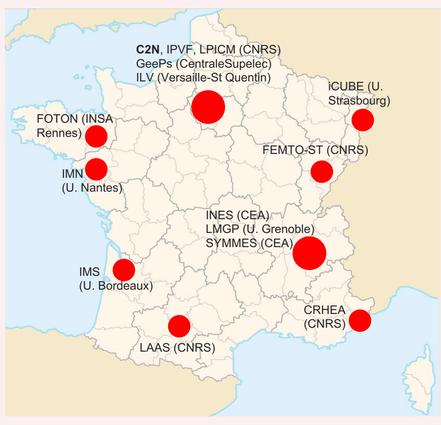
Objectifs et positionnement dans le PEPR TASE



Cellule solaire tandem intégrée, obtenue par dépôt direct ou collage



Les partenaires de IOTA en France



PhD: Laura De Almeida

16 laboratoires impliqués dans IOTA
Aide totale : 5.76 M€
15 thèses + 2 postdocs/ingénieurs

Comité de pilotage — Resp. des WPs — Resp. des labos

Key tandem layers	Breakthrough technologies	High efficiency functional PV
WP1: 3 PhDs **WP2:** 2 PhDs	**WP3:** 4 PhDs	**WP4:** 5 PhDs

- **Début de projet : 01/01/2023**
- **Fin de projet : 31/12/2027**
- **Signature du Contrat Attributif d'Aide : 26 juin 2023**
- **Réunion de lancement administrative : 06 novembre 2023**
- **Réunion de lancement scientifique : 28 novembre 2023**

WP1: Interlayer Materials for rough surface and Top-cell

→ Year 3 and 4

PhD: Huriye ERTAY
Advanced characterization of interfaces

Goal: Develop optimized **multilayer devices**.

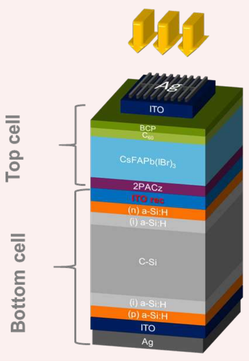
- Controlled **surfaces and interfaces** from a chemical, structural, morphological, electrical and optical point of view
- Advanced characterization of interfaces

Strategy: Need to (i) **screen a broad range of different transparent conductive layers** on the Si sub-cell for targeted top-cells, and (ii) **analyse selected interlayer systems** in combination with the corresponding top-cells.

WP2: Understanding and optimizing the deposition of vacuum-based Perovskite

→ Year 3 and 5

PhD: Kristell Carreric
Deposition of perovskite on rough Si



Textured surface:

- Improved efficiency (light-trapping)
- Industrial compatibility

Goal: New process for conformal perovskite deposition

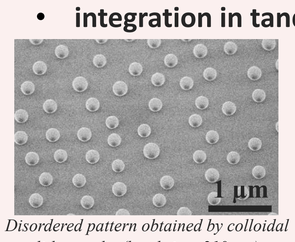
WP3: Breakthrough Technologies : nanopatterning, bonding, contacts

→ Year 3 and 4

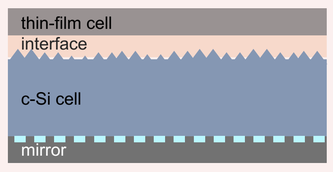
PhD: Laura De Almeida
Low-cost nanopatterning

Objectives:

- **low-cost** fabrication
- **large-area** upscaling
- **integration in tandem solar cells**



Disordered pattern obtained by colloidal lithography (bead size=210 nm)



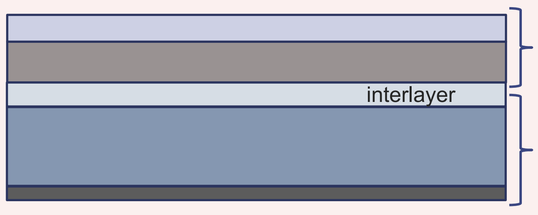
WP4: Integration in tandem solar cells, novel architectures

Goal:

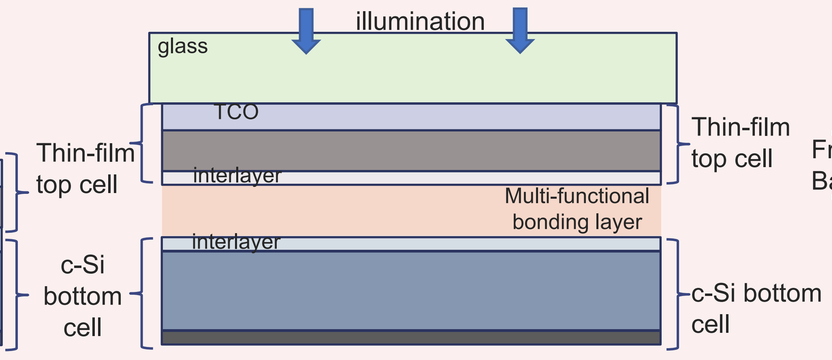
- Develop **accurate tandem cell models**
- integrate these building blocks (WP1, WP2, WP3) into **innovative thin-film/Si highly-efficient (>30 %) tandem architectures**
- Proof-of-concept devices but with **technologies compatible with upscaling**

→ Year 5

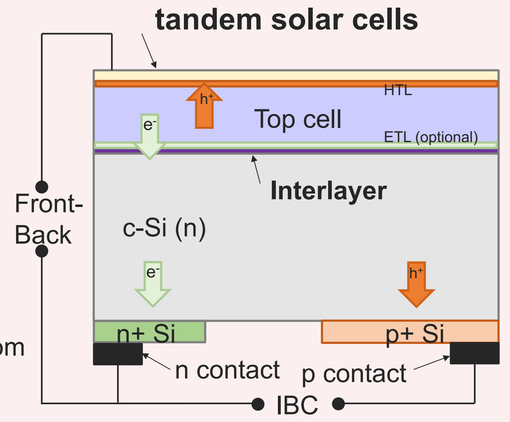
Monolithic thin-film/c-Si tandem solar cell



Integrated bonded thin-film//c-Si tandem solar cell



Monolithic 3T tandem solar cells



Website : www.pepr-tase.fr

Ce travail bénéficie d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 portant la référence 22-PETA-0005.

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté Égalité Fraternité

FRANCE 2030 — PROGRAMME DE RECHERCHE — SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES & ÉNERGIES RENOUVELABLES

TASE '24

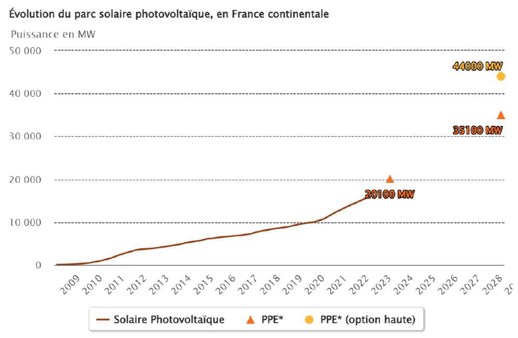
Smart4Module : vers des modules PV innovants dans une démarche d'éco-conception

R. Feilleux[1], I. Retailleau[1], A. Parmentier[2], C. Alonso[3], L. Hirsch[4], F. Sauvage[5], F. Tournilhac[6], D. Munoz-Rojas[7], N. Schneider[2], T. Bejat[1], S. Cros[1], J.B. Charpentier[1], C. Sollogoub[8], J.L. Bouvard[9], L. Rozes[10], Y. Bonnassieux[11], F. Oswald[12], J. Boucle[13], D. Duche[14], O. Margeat[15], G. Zissis[16], F. Odobel[17], E. Cloutet[18]

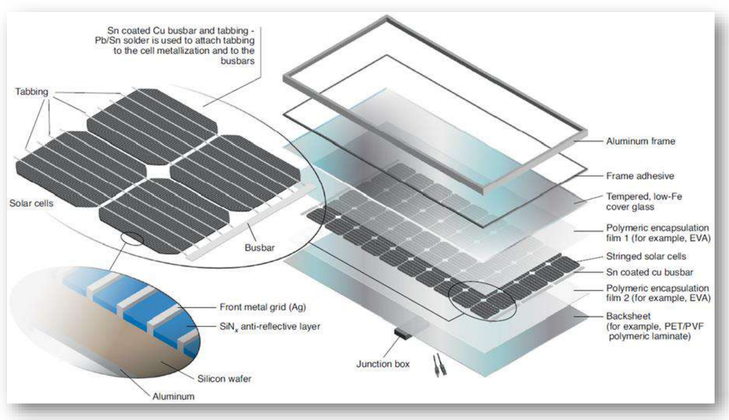
[1] CEA, Direction des énergies (DES) E-mail: romain.feilleux-anginieur@cea.fr, France
[2] IPVF, UMR-IPVF 9006, France
[3] LAAS-CNRS, France
[4] IMS, UMR5218-IMS, U. Bordeaux
[5] LCRS, UMR CNRS/UPJV 7314, U. Picardie
[6] ESPCI, UMR 7167
[7] LMGP, UMR5628-LMGP
[8] CNAM-PIMM, UMR 8006
[9] CEMEF-Mines Paris
[10] LCMCP, UMR 7574, Sorbonne U
[11] LPICM, UMR7647-LPICM
[12] CEA, IRAMIS (DRF)
[13] XLIM, UMR7252-XLIM
[14] IM2NP, UMR 7334, AMU
[15] CINaM, UMR 7325
[16] UMR5213-LAPLACE, UPS
[17] CEISAM UMR CNRS 6230
[18] LCPO, UMR 5629

Contexte

- Marché PV en forte croissance en France et dans le monde
- Objectif fixé en 2022 de 6 GW installés par an (contre 3,2 en 2023)
- Trajectoire PPE : augmentation de 75% de la puissance totale installée en 5 ans (120% sur option haute)
- Soutien par les lois APER (03/23) et mesures de soutien annoncés le 5/04/24



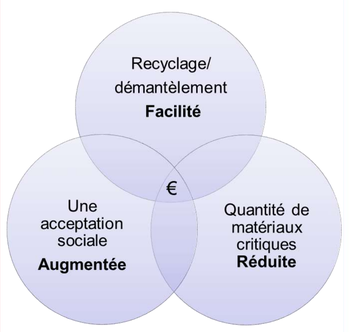
Etat de l'art :

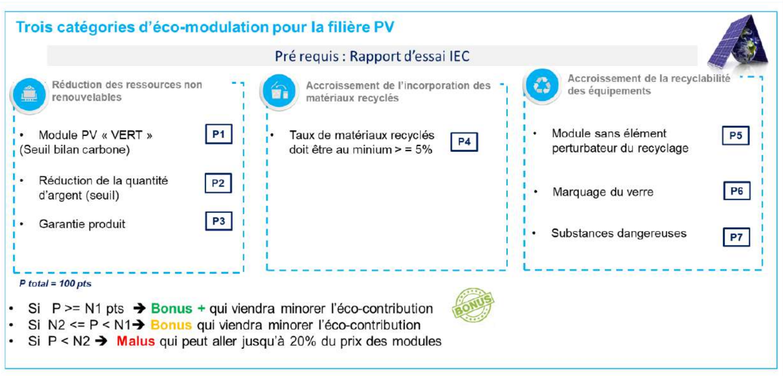


- Modules majoritairement à base de cellules Si → challenges esthétique et gestion de la transparence (BIPV, Agri)
- Matériaux choisis pour leur durabilité vs recyclabilité → polymères thermodurs
- Futures technologies cellules (Pk, OPV…): défis de protection par encapsulation
- Utilisation de matériaux critiques pour les interconnexions (ex : Ag)

Enjeux et verrous :

- Enjeu principal : accélérer le déploiement du photovoltaïque en France (x2 minimum)
- Verrous :
  - Acceptabilité sociétale de la technologie PV
    - → Améliorer les capacités d'intégration (usage des surfaces agricoles, esthétique bâtiment)
    - → Limiter le recours au matériaux critiques (diodes bypass, interconnexions…)
    - → Améliorer le bilan du cycle de vie des modules PV : intégrer la recyclabilité dans les conceptions et augmenter la fiabilité
    - → Respect des normes d'éco-conception en cours d'élaboration (SOREN)





Critères d'éco-conception retenus pour l'éco-modulation dans la filière PV

Axes de travail

1 - Matériaux d'encapsulation : Performance, fiabilité et recyclabilité

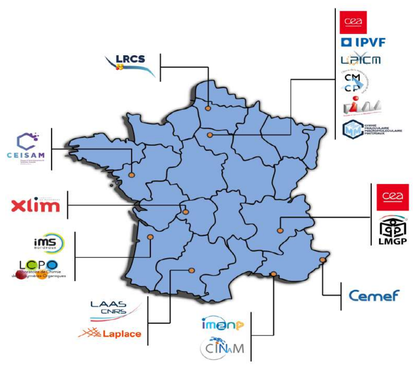
- Développement et intégration de matériaux pour l'encapsulation et les faces avant sur base vitrimère
- Modélisation de la fiabilité des modules sous contraintes thermomécaniques
- Développement de nouveaux procédés d'encapsulation pour les nouvelles technologies de cellules

2 - Transparence & Esthétisme des solutions PV

- Développement d'architectures module OPV semi-transparentes pour l'Agriphotovoltaïsme
- Développement et optimisation de modules PV transparents pour l'intégration bâtiment (BIPV)

3 - Nouvelles technologies d'interconnexion sans matériaux critiques

- Développement de solutions d'interconnexion et de diodes bypass en électronique imprimée
- Intégration de l'exigence de limitation de l'utilisation des matériaux critiques dans ces développements (interconnexions non métalliques)



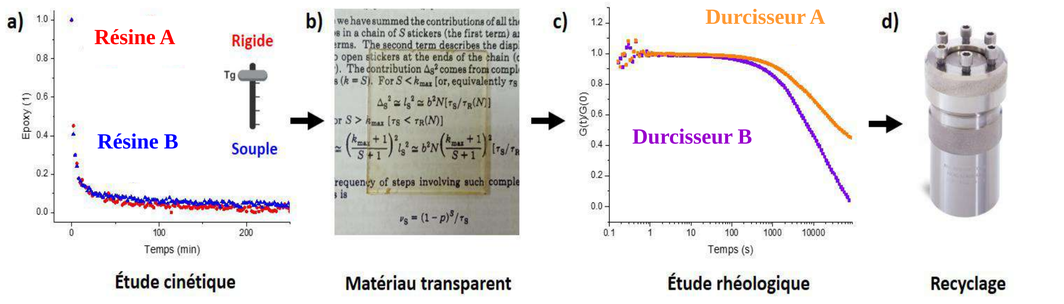
- 9 Sujets de thèses ouverts pour couvrir l'ensemble des enjeux
- Complémentarité des sujet (ex: developement d'électrodes transparentes dans l'axe 3 pour alimenter l'axe 2)

Gantt diagram of the project

	T1 _ T6	T7_ T12	T13_T18	T19_T24	T25_T30	T31_T36	T37_T42	T43_T48	T49_T54	T55_T60
Axe 1										
Axe 2										
Axe 3										

Statut et premiers résultats

- 2 thèses démarrées fin Q3 2023 :
  - Développement et intégration de composites à base vitrimère pour les faces avant de module PV, Ianis Retailleau sous la direction de Francois Tournilhac (ESPCI)



Étude cinétique | Matériau transparent | Étude rhéologique | Recyclage

Identification des résines base de cinétique proche :
- Résine rigide → tenue en FAV
- Résine souple →plastifiant et « renforçant »

Evaluation de la stabilité des performances optiques sous facteurs thermique Transmittance > 80%

Mise en évidence des propriétés vitrimères sur 2 durcisseurs (ici, relaxation des contraintes

Premiers essais de solvolyse encourageants

- Optimization of thin film encapsulation layers by ALD and SALD for perovskite-silicon tandem solar cells, Aubin Parmentier, sous la direction de David Munoz-Rojas (LMGP) et Nathanaelle Schneider (IPVF)

- **Substrate selection: PET 75µm + ITO 50nm (sputtering deposition: Plassys MP-600 device ;** $P_{work} = 2{,}0\ mTorr$, $T_{substrate} = 18\ °C$, **P = 200 W, Tune ~ 16,5 %, Load ~ 48 %, DC Bias = 117 V).**
- **Deposition temperature effect: Positive impact of an ALD-**Al_2O_3 **monolayer deposited at 160°C. Hypothesis : negligible barrier properties for ALD-**Al_2O_3 **and ALD-**ZnO **deposited at 100°C.**
- **Crack formations during preparation: Hypothesis : cracks formation during**

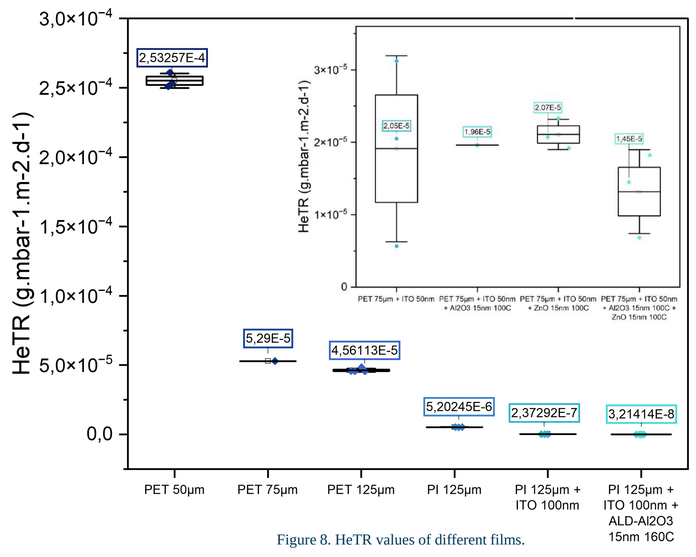


Figure 8. HeTR values of different films.

- Success in modeling the barrier properties of monolayers
- Acceptable deviation between numerical and analytical resolutions
- Selection of 75µm PET substrate + 50nm ITO for permeation measurements
- Negligible barrier properties for ALD-Al_2O_3 and ZnO deposited at 100°C or cracks formation during sample handling

Website : www.pepr-tase.fr **Contact : romain.feilleux-anginieur@cea.fr**

anr

Agrivoltaics

Among the adaptation and mitigation solutions to the climate-water-energy-food nexus, in line with the sustainable development goals of the United Nations (https://sdgs.un.org/goals), in particular the goals 6 (water), 7 (energy) and 2 (food security), agrivoltaics (hereafter, APV) may play a key role. APV is a food-energy producing ecosystem that involves the simultaneous use of land areas for both solar PV power generation and agriculture (Dupraz et al, 2011).

Agrivoltaics provides renewable low-carbon energy and represents a potential instrument to realize a sustainable and circular food economy in rural and farmers communities. Furthermore, building photovoltaic panels over crop fields could allow to mitigate the competition between solar and agriculture in land-use, minimizing biodiversity loss, and it could help mitigate the impact of climate change on crop productivity, that we expect to be affected in a warmer and drier future climate.

APV could strongly support the clean energy transition (e.g. Solar Power Europe, 2020) and could play an important role, as the installation of APVs systems over less than 1% of global agricultural land has the potential to satisfy the total global electricity demand (21 PWh, as available in Feb 2019 by Adeh et al, 2019).

AgriPV platform at SIRTA, Palaiseau (May 2023)

AgriPV-ER project

Agrivoltaics for Enhanced Resilience at the water-energy-food nexus: application to the Euro-Mediterranean region

Funded by AAP PEPR TASE, ANR (2023-2027)

The overall purpose of the AgriPV-ER project is to assess and optimize the environmental impact of agrivoltaics in the nexus water-energy-food, from local to regional scales, under different system configurations, and different climate scenarios.

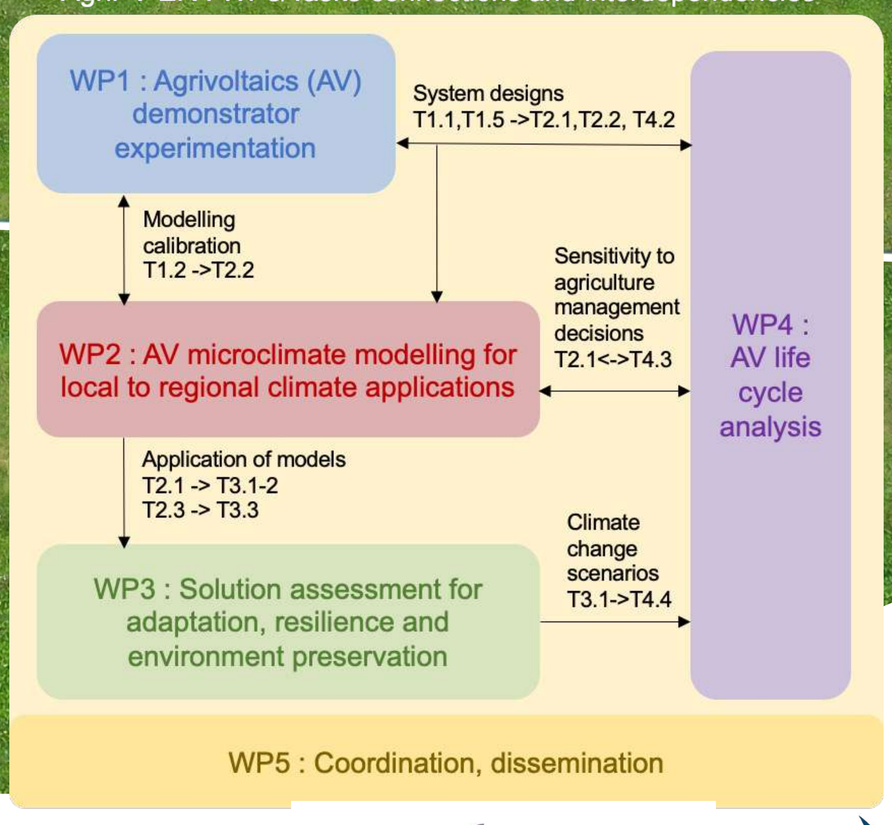
Project objectives with SIRTA's demonstrator

- Characterization and modelling of the impact on plants and soil
- Self-consumption management in the building-microgrid scale
- System state monitoring (soil-plants-meteo-photovoltaics)
- Solar radiation modelling
- PV power characterization and opto-electrical modelling
- Optimization and management (energy-water-food)

Contact:
jordi.badosa@lmd.polytechnique.fr

WP1 : Agrivoltaics (AV) demonstrator experimentation	**CNRS-LMD**	**GeePs, INRAE. OIE**
T1.1 Use case instrumental set and data	CNRS-LMD	
T1.2 Characterisation and modelling of the impact on plants and soil	CNRS-LMD	
T1.3 Solar radiation modelling	OIE	
T1.4 PV power characterisation	GeePs	
T1.5 Optimisation and management (energy-water-food)	GeePs	
WP2 : AV microclimate modelling for regional climate models	**LSCE**	**CNRS-LMD-LATMOS. OI**
T2.1 AV modeling module	LSCE	
T2.2 Calibration to the local demonstrator	LSCE	
T2.3 Coupled evalution of AV modelling	CNRS-LMD	
WP 3 : Solution assessment for adaptation, resilience and environment preservation	**CNRS-LMD**	CNRS-LATMOs. OIE
T3.1 AV impact indicators on water-energy-food nexus: assessment in the present and futures climate	CNRS-LMD	
T3.2 Assessment of AV potential for adaptation and resilience to climate extremes	CNRS-LMD	
T3.3 Feedback of AV systems on regional climate	CNRS-LATMOS	
WP4 : AV life cycle analysis	**OIE**	CNRS-LMD, LSCE. GeePs
T4.1 Life Cycle Assessement methodological choices	OIE	
T4.2 Agriculture and energy data collection	OIE	
T4.3 Modelling for a multi-functional dynamic system	OIE	
T4.4 LCA under climate change and water-energy-food nexus perspectives	CNRS-LMD, OIE	
WP5 : Coordination, dissemination		
Coordination and dissemination		

AgriPV-ER : WPs/Tasks connections and interdependencies

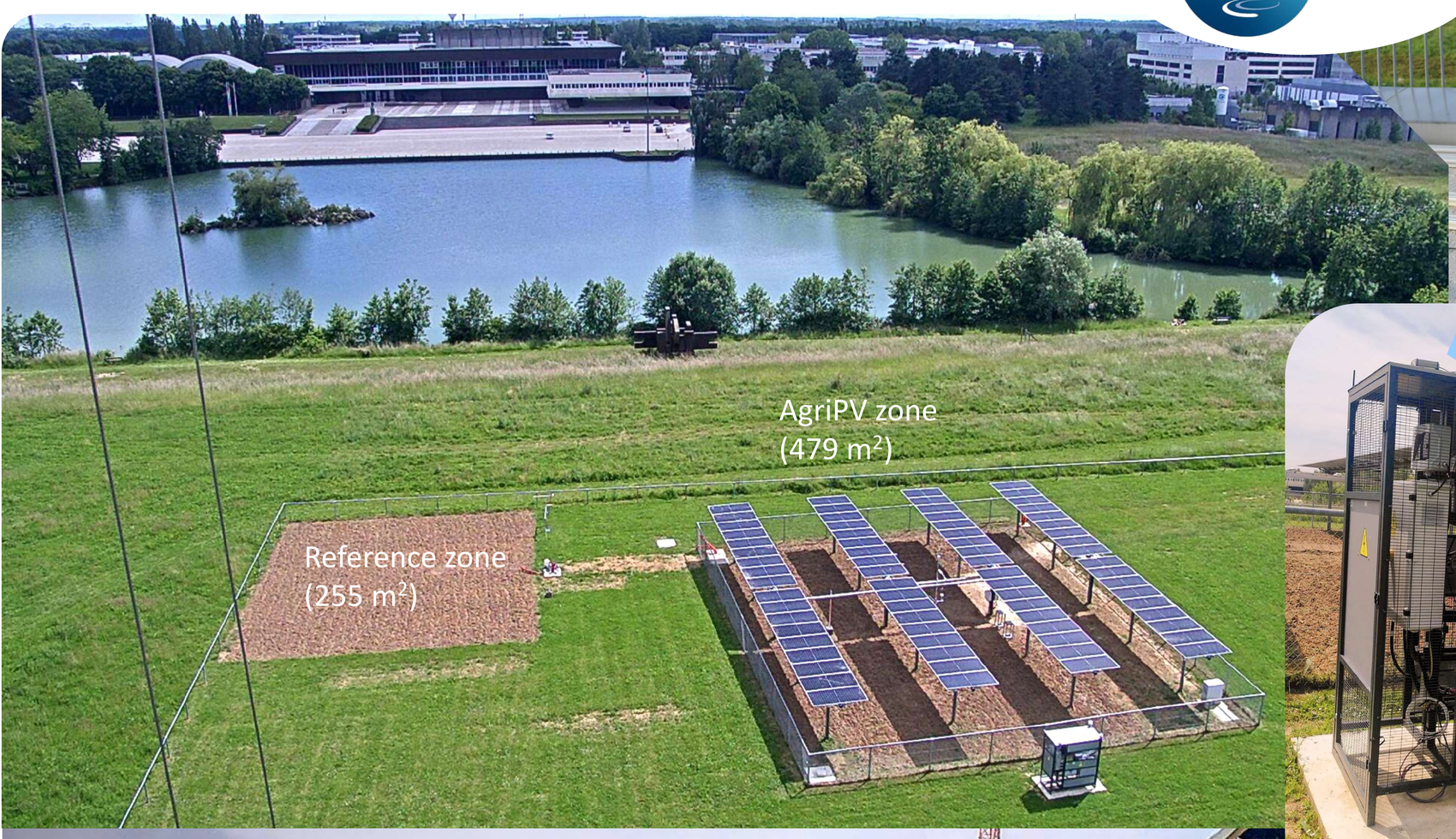


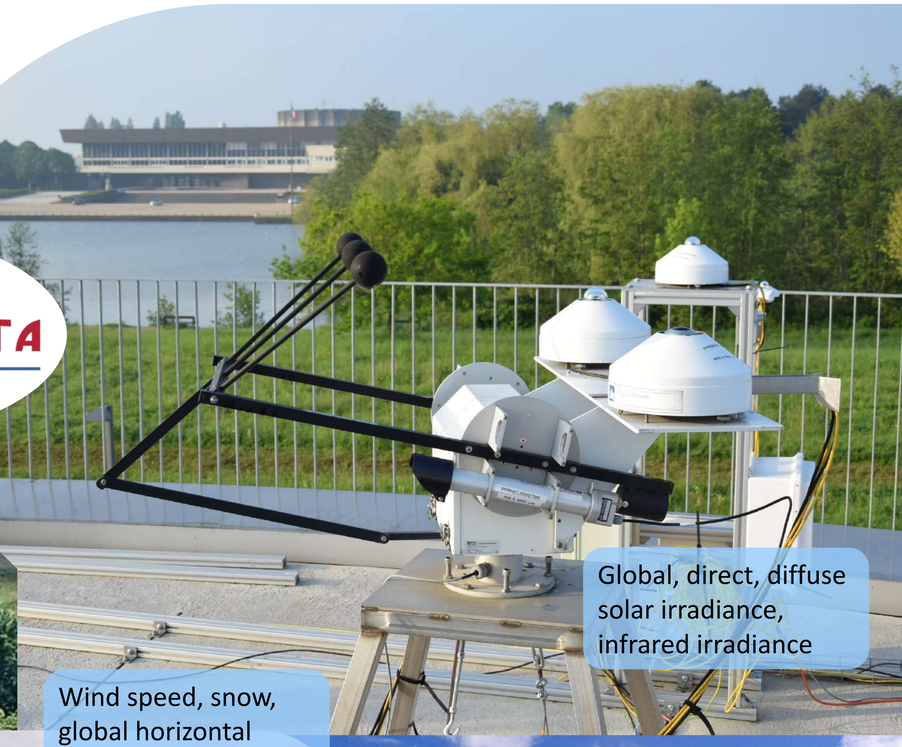
Funding support :

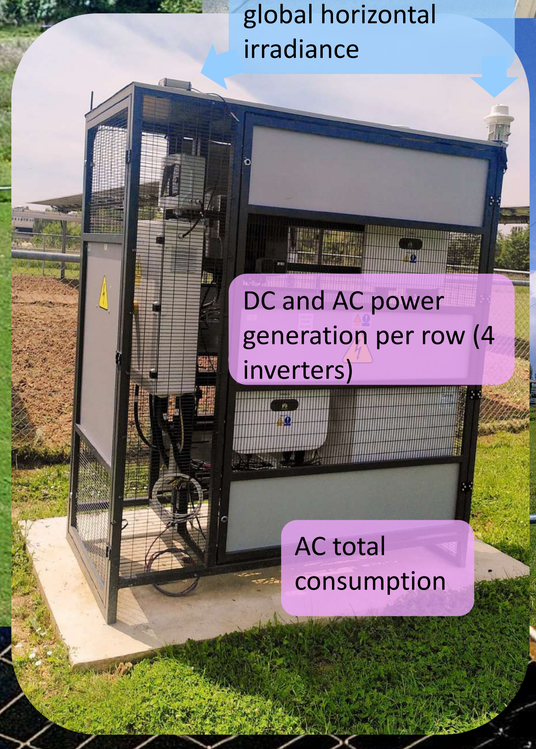
Agrivoltaics experimentation set-up at SIRTA observatory

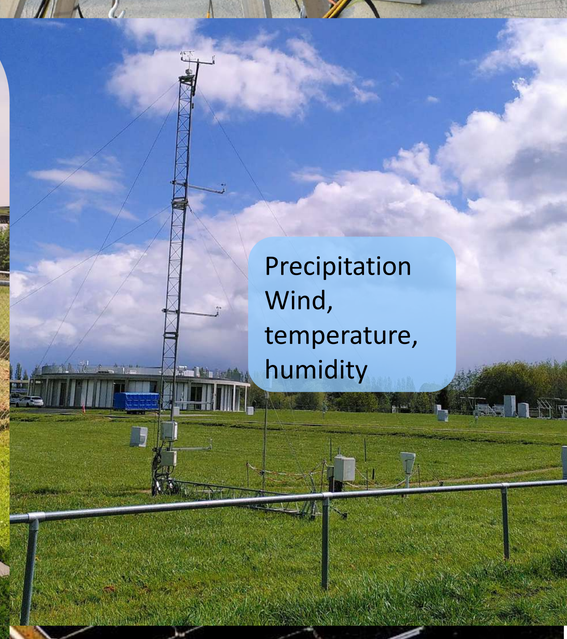
AgriPV-ER PEPR TASE project (2023-2027)

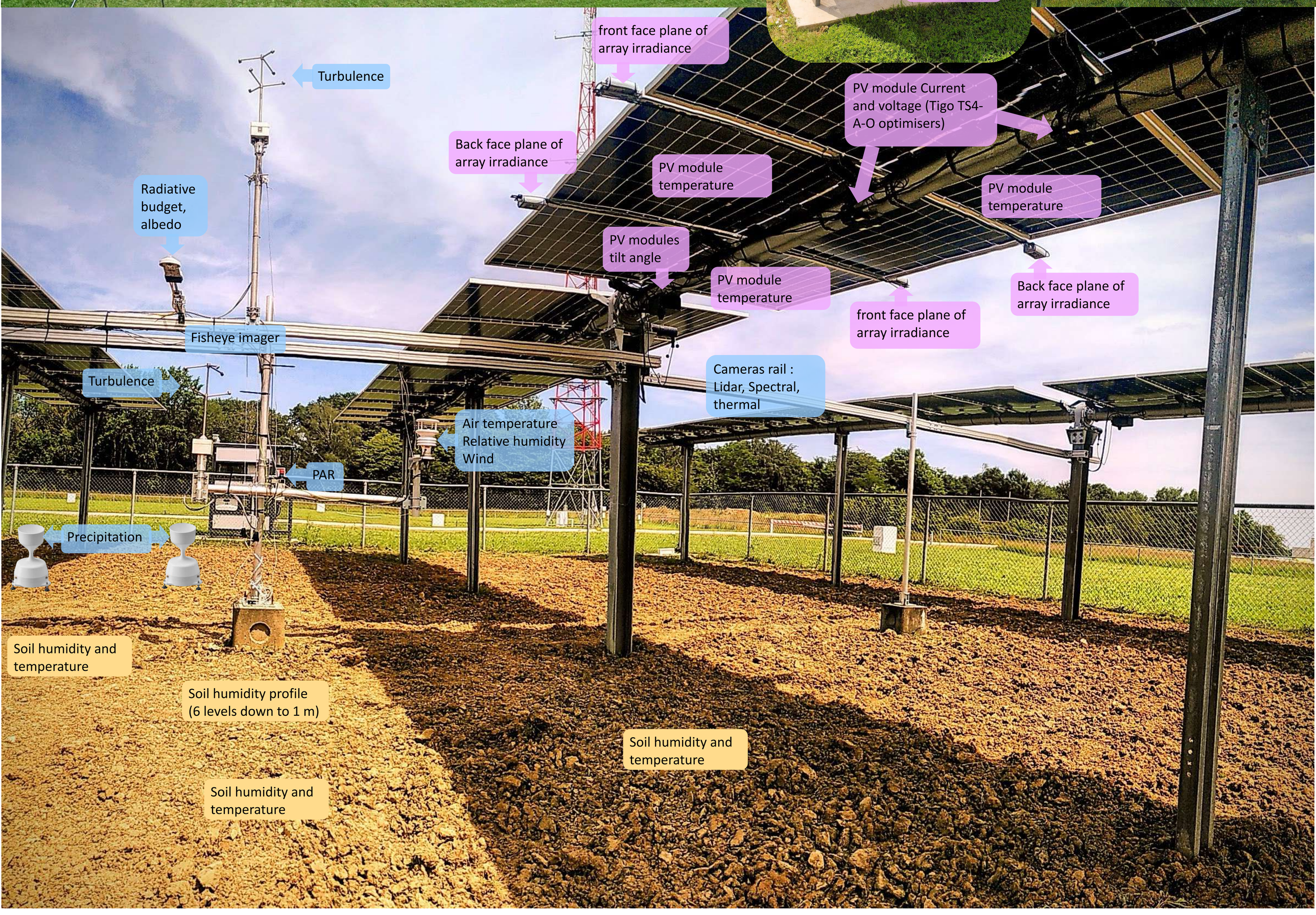
IPSL SIRTA











RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté Égalité Fraternité

FRANCE 2030 — PROGRAMME DE RECHERCHE SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES & ÉNERGIES RENOUVELABLES

cnrs — LMD — LATMOS — INRAE — cea — LSCE — MINES PARIS — PSL — CentraleSupélec — université PARIS-SACLAY — GeePS Génie électrique et électronique de Paris — LISN LABORATOIRE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES DU NUMÉRIQUE — l'X ÉCOLE POLYTECHNIQUE — Défis Technologiques pour une Énergie Responsable — ilede France — INSTITUT POLYTECHNIQUE DE PARIS — E4C ENERGY4CLIMATE INTERDISCIPLINARY CENTER

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté Égalité Fraternité

FRANCE 2030 — PROGRAMME DE RECHERCHE — SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES & ÉNERGIES RENOUVELABLES

TASE '24

MINES PARIS | PSL — CNRM — UGA Université Grenoble Alpes — UNIVERSITÉ DE LA RÉUNION — l'X ÉCOLE POLYTECHNIQUE

FINE4CAST

Nouvelle Génération d'Outils de Prévision de Demande d'Energie et de Production Renouvelable à Fine Échelle Spatiale et Temporelle

G. Kariniotakis[1a], S. Camal[1a], A. Bocquet[1a], Y. Bai[1a], A. Michiorri[1a], Y.-M. Saint-Drénan[1b], P. Blanc[1b], L. Raynaud [2], Q. Rodier[2], M.-A. Magnaldo[2], E. Enel[2], Q. Libois[2], B. Delinchant[3], F. Wurtz[3], M. Hadži-Nikolić[3], Y. Maréchal[3], M. David[4], M. Delort[4], J. Le Gal La Salle[4], P. Lauret[4], S. Cros[5], J. Badosa[5]

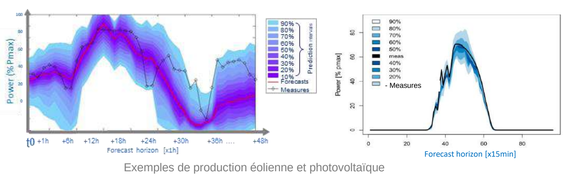
[1] MINES Paris - PSL, Département Energétique et procédés, Centres PERSEE[a] et OIE[b]
[2] CNRS/Météo-France – Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM)
[3] Grenoble-INP UGA - G2ELab
[4] Université de la Réunion – PIMENT
[5] Ecole Polytechnique – Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD)

Contexte

Les prévisions court-terme (qqs minutes au lendemain) de la production EnR (éolienne, solaire) et de la consommation sont nécessaires pour une gestion économique et sécurisée des systèmes énergétiques

Production EnR

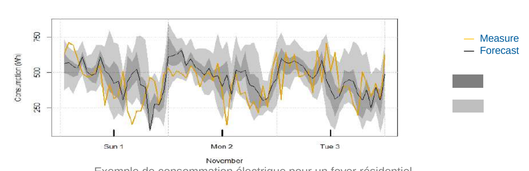
- Les prévisions de production sont aujourd'hui opérationnelles.
- Cependant, les erreurs de prévision ont des impacts coûteux sur les systèmes d'énergie.
- Des nouveaux besoins de prévision émergent (i.e. rampes, agrégations)
- Améliorer les prévisions est toujours essentiel pour les utilisateurs.



Exemples de production éolienne et photovoltaïque

Consommation locale

- La prévision à l'échelle d'un consommacteur ou d'un poste source est nécessaire pour la gestion des micro-réseaux, bâtiments intelligents, communautés d'énergie etc.,
- La demande est très volatile et évolue avec les nouveaux usages (ex: véhicule électrique).
- Besoin de nouvelles approches de prévision.



Exemple de consommation électrique pour un foyer résidentiel.

Vision du projet

Améliorer la prévision à court terme de la consommation et de la production EnR à l'échelle locale à travers une approche holistique qui considère toute la chaine de valeur et de modèles : de la donnée à l'utilité pour les applications.

Objectifs

Un projet organisé selon la chaîne de modélisation, depuis la prévision météo jusqu'aux applications dans les systèmes énergétiques

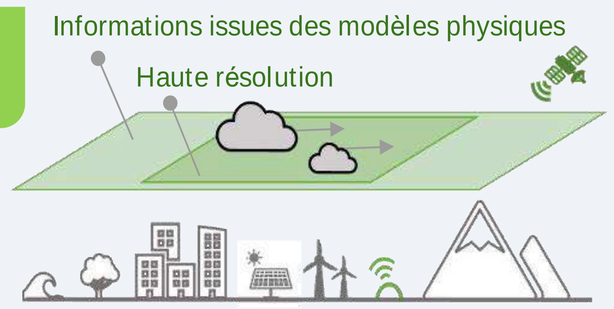
1. Développer des produits de **prévision météo dédiés au secteur de l'énergie**.
2. Augmenter la **résolution spatio-temp des modèles météorologiques** (AROME-EPS, LES)
3. Exploiter les **nouvelles sources des données** météo (Meteosat 3ème génération, Sky Imagers, etc.)
4. Développer une **approche générique de prévision** simultanée de la conso et de production EnR
5. Prédire la **consommation à l'échelle locale** en tenant compte des **nouveaux usages** et en intégrant des **données contextuelles et socio-économiques** (réseaux sociaux, news…)
6. Adapter les modèles de prévision lorsque la production EnR ou la consommation sont affectées par une gestion importante de la **flexibilité**.
7. **Relier les modèles de prévision** énergétique à la **valeur** qu'ils apportent aux applications

Prévisions météo

Prévision météo orientée utilisateur

Informations issues des modèles physiques

Haute résolution



Prévisions énergie

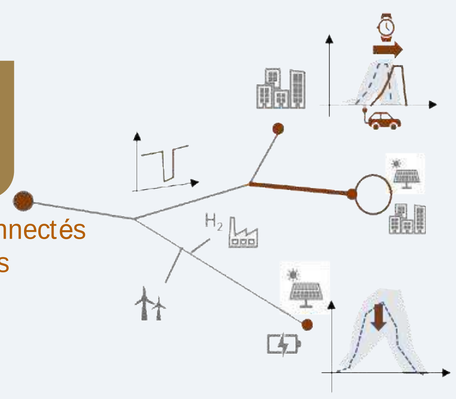
Prévisions énergie orientées valeur

Prévision générique & continue de la production ENR et de la consommation locale (du quartier à la région)

influence des données sociales sur la demande locale

Valeur des prévisions dans les applications

Systèmes interconnectés et insulaires



Rétro-action de la flexibilité sur la demande locale

Valeur pour la gestion des réseaux et des micro-réseaux

Valeur dans l'offre d'énergie et de flexibilité, prévision du potentiel de flexibilité

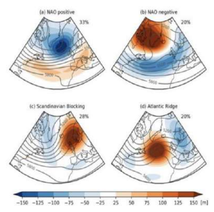
Innovations et travaux en cours…

WP1: Set the project scene

Use Cases, KPIs, Data Management, Evaluation Framework

WP2: Next generation modeling and prediction of weather variables

Prévision météo avec données satellite avancées



Prévision d'irradiance solaire adaptée aux données **satellites avancées** (par ex. Meteosat Third Generation).

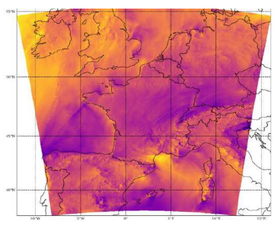
Production d'indicateurs analysant les erreurs de prévisions météo solaire, en utilisant les données satellites et des situations météo spécifiques (par ex dans l'Atlantique Nord)

LES opérationnel pour production ENR

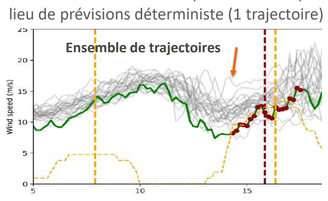
Simulation de la turbulence et des effets de surface créant des **nuages réalistes à résolution 100 m**. Evaluation sur site PV avec mesures météos.

Ensembles météo à haute résolution

Modèle AROME hectométrique

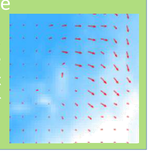


Production **d'ensembles** pour anticiper la variabilité de la ressource (surtout solaire) au lieu de prévisions déterministe (1 trajectoire)



Modèle 'physics-informed' de prévision de rayonnement solaire

Combinaison des prévisions AROME HR, LES et Satellite à l'aide d'un modèle physique + Deep Learning adapté aux images et à la grande dimension pour produire des cartes de rayonnement



Analyse et processing des prévisions météo pour la prévision énergétique (WP3)

Analyse statistique temps/fréquence, causalité des prévisions météo produites en WP2, pour intégration dans les modèles statistiques / Machine Learning de prévision ENR et demande.
Comparaison avec données classiques (AROME déterministe, cartes de rayonnement commercialement disponibles)

WP2: Fourniture de jeux de données météo pour l'apprentissage et le test des modèles de prévision d'énergie, WP3: Retour sur variables les plus utiles

WP3: Next generation energy (demand and RES) forecasting models

Prévision continue ENR / demande locale

Contrairement aux approches existantes:
- prévision de la demande locale
- prévision de la demande VE
- adaptation au contexte insulaire (possibilité d'évaluer le potentiel de 'Transfer learning' en apprenant sur d'autres îles ou contexte continental proche)
- Prévision simultanée ENR / demande qui simplifie les modèles (>= 2 x moins de modèles)

Extension

Prévision de la demande avec informations contextuelles

Contrairement aux approches existantes:
- Analyse des sentiments dans les informations et réseaux sociaux utilisant le traitement du langage naturel
- Prévisions des niveaux de consommation électrique inhabituels à l'échelle du quartier à différents horizons

WP3: Fourniture de jeux de données pour l'évaluation dans les applications, WP4: Retour sur paramétrage améliorant les prévisions

WP4: Value of forecasts in energy applications

Prévision orientée valeur

Prediction — Cost optimization

Paramètres des modèles de prévision optimisés itérativement en fonction du gradient du coût du problème d'optimisation

Impacts mutuels de la pénétration ENR et de la flexibilité

Prediction — Flexibility activation

Potentiel de flexibilité d'ENR locales et réponse indirecte d'un quartier à un signal type 'nudge'

Ajustement de la prévision suite à une activation massive, Evaluation du bénéfice lié aux gains de participation

www.pepr-tase.fr

Contacts : georges.kariniotakis, simon.camal @minesparis.psl.eu

cea — cnrs — anr

PROGRAMME DE RECHERCHE
SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES & ÉNERGIES RENOUVELABLES

TASE '24

Flex-TASE

Flexibilité pour les Technologies Avancées des Systèmes Energétiques

Frédéric Wurtz[1], Daniel Llerena[2], Christophe Boisseau[3], Anaïs Bovet[4]

[1] Univ. Grenoble Alpes, G2ELab, France – frederic.wurtz@g2elab.grenoble-inp.fr
[2] Univ. Grenoble Alpes, GAEL, France – daniel.llerena@univ-Grenoble-alpes.fr
[3] Université Grenoble Alpes, OTE , France – christophe.boisseau@univ-grenoble-alpes.fr
[4] Université Grenoble Alpes, OTE , France – anais.bovet@univ-grenoble-alpes.fr

Contexte : la nature technique et sociale de la flexibilité comme point de départ

La flexibilité appelle

Des innovations techniques

Pour orchestrer une flexibilité entre production et consommation, face à l'intermittence des énergies renouvelables (soleil, vent …), ou au risque de congestion ou aux limites des moyens de production disponibles,

Des innovations sociales

Pour aller vers une implication/appropriation des acteurs de la chaîne énergétique, des gestionnaires, jusqu'aux consommateurs qui font partie du système énergétique et de sa dynamique de fonctionnement et de réaction

Enjeux et questions de recherche

Quelle est la nature d'un système technico-social de production/consommation d'énergie adressant

La flexibilité indirecte
(ou implicite)
mobilisant les acteurs sur des solutions techniques et organisationnelles passant par l'envoi de signaux (tarifaire et non tarifaires) ?

La flexibilité 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 (type agrégateurs) ?

Quelles nouvelles méthodes et approches à l'interface des sciences de l'ingénieur et des SHS pour

Observer, mesurer
(quantitativement & qualitativement) les dynamiques de flexibilité, alimentée par une recherche participative allant sur des *living-labs* et des terrains réels ?

Être in-fine en mesure de **proposer** de nouveaux outils de conception, de simulation, intégrant de nouveaux indicateurs ?

Pour en être en mesure de répondre à de nouvelles questions

Comment les solutions techniques permettent-elles de mobiliser les leviers d'appropriation et d'implication de flexibilité dans la chaîne de consommation et de production d'énergie ?

Comment la nécessaire prise en compte de l'«Humain dans la boucle» à titre individuel et collectif, rend nécessaire de revoir les méthodes de mesures, de caractérisation et d'innovations ?

Thèses et postdocs

Adaptation des modes de production et de consommation d'énergie des ménages à l'aide de PV dans un contexte de changement climatique	• Encadrement : Dorothée CHARLIER (dir.), Monika WOLOSZYN et Anna RISCH • Recrutement prévu : juin 2025
Méthodologie de distribution de la flexibilité énergétique d'un parc de bâtiments tertiaires pour optimiser le confort des occupants sous profil de consommation contrainte	• Encadrement : Antoine LECONTE, Julien RAMOUSSE, Etienne WURTZ (dir.) et Jérôme Le DREAU • Recrutement prévu : octobre 2024
Modèle dynamique et hiérarchisé de flexibilité directes	• Encadrement : Hervé GUEGUEN (dir.) et Antoine LECONTE • Recrutement prévu : octobre 2024
Optimisation de la topologie et de la gestion de l'énergie de communautés et multi-communautés d'énergie	• Encadrement : Anthony ROY, François AUGER (dir.), Salvy BOURGUET et Jean-Christophe OLIVIER • Doctorant : Youenn Froger depuis le 1er décembre 2023
Optimization of flexibility services under multiple local uncertainties in the context of smart grids	• Encadrement : Georges Kariniotakis (dir.) et Panagiotis Andrianesis • Recrutement prévu : octobre 2024
Sobriété et flexibilité énergétique – évaluer l'adaptation des ménages à l'aide de techniques de modélisation multi-agents	• Encadrement : Jérôme LE DREAU, Stéphane PLOIX et Frédéric WURTZ
Ville et transition énergétique. Décarboner le chauffage urbain en récupérant la chaleur perdue	• Encadrement : Gilles Debizet • Doctorante : Annabelle Serraz depuis le 1er décembre 2023
Flexibility modeling and aggregation for micro-grids control and sizing	• Encadrement : Hervé Guéguen (dir.) et co-encadrants à venir • Doctorant : Niels Thobie à partir du 1er octobre 2024
Impact des nudges sur la flexibilité indirecte	• Encadrement : Romain Boudrais (dir.) et Marie Ruellan • Doctorante : Soraya Belbati depuis à partir du 1er octobre 2024

Productions et résultats attendus

Des méthodes pour la caractérisation des réservoirs et des leviers de flexibilité sur :
- la demande directe (basée sur des systèmes techniques)
- la demande indirecte (passant par les acteurs et l'envoi de signaux).

La construction d'indicateurs quantitatifs et qualitatifs de caractérisation de la flexibilité.

De nouvelles générations d'outils de calcul et de simulation pour la flexibilité inter-opérables entre les paradigmes de:
- la simulation dynamique,
- l'optimisation,
- l'approche agent.

La mise au point d'une recherche **socio-technique** sur des scènes de recherche de type *living-lab* et terrain, à l'interface des innovations techniques des usages et usagers.
Les terrains de recherche couvrent:
- le résidentiel,
- le tertiaire,
- les industries électro-intensives,

en lien avec les communautés énergétiques, les gestionnaires de réseau de distribution et de transport, les opérateurs d'agrégation et les fournisseurs d'énergie

Le déploiement d'une plate-forme de type **observatoire** support à une dynamique de recherche sur la flexibilité pour accompagne:
- une recherche de **science participative** à l'échelle des consommateurs et des communautés énergétiques
- une approche de **science ouverte** (open source, open-data)

Website : www.pepr-tase.fr Contact : frederic.wurtz@g2elab.grenoble-inp.fr

Life Cycle Assessment of Technologies related to Advanced energy systems to contribute to Sustainability and Energy sovereignty (LCA-TASE)

BRGM:[1] A. BEYLOT ; **CEA**:[2-3] D. CHEZE, F. CLAUDON, N. GAZBOUR, P. LIMOUSIN ; **ENSAM**:[4] B. LARATTE ; **IFPEN**:[5] N. ROGY, D. TEXEIRA ; **INRAE**:[6] E. LOISEAU ; **MINES**:[7-8] P. PEREZ-LOPEZ, C. ROUX ; **UB**:[9-10] E. MIGNARD, M. SAINT-JEAN, C. SANABRIA, G. SONNEMANN

[1] **BRGM**, 3 av. Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans, France
[2] **CEA** INES, 50 avenue Lac Léman, 73375 Le Bourget du Lac, France
[3] **CEA** Tech en Occitanie, 51 rue de l'Innovation, 31670 Labège, France
[4] **ENSAM**, I2M UMR 5295, 8 Av. de l'Université, 33400 Talence, France
[5] **IFPEN**, 1 et 4 avenue de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison, France
[6] **INRAE**, Univ Montpellier, Institut Agro, Montpellier, France
[7] **MINES OIE**, rue Claude Daunesse, BP 207, 06904 Sophia Antipolis, France
[8] **ARMINES**, 60 Bd. Saint Michel, 75272 Paris, France
[9] **Univ. Bordeaux**, BSE UMR 6060, 16 Av. Léon Duguit, 33608 Pessac, France
[10] **Univ. Bordeaux**, ISM UMR 5255, 381 Av. de la Libération, 33405 Talence, France

CONTACT
guido.sonnemann@u-bordeaux.fr
pepr.lca.tase@u-bordeaux.fr

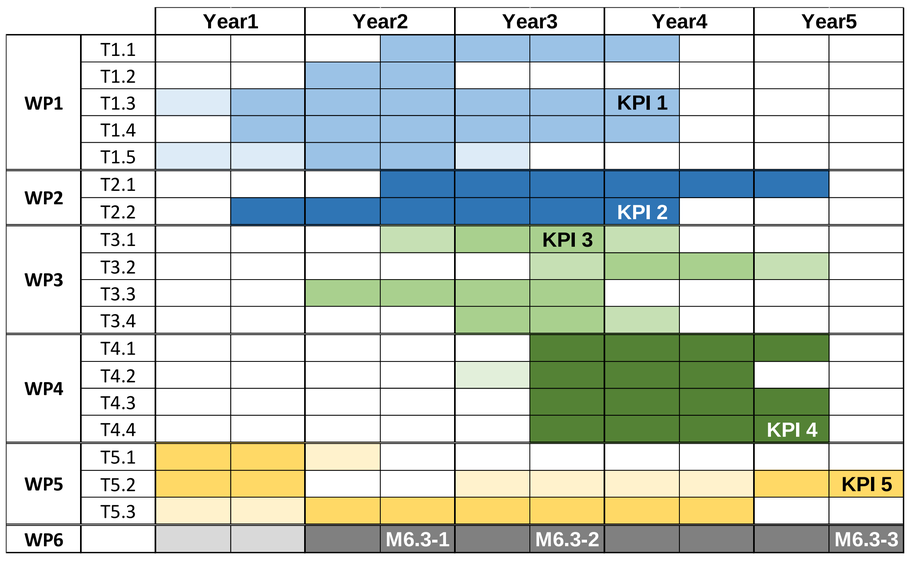
LCA-TASE at a glance

This project aims to provide French stakeholders in the energy transition with advanced Life Cycle Assessment (LCA) methodologies to have reliable metrics on the environmental, social and economic impacts of renewable energies (ENR), i.e. photovoltaic and wind turbines, in order to assess their sustainability from a life cycle perspective. It hence aims of advancing the LCA methodology by including ecosystem services and biodiversity, the development of new indicators currently missing (circularity or the perception of landscapes), and dynamic and prospective modeling taking into account spatial issues, temporal or upscaling of these technologies.

LCA-TASE project is wide-ranging because it includes both emerging and more mature technologies for the production, storage and usages of energy. In particular, concrete cases of decentralized grid integration in buildings and electric vehicles will be studied, including on a national scale.

Finally, it will allow local and national decision-makers to obtain a database for environmental LCA of energy systems covering the supply chain of primary and secondary raw materials. All of this LCA modeling and method enrichment will thus make it possible to obtain LCA results of different configurations to assess the environmental impacts of renewable energies and storage technologies at different scales (temporal, spatial, system) and under different constraints (e.g. territorial constraints, building integration, network constraints).

This will make it possible to make an unprecedented prospective and dynamic assessment of the sovereignty of France's energy systems and will allow the French LCA research community to catch up with similar efforts carried out elsewhere in Europe.



IMPACT	DELIVERABLE	MEANS OF VERIFICATION
KPI 1: Method to integrate Ecosystem Services and Biodiversity in LCA	Method published as scientific paper	Available in specialized journals (OA)
KPI 2: Application of the LSCA principles to a case study of renewable energy in France	Application published as scientific paper	
KPI 3: Case studies of environmentally friendly development of energy technologies	At least two case studies published in scientific papers	
KPI 4: LCA results of various configurations to evaluate environmental impacts of REN and storage technologies at different scales and under different constraints	Python tool to better take into account dynamic and prospective evolution of electricity supply mix	Open access Python library
KPI 5: Dedicated LCA database of renewable energy systems in France	Compilation of LCA data	OFREMI data hub

METHODS

WP1 Advancing LCA methodology to improve and extend environmental impact assessment modelling of energy systems, incl. ecosystem services for biodiversity

- **T1.1** Dynamic modelling of LCI: Methodological options
- **T1.2** Spatial differentiation in LCA for renewable energy systems: towards a regionalization in France
- **T1.3** Integration of Ecosystem Services and Biodiversity in environmental assessments
- **T1.4** Prospective modelling for environmental impacts of future scenarios of PV sector
- **T1.5** Prospective modelling for upscaling of emerging PV technologies

WP2 From LCSA to multi-criteria's and multi-stakeholders' sustainability assessment

- **T2.1** Adapting and developing the missing indicators for circularity and landscape as a way to adapt to new demands for the impact assessment modelling of energy systems
- **T2.2** Integration of LCA with other advanced modelling techniques to better incorporate social, environmental, and economic considerations for improved LCSA methodology and linking with the Sustainable Development Goals and Environmental, Social, and Governance reporting for decision-making

APPLICATIONS

WP3 Environmental impact improvement of energy technologies : production, storage and usages

- **T3.1** Environmental and other sustainability impacts of emerging PV systems
- **T3.2** Environmental impacts of different storage solutions
- **T3.3** Environmental impacts of decentralized PV electrical systems coupled with heating systems in buildings and electric vehicles considering equipment lifetime, usages and energy management
- **T3.4** Environmental impacts of different wind turbines systems at a territorial scale

WP4 Environmental impact assessment of electricity mix integrating renewable energy at national grid level

- **T4.1** Environmental impacts of decentralized PV electrical systems in building with vehicles connected to the network modeled at the national level: BIPV
- **T4.2** Environmental impact assessment of PV in flexible electricity network: building and the grid interactions
- **T4.3** Impacts of the French electricity production mix at various temporal scale
- **T4.4** Prospective impact assessment of the electricity mix

DATA

WP5 Innovative compilation of data for environmental LCA of energy systems covering the raw materials supply chain

- **T5.1** Consistent modelling of LCI datasets for comparative studies including resources accounting as well as uncertainty and sensitivity analyses
- **T5.2** Dedicated LCA Database of energy systems in France including primary and secondary raw material supplies
- **T5.3** Sovereignty in energy systems and raw materials supply including raw materials intensity in energy systems

MANAGEMENT

WP6 Project management, communication and dissemination

Other projects from PEPR TASE

Advisory boards: Industry and Multistakeholder

OFREMI and existing databases

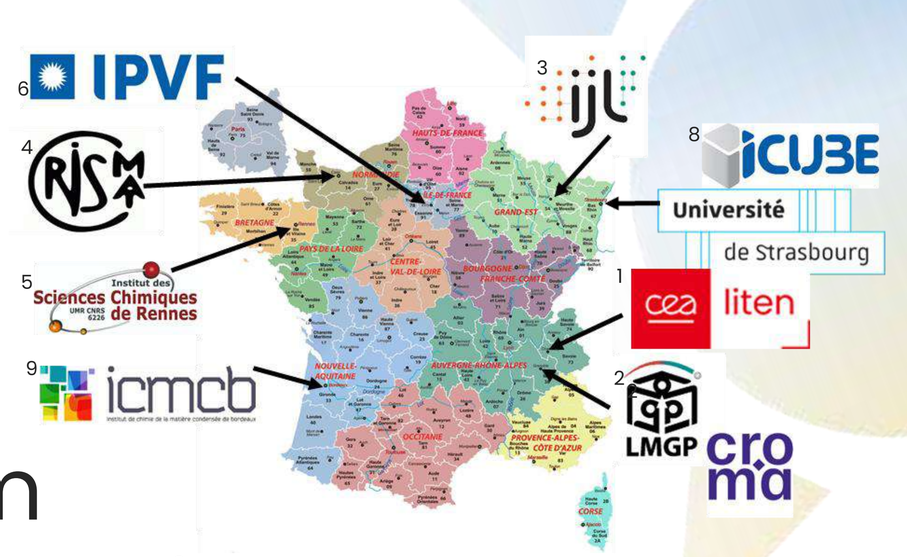
Some key data:

- LCA-TASE project has started on July 1st 2023
- Duration time: 60 months
- 1 Project manager and 117 months of postdoc
- 6 PHDs: **CEA** [T1.4] ; **INRAE** [T1.3] ; **ENSAM** [T2.1] ; **UB/all** [T2.1] ; **UB/ENSAM** [T2.2] ; **MINES** [T1.1 + T4.2 + T4.3]

Still in progress

This work benefited an aid from the state, managed by the French National Research Agency under the France 2030 program, with the reference ANR-22-PETA-0010

SOLSTICE



New Momentum in SOLving the indium and Silver consumption issues for a sustainable Terawatt-scale Industrialization of high efficiency solar CElls

F.Jay[1*], D.Bellet[2], V. Demange[5], J-L Deschanvres[2] , F. Ducroquet[7] , S.Dubois[1], T.Fix[8], A. Fouchet[4], C.Jimenez[2], D.Munoz-Rojas[2], A. Nominé[3], J-F Pierson[3], N. Schneider[6], M. Treguer-Delapierre[9]

OBJECTIVES

Support the **terawatt-scale deployment** of solar cells production by **freeing themselves from critical material dependence**

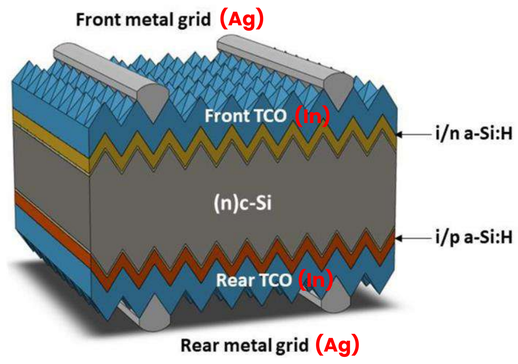
→ <u>critical materials</u>: **Indium (In)** and **Silver (Ag)**

→ <u>Related solar cell structures</u>
Single junction **SHJ / TOPCon-like**
2T Tandem **PK/c-Si**

→ <u>Targeted content</u>: **No Indium**, **Ag <2mg/W**
<u>Targeted η Vs ref</u>: **≤0,2%abs**, **≤0,5%abs**

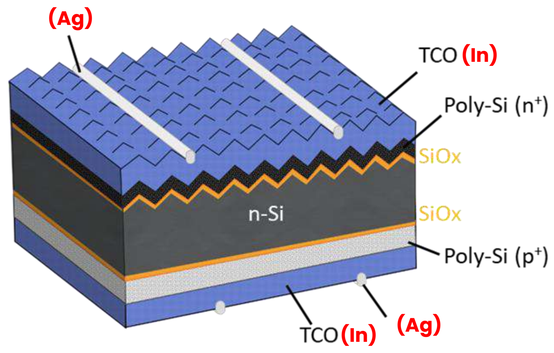
SELECTED SOLAR CELL STRUCTURES

Heterojunction



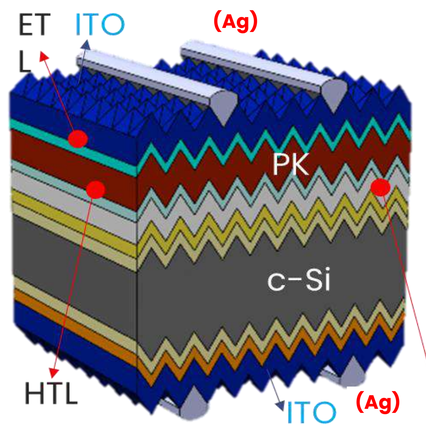
-high efficiency >25% / high TRL
-Low temp process (<250°C)
-Double side texturized

Topcon-like



-high efficiency >25% / high TRL
-med temp process (<400°C)
-single side textured

Tandem 2T PK/Si



-high efficiency >35% / low TRL next generation
-very low temp process (<130°C)
-single/double side textured

ALTERNATIVE MATERIALS DEVELOPMENT

ACCORDING SOLAR CELLS STRUCTURE SPECIFICATIONS *(Material prop., surface topologies, sublayer, temperature limitation)*

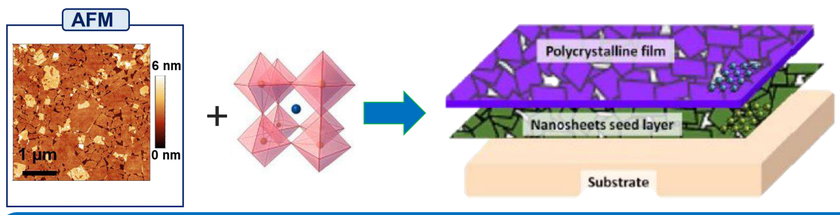
n-type Transparent conductive material (TCM)

$CaVO_3$, and $SrVO_3$
➔Transfer via nanosheets

<u>Step 1 : control of the nanosheets size</u>
(100nn to 500nm)
➔ Research engineer (18 months)
Coverage of different types of surfaces with varying degrees of roughness :
- *Single-crystal size and sieving*
- *Putting into solution*
- *Deposition on solar cells*

Institut des Sciences Chimiques de Rennes UMR CNRS 6226

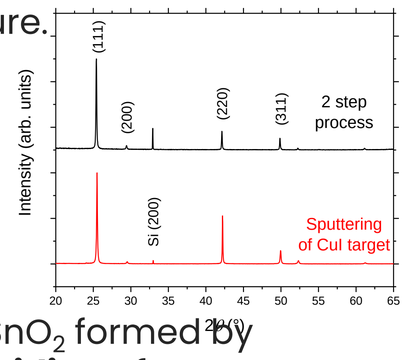
<u>Step 2 : Optimisation of large-area SrVO3 and CaVO3 deposits</u>
➔ Research engineer (18 months)
- Large-area PLD : 2-3 inches
-Magneton Sputtering : 3 inches
+ Aluminium electrodes to contact the TCO



p-type TCM

CuI and n-doped SnO_2 by magnetron sputtering deposition

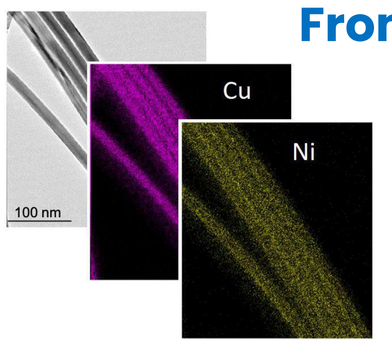
CuI films can be deposited either by sputtering of a copper iodide target or by iodination of a copper thin film (2 step process). Both kind of films exhibit similar cubic structure.

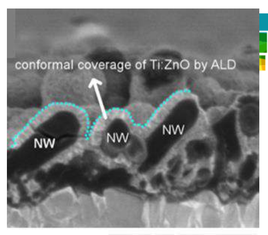


N:SnO_2 formed by **nitriding of a sputtered SnO_2 film**

Transparent electrodes based on metallic nanowire (NW) and TCM nanocomposites

From Ag-based NW to Cu-based NW





NW+metal oxide
NW+cond. polymer

- NW capping by **SALD** or **metal co-reduction**
- **Core-shell nanostructures** to improve the material stability
- Definition of **network density** following the application **TCM** or **Transparent electrode** (TE)

Dev. supported by material/device characterization

- **Material properties**: chemical (RBS, ERDA, XRD, XPS), optical (UV-vis. Spectroscopy, SE, PL), electrical (IV, CV Hall), @ **nanometric scale**: structural (TEM, MEB, EDS, AFM), electrical (SCM, SSRM, SMIM)
Surface and interface properties: electrical spectroscopy (admittance, noise), surface photovoltage, scanning Kelvin probe, APS

Choices supported by AI-Powered multicriteria selection

Sustainability Assessment → **Performance Evaluation** → **Multi-criteria Decision making** → **Recommandation & update**

<u>Project information</u>: 54months 07/23 to 12/27
Including funding for 9 master internships, 2 PhD thesis, 1 post-doctoral student,s 4 research engineers.
This work was supported by a French government grant managed by the Agence Nationale de la Recherche under the France 2030 program, ANR-22-PETA-001

PROGRAMME DE RECHERCHE
SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES & ÉNERGIES RENOUVELABLES

TASE '24

TASTING

TrAnsformation of the energy SysTem for a better resilience and **flexibility** with enhanced diGitalization

Berric Mathilde[1,2], Caire Raphael[1,2]

[1] Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, G2Elab, 38000 Grenoble, France
* Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes
[2] on behalf of the TASTING Consortium including 7 labs and 1 industrial partner

Context

The TASTING project tackles the major challenges linked to modernising and securing electricity systems, with a focus on the cloud/edge continuum. Its structure follows the PEPR TASE call 'Technological solutions for the digitalisation of intelligent energy systems'. The targeted scientific challenges relate to the ICT infrastructure as a key enabler and solution provider for the profound changes that our energy infrastructures will face in the coming decades. Indeed, the energy landscape has already been greatly disrupted, and each EU Member State is initiating different trajectories with regard to their respective energy transitions.Translated with DeepL.com (free version)

Partners:

7 labs

G2Elab - Grenoble Electrical Engineering Laboratory (Grenoble INP)
GeePs - Paris Electrical and Electronic Engineering Laboratory (Centrale Supelec)
IRIT - Toulouse Institute for Computer Science Research
LIST - Systems and Technology Integration Laboratory (CEA)
L2EP - Lille Electrotechnics and Power Electronics Laboratory (Centrale Lille)
L2S - Signals and Systems Laboratory (Centrale Supelec)
SATIE - Information and Energy Technology Systems and Applications Laboratory (ENS Rennes)

Industrial Partner, use case provider

RTE, France's transmission system operator

Challenges and obstacles :

It is clear that at the national level, there is no horizontal approach to Smart Grids. Many researchers from various original disciplines offer innovative work on specific points. However, it seems to TASTING consortium that there is an unmet need for securing this multi-infrastructure system. Building on past research work, we will pursue a system and integrative approach which will contribute to improving the resilience of our modern societies.
The purpose of the proposed research program is part of a process of creating methods for understanding (modeling) electrical network failures and decentralizing certain energy management (optimization) functions. The heart of the research project is based on the analysis of these functions for processing, securing and making the electrical system more reliable in our modern societies. It includes in particular:

- the functions of optimal management of energy flows and more particularly the interaction between these functions, the increase in the existing transfer capacity and the reflection on optimal locations of regulating devices together with associated ICT solutions,
- in-depth reflection on the obstacles linked to the integration of decentralized and/or renewable production on a large scale (weakening of networks) which leads to new types of protection including detection and location of faults. The widespread use of ICT (Information and Communication Technologies) allows for better observability of producers or various components of power systems and thus compensates for the incompleteness of data on the distribution network.
- taking into account uncertainties through robust modeling and optimization methods,
- the best spread of algorithm on various computing resources,
- the operational safety of the electrical networks of the future, intelligent and integrating local and/or renewable energies.

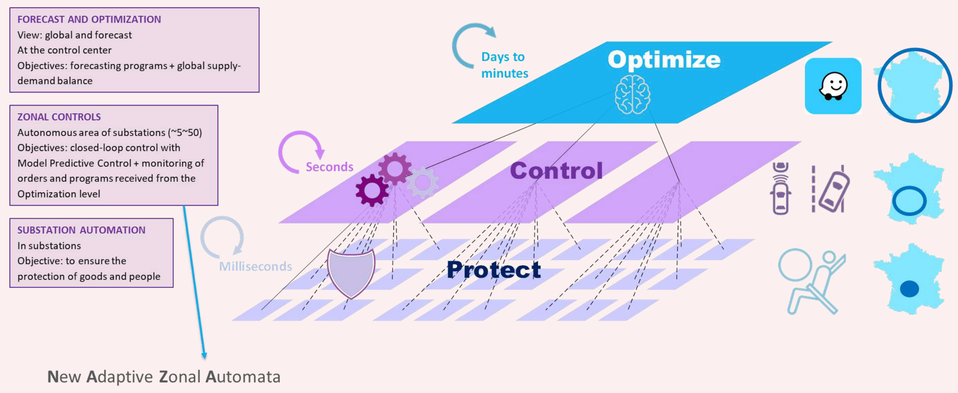
WPs

WP1: Infrastructure reliability and security
- Development of new control algorithm methods taking into account the constraints of the physical and cyber-physical layers.
- Proposal of real-time verification methods based on the formal validation of security properties to detect cyber-attacks targeting energy infrastructures.

WP2: Distributed architectures of cyber-physical systems.
- Evaluation of fully distributed control methods, comparison with semi-decentralised techniques and new consensus-based decision methods.
- Design of digital, intelligent and distributed instrumentation for real-time monitoring of system health.
- Development of intrusion detection systems for energy network communications.
- Implementation of adaptive and distributed frequency control to optimise local network zones faced with intermittent energy production.

WP3: Facilitating deployment on hardware
- Development of methods and algorithms to be implemented on hardware in digital substations.
- Proposal of digital methods for detecting faults in energy networks in order to improve the stability and availability of HV/MV networks.
- Development of methodologies to detect changes in network topology and automatically adapt model-based controllers.

WP4: Digital twins for multi-energy systems
- Use of digital twins to optimise the operation of multi-energy power systems.
- System health monitoring using digital twins.



Courtesy of Guillaume Giraud, RTE

Expected scientific outcomes

- **G2ELab**: TASTING is helping to organise the digitisation challenges proposed by RTE, an area of major interest for the laboratory due to the importance of the electricity vector.
- **CEA**: The CEA is focusing on the development of secure and reliable technologies to enable continuous access to secure information and to maintain the balance of the network. Experiments with RTE will evaluate these technologies, facilitating their transfer to the energy industry. The project includes academic collaborations and the dissemination of results through patents and scientific publications.
- **Inria Ctrl-A**: TASTING will enable Inria Ctrl-A to validate and apply its results to the digitalisation of electrical energy management and control. Inria Ctrl-A will contribute its IT expertise and acquire new experience and challenges by developing and exploiting previous cooperative work with RTE.
- **L2S**: The laboratory will develop control algorithms taking into account physical and cybernetic agents, proposing correct controllers by design based on several communication scenarios and physical constraints. The aim is to distribute intelligence over the transmission network, using multi-zonal approaches.
- **GeePs**: TASTING will strengthen the position of GeePs in power quality analysis, using data from Phase Measurement Units and their connection with HIL simulation.
- **SATIE**: The project offers the SATIE team the opportunity to develop new algorithms for distributed optimisation in large-scale realistic networks, comparing these approaches with other methods. TASTING will also strengthen academic collaborations on this crucial subject.
- **IRIT**: Focusing on the smart city and smart grids, IRIT has carried out work on the use of multi-agent systems to distribute intelligence in electricity distribution networks. TASTING will make it possible to apply and extend this work to electricity transmission networks, enriching knowledge and skills by exploring approaches and techniques from other fields.
- **L2EP**: The L2EP team focuses on the development of new technologies for a more economical and ecological electricity system. Communication networks and digital technologies are essential for improving energy management, resilience and adaptability. TASTING will explore self-adaptive control functions and self-learning algorithms for distributed energy resources. WP4 will support interdisciplinary activities by studying a digital twin of a power gas network to better manage a distribution electricity network. The project will also study digital function specifications, hardware, communication network performance and reconfigurations in the event of digital fault

Use cases

UC1: Active management on 63kV loops of different fallback topologies and flexibility (MPC, reconfiguration, dispatch down) via advanced coordination techniques for congestion management
UC2: The virtualisation of command controls for real-time management
UC3: On the optimal and distributed constitution of load shedding strategies
UC4: On fault location
UC5: Multi-energy CPU with digital twin
UC6: CPU virtualisation and distribution on more or less centralised IT resources

Website : www.pepr-tase.fr

Contact : Raphael.Caire@grenoble-inp.fr

TASE '24

BioFlexPV: Matériaux d'encapsulation biosourcés pour les modules photovoltaïques flexibles

S. Chambon,[1] M. Gueunier-Farret,[1] G. Wantz,[1] L. Hirsch,[1] A. Gapin,[2] T. Vidil,[2] S. Grelier,[2] E. Cloutet,[2] H. Cramail,[2] A. Mehdi,[3] P. Hesemann,[3] O. Dautel,[3] D. Coutancier,[4] N. Schneider,[4] S. Cros,[5] L. Liotaud,[5] A. Carella,[5] T. Bejat,[5] G. Sonnemann,[6] E. Mignard[6]

[1] IMS, UMR CNRS 5218, Univ. Bordeaux , France – E-mail: sylvain.chambon@u-bordeaux.fr
[2] LCPO, UMR CNRS 5629, Univ. Bordeaux, France
[3] ICGM, UMR CNRS 5253, Univ. Montpellier, France
[4] IPVF, UMR CNRS 9006, France
[5] CEA, Direction des énergies (DES), France
[6] ISM, UMR 5255, Univ. Bordeaux, France

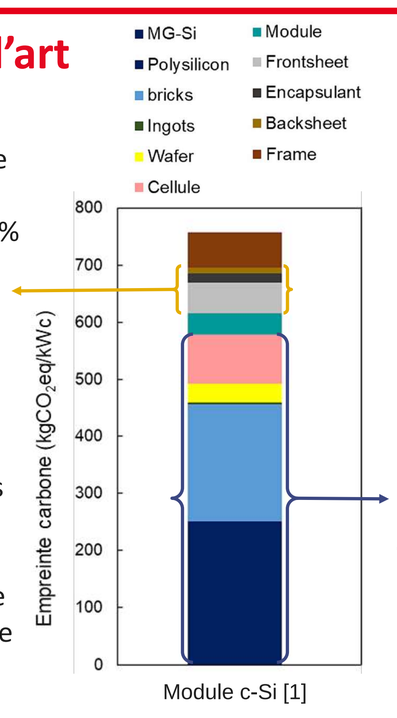
Contexte et état de l'art

Photovoltaïque mature: c-Si

- ✓ Technologie robuste, éprouvée et efficace
- × Fabrication des cellules PV: 75% de l'empreinte carbone
- × Recyclabilité
- × Encapsulants pétro-sourcés
- × Modules lourds

Objectifs: développement de films barrières et d'encapsulants **bio-sourcés**

- ➔ Modules c-Si légers
- ➔ Modules démontables afin de récupérer les éléments à haute valeur ajoutée (verre, cellules PV).



Photovoltaïque émergent: Perovskite (PK), organique (OPV), CIGS

- ✓ Reduction de l'empreinte carbone des cellules PV
- ✓ Modules fins et légers
- × Stabilité
- × Encapsulants pétro-sourcés

Objectifs: Développement de solution d'encapsulation **à faible empreinte carbone** pour les technologies émergentes

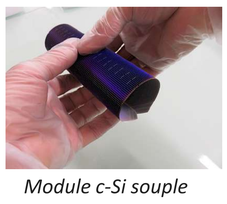
- ➔ Futures générations de modules bas-carbone

[1] Bejat T., et al., Prog Photovolt Res Appl. 2024; 1–16, doi:10.1002/pip.3803)

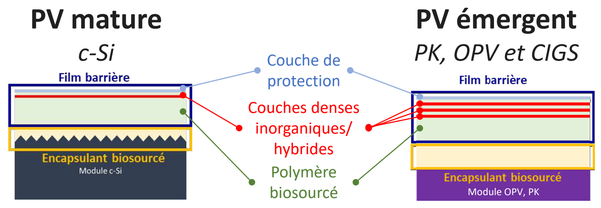
Enjeux et verrous:

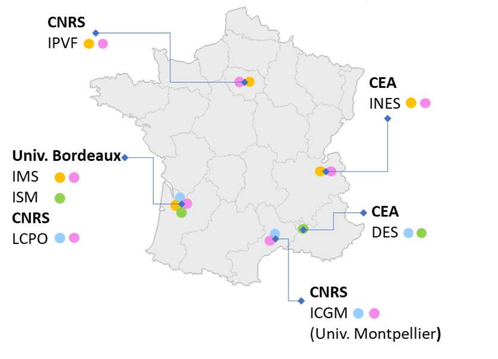
Dans le PV silicium, les modules sont lourds et non démontables

- ➔ Remplacement de l'EVA par un matériau de scellage biosourcé et « démontable »
- ➔ Développer une barrière légère biosourcée: bioplastique (WVTR = 1-2 g m^{-2} d^{-1})



Module c-Si souple





Dans le PV émergent (OPV/PK), l'encapsulation est **pétrosourcée.** Elle représente 60-70% de la masse des modules PV

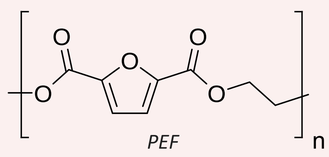
- ➔ Développer des solutions d'encapsulation biosourcées
- ➔ Travailler sur des systèmes de dyade organique/inorganique (WVTR = 10^{-3}g/$m^{-2}$$d^{-1}$)

Module OPV souple

WP1: Synthèse de nouveaux matériaux

Post-doc 1 (2024 – 2025): substrat polymérique biosourcé

- Synthèse de poly-éthylène furanoate (PEF)



Thèse 1 (2024 – 2027): matériaux de scellage biosourcé

- Synthèse de poly-hydroxyuréthane (PHU) (LCPO)
- Etude du gonflement des PHU pour la démontabilité des modules (CEA-Marcoule)

Thèse 2 (2024 – 2027): matériaux sol-gel hybrides pour les couches denses

- Synthèse d'organo-silices hydrophobes et aux propriétés barrières UV (ICGM)
- Mise en forme en film mince et études des propriétés barrières, optiques, mécaniques (IMS)

WP2: Développement de films barrières

Thèse 3 (2025 – 2028): Développement de couches denses par ALD sur substrats biosourcés

- Fabrication de couches denses inorganiques (ex: Al_2O_3) ou hybrides (ex: alucone) par ALD sur substrats biosourcés et développement des multicouches ou dyades (IPVF)
- Etudes des propriétés barrières aux gaz (CEA-INES)

Etude des propriétés mécaniques, optiques, barrières des matériaux et multi-couche développés

- Mise en place d'une base de données regroupant toutes les propriétés

WP3: Intégration dans les modules PV

Thèse 4 (2025 – 2028): Intégration dans des module OPV

- Encapsulation de cellules et modules OPV avec des stratégies biosourcées et abondantes (IMS)
- Etude du vieillissement des encapsulants et des cellules/modules OPV (CEA-INES)

Thèse 5 (2025 – 2028): Intégration dans des module PV c-Si

- Encapsulation de modules c-Si avec matériaux biosourcées et étude de vieillissement (CEA-INES)
- Etude de la démontabilité des modules (CEA-Marcoule)

Post-doc 2 (2027 - 2028): modules PK et CIGS

- Encapsulation biosourcé pour cellules/modules PK et CIGS

WP4: Recyclage et analyse de cycle de vie

Master 2 (x2) et post-doc (2026 - 2028): Analyses de cycle de vie

- Analyses de cycle de vie des solutions d'encapsulation biosourcées développées et des procédés mis en place dans le cadre du projet BioFlexPV (ISM)
- Etude du gonflement des PHU (CEA-Marcoule) → **Thèse 1**
- Etude de la démontabilité des modules PV c-Si (CEA-Marcoule) → **Thèse 5**

Conclusions

- Le projet BioFlexPV a démarré le 1er janvier 2024; durée prévue : 5 ans
- Les premiers recrutements sont prévus pour septembre / octobre 2024: **Thèse 1** (synthèse de PHU), **Thèse 2** (synthèse de sol-gel hybride) et **post-doc 1** (synthèse du PEF)

Website : www.pepr-tase.fr Contact : sylvain.chambon@u-bordeaux.fr

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté Égalité Fraternité

FRANCE 2030 — PROGRAMME DE RECHERCHE — SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES & ÉNERGIES RENOUVELABLES

TASE '24

Flex-Mediation

Coordinateur : **Gilles Debizet**
Université de Grenoble Alpes, PACTE

Variabilité
des énergies renouvelables …

… **intermédiations** …

Quelles **intégrations de la variabilité** dans les relations avec les utilisateurs ?

Quelles médiations entre **production et utilisation** finale ?

Quelles réponses de la **régulation** aux attentes de **justice énergétique** ?

… **évolutivité**
des utilisations

Multi-acteurs : Collectifs et communautés, marchés, régulateurs et législateurs…

Complexité : **co-construction inter-disciplinaire**

Restitution aux acteurs

Science **ouverte**

Comprendre les **médiations entre productions variables** et **utilisations évolutives** de l'électricité

Communautés énergétiques comme intermédiaires : participation, arrangements marchands et usages

A. Diaconu - PACTE, Univ. Grenoble Alpes

Nouveaux **arrangements organisationnels** entre production et consommation et leur mode de valorisation des ressources

A. Artis – PACTE, Univ. Grenoble Alpes
L. Desvallées – TREE, Univ. de Pau et P.-A.
1 doctorant·e – recrutement en cours

Influence des modes d'**émergence** et de **fonctionnement** des communautés énergétiques sur le juste partage des coûts et bénéfices

N. Kroichvili – FEMTO-ST/RECITS, UTBM
L. Laigle – CSTB
S. Dassé – FEMTO-ST/RECITS, CNRS

Influence des **intermédiaires** sur la **perception** de la variabilité des ENR et les pratiques des consommateurs

A. Diaconu – PACTE, Univ. Grenoble Alpes
G. Debizet – PACTE, Univ. Grenoble Alpes
M. Pellegrino – LabUrba, Univ. G. Eiffel
1 doctorant·e – recrutement en cours

Regards multi-échelles

- De micro-local à supra-national
- Réseaux, marchés, territoires

Positionnement scientifique

- Méthodes privilégiées : enquêtes, ethnographies, sources documentaires
- Multi-disciplinarité : sociologie, géographie/aménagement, droit, économie

Appui et soutien à la recherche

P. Chiron, E. Huber, N. Robinet – PACTE, Université Grenoble Alpes

A. Moulene Dauba – TREE, Université de Pau et Pays de l'Adour

Régulation dans le déploiement des énergies renouvelables et dans le développement de la **flexibilité**

B. Lormeteau – IODE, CNRS

Conception des politiques publiques et de la régulation relative à la flexibilité : nouvelles formes de services (fournisseurs, agrégateurs, communautés) et intégration dans les mécanismes de **marchés**, comparaison internationale

T. Reverdy – PACTE, Univ. Grenoble Alpes
B. Lormeteau – IODE, CNRS
C. Gasull – PACTE, Univ. Grenoble Alpes

Traduction légale de la flexibilité et questions de justice énergétique : comparaison européenne, analyse contractuelle multi-échelles, innovations en **droits** spécifiques pour les acteurs concernés

L. De Fontenelle – TREE, Univ. Pau et P.-A.
B. Lormeteau – IODE, CNRS
1 doctorant·e – recrutement en cours

Grenoble
19-20 mars 2025

2 journées d'études et de rencontres

Recherche sciences sociales et inter-disciplinarité

Sciences et **société**

Site Web : www.pepr-tase.fr

Contacts : gilles.debizet@univ-grenoble-alpes.fr

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté Égalité Fraternité

FRANCE 2030 — PROGRAMME DE RECHERCHE — SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES & ÉNERGIES RENOUVELABLES

TASE '24

cea — cnrs

MINOTAURE: Multimodal approach combining IN situ, ex situ and Operando characTerisAtion with simUlations for highly REliable next generation photovoltaics

Jean-Paul Kleider — jean-paul.kleider @centralesupelec.fr

James Connolly — james.connolly @centralesupelec.fr

Philip Schulz — philip.schulz @cnrs.fr

Olivier Bonino — olivier.bonino @cea.fr

Sylvie Harel — sylvie.harel @cnrs-imn.fr

Frédéric Sauvage — frederic.sauvage @u-picardie.fr

Stéphanie Pouget — stephanie.pouget @cea.fr

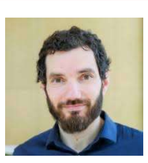
Hervé Vezin — Herve.vezin @cnrs.fr

Damien Aureau — damien.aureau @uvsq.fr

Daniel Suchet — daniel.suchet @polytechnique.org

Laurent Barrallier — laurent.barrallier @ensam.eu

Amaury Delamarre — amaury.delamarre @c2n.upsaclay.fr


Joël Wyttenbach — joel.wyttenbach @cea.ff

Lucia Reining — lucia.reining @polytechnique.fr

Jean-Baptiste Puel — jean-baptiste.puel @edf.fr

Contexte

- **Electrification croissante en France et dans le monde**
- **Forte croissance du marché du PV et part du PV dans le mix électrique**
- **Nouvelles technologies (Si-HJT, Si-Topcon, CIGS, Organiques, Pérovskites, tandems)**

Enjeux et verrous

- **Fiabiliser les nouvelles technologies pour le PV**
- **Développer des outils permettant l'analyse des dégradations**
- **Coupler caractérisations et modélisations**

Frédéric Sauvage

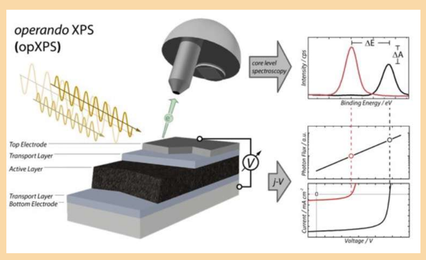
Stéphanie Pouget

Suivre l'évolution des propriétés structurales, chimiques, électriques en conditions de fonctionnement

Task 2.2. Multiscale combined chemical, structural & electronic investigation of surface and interfaces in perovskite solar cells
PhD 2.1 at M12 (CEA/LCAE) identified candidate – **recruiting**

Task 2.3. Operando approach of mechanical, chemical and electronic changes through XRD, XRF, XRR and XBIC mapping in absorber layers – in close connection with Task 4.2.1
PhD 2.2 (CEA/SyMMES + FOTON) **delayed at M18**

Task 2.4. Operando/in-situ exploration of degradation mechanisms in electronic, gas and mechanical properties under relevant conditions and stressors using Transmission Electron Microscopy (Imaging / 4D STEM and ASTAR), GC/FT-ICR and GC/FTIR/MS and Electron Spin Resonance Spectroscopy
PhD 2.3 (LRCS/LASIRe) delayed at M24
Post-Doc 2.3 (LRCS/LASIRe) M18 under identification



Raphael Ramos

Anass Benayad

Etudes physico-chimiques en condition de fonctionnement (Task 2.2)

Damien Aureau

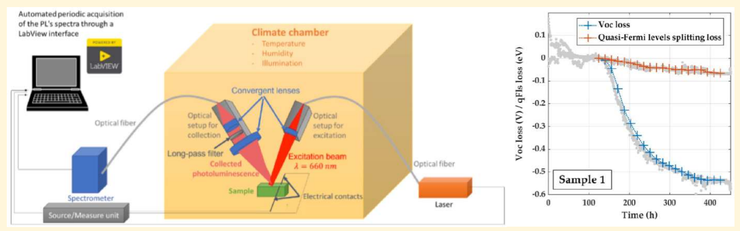
Daniel Suchet

Laurent Barrallier

Etudier les contraintes mécaniques, électriques, chimiques, et optiques - vieillissement accéléré

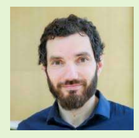
Un vieillissement **accéléré** est-il représentatif des conditions réelles ?
Réponse grâce au suivi **in situ**
des propriétés **mécaniques**, **chimiques** et **opto-électroniques.**

PhD 3.1	T+18	Coupled in situ mechanical and chemical characterisation by XRD, synchrotron and Raman , also linked to WP2 and WP5.	**Recruiting**
PhD 3.3	T+12	Analysis of opto-electronic degradation (I-V, PL, AS,...), also linked to WP4 and WP5	**Hired**
Post-doc 3.4	T+?	Analysis of chemical degradation by combined ToF-SIMS and XPS measurements, also linked to WP4	



Mesures optiques et électriques sous vieillissement accéléré

Amaury Delamarre


Joël Wyttenbach

Philip Schulz

Techniques multi-échelles, Couplage de techniques, Techniques spécifiques pour tandems

Plusieurs tâches démarrent la première année:

4.3.2 Degradation in transport and recombination properties in layers and at interfaces :
- **PhD 4.1** M12 Degradation studies from Impedance Spectroscopy, Admittance techniques, Noise measurements, **Links**: WP3 and WP5 – **Recruiting**
- **PhD 4.2** M12 Transport and recombination properties in layers and at interfaces (Rs, Rc, Hall, THz pump-probe, PL coupled), **Link** WP5 – **being hired**

4.3.3 Coupling of photoemission and photoluminescence characterisation:
- **PhD 4.3** M1 Coupling of PES/PL, linked to WP2.
- **PhD 4.4** M1 Multiscale analysis of degradation: PL, CL, XPS & Nano-Auger

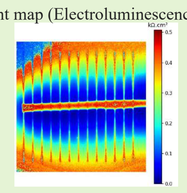
4.3.4 Correlation of mechanical and electrical properties by coupling XRD and differential luminescence mapping:
- **PhD 4.6** M12 Light induced strain and lattice dynamics: X-ray scattering + Correlative time-resolved and pump-probe analyses of absorbers top subcell
- **Post-doc 4.9** : (CEA/DTS, ENSAM, C2N, IPVF, GeePs, EDF, L2S) M9: Combined mappings of mechanical stress and electrical properties using X-ray and differential luminescence (5m) + Electrical parameters mappings and global analysis of tandem cells (10m)

Stress map (XRD)

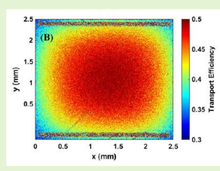
Comparison

Aging understanding

Shunt map (Electroluminescence)

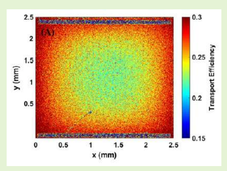


4.4.1 Subcell specific degradation mechanisms with 2D localization: carrier collection, resistances:
- **PhD 4.5** M6 Separation of the contribution of subcells in tandem ageing - **Recruiting**



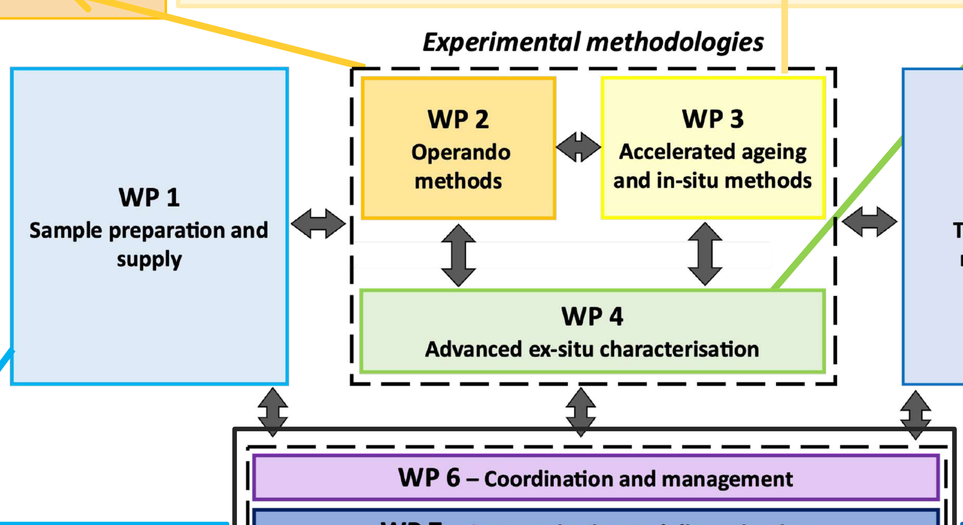
Transport efficiency top cell (InGaP)

Transport efficiency middle cell (GaAs)



H. Xu, et al., Progress in Photovoltaics: Research and Applications, (2019).

Techniques avancées complémentaires pour comprendre le vieillissement



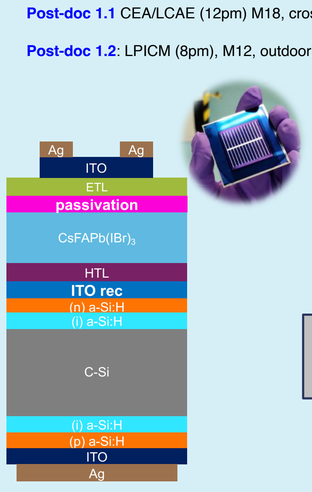
Olivier Bonino

Sylvie Harel

Préparation et livraison aux groupes de travail de caractérisation
Différents types de structures: silicium, CIGS, pérovskites

Post-doc 1.1 CEA/LCAE (12pm) M18, cross section samples preparation (CEA/LCAE) **– being recruited**

Post-doc 1.2: LPICM (8pm), M12, outdoor ageing



Cellule solaire tandem PK/Si

Actions effectuées :
- Recensement des demandes de specimens et de structures d'étude - Calendrier de fourniture
- Echanges techniques entre demandeurs et fournisseurs
- Liens avec le projet IOTA

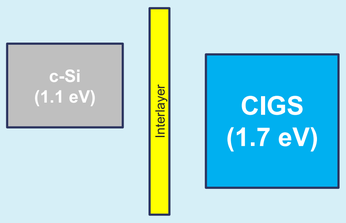
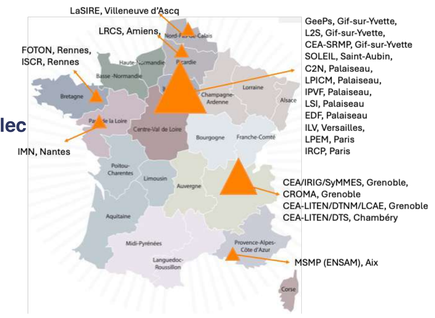


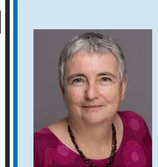
Schéma cellule solaire tandem CIGS/Si

Financement : 5,05 M€
Démarrage : 02/11/2023
Durée : 5 ans
Coordinateur: CentraleSupélec

22 laboratoires répartis sur 8 partenaires

CentraleSupélec




Lucia Reining

James Connolly

Jean-Baptiste Puel

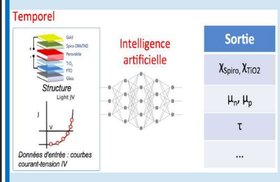
Modélisation multi-échelles
- Niveau atomique
- Niveau dispositif
- Couplage + IA

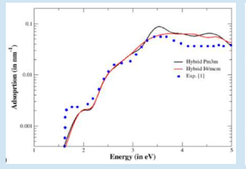
PhD 5.1 M6 Band offsets and spectroscopy analyses **- Hired**

PhD 5.2 M12 Multiscale modelling - Recruiting

Post-doc 5.3 [M18] (LSI, GeePs, ENSAM,CEA-SRMP) 12m: Multiscale modelling

Actions effectuées :
- Analyse de la dégradation par combinaison de modèles physiques et IA.
- Analyse de datacubes de caractérisation par IA pour cartographies de paramètres.
- Modélisation multiéchelle : Échelle atomistique pour études et optimisation matériaux
  Échelle dispositif pour optimisation des performances





Parameter source	Jsc (A/m²)	V_{oc} (V)	V_{mp} (V)	FF (%)	η (%)
Exp. [6]	17.5	1.13	0.98	81.6	16.2
DFT pristine	13.4	1.8	1.40	71.9	17.5
DFT Tetra	17.3	1.27	1.13	85.0	18.7
DFT Cubic	18.2	1.26	1.13	85.3	19.6

Exemple d'IA :
• Filtrage de données
• Estimation de paramètres apprentissage

Échelle atomistique :
Calcul DFT d'absorption de phases (ici cubique et tétragonale pérovskite)

Échelle dispositif :
Calculs de performances de matériaux simulés à l'échelle atomiste

Website : www.pepr-tase.fr

Contact : jean-paul.kleider@centralesupelec.fr

anr

TASE'24 POWDEV

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté Égalité Fraternité

anr agence nationale de la recherche

FRANCE 2030

MAIN OBJECTIVES

- Simulate, characterize and analyze the scenario of a blackout & Optimize the resilience of PSMRE

RESEARCH QUESTIONS

- RQ1: What is the specific chain of events for a blackout and how massive integration of RES can act on this chain ?
- RQ2: Which metrics and which objective functions are relevant to assess the vulnerability, how to calculate them?
- RQ3: What are the remedial solutions to apply in operation and how to optimize them?
- RQ4: What are the possible remedial solutions to apply in design and how to optimize them?

Project Management

CentraleSupélec

université PARIS-SACLAY

WP 1 - Climate and extreme events

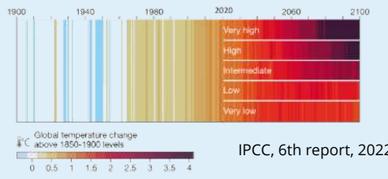
LSCE
LABORATOIRE DES SCIENCES DU CLIMAT & DE L'ENVIRONNEMENT

OBJECTIVES

- Study of **current and future climatic conditions** based on the IPCC's SSP scenarios
- Database of **extreme events** likely to impact energy infrastructure in connection with these scenarios
- Identification of the most **extreme scenarios** conducive to generating large-scale **energy outages**

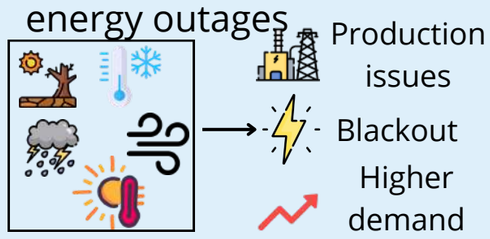
TASKS

Use of the **IPCC scenarios** to analyze the impact on energy productions

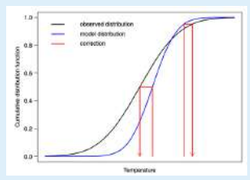


IPCC, 6th report, 2022

Identification of **extreme events** that triggerd major energy outages



Correction of biases in regional climate models



Customization of existing methodologies for **consistent data in electrical grid models**

Climate data to simulate **large-scale outages** in electrical and socio-economic models

WP 2 - Electricity systems and networks

G2Elab Grenoble Génie Électrique Grenoble Electrical Engineering

UGA Université Grenoble Alpes

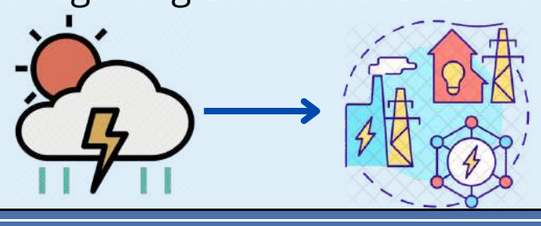
OBJECTIVES

- Study of on **the modelisation** of complex power systems and **indicators** of power system resilience
- Create scenarios of complex systems with **protections and control strategies** based on database of **extreme events**
- Methodology for experimental **PHIL real-time simulation** and validation the results

TASKS

Identification and characterization of modeling methods to explore and analysis of relevant indicators when **Blackouts**

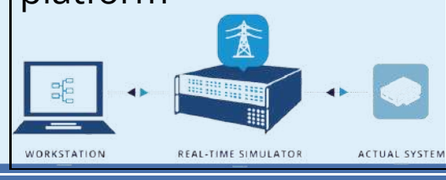
Define and **model** a case study of **complex power system** by integrating extreme event data



Development of metrics and indicators by using simulation/co-simulation results

Development of a decision-making tool for remedial solutions (planification - operational levels)

Validation scenarios with **PHIL real-time simulation** on **PREDIS** platform



CEC Dauphine | PSL UNIVERSITÉ PARIS

WP 3 - Socio-economic scenarios

SOURCE Soutenabilité et résilience

UVSQ université PARIS-SACLAY

IRD Institut de Recherche pour le Développement FRANCE

OBJECTIVES

- **Socio-economic scenarios** of the extensive deployment of renewable energies in the context of climate change
- **Holistic approach** that considers economic, societal, and environmental impacts related to the power system changes
- Analysis of **markets and investments dynamics** involved in the deployment of renewable energies considering extreme events

TASKS

Economic and societal actors modeling in the **optimization** process of power systems for resilience

Examining how **fluctuations in commodity markets** affect the costs and stability of renewable energy supplies

Qualitative methods to approach **community resilience and social acceptance** of renewable energy infrastructures and load shedding.

Evaluation of the socio-economic impacts of a **power outage**

WP 4 - Proactive and Robust Optimization for mitigation and planification of resilient power systems

OBJECTIVES

- **Axis 1:** **Proactive disaster response** mitigation modeling and optimization framework for resilient power systems
- **Axis 2:** **Robust optimization** of electrical network design taking into account blackout scenarios

TASKS

Axis 1

- Identification of effective operational mitigation and response strategies against cascading failures
- Model the optimal pre- and post-disruption operational mitigation and recovery problem
- Develop rigorous and efficient solution algorithms
- Application and validation of the models and algorithms

Axis 2

- Model effectively the cascading effect
- Finding approximate models
- Finding effective solution algorithms
- Validating the solutions in a practical setting

Inria

CentraleSupélec

université PARIS-SACLAY