

Modélisation d'un système photovoltaïque et extraction automatique d'alarmes opérationnelles

Contexte

Les systèmes solaires photovoltaïques (PV) modernes reposent sur des chaînes d'énergie comprenant modules, dispositifs de conversion, systèmes de gestion de puissance et, de plus en plus, solutions de stockage. Cette architecture multi-composant génère une dynamique complexe, caractérisée par des interactions non linéaires, des transitions rapides entre régimes de fonctionnement et des réponses propres à chaque sous-système. Cependant, les indicateurs globaux traditionnellement utilisés en exploitation — tension, courant et puissance — ne fournissent qu'une vision agrégée du comportement et se révèlent souvent insuffisants pour caractériser des phénomènes internes plus subtils [1].

Plusieurs études récentes montrent que les méthodes de diagnostic fondées exclusivement sur les grandeurs électriques atteignent rapidement leurs limites face à la variabilité opérationnelle des centrales et à la diversité des défauts [2]. En parallèle, les approches fondées sur l'intelligence artificielle appliquées aux systèmes photovoltaïques démontrent un fort potentiel pour extraire des signatures pertinentes au sein de données multidimensionnelles, mais leur efficacité dépend directement de la qualité des signaux analysés, de leur structuration et de la pertinence des indicateurs dérivés [3]. Dans ce contexte, plusieurs travaux insistent sur l'importance d'analyser plus finement les formes d'onde, les variations dynamiques et les comportements transitoires des sous-systèmes PV — c'est-à-dire les différents blocs fonctionnels composant la chaîne énergétique tels que les modules, les strings, les dispositifs de conversion (DC/DC, onduleurs) et, le cas échéant, les unités de stockage. Une telle décomposition permet d'identifier des marqueurs internes plus sensibles que les indicateurs globaux usuels. La littérature montre notamment que l'observation détaillée des transitions, ruptures locales, phénomènes non linéaires ou pertes dynamiques permet de mieux discriminer les comportements propres aux modules, aux convertisseurs ou aux dispositifs de stockage [4].

Cette tendance se retrouve également dans les recherches récentes sur les systèmes solaires couplés au stockage, où l'hétérogénéité des dynamiques électriques et énergétiques a conduit à l'émergence de modèles hybrides capables de représenter séparément les contributions de chaque sous-ensemble [5, 6]. Ces modèles servent non seulement à améliorer la compréhension des interactions internes, mais aussi à générer des indicateurs locaux plus riches que les seules mesures d'entrée et de sortie. Dans ce cadre, un axe de recherche émergent consiste à transformer automatiquement certaines variations caractéristiques des signaux — ruptures, changements de régime ou réactions différenciées selon les sous-systèmes — en alarmes opérationnelles. Celles-ci sont des représentations discrètes de phénomènes continus et permettent de structurer l'information de manière plus interprétable [7]. Des travaux dans le domaine de la détection dynamique des anomalies illustrent par exemple l'efficacité de méthodes fondées sur des seuils adaptatifs ou des transformations statistiques de signaux continus pour générer des alarmes sensibles aux variations internes [8].

Dans la continuité des recherches menées au laboratoire PROMES-CNRS (thématique CSPG) sur la compréhension multi-physique des systèmes solaires et la structuration explicable des données

énergétiques, ce stage vise à combiner modélisation physique simplifiée, analyse avancée des signaux et construction automatique d'indicateurs discrets. Il traite exclusivement de la construction d'un modèle dynamique multi-composant (modules + conversion + stockage éventuel) et de la définition d'un ensemble d'alarmes opérationnelles dérivées des signaux simulés. Ces alarmes constitueront des représentations compactes et interprétables des comportements internes du système, sans que leur utilisation ultérieure soit spécifiée à ce stade exploratoire.

Plan de travail du stage

Le/la stagiaire participera à la construction d'un modèle dynamique simplifié d'une chaîne photovoltaïque multi-composant (modules, conversion et stockage éventuel) ainsi qu'à l'extraction automatique d'alarmes opérationnelles dérivées des signaux simulés. L'objectif est de mettre en place un cadre méthodologique permettant (i) de reproduire les principales dynamiques internes du système, (ii) d'identifier des variations caractéristiques dans les signaux et (iii) de transformer ces variations en indicateurs discrets interprétables.

Principales missions :

1. Analyser la littérature scientifique traitant de la modélisation dynamique des systèmes PV multi-composants et des méthodes d'extraction d'indicateurs ou d'alarmes issues de signaux continus.
2. Construire un modèle dynamique simplifié décrivant modules, conversion et stockage éventuel, puis identifier les variables observables pertinentes pour la génération d'alarmes.
3. Simuler et prétraiter les signaux obtenus, assurer leur cohérence temporelle et analyser leurs variations caractéristiques (transitions, ruptures locales et changements de régime).
4. Définir et implémenter un premier ensemble d'alarmes opérationnelles, obtenu par transformation automatique des signaux simulés à l'aide de règles statistiques, seuils adaptatifs ou méthodes de détection de ruptures.
5. Évaluer la cohérence et la robustesse des alarmes générées sur différents scénarios simulés et produire des visualisations permettant d'interpréter la relation entre signaux continus et alarmes discrètes.
6. Rédiger un cahier des charges méthodologique pour une extension future du modèle et du système d'alarmes à des données réelles ou à des configurations plus complexes.
7. Mettre en forme et valoriser les résultats via un dépôt open-source (GitHub/Zenodo) et la préparation d'une communication scientifique.

Profil recherché et compétences

- Étudiant·e de master 2^e année, école d'ingénieur 5^e année (EEA, énergie, automatique).
- Bonnes compétences en modélisation physique ou systèmes dynamiques, traitement du signal, notions en conversion d'énergie ou systèmes PV appréciées.
- Maîtrise de Python/Matlab.
- Curiosité scientifique, autonomie, esprit analytique et capacité à structurer un travail exploratoire.

Encadrement et environnement

Le stage se déroulera au sein de la thématique **CSPG** (Centrales Solaires de Prochaines Générations, <https://www.promes.cnrs.fr/recherche/thematiques/centrales-solaires-de-prochaines-generations-cspg/>) du **laboratoire PROMES-CNRS, Rambla de la thermodynamique, 66100 Perpignan**, dans un environnement interdisciplinaire combinant : (i) la modélisation physique des systèmes solaires, (ii) l'analyse expérimentale et l'acquisition multi-domaine, et (iii) le traitement du signal, les méthodes statistiques et les approches inspirées des systèmes à événements discrets.

Durée du stage : 6 mois

Période souhaitée : 1^{er} semestre 2026 (février ou mars 2026)

Encadrants : Edgar Hernando Sepúlveda-Oviedo et Stéphane Grieu

Mails de contacts : Merci de transmettre vos notes, un CV et une lettre de motivation à edgar-hernando.sepulveda-oviedo@univ-perp.fr et grieu@univ-perp.fr

Rémunération : Oui

Références

- [1] Marangis, Demetris et al. "Trend-Based Predictive Maintenance and Fault Detection Analytics for Photovoltaic Power Plants". Sol. RRL. (2024).
- [2] Sepúlveda-Oviedo, Edgar Hernando, et al. "Artificial intelligence in photovoltaic fault diagnosis: A natural language-based Topic-tSNE fusion analysis". Energy and AI. (2025).
- [3] Sepúlveda-Oviedo, Edgar Hernando, et al. "Feature extraction and health status prediction in PV systems". Advanced Engineering Informatics. (2022).
- [4] Taghezouit, Bilal et al. "Model-based fault detection in photovoltaic systems: A comprehensive review and avenues for enhancement". Results in Engineering. (2024).
- [5] Saleem, Muhammad Saad et al. "Discrete-Time Cascaded-Control Design of Photovoltaic Systems for GMPPT and Power Curtailment Operations". 2023 25th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'23 ECCE Europe), Aalborg, Denmark. (2023).
- [6] Awad, Hadia et al. "Field Data-Driven Discrete-Event Simulation of Residential PV/ Energy Storage Systems in Cold Climate Regions". 2025 IEEE Electrical Energy Storage Applications and Technologies Conference (EESAT), Charlotte, NC, USA. (2025).
- [7] Briceño, Citlaly et al. "Discrete event simulation for photovoltaic integration in sustainable manufacturing— A review and future directions" Renewable and Sustainable Energy Reviews. (2025)
- [8] Cao, Yu et al. "A dynamic alarm threshold setting method for photovoltaic array and its application" Renewable Energy. (2020).