



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 Ilias BAKHATTAR

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

Le Mardi 18 Juillet 2023 à 10H00 au Grand Amphi à l'ENSAM de Rabat

Intitulé de la thèse

**ÉTUDE COMPARATIVE DE LA COMBUSTION EN LIT FIXE DE QUATRE BIOMASSES
LIGNOCELLULOSIQUES: APPROCHE EXPÉRIMENTALE ET SIMULATION NUMÉRIQUE**

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. Mhamed MOUQALLID, PES, ENSAM, Université Moulay Ismail, Meknès

Pr. Mohamed BOUHRIA, PES, FST-Mohammedia, Université Hassan II, Casablanca

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

Examineur :

Pr. Omar ZEGAOUI, PES, Faculté des sciences, Université Moulay Ismail, Meknès

Invités :

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

Dr. Abdelghani KOUKOUCH, Green Energy Park, UM6P, Benguerir



Résumé: D'après plusieurs études menées par des organismes internationaux à vocation énergétique, les combustibles fossiles sont voués à la disparition d'autant plus qu'ils ont un impact négatif sur l'environnement. L'adoption des énergies renouvelables s'avère une alternative très prometteuse pour remplacer ces combustibles.

Dans cette optique, ce travail contribue à la valorisation énergétique de la biomasse en menant une étude comparative sur quatre biomasses lignocellulosiques, à savoir : les grignons d'olive (GO), les coques d'argan (CA), les noyaux des dattes (ND) ainsi que les pellets de bois (PB). Les trois premiers types de biomasses représentent des résidus agricoles marocains alors que les pellets de bois ont été pris comme la biomasse de référence. Après avoir présenté l'état de l'art, une étude comparative des propriétés physicochimiques et thermiques de ces biomasses a été menée. Plusieurs techniques d'analyses physicochimique ont été utilisées pour caractériser les biomasses considérées, et plus particulièrement la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF), la diffraction des rayons X (DRX) ainsi que les analyses élémentaires et immédiates. Ces dernières ont permis de calculer le pouvoir calorifique supérieur (PCS) associé à chaque échantillon. Les valeurs obtenues sont comprises entre 17 et 22 MJ/kg (21.88 MJ/kg pour les GO), ce qui montre que les matériaux traités peuvent être qualifiés de combustibles. Quant aux analyses thermiques, l'analyse calorimétrique différentielle (DSC) et les analyses thermogravimétriques (ATG) ont été effectuées dans deux atmosphères différentes (inerte et oxydante). Trois séries d'analyses, correspondant au taux de chauffage de 5.0, 10.0 et 20.0 °C/min, ont été accomplies, pour chaque biomasse. Ensuite, nous avons été servis de données issues des analyses ATG/DTG pour l'étude cinétique de la pyrolyse et de la combustion de ces matériaux, en se basant sur les deux méthodes isoconversionnelles (FWO et KAS) les plus utilisées dans la littérature. Il en résulte que les deux méthodes de conversion thermochimiques (pyrolyse et combustion) présentent certains défis et difficultés par rapport à la combustion des combustibles fossiles traditionnels. En effet, des tests expérimentaux de combustion en lit fixe ont été réalisés en configuration à contre-courant, pour trois débits d'air différents (1.5, 3.0 et 5.0 Nm³/s). Des thermocouples sont placés sur quatre positions horizontales différentes afin de suivre la propagation du front de flamme tout au long du lit. Les résultats obtenus, lors des essais, ont montré que les biomasses brûlées possèdent des performances énergétiques attrayantes puisqu'elles génèrent des quantités de chaleur conséquentes avec des températures qui atteignent jusqu'à 1200 °C environ. La combustion des grignons d'olive (GO) est caractérisée par une vitesse du front de flamme plus importante par comparaison avec les autres biomasses.

Ce travail a été complété par la présentation d'un modèle mathématique simplifié permettant de décrire les phénomènes de transfert de chaleur et de masse, en régime transitoire, survenant lors de la combustion de la

biomasse des grignons d'olive (GO). Les équations de conservation ont été traitées numériquement au moyen de la méthode des volumes finis. Les résultats numériques obtenus sont en bon accord avec les résultats expérimentaux.

Mots-clés: Analyse thermique, biomasse lignocellulosique, caractérisation physicochimique, combustion, étude cinétique, lit fixe, Pyrolyse, simulation numérique.

Abstract: According to several studies published by international energy agencies, fossil fuels are doomed to disappear all the more as they have a negative impact on the environment. Renewable energies seem to be a very promising alternative to replace these conventional fuels.

In this context, this work contributes to the energetic valorization of biomass by carrying out a comparative study on four lignocellulosic biomasses: olive pomace (GO), argan shell (CA), date stones (ND), and wood pellets (PB). The first three types of biomass represent Moroccan agricultural residues, while wood pellets have been taken as reference biomass. After presenting the state-of-the-art, a comparative study of the physicochemical and thermal properties of these biomasses was conducted. Several physicochemical analysis techniques were used to characterize the considered biomasses, particularly Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), X-ray diffraction (XRD) as well as the ultimate and proximate analyses. The latter has been used to calculate the higher heating value (HHV) for each sample. The findings range from 17 to 22 MJ/kg (21.88 MJ/kg for GO), showing that the analyzed materials could be qualified as combustible. As for thermal analyses, differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetric analyses (TGA) were performed in two different atmospheres (inert and oxidizing). Three series of analyses, corresponding to heating rates of 5.0, 10.0, and 20.0 °C/min, were accomplished for each biomass. Then, data from ATG/DTG analyses have enabled us to study the kinetics of pyrolysis and combustion of these materials, based on the two famous iso-conversional methods (FWO and KAS). As a result, both thermochemical conversion methods (pyrolysis and combustion) present some challenges and difficulties compared with the combustion of conventional fossil fuels. In fact, experimental fixed-bed combustion tests were carried out in counter-current configuration, for three different air flows (1.5, 3.0, and 5.0 Nm³/s). Thermocouples are placed at four different horizontal positions to track the flame front propagation along the bed. The energy performance of these biomasses is promising, with maximum temperatures reaching approximately 1200°C during the tests. Furthermore, Olive pomace (GO) combustion is characterized by a higher flame front velocity compared with other biomasses.

This work concludes with the presentation of a simplified mathematical model describing transient heat and mass transfer phenomena occurring during GO combustion. The conservation equations were treated



numerically using the finite volume method. The numerical results obtained are in good agreement with the experimental results.

Keywords: Combustion, fixed bed, kinetics study, Lignocellulosic biomass, numerical simulation, Physicochemical characterization, Pyrolysis, thermal analysis.