Conception innovante d'un pilote d'optimisation des paramètres opératoires de la méthanisation en voie solide

Amar NAJI[1,2,3], Arnaud COUTU[2], Sabrina GUERIN[1], Vincent ROCHER[1], André PAUSS[3], Thierry RIBEIRO[2]

Affiliation 1 : SIAAP - Service public pour l'assainissement francilien, Direction Innovation, 82 avenue Kléber, 92700 Colombes.

Affiliation 2 : Institut Polytechnique UniLaSalle, Université Artois, ULR 7519, 19 rue Pierre Waguet, BP 30313, 60000 Beauvais.

Affiliation 3 : Alliance Sorbonne Université, Université de Technologie de Compiègne, Transformations Intégrées de la Matière Renouvelable (TIMR), Rue Roger Couttolenc, CS 60319, 60203 Compiègne.

Introduction

La loi de transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015 vise à la limitation du dérèglement climatique, la préservation des ressources et l'indépendance énergétique de la France. Cette loi amène notamment comme objectif la réduction de la consommation énergétique de 50% en 2050 par rapport à 2012 avec une échéance à 20% en 2030. Cette situation nécessite de mobiliser différents moyens de valorisation des matières existantes pour produire de l'énergie et préserver les ressources. La valorisation des gisements territoriaux avec notamment le procédé de méthanisation joue un rôle primordial pour atteindre ces objectifs. La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) pose pour la méthanisation un objectif de réduction des coûts de 95€/MWh à 60€/MWh pour 2028. La production de déchets en France en 2018 représente 342 millions de tonnes dont 39 millions sont des ordures ménagères et 8,7 millions sont des déchets organiques comprenant les boues issues de l'assainissement des eaux usées (ADEME 2021). Dans ce contexte, un partenariat a été établi entre le SIAAP, l'UTC et UniLaSalle Beauvais dans le cadre du projet Méthacopée inscrit au programme de recherche MOCOPEE (Modélisation Contrôle et Modélisation des Procédés d'Epuration des Eaux) avec comme objectif de proposer une méthodologie permettant de définir le meilleur mix d'intrants en méthanisation et les conditions opératoires associées en un minimum d'expérimentations. Le procédé de méthanisation est un procédé complexe comprenant de nombreux verrous scientifiques et technologiques. La digestion anaérobie en voie solide (taux de matières sèches supérieur à 15%) est un procédé présentant un fort intérêt pour la dégradation de substrats à fort taux de matière sèche tels que les pailles et les fumiers (André et al., 2018). La production de méthane d'un procédé dépend de la composition en substrats dégradables ainsi que de plusieurs paramètres opératoires. De plus, les expériences de méthanisation sont des expériences longues et l'optimisation des paramètres opératoires devient alors très coûteuse et/ou très longue. Les objectifs de ces travaux se focalisent sur le développement de méthodes opératoires d'optimisation plus efficaces et sur la conception du matériel permettant de réaliser ces expériences. Les paramètres opératoires étudiés sont la fréquence de recirculation et l'immersion du massif de substrats solides sur un mélange complexe de substrats. Un premier axe de travail concerne le design et la conception d'un matériel adapté aux expériences nécessaires minimisant les coûts et la durée de conception. Le second axe concerne le développement de plans d'expériences pour minimiser les expériences nécessaires, déterminer rapidement un optimum expérimental et obtenir un modèle valide et représentatif des paramètres étudiés.

Matériel et Méthodes

Dans un premier temps, une méthodologie de plan d'expériences, inspirée de la littérature (Coutu et al., 2022), a été mise en place et développée pour aller plus loin dans la compréhension du phénomène

de digestion anaérobie en voie solide. Le plan d'expérience mis en place couple un plan de surface de réponse (plan de Doehlert) avec un plan de mélange (Simplex augmenté) afin de permettre la détermination d'un optimum expérimental en un set d'expériences pour un mélange à 2 substrats et 3 sets d'expériences pour un mélange à 3 substrats en considérant un maximum de 30 réacteurs. Dans un second temps, le matériel expérimental a été dimensionné et conçu pour réaliser les expériences nécessaires à cette méthode d'optimisation. Une étuve a été dimensionnée et installée pour accueillir les 30 réacteurs (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**A). Les réacteurs ont été dessinés en 3D à l'aide du logiciel FreeCAD puis le logiciel Preform a été utilisé pour convertir ces dessins en fichiers imprimables. La technologie d'impression utilisée est la stéréolithographie apparatus (SLA) avec usage de la résine Clear V2 (Formlabs) afin d'assurer l'étanchéité et la résistance mécanique et thermique du réacteur (Figure 1B). Les joints d'étanchéité ont également été imprimés en 3D en résine Flexible 80A (Formlabs). La méthode d'impression 3D permet d'obtenir des réacteurs opérationnels en divisant le temps de production par 10 et le budget par 3 par rapport à un réacteur standard produit par plasturgie, tout en assurant l'adaptabilité du produit aux contraintes fixées.

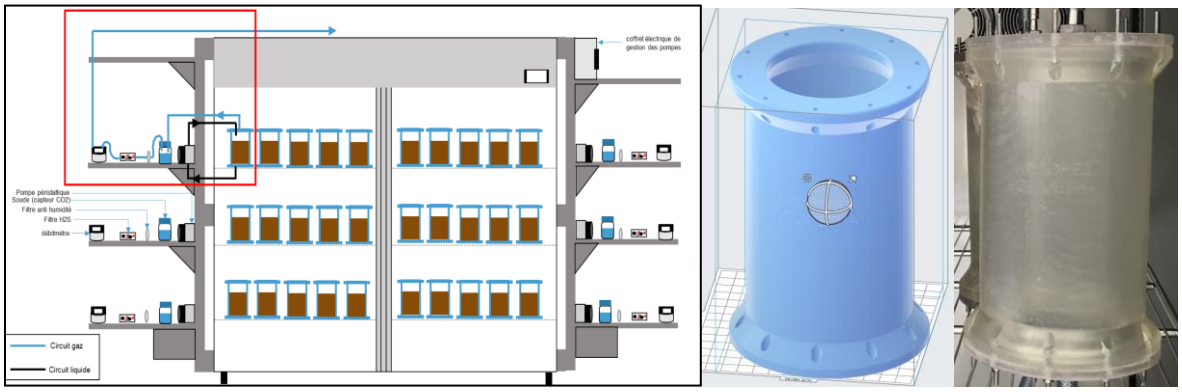

Figure 1 : A. schéma global du pilote MOCOPEE, B. modèle 3D et photographie du réacteur conçu.

Conclusion

Les premiers tests sur les réacteurs imprimés en 3D ont permis de valider l'étanchéité de ces derniers et la répétabilité des expériences à mener, confirmant que la méthode de conception est adéquate à la stratégie d'optimisation à venir. Le domaine d'étude des expériences d'optimisation, le choix du modèle mathématique et du plan d'expériences a été effectué. Des expériences sont actuellement en cours pour construire le modèle représentatif des paramètres opératoires étudiés et ainsi déterminer les optimums expérimentaux associés.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le programme MOCOPEE pour le financement de ce travail de recherche et de l'allocation de thèse d'Amar NAJI, ainsi que Carlyne LACROIX pour son aide technique.

Références bibliographiques

ADEME, 2021. Déchets Chiffres-clés L'essentiel 2021. Brochure réf. 011723.

André, L.; Pauss, A.; Ribeiro, T., Solid anaerobic digestion: State-of-art, scientific and technological hurdles. *Bioresource Technology*, 2018, 247, 1027–1037.

Coutu, A.; Mottelet, S.; Guérin, S.; Rocher, V.; Pauss, A.; Ribeiro, T., Methane yield optimization using mix response design and bootstrapping: application to solid-state anaerobic co-digestion process of cattle manure and damp grass. *Bioresource Technology Reports*, 2022, 17, 100883.