

**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 Hanane MESSAOUDI**

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

**Spécialité : Génie Énergétique**

**Le 13 décembre 2025 à 10h00 au Grand Amphi à l'ENSAM de Rabat**

**Intitulé de la thèse**

**Physicochemical Characterization, Drying, and Energy recovery  
of residual sludge from different wastewater treatment plants**

**Président :**

Professeur Abdellah BAH, PES, ENSAM, Université Mohammed V, Rabat

**Directeur de thèse :**

Professeur Mohamed ASBIK, PES, ENSAM, Université Mohammed V, Rabat

**Co-Directeur de thèse :**

Professeur Toufik BOUSHAKI, Professeur des Universités, ICARE, CNRS, Orléans

**Rapporteurs :**

Professeur Omar ZEGAOU, PES, Faculté des Sciences, Université Moulay Ismail, Meknès

Professeur Moha CHERKAOU, PES, École Nationale Supérieure des Mines, Rabat

Professeur Mohammed GAROUM, PES, École Normale Supérieure, Rabat

**Examineur :**

Professeur Omar ANSARI, PES, ENSAM, Université Mohammed V, Rabat

## Résumé:

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la valorisation énergétique des boues d'épuration par des procédés thermochimiques, en réponse aux limites croissantes des méthodes conventionnelles de gestion, telles que la mise en décharge ou l'épandage agricole. Ces pratiques, souvent peu durables, justifient la recherche de solutions innovantes à fort potentiel environnemental et énergétique.

Le travail combine des études expérimentales et de modélisation pour évaluer le potentiel de conversion énergétique de ces déchets complexes. Une première phase a été consacrée au séchage, une étape clé visant à réduire la forte teneur en eau de cette biomasse avant toute conversion thermochimique. Trois études expérimentales complémentaires ont permis d'identifier l'influence de la température, de l'épaisseur des échantillons et des transformations physiques (retrait, fissuration) sur la cinétique de séchage. Il a été observé que l'augmentation de la température accélère le processus, tout comme la réduction de l'épaisseur des échantillons. En parallèle, l'apparition des fissures s'intensifie avec la température et devient plus profonde dans les échantillons les plus épais, alors que le retrait volumique diminue avec l'augmentation de l'épaisseur.

L'intégration de ces phénomènes physiques dans le modèle SWeibull a permis d'améliorer la prédiction du coefficient effectif de diffusion de l'humidité, réduisant l'écart de 33 % par rapport aux valeurs obtenues sans prise en compte de ces phénomènes. Il a également été démontré que la texture initiale des boues, influencée par des traitements préalables tels que la digestion anaérobie, joue un rôle déterminant dans leur comportement au séchage.

La deuxième phase du travail a concerné la caractérisation physico-chimique et thermique des boues issues de deux stations marocaines (Benguerir et Marrakech). Les analyses ont révélé une forte teneur en matière organique, un potentiel calorifique significatif (compris entre 14 and 15.5 MJ/kg), ainsi qu'une présence importante de cendres (entre 33 et 38%). L'analyse thermogravimétrique (ATG) couplée à la spectrométrie de masse a permis de caractériser les étapes de dégradation lors de la pyrolyse ainsi que les émissions des gaz libérées, tels que  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $C_3H_8$ ,  $CO$ ,  $NO$  et  $SO$ . Par ailleurs, l'étude cinétique, basée sur les méthodes isoconversionnelles (KAS, FWO, Starink), a mis en évidence des énergies d'activation élevées ( $\approx 416$  kJ/mol), témoignant de la complexité de cette biomasse.

Des essais de combustion ont ensuite été réalisés pour évaluer les performances énergétiques en fonction de différents paramètres : le débit d'air, la granulométrie et la co-combustion avec d'autres biomasses, notamment les pellets de bois. Ces essais ont montré que le débit d'air exerce une forte influence sur la qualité de la combustion des boues d'épuration, que la granulométrie affecte la stabilité de la flamme ainsi que l'homogénéité thermique, et que la co-combustion améliore la conversion thermique de ces déchets tout en réduisant partiellement les émissions de gaz polluants.

Enfin, la dernière phase a porté sur la gazéification, modélisée à l'aide du logiciel Aspen Plus, avec ou sans prétraitement par carbonisation hydrothermale (HTC). Les résultats ont montré que le HTC améliore nettement la qualité du gaz de synthèse (syngaz), en particulier par une augmentation de la conversion du carbone et des teneurs en  $H_2$  et  $CO$ , avec un rendement énergétique de conversion (CGE) pouvant atteindre 87 %.

L'ensemble de ces travaux confirme que les boues d'épuration peuvent constituer une ressource énergétique viable, à condition d'adapter les procédés de valorisation aux caractéristiques spécifiques de ce type de biomasse.

**Mots-clés:**

Boues d'épuration ; Séchage ; Caractérisation physico-chimique ; Caractérisation thermique ; Cinétique de pyrolyse ; Combustion ; Gazéification ; Carbonisation hydrothermale.

**Abstract:**

This thesis deals with the energy recovery of sewage sludge using thermochemical processes, in response to the growing limitations of conventional management methods such as landfilling or agricultural spreading. These often-unsustainable practices justify the search for innovative solutions with high environmental and energy potential.

The work combines experimental and modeling studies to assess the energy conversion potential of this complex waste. The first phase was devoted to drying, a key step aimed at reducing the high-water content of this biomass prior to thermochemical conversion. Three complementary experimental studies identified the influence of temperature, sample thickness, and physical transformations (shrinkage, cracking) on drying kinetics. It was found that increasing temperature accelerated the process, as did reducing sample thickness. At the same time, the appearance of cracks increases with temperature and becomes deeper in thicker samples, while volume shrinkage decreases with increasing thickness.

Incorporating these physical phenomena into the SWeibull model improved the prediction of the effective moisture diffusion coefficient, reducing the deviation by 33% compared with values obtained without taking these phenomena into account. It has also been shown that the initial texture of sludge, influenced by prior treatments such as anaerobic digestion, plays a crucial role in its drying behavior.

The second phase of this work involved the physico-chemical and thermal characterization of sludge from two Moroccan plants (Benguerir and Marrakech). Analyses revealed a high organic matter content, a significant calorific potential (between 14 and 15.5 MJ/kg), and a high ash content (between 33 and 38%). Thermogravimetric analysis (TGA) coupled with mass spectrometry enabled us to characterize the degradation stages during pyrolysis, as well as the emissions of gases released, such as H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, CO, NO, and SO. In addition, the kinetic study, based on isoconversion methods (KAS, FWO, Starink), highlighted high activation energies ( $\approx 416$  kJ/mol), testifying to the complexity of this biomass.

Combustion tests were then carried out to assess energy performance as a function of various parameters: air flow rate, granulometry, and co-combustion with other biomasses, notably wood pellets. These tests showed that air flow exerts a strong influence on the combustion quality of sewage sludge, that granulometry affects flame stability and thermal homogeneity, and that co-combustion improves the thermal conversion of this waste while partially reducing pollutant gas emissions.

Finally, the last phase focused on gasification, modeled using Aspen Plus software, with or without pre-treatment by hydrothermal carbonization (HTC). The results showed that HTC significantly improves syngas

quality, by increasing carbon conversion and  $H_2$  and CO contents, with an energy conversion efficiency (CGE) of up to 87%.

All this work confirms that sewage sludge can be a viable energy resource if recovery processes are adapted to the specific characteristics of this type of biomass.

**Keywords:**

Sewage sludge; Drying; Physicochemical characterization; Thermal characterization; Pyrolysis kinetics; Combustion; Gasification; Hydrothermal carbonization.