



Offre de thèse au laboratoire PROMES

Titre de la thèse : Surveillance de l'état de santé des centrales solaires équipées de collecteurs cylindro-paraboliques par mesure ultrason et des méthodes d'intelligence artificielle

Laboratoire : Laboratoire des PROCédés Matériaux et Énergie Solaire (PROMES)

Établissement : Centre national de la recherche scientifique (CNRS)
Université de Perpignan Via Domitia (UPVD)

Cofinancement : École Doctorale Énergie Environnement - ED 305
Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) - ANR

Candidature : envoyer un CV et une lettre de motivation à Ferhat Tamssaouet : ferhat.tamssaouet@univ-perp.fr et Stéphane Grieu : stephane.grieu@univ-perp.fr

Date limite de candidature : 05/06/2023

Date de début de la thèse : 01/10/2023

Mots-clés : centrales solaires à concentration, production de chaleur industrielle, *Prognostics and Health Management*, durée de vie résiduelle, maintenance prédictive, intelligence artificielle.

Profil du candidat :

- Formation : Master 2 Recherche ou Diplôme d'Ingénieur avec une expérience recherche (PFE effectué dans un laboratoire de recherche).
- Discipline : Sciences pour l'ingénieur.
- Connaissances et compétences : apprentissage machine et/ou *Prognostics and Health Management*.
- Programmation : Python ou autres langages équivalents.
- Autre : Esprit de synthèse, bonne rédaction, bon niveau d'anglais.

1- Contexte

Afin de répondre aux enjeux énergétiques et climatiques, nos sociétés se tournent de plus en plus vers les technologies tirant profit des énergies renouvelables. Parmi ces dernières, l'énergie solaire est l'une des solutions ayant le plus grand potentiel pour couvrir les besoins croissants des sociétés modernes. Parmi les solutions technologiques exploitant l'énergie solaire, les centrales solaires à concentration (technologie CSP, pour *Concentrated Solar Power*) sont très prometteuses. En effet, les CSP présentent plusieurs avantages pour la production électrique (stockage d'énergie) mais aussi et surtout pour la production de chaleur industrielle. En 2019, la consommation française de chaleur (majoritairement produite à partir de sources carbonées : 35 % gaz naturel, 24 % valorisation des déchets urbains et 23 % biomasse) s'établissait à 26 TWh, dont 42 % par le secteur industriel [1]. Or, la demande en chaleur industrielle est difficile à satisfaire par des sources d'énergie non-fossiles car les températures attendues sont généralement très élevées. Cependant, les centrales CSP sont capables d'atteindre ces températures

et de répondre à la plupart de ces besoins. Malgré ce fort potentiel, la compétitivité de cette technologie reste assez faible.

Pour améliorer la compétitivité des centrales CSP, il est essentiel d'augmenter le rendement des procédés et de réduire les coûts d'exploitation qui représentent jusqu'à 70 % des coûts d'une installation industrielle [2]. Un des leviers pour atteindre cet objectif est la mise en place d'une maintenance prédictive (MP). En effet, la MP garantit la continuité de service, permet d'éviter les défaillances et diminue les risques environnementaux. Pour cela, une approche de pronostic et de gestion de l'état de santé (ou PHM, pour *Prognostics and Health Management*) doit être mise en place, ce qui permettra la surveillance de l'état de santé des systèmes, la détection et le diagnostic de fautes, le pronostic de défaillances et la prise de décision pour la maintenance ou le contrôle [3].

En détails, ce projet concerne la microcentrale solaire MicroSol-R (Microcentrale Solaire pour la Recherche) du site PROMES d'Odeillo-Font-Romeu, dans les Pyrénées-Orientales. Inaugurée en 2016, MicroSol-R capte l'énergie solaire pour être utilisée directement comme chaleur ou pour transformer cette dernière en électricité. La captation de l'énergie solaire est assurée par trois collecteurs cylindro-paraboliques de 12 m de long et de 5,7 m d'ouverture. Ces collecteurs concentrent le rayonnement solaire vers un tube échangeur contenant un fluide caloporteur, alors chauffé à 300 ou 400 °C.

À la suite d'une étude préliminaire, menée dans le cadre d'un projet de recherche financé en 2022 par le Bonus Qualité Recherche (BQR) de l'UPVD, qui a permis d'identifier les composants critiques de la microcentrale solaire et les paramètres physiques à surveiller pour suivre leur état de santé. Au vu de l'instrumentation existante, il a été déterminé que les tubes échangeurs sont parmi les composants les plus critiques d'une centrale. En effet, leur défaillance impactera inévitablement le rendement de la centrale [4] et la fuite du fluide caloporteur (souvent toxique) peut mettre en danger les opérateurs et/ou l'environnement.

Pour mettre en œuvre une démarche PHM pour la surveillance de l'état de santé des centrales solaires à concentration et plus spécifiquement des tubes échangeurs, il est essentiel d'avoir une instrumentation adéquate. Parmi les techniques de mesure possibles, les mesures acoustiques et, en particulier les mesures d'ultrasons, sont très prometteuses pour la surveillance de l'intégrité structurale de ces tubes. Les transducteurs ultrasons présentent de nombreux avantages, tels que leur facilité d'installation, leur grande sensibilité, même à des défauts minimes, leur faible coût et leur capacité de fonctionnement, même dans des environnements difficiles (comme des températures élevées). Cependant, ces signaux sont difficiles à traiter parce qu'ils varient selon les conditions de mesure (bruit et conditions environnementales) et sont tributaires des géométries d'acquisition, ce qui augmente l'effort à mettre en œuvre pour leur prétraitement et réduit la généralisation des résultats.

2- Objectif de la thèse

L'objectif de cette thèse est la mise en œuvre d'une démarche PHM destinée aux tubes échangeurs des centrales solaires à concentration équipées de collecteurs cylindro-paraboliques. Les résultats attendus sont le développement, l'analyse et la validation d'algorithmes, utilisant l'apprentissage machine, capables de détecter l'occurrence, de diagnostiquer la nature et de prédire l'évolution des défauts qui peuvent survenir en utilisant des mesures ultrasons. Ces algorithmes devront permettre de diminuer les coûts de maintenance et donc de rendre ces centrales solaires économiquement plus compétitives. De plus, les résultats peuvent aussi être exploités pour optimiser le rendement des centrales conjointement aux travaux qui sont menés actuellement à PROMES sur le contrôle-commande avancé des centrales solaires équipées de collecteurs cylindro-paraboliques [6].

3- État de l'art

Le PHM, aussi appelé SHM pour *Structural Health Management* dans le cas où on s'intéresse à des structures, est l'ensemble des méthodes et des algorithmes, de l'acquisition des données à la prise de

décision, utilisés pour la planification des activités de maintenance tout au long du cycle de vie d'un système. Du fait de la complexification des processus industriels et de l'augmentation des données de surveillance (grâce notamment à l'IoT, pour *Internet of Things*, ou au stockage dans le *CLOUD*, etc.), le PHM/SHM est devenu très populaire depuis deux décennies puisqu'il permet de réaliser le suivi et la surveillance de l'état de santé des systèmes d'une façon individuelle, alors qu'avant, il était nécessaire d'avoir recours aux probabilités *a priori* dans les études de fiabilité sans prendre en compte les conditions et les profils d'utilisation [3]. Malgré les multiples avantages de la mise en œuvre d'une démarche PHM, et contrairement à beaucoup de technologies/secteurs, très peu d'études abordent les technologies du solaire à concentration [6] et encore moins pour les centrales équipées de collecteurs cylindro-paraboliques.

Concernant les tâches de détection et de diagnostic (caractérisation) de défauts, dans [7], des transducteurs électromagnétiques à ultrasons ont été utilisés sur des tubes échangeurs, le but étant d'utiliser ensuite un réseau de neurones pour apprendre le lien entre les points chauds détectés par des thermocouples et la distorsion des signaux ultrasons causée par la corrosion. Les résultats en détection sont assez satisfaisants (80 % de bonnes prédictions). Cependant, l'approche ne permet pas de caractériser le défaut, ni de le localiser. De plus, l'étude étant menée dans un laboratoire, il serait difficile d'obtenir les mêmes résultats en conditions opérationnelles. Dans [8], les auteurs ont traité la problématique de la classification des défauts détectés par les signaux ultrasons entre fissures et défauts de soudure. Cette approche nécessite un prétraitement (transformée de Hilbert, transformée en ondelettes, algorithme d'autocorrélation, etc.) des données, ce qui la rend difficilement implémentable. Cependant, les résultats obtenus en termes de localisation de défauts sont très probants sachant qu'uniquement deux signaux ultrasons sont utilisés, même si les conditions opératoires des expériences menées sont difficilement reproductibles dans une vraie centrale solaire. Concernant le pronostic de défaillances, à notre connaissance, il n'existe pas d'étude portant sur la prédiction de la durée de vie des tubes échangeurs dans les CSP.

4- Développements scientifiques envisagés

Afin d'atteindre les objectifs de ce projet, plusieurs actions devront être menées. La première concerne l'étude des bases de données existantes sur les signaux ultrasons de surveillance de l'état de santé des structures. Une des bases candidates pour apporter la preuve de concept d'algorithmes PHM est celle de l'*Open Guided Waves* (OGW) produite par la Société Allemande pour les Essais Non Destructifs (DGZfP) qui constitue un benchmark complet, ouvert et transparent pour les chercheurs [9]. En effet, OGW autorise différents matériaux, géométries, disposition des transducteurs, etc., permettant de tester en détails les algorithmes développés.

Préalablement à la deuxième action, il est nécessaire de proposer des méthodes de prétraitement des données ultrasons afin d'extraire les indicateurs quantitatifs permettant de décrire l'état de santé d'une structure. Ensuite, il faudra développer des modèles fondés sur l'intelligence artificielle pour la détection, la caractérisation (le diagnostic) et la localisation des défauts en utilisant les signaux ultrasons. Comme les signaux ultrasons sont généralement constitués de vecteurs de grande dimension (en fonction de la résolution et de la sensibilité des transducteurs utilisés), il sera nécessaire de réduire la dimensionnalité de ces données avant de les utiliser pour entraîner des modèles PHM dont il convient de maîtriser le coût calculatoire. Pour ce faire, nous pouvons combiner deux types d'architectures neuronales : des auto-encodeurs pour la réduction de la dimensionnalité et des réseaux de neurones profonds (des perceptrons multicouches par exemple) pour la classification des données (détection et diagnostic). Puis, pour localiser les défauts détectés, il serait intéressant d'explorer les réseaux de neurones convolutifs (CNN, pour *convolutional neural networks*) ou de diffusion pour pouvoir inférer la position d'un défaut à partir des signaux ultrasons. Ensuite, vient la tâche du pronostic des défaillances qui correspondent dans ce cas à des ruptures dans la structure des tubes provoquant la perte du liquide caloporteur. L'exécution de cette tâche est conditionnée par la nature des mécanismes de dégradation. En effet, pour prédire l'évolution des défauts, il faut qu'ils soient évolutifs (et non brusques) et

stationnaires (donc prédictifs). Pour cela, des réseaux de neurones récurrents, tels que les réseaux LSTM (pour *long short-term memory*), ont prouvé leur grande robustesse pour modéliser et prédire des évolutions non-linéaires à des horizons temporels longs [10].

Une fois la preuve de concept de modèles PHM (de **détection**, de diagnostic et de **localisation** des défauts, et éventuellement de pronostic de défaillances) utilisant les signaux ultrasons apportée sur des bases de données qui font consensus dans la communauté scientifique, il faudra les valider grâce à la microcentrale solaire MicroSol-R dans le cadre de la troisième action de cette thèse. Pour ce faire, il faudra mettre en place l'instrumentation, qui sera constituée de transducteurs ultrasons et effectuer l'acquisition des données. Les coûts de la mise en place de nouveaux instruments de mesure seront supportés par le laboratoire PROMES.

Finalement, la dernière tâche de cette thèse concernera le développement de stratégies de maintenance et l'analyse coût-bénéfice de leur implémentation in situ, en lien avec les stratégies de contrôle-commande actuellement développées.

Title: Health monitoring of solar power plants with parabolic trough collectors using ultrasound measurement and artificial intelligence

Application: send a CV and a cover letter to Ferhat Tamssaouet: ferhat.tamssaouet@univ-perp.fr and Stéphane Grieu: stephane.grieu@univ-perp.fr

Application deadline: 05/06/2023

Starting date of the thesis: 01/10/2023

Keywords: Concentrated solar power plants, industrial heat production, Prognostics and Health Management, remaining useful life, predictive maintenance, artificial intelligence.

Applicant profile:

- Education: Master 2 or Engineering degree with research experience.
- Discipline: Engineering sciences.
- Knowledge and skills: machine learning and/or Prognostics and Health Management.
- Programming: Python or other equivalent programming languages.
- Other: ability to synthesize, good writing skills, good level in English.

Thesis overview

The objective of this thesis is the implementation of the Prognostics and Health Management (PHM) approach for heat exchanger tubes of concentrated solar power (CSP) plants equipped with parabolic trough collectors. The expected results are the development, the analysis and the validation of machine learning based algorithms able to detect the occurrence, to diagnose the nature and to predict the evolution of structure defects. These algorithms should lower the maintenance costs and therefore improve the economic competitiveness of the CSP plants. Moreover, the results can also be used to maximize the plant energy production in relation with the work currently being carried out at PROMES on the advanced control of solar plants equipped with parabolic trough collectors [6].

Bibliographie

- [1] Le service des données et études statistiques (2021). Réseaux de chaleur. Chiffres clés de l'énergie, édition 2021.
- [2] Heller, P. (Ed.). (2017). The performance of concentrated solar power (CSP) systems: analysis, measurement and assessment. Woodhead Publishing.
- [3] Tamssaouet, F., Nguyen, K. T., Medjaher, K., & Orchard, M. E. (2022). System-level failure prognostics: Literature review and main challenges. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 237(3), 524-545.
- [4] Avapak, S. (2016). Failure mode analysis on concentrated solar power (CSP) plants: a case study on solar tower power plant (Doctoral dissertation, Queensland University of Technology).
- [5] Elliott Girard, Stéphane Thil, Stéphane Grieu. Développement et validation expérimentale d'algorithmes pour le contrôle-commande avancé des centrales solaires à collecteurs cylindro-paraboliques équipées de systèmes de stockage. Thèse en cours.
- [6] García Márquez, F. P. (2022). Maintenance Management in Solar Energy Systems. Energies, 15(10), 3727.
- [7] Jiménez, A. A., Muñoz, C. Q. G., Marquez, F. P. G., & Zhang, L. (2017). Artificial intelligence for concentrated solar plant maintenance management. In Proceedings of the tenth international conference on management science and engineering management (pp. 125-134).
- [8] Gómez Muñoz, C. Q., Arcos Jimenez, A., García Marquez, F. P., Kogia, M., Cheng, L., Mohimi, A., & Papaelias, M. (2018). Cracks and welds detection approach in solar receiver tubes employing electromagnetic acoustic transducers. Structural Health Monitoring, 17(5), 1046-1055.
- [9] <http://openguidedwaves.de/>
- [10] Tamssaouet, F., Nguyen, K. T., Medjaher, K., & Orchard, M. (2021). Combination of Long Short-Term Memory and Particle Filtering for Future Uncertainty Characterization in Failure Prognostic. Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference, Angers, France.