



OPTIMISATION MULTI-OBJECTIF POUR L'ÉCO-CONCEPTION D'UNE FILIÈRE DE VALORISATION DES RÉSIDUS ORGANIQUES VIA LA MÉTHANISATION

MULTIOBJECTIVE OPTIMISATION AND ECO CONCEPTION OF ORGANIC RESIDUES BASED ON ANAEROBIC DIGESTION TREATMENT CHAIN

Établissement **Montpellier SupAgro**

École doctorale **GAIA - Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau**

Spécialité **APAB - Agroressources, Procédés, Aliments, Bioproduits**

Unité de recherche **LBE - Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement**

Encadrement de la thèse Jean-Philippe STEYER

Co-Directeur Julie JIMENEZ

Financement du 01-10-2020 au 30-09-2023 origine **concours ED GAIA** Employeur **INRAE**

Concours GAIA

Les coûts de fonctionnement seront portés par le laboratoire d'accueil.

Début de la thèse le **1 octobre 2020**

Date limite de candidature **16 mai 2020**

Mots clés - Keywords

Modélisation, méthanisation, filière, optimisation, ACV, algorithme génétique

Modeling, anaerobic digestion, treatment chain, optimisation, LCA, genetic algorithm

Profil et compétences recherchées - Profile and skills required

Master 2 ou diplôme d'ingénieur dans le domaine des Mathématiques, Sciences des Procédés

MASTER grade or Engineering school grade in Mathematics or Process engineering

Description de la problématique de recherche - Project description

Le caractère non renouvelable des énergies fossiles et leurs contributions au changement climatique ont engendré un intérêt mondial dans le développement et l'implémentation de nouveaux projets sur les énergies renouvelables (Albuquerque et al., 2012). La commission européenne sur l'Energie a notamment soulevé les points suivants : la nécessité de réduire les gaz à effets de serre en utilisant de l'énergie propre et localement produite, incluant l'énergie valorisée à partir de résidus, et la nécessité d'augmenter les marchés énergétiques compétitifs pour stimuler l'innovation technologique (European Energy Policy, European Commission 2007). Dans ce contexte, les technologies comme la digestion anaérobie productrice de biogaz à partir de résidus organiques, et dont la part de marché est en train d'augmenter, jouent un rôle majeur engendrant des aspects positifs sur la gestion des résidus, l'apport d'énergie et l'environnement. En effet, la digestion anaérobie de résidus organiques produit à la fois du biogaz valorisable énergétiquement et un résidu appelé digestat, également valorisable. Ce dernier est un mélange de matière organique (MO) partiellement dégradée, de biomasse microbienne et de composés inorganiques valorisables (azote, phosphore, potassium). C'est pourquoi l'épandage direct de ce type de résidu, surtout issu des résidus agricoles, est couramment employé et considéré non seulement comme engrais nécessaire à la croissance des cultures afin de diminuer les coûts générés par les engrais minéraux mais également comme amendement organique (Expertise scientifique collective INRA-CNRS-IRSTEA, 2014). Or, la qualité de ce digestat de méthanisation post-traité ou non varie en fonction de la qualité des intrants (Guilayn et al., 2019), ce qui a pour conséquence une qualité de sous-produit valorisable en agriculture subie. En effet, les besoins des agrosystèmes sont variables selon le type de sols, les conditions pédo-climatiques, et les cultures visées ainsi que les pratiques culturales. Ainsi, il existe un réel besoin de mettre en adéquation les besoins des agrosystèmes et la qualité des produits qui y sont appliqués afin d'aboutir à une fertilisation maîtrisée et contrôlée. C'est pourquoi, il serait nécessaire de développer un outil d'aide au dimensionnement d'une filière de valorisation des résidus organiques par méthanisation dans un concept de bioraffinerie environnementale afin de répondre à plusieurs services rendus tels que la production d'énergie via le biométhane et la production de fertilisant organique via le co-produit issu du procédé. L'objectif est de réaliser de l'ingénierie inverse et de se baser sur les besoins des agrosystèmes et qualité des produits afin de générer divers scénarios selon le type de procédés et couplage de procédés, et d'intrants, sous contrainte environnementale. Pour ce faire, la thèse proposée propose de développer une plateforme d'optimisation multi-objectif et multi-critères se basant sur (i) les modèles dynamiques de transformation biologique de la matière, (ii) les indicateurs environnementaux issus de l'ACV (Analyse du Cycle de Vie) (iii) les algorithmes adéquats pour réaliser de l'optimisation multi-objectifs. Le périmètre de l'étude serait une filière de valorisation des résidus organiques basée sur de la méthanisation.

Development and implementation of new projects on renewable energies have raised since fossil fuels are not renewable and contribute to climate change (Alburquerque and al., 2012). The European Commission on the Energy raised in particular the following points: the need of reducing greenhouse gases by using clean and locally produced energy, including the energy from residues, and the necessity of increasing competitive energy markets to stimulate the technological innovation (European Energy Policy, European Commission, 2007). In this context, technologies such as anaerobic digestion which produces biogas from organic residues play a major role generating positive aspects on the management of residues, the production of energy and the environment protection contribution. Indeed, anaerobic digestion of organic residues produces at the same time biogas energetically valuable and a residue called digestate, also valuable. Indeed, the latter is a mixture of organic matter (OM) partially degraded, of microbial biomass and valuable inorganic compounds (i.e. nitrogen, phosphorus, potassium). That is why the direct spreading of this type of residue on agricultural soils is usually used and considered not only as fertilizer necessary for the cultures growth by substituting mineral fertilizers but also as organic amendment (collective scientific Expertise INRA-CNRS-IRSTEA, on 2014).

However, the digestates quality post-treated or not, varies according to the quality of the inputs (Guilayn et al., 2019). This has a direct consequence on the product quality used in agriculture. In fact, the agrosystems needs vary according to the type of soil, climatic conditions, and crop type, as well as cultural practices. Thus, there is a real need to match agrosystems constraints with the products quality in order to achieve a controlled fertilization. That is why, it would be necessary to develop a tool to design the organic residue recovery process by anaerobic digestion to fulfill the produced several services such as energy production (biomethane) and organic fertilizer production (digestate). The objective would be to perform reverse engineering to generate various scenarios according to process conditions, process combination, and inputs, under environmental constraints.

To do this, the thesis proposes to develop a multi-objective and multi-criteria optimization platform based on (i) dynamic models of biological process, (ii) environmental indicators from LCA (Life Cycle Analysis) and (iii) adequate algorithms to perform multi-objective optimization. The scope of the study would be a way of recovering organic residues based on anaerobic digestion.

Thématique / Domaine / Contexte

Mathématiques, Génie des procédés

Environnement, bioraffinerie, valorisation résidus organiques

Depuis quelques années, la digestion anaérobie a montré un intérêt autre que celui de la production d'énergie via le méthane. En effet, le digestat de digestion anaérobie entre dans la thématique de bioraffinerie environnementale et de bioéconomie circulaire avec le retour sur les sols agricoles de ce dernier comme fertilisant organique. Toutefois, le contrôle de la digestion anaérobie s'est largement cantonné à la production de méthane via notamment l'étude des inhibiteurs de la digestion anaérobie (i.e. pH, acides gras volatils, ammonium) (Jimenez et al., 2015) ainsi qu'à son optimisation via, entre autres, les prétraitements des substrats (Carrère et al., 2010). Par conséquent la qualité des digestats est subie en sortie de réacteur et donc pas forcément adaptée au type de sol agricole à fertiliser, tout comme les teneurs et disponibilités des nutriments essentiels pour les cultures associées. Or, dans un contexte de bioraffinerie environnementale, l'objectif est de ne plus subir la qualité du produit sortant mais de la contrôler tout en gardant le potentiel de production énergétique via le biogaz. En effet, des antagonismes existent selon le service rendu désiré. La matière organique est biodégradée au sein du méthaniseur afin de produire du méthane mais la qualité de cette matière est aussi primordiale lors du retour au sol des digestats (Jimenez et al., 2017). L'azote ammoniacal provenant de la minéralisation des protéines ou le soufre sont très intéressants d'un point de vue fertilisation des cultures mais sont inhibiteurs de la méthanogénèse à certaines concentrations. C'est pourquoi, le projet de thèse décrit ci-dessus ambitionne de combler ce manque développant une méthode d'optimisation multi-objectif afin de se baser sur les besoins des services rendus « production de méthane » et « production de matières fertilisantes » et de réaliser de l'ingénierie inverse. Dans le domaine du traitement de l'eau, Beraud et al. (2009) ont réalisé un tel exercice à s'appuyant sur une méthode d'optimisation multi-objectif basé sur des algorithmes génétiques (NSGA-II) ainsi que sur l'analyse de sensibilité. Cela a permis de trouver les meilleurs fronts de Pareto vis-à-vis de multiples objectifs antagonistes liés au coût énergétique de l'aération des bassins de traitement des eaux usées nécessaire au bon déroulement du traitement biologique. D'autres travaux ont utilisé ce type d'algorithme afin de mieux concevoir les procédés de traitement et/ou de production de produits divers (Dipama, 2010 ; Morales Mendoza, 2013 ; Armand, 2015). En complément des critères de qualité et quantité de matière organique et minérale, d'autres indicateurs pertinents doivent être pris en compte afin de réaliser cet exercice sous contrainte environnementale. C'est pourquoi, l'analyse de cycle de vie apparaît également comme un outil intéressant afin de générer des indicateurs environnementaux cruciaux pour l'analyse globale. Morales Mendoza (2013) a réalisé un tel exercice dans le cadre de l'éco-conception de procédés chimiques couplant ACV, modélisation globale et optimisation multi-objectifs. De Faria (2016) a développé une plateforme prédictive contenant la modélisation dynamique de l'ensemble de la station d'épuration des eaux usées, l'analyse de cycle de vie et un outil d'optimisation multi-objectif. A ce jour, il n'y a pas eu d'études reportées sur l'optimisation multi-objectifs et multi-critères d'une filière de méthanisation avec comme objectifs la production concomitante de méthane et de matière fertilisante.

Objectifs

Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est de développer un outil d'aide à la conception d'une filière de traitement de résidus organiques basée sur la méthanisation en se basant sur (i) les modèles dynamiques de transformation biologique de la matière, (ii) les indicateurs environnementaux issus de l'ACV (iii) les algorithmes adéquats pour réaliser de l'optimisation multi-objectifs. Des solutions de compromis Pareto-optimaux seront recherchées entre l'atteinte des meilleures performances de valorisation et la limitation des impacts environnementaux.

Méthode

La méthodologie et la stratégie à mettre en place afin de répondre à la problématique du projet de thèse sont les suivantes :

- Appropriation des modèles de procédés biologiques et physico-chimiques disponibles au LBE et choisir le nombre de procédés à inclure

- ; si besoin modifier ou simplifier les modèles ;
- Etat de l'art sur les indicateurs environnementaux issus de l'Analyse de Cycle de vie ACV ;
- Identification des indicateurs environnementaux et associés à chaque service rendu par la filière étudiée pertinents à prendre en compte dans l'étude et implémentation dans les modèles;
- Identification et description des indicateurs à optimiser (variables), les leviers d'actions (analyse de sensibilité) et les contraintes ;
- Etat de l'art sur les algorithmes d'optimisation multi-objectifs.
- Identifier plusieurs types d'algorithmes d'optimisation multi-objectifs potentiellement applicables (ex : algorithmes génétiques,...) ;
- Implémenter l'algorithme retenu ;
- Dans une démarche de « reverse engineering », appliquer la démarche d'optimisation multi-objectifs à une étude de cas réelle ;

Résultats attendus - Expected results

Les résultats attendus sont les suivants :

- Développement et/ou utilisation d'indicateurs environnementaux et de qualité des services rendus afin d'optimiser la filière.
- Développement d'une « plateforme » de modélisation filière complète avec calculs d'indicateurs environnementaux pertinents
- Optimisation de la filière en utilisant un algorithme multi-objectif appliqué sur un cas réel : résultats, limites et besoins.
- Publications associées dans des revues de rang A.

Précisions sur l'encadrement - Details on the thesis supervision

L'encadrement de thèse se fera par Jean-Philippe STEYER (HDR) et Julie JIMENEZ qui s'engage à passer son HDR dans les 3 années. Une réunion hebdomadaire est proposée afin d'accompagner le doctorant tout au long de sa thèse. Des formations sont prévues en interne dès son arrivée afin de faciliter son intégration et appropriation du sujet.

Conditions scientifiques matérielles et financières du projet de recherche

Les données expérimentales nécessaires au bon déroulement de la thèse seront fournies sur la base de projets terminés sur les filières de traitement des résidus organiques et de la base de données associée développée par le LBE. Un ordinateur ainsi que l'accès aux logiciels nécessaires au déroulement de la thèse seront fournis. Du fonctionnement est également prévu dans le cas où le doctorant parte en mission pour faire des réunions et/ou des colloques.

Objectifs de valorisation des travaux de recherche du doctorant : diffusion, publication et confidentialité, droit à la propriété intellectuelle,...

3 Publications associées aux résultats attendus dans des revus scientifiques de rang A
Participation à des conférences nationales et internationales afin de valoriser au mieux les résultats
Outil final: dépôt auprès de l'APP (Agence Protection Programme)

Collaborations envisagées

Une collaboration avec l'unité ITAP et les chercheurs impliqués dans la chaire ELSA-PACT sur les aspects Analyse de Cycle de Vie est prévue ainsi qu'avec les chercheurs du centre de recherche ICRA de Girona (Espagne) sur les aspects développement d'outil d'aide à la décision.

Ouverture Internationale

Un rapprochement avec les chercheurs du centre de recherche ICRA de Girona (Espagne) sur les aspects développement d'outil d'aide à la décision est prévue.

Références bibliographiques

Albuquerque, J.A., de la Fuente, C., Campoy, M., Carrasco, L., Nájera, I., Baixauli, C., Caravaca, F., Roldán, A., Cegarra, J., Bernal, M.P., 2012. Agricultural use of digestate for horticultural crop production and improvement of soil properties. *Eur. J. Agron.* 43, 119–128.

Angelidaki, I. and Sanders, W. (2004) Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 3, 117-129.

Armand Decker, S. (2015) Développement d'une méthode d'optimisation multiobjectif pour la construction bois : prise en compte du confort des usagers, de l'impact environnemental et de la sécurité de l'ouvrage. *Mécanique [physics.med-ph]*. Université de Bordeaux. Français.

Beraud B., Lemoine C., Steyer, J.-P. (2009) Multiobjective Genetic Algorithms for the Optimisation of Wastewater Treatment Processes. *Computational Intelligence Techniques For Bioprocess Modelling, Supervision And Control*, 218, 163-195.

Carrère, H., Dumas, C., Battimelli, A., Batstone, D.J., Delgenèse, J.-P., Steyer, J.-P., Ferre, I., 2010. Pretreatments methods to improve

sludge anaerobic degradability: A review. *Journal of Hazardous Materials*. 183, 1-15.

Dipama, J. (2010) Optimisation multi-objectif des systèmes énergétiques. Ecole Polytechnique de Montréal. Français.

European Commission, 2007. An Energy Policy for Europe, COM (2007) 1 Final. Belgium EC Brussels.

de Faria, A. B. B. (2016) Development of an integrated approach for wastewater treatment plant optimization based on dynamic modelling and environmental assessment. *Chemical and Process Engineering*. INSA de Toulouse. English. (NNT : 2016ISAT0039). (tel-01652117)

Houot, S., Pons, M.-N., Pradel, M. (2014) Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier. *Expertise Scientifique Collective INRA-CNRS-IRSTEA*.

Guilayn, F., Jimenez, J., Martel, J. L., Rouez, M., Crest, M., Steyer, D. (2019a). First fertilizing-value typology of digestates: A decision-making tool for regulation. *Waste Management*, 86, 67-79.

Jimenez, J. Lei, H., Steyer, J.-P., Houot, S., Patureau, S. (2017) Methane production and fertilizing value of organic waste: Organic matter characterization for a better prediction of valorization pathways. *Bioresource Technology*, 241, 1012-1021.

Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B. S., Field, D. J., Gimona, A., Hedley, C. B., Hong, S. Y., Mandal, B., Marchant, B. P., Martinc, M; McConkey, B. G., Mulder, V. L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A. C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C.-C., Vågen, T.-G., van Wesemael, B., Winowiecki, L. (2017) Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59-86.

Morales Mendoza, L. F. (2013) Ecoconception de procédés : approche systémique couplant modélisation globale, analyse du cycle de vie et optimisation multi objectif. *Mécanique, Énergétique, Génie civil, Procédés*. LGC Toulouse. Français.

Dernière mise à jour le 12 mars 2020