



جامعة محمد الخامس بالرباط  
Université Mohammed V de Rabat

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

## **AVIS DE SOUTENANCE DE THÈSE DE DOCTORAT**

**Monsieur Abdelmajid ACHKIR**

Soutiendra publiquement sa thèse de Doctorat en Informatique

**Le Samedi 21 Octobre 2023 à 10h00 au Grand Amphi à l'ENSAM de Rabat**

**Intitulé de la thèse**

**TRAITEMENT DES EAUX USÉES ET VALORISATION DES BOUES D'ÉPURATION EN  
AGRICULTURE ET ADSORPTION, ÉVALUATION DES RISQUES POUR  
L'ENVIRONNEMENT ET LA SANTÉ**

**Devant le jury composé de :**

**Président et Rapporteur:**

Pr. Abdelaziz SMOUNI, PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat

**Directeur de thèse :**

Pr. Mohammed EL MAHI , PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

**Co-directeur de thèse :**

Pr. EL Mostapha LOTFI, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

**Rapporteurs :**

Pr. Mouna FAHR, PH, Faculté des sciences Université Mohammed V de Rabat

Pr. Hind CHERKAOUI DEKKAKI, PH, FST-AI Hoceima, Université Abdelmalek Essaâdi, Tetouan

**Examineurs :**

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

Pr. Maâmar YAGOUBI, PH, Faculté des sciences, Université Mohammed V de Rabat

**Invité:**

Pr. Tawfik EL MOUSSAOUI, PA, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Rabat, Rabat





جامعة محمد الخامس بالرباط  
Université Mohammed V de Rabat

Résumé : La présente thèse a pour objectifs d'étudier le traitement des eaux usées issu de la station d'épuration de la ville de Skhirat-Maroc par le procédé lagunage naturel avec digestion anaérobie des boues et leur impact sur les puits qui entourent la STEP, afin d'apprécier l'impact des rejets polluants sur les eaux souterraines, et donner une image de la performance des équipements de la STEP (l'étanchéité de la géomembrane de la lagune). Ainsi une étude de recherche profonde sur les avantages et les risques de l'épandage des boues d'épuration sur les terres agricoles. Dans le premier volet de ce travail de recherche porte sur les bénéfices et les risques de l'épandage des boues d'épuration sur les terres agricoles. Par ailleurs, les principaux paramètres physicochimiques et bactériologiques en termes de coliformes fécaux (CF) et streptocoques fécaux (FS), des boues d'épuration générées par la STEP de Skhirat, Maroc, ont été réalisés au cours de la période 2018-2019. Les résultats obtenus à partir des paramètres physicochimiques une forte concentration en matière organique dans les MES qui atteint 96,3 mg/l, et en nutriments. En effet, l'azote total Kjeldhal (NTK) a enregistré un maximum de 3791 mgN/l, tandis que le potassium K<sup>+</sup> atteint 58,71 mg/l. Ainsi, le phosphore total PT atteint 508,25 mg/l et les concentrations de micronutriments tels que Cl<sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, étaient également élevées, ce qui est intéressant et pourrait être bénéfique à la fois pour les sols et que pour les plantes. Par ailleurs, les niveaux moyens de CF et SF sont respectivement de 5,40 UFC/ml et 5,85 UFC/ml. Pour SF. Cependant, ces boues d'épuration contiennent en outre de fortes concentrations de métaux lourds, principalement du zinc et du cuivre, ce qui pourrait limiter leur réutilisation pour l'épandage. Ces résultats ont été comparés aux normes appliquées et aux lignes directrices établies pour l'épandage agricole. Pour mieux comprendre les mécanismes qui régissent le comportement des boues sèches dans les sols à cette fin une étude de fertilité du sol et les paramètres de risque de contamination soient évalués en réponse à des taux d'amendement croissants provenant de l'application de boues d'épuration, dans des conditions climatiques semi-arides au Maroc, en utilisant deux textures de sol : le sol A (argile-limon) et le sol B (argile-sableux). sur une période de deux



جامعة محمد الخامس بالرباط  
Université Mohammed V de Rabat

ans. Pour cela, les paramètres physico-chimiques des traitements des boues d'épuration et des sols, la teneur en métaux lourds, le degré de pollution et les risques associés ont été évalués et comparés à des sols contrôlés. Il en ressort que tous les paramètres étudiés ont évolué de manière significative ( $p < 0,05$ ) et dose-dépendante pour les deux sols par rapport aux sols témoins non traités. Ainsi une étude expérimentale sous le climat semi-aride du Maroc, afin d'évaluer l'absorption probable de plusieurs métaux lourds (Cu, Pb, Ni, Cr, Zn) par *Solanum lycopersicum*. Des tomates ont été cultivées dans un sol amendé de texture argilo-limoneuse avec différents taux de boue/sol (0%, 10%, 30%, 70% et 100%), Tous les traitements étudiés ont montré une augmentation significative ( $p < 0,05$ ) des paramètres du sol étudié, les racines présentant des teneurs en métaux lourds significativement plus élevées que les parties aériennes de la tomate, suivies par la tige. L'absorption des métaux lourds a été évaluée dans les fruits, les feuilles, les tiges et les racines des tomates. Le résultat le plus remarquable de cette étude est que le cadmium et le nickel, deux métaux importants en raison de leur dissolution et de leur mobilité, n'ont pas été trouvés dans les fruits, quel que soit le taux de traitement, par rapport au reste des parties de la plante de tomate. Le facteur de transfert (FT) a augmenté comme suit ( $Cr > Zn > Cu > Pb > Ni$ ) dans les racines ( $Zn > Cu > Cr > Pb$ ) dans les fruits, ce qui signifie que le risque de transfert de métaux lourds vers les tomates est faible. Le risque de contamination du sol est estimé à l'aide d'indices de géo-accumulation, de facteurs de contamination (FC), d'indices de charge polluante (ICP) et de risques écologiques potentiels (PER). Dans l'ensemble, les résultats des indices de charge polluante (PLI) et du risque écologique potentiel (PER) ont montré un risque faible à modéré de contamination par les métaux lourds.

Pour cette raison, une bonne gestion de la réutilisation par les eaux usées traitées et l'amendement des boues dans les sols agricoles devrait être prise en compte afin de minimiser le transfert des contaminants dans les écosystèmes. Ce qui impose, malgré le traitement, le management d'irrigation avec les eaux usées traitées pour protéger les



جامعة محمد الخامس بالرباط  
Université Mohammed V de Rabat

écosystèmes. Toutefois, cette pratique peut contribuer à l'amélioration de la croissance des plantes, l'augmentation la productivité des soles pauvres en matière organique, réduire l'utilisation des amendements chimiques et par la suite une bonne gestion des Bio-solides

**Mots clés :** Agricoles, Boue d'Épuration, Bactériologiques , Bioaccumulation , Eaux usées, évaluation des risques, fertilité, Métaux lourds, physico-chimiques, réutilisation ,STEP Skhirat, sol, Solanum Lycopersicum LTié par ordre alphabétique.

**Abstract :** The aim of this thesis is to study the treatment of wastewater from the Skhirat-Morocco wastewater treatment plant (WWTP) using the natural lagooning process with anaerobic sludge digestion and its impact on the wells surrounding the WWTP, in order to assess the impact of pollutant discharges on groundwater, and give an idea of the performance of the WWTP equipment (the watertightness of the lagoon geomembrane). In-depth research into the benefits and risks of spreading sewage sludge on agricultural land. The first part of this research project focuses on the benefits and risks of spreading sewage sludge on agricultural land. In addition, the main physicochemical and bacteriological parameters in terms of faecal coliforms (FC) and faecal streptococci (FS), of sewage sludge generated by the Skhirat WWTP, Morocco, were carried out over the 2018-2019 period. The results obtained from physicochemical parameters show a high concentration of organic matter in suspended solids, reaching 96.3 mg/l, and of nutrients. Total nitrogen Kjeldhal (NTK) recorded a maximum of 3791 mgN/l, while potassium K<sup>+</sup> reached 58.71 mg/l. Total phosphorus PT reached 508.25 mg/l and concentrations of micronutrients such as Cl<sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, were also high, which is interesting and could be beneficial to both soils and plants. Average CF and SF levels were 5.40 CFU/ml and



جامعة محمد الخامس بالرباط  
Université Mohammed V de Rabat

5.85 CFU/ml respectively. For SF. However, this sewage sludge also contains high concentrations of heavy metals, mainly zinc and copper, which could limit its reuse for land application. These results were compared with applied standards and established guidelines for agricultural land application. To better understand the mechanisms governing the behavior of dry sludge in soils, a soil fertility study and contamination risk parameters were evaluated in response to increasing amendment rates from the application of sewage sludge, under semi-arid climatic conditions in Morocco, using two soil textures: soil A (clay-loam) and soil B (clay-sandy).over a two-year period. To do this, the physico-chemical parameters of the sewage sludge and soil treatments, the heavy metal content, the degree of pollution and the associated risks were assessed and compared with controlled soils. All the parameters studied showed significant ( $p < 0.05$ ) and dose-dependent changes for both soils compared with untreated control soils. An experimental study was carried out in the semi-arid climate of Morocco to assess the probable uptake of several heavy metals (Cu, Pb, Ni, Cr, Zn) by *Solanum lycopersicum*. Tomatoes were grown in amended soil with a clay-loam texture and different rates of mud/soil (0%, 10%, 30%, 70% and 100%). All the treatments studied showed a significant increase ( $p < 0.05$ ) in the soil parameters studied, with the roots showing significantly higher levels of heavy metals than the aerial parts of the tomato, followed by the stem. Heavy metal uptake was assessed in tomato fruit, leaves, stems, and roots. The most remarkable result of this study was that cadmium and nickel, two important metals due to their dissolution and mobility, were not found in the fruit, regardless of the treatment rate, compared with the rest of the tomato plant parts. The transfer factor (TF) increased as follows (Cr > Zn > Cu > Pb > Ni) in the roots (Zn > Cu > Cr > Pb) in the fruits, which is the same as for the rest of the plant. The transfer factor (TF) increased as follows (Cr > Zn > Cu > Pb > Ni) in the roots (Zn > Cu > Cr > Pb) in the fruit, which means that the risk of heavy metals being transferred to tomatoes is low. The risk of soil contamination is estimated using geo-accumulation indices, contamination factors (CF), pollutant load indices (PLI) and potential ecological risks (PER). Overall, the results of the