

École Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes
Centre d'Études Doctorales en Sciences des Technologies de l'Information et de l'Ingénieur

AVIS DE SOUTENANCE DE THÈSE DE DOCTORAT

Madame Khadija El ALAMI

Soutiendra publiquement sa thèse de Doctorat en Sciences de l'ingénieur

Le Jeudi 28 Juillet 2022 à 10H au Grand amphi à l'ENSAM de Rabat

Intitulé de la thèse

**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATIONS OF A PACKED-BED
THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEM USING MOROCCAN ROCKS AS
STORAGE MATERIALS: TOWARDS AN EFFECTIVE DISPATCHING OF
CONCENTRATED SOLAR POWER PLANTS**

Devant le Jury composé de :

Président :

Pr. Abdellah BAH, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Directeur de thèse :

Pr. Mohamed ASBIK, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Rapporteurs :

Pr. Hamid EL QARNIA, PES, Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayad, Marrakech

Pr. Abdesselam BELAARAJ, PES, Faculté des Sciences, Université Moulay Ismaïl, Meknès

Pr. Mohamed ROUGUI, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Examineurs :

Pr. Abdessamad FAIK, PES, Université Mohammed IV Polytechnique, Benguerir

Pr. Omar ANSARI, PH, ENSAM, Université Mohammed V, Rabat

Pr. Mustapha MALHA, PH, ENSAM, Université Mohammed V, Rabat

Invité :

Dr. El Ghali BENNOUNA, IRESEN, Green Energy Park, Benguerir



Résumé : Les systèmes de stockage d'énergie thermique (TES) à lit de roches représentent une solution prometteuse pour garantir la flexibilité et l'amélioration de la rentabilité des centrales solaires à concentration (CSP). Cependant, l'identification des roches appropriées au stockage thermique reste un défi. Dans ce contexte, l'objectif principal de cette thèse est de trouver une adéquation entre les roches naturelles marocaines et les gammes de température de fonctionnement des différents types des centrales CSP. Ceci permettrait d'intégrer ces matériaux dans le bloc de stockage thermique de ces centrales. D'autre part, l'évaluation de leurs comportements thermiques ainsi que leurs indicateurs de performance, faciliterait la sélection de roches convenables pour remplir le réservoir de stockage à construire à la plateforme du Green Energy Park dans le cadre du projet TES-Prototypes.

Dans un premier temps, une méthodologie de sélection des roches a été développée, fournissant des étapes directrices pour faciliter le processus de sélection des roches. De plus, elle permet de spécifier les caractéristiques et les propriétés des roches requises pour les utiliser en tant que milieu de stockage d'énergie thermique à haute température. Ensuite, une étude comparative détaillée portant sur les roches marocaines (magmatiques, métamorphiques et sédimentaires) a été réalisée en vue d'identifier six variétés de roches comme matériaux potentiels candidats au stockage, à savoir : gabbro, microgranite, granodiorite, péridotite, serpentinite et goethite. Ces roches ont été collectées dans différentes régions du Maroc, et caractérisées expérimentalement en termes d'analyses pétrographiques, géochimiques et structurales, ainsi que de propriétés physico-mécaniques, thermiques et de stabilité. Les résultats obtenus montrent que le gabbro, la péridotite (PX) et la goethite semblent être les roches les plus recevables, parmi celles étudiées, puisqu'elles ont la capacité thermique volumique la plus élevée (environ 3,9 MJ/m³K à 500°C). L'évaluation de la durabilité a été également réalisée pour examiner l'effet du processus de cyclage thermique sur les stabilités thermique et chimique des roches. Les principaux résultats indiquent que toutes les roches étudiées conviennent à une application de stockage à température moyenne jusqu'à 400°C. En effet, elles résistent à plus de 400 cycles sans aucune modification structurale. En revanche, gabbro, microgranite, granodiorite, péridotite et goethite sont des matériaux rocheux adaptés aux applications de stockage à haute températures (environ 550°C).

Afin de prédire le comportement thermique et d'évaluer les indicateurs de performance d'un système TES thermocline à lit de roche, un modèle thermique unidimensionnel à deux phases (solide et fluide) a été développé, résolu numériquement et validé expérimentalement. L'écart entre les résultats numériques et expérimentaux (issus de la littérature) ne dépasse pas 4%. Ainsi, le modèle proposé peut prédire et simuler le comportement en temps réel du système de stockage pour différentes conditions de fonctionnement, notamment celles liées aux matériaux de stockage, aux fluides caloporteurs (HTF) et aux dimensions de réservoir de stockage. En outre, une analyse comparative des performances des roches étudiées a été effectuée pour cinq cycles thermiques consécutifs. Les principaux résultats démontrent que le gabbro, la péridotite (PX) et la goethite présentent les meilleurs indicateurs de performance. Ils ont une énergie stockée d'environ 8,3 GJ et une efficacité globale de 94 %. Ces résultats s'expliquent par le fait que leurs capacités thermiques volumiques sont élevées, ce qui pourrait aussi contribuer à la réduction de la taille et du coût du réservoir.

Mots-clés : Centrales solaires à concentration, fluide caloporteur, lit de roches, matériaux de stockage, roches naturelles marocaines, stockage de l'énergie thermique, thermocline.

Abstract: Packed-bed thermal energy storage (TES) systems are a viable alternative for increasing the dispatchability and cost-effectiveness of concentrated solar power (CSP) facilities. Identifying appropriate rocks for thermal storage, on the other hand, remains a challenge. In this context, the main objective of this thesis is to determine the compatibility of native Moroccan rocks with the operational temperature ranges of various types of CSP plants. This would allow these materials to be included into the thermal storage block of these reactors. Furthermore, assessing their thermal behaviors and performance indicators would aid in the selection of suitable rocks to fill the storage tank that will be created at the Green Energy Park platform as part of the "TES-Prototypes" project.

Initially, a rock selection technique was established, which gave leading steps to help with the rock selection process. Similarly, to establish the requisite qualities and attributes of rocks for their usage as high-temperature TES medium. Second, a comprehensive comparative analysis of Moroccan rocks (igneous, metamorphic, and sedimentary) was conducted to identify six types of rocks as viable candidate storage



materials, namely gabbro, microgranite, granodiorite, peridotite, serpentinite, and goethite. These rocks were collected from various parts of Morocco and experimentally assessed in terms of petrographic, geochemical, and structural investigations, as well as physico-mechanical, thermal, and stability aspects. According to the data, gabbro, peridotite (PX), and goethite appear to have the most potential of all the rocks studied, since they have the maximum volumetric heat capacity (about 3.9 MJ/m³K at 500°C). The durability assessment was also conducted to investigate the effect of the thermal cycling process on the thermal and chemical stabilities of rocks. The major findings indicate that all of the tested rocks are appropriate for medium temperature storage applications up to 400°C, since they can withstand over 400 cycles without structural alteration. Gabbro, microgranite, granodiorite, peridotite, and goethite, on the other hand, are excellent rock materials for high-temperature storage (about 550°C).

In order to predict the thermal behavior and evaluate the performance indicators of a thermocline packed-bed TES system, a 1-D dual-media (solid and fluid) heat transfer model was formulated, solved numerically, and validated experimentally. The deviation between numerical and experimental results (from the literature) does not exceed 4%. Thus, the proposed model can predict and simulate the real-time behavior of the storage system for different operating conditions, including those associated with storage materials, heat transfer fluids (HTFs), and storage tank dimensions. Further, a performance comparative analysis of the investigated rocks was carried out for five consecutive thermal cycles. The main outcomes showed that gabbro, PX, and goethite have the greatest performance indicators, as they have a stored energy of about 8.3GJ and overall efficiency of 94%. These findings can be explained by the fact that their volumetric heat capacities are high, which may also contribute to the reduction of the tank size and cost.

Keywords: Concentrated Solar Power, heat transfer fluid, Moroccan natural rocks, packed-bed, Storage materials, thermal energy storage, thermocline.

