



Résumé de la thèse

L'aggravation de la crise climatique, la dégradation environnementale et l'augmentation de la demande énergétique soulignent l'urgence de la transition vers des systèmes énergétiques durables et décentralisés. Dans des régions comme le Maroc rural, où la dépendance aux combustibles fossiles importés contraste avec une activité agricole abondante et une production significative de déchets organiques, l'énergie issue de la biomasse représente une voie viable et localement adaptée vers la durabilité. Ce travail de recherche explore le potentiel multifacette de la co-digestion anaérobie en tant que solution bioénergétique décentralisée capable de transformer les résidus agro-pastoraux locaux en énergie renouvelable et en coproduits agronomiques de valeur, contribuant ainsi aux objectifs environnementaux tout en améliorant les moyens de subsistance ruraux. Inscrite dans une démarche globale de transition vers des systèmes énergétiques bas carbone, la recherche adopte une méthodologie multi-échelle combinant analyse théorique, collecte de données de terrain et simulation de procédés. Elle se fonde principalement sur la valorisation de la biomasse lignocellulosique et des effluents d'élevage, ressources abondantes mais encore largement sous-exploitées dans la région étudiée. La digestion efficace des substrats lignocellulosiques est freinée par la complexité structurelle de leur matrice, composée principalement d'holocellulose (cellulose et hémicellulose) et de lignine, limitant l'accessibilité microbienne et la biodégradabilité. Pour y remédier, ce travail propose une analyse approfondie des propriétés physico-chimiques de ces substrats et évalue les stratégies de prétraitement visant à améliorer l'hydrolyse, favoriser l'assimilation microbienne et accroître l'efficacité globale de la bioconversion. La co-digestion avec du fumier riche en nutriments offre des bénéfices synergiques, notamment une optimisation des rapports C/N et une meilleure capacité tampon, éléments essentiels à la stabilité du procédé et à l'amélioration du rendement en méthane. La co-digestion anaérobie est envisagée non seulement comme moyen de production de biogaz renouvelable, mais aussi comme stratégie de génération de digestat, un coproduit riche en nutriments présentant un fort potentiel comme amendement organique pour les sols. En intégrant ces deux sorties dans une logique d'économie circulaire, la recherche montre comment cette technologie peut contribuer au recyclage des nutriments, à la réduction de la dépendance aux engrais de synthèse, et au soutien de systèmes agricoles



Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques et Sciences Médicales

durables. La thèse explore également les options technologiques de valorisation du biogaz et son intégration dans Logo des réseaux énergétiques décentralisés, ainsi que les voies de traitement et de réutilisation du digestat à des fins agronomiques. Pour ancrer la recherche dans les réalités locales, une étude de cas détaillée a été menée à Ribat El Kheir, une commune rurale marocaine ne disposant pas d'estimation préalable de son potentiel en biomasse agricole. À travers des entretiens structurés avec 90 parties prenantes, incluant agriculteurs, techniciens agricoles et fournisseurs, complétés par des rapports agricoles régionaux, l'étude identifie les principales ressources de biomasse, notamment les résidus de culture issus des céréales et des arbres fruitiers, ainsi que le fumier d'élevage. En utilisant des ratios résidus/produit et des facteurs de disponibilité excédentaire adaptés aux conditions régionales, l'étude estime les potentiels bruts et techniquement mobilisables de biomasse, en tenant compte des usages concurrents tels que le fourrage, le combustible ou la conservation des sols. Cette évaluation empirique des ressources constitue une base pour une planification bioénergétique informée et durable. Sur la base des données de terrain, la deuxième partie du travail expérimental consiste à simuler le processus de digestion anaérobie à l'aide du logiciel Aspen Plus. Le modèle évalue la production de biogaz à partir de fumier bovin et de paille de blé dans différentes conditions opératoires, incluant le temps de rétention hydraulique, les régimes de température et les configurations de digestion (mono- vs. co-digestion). Les résultats indiquent que la co-digestion en régime thermophile à 55 °C avec un temps de rétention de 25 jours donne le rendement le plus élevé en biogaz et en concentration de méthane. La production de biogaz a augmenté de plus de 22 % par rapport à la mono-digestion du fumier bovin, et de plus de 300 % par rapport à la digestion de la seule paille de blé. Ces améliorations sont attribuées à une synergie nutritionnelle renforcée, une meilleure capacité tampon et des interactions microbiennes complémentaires, confirmant ainsi la faisabilité technique de la co-digestion comme approche d'optimisation énergétique. Grâce à l'intégration d'une revue critique, d'une enquête de terrain et d'une analyse basée sur la simulation, cette thèse propose un cadre complet pour la mise en œuvre de la co-digestion anaérobie en tant que stratégie énergétique rurale décentralisée. Elle fournit des éléments pratiques pour la quantification des ressources en biomasse, l'optimisation des procédés et l'intégration des systèmes, tout en mettant en lumière les bénéfices socio-environnementaux liés à la valorisation du digestat. L'approche interdisciplinaire et ancrée territorialement confère Logo à ces résultats une pertinence à la fois scientifique et opérationnelle, contribuant aux ambitions de durabilité du Maroc. En définitive, ce travail plaide pour le déploiement



Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques et Sciences Médicales

stratégique de systèmes bioénergétiques localement adaptés et efficaces en ressources, favorisant la souveraineté énergétique, la protection de l'environnement et le développement rural résilient.

Mots clés : Maroc rural ; Co-digestion anaérobie ; Résidus agro-pastoraux ; Production de biogaz ; Aspen Plus ; Analyse par simulation