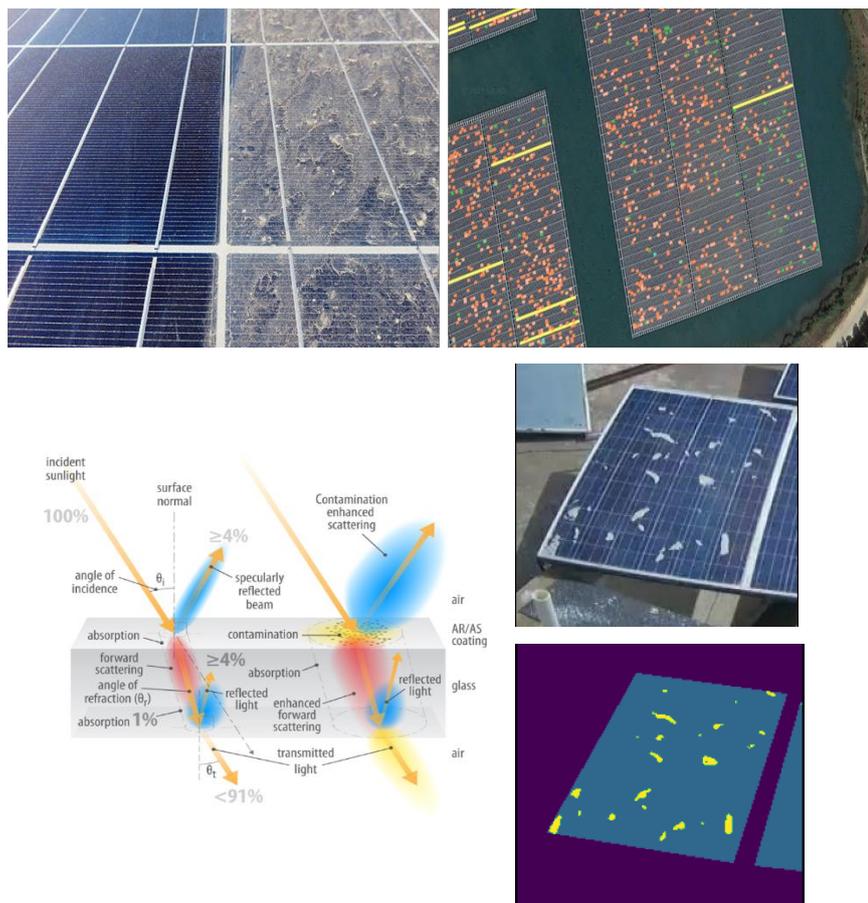


## Contexte et Pertinence Scientifique

Les systèmes photovoltaïques (PV), en particulier ceux installés dans des régions sujettes aux salissures, telles que les zones arides, ainsi que les sites marins et agricoles, subissent d'importantes pertes énergétiques dues aux salissures. Ces pertes peuvent atteindre 20% à 30% par an, entraînant des pertes financières dépassant 10 milliards d'euros en 2023<sup>1,2</sup>. Afin de limiter ces impacts, il est essentiel de développer des outils avancés pour prédire l'accumulation de salissures et ses conséquences. Bien que des progrès aient été réalisés<sup>3,4,5,6</sup> en modélisation optique, diagnostic sur le terrain, les revêtements anti-salissures et l'optimisation du nettoyage, une approche intégrée combinant les paramètres environnementaux et opérationnels avec des capacités prédictives reste à explorer.



**Fig. 1 :** Ci-dessus : exemple d'un système PV avec salissures sévères et diagnostic des points chauds (pertes) dus à des salissures sévères, via l'imagerie IR d'un drone. En bas : à gauche, exemple d'approche de modélisation optique pour les salissures ; à droite, exemple d'analyse d'image et de détection de salissures sur des panneaux PV.

## Objectifs de la Recherche

Cette thèse propose de développer une méthode robuste et évolutive pour prédire l'accumulation de salissures dans les systèmes PV, en s'appuyant sur la modélisation de l'environnement réel et des techniques avancées de fusion de données. Elle abordera les questions scientifiques clés suivantes :

<sup>1</sup> J.A. Tsanakas et al. (2024). Quality assurance from laboratory to field: Novel test solutions for soiling-prone PV systems. 41th EUPVSEC & Special Issue EPJ Photovoltaics Journal (in press).

<sup>2</sup> L. Micheli et al. (2024). Modelling Performance and Maximum Allowed Costs for Anti-Soiling Coatings in Europe. 41th EUPVSEC, Vienna, Austria.

<sup>3</sup> G. Smestad et al. (2024). Modelling photovoltaic soiling losses through optical characterization. Scientific Reports 10(58).

<sup>4</sup> Report IEA-PVPS T13-21:2022

<sup>5</sup> W. Javed et al. (2017). Modeling of photovoltaic soiling loss as a function of environmental variables. Solar Energy 157, pp. 397-407.

<sup>6</sup> Z. Brydon et al. (2023). An Automated Framework for Drone-based Solar Panel Soiling Detection. 8th International Conference on Robotics and Automation Engineering.

1. *Comment mieux prédire les salissures et les pertes énergétiques du PV associées à partir des paramètres environnementaux et opérationnels ?*
2. *Quels mécanismes permettent de décrire, modéliser et répliquer l'accumulation des salissures au niveau du module PV ?*
3. *Comment utiliser l'imagerie multispectrale et la fusion de données pour améliorer la modélisation et le pronostic des salissures à l'échelle système ?*

## Approche Méthodologique

La thèse suivra une méthodologie ascendante, partant du niveau module pour atteindre l'échelle système PV, structurée en trois étapes principales (Fig, 2) :

1. Niveau Composant/Module
  - a. Reproduction et modélisation de l'accumulation des salissures dans des conditions contrôlées en laboratoire.
  - b. Validation expérimentale du modèle en exploitant l'expertise du CEA sur les mécanismes de dégradation et les tests accélérés.
2. Intégration au Niveau Système
  - a. Mise en place de campagnes de monitoring pour collecter des données diversifiées, incluant des données météorologiques, opérationnelles et des images multispectrales.
  - b. Réalisation d'essais de salissures sur un site pilote et analyse des corrélations entre les différents ensembles de données.
  - c. Validation et amélioration des outils de diagnostic avec des fonctionnalités innovantes, telles que la prédiction de la propagation des salissures par l'IA.
3. Déploiement au Niveau Opérationnel
  - a. Évaluation de la méthode sur des modules PV commerciaux dans des centrales PV à grande échelle.
  - b. Démonstration de l'applicabilité réelle et de l'évolutivité de l'approche pour optimiser la maintenance et minimiser les pertes énergétiques.

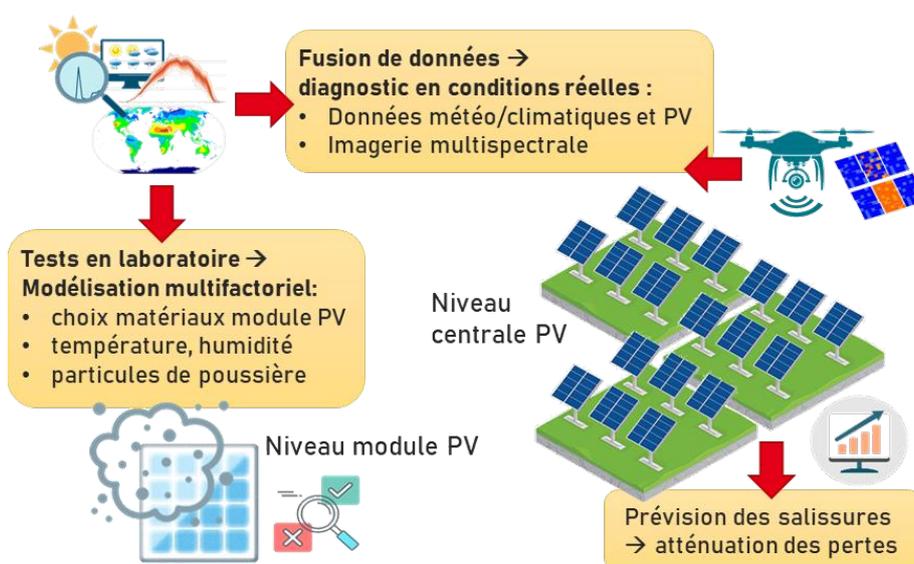


Fig. 2 : Schéma de la méthodologie/des étapes de la thèse

## État de l'Art et Contributions Innovantes

Les études existantes ont abordé certains aspects des salissures, tels que la modélisation environnementale, la caractérisation optique et les mesures anti-salissures. Cependant, ces travaux

manquent souvent d'intégration entre échelles et ne tirent pas pleinement parti des approches modernes de fusion de données. Les contributions clés de cette thèse incluent :

- Le développement d'un modèle multifactoriel d'accumulation de salissures validé par des expériences contrôlées.
- L'intégration du diagnostic terrain et de la modélisation environnementale via des techniques avancées de fusion de données, notamment l'imagerie multispectrale, une première dans le domaine PV.
- La création d'un cadre prédictif pour anticiper les schémas de salissures et optimiser les calendriers de nettoyage, en intégrant des méthodologies basées sur l'intelligence artificielle.

## Résultats Attendus

Les résultats de cette thèse permettront :

- Une prédiction précise et une atténuation des pertes énergétiques dues aux salissures.
- Une optimisation des stratégies de nettoyage et de maintenance des centrales PV, réduisant ainsi les coûts opérationnels.
- Le développement d'un outil complet de diagnostic et de pronostic des salissures, applicable à diverses installations PV.

## Mise en Œuvre et Moyens

La recherche s'appuiera sur les infrastructures et compétences du CEA et de ses partenaires :

- Ressources Internes : Techniques avancées de fusion de données et de vision par ordinateur, outils de diagnostic PV basés sur l'imagerie (Fig. 3).
- Collaboration Externe : expertise de l'école doctorale / université collaboratrice en imagerie multispectrale et modélisation environnementale.
- Infrastructures : Laboratoires pour la fabrication et les tests de modules, prototypes de tests en conditions réelles, et bases de données propriétaires pour l'analyse et la modélisation.



**Fig. 3:** Ci-dessus : Les enceintes/laboratoires d'essais d'encrassement PV du CEA. En bas : Le kit d'essais d'encrassement du CEA pour les mesures en extérieur et le diagnostic PV du CEA basée sur l'imagerie IR.

## Impact Scientifique et Sociétal

Cette thèse aura un impact majeur dans le domaine des énergies renouvelables et du PV :

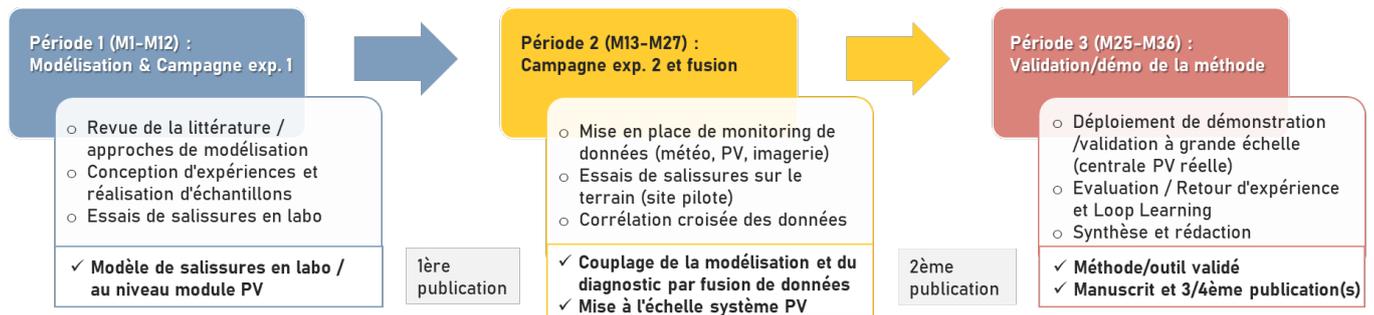
- a. Renforcer la fiabilité et les performances des systèmes PV dans les régions sujettes aux salissures.

- b. Contribuer à la transition énergétique en maximisant l'efficacité de la production solaire.
- c. Réduire le Coût Actualisé de l'Électricité (LCOE) des systèmes PV, favorisant leur adoption à l'échelle mondiale.

## Jalons et Planning

La recherche est organisée en trois phases :

- Phase 1 (Mois 1–12) : Revue de la littérature, mise en place des expériences et développement initial du modèle de salissures.
- Phase 2 (Mois 13–27) : Monitoring des données, essais sur le terrain et affinement du modèle via la fusion de données.
- Phase 3 (Mois 25–36) : Validation et démonstration à grande échelle de la méthode dans des centrales PV réelles.



La thèse aboutira à un outil validé pour le pronostic et la gestion des salissures dans les systèmes PV, accompagné de plusieurs publications scientifiques.

Contacts:

- Ioannis Tsanakas (CEA), ioannis.tsanakas@cea.fr
- Yajing Yan (LISTIC/USMB), yajing.yan@univ-smb.fr