

Caractérisation thermophysique de matériaux par méthode photothermique et apprentissage automatique – Evaluation in situ du vieillissement des récepteurs solaires

1 – Contexte

Afin d'optimiser le fonctionnement des centrales solaires à concentration, le laboratoire PROMES-CNRS (UPR 8521) s'intéresse depuis de nombreuses années à la compréhension du vieillissement des matériaux dont sont constitués les récepteurs solaires. En effet, il est nécessaire de comprendre comment ces matériaux se comportent dès lors qu'ils sont soumis à des hauts flux et comment, au cours de leur durée d'utilisation, leurs propriétés peuvent influencer l'efficacité des centrales.

Dans le cadre de plusieurs projets européens successifs (SFERA, SFERA II, RAISELIFE et SFERA III ; ce dernier est en cours), des montages expérimentaux innovants ainsi que des méthodes de conception optimale d'expérience ont été développés et mis au point. Les thèses financées par ces projets, parmi lesquelles la thèse de Reine Reoyo-Prats [1], traitent de l'étude des mécanismes de vieillissement des matériaux par le suivi de leurs propriétés thermophysiques au cours du temps. Aussi, il est nécessaire de disposer de méthodes d'estimation de ces propriétés qui soient performantes et les plus universelles possible. En effet, les matériaux à étudier sont nombreux : des matériaux massifs, bicouches ou plus, homogènes ou hétérogènes, etc. Notre préoccupation, à l'origine du sujet de thèse proposé, est unique : comment se comportent ces matériaux au cours du temps ? Comment évoluent leurs propriétés lorsque ces matériaux subissent de fortes contraintes thermiques et mécaniques ?

Dans le cadre de la maintenance en temps réel des centrales solaires à concentration, un dispositif de diagnostic in situ et non destructif du récepteur solaire serait un outil à haute valeur ajoutée. La mise au point d'un tel dispositif nécessite le développement d'algorithmes à coût calculatoire maîtrisé pour la caractérisation thermophysique des matériaux dont sont constitués les récepteurs solaires. Le sujet de thèse proposé (axe thématique CSPG, pour « Centrales Solaires de Prochaines Générations », activité « Intelligence artificielle pour le solaire ») cible le développement de ces algorithmes. Les travaux seront financés en cas de succès au concours de l'ED 305 « Energie et environnement » (juin 2022).

2 – Objectifs

Les travaux proposés mettront à profit, d'une part, les données expérimentales collectées par Reine Reoyo-Prats (ces données sont peu nombreuses) et, d'autre part, les algorithmes d'estimation développés par cette dernière pendant sa thèse de doctorat [2]. Reine Reoyo-Prats a démontré que les réseaux de neurones artificiels à propagation avant pouvaient être utilisés comme outils d'estimation de propriétés thermophysiques et qu'ils permettaient, dans certains cas, de palier les limitations des méthodes inverses. L'estimation simultanée de la diffusivité thermique et de la conductivité thermique de matériaux massifs, à partir de leurs réponses photothermiques, s'est avérée possible grâce à ces outils. Il est toutefois nécessaire d'améliorer les algorithmes développés et d'en étendre, autant que possible, le domaine de validité. Ainsi, le travail proposé dans le cadre de cette thèse s'articule en trois grandes parties.

1. La première partie des travaux sera consacrée à la consolidation de la base de données disponible au laboratoire PROMES-CNRS. A cet effet, deux voies seront explorées : (1) la modélisation des réponses photothermiques des matériaux à caractériser, que l'on soumettra à différents types d'excitation, pour la génération de données simulées et (2) l'augmentation de données par auto-encodeur variationnel (un réseau de neurones artificiels pour l'apprentissage non supervisé de caractéristiques discriminantes). Les modèles développés permettront, par ailleurs, d'optimiser les paramètres des dispositifs expérimentaux en menant des études de sensibilité. Cette étape de consolidation de la base de données est rendue nécessaire par le manque de données expérimentales.
2. La deuxième partie des travaux ambitionne le développement, en un langage de programmation adapté aux contraintes de l'embarqué (Python), à partir de la base de données consolidée, d'algorithmes fondés sur l'apprentissage automatique/profond pour la caractérisation thermophysique des matériaux

massifs dont sont constitués les récepteurs solaires. Seront associés des réseaux de neurones à convolution (ou CNN, pour Convolutional Neural Networks), pour le traitement des réponses photothermiques et l'extraction de caractéristiques de haut niveau, et réseaux de neurones à propagation avant ou réseaux de neurones récurrents (des réseaux LSTM, pour Long Short Term Memory) pour l'estimation simultanée de la diffusivité thermique et de la conductivité thermique des matériaux massifs à caractériser. Il sera impératif de maîtriser le coût calculatoire de ces algorithmes, pour un fonctionnement en temps réel, dans l'optique du développement d'un dispositif de caractérisation in situ des récepteurs solaires et de l'évaluation de leur vieillissement. Les algorithmes développés par Reine Reoyo-Prats au cours de ses travaux de thèse [1, 2] fourniront des performances de référence. Il sera indispensable, au cours de ce travail, de garder à l'esprit que les méthodes utilisées doivent être implémentables dans un dispositif compact, transportable et facilement utilisable par un agent chargé du contrôle et de la maintenance d'une centrale solaire à concentration. Des solutions techniques pourraient alors être proposées.

3. Au cours du projet RAISELIFE, nous avons testé des matériaux multicouches pour la fabrication des récepteurs solaires de prochaine génération. Certains de ces matériaux se sont avérés très prometteurs, tant par leurs qualités thermiques que mécaniques. De ce fait, la troisième partie des travaux aura pour finalité d'évaluer la validité, avec les matériaux multicouches testés, des algorithmes développés pour l'estimation de propriétés thermophysiques (diffusivité thermique et conductivité thermique) de matériaux massifs. Le cas échéant, ces algorithmes seront adaptés aux matériaux multicouches.

3 – Compétences recherchées

Le sujet de thèse proposé par PROMES-CNRS est pluridisciplinaire. Le candidat/la candidate devra se montrer à l'aise avec les outils de simulation et de programmation scientifique/embarquée (Python) pour le développement d'algorithmes d'estimation de propriétés thermophysiques à l'aide des outils de l'apprentissage automatique/profond. En outre, il lui sera demandé(e) de contribuer à l'amélioration d'un banc de photothermie. Il/elle devra donc faire preuve d'un goût particulier pour l'aspect expérimental. Ainsi, une formation initiale généraliste couplée à une formation de deuxième cycle dans le domaine de la modélisation et de l'intelligence artificielle serait le cursus idéal. Des compétences en science de la donnée, tout comme une connaissance des transferts thermiques, seraient particulièrement appréciées.

4 – Laboratoire d'accueil (www.promes.cnrs.fr)

PROMES (« Procédés, Matériaux et Énergie Solaire »), une unité propre de recherche du CNRS (UPR 8521) conventionnée avec l'Université de Perpignan Via Domitia (UPVD), aborde l'énergie solaire et sa valorisation. Ses activités de recherche sont structurées selon trois axes thématiques : Matériaux pour l'Énergie et l'Espace (MEE), Centrales Solaires de Prochaines Générations (CSPG) et Stockage et Chimie Solaire (SCS).

5 – Contacts

Olivier Faugeroux, MCF HDR, 62^e section du CNU, faugeroux@univ-perp.fr

Bernard Claudet, PR, 62^e section du CNU, claudet@univ-perp.fr

Ferhat Tamssaouet, MCF, 61^e section du CNU, ferhat.tamssaouet@univ-perp.fr

Stéphane Grieu, PR, 61^e section du CNU, grieu@univ-perp.fr

6 – Bibliographie

[1] Reine Reoyo-Prats, Etude du vieillissement de récepteurs solaires - Estimation de propriétés thermophysiques par méthode photothermique associée aux outils issus de l'intelligence artificielle, thèse de doctorat, laboratoire PROMES-CNRS, 2020.

[2] Reine Reoyo-Prats, Stéphane Grieu, Olivier Faugeroux and Bernard Claudet, Novel artificial neural network-based method for the simultaneous estimation of thermophysical properties using experimental photothermal data, *European Physical Journal Applied Physics* 93 (1) (2021) 10901.

Thermophysical characterization of materials by photothermal method and machine learning – In situ assessment of the aging of solar receivers

1 – Context

In order to optimize the operation of concentrated solar power plants, PROMES-CNRS (UPR 8521) has been interested for many years in understanding the aging of the materials of which solar receivers are made. Indeed, it is necessary to understand how these materials behave when they are subjected to high fluxes and how, during their service life, their properties can influence power plant efficiency.

Within the framework of successive European projects (SFERA, SFERA II, RAISELIFE and SFERA III; the latter project is still in progress), innovative experimental setups as well as methods for optimal design of experiments have been developed and perfected. The PhD theses funded via these research projects, including Reine Reoyo-Prats's PhD thesis [1], deal with studying the aging mechanisms of materials by monitoring their thermophysical properties over time. So, efficient and as universal as possible methods for estimating these properties are needed. Indeed, the materials to be studied are numerous: bulk materials, two-layer (or more) materials, homogeneous or heterogeneous materials, etc. Our concern, at the origin of the proposed PhD thesis subject, is unique: how do these materials behave over time? How do their properties change in case these materials are subjected to high thermal and mechanical stresses?

In the context of real-time maintenance of concentrated solar power plants, an in-situ and non-destructive diagnostic device dedicated to solar receivers would be a high added-value tool. The development of such a device requires computationally-tractable algorithms for thermophysical characterization of the materials of which the solar receivers are made. The proposed PhD thesis topic (PROMES-CNRS's thematic axis "Next generation solar power plants", research activity "Artificial intelligence for solar energy") targets the development of these algorithms. The PhD thesis will be funded in case of a successful ED 305 ("Energy and environment") competition (June 2022).

2 – Goals

The proposed work will take advantage, on the one hand, of the experimental data collected by Reine Reoyo-Prats (these data are few in number) and, on the other hand, of the algorithms she has developed for thermophysical properties estimation during her PhD thesis [2]. Reine Reoyo-Prats demonstrated that feedforward artificial neural networks can be used as tools for estimating thermophysical properties and that they allow, in some cases, to overcome the limitations of inverse methods. Simultaneous estimation of thermal diffusivity and thermal conductivity of bulk materials, from their photothermal responses, has proven to be possible thanks to such tools. However, it is necessary to improve the developed algorithms and to extend as much as possible their validity domain. Thus, the work proposed in this PhD thesis is divided into three parts.

1. The first part of the work will be devoted to consolidating the database available at PROMES-CNRS. To this end, two different ways will be explored: (1) the modelling of the photothermal responses of the materials to be characterized, which will be subjected to different excitations, for the generation of simulated data and (2) data augmentation by using a variational autoencoder (i.e., an artificial neural network allowing unsupervised learning of discriminative features). The developed models will also be used to optimize experimental parameters by carrying out sensitivity studies. This database consolidation step is necessary due to the lack of experimental data.
2. The second part of the work aims to develop, in an embedded programming language (Python), taking advantage of the consolidated database, machine/deep learning-based algorithms for the thermophysical characterization of the bulk materials of which the solar receivers are made. Convolutional neural networks, for the processing of photothermal responses and the extraction of high-level features, will be associated with feedforward neural networks or recurrent neural networks (long short term memory neural networks) for the simultaneous estimation of thermal diffusivity and thermal conductivity of the

bulk materials to be characterized. It will be mandatory to control the algorithms' computational cost, for real-time operation, with a view to developing an in-situ characterization device for solar receivers and aging assessment. The algorithms developed by Reine Reoyo-Prats during her PhD thesis [1, 2] will provide benchmark performance. It will be essential, during this work, to keep in mind that the developed algorithms must be implementable in a compact device, transportable and easily usable by an agent in charge of the management and maintenance of a concentrated solar power plant. Technical solutions could then be proposed.

3. During the RAISELIFE project, we tested multilayer materials for the fabrication of next generation solar receivers. Some of these materials have proven to be very promising, both in terms of thermal and mechanical characteristics. Therefore, the third part of the work will aim to assess the validity of the algorithms developed for estimating the thermophysical properties (thermal diffusivity and thermal conductivity) of bulk materials with multilayer materials. If necessary, these algorithms will be adapted to multilayer materials.

3 – Targeted skills

The PhD thesis proposed by PROMES-CNRS is multidisciplinary. The candidate must be comfortable with simulation and scientific/embedded programming (Python) for the development of machine/deep-learning-based algorithms dedicated to the estimation of thermophysical properties. In addition, he/she will be asked to contribute to the improvement of a photothermal test bench. He/she will therefore have to demonstrate a particular taste for experimental aspects. Thus, a generalist initial training coupled with an advanced training in the field of modeling and artificial intelligence would be the ideal course. Skills in data science, as well as knowledge of heat transfer, would be particularly appreciated.

4 – Host laboratory (www.promes.cnrs.fr)

PROMES (“Processes, Materials and Solar Energy”) is a CNRS own research unit (UPR 8521) which is under agreement with the University of Perpignan Via Domitia (UPVD). PROMES's research activities focus on solar energy and its valuation. Those activities are structured around three thematic axes: Materials for Energy and Space (MEE), Next Generation Solar Power Plants (CSPG) and Storage and Solar Chemistry (SCS).

5 – Contacts

Olivier Faugeroux, Associate Professor (HDR), 62^e section of the French CNU, faugeroux@univ-perp.fr

Bernard Claudet, Full Professor, 62^e section of the French CNU, claudet@univ-perp.fr

Ferhat Tamssaouet, Associate Professor, 61^e section of the French CNU, ferhat.tamssaouet@univ-perp.fr

Stéphane Grieu, Full Professor, 61^e section of the French CNU, grieu@univ-perp.fr

6 – Bibliography

[1] Reine Reoyo-Prats, Etude du vieillissement de récepteurs solaires - Estimation de propriétés thermophysiques par méthode photothermique associée aux outils issus de l'intelligence artificielle, thèse de doctorat, laboratoire PROMES-CNRS, 2020.

[2] Reine Reoyo-Prats, Stéphane Grieu, Olivier Faugeroux and Bernard Claudet, Novel artificial neural network-based method for the simultaneous estimation of thermophysical properties using experimental photothermal data, European Physical Journal Applied Physics 93 (1) (2021) 10901.