



جامعة محمد الخامس بالرباط
Université Mohammed V de Rabat

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

Monsieur Hamza CHATER

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

Spécialité : Génie Énergétique

Le 21 Octobre 2023 à 10h00 à l'Amphi 4 à l'ENSAM de Rabat

Intitulé de la thèse

**PRODUCTION D'UN BIO-COMBUSTIBLE SOLIDE (HYDROCHAR) A PARTIR D'UN
RESIDUE AGRICOLE PAR LE PROCÉDE DE CARBONISATION HYDROTHERMALE
SOLAIRE (CSP/PV)**

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. Abel ROUBOA, Professor, Faculty of Engineering, University of Porto, Portugal

Pr. Hassan EL BARI, PES, Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail, Kénitra

Pr. Driss ZEJLI, PES, ENSA, Université Ibn Tofail, Kénitra

Examineur :

Pr. Ali IDLIMAM, PES, ENS, Université Cadi Ayyad, Marrakech

Invités :

Pr. Veronica BELANDRIA, Maître de Conférences, ICARE-CNRS, Université d'Orléans, France

Dr. Samir RACHIDI, IRESEN, Rabat





Résumé: La conciliation entre le besoin d'énergie indispensable au développement des pays et des civilisations, et l'impératif de préservation de l'environnement nécessite l'exploration de sources d'énergie renouvelables et durables. La valorisation de la biomasse, par des procédés tels que la carbonisation hydrothermale, permet de produire un hydrochar riche en carbone pouvant être utilisé comme source d'énergie. Cependant, un inconvénient majeur de ce procédé est la quantité d'énergie nécessaire pour atteindre les conditions sous-critiques requises. Cette énergie provient principalement de sources électriques, ce qui limite l'intérêt environnemental global du procédé. Pour pallier ce problème, deux approches novatrices sont présentées : l'une utilisant un capteur cylindro-parabolique comme source d'énergie, l'autre exploitant des panneaux photovoltaïques. Avant de discuter ces deux nouvelles conceptions, une lacune de la littérature est comblée en développant une nouvelle approche numérique pour simuler le procédé CHT, en particulier pour des ratios biomasse/eau élevés. Ce nouveau modèle est développé en appliquant une méthode inverse pour étudier la rhéologie du mélange lors du CHT. Les résultats montrent que le comportement du mélange varie selon le ratio, passant d'un comportement newtonien vers un comportement non-newtonien pour les ratios élevés. Le modèle non-newtonien développé prédit avec précision les profils de température expérimentaux, avec un écart relatif inférieur à 4% quelle que soit la configuration expérimentale.

Concernant le premier système novateur, il consiste en un capteur solaire parabolique relié à un échangeur de chaleur dans lequel circule un fluide caloporteur. Le capteur solaire capte les rayonnements solaires et les concentre sur un tube où circule le fluide caloporteur ; ce dernier transmet alors la chaleur au réacteur CHT à travers l'échangeur hélicoïdal. Cette conception a été évaluée expérimentalement. Cependant, les performances thermiques de ce système ne sont pas satisfaisantes, ce qui impose la réalisation à une analyse exergétique. Cette analyse révèle d'importantes pertes thermiques causées par les écarts de température entre le système et son environnement, la faible surface de contact et la force centrifuge favorisant les échanges vers l'extérieur. Sur la base de cette analyse exergétique, trois nouvelles conceptions sont proposées



afin d'améliorer l'efficacité énergétique globale. Ces trois conceptions sont étudiées par simulations numériques. Les résultats montrent que l'utilisation d'un système de jacket ou d'un échangeur immergé dans le réacteur permet d'atteindre les conditions souhaitées pour le processus CHT.

Le deuxième système novateur consiste en l'utilisation de panneaux solaires photovoltaïques pour fournir l'énergie nécessaire au processus de carbonisation hydrothermale. Le système couple les panneaux photovoltaïques à un collier chauffant qui assure le chauffage du réacteur. Une analyse thermodynamique complète a été réalisée pour évaluer l'efficacité énergétique et exergetique de ce système. Les résultats montrent que le système atteint les conditions requises pour la carbonisation hydrothermale, même dans de mauvaises conditions météorologiques le jour des tests expérimentaux. Les pertes d'exergie et d'énergie des panneaux solaires ont été quantifiées et l'analyse exergetique révèle une amélioration significative des propriétés de l'hydrochar par rapport à la biomasse d'origine. Une évolution de la zone caractéristique de la biomasse vers la zone lignite a été observée. Ceci permet d'obtenir un produit ayant une densité énergétique supérieure à celle de la biomasse initiale et un hydrochar similaire aux combustibles fossiles en termes de composition chimique. L'hydrochar a présenté une exergie chimique plus élevée, atteignant 29,2 MJ/kg, par rapport aux grignons d'olive.

Mots-clés: Analyse CFD, analyse exergetique, carbonisation hydrothermale, collecteur solaire cylindro-parabolique, cellules photovoltaïques, rhéologie des fluides, théorie des problèmes inverses, traitement hydrothermal solaire.

Abstract: Reconciling the energy needs of developing countries and civilizations, with the imperative of preserving the environment, calls for exploring renewable and sustainable energy sources. Biomass upgrading through processes such as hydrothermal carbonization produces carbon-rich hydrochar that can be used as an energy source. However, a primary drawback of this process is the significant amount of energy required to achieve the necessary subcritical conditions. This energy mainly comes from electrical sources, limiting the overall environmental



benefit of the process. To overcome this problem, two innovative approaches are presented: one uses a parabolic trough as an energy source and the other exploits photovoltaic panels.

Before discussing these two new designs, a gap in the literature is addressed by developing a new numerical approach to simulating the hydrothermal carbonization (HTC) process, particularly for high biomass-to-water ratios. This new model applies an inverse method to study the rheology of the mixture during HTC. The results show that the behavior of the mixture varies with the ratio, from Newtonian to non-Newtonian, for high ratios. The non-Newtonian model developed accurately predicts the experimental temperature profiles, with a relative deviation of less than 4% for any experimental configuration.

The first innovative system comprises a parabolic solar collector connected to a heat exchanger where a heat transfer fluid (HTF) circulates. The solar collector collects solar radiation and concentrates it on a tube through which the HTF circulates. The HTF transfers the energy to the batch reactor via the helical heat exchanger. This design has been evaluated experimentally. However, the thermal performance of this system is unsatisfactory, leading to an exergy analysis. This analysis revealed significant heat losses caused by temperature differences between the system and its environment, the small contact surface, and centrifugal forces favoring outward heat exchange. Based on this exergy analysis, three new designs are proposed to improve overall energy efficiency. Numerical simulations studied these three designs. The results show that using a jacketed system or an exchanger immersed in the reactor achieves the desired conditions for the HTC process.

The second innovative system uses photovoltaic solar panels to supply the energy required for hydrothermal carbonization. The conception couples the photovoltaic panels to a heating collar that heats the reactor. A complete thermodynamic analysis assessed the energy and exergy efficiency of the system. The results show that the system achieves the conditions required for hydrothermal carbonization, even under unfavorable weather conditions. Exergy and energy losses from the solar panels have been quantified, and the exergy analysis reveals a significant



improvement in hydrochar properties compared with the original biomass. An evolution of the biomass characteristic zone towards the lignite zone was observed. This results in a product with a higher energy density than the original biomass and a hydrochar similar to fossil fuels in terms of chemical composition. The hydrochar showed a higher chemical exergy, reaching 29.2 MJ/kg, compared with olive pomace.

Keywords: CFD analysis, Exergy Analysis, Fluid rheology, Hydrothermal Carbonization, Inverse problem theory, Parabolic trough solar collector, Photovoltaic Cells, Solar Hydrothermal Processing.