



# Impacts de la méthanisation sur le bilan des flux d'azote dans une succession de culture fertilisée avec des effluents méthanisés ou non : premiers résultats

Antoine Savoie, Catherine Pasquier, Adeline Ayzac, Polina Voylokov, Anastasiia Lemekhova, Sophie Générmont, Benjamin Loubet, Catherine Hénault, Sabine Houot

## ► To cite this version:

Antoine Savoie, Catherine Pasquier, Adeline Ayzac, Polina Voylokov, Anastasiia Lemekhova, et al.. Impacts de la méthanisation sur le bilan des flux d'azote dans une succession de culture fertilisée avec des effluents méthanisés ou non : premiers résultats. JRI biogaz méthanisation 2018, Oct 2018, Rennes, France. hal-02737298

**HAL Id: hal-02737298**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02737298>**

Submitted on 2 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

# JRI 2018

## biogaz méthanisation

2 au 4 octobre 2018 - Rennes



**3 et 4 octobre 2018**

### **Travaux de recherche en 5 sessions**

Ressources, opportunités et territoires

Digestats et valorisation

Aspects sanitaires liés à la  
méthanisation

Processus et procédés

Biogaz et biométhane

## **Recueil des résumés**

## Contenu

### RESSOURCES, OPPORTUNITES ET TERRITOIRES

|                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Analyse des conditions de faisabilité technico-économique d'un système gazier basé à 100 % sur du gaz renouvelable à horizon 2050.....                                       | 2  |
| Comprendre l'implantation des unités de méthanisation sur les territoires : une comparaison.....                                                                             | 3  |
| Informier et dialoguer autour d'un projet de méthanisation.....                                                                                                              | 4  |
| VALORMAP : Création d'une base de données spatialisée relative à la valorisation énergétique par méthanisation des résidus et coproduits organiques des agro-industries..... | 5  |
| Problématique de la fiabilité des tests de potentiel méthanogène (BMP) : résultats d'une étude inter-laboratoire internationale et perspectives.....                         | 6  |
| Optimisation de la mobilisation des CIVE pour la méthanisation dans les systèmes d'exploitation.....                                                                         | 7  |
| Caractérisation des fauchages de bord de route pour la méthanisation (CARMEN).....                                                                                           | 8  |
| Projet PAM : Prétraitement des déchets agricoles pour l'optimisation de leur valorisation par méthanisation.....                                                             | 9  |
| Methalae : Comment la méthanisation peut être un levier de l'agro écologie.....                                                                                              | 10 |

### SESSION POSTERS

|                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Les digestats : une réponse à la fertilité des sols dans un contexte de réduction des intrants de synthèse ?.....                                                                                                  | 12 |
| Alimentation des unités de méthanisation agricoles nature des substrats origine quantités potentiel gaz.....                                                                                                       | 13 |
| L'amélioration de la gestion et de la valorisation des digestats grâce au Bactériolit®.....                                                                                                                        | 14 |
| L'amélioration de l'accessibilité de la matière organique et de la production d'énergie sur les installations de méthanisation grâce au Bactériométhas®.....                                                       | 15 |
| Optimiser et flexibiliser l'alimentation des unités de méthanisation.....                                                                                                                                          | 16 |
| Eléments d'aide à la réflexion permettant de mieux appréhender l'impact sur les pratiques agricoles du recours aux cultures et aux résidus de culture en méthanisation ainsi que de l'utilisation du digestat..... | 17 |
| Utilisation de résidus d'origine algale en digestion anaérobie : performances en pilote continu et qualité agronomique des digestats.....                                                                          | 18 |
| Actualités réglementaires pour la mise sur le marché des fertilisants issus de sites de méthanisation.....                                                                                                         | 19 |
| Nouvelles voies de valorisation des digestats à faible impact environnemental.....                                                                                                                                 | 20 |
| Etude de l'impact des prétraitements alcalins et du génotype sur la digestion anaérobie du sorgho et du miscanthus.....                                                                                            | 21 |
| ELBA l'outil web de détermination de la biomasse agricole en France l'outil web de détermination de la biomasse agricole en France.....                                                                            | 22 |

### DIGESTATS ET VALORISATION

|                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Caractéristiques des digestats et modes de valorisation dans le cadre des unités de méthanisation agricoles.....                                                | 24 |
| Définition de classes de digestats agricoles en vue de la préconisation de leur insertion dans les pratiques de fertilisation.....                              | 25 |
| Caractérisation de la matière organique : outil d'aide à la compréhension des mécanismes de la digestion anaérobie et de la qualité du digestat.....            | 26 |
| Impact du stockage sur les propriétés fertilisantes et amendantes des digestats de méthanisation.....                                                           | 27 |
| Impacts de la méthanisation sur le bilan des flux de N dans une succession de culture fertilisée avec des effluents méthanisés ou non : premiers résultats..... | 28 |
| Impact des cocktails de cosubstrats sur les propriétés fertilisantes azotées des digestats.....                                                                 | 29 |
| Séparation de phases et digestats: profils d'efficacité de séparation basés sur les intrants de digestion anaérobie et du choix de la technologie.....          | 30 |
| Stripping pour l'élimination de l'ammoniac présent dans le digestat.....                                                                                        | 31 |
| Caractérisation de la fraction liquide des digestats issus de la co-digestion de résidus solides.....                                                           | 32 |

### ASPECTS SANITAIRES LIÉS A LA MÉTHANISATION

|                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Méthanisation collective : Prend-on un risque sanitaire?.....                                                                                                  |    |
| Devenir des bactéries indicatrices d'efficacité de traitement et de bactéries pathogènes au cours de la méthanisation mésophile des effluents d'élevages ..... |    |
| Impact de la méthanisation sur le virus Influenza aviaire contenu dans du lisier de canard.....                                                                | 34 |

## PROCESSUS ET PROCÉDÉS

|                                                                                                                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Caractérisation rhéologique de la matière entrante pour la mise en œuvre du procédé de méthanisation voie épaisse agitation pneumatique ARKOMETHA.....</i> | <i>37</i> |
| <i>La méthanisation des résidus de culture de l'échelle du laboratoire à l'unité de méthanisation grandeur réelle.....</i>                                    | <i>39</i> |
| <i>Piloter les performances des unités de méthanisation à faible temps de séjour.....</i>                                                                     | <i>40</i> |
| <i>Quels outils pour le suivi et le pilotage des digesteurs et l'identification des dysfonctionnements ?.....</i>                                             | <i>41</i> |
| <i>Mise en évidence de dysfonctionnements d'un digesteur par Spectroscopie Proche Infrarouge (SPIR).....</i>                                                  | <i>42</i> |
| <i>Addition de matériaux conducteurs à base de carbone et oligoéléments pour stabiliser la digestion anaérobie des biodéchets alimentaires.....</i>           | <i>43</i> |
| <i>Méthanisation à température ambiante – Evaluation du procédé « Nénufar » à Guernévez.....</i>                                                              | <i>44</i> |
| <i>Etude de la cinétique de la méthanisation en vue du développement d'un modèle de dimensionnement de méthaniseur industriel.....</i>                        | <i>45</i> |
| <i>Biocat project a rapid and efficient bio-methanation process.....</i>                                                                                      | <i>47</i> |

## SESSION POSTERS

|                                                                                                                                                                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>MAPPED – Développement et tests d'outils dédiés au pilotage intelligent d'unités de méthanisation à l'échelle du territoire pour accélérer et optimiser la production de biogaz.....</i>                        | <i>49</i> |
| <i>Utilisation d'enzymes en vue de l'amélioration de la digestibilité des pulpes de betterave.....</i>                                                                                                             | <i>51</i> |
| <i>Digestion anaérobie et spectroscopie proche infra-rouge. Application au suivi de procédé à travers l'utilisation et l'industrialisation de modèles en ligne pour 5 paramètres clés de la méthanisation.....</i> | <i>52</i> |
| <i>Digestion anaérobie et enzymatique. Application au prétraitement de substrats difficiles dans le but de fluidifier le mélange de gisements à incorporer.....</i>                                                | <i>53</i> |
| <i>Improvement of biomethane production from agricultural waste.....</i>                                                                                                                                           | <i>54</i> |
| <i>Micro Méthanisation Modulaire intégrée dans le Cycle agronomique Biologique et Economique de l'exploitation agricole.....</i>                                                                                   | <i>55</i> |
| <i>Mapping Biogaz – Biométhane.....</i>                                                                                                                                                                            | <i>57</i> |
| <i>DUALMETHA : Procédé de méthanisation hybride lauréat des Programmes Investissements d'Avenir.....</i>                                                                                                           | <i>58</i> |
| <i>Mathematical and numerical modeling of the valorization of household waste In Morocco.....</i>                                                                                                                  | <i>59</i> |
| <i>Méthanisation des noyaux de datte : effet de la composition chimique de six variétés et de différents prétraitements.....</i>                                                                                   | <i>61</i> |
| <i>Petite méthanisation à la ferme.....</i>                                                                                                                                                                        | <i>62</i> |
| <i>Comparaison de 3 technologies de digestion anaérobie pour produire des acides gras volatiles à partir de la vinasse de betterave à sucre.....</i>                                                               | <i>63</i> |
| <i>Optimisation du découplage réactionnel des deux premières étapes de la digestion anaérobie essais sur site et en laboratoire.....</i>                                                                           | <i>64</i> |
| <i>Digestion de sous-produits de mytiliculture en voie sèche de type batch à l'échelle pilote 60 L : Essais préliminaires &amp; perspectives.....</i>                                                              | <i>65</i> |

## BIOGAZ ET BIOMÉTHANE

|                                                                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Le projet méthycentre : premier projet de démonstration en France de couplage méthanisation – méthanation.....</i>               | <i>67</i> |
| <i>Résultats du Projet HYCABIOME : Couplage Méthanisation / Méthanation biologique.....</i>                                         | <i>68</i> |
| <i>Développement et optimisation d'un procédé de méthanation biologique ex-situ pour un couplage avec la méthanisation.....</i>     | <i>70</i> |
| <i>Impact des conditions d'agitation et d'hydrogénation sur les performances de méthanation biologique en digesteur pilote.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Comparaison d'adsorbants alternatifs pour le traitement de l'H<sub>2</sub>S dans le biogaz.....</i>                              | <i>72</i> |
| <i>AE-AMINE: Une technologie de lavage aux amines innovante à haute.....</i>                                                        | <i>73</i> |
| <i>Trackleaks : fuites sur installation de méthanisation mesures et bilan environnemental.....</i>                                  | <i>74</i> |

## **Session**

# **RESSOURCES, OPPORTUNITES ET TERRITOIRES**

## Analyse des conditions de faisabilité technico-économique d'un système gazier basé à 100 % sur du gaz renouvelable à horizon 2050

Simon Métivier, Christian Couturier / Solagro

### Contexte - Objectifs

Après une première étude menée par l'ADEME sur la faisabilité technico-économique d'un système électrique avec un mix 100% renouvelable en France en 2050, cette nouvelle étude s'intéresse au vecteur gaz. Ce travail mené en partenariat par l'ADEME, GRDF et GRTgaz contribue à la réflexion sur la stratégie volontariste de la France pour baisser ses émissions de CO<sub>2</sub> en maîtrisant sa consommation énergétique et en développant des énergies renouvelables.

L'objet de l'étude est d'analyser les conditions de faisabilité technico-économique d'un système gazier basé à 100 % sur du gaz renouvelable à horizon 2050, en répondant aux questions suivantes :

- Quelle est la ressource en gaz renouvelable ou de récupération en 2050 en France métropolitaine?
- Peut-elle satisfaire la demande de gaz chaque jour et à tout point du réseau ?
- Quelles évolutions des réseaux ou des filières de production seraient nécessaires ?
- Quelles sont les contraintes et les marges de manœuvres techniques disponibles ?
- Quel serait l'impact sur le coût moyen du gaz délivré ?

L'étude se compose en trois phases principales :

- 1) L'évaluation de la ressource disponible pour la production de gaz renouvelables par l'intermédiaire des trois principales filières : méthanisation, gazéification, power-to-gas. Le potentiel de production de chaque ressource est calculé à une maille cantonale ou départementale, leurs coûts d'approvisionnement et de transformation sont également décrits en prenant en compte des gains sur les performances technico-économiques. L'estimation de la ressource issue de la biomasse intègre des critères de durabilité.
- 2) L'évaluation de la demande de gaz 2050 en prenant en compte les évolutions liées à la mise en œuvre de mesures d'économies d'énergie et mais aussi le développement du nouvel usage : le gaz carburant. Le profil de consommation est décrit au pas de temps journalier et à la maille communale
- 3) L'optimisation de l'équilibre offre-demande en mobilisant les gaz renouvelables les moins coûteux pour satisfaire la demande. Les coûts d'adaptation du réseau (raccordement, maillage, rebours), ainsi que les besoins de stockage sont également évalués afin d'obtenir un coût complet du MWh de gaz délivré

Au final, plusieurs scénarios sont modélisés permettant de montrer la sensibilité à plusieurs paramètres tels que : la place du vecteur gaz, l'accès limité à certaines ressources, la part du gaz renouvelable.

Lien vers la synthèse de l'étude : <http://www.ademe.fr/mix-gaz-100-renouvelable-2050>

## Comprendre l'implantation des unités de méthanisation sur les territoires : une comparaison Ardennes-Nouvelle Aquitaine

Alexandre Berthe (Université Paris Diderot - UMR LIED), Louis Dupuy (APESA) et Pascal Grouiez (Université Paris Diderot - UMR LADYSS)

La mise en évidence de plus en plus prégnante des limites planétaires concernant les ressources environnementales (sols, biodiversité...) et le changement climatique impose la mise en place d'une transition écologique. Ce constat, proposé par les sciences de la nature, ne permet en revanche pas une mise en action puisqu'il ignore le fait que ce sont les systèmes sociaux qui peuvent porter une transition, qui devient alors une transition socioécologique. Face à cela, les sciences humaines et sociales permettent de mettre en évidence la pertinence d'une approche polycentrique, prenant comme centre l'échelle territoriale. Dans cette transition, la question énergétique est fondamentale puisque la production d'énergie est la source principale des gaz à effets de serre. L'un des leviers de la transition écologique est alors la transition énergétique, qui permet le développement de nouvelles filières et activités sur les territoires, tout en proposant un mix énergétique plus sobre en carbone.

En particulier, les unités de méthanisation permettent à partir de déchets organiques de produire du biogaz utilisable pour la production énergétique. Cette solution peut se penser au cœur des territoires puisqu'elle peut reposer sur des unités de taille réduite. Elle mobilise des ressources très locales, provenant notamment de l'agriculteur, qui seraient autrement perdues car considérées comme des déchets. La méthanisation pourrait donc devenir un levier de transition énergétique qui nécessite plusieurs éléments qu'il s'agira ici d'analyser : une appropriation de la part des acteurs, une faisabilité économique, une dynamique institutionnelle favorable au niveau local, une acceptabilité de la part des habitants... L'implantation d'unités de méthanisation sur les territoires ne se limite donc pas à une réflexion technique sur les méthodes les plus adéquates, mais réclame en complément une compréhension détaillée et propre aux territoires s'appuyant sur une perspective de sciences humaines et sociales. L'implantation de ce secteur reconfigure l'ensemble de la filière énergétique et de la filière des déchets du territoire ce qui peut entraîner des résistances ou des facilitations socio-économiques et institutionnelles que ce projet appréhendera également.

L'objectif de cette présentation est de participer à la compréhension des phénomènes de transition qui s'opèrent à l'échelle territoriale. La capacité des territoires de la Nouvelle Aquitaine à porter des projets de transition énergétique sera mise en perspective avec celle d'un territoire en plus grande difficulté économique et ayant réussi à développer des projets de méthanisation : le département des Ardennes. L'intérêt d'une telle comparaison est de mieux saisir les facteurs territoriaux, socio-économiques de réussite ou d'échec d'implantation d'unités de méthanisation et les stratégies d'acteurs associées. Pour ce faire, deux approches seront combinées : (i) la réalisation d'entretiens semi-directifs auprès d'agriculteurs et d'institutions liées au secteur de l'énergie et (ii) la mise en place d'une base de données socioéconomiques et techniques sur les unités de méthanisation. Globalement, cette présentation permettra d'évaluer les blocages et les facilitations potentielles des systèmes socio-économiques et agricoles présents sur ces territoires. En particulier, nous montrons :

- La diversité des projets d'unités de méthanisation contrairement à l'hypothèse d'isomorphisme présente dans la littérature
- Le rôle de la méthanisation dans la stratégie des exploitations agricoles (changement d'activité agricole, lien avec l'agro-alimentaire, diversification, captage de la valeur...)
- La place importante de la structuration du territoire (rôle des coopératives, par exemple)

## Pourquoi et comment informer et dialoguer autour de votre projet de méthanisation ?

Delatte C., Quelia

Le développement de cette nouvelle activité peut interagir avec de nombreux acteurs locaux et générer beaucoup d'attention. Par principe vertueuse pour l'environnement, la méthanisation va en effet induire, quelle qu'en soit la perception positive ou négative, des changements sur le territoire. Alors que la plupart des porteurs de projets hésitent à communiquer, le fait d'informer et la capacité de dialoguer peuvent pourtant contribuer à faire comprendre votre démarche.

Le guide de l'ADEME explique comment analyser la situation, contexte unique de votre projet, et propose une série d'outils et méthodes pour informer et dialoguer. Il présente également des ressources pour vous accompagner et une série de fiches de retours d'expérience. La création de ce guide destiné principalement aux agriculteurs qui portent un projet de méthanisation.

Ce guide invite les porteurs de projets agricoles à créer de meilleures conditions pour développer votre future activité de méthanisation en devenant acteur de l'information et du dialogue autour de votre projet. Il est également applicable à d'autres porteurs de projets de méthanisation en général.

## **VALORMAP : Création d'une base de données spatialisée relative à la valorisation énergétique par méthanisation des résidus et coproduits organiques des agro-industries**

Levasseur P., IFIP – Badey L., ITERG (coord.) – Bioteau T., IRSTEA Rennes – Deloche Y, CRITT Paca – Jolibert F., UNGDA – Penavayre S., IFV – Prasse S., CTP – Thébault J., IPC, Torrijos M., INRA Narbonne – Barthelemy M., AGRIA Grand Est

La méthanisation est une solution de traitement et de valorisation de la matière organique en pleine croissance en France. Les agro-industries génèrent un tonnage important de résidus et coproduits organiques disposant parfois d'un rendement méthane intéressant et permettant d'envisager leur valorisation en codigestion anaérobie. Le projet ValorMap avait ainsi pour objectif, sur la période 2015-2017, de créer une base de données spatialisée relative à la valorisation énergétique par méthanisation des résidus et coproduits organiques des agro-industries. Ce projet a rassemblé des Instituts Techniques et Centres régionaux, pour leur connaissance du secteur agro-industriel et des caractéristiques des résidus et coproduits générés. Le LBE de l'INRA Narbonne a procédé aux analyses (BMP et chimiométrie) et l'IRSTEA de Rennes a réalisé la base de données spatialisée.

Résultats : Après avoir capitalisé des données antérieures, les partenaires ont procédé à une étude de gisement des co-produits potentiellement intéressants pour la méthanisation au sein de leurs filières respectives. Cette enquête a permis en outre d'établir ou de réactualiser des ratios de production et d'échantillonner ces co-produits. Le potentiel méthanogène et les concentrations en matières sèches et organiques, azote ammoniacal et total, phosphore et potassium ont été déterminés sur plus de 110 déchets des industries agro-alimentaires. Ces données individuelles sont téléchargeables sur le site du projet (<https://www.valormap.fr/>) au format excel afin de pouvoir implémenter des bases de données existantes chez les différents acteurs de la méthanisation (agriculteur-méthaniseurs, conseillers énergie/environnement, bureaux d'études, constructeurs, puissance publique,...). Pour une meilleure compréhension, les résultats ont en outre fait l'objet d'un travail d'agrégation en 10 familles de produits : boues et graisses issues du traitement des eaux sur site AA ; résidus animaux, végétaux, de la production de lait et fromage, issus du raffinage des huiles végétales, etc. La diversité des rendements méthane mesurés peuvent notamment s'expliquer par une variabilité sur les procédés de fabrications et la nature des matières premières entrantes.

Les auteurs du projet ont réalisé plus d'une vingtaine de fiches « co-produits » où figurent les procédés d'obtention, les ratio de production, les résultats d'analyses et leur principaux facteurs de variation, les points de vigilance (en termes de stockage, d'odeur, de contrainte réglementaire, de mode de valorisation concurrentielle, d'éventuels indésirables connus) et *in fine*, les perspectives de valorisation en filière méthanisation. Compte tenu de ces atouts et contraintes, un taux de mobilisation envisageable est mentionné à titre indicatif. Ces fiches sont également téléchargeables sur le site du projet. Les résultats du projet permettent également de géolocaliser les gisements de ces déchets. Un outil public web donne accès aux masses des grandes catégories de déchets à l'échelle départementale et les quantités d'énergie correspondante, sous forme de KWh et de m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>, à l'échelle cantonale. Cette carte interactive permet également de visualiser la production brute ou le gisement potentiellement mobilisable.

## **Problématique de la fiabilité des tests de potentiel méthanogène (BMP) : résultats d'une étude inter-laboratoire internationale et perspectives**

H. Fruteau de Laclos<sup>1</sup>, C. Holliger<sup>2</sup>, S. Hafner<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Méthaconsult, Préverenges-CH, <sup>2</sup> Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne-CH, <sup>3</sup> University of Southern Denmark-DK

Les résultats des tests de potentiels méthanogènes (BMP) sont couramment utilisés pour prédire la production de méthane attendue lors d'un projet, production sur laquelle seront basées les recettes du plan d'affaires, et souvent pour servir de base aux garanties de performances des fournisseurs de procédés. Dans certains cas des producteurs de déchets peuvent également demander une rémunération sur la base d'un potentiel méthanogène. Il est donc important de pouvoir déterminer de façon suffisamment fiable ces potentiels.

Or la reproductibilité des tests BMP est questionnée depuis maintenant plusieurs années, avec la publication d'études interlaboratoires nationales et internationales. Ces études montrent une (très) grande variabilité de résultats entre les différents laboratoires pour un même substrat homogène. Les écarts types observés varient suivant les études, mais l'étendue des mesures (écart entre la valeur minimale et la valeur maximale mesurée par l'ensemble des laboratoires) est toujours importante. Par exemple l'étude française présentée en 2014 montre une étendue des mesures allant de 175 à 369 NI CH<sub>4</sub>/kg MO pour le même échantillon de paille.

La présente étude avait pour but d'évaluer l'application de critères internes de validation sur les résultats de tests BMP obtenus par 33 laboratoires spécialistes du domaine lors de deux séries de tests successifs. Le protocole appliqué avait été préalablement déterminé collectivement lors d'un 1<sup>er</sup> atelier organisé à Leysin (CH) en 2016. Il s'inspire du protocole mis en œuvre en Allemagne par la VDLUFA et fixe de nombreux paramètres au contraire des normes existantes qui autorisent une grande latitude dans la réalisation des tests.

Les résultats montrent que les critères de validation, basés sur la reproductibilité entre des triplicats et l'obtention d'une valeur seuil pour la cellulose pure, permettent de réduire l'étendue des résultats de mesure mais encore insuffisamment. Sans critère de validation l'étendue des mesures par exemple pour le même échantillon de farine fourragère est de 305 à 691 NI CH<sub>4</sub>/kg MO. L'application des critères réduit l'étendue à 318-415 NI CH<sub>4</sub>/kg MO mais seulement 15 tests sur 59 sont validés. L'assouplissement de ces critères permet une plus large validation de 36 tests sur 59, mais l'étendue des mesures est alors de 318 à 460 NI CH<sub>4</sub>/kg MO.

L'analyse des résultats met en évidence de nombreuses questions dont deux récurrentes concernent l'impact de la méthode de mesure du méthane et l'impact de l'inoculum utilisé.

La suite à donner à cette étude sera discutée collectivement lors d'un 2<sup>nd</sup> atelier organisé en Avril 2018 à Munich (DE). L'objectif final est de comprendre les sources de variabilité pour définir un protocole adéquat permettant à un utilisateur qui confie un tests BMP à un laboratoire, d'obtenir un résultat suffisamment fiable pour être utilisé à des fins d'application.

L'organisation de cette étude a été soutenue par l'Office Fédéral de l'Energie (Suisse). Les 33 laboratoires de 14 pays ont participé sur la base du volontariat.

**Optimisation de la mobilisation des CIVE pour la méthanisation dans les systèmes d'exploitation**

S. Marsac, G Espagnol, M Heredia, ARVALIS – Institut du végétal - GIE GAO

N Delaye, F. Labalette, Terres Univia - GIE GAO

V Lecomte, Terres Inovia – GIE GAO

M Bazet, EURALIS

Les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) sont au cœur des stratégies de transition énergétique et de développement de la bioéconomie. Leur valorisation renforce leurs fonctionnalités écosystémiques (Justes, 2012 ; Berti, 2015 ; Martin, 2014 ; Goff, 2010) par de nouvelles fonctions économiques (revenu, résilience des systèmes d'exploitation) et environnementales (énergie renouvelable, lutte contre les émissions de GES - Graß 2013 ; Marsac 2014 ; Szerencsits, 2014). Malgré quelques références sur la conduite des CIVE dans différents pédoclimats français (Expé CIVE - ADEME, CIBIOM - fonds ENERBIO 2010 - 06, Chambre d'agriculture du Loiret, Chambre régionale d'agriculture de Bretagne), les références et évaluations multicritères sur les séquences complètes de 3 cultures en 2 ans sont peu nombreuses en France comme en Europe (Marsac, 2014 ; Szerencsits, 2014). La mise en œuvre de ces intercultures interroge alors sur de nombreux points : coût, impact dans la succession de culture, impact sur l'état organique des sols.

Le programme OPTICIVE a mis en œuvre différentes expérimentations analytiques (choix d'espèce, date de semis, fertilisation, travail du sol dans la succession, impact sur la culture suivante...) et essais de systèmes de culture innovants sur deux plateformes Syppre® du sud-ouest pour analyser les effets sur l'ensemble de la séquence de cultures. Les mesures fines d'état hydrique et azoté de sol ont notamment permis d'adapter le paramétrage du modèle de culture CHN. Des évaluations techniques, économiques et environnementales sont conduites avec l'outil Systerre®. Des mesures de biomasses aérienne et racinaire restituées au champ ont permis d'évaluer l'impact sur l'état organique des sols avec ou sans retour au sol de digestat.

Les fonctions écosystémiques de ces intercultures entre 2 cultures alimentaires sont confirmées voire renforcées avec une conduite adaptée. Les graminées (avoine, triticale...) ou associations simples avec 20% de légumineuses maximum semées avant le 1<sup>er</sup> octobre assurent les productions les plus satisfaisantes (6 à 8 tMS/ha). Le choix d'espèce et de variété doit permettre une productivité maximum la plus précoce possible (15/04) en limitant les risques biotiques et abiotiques. Pour les intercultures d'été semées avant le 10/07, de nombreuses espèces comme le tournesol, le sorgho, le maïs et le millet procurent des productivités équivalentes ou supérieures en conditions d'alimentation hydrique satisfaisantes. Une fertilisation azotée (60 à 100 kg N/ha selon les conditions), notamment via les digestats est toujours valorisée y compris sur les associations. L'adaptation de la précocité de chacune des cultures de la séquence –alimentaires et CIVE - est indispensable, tout comme la simplification du travail du sol pour réduire les délais entre 2 cultures et limiter les impacts sur l'implantation de la culture suivante. Avec ces niveaux de production, la biomasse aérienne non récoltée par les machines (chaumes) représente l'équivalent d'un CIPAN avec près de 2 tMS/ha tandis que la biomasse racinaire produit plus d'1 tMS/ha.

Ces premiers retours d'expérience ont permis de construire des séquences de formation sur la conception de ces séquences de culture. Les évaluations multicritères en cours permettront de chiffrer des indicateurs seuils pour la valorisation de ces couverts en unité de méthanisation. Le modèle CHN paramétré pourra être utilisé et validé avec le retour d'expérience de groupes d'agriculteurs dans différents pédoclimats pour construire des recommandations régionalisées indispensables pour le développement de ces CIVE.

## **Caractérisation des fauchages de bord de route pour la méthanisation (CARMEN)**

I. ZDANEVITCH<sup>1</sup>, J. LENCAUCHEZ<sup>2</sup>, L. DUFFO<sup>2</sup>, C. PINEAU<sup>3</sup>, T. RIBEIRO<sup>4</sup>, L. ANDRE<sup>4</sup>

<sup>1</sup> INERIS, BP 2, F - 60550 Verneuil en Halatte

<sup>2</sup> AILE, 73, rue de Saint-Brieuc - CS 56520 - F - 35065 RENNES Cedex

<sup>3</sup> CEREMA OUEST : MAN - 9 rue René Viviani - BP 46223 - NANTES cedex 2

<sup>4</sup> UniLaSalle, UR 2018.C103 Transformations & AgroRessources, Rue Pierre Waguët, BP 30313, F - 60026 Beauvais Cédex, France

Depuis plusieurs années, certains territoires dont le département de la Mayenne ont développé le fauchage des bords de route avec exportation (FAE), couplé à une limitation du nombre de fauchages par an. Ce mode de gestion raisonnée apporte plusieurs bénéfices environnementaux (limitation des fuites d'azote vers les eaux de surface et souterraines, lutte contre les plantes invasives, limitation de la repousse des herbes...). De plus, les herbes exportées sont valorisées par compostage ou méthanisation. Le niveau de contamination de cette biomasse, notamment en métaux lourds ou hydrocarbures aromatiques polycycliques, a été peu étudié. Cette question ainsi que les aspects logistiques et économiques liés à la valorisation par méthanisation ont fait l'objet d'un projet de recherche sur deux ans. Les premiers résultats ont été présentés aux JRI Méthanisation en 2017.

Durant ces deux années, six sites de fauche, de différentes typologies, ont fait l'objet de trois campagnes de prélèvement, de façon à représenter un panel de situations d'environnement et de trafics allant de 4 000 véhicules par jour, sur une route départementale en Mayenne, à plus de 100 000 véhicules par jour sur le périphérique de Rennes. Les résultats obtenus ont été complétés par des prélèvements de sols sur les zones de fauchage et des prélèvements d'herbes et de sols témoins dans des lieux proches des routes, mais en-dehors de l'influence directe du trafic.

Deux essais de digestion anaérobie ont été menés dans trois pilotes, en mélange avec des fumiers et lisiers de bovins, ce qui a permis d'établir la meilleure proportion d'herbes par rapports aux effluents d'élevage et d'analyser les ETM et HAP à la fois sur les herbes et les effluents avant méthanisation et sur le digestat après digestion.

Enfin, les éléments de logistique (distances parcourues, nombres d'opérateurs, temps passé, consommations de carburants) des gestionnaires des sites ruraux ont été relevés en vue d'établir le bilan coûts-bénéfices du fauchage avec exportation.

Hormis certains échantillons du périphérique de Rennes présentant des teneurs élevées en zinc pour lesquels des hypothèses peuvent être avancées, les résultats d'analyse sont similaires sur les trois campagnes et montrent des teneurs des herbes exportées chez les méthaniseurs, tant en métaux lourds qu'en HAP, très inférieures aux valeurs limites prescrites par la norme NF U 44-051 pour la qualité des composts. Le digestat issu de ces herbes est donc compatible avec le retour au sol.

L'étude coûts-bénéfices en cours de finalisation, semble montrer que le fauchage avec exportation présente un surcoût économique d'environ 50 % par rapport à l'abandon des herbes sur place, mais que des économies sont envisageables sur l'entretien des routes sur 20 ans. Les bilans énergétique, environnemental et sociétal, sont positifs, même si ce dernier est plus délicat à quantifier.

## Projet PAM : Prétraitement des déchets agricoles pour l'optimisation de leur valorisation par méthanisation

Helen COARITA<sup>1</sup>, Mitra TEHRANCHI<sup>3</sup>, Ruben TEIXEIRA FRANCO<sup>1</sup>, Pierre BUFFIERE<sup>1</sup>, Rémy BAYARD<sup>1</sup>, Stéphane PACAUD<sup>2</sup>, Bruno CHANUDET-BUTTET<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université de Lyon, INSA Lyon, Laboratoire DEEP, EA7429, 69621 Villeurbanne

<sup>2</sup> Université de Lorraine, ENSAIA, 2 Avenue de la Forêt de Haye, 54500 Vandœuvre-lès-Nancy

<sup>3</sup> NOREMAT, 166 Rue Ampère, 54710 Ludres

Le déploiement de la méthanisation agricole en France s'accompagne de nombreux questionnements techniques. La plupart des installations françaises sont des technologies de type infiniment mélangé en voie humide, configurées pour des intrants typiquement rencontrés en Europe du Nord (lisiers, maïs). Toutefois, les conditions de l'élevage bovin sont différentes avec, en France, une production de résidus majoritairement sous la forme de fumier. La présence de paille confère à ces intrants un caractère solide et hétérogène. De plus, la ration du méthaniseur est très souvent complétée par des co-substrats de composition et caractéristiques très variables (herbes ensilées ou non, résidus organiques des IAA) avec pour conséquence des installations qui n'atteignent pas le potentiel de conversion en méthane estimé et qui rencontrent des difficultés d'homogénéisation et de mélange dans les digesteurs.

Parmi les solutions prometteuses, l'amélioration de la préparation de la charge au moyen de systèmes mécaniques est l'objet du projet PAM « Prétraitements Avant Méthanisation » (programme GRAINE de l'ADEME) : de nombreux équipements sont proposés sur le marché (pulpeurs, pompes dilacératrices, broyeurs, malaxeurs), mais peu d'informations techniques et économiques sont disponibles sur de tels dispositifs, qui permettraient de quantifier les gains d'efficacité. C'est tout l'enjeu du présent projet qui vise à répondre à des questionnements scientifiques liés à l'origine et à la quantification des gains de productivité, induits par la mise en place de technologies avancées de préparation de la charge dans le cas d'effluents d'élevages de type fumiers ou herbe : conditions de préparation de la charge et augmentation de la vitesse et du potentiel de bioconversion, équilibre de la ration (fractions solubles/insolubles), amélioration de la ration et gain d'efficacité du réacteur.

Cette présentation apporte un regard scientifique et pratique sur des systèmes de préparation mécanique de fumiers étudiés au cours de la première année du projet PAM. Outre la méthodologie et la sélection de sites de méthanisation à étudier, les résultats présentés concernent les premiers essais expérimentaux réalisés sur fumier de bovin collecté sur la ferme de La Bouzule (propriété de l'ENSAIA de Nancy), et prétraité *in situ* avec un équipement de broyage et défibrage. Plusieurs techniques analytiques avancées ont été mises en place afin de caractériser l'effet du dispositif de

prétraitement à la fois au niveau des propriétés mécaniques et de texture (granulométrie, rétention en eau), que des propriétés biochimiques (composition chimique, biodégradabilité) ou cinétiques de biodégradation.

Enfin, l'exploitation des conclusions des expériences du projet PAM conduiront à faire la synthèse de bonnes pratiques des conditions de préparation des rations avant méthanisation agricole pour les acteurs de la filière (agriculteurs méthaniseurs, bureaux d'étude et de conseil, financeurs, etc.). La maîtrise de cette étape aura aussi un impact positif sur le bon fonctionnement et l'entretien des outils (pompes, canalisations, mélangeurs, agitateurs) ainsi que sur la puissance et la consommation énergétique de tels outils.

LABOUBEE Céline / Solagro  
DAMIANO Armelle / AILE

Methalae : Comment la méthanisation peut être un levier de l'agro écologie

D'une durée de 3 ans, ce programme CASDAR est multi-partenarial : Trame, Aile, CA 49, CER France, Methaneo et Lycée de Périgueux, et coordonné par Solagro. Il a pour objectif d'apporter un regard, issu d'une démarche scientifique, sur les impacts de la méthanisation, au sein des exploitations agricoles et sur les territoires, à la fois sur les plans techniques, environnementaux, économiques et sociétaux. Il s'agit notamment d'explicitier les adaptations apportées aux systèmes agricoles par les agriculteurs engagés dans des projets de méthanisation individuels ou collectifs et de comprendre en quoi la méthanisation peut également amener les agriculteurs à s'insérer dans une démarche agro-écologique, incluant sa dimension sociale. En effet, le potentiel de développement de la méthanisation rurale ne pourra se concrétiser que s'il est démontré que ses impacts environnementaux et sociétaux sont positifs.

Dans sa dernière année de réalisation, ce programme a permis d'enquêter 46 exploitations agricoles françaises, engagées pour moitié dans un projet de méthanisation individuel et pour l'autre dans une unité collective. Ces exploitations ont été enquêtées sur 3 campagnes agricoles : une avant la mise en service de l'unité de méthanisation, les deux autres après la mise en service de l'unité. Les partenaires sont en cours de traitement des données collectées et seront en mesure d'avoir une vision claire des impacts d'une unité de méthanisation sur les exploitations agricoles et leurs systèmes.

Parmi les leviers de transition vers l'agro-écologie, qui ont déjà été identifiés dès la fin de la seconde phase d'enquête, peuvent être listés :

- évolution de l'alimentation animale vers plus d'autonomie,
- amélioration de bien être et de la santé animale,
- dégagement de temps de travail,
- évolution des pratiques de fertilisation (une autonomie azotée parfois atteinte),
- amélioration de la qualité du sol et des productions,
- souplesse du système exploitation,
- ...

Ces premières pistes d'amélioration agro écologiques, au sein des exploitations agricoles et des territoires, sont en cours de validation au travers de l'exploitation des données collectées au cours de la dernière année d'enquête. Les résultats consolidés du programme seront présentés lors du séminaire de clôture du programme fin octobre 2018, ou en avant-première lors des JRI

**Session**  
**POSTERS**

## Les digestats : une réponse à la fertilité des sols dans un contexte de réduction des intrants de synthèse ?

Piutti Séverine<sup>1</sup>, Laflotte Alexandre<sup>2</sup>, Genestier Julie<sup>1</sup>, Ravard Benjamin<sup>2</sup>, Le Roux Yves<sup>3</sup>, Pacaud Stéphane<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Lorraine, INRA, UMR 1121 Agronomie et Environnement, TSA 40602, F-54518 Vandoeuvre-lès-Nancy cedex

<sup>2</sup> Université de Lorraine, ENSAIA, Centre R et D, TSA 40602, F-54518 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex

<sup>3</sup> Université de Lorraine UR-AFPA, TSA 40602, F-54518 Vandoeuvre-lès-Nancy cedex

L'utilisation de biomasse en méthanisation permet de générer des coproduits de réaction correspondant à une matrice organique résiduelle i.e. digestats (Zhang *et al.*, 2007) qui peuvent être utilisés en agriculture comme engrais et/ou amendements organiques (Möller et Müller, 2012). Si de nombreux verrous ont été levés ces dernières années sur la faisabilité technique autour de la mise en place d'unités de méthanisation, de nombreuses questions sont actuellement adressées à la profession agricole concernant la valorisation agronomique des digestats en tant qu'engrais et/ou amendements organiques. Si les digestats, du fait de leur teneur en azote minéral, pourraient permettre de réduire les quantités d'engrais de synthèse épandus sur les systèmes de culture, peu de données sont encore disponibles dans la littérature scientifique sur leurs impacts à court et moyen terme sur l'abondance, la diversité et les fonctions microbiennes des sols (en lien avec la fertilité et le stockage de C). L'un des objectifs du projet Interreg PERSEPHONE est de comparer dans différentes conditions pédoclimatiques (France, Belgique, Luxembourg et Allemagne) les effets de différentes modalités de fertilisation (digestat vs engrais chimiques vs lisier brut vs témoin non fertilisé) sur la production de fourrage en prairies (quantité de biomasse et qualité) et sur différentes variables en lien avec la fertilité des sols (pools de carbone (C) et azote (N) des sols, activités enzymatiques microbiennes). Les hypothèses testées sont les suivantes :

- les digestats du fait de leurs caractéristiques (faible C/N, teneur en N inorganique, pH) peuvent modifier à court terme la diversité des communautés microbiennes du sol et influencer, du fait des équilibres stoechiométriques de ces communautés, les activités enzymatiques marqueurs de la minéralisation des matières organiques (MO).
- les digestats modifient à moyen voire long terme les pools de C et N dans les sols (en termes de quantité et de qualité).

Les résultats de caractérisation, menée avant mise en place des essais sur chacun des 4 sites expérimentaux étudiés, mettent en évidence des différences à la fois sur les variables physico-chimiques et microbiennes témoignant de l'existence d'un gradient de type de sol et de réponses à l'épandage de digestats potentiellement différentes. A l'issue de la première année de suivi, la production fourragère cumulée des 5 fauches réalisées entre mai et octobre 2017 n'est pas significativement différente entre les modalités digestats et lisiers bruts. Les conditions hydriques particulièrement limitantes de la campagne 2017 ont induit une production fourragère supérieure dans la modalité de fertilisation strictement chimique. Concernant les variables microbiennes du sol, l'analyse en composante principale réalisée sur l'ensemble des sites ne permet pas de discriminer à l'issue de la première année d'expérimentation (octobre 2017) de réponses différentielles selon les modalités de fertilisation étudiées. Néanmoins à l'échelle de chaque site, le suivi temporel des variables microbiennes sur la saison révèle une sensibilité saisonnière plus importante des variables d'activités enzymatiques que des variables reflétant la taille des pools de C et N du sol. L'ensemble des données acquises au cours de ce projet permettra de communiquer vers le monde agricole sur les effets des digestats sur le fonctionnement du sol dans les différentes conditions pédoclimatiques différentes.

Titre : Alimentation des unités de méthanisation agricoles ; nature des substrats, origine, quantités, potentiel gaz

L'état des lieux présenté concerne un panel de 50-60 unités de méthanisation agricoles en service depuis 2 ans ou plus. Il est issu des travaux d'enquête réalisés dans le cadre du programme Prodigé porté par l'APCA et les Chambres d'Agriculture de 8 grandes régions.

Les substrats organiques utilisés sont décrits et quantifiés en tonnage de matières brutes, de matières organiques et de potentiel biogaz. Leurs natures (effluents d'élevage, résidus végétaux, cultures intermédiaires, cultures énergétiques, déchets) et leurs origines (agricoles ou autres) sont présentées.

Une évaluation par site du coût global de la ration rapporté à l'énergie du biogaz produit (par MWh pci) est établie.

Des éléments qualitatifs concernant les difficultés d'approvisionnement ou d'utilisation de certains substrats sont également évoqués.

## L'amélioration de la gestion et de la valorisation des digestats grâce au Bactériolit®

---

SOBAC, ZA LIOUJAS 12740 LIOUJAS, France

---

### Résumé :

*Problématique :* Les digestats issus de méthanisation sont des effluents composés d'une forte proportion d'azote minéral. Des pertes conséquentes ont lieu lors du post traitement (séchage), du stockage, de l'épandage et au niveau du sol.

*Objectif :* Montrer et quantifier l'action d'un complexe de microorganismes sur l'amélioration de la valorisation des digestats.

### *Méthodologie et résultats :*

Il existe aujourd'hui différentes méthodes pour valoriser les digestats. Nous détaillons ici des résultats obtenus sur trois modes de stockage/valorisation différents.

Le premier résultat a été obtenu sur une installation de méthanisation qui composte et sèche ses digestats avec insufflation d'air chaud. La problématique à traiter était ici l'ambiance du bâtiment qui était perturbée par des dégagements d'ammoniac. L'utilisation du complexe de microorganismes Bactériolit® dans les digestats a permis de diviser par plus de 4 les dégagements d'ammoniac au bout de 15 jours de compostage/séchage. Les consommations de réactif liées au traitement de l'air ont été réduites de 40%, les purges ont aussi été réduites et les composts enrichis en azote de 10%.

Le deuxième résultat a été obtenu sur une installation de méthanisation qui composte ses digestats solides issus d'une séparation de phase. Un suivi comparatif a été réalisé entre T=0 et T=55 jours sur des modalités ensemencées ou non en Bactériolit®. Les résultats montrent une diminution de 35 % des pertes de matière organique avec le Bactériolit® à 55 jours. Il a également été mesuré 40 % d'azote en plus dans le digestat Bactériolit® par rapport au témoin et une réorganisation de 33 % de l'azote minéral en organique.

Le troisième résultat a été obtenu en suivant l'évolution d'un digestat liquide au stockage. Le Bactériolit® a ici permis de réduire les pertes de matières de 12 % et de réduire de 36 % les pertes d'azote au stockage.

*Conclusion et application :* Il a ainsi été validé que le Bactériolit® permet dans tous les cas d'éviter les pertes de matière organique et minérale sur un digestat. Il participe aussi à la réduction des nuisances olfactives mais également des pollutions hydriques en retransformant une partie de l'azote minéral en azote organique. Bactériolit® apparaît aujourd'hui comme un outil pour pallier aux pertes à la fois par volatilisation et lessivage par le vivant sur les exploitations de méthanisation. Il est également un outil pour lutter contre le réchauffement climatique grâce à la diminution des gaz à effet de serre produits sur les exploitations travaillant avec le Bactériolit®.

Ces résultats doivent être accompagnés des résultats aux champs suite à l'épandage des digestats. Un travail de suivi et de recherche a ainsi été réalisé sur le retour au sol des digestats Bactériolit®, les rendements et qualité des cultures. Il fait l'objet d'une autre étude.

**Mots clés :** Méthanisation, Digestat, Bactériolit®, Sobac, Ammoniac, Azote

## L'amélioration de l'accessibilité de la matière organique et de la production d'énergie sur les installations de méthanisation grâce au Bactériométh<sup>®</sup>

---

SOBAC, ZA LIOUJAS 12740 LIOUJAS, France

---

### Résumé :

#### *Problématique :*

« La méthanisation à la française » traite en partie des fumiers pailleux qu'il est parfois difficile d'alimenter dans le digesteur du fait de leurs textures et qui ne se transforment pas en totalité. Il arrive également sur certaines installations de voir dans le digesteur des amas de matière se former qui perturbent le fonctionnement de la biologie et de l'agitation.

#### *Objectif :*

L'objectif de cette étude est de suivre la production d'énergie sur une installation de méthanisation utilisant du Bactériométh<sup>®</sup>.

#### *Méthodologie et résultats :*

Le Bactériométh<sup>®</sup> a été positionné soit lors de la création des litières directement sous les animaux pour les fumiers ou bien en création de ration sur dalle ou dans les fosses à la dose moyenne de 1kg/m<sup>3</sup> de substrat entrant digesteur.

Les résultats obtenus sur les installations utilisant le Bactériométh ont montré une augmentation de la production d'énergie dans tous les cas. Cet article présente les données mesurées sur deux installations : une en voie sèche et l'autre en voie infiniment mélangé. Un suivi en laboratoire est également présenté.

Une augmentation de production d'énergie a ainsi été mesurée dans tous les cas, à des valeurs différentes suivant les rations, les process et les temps de séjour.

De plus, il a été observé sur les installations de méthanisation infiniment mélangé une diminution de l'énergie d'agitation consommée (exemple présenté ici à -24%). Une diminution des odeurs au stockage a également été observée dans tous les cas.

#### *Conclusions et applications :*

Les effets du Bactériométh<sup>®</sup> obtenus à grande échelle et en laboratoire vont dans le même sens.

Chaque suivi a montré une augmentation significative de production d'énergie suite à l'ajout du Bactériométh<sup>®</sup>. On observe également en voie infiniment mélangé une amélioration de l'homogénéité dans le digesteur et une optimisation de l'agitation. Le Bactériométh<sup>®</sup> a permis la disparition totale de croûtes et amas de matières flottantes dans le digesteur. En voie sèche on améliore à la fois la cinétique de production mais également la production cumulée.

L'applicabilité et la transférabilité sur le terrain de l'emploi du Bactériométh<sup>®</sup> sont tout à fait en accord avec le fonctionnement des installations.

Il peut être utilisé en dose de routine lorsqu'il est recherché une action sur des fumiers très pailleux ou résidus ligneux qui ont du mal à évoluer. On peut également l'utiliser sous forme de cure pour pallier à un taux de matière sèche qui augmente de façon anormale ou pour améliorer le fonctionnement de la biologie.

## Optimiser et flexibiliser l'alimentation des unités de méthanisation

C.Charnier<sup>1,\*</sup>, S.Pacaud<sup>2</sup>, M. Fick<sup>2</sup>, C.Marcilhac<sup>1</sup>, J.Budin<sup>1</sup>, E.Lecadre<sup>4</sup>, C.Richard<sup>4</sup>, J.Miroux<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> BioEnTech, 74 Av. Paul Sabatier, 11100, Narbonne, France.

<sup>2</sup> Ensaia-Université de Lorraine, 2 avenue de la Forêt de Haye, 54518 Vandoeuvre.

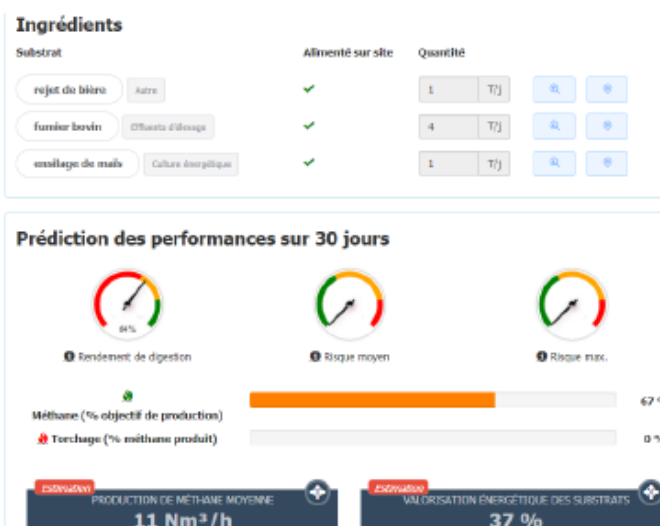
<sup>3</sup> ENGIE lab CRIGEN, 361 avenue du Président Wilson, 93210, Saint-Denis.

\*Correspondance: cyrille.charnier@bioentech.eu, +33 633 33 06 47.

L'alimentation est un paramètre déterminant des performances du procédé digestion anaérobie. Elle est d'autant plus importante que le secteur se développe. Le stress sur les gisements et la mise en place de nouvelles solutions logistiques facilitant les interactions digesteurs/gisements vont bouleverser le fonctionnement des unités de méthanisation. Les unités collectives, agricoles et de station d'épuration devront diversifier les substrats avec des recettes de plus en plus flexibles pour assurer la rentabilité des unités. Cependant, l'optimisation de la ration d'alimentation est complexe. Elle dépend des contraintes opérationnelles de l'unité et nécessite un haut niveau d'expertise. De par le temps de séjour élevé des unités, il est fondamental d'anticiper leur fonctionnement pour en optimiser les performances. Par conséquent, anticiper les performances du procédé de digestion anaérobie en fonction de la recette d'alimentation est l'un des challenges de l'optimisation des unités à temps de séjour long.

Nous proposons de répondre à cette problématique par une interface de simulation permettant à l'exploitant de simuler diverses recettes d'alimentation et d'estimer les performances associées [1][2][3][4]. Cette prédiction permet de choisir la meilleure stratégie d'alimentation pour l'unité en fonction des gisements disponibles dans les alentours ou sur des plateformes comme celle étudiée dans le cadre du projet MAPPED (PIA-ADEME). En estimant les performances de chaque recette, l'outil conforte l'exploitant dans ces

choix et lui permet de flexibiliser son plan d'approvisionnement. Au jour le jour, MeMo prend le relais pour adapter la recette choisie en fonction de l'état biologique du digesteur. MeMo fournit des recommandations d'alimentation substrats par substrats. Pour illustrer ces outils et leurs bénéfices, nous nous appuyons sur le retour d'expérience obtenu sur l'unité de la ferme expérimentale de la Bouzule, ENSAIA, dans le cadre du projet ANR Autoferm ainsi que sur les retours d'expériences dans le cadre du projet MAPPED. Ce retour conforte les besoins des exploitants qui restent toujours suspendus à des potentiels méthanogènes qui intègrent très mal la variable vitesse. Exploiter son unité à 100%, h24, est un défi sur du long terme qui doit passer par la mise en œuvre d'aide à la décision. Ici MeMo s'est bien approprié cette question et apporte une réponse pertinente que l'unité de l'Ensaia a pu valider. La démarche d'amélioration continue mise en place par BioEntech en fait un produit qui colle au plus près de la demande.



**Eléments d'aide à la réflexion permettant de mieux appréhender l'impact sur les pratiques agricoles du recours aux cultures et aux résidus de culture en méthanisation ainsi que de l'utilisation du digestat**

Audrey EL HABTI / S3d Ingénierie

La région Bourgogne Franche Comté compte une quarantaine d'installations de méthanisation en fonctionnement dont 35 installations à la ferme. On comptabilise une vingtaine de nouveaux projets actuellement en développement ou en construction. Plusieurs projets prévoient d'avoir recours de manière plus ou moins importante à des cultures énergétiques, implantées comme intercultures et/ou cultures principales. Dans certains cas, les porteurs de projet souhaiteraient aller au-delà des quantités permises par le cadre régional d'attribution de subventions à l'investissement qui limite la part de cultures à 25% de l'énergie produite.

L'étude commandée par l'ADEME BFC à S3d Ingénierie visait à présenter les connaissances et retours d'expérience disponibles en région, afin de fournir des éléments d'aide à la réflexion permettant de mieux appréhender l'impact sur les pratiques agricoles du recours aux cultures et aux résidus de culture en méthanisation, ainsi que de l'utilisation du digestat.

Les préconisations issues de cette étude visent à déterminer les orientations à promouvoir pour favoriser le développement d'une filière de méthanisation agricole s'appuyant sur des systèmes vertueux combinant la méthanisation, les cultures énergétiques et l'utilisation du digestat.

En s'appuyant sur un état de l'art à l'échelle nationale et un état des lieux basé sur des enquêtes auprès des agriculteurs méthaniseurs en Bourgogne Franche Comté, ce travail a permis de montrer que ces pratiques peuvent être vertueuses du point de vue du système global de production agricole et énergétique.

L'état des lieux des pratiques montre que le recours aux cultures intermédiaires à vocation énergétiques présente des intérêts agronomiques, environnementaux et économiques sur les exploitations concernées, avec parfois une proportion de CIVE allant au-delà des limites fixées par le cadre régional. Un assouplissement du cadre régional semble donc possible, sous réserve d'analyser les conditions du recours aux CIVE dans le plan d'approvisionnement et les hypothèses retenues au stade de l'étude de faisabilité de chaque projet au cas par cas.

Les résidus de culture disponibles en région sont les menues pailles et les cannes de maïs : ces gisements sont intéressants à mobiliser autant que possible, et là encore une analyse des conditions de mobilisation est à réaliser au cas par cas pour en déterminer la faisabilité technique et organisationnelle ainsi que l'intérêt économique.

Enfin, la valorisation du digestat est un atout unanimement reconnu pour améliorer les pratiques de fertilisation sur les exploitations agricoles et réaliser des économies d'engrais substantielles. Cependant, des marges de progrès subsistent sur les pratiques d'épandage et la précision des apports, et des questions techniques restent à approfondir pour s'assurer d'un impact environnemental positif sur les sols et l'eau à long terme.

## Utilisation de résidus d'origine algale en digestion anaérobie : performances en pilote continu et qualité agronomique des digestats

F. MONLAU<sup>1</sup>, E. ARRIBARROUY<sup>1</sup>, C. PEYRELASSE, J.F. LASCOURREGES<sup>1</sup>, C. LAGNET<sup>1</sup>

<sup>1</sup> APESA, Plateau technique, Cap Ecologia, Avenue Frédéric Joliot Curie, 64230 Lescar, France.

\*Correspondance: florian.monlau@apesa.fr, +33 688491845.

La culture d'algues a retenu une forte attention au niveau R&D et industriel ces derniers temps notamment pour la production de biodiesel (Chisti, 2007; Sialve et al., 2009). Toutefois, la rentabilité économique du biodiesel algal peut nécessiter d'intégrer le procédé dans un schéma de bioraffinerie environnementale où les co-produits sont valorisés. C'est dans ce cadre que s'intègre le projet CYCLALG (<http://www.cyclalg.com>) du programme Interreg POCTEFA dont l'APESA est partenaire. Les travaux ont porté sur la souche *C. protothecoides* (cultivée en hétérotrophie). Après une extraction des lipides et des protéines par voie chimique (KOH, éthanol) et enzymatique respectivement, l'APESA a travaillé sur la valorisation du résidu final par méthanisation. Les objectifs recherchés étaient :

- De valider les performances et la stabilité de la dégradation de tels résidus en méthanisation ;
- D'étudier la qualité agronomique du digestat produit.

Le résidu algal présentait une teneur en MS de 93,1% PB et une MO de 77,6% MS. Après la réalisation d'un test de potentiel méthanogène (BMP) sur le résidu, un essai a été réalisé sur un pilote continu mésophile de 4 litres (volume utile) afin de valider les performances. Ce pilote était automatisé en terme d'alimentation et de sous-tirage (i.e. pompe péristaltique). Les paramètres de fonctionnement (pH, AGVs/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, RedOx) ont été monitorés quotidiennement tout comme la composition du biogaz (i.e. CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S par micro GC-TCD, Varian 490). La concentration en ammonium (kits spectrophotométrique, WTW) et en AGVs totaux (GC-FID, Agilent 7890B) ont été suivis une fois par semaine. Après une brève montée en charge, la CVO (Charge Volumique Organique) a été fixée à environ 2.6 kgMO/m<sup>3</sup>/jour, correspondant à un TSH (Temps de Séjour Hydraulique) d'environ 30 jours. En parallèle, la qualité agronomique du digestat produit sur les trois dernières semaines de l'essai a été caractérisée selon la norme NFU-44051 et par des tests de croissance sur plantes (i.e. tomates, blé).

Dans un premier temps, les essais BMP ont montré que le résidu algal peut générer une production de méthane de 185 (±12) Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t MO. Les essais en pilote ont confirmé les résultats avec une production de méthane sur les quatre dernières semaines d'essai de 196 (±5) Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t MO et une teneur en CH<sub>4</sub> de 62%. Tout au long de l'essai une bonne stabilité des paramètres de fonctionnement a été observée avec notamment un ratio AGVs/HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> qui est resté en dessous de 0.3, seuil indiquant une bonne stabilité du système (Sambusiti et al., 2013). Le digestat produit présentait une teneur en MS de 6,6 g/100g et une MO de 65,2 g/100gTS. Les concentrations en éléments nutritifs ont été mesurées : NTK : 3.02 (±0.17) g/100gTS ; NH<sub>4</sub><sup>+</sup> : 0.65 (±0.04) g/100gTS ; K<sub>2</sub>O : 5.1 (±0.02) g/100gTS ; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : 3 (±0.01) g/100gTS ; SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> : 0.42 (±0.06) g/100gTS. Les divers éléments traces métalliques (AS, CD, Cr, Hg, Ni, Pb, Se, Cu, Zn) étaient tous à des teneurs inférieures à celles recommandées par la norme NFU-44051. Les tests agronomiques sont en cours d'essais et seront présentés lors des JRI.

## Actualités réglementaires pour la mise sur le marché des fertilisants issus de sites de méthanisation

P. CHENON

VoxGaia, 50 rue Pierre et Marie Curie – F-68700 Cernay  
Correspondance : [pascale.chenon@voxgaia.fr](mailto:pascale.chenon@voxgaia.fr), +33 6 79 54 20 21.

Dans le cadre du *Plan Énergie Méthanisation Autonomie Azote (EMAA)*, le Ministère en Charge de l'Agriculture a souhaité développer les unités de méthanisation et encourager les démarches de mise sur le marché des digestats issus de ces installations. Différents travaux ont été et sont actuellement menés dans ce sens que cela soit directement par des exploitants, par les différents ministères (programme Valdipro, groupe de travail présidé par le secrétaire d'État auprès du Ministre de la transition écologique et solidaire, ...) ainsi que par le Bureau de Normalisation des matières fertilisantes (BNFerti).

L'objectif de cette communication est de présenter la réglementation de la mise sur le marché des fertilisants issus de sites de méthanisation pour la rendre accessible aux différentes parties prenantes et de faire un état des lieux de son avancement.

En France, la principale voie de mise sur le marché pour les matières fertilisantes, leurs adjuvants et les supports de culture (MFSC), telles que prévues par l'article L 255-2 du Code Rural et de la Pêche Maritime, est l'autorisation de mise sur le marché (AMM) délivrée par l'ANSES et nécessitant une procédure d'évaluation préalable.

Il existe cependant des dérogations à la règle de l'AMM, dont les principales sont la conformité à une norme française rendue d'application obligatoire par un arrêté interministériel ; la conformité à un cahier des charges approuvé par voie réglementaire ; la conformité à une réglementation européenne de mise sur le marché des MFSC ; le respect des dispositions du Code de l'Environnement relatives aux déchets épandus sur les terrains agricoles (plan d'épandage),

Ces différentes possibilités réglementaires pour les fertilisants issus de la méthanisation ainsi que les évolutions en cours seront exposées aux JRI Biogaz Méthanisation de Rennes. Aujourd'hui ces innovations concernent principalement le cahier des charges CDCAgri1, le projet d'harmonisation européenne pour la mise sur le marché des fertilisants et la normalisation française avec le projet d'introduction de trois nouvelles dénominations correspondant à des fertilisants pouvant être issus de sites de méthanisation (solutions de sulfate ou de nitrate d'ammonium et solutions de phosphate d'ammonium.).

Un focus sera également fait sur les avis et décisions de l'ANSES qui permettent la mise sur le marché de huit digestats à ce jour.

Nouvelles voies de valorisation des digestats, à faible impact environnemental.

La production de biogaz est l'un des leviers importants de l'accroissement de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique, en particulier lorsqu'elle est conjuguée avec la valorisation de gisements de carbone 'fatal'. En l'absence de tri, le devenir des constituants issus des matières premières et non transformés en biogaz pose au moins deux problèmes majeurs :

1. les volumes considérables à stocker puis à transporter et à épandre : la conception actuelle des unités de méthanisation conduit à 30 000 à 40 000 tonnes de digestat brut par an pour une capacité de l'ordre de 1 MW
2. l'augmentation des capacités de méthanisation sur un territoire donné conduit 'mécaniquement' à l'allongement des distances moyennes d'épandage, à l'augmentation des temps & coûts de transport, et fini parfois par se heurter à un manque de terres et/ou de périodes autorisées pour l'épandage.

Face à ce goulot d'étranglement, les deux principales approches en cours en Europe sont la réduction des volumes et les transferts sur longue distance. Centré sur l'élimination d'eau, l'évaporation ou le séchage de digestats mettent en œuvre des énergies importantes de plusieurs centaines de kWh par tonne de digestat brut, énergies pas toujours disponibles 'gratuitement'. Centré sur l'élimination de matières solides, la séparation de phase aboutit à une réduction de 5 à 25% du volume de digestat brut.

NEREUS propose et met en œuvre une approche nouvelle pour trier in situ et avant stockage les constituants principaux des digestats, et élargir les voies de valorisation possible, tout en réduisant fortement l'empreinte environnementale de la prise en charge des digestats.

La base de ce tri s'appuie sur quatre opérations unitaires :

- la séparation de phase extrait une fraction solide
- la nanofiltration céramique extrait une fraction organo-minérale concentrée
- l'osmose inverse basse pression extrait une fraction minérale et de l'eau
- la cristallisation extrait une fraction minérale solide

A ce stade, seulement 9 à 15 kWh par tonne de digestat brut sont requises, et le volume à stocker puis transporter & épandre a été réduit de 50 à 60%. Une forte baisse des émissions de CO<sub>2</sub> résulte ainsi à la fois d'une transformation 10 fois moins énergivore et d'une nette réduction des tonnages transportés et des distances parcourues.

L'impact qualitatif sur l'épandage est tout aussi important : disposer des unités fertilisantes dans des volumes réduits, disposer séparément des formes organique et minérales des éléments, cela permet de mieux cibler les apports (dates, quantités, types) et de réduire fortement les pertes se retrouvant soit dans les masses aquatiques soit à l'atmosphère.

Ce premier tri ouvre des possibilités de valorisation autres que l'épandage : dans le cadre du projet Perséphone, diverses voies sont explorées telles que :

- la production de micro algues, rendue possible par le caractère clarifié du concentrat d'osmose inverse, riche en nutriments
- la récupération d'unités fertilisantes minérales sous forme solide, facilitée par le couplage cristallisation – nanofiltration céramique.

L'approche NEREUS est à présent mise en œuvre à pleine échelle (0,5 – 5 tonnes / heure) pour la séquence de base de tri de digestat, les résultats de plus de deux ans de retour d'expérience étant présentés aux JRI 2018. Avec un coût total de 3,5 +/- 0,3 €/tonne de digestat brut pour une capacité de 40 000 tonne par an, l'économie rejoint l'écologie et le développement durable.

## Etude de l'impact des prétraitements alcalins et du génotype sur la digestion anaérobie du sorgho et du miscanthus

Hélène Thomas<sup>1</sup>, David Pot<sup>2</sup>, Maryse Brancourt-Hulmel<sup>3</sup>, Stéphanie Arnoul<sup>4</sup>, Joël Alcouffe<sup>5</sup>,  
Patrice Jeanson<sup>6</sup>, Pierre Malvoisin<sup>7</sup>, Hélène Carrère<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LBE, Univ Montpellier, Inra, 102 Avenue des Etangs, 11100 Narbonne

<sup>2</sup> CIRAD, UMR AGAP, 34398 Montpellier

<sup>3</sup> INRA UR1158 AgrolImpact, 2 Chaussée Brunehaut, Estrées-Mons, 80203 Péronne

<sup>4</sup> INRA, UE0972 GCIE, 2 Chaussée Brunehaut, Estrées-Mons, BP 50136, F-80203 Péronne

<sup>5</sup> RAGT Semences, Centre de Recherche La Courtade Haute 81600 Rivières

<sup>6</sup> Euralis Semences, Domaine de Sandreau, 31700 Mondonville

<sup>7</sup> Aelred, 91058 Evry

Trois ans après une première présentation du projet BFF (Biomass For the Future, <http://www.biomassforthefuture.org/>) aux JRI de février 2015, cette présentation a pour objectif de faire un bilan des avancées des travaux sur la méthanisation des deux cultures développées dans le projet : le sorgho et le miscanthus.

Les potentiels méthane de 14 génotypes de sorghos 2<sup>ème</sup> génération issus du croisement de parents élités (de 241 à 323 NmLCH<sub>4</sub>/g<sub>MV</sub>) se sont révélés statistiquement plus élevés que ceux des génotypes de 1<sup>ère</sup> génération (5 génotypes commerciaux analysés de 239 à 303 NmLCH<sub>4</sub>/g<sub>MV</sub>). Les BMP des génotypes de 2<sup>ème</sup> génération cultivés en milieu irrigué étaient statistiquement supérieurs à ceux non irrigués (12% en moyenne). En revanche, le rendement en matière sèche à l'hectare est génotype dépendant et plus élevé pour les cultures irriguées (les rendements varient de 5 à 21 tMS/ha). De plus, les variations du rendement en matière sèche à l'hectare sont beaucoup plus importantes que les variations de potentiels méthanogènes. La production de méthane rapportée à l'hectare est donc supérieure dans le cas des cultures irriguées (de 13% en moyenne). Le rendement de biomasse étant le paramètre le plus important, il convient de diriger la sélection pour maximiser leur potentiel méthane sur les génotypes présentant un fort rendement en biomasse.

Par ailleurs, 19 génotypes de sorgho ont été cultivés en culture dérobée avec irrigation. Leurs BMP sont dans la même gamme que ceux en culture principale, voire légèrement supérieurs.

De plus, l'étude de l'impact du l'ensilage versus le stockage après séchage sur le BMP des sorghos est actuellement en cours sur 5 génotypes.

En ce qui concerne le miscanthus, les BMP mesurés sur 8 génotypes (de 166 à 202 NmLCH<sub>4</sub>/g<sub>MV</sub>) sont globalement inférieurs à ceux des sorghos, en lien avec des teneurs en lignine plus élevées. Par ailleurs, un génotype cultivé sur 8 sols différents dont 7 pollués par les métaux lourds n'a pas présenté de variations significatives pour les valeurs de BMP.

Des pré-traitements alcalins (à la chaux et à la soude) ont été appliqués à un génotype de chaque biomasse. Si pour le miscanthus, la cinétique et le BMP sont améliorés, seulement la cinétique de méthanisation est augmentée pour le sorgho.

Enfin, la co-digestion en voie sèche de fumier bovin pailleux avec du sorgho a été étudiée en réacteur à lit percolé opéré en mode discontinu. Différentes proportions de sorghos dans le fumier ont été étudiées : 2%, 5% et 11% en matière brute, représentant 7,5%, 15% and 30% en MV. Le dernier mélange a engendré une légère acidification du lixiviat lors du démarrage qui cependant, n'a pas empêché d'obtenir la production de méthane la plus élevée par rapport au fumier en mono-digestion (+16%).

*Le projet BFF (2012-2020) est financé par l'ANR dans le cadre des investissements d'avenir sous la référence ANR11-BTBR-0006.*

## ELBA, l'outil web de détermination de la biomasse agricole en France

S. Marsac, M Heredia, B Lauga, J. Callens, ARVALIS – Institut du végétal - GIE GAO  
N Delaye, F. Labalette, Terres Univia - GIE GAO  
Pascal Levasseur, IFIP  
Jacques Capdeville, IDELE  
Paul Ponchant, Jean Marie Fontanet, ITAVI

La biomasse agricole est au cœur des stratégies nationales de mobilisation de la biomasse et bioéconomie pour atteindre les objectifs de production d'énergie renouvelable et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le développement de projets de valorisation passe notamment par une meilleure connaissance de la disponibilité en ressources (masse, nature, localisation) avec un maillage relativement fin. De précédents travaux (Labalette et al., 2012) avaient permis de stabiliser les méthodologies d'évaluation pour les ressources en biomasse agricole d'origine végétale. Le projet ELBA (ELaboration de la Biomasse Agricole) soutenu par l'ADEME a permis de rassembler 5 instituts techniques agricoles – Métha 5 - pour construire un outil partagé d'évaluation et de représentation géographique des ressources en biomasse agricole en France : coproduits de grandes cultures et cultures dédiées, effluents des élevages de ruminants, porcs et volailles.

Une méthodologie commune d'évaluation a pu être construite sur la base de différentes sources statistiques nationales (Recensement Agricole, enquêtes pratiques d'élevage, aviculture...), de nombreuses références expérimentales des instituts techniques et de leur expertise.

Les ressources brutes sous l'animal pour les effluents d'élevage, sur pied pour les végétaux sont d'abord évaluées. Des réactions sont ensuite appliquées selon des ressources (végétaux, bovins) : fraction non maîtrisable (déjections épandues directement au champ lors du pâturage), pertes à la récolte, besoins en paille pour la litière. Des modulations peuvent être appliquées selon les ressources à chacune des étapes pour intégrer des spécificités régionales : pédoclimat, modes de logement, temps de présence des animaux au champ...

Chacun de ces paramètres spécifiques aux différentes ressources (mode de logement, besoins en litière, rapports paille/grain, récoltabilité...) a été spécifiquement travaillé et documenté. Une base de données a été construite avec une résolution cantonale. Des interfaces web de calcul et de consultation permettent d'accéder librement aux résultats à l'échelle régionale et départementale et sur demande pour le canton. Cette architecture assure la sécurité des données et leur mise à jour.

Plus de 28 MtMS de biomasse agricole issue de 30 différents substrats (tous résidus de culture au champ, tous effluents d'élevage) sont ainsi potentiellement et durablement disponibles en France. Les effluents d'élevage représentent 122 Mt brutes en France. La codigestion de pailles de maïs, de lisier de porc et de canard représente par exemple un potentiel de 117 MNm<sup>3</sup> de biométhane dans le Sud-Ouest de la France. La cartographie cantonale de ces substrats aide à l'optimisation de l'emplacement des unités de méthanisation.

Quelques paramètres méthodologiques restent à améliorer afin de mieux prendre en compte les spécificités locales. Cet outil constitue néanmoins une première étape vers une plateforme nationale d'évaluation des ressources.

**Session**  
**DIGESTATS ET VALORISATION**

Quideau Pierre / APCA - Chambre d'Agriculture de Bretagne

Titre : Caractéristiques des digestats et modes de valorisation dans le cadre des unités de méthanisation agricoles

L'état des lieux présenté concerne un panel de 50-60 unités de méthanisation agricoles en service depuis 2 ans ou plus. Il est issu des travaux d'enquête réalisés dans le cadre du programme Prodige porté par l'APCA et les Chambres d'Agriculture de 8 grandes régions.

La diversité des moyens et équipements mis en œuvre pour traiter, stocker, épandre les digestats est décrite. Les capacités de stockage sont exprimées en mois de production. Les coûts d'investissement sont rapportés à la taille des installations et à la nature des substrats et des digestats.

La diversité de composition des digestats (matière sèche, matière organique, valeurs fertilisantes, taux de minéralisation de l'azote) est présentée et mise en lien avec la nature des substrats. Le supplément de quantités d'éléments fertilisants à gérer en épandage du fait de la méthanisation est évalué, ainsi les coûts d'épandage inhérents et les économies d'engrais azotés déclarées par les exploitants.

## Définition de classes de digestats agricoles en vue de la préconisation de leur insertion dans les pratiques de fertilisation

Anne Wallrich<sup>1</sup>, Denis Ollivier<sup>2</sup>, Julie Jimenez<sup>3</sup> et Sabine Houot<sup>1</sup>

(1) INRA, UMR ECOSYS, INRA-AgroParisTech, 78850 Thiverval-Grignon; (2) Trame – Association des Agriculteurs Méthaniseurs de France, 6 rue de La Rochefoucauld – 75009 Paris ; (3) INRA, LBE, Avenue des Etangs, 11100 Narbonne

Depuis la mise en place du plan EMAA (énergie méthanisation autonomie azote) en 2013, la méthanisation s'est largement développée dans le monde agricole. En 2016, il y avait 450 installations de méthanisation dont plus de la moitié chez des agriculteurs dont beaucoup se sont regroupés au sein de l'association « Agriculteurs méthaniseurs de France » (AMF). Outre le biogaz produit et converti en énergie ou chaleur, le digestat issu de la méthanisation est utilisé en tant que matière fertilisante très riche en nutriments (azote mais aussi phosphore et potasse) mais aussi en matière organique restant après la méthanisation dont le retour au sol peut contribuer à l'entretien des stocks de matière organique dans les sols (Möller, 2015). Les caractéristiques des digestats vont dépendre du mélange de déchets traités par méthanisation (recette entrante). Outre les effluents d'élevage, des résidus de culture ou des cultures intermédiaires peuvent entrer dans les mélanges entrant ainsi que des déchets issus des territoires (déchets d'industries agro-alimentaires, de marchés ou supermarchés, de cantines ...). Ces mélanges entrant peuvent varier au cours de l'année. Le procédé de méthanisation (voie sèche ou humide, durée, ...) va influencer également sur les caractéristiques des digestats (Jimenez et al., 2017). Ces caractéristiques vont conditionner leur intérêt agronomique, leur devenir après apport au sol et la disponibilité des éléments nutritifs ainsi que l'efficacité des matières organiques à entretenir les stocks humiques des sols.

L'association des agriculteurs méthaniseurs de France (AMF) a pour objectif de répondre aux besoins des agriculteurs possédant un méthaniseur sur leur exploitation, notamment en matière de caractérisation des intrants de leur potentiel méthanogène et de leurs effets sur les digestats produits, valorisation du biogaz produit mais aussi des digestats issus des procédés.

A partir de l'analyse statistique de la diversité des digestats produits au sein des adhérents AMF (diversité de caractéristiques analytiques, de « recettes » entrant en méthanisation, de procédé), l'objectif du travail est d'étudier s'il existe un lien entre ces 3 sources de diversité (en quoi les mélanges entrant et le procédé déterminent les caractéristiques des digestats ?), s'il est possible de définir des classes de digestats basées sur les intrants et procédés pour lesquels on pourra caractériser leur intérêt agronomique (teneurs en matière organique et éléments majeurs) et donc préconiser des usages ou précaution d'usage pour éviter des pertes par volatilisation de l'ammoniac par exemple. Ce travail se fait dans le cadre d'une collaboration entre l'association des agriculteurs méthaniseurs de France localisée à Paris et l'INRA à Grignon et Narbonne dans le cadre du programme Concept-Dig financé par l'ADEME. Outre ce traitement statistique des données existantes, des digestats « types » seront ensuite caractérisés plus finement pour préciser le degré de stabilité de leur matière organique et la disponibilité des éléments nutritifs.

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

Möller K. 2015. Effects of anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions, and soil biological activity. *A review Agron. Sustain. Dev.* 35:1021–1041

## Caractérisation de la matière organique : outil d'aide à la compréhension des mécanismes de la digestion anaérobie et de la qualité du digestat

JIMENEZ J., SERTILLANGES N., HOUOT S., PATUREAU D.  
LBE, Univ Montpellier, INRA, Narbonne, France

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 issu de la digestion anaérobie entre dans la thématique de la bioraffinerie environnementale et de la bioéconomie circulaire avec son retour sur les sols agricoles comme fertilisant organique. De plus, l'épandage de fertilisants organiques tels que les digestats participe à l'initiative « 4 pour 1000 » issue de la COP 21 (Minasny et al., 2017) qui a pour objectif de restaurer la fertilité des sols en augmentant leur teneur en MO de quatre grammes pour mille grammes de CO<sub>2</sub> chaque année afin de compenser l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre produits par la planète. 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 de la matière organique (MO) des digestats est subie en sortie de réacteur. C'est ainsi que la MO issue des digestats épandus n'est 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. C'est pourquoi, l'étude présentée ambitionne, à terme, de combler ce manque en commençant par l'amélioration des connaissances sur le devenir de la MO au cours de la digestion anaérobie.

Ainsi, la caractérisation de la qualité de la MO des digestats est primordiale afin de mieux piloter leur épandage et d'anticiper leur effet au sol. Les concepts de stabilité (i.e. inverse de biodégradabilité) et d'accessibilité de la MO sont essentiels dans la compréhension du devenir de la MO dans un système biologique (Jimenez et al., 2017). En effet, l'accessibilité de la MO peut se définir comme le possible accès d'un microorganisme à cette MO et est impactée par l'état physique de la MO (taille de particules) et par l'activité enzymatique hydrolytique du système biologique considéré. Enfin, la biodégradabilité d'une MO correspond à l'assimilation par un microorganisme de cette MO accessible dont la qualité de ses molécules est biodégradable dans les conditions environnementales données. Récemment, Jimenez et al. (2017) a montré qu'en couplant l'évaluation de l'accessibilité chimique via des extractions chimiques à celle de la complexité de la MO par une méthode spectrale (i.e. fluorescence), on arrive à prédire à la fois le potentiel méthanogène et le carbone minéralisable après incubation sur sol agricole. Cette étude a mis en évidence les similarités et différences de l'impact de la qualité de la MO sur le potentiel de biodégradation de type digestion anaérobie et le potentiel de minéralisation du carbone en aérobie, sur sol. En identifiant ces antagonismes, on va pouvoir mettre en évidence quelle qualité de MO est à produire dans un digestat et celle à « réserver » au potentiel méthane.

A partir de ces données, l'étude proposée permet de mieux appréhender le devenir de la MO pendant la digestion, par typologie (i.e. type d'alimentation), au regard du devenir du digestat après épandage au sol.

## Impact du stockage sur les propriétés fertilisantes et amendantes des digestats de méthanisation

Affes R.<sup>1</sup>, Trémier A.<sup>1</sup>, Nunes G.<sup>1</sup>, Jimenez J.<sup>2</sup>, Ollivier D.<sup>3</sup>, Girault R.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Irstea, UR OPAALE, Rennes

<sup>2</sup> LBE, Univ Montpellier, INRA, Narbonne, France

<sup>3</sup> TRAME- AAMF, Paris

Avant leur retour au sol, la plupart des digestats sont stockés sur des durées pouvant aller de quelques semaines à plusieurs mois. Cette durée dépend notamment du système de cultures associé à l'unité de méthanisation (et en particulier de la stratégie de fertilisation organique appliquée au digestat ou à ses différentes fractions) et doit s'adapter aux contraintes réglementaires sur les saisons d'épandage autorisées. Au cours du stockage, les propriétés des digestats peuvent cependant évoluer et il est nécessaire de prendre en compte ces évolutions dans l'optimisation de la filière de valorisation des digestats.

L'objectif de cette étude est de quantifier l'impact du stockage sur les caractéristiques des digestats impactant leurs propriétés fertilisantes et amendantes. Les digestats considérés dans cette dernière sont ceux issus de filières de méthanisation en voie liquide ainsi que les phases liquides et solides issues de leur séparation par centrifugation ou presse à vis.

Pour ce faire, des expérimentations de stockage ont été réalisées à une échelle pilote (5L pour les liquides, 300L pour les solides) permettant la mise en œuvre de processus proches de ceux observés à une échelle réelle. Trois digestats bruts, ainsi que les deux phases issues de leur séparation liquide/solide ont été échantillonnés sur des sites réels choisis pour étudier des typologies diverses de digestats produits en France. Au cours des expérimentations de stockage, un suivi des caractéristiques physico-chimiques des digestats associées aux propriétés fertilisantes azotées (teneur en azote total, taux de minéralisation de l'azote, caractéristiques de l'azote organique...) et amendantes (teneur en matière organique et carbone organique, caractéristiques du carbone organique...) a été réalisé en complément de la quantification des émissions gazeuses observées. Les expérimentations ont été conduites sur une durée maximale de 3 mois.

Les résultats obtenus sur les digestats bruts (sortie méthaniseur) et les phases liquides séparées sont très différents de ceux obtenus sur les phases solides. En effet, en ce qui concerne les digestats bruts et les phases liquides, des évolutions peu significatives ou modérées sont constatées, à condition que les pratiques de stockage mises en œuvre limitent la volatilisation physico-chimique de l'ammoniac. A défaut, une perte significative de pouvoir fertilisant azoté pourra être observée au cours du stockage.

En ce qui concerne les phases solides de digestats, des évolutions des quantités de matière organique et de ses caractéristiques sont observées. Un processus spontané d'élévation significative de la température a été mesuré au sein du tas de stockage (plus de 70°C dans certains cas). Ce phénomène est assimilable à un compostage naturel, permis par l'aération passive du tas facilitée par le gradient de température. Retrouvant ainsi des conditions aérobies pendant le stockage, la matière organique de la phase solide du digestat, essentiellement sa part labile résiduelle, se dégrade comme elle aurait pu le faire après retour au sol.

Ces résultats permettent d'établir des recommandations opérationnelles à destination des exploitants d'unités de méthanisation afin d'optimiser leurs filières de stockage des digestats en minimisant les pertes azotées, et en optimisant leurs propriétés fertilisantes et amendantes.

## Impacts de la méthanisation sur le bilan des flux de N dans une succession de culture fertilisée avec des effluents méthanisés ou non : premiers résultats

Antoine SAVOIE<sup>1</sup>, Catherine PASQUIER<sup>2</sup>, Adeline AYZAC<sup>2</sup>, Polina VOYLOKOV<sup>3</sup>, Anastasia LEMEKHOVA<sup>3</sup>, Sophie GENERMONT<sup>3</sup>, Benjamin LOUBET<sup>3</sup>, Catherine HENAULT<sup>2</sup>, Sabine HOUOT<sup>3</sup>

(1) INRA UEPAO, 37380 Nouzilly ; (2) INRA UR SOLS, 45000 Orléans ; (3) INRA ECOSYS, 78850 Thiverval Grignon.

Depuis la mise en place du plan EMAA (énergie méthanisation autonomie azote) en 2013, la méthanisation s'est largement développée dans le monde agricole, surtout dans les exploitations avec élevage. La méthanisation par voie liquide et mésophile est le procédé le plus répandu souvent suivie d'un post-traitement par séparation de phase. Quand la fertilisation se faisait à partir de fumier et lisier, l'implantation de la méthanisation conditionne de nouvelles pratiques de fertilisation avec des digestats liquides ou solides ou avec des digestats bruts quand il n'y a pas de séparation de phase. L'objectif du projet MétaMétha, initié en 2017 et financé par la région Centre Val de Loire est de quantifier l'impact de l'introduction de la méthanisation sur les flux de C et N au champ après apports d'effluents d'élevage méthanisés ou non. Les résultats de la première année de culture seront présentés.

Un méthaniseur (méthanisation mésophile par voie liquide) a été installé à Nouzilly pour traiter l'ensemble des effluents d'élevage de Nouzilly mais également d'autres déchets territoriaux suivie d'une séparation de phase. L'essai au champ mis en place pour 3 ans (succession blé-colza) comprend 5 traitements correspondant à 4 stratégies de fertilisation et un traitement témoin : (A) apport de lisier au printemps et fumier en été ; (B) N minéral ; (C) apport de digestat liquide au printemps et digestat solide en été ; (D) témoin sans apport ; (E) apport de digestat brut au printemps et en été. Immédiatement après épandage, la volatilisation du NH<sub>3</sub> est suivie par implantation de badge alpha puis modélisation (Loubet et al., 2017). Les émissions de N<sub>2</sub>O sont mesurées par chambres statiques. Les résultats de la première culture sont présentés dans le tableau ci-dessous correspondant à 2 épandages de printemps pour une culture de blé. Un dépôt de NH<sub>3</sub> est observé dans le traitement témoin lié à la pression de l'élevage environnant. La volatilisation d'ammoniac varie de 4% du N-NH<sub>4</sub> apporté pour le N minéral à 32% pour le digestat brut.

| Traitement      | N total<br>apporté    | N-NH <sub>4</sub><br>apporté | N-NH <sub>3</sub> emission |                                | N <sub>2</sub> O<br>emission | Nette N <sub>2</sub> O<br>emission | N récolte             | CAU     |
|-----------------|-----------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-----------------------|---------|
|                 | kg N ha <sup>-1</sup> |                              | kg N ha <sup>-1</sup>      | % N-NH <sub>4</sub><br>apporté | g ha <sup>-1</sup>           | g 100kg <sup>-1</sup> N            | kg N ha <sup>-1</sup> | % N ap. |
| A: lisier       | 100                   | 69                           | 2.2                        | 15.7                           | 95                           | 66                                 | 139                   | 46      |
| B: N Minéral    | 129                   | 129                          | -3.3                       | 4.1                            | 203                          | 134                                | 165                   | 52      |
| C: dig. liquide | 260                   | 136                          | 13.9                       | 16.5                           | 275                          | 95                                 | 193                   | 34      |
| D: témoin       | 0                     | 0                            | -8.6                       | -                              | 30                           |                                    | 81                    |         |
| E: dig. brut    | 298                   | 150                          | 39.7                       | 32.3                           | 250                          | 74                                 | 168                   | 23      |

En conclusion provisoire, il semble que la séparation de phase permette une meilleure valorisation du N apporté par les digestats avec moins de volatilisation de NH<sub>3</sub>. Le facteur d'émission du N<sub>2</sub>O semble également inférieur à 1% classiquement proposé dans les évaluations environnementales de la fertilisation organique.

Loubet, B. et al., 2017. Evaluation of a new inference method for estimating ammonia volatilisation from multiple agronomic plots, Biogeosciences Discuss., <https://doi.org/10.5194/bg-2017-424>, in review.

## **Impact des cocktails de cosubstrats sur les propriétés fertilisantes azotées des digestats**

Bareha Y.<sup>1</sup>, Trémier A.<sup>1</sup>, Fisgativa H.<sup>1</sup>, Marcihac C.<sup>1</sup>, Béline F.<sup>1</sup>, Girault R.<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Irstea, UR OPAAL, Rennes

Issus de la méthanisation, les digestats sont des produits dont l'intérêt agronomique représente un enjeu grandissant pour la substitution des engrais minéraux azotés. Riches en azote minéral, facilement disponible pour les plantes, les digestats sont ainsi généralement valorisés en fertilisation organique. Cependant, le manque d'informations sur l'impact de la nature des substrats méthanisés sur leurs propriétés fertilisantes limite les possibilités de prise en compte de la valeur agronomique des digestats dans l'optimisation de la conception et de l'exploitation des unités de méthanisation. L'objet de cette étude est de déterminer les impacts des différents substrats apportés au digesteur sur les caractéristiques azotées du digestat en lien avec la disponibilité de l'azote pour les plantes (teneur en N total, taux de minéralisation de l'azote, C/N). L'étude se limite aux digestats bruts issus de filières de méthanisation agricoles mésophiles en voie liquide.

Pour ce faire, l'étude repose sur la combinaison de deux étapes :

- *La caractérisation expérimentale du devenir de l'azote et du carbone en digestion anaérobie mésophile sur un large panel de substrats.* Pour ce faire, des tests de minéralisation de l'azote organique ont été menés sur un panel de 35 substrats à l'aide de réacteurs batch pendant 40 jours en conditions mésophiles en utilisant un inoculum centrifugé afin de réduire la concentration en azote ammoniacal due à l'inoculum. L'azote total Kjeldal (N-NTK) et l'azote ammoniacal ( $\text{N-NH}_4^+$ ) ont été mesurés à l'état initial et final pour obtenir le potentiel apparent de minéralisation de l'azote organique (proportion maximale de l'azote organique pouvant être minéralisé en digestion).
- *Sur la base des résultats précédents, la simulation de scénarios de co-digestion variés.* Les scénarios d'alimentation ont été dimensionnés en utilisant du lisier porcin d'une part et du lisier bovin d'autre part comme matrice d'alimentation. Les ratios de cosubstrats ont été calculés en considérant un couple charge organique/temps de séjour représentatif des filières de méthanisation françaises.

Les résultats mettent en évidence :

- *un effet significatif de la matrice d'alimentation porcine ou bovine.* En effet, en moyenne, les digestats issus de filières utilisant du lisier de bovin comme substrat de base présentent des C/N supérieurs et des taux de minéralisation de l'azote inférieurs à ceux issus de filières utilisant du lisier de porc. Ce résultat s'explique essentiellement par l'impact des caractéristiques des lisiers de porcs et de bovins digérés, mais aussi par des ratios de cosubstrats différents du fait notamment de la teneur en matière organique moindre du lisier de porc.
- *un impact significatif de la nature des cosubstrats.* A ce titre des typologies de digestats ont pu être établies en fonction de leurs substrats d'origine. A titre d'exemple, en moyenne, les digestats issus de filières de codigestion digérant une part importante d'ensilages de cultures (intermédiaires ou non) présentent des C/N plus élevés et des taux de minéralisation de l'azote plus faibles que ceux issus de filières digérant une part importantes de coproduits d'origine agroalimentaire.

Bien que ces résultats doivent être validés au travers d'une analyse de données issues de sites réels, cette étude permet de déterminer des typologies de caractéristiques azotées des digestats en fonction du type d'alimentation du digesteur.

## Séparation de phases et digestats: profils d'efficacité de séparation basés sur les intrants de digestion anaérobie et du choix de la technologie

F. GUILAYN<sup>1,2\*</sup>, J. JIMENEZ<sup>1</sup>, M. ROUEZ<sup>2</sup>, M. CREST<sup>2</sup>, D. PATUREAU<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LBE, INRA, 102 avenue des Etangs, 11100, Narbonne, France.

<sup>2</sup> Suez, CIRSEE, 38 rue du Président Wilson, 78230, Le Pecq, France.

\*Correspondance: felipe.guilayn@suez.com, +33 (0) 6 48 22 33 83.

La séparation mécanique du digestat dans une phase « liquide » et dans une phase « solide » est présente dans de nombreuses installations de digestion anaérobie. Dans cette étude, des données de la littérature et des analyses internes non publiées (LBE et SUEZ) ont été recueillies pour évaluer l'efficacité de la séparation des digestats avec différents séparateurs mécaniques. Une large base de données de caractérisation et bilan de matière a été mise en place. Pour la première fois, des indicateurs d'efficacité ont permis de définir deux profils de distribution de masse (Figure). Le profil de faible performance se caractérise par le fait que chaque composant soit principalement destiné à la fraction liquide, à l'exception de P, Mg et Ca dans certains cas. Les presses à vis représentent 67% de ces séparateurs mais l'on trouve également de nombreux procédés de tamisage. La plupart (>75%) des digestats proviennent principalement d'intrants fibreux tels que le fumier bovin et l'ensilage. Dans le profil de haute performance, la grande majorité des séparateurs sont des centrifugeuses (>85%), comprenant ceux étant combinés avec des centrifugeuses. Dans ce cas, les composés du digestat sont plus efficacement concentrés dans la fraction solide, sauf l'azote. Les intrants de digestion anaérobie sont principalement non fibreux (>75% des cas), comme les boues et le lisier porcin. Cette étude ouvre une possibilité pour les professionnels de la digestion anaérobie d'établir des considérations plus réalistes pour la performance de la séparation de phases des digestats au regard des substrats et du procédé de séparation.

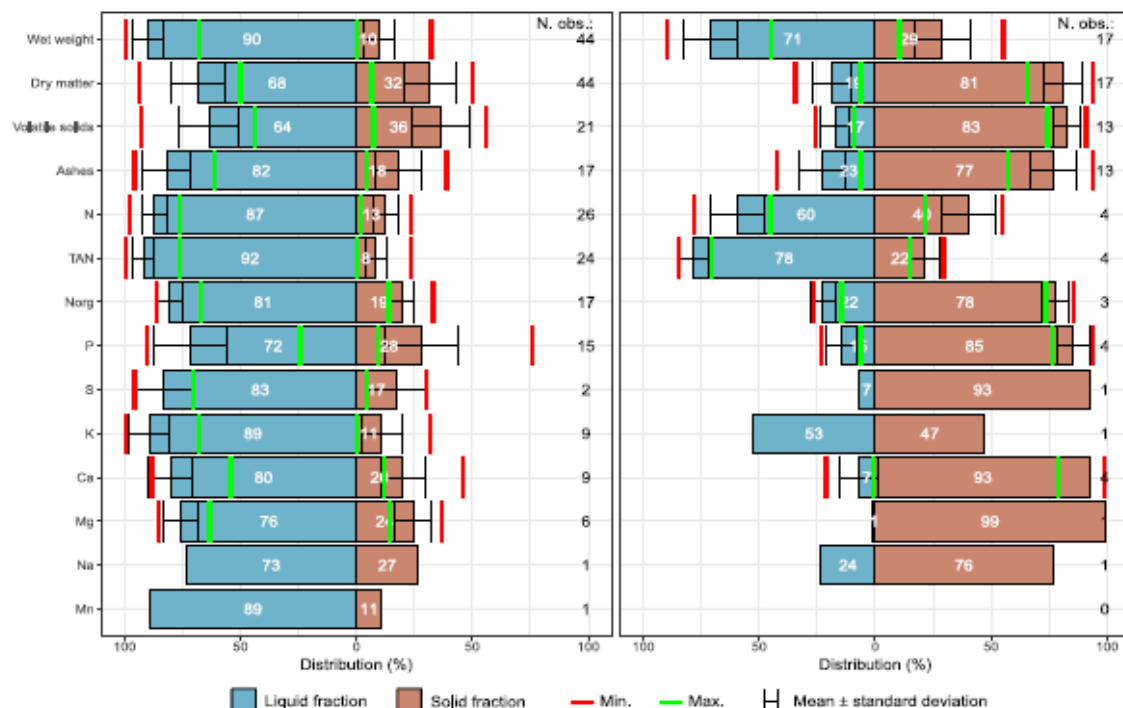


Figure : Profils de performance de séparation. Faible (gauche) et haute (droite) performance.

## Stripping pour l'élimination de l'ammoniac présent dans le digestat

Virginie KREIM / CMI Europe Environnement

La méthode de stripping pour l'élimination de l'ammoniac présent dans le digestat est maintenant une technologie éprouvée dans le domaine de la méthanisation. Avec cependant quelques inconvénients :

- La possible formation incontrôlée de struvite
- L'effet tampon du digestat notamment dû la forte concentration de  $\text{CO}_2$ , qui entraîne de grandes consommations de soude.
- Dans les cas où le sulfate d'ammonium ne peut pas être revalorisé sur site, il peut être difficile de trouver une filière pour l'écoulement de la production de ce produit secondaire.

Les avantages du stripping sur les sites de méthanisations sont :

- La facilité de mise en œuvre
- La récupération d'énergie pour la chauffe du digestat à stripper
- La possibilité d'atteindre des rendements supérieurs à 99%

Cette présentation a pour objectif de présenter :

- Les avancés dans le domaine du stripping concernant la réduction de consommation de soude par un pré-stripping du  $\text{CO}_2$ .
- Un produit secondaire répondant aux normes et plus facilement revalorisable.

Et ce par une exploitation de l'état de l'art et la présentation des résultats de nos recherches à l'échelle laboratoire et semi-industrielle.

## Caractérisation de la fraction liquide des digestats issus de la co-digestion de résidus solides

A. BATTIMELLI, A. AKHIARI, M. TORRIJOS, H. CARRERE

LBE-INRA, 102 avenue des Etangs, 11 100 Narbonne France.

\*Correspondance: [audrey.battimelli@inra.fr](mailto:audrey.battimelli@inra.fr), tél. +33 468 425 153, fax: +33 468 425 160.

**Mots-clés:** méthanisation, déchets solides, fumier bovin, séparation solide-liquide, matière organique, biodégradabilité

Le secteur de la méthanisation à la ferme ou territoriale connaît un fort développement, entraînant la production de grandes quantités de digestats. Si la fraction solide de ces digestats est généralement utilisée en tant qu'amendement organique, la fraction liquide peut être valorisée par la récupération des éléments minéraux bien que la présence de composés organiques pose des problèmes de traitement et d'élimination.

Les objectifs de cette étude sont d'une part de caractériser la fraction liquide des digestats prélevés sur sites de méthanisation afin de donner des premiers éléments pour leur éventuel traitement et d'autre part d'expliquer la variabilité des composés résiduels présents dans cette fraction liquide en relation avec l'origine des substrats, les paramètres du procédé de méthanisation et le type de séparation solide/liquide.

Dans un premier temps, nous avons caractérisé de manière détaillée onze digestats issus d'installations industrielles de co-digestion. Le fractionnement par neuf filtrations successives de la fraction liquide des digestats a permis de quantifier la contribution des matières en suspension, des colloïdes grossiers et fins et des matières dissoutes aux différents paramètres physico-chimiques et biologiques. Il a été montré la faible biodégradabilité aérobie des composés organiques dont la majeure partie se trouve dans la matière en suspension ( $> 1,2 \mu\text{m}$ ).

Pour élargir la base de données, nous avons caractérisé dix-huit digestats supplémentaires et un digestat de boues de station d'épuration dont les fractions liquides ont été fractionnées par deux filtrations successives ( $1,2 \mu\text{m}$  et  $1 \text{ kDa}$ ). L'analyse en composantes principales, la classification hiérarchique et la matrice de corrélation réalisées sur l'ensemble des 30 digestats ont mis en avant l'impact majeur des techniques de séparation solide/liquide sur la composition de la fraction liquide des digestats. Dans le groupe des techniques de séparation hautement performantes, des sous-groupes ont permis de distinguer les digestats à base de boues d'épuration, ceux à base de lisiers porcins et ceux issus de procédés piston thermophiles. Dans le groupe des procédés de séparation à faible performance, les teneurs en DCO et matières sèches de la fraction liquide des digestats ont été corrélées aux teneurs en cultures énergétiques et fumiers bovins dans l'alimentation. Finalement, pour l'ensemble des digestats, le paramètre SUVA (Specific UltraViolet Absorption), lié à la teneur en matière aromatique et à la stabilisation des composés, a été corrélé au temps de séjour des digesteurs.

La faible biodégradabilité des composés organiques et leur forte proportion en matières en suspension suggèrent le développement de procédés physico-chimiques de séparation tels que la coagulation pour le traitement de la fraction liquide des digestats.

## **Session**

# **ASPECTS SANITAIRES LIÉS A LA MÉTHANISATION**

## Impact de la méthanisation sur le virus Influenza aviaire contenu dans du lisier de canard

Benjamin LOBET / GIP AGROLANDES

Le but de nos travaux, en partenariat avec METHALANDES, l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse et le Laboratoire Départemental d'Analyse des LANDES, est de démontrer que **la méthanisation est une méthode fiable, écologique et économiquement réalisable pour assainir le lisier vis-à-vis du virus aviaire.**

L'idée est de « profiter » des conditions extrêmes du premier semestre 2016 en termes de flambée épidémique pour étudier le comportement du virus contenu dans le lisier lors de son passage en méthanisation « mésophile ».

Le méthaniseur d'HAGETMAU bénéficiant d'une dérogation l'exonérant d'hygiénisation, cela permet d'avoir une idée fiable du comportement du virus présent en grande quantité dans des lisiers alors qu'ils sont traités uniquement par méthanisation. Les conditions ainsi réunies sont les plus défavorables sur le plan sanitaire :

- Haut niveau de contamination
- Absence d'hygiénisation
- Méthanisation par flore mésophile, donc basse température.

Le protocole de fonctionnement normal du méthaniseur de METHALANDES est le suivant :

Principe de fonctionnement :

- Infiniment mélangé.
- Hygiénisation des produits d'origine animale hormis le lisier.
- Process :
  1. Livraison sécurisée du lisier, élevage par élevage, à METHALANDES
  2. Prémélange en cuve tampon de 2000 m<sup>3</sup>
  3. Introduction en digesteur primaire (300 m<sup>3</sup>/j)
  4. Séjour de 26 j à 38° C en digesteur primaire
  5. Transfert en digesteur secondaire (300 m<sup>3</sup>/j)
  6. Séjour de 26 J à 40° C en digesteur secondaire
  7. Transfert de 300 m<sup>3</sup> /j vers le process de déshydratation du digestat

La conclusion de l'étude portée par AGROLANDES, est donc que la méthanisation utilisant de process de double digesteur est totalement fiable pour éliminer radicalement le virus Influenza quand ce dernier est présent, y compris en quantité importante, dans les lisiers de palmipède.

La deuxième conclusion est que si le process de méthanisation « mésophile » qu'utilise METHALANDES est efficace dans des conditions particulièrement défavorables, alors les process « thermophiles » sont au moins aussi efficaces pour se débarrasser du virus Influenza. La méthanisation dans sa globalité, quel que soit le process utilisé, est donc efficace contre le virus.

Enfin, les résultats de cette étude légitiment totalement le fait que **l'hygiénisation des lisiers avant entrée en méthaniseur (1 heure à 70°C) est inutile vis-à-vis du statut du virus Influenza** : Il convient donc de s'interroger sur cette exigence réglementaire qui compromet les modèles économiques de ces équipements (surcoûts en équipements, complexification du process, rendement énergétique moindre du fait du besoin d'énergie pour hygiéniser...) d'autant qu'a priori, certains pays, **notamment le Danemark et l'Angleterre**, bien que sous le coup de la même réglementation européenne que la France, n'hygiénisent pas les lisiers.

Sur ce sujet de la méthanisation, il est donc souhaitable de poursuivre le travail sur les points stratégiques suivants :

- Assurer la publication scientifique des travaux déjà réalisés.
- Compléter l'étude sur l'assainissement du virus Influenza par la méthanisation, par une étude de la cinétique à l'intérieur du méthaniseur (sur un temps de méthanisation « moyen » de 26 jours, compte tenu des différents mélanges et brassage du contenu du process « infiniment mélangé », nous savons que du lisier peut ressortir en moins de 10 jours : l'inactivation du virus peut donc, pour l'instant, être garantie en moins de 10 jours de présence en réacteur.
- Faire une étude comparative des process des différents types de méthaniseurs afin d'enrichir les conclusions de l'étude scientifique menée par le Professeur GUERIN de l'ENVT. Cette étude aura pour finalité d'« homologuer » tout méthaniseur qui aurait des caractéristiques de fonctionnement de temps/température égales ou plus élevées que celles de METHALANDES. Cette étude permettra donc de généraliser les résultats de nos travaux à bon nombre de types de méthaniseurs et/ou de technologies de méthanisation.
- Faire un « benchmark » des règlements et procédures d'agrément des méthaniseurs dans différents pays d'Europe sous l'angle de l'obligation pour les produits d'origine animale de les hygiéniser ; puis soumettre ce travail à la DGAL avec l'objectif de faire évoluer la réglementation française.
- Dans une optique « biosécuritaire », faire en sorte que tous les lisiers puissent être traités par méthanisation avant d'être remis dans le milieu naturel (et ce à un coût neutre pour les éleveurs et gaveurs) : actualiser une étude de gisement de lisier pour définir une stratégie d'implantation de méthaniseurs en tenant compte des contraintes de logistique (proximité du gisement, taille du méthaniseur, proximité d'une canalisation de gaz pour injection...).

## **Session**

# **PROCESSUS ET PROCÉDÉS**

## **Caractérisation rhéologique de la matière entrante pour la mise en œuvre du procédé de méthanisation voie épaisse agitation pneumatique ARKOMETHA.**

J.Camberlain, S.Hattou, A.Guendouz, F.Blanc

ARKOLIA ENERGIES, ZA du Bosc – 16 rue des Vergers, 34130 Mudaison

Auteur correspondant : [fblanc@arkoliaenergies.fr](mailto:fblanc@arkoliaenergies.fr), +33 6 48 80 27 47

### **Contexte :**

Il existe de nombreux procédés qui permettent de mettre en œuvre la technique de méthanisation, lesquels sont classés en plusieurs catégories, procédés dit en voie liquide (siccité < 10% MS) généralement en continu, le procédé en voie sèche ou voie épaisse (siccité > 20%MS) qui peut être réalisé en batch (garage) ou en continu (digesteur piston).

Au regard des fortes siccités rencontrées sur les déchets agricoles et péri-urbains, la voie épaisse semble la plus adaptée. Les avantages de celle-ci sont multiples, notamment grâce à des tailles de réacteurs compacts, une consommation d'eau plus faible, un pré-traitement mécanique limité et une quantité de digestat réduite en sortie. En revanche, il existe encore certains verrous technologiques quant à sa mise en œuvre. Outre les aspects biochimiques, la principale difficulté de la voie sèche concerne les écoulements au sein des digesteurs.

Dans le cadre du développement de la technologie Arkometha, ce sujet a fait l'objet de travaux de thèses menés en collaboration étroite avec le laboratoire de rhéologie des procédés de Grenoble. Ces études ont permis de mettre en évidence que la notion de MS n'était pas le paramètre le plus pertinent pour le dimensionnement et la conduite des procédés en voie sèche. Une méthode de caractérisation rhéologique de la matière appliquée à la méthanisation voie sèche a donc été développée.

Les caractéristiques rhéologiques nous apparaissent indispensables pour une bonne maîtrise du procédé voie épaisse Arkometha. Elles ont vocations à faciliter le dimensionnement du système d'agitation pneumatique sur les futures installations ARKOMETHA et optimiser le fonctionnement de l'agitation. Cette méthodologie a également des applications pour déterminer l'impact d'un pré-traitement physique sur les aspects rhéologique de la matière.

### **Procédé ARKOMETHA, technologie voie épaisse par agitation pneumatique**

La technologie ARKOMETHA tire son originalité de son système d'agitation pneumatique. Il est composé de cannes d'injections plongeantes dans la matière depuis la toiture jusqu'au plancher du digesteur. Celles-ci sont reliées à un caisson mis sous pression par un compresseur de biogaz. En fonction des caractéristiques rhéologiques du mélange et des paramètres d'agitation sélectionnés, la

détente du biogaz engendre une force suffisante pour dépasser le seuil d'écoulement, ce qui permet la mise en mouvement et le brassage de la matière.

### Méthodologie de caractérisation rhéologique de la matière

#### - Mesure du seuil d'écoulement d'une matrice

La scissométrie est la technique employée pour la mesure du seuil d'écoulement de la matière, elle met en œuvre la rotation lente d'une pale de 4 lames dans un échantillon, il en résulte une mesure du couple en fonction du temps. Le couple maximum et les dimensions de la pale utilisée permettent d'évaluer le seuil selon les formules suivantes (Nguyen & Boger, 1985) :

$\tau_0 = \frac{C_{max}}{K}$  avec  $K = \frac{\pi \cdot D^3}{2} \cdot (\frac{H}{D} + \frac{1}{3})$  où :  $\tau_0$  = seuil de contrainte (Pa),  $C_{max}$  = couple maximum (Nm),  $D$  = diamètre de la pale (m).  $H$  = hauteur de la pale (m).

Le laboratoire d'Arkolia énergies est équipé d'un rhéomètre de terrain spécialement conçu pour tenir compte des particularités des substrats à forte granulométrie (RGDS : Rhéomètre de Grande Dimension pour les Substrats). Celui-ci dispose de plusieurs jeux de cuves (2, 8 et 60L) et de pâles étalonnée avec des fluides modèles.

#### - Détermination de la MS critique (fraction d'eau libre) de la matière

La capacité de rétention d'eau d'une matrice, appelée aussi teneur en eau liée (WC), a été déterminée par une technique de séchage (Vaxelaire & Cézac, 2004; García-Bernet et al., 2011). L'échantillon préalablement préparé, est mis à évaporer sur une balance thermogravimétrique réglée à 80°C. La perte de masse est suivie en ligne, il en résulte une vitesse d'évaporation en fonction du poids de l'échantillon.

Dans les conditions de séchage appliquées, la fraction d'eau libre présente une vitesse d'évaporation constante. En revanche la fraction d'eau liée, de par la nature de ses différentes liaisons, aura tendance à présenter un profil d'évaporation décroissant. Le point critique, appelé aussi  $W_c$ , correspond au point d'inflexion sur la courbe d'évaporation en fonction de la masse de l'échantillon. Celui-ci est ensuite ramené à la MS critique, siccité à partir de laquelle les écoulements deviennent limitant.

Un outil de calcul a été développé en interne pour identifier avec précision le point d'inflexion de la courbe d'évaporation.

### Résultats

Cette méthodologie, développée pour un usage industriel, a permis de réaliser des mesures rhéologiques à différentes échelles (pilote de laboratoire et site industriel), sur différents substrats solides (agricoles, péri-urbain) et à différentes étapes du procédé de méthanisation. Ces résultats enrichissent la base de données d'Arkolia Energies dans le but d'optimiser le fonctionnement des installations en voie sèche.

La courbe d'étalonnage du RGDS, ainsi que les caractéristiques rhéologiques d'une matrice à forte siccité, pourront de plus être présentées oralement lors de la manifestation.

D. Brosset, GAEC Bois Joly  
P. Peu, IRSTEA  
S. Marsac, R. Trochard ARVALIS–Institut du végétal-GIE GAO  
N. Delaye, F. Labalette, Terres Univia-GIE GAO  
S. Pommier, CRITT/INSA

La mobilisation de nouveaux substrats sans compétition d'usage avec les productions alimentaires fait partie de la stratégie nationale de mobilisation de la biomasse. Les résidus de culture majoritairement enfouis sont au cœur de cette stratégie et présentent de nombreux avantages pour la digestion anaérobie. Dans une approche du sol au sol, c'est un réel changement de paradigme qu'offre la méthanisation des résidus de culture avec une gestion durable de leur digestats pour mobiliser des ressources supplémentaires. Mais le procédé de dégradation anaérobie doit être adapté pour faciliter l'accès au compartiment holocellulosique et compléter le substrat pour palier leur faible concentration en azote. La digestion de ces pailles par des procédés en voie sèche représente une réelle opportunité pour de petites unités de méthanisation à la ferme notamment pour des exploitations orientées vers les grandes cultures.

Le projet RESIMETHA soutenu par l'ADEME a permis de caractériser finement ces ressources (pailles de céréales, maïs, colza) en vue d'adapter leur valorisation. L'optimisation de la préparation des pailles a été travaillée du laboratoire (IRTSEA) à l'unité de méthanisation grandeur nature (GAEC Bois Joly) en passant par le pilote SOLIDIA (INSA) pour valider la valorisation envisagée. L'évaluation technique économique et environnementale des systèmes de culture mobilisant les pailles pour la méthanisation est en cours via l'outil Systerre®. Cette évaluation sera conduite à partir d'unités type de méthanisation prédéfinies. Des analyses de digestats produits sur le site du Gaec du Bois Joly permettent de paramétrer le modèle AMG pour évaluer l'impact de cette mobilisation sur l'état organique des sols après retour des digestats.

Les premiers résultats confirment le potentiel de ces substrats. Toutefois, la réhydratation nécessaire pour une utilisation en l'état dans un méthaniseur implique une forte mobilisation d'eau extérieure. Par ailleurs, l'enchaînement de batchées successives peut être la cause d'une perte importante d'activité qu'il faut gérer avec un recyclage de digestat. Et, la faible teneur en azote biodisponible des résidus de culture nécessite un rééquilibrage par apport d'azote externe. Sur la base de ces premiers résultats, diverses stratégies de méthanisation à la ferme ont alors été mises en œuvre : réhydratation simple via des eaux de pluies, réhydratation via les lisiers de canards avec ou sans recyclage de digestat au substrat.

Les meilleures voies de préparation de la matière sont également en cours de validation sur le pilote SOLIDIA de l'INSA de Toulouse.

Si la manipulation de paille sous forme de balles haute densité facilite le transport et le stockage, ces balles sont plus difficilement réhydratables. Leur préparation optimale est relativement chronophage pour des rendements de méthanisation qui ne permettent pas d'atteindre le potentiel.

Des essais sur pailles de maïs broyées sont en cours pour évaluer l'intérêt de cette forme de substrat avec des humidités plus élevées réduisant la mobilisation d'eau lors de leur réhydratation.

Les premières évaluations technico-économiques permettront de définir des seuils de rendement et de coût de ces pailles pour un type d'unité de méthanisation défini. Les ressources supplémentaires durablement mobilisables pour la méthanisation dans deux types de systèmes de cultures seront également chiffrées.

## Piloter les performances des unités de méthanisation à faible temps de séjour.

C.Charnier<sup>1\*</sup>, R.Samso<sup>1</sup>, F.Novellis, J.Miroux<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> BioEnTech, 74 Av. Paul Sabatier, 11100, Narbonne, France.

\*Correspondance: cyrille.charnier@bioentech.eu, +33 633 33 06 47.

La méthanisation est une réponse adaptée pour le traitement des effluents industriels liquides chargés en DCO tels que des rejets de brasserie, d'industries sucrières ou encore de papeteries. Contrairement au traitement aérobie, le traitement par digestion anaérobie de ces effluents permet de produire du biogaz, source d'énergie pour l'usine, et une faible production de boues. Des unités de méthanisation spécifiques se sont développées sur cette thématique. Elles ont la particularité de découpler le temps de séjour de l'effluent de celui de la biomasse méthanogène. Un exemple bien connu de ces procédés est l'UASB. Extrêmement efficaces, ces unités traitent de grandes quantités d'eau et de fortes charges organiques avec un temps de séjour réduit à quelques heures. Le contre coup de ce dynamisme est l'instabilité des unités. En quelques heures, le milieu réactionnel peut être complètement bouleversé induisant de la perte de performances jusqu'à l'acidification. A cela s'ajoute le risque de lessivage de la biomasse méthanogène pouvant être entraînée avec l'effluent. La difficulté de pilotage ainsi que les coûts colossaux en cas d'arrêt du système induisent une sous exploitation de l'unité et/ou des OPEX élevés. Les contraintes de pilotage de ces unités sont :

- sécuriser l'état biologique du digesteur pour prévenir le risque d'acidose
- suivre l'activité de la biomasse méthanogène pour éviter les risques de lessivage
- réduire les OPEX en jouant sur différents leviers (chaleur, soude, dilution...)

Une limite de pilotage forte est le manque de données. Peu de capteurs permettent d'estimer les paramètres clés de fonctionnement du digesteur tels que l'alcalinité, la DCO ou la concentration d'AGV. Les analyses laboratoires ne fournissent qu'une vision à posteriori de l'état du digesteur et ne permettent pas un pilotage en accord avec le faible temps de séjour des unités.

Pour lever ce verrou, MeMo dispose d'une approche modèle robuste et précise. MeMo permet de représenter les variables clés de pilotage du digesteur tel que les AGV, la DCO, l'alcalinité en temps réel en se basant sur des capteurs simples tels que le pH et la production de méthane. Ces variables clés rentrent dans la seconde couche de calcul de MeMo pour estimer, en temps réel, les indicateurs de performances tels que le risque d'acidification du digesteur, l'abattement de DCO ou encore la performance de la biomasse méthanogène permettant d'estimer le lessivage.

Dans l'optique d'assister l'opérateur dans l'optimisation de son unité, MeMo émet



des recommandations de pilotage avec une fréquence adaptée aux contraintes opérationnelles. En particulier, MeMo recommande le débit d'alimentation qui permet de traiter un maximum d'effluent en garantissant les meilleures performances d'abattement et un risque d'acidification faible. MeMo fournit de plus des recommandations de pilotage permettant de réduire les OPEX tels que la consommation de soude ou encore d'énergie. MeMo a, par exemple, permis de réduire la consommation de chaleur en adaptant la température du digesteur en fonction de la charge à traiter par des recommandations en quasi temps réel.

## Quels outils pour le suivi et le pilotage des digesteurs et l'identification des dysfonctionnements?

*Fabrice Béline, Lorraine Awhangbo, Henry Fisgativa, Véronique Maheux, Patricia Saint-Cast  
Iristea, UR OPAALE, Rennes*

En France, la méthanisation se base sur la codigestion de différents déchets organiques et résidus de cultures dont les caractéristiques évoluent au cours de l'année aussi bien d'un point de vue qualitatif que quantitatif. La codigestion présente l'avantage d'optimiser la valorisation énergétique des déchets organiques d'origines diverses et de minimiser le recours aux cultures énergétiques en concurrence avec les cultures alimentaires et fourragères. Par contre, cela engendre des difficultés spécifiques de pilotage du procédé. En effet, l'introduction de déchets organiques d'origines diverses et dont les caractéristiques ne sont pas toujours bien connues rend difficile cette opération de pilotage.

Dans ce contexte, afin d'identifier les paramètres de suivi et de pilotage les plus pertinents et de tester de nouveaux capteurs et mesures innovantes, des expérimentations de codigestion anaérobie ont été réalisées sur une année à l'aide d'un pilote de laboratoire instrumenté de 35 litres. Au cours de ces expérimentations, des effluents d'élevage, des résidus d'aliments pour bétails, des déchets de fruits, des biodéchets et des déchets de l'industrie agroalimentaires ont été codigérés au cours d'opération « normale » de méthanisation avec charges organiques de 1 à 3 kgMV.m<sup>-3</sup>.j<sup>-1</sup> correspondant à 1.3 - 5 kgDCO.m<sup>-3</sup>.j<sup>-1</sup>. Les productivités et les rendements de dégradation du méthaniseur associés à ces charges organiques ont variés de 0.2 à 1.05 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>.m<sup>-3</sup>reacteur.j<sup>-1</sup> et de 80 à 90%, respectivement. En plus des paramètres opérationnels (température, charge organique et temps de séjour hydraulique), les paramètres classiques de suivi « terrain » ont été mesurés pendant ces expérimentations [pH, quantité et qualité du biogaz (CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>), FOS/TAC, ...] ainsi que les paramètres physico-chimiques usuels (matières volatiles, DCO, acides gras volatils, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, acides gras longues chaînes, ...). En complément, des mesures spécifiques ont été réalisées régulièrement:

- Spectrométrie proche infrarouge (SPIR) sur le digestat,
- Enregistrement précis des cinétiques de production de biogaz au sein du digesteur (CinétiqueBiogaz),
- Réponse cinétique de production de biogaz du digestat suite à l'ajout d'acétate (RespiroAcetate).

En plus de ces expérimentations en conditions « normales » de fonctionnement, plusieurs expérimentations plus courtes (2 à 4 semaines) simulant des dysfonctionnements liés à des surcharges organiques, des surcharges lipidiques, de fortes concentrations en NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, ... ont été réalisées et l'ensemble des paramètres ont également été mesurés lors de ces dysfonctionnements.

Lors des opérations « normales » de fonctionnement, les différents paramètres de suivi « terrain » sont le plus souvent dans la gamme optimale préconisée mais ces paramètres ne permettent pas d'indiquer précisément la conduite à suivre (sous charge, surcharge, ...) car ils dépendent également d'autres facteurs, notamment des caractéristiques des intrants. Au cours des périodes de dysfonctionnement, dans la plupart des cas, de nombreux paramètres « terrain » (FOS/TAC, pH, quantité et qualité du biogaz) permettent d'identifier le dysfonctionnement du digesteur. Cependant, l'identification du dysfonctionnement arrive souvent tardivement et rend l'opération de pilotage difficile. Lors des événements de surcharge organiques ou lipidiques, le dysfonctionnement observé (acidose) est précédé d'une augmentation de la production de biogaz qui rend difficile son identification. Les nouvelles mesures proposées (SPIR, cinétiqueBiogaz et RespiroAcetate) permettent une investigation plus poussée au niveau de la biologie du réacteur et peuvent, en combinaison avec les autres paramètres, permettre un meilleur pilotage des digesteurs. L'ensemble des données acquises lors de ces expérimentations seront présentées et discutées lors de cette présentation.

## Mise en évidence de dysfonctionnements d'un digesteur par Spectroscopie Proche Infrarouge (SPIR)

Lorraine Awhangbo<sup>1</sup>, Fabrice Béline<sup>1</sup>, Jean Michel Roger<sup>2</sup>, Alexia Gobretch<sup>2</sup> & Ryad Bendoula<sup>2</sup>.

1- Iristea, UR-OPAALE Rennes

2- Iristea, UMR ITAP Montpellier

En France, le modèle de développement de la méthanisation principalement basé sur la codigestion de différents substrats organiques nécessite des équipements et un suivi prenant en compte cette spécificité. Pour cela, la mise au point de nouveaux capteurs pour le suivi et le pilotage du procédé afin de sécuriser et d'optimiser son fonctionnement apparaît comme un élément majeur et doit permettre d'accompagner son développement. Les capteurs optiques, notamment la spectrométrie proche infrarouge (SPIR), se sont fortement développés pour des mesures spécifiques rapides et en ligne dans de nombreux domaines (pharmaceutique, biomédicale, agroalimentaire, agriculture, ...). En effet, il s'agit d'une technique non destructive qui permet d'accéder rapidement à la composition chimique des matériaux : la SPIR donne une empreinte unique de la composition de la matière. Elle constitue une technique très robuste lorsqu'elle est utilisée sur des matériaux peu absorbants et peu diffusants. Ainsi, les outils de spectrométrie apparaissent comme des technologies intéressantes et parmi les plus pertinentes pour le suivi « en ligne » des milieux biologiques et pour envisager des stratégies de pilotage du procédé de méthanisation. Toutefois, les enjeux sont d'appliquer la SPIR, d'une part, sur des milieux turbides et opaques et, d'autre part, sur des milieux à forte teneur en eau tels que les matrices rencontrées dans les digesteurs. Ainsi, le lien entre le spectre et l'information recherchée étant plus complexe sur ces milieux, des travaux de recherche sont nécessaires pour évaluer cette technologie et l'adapter à la caractérisation de ces milieux complexes et pour définir les contraintes d'utilisation.

Dans ce cadre, les travaux réalisés au cours de ce projet de recherche ont pour objectif principal d'évaluer les réponses de la spectrométrie infrarouge (SPIR) face à des événements de dysfonctionnement d'un digesteur et de définir un protocole de traitement des données spectrales obtenues. Un pilote constitué d'un réacteur infiniment mélangé de 35L a permis d'effectuer des tests sur deux sondes spectroscopiques dans le domaine visible et proche infrarouge (350-2500nm). Différentes expérimentations de digestion ont été conduites sur ce pilote avec du lisier porcin comme substrat de base et des co-substrats tels que des résidus d'aliments pour bétails, des déchets de fruits, des bio-déchets et des graisses agroalimentaires. Ainsi, une base de données spectrale a été constituée à partir des différents suivis effectués sur ce pilote. A partir de cette base de données, la chimiométrie (discipline mettant en relation les mesures faites sur un système chimique ou un procédé avec l'état de ce système ou procédé, en utilisant des méthodes mathématiques ou statistiques) a permis d'analyser les variations dans le temps, en fonction de l'historique du digesteur. Le traitement des données spectrales a notamment permis de déterminer les signatures spectrales d'un fonctionnement normal d'un digesteur à partir de différents substrats. De plus, les premiers résultats concernant les dysfonctionnements du digesteur montrent que, dans ces milieux complexes, il est plus pertinent d'utiliser l'évolution de la signature spectrale globale plutôt que de déterminer des concentrations de différents composés. L'ensemble des données clés acquises lors de ces expérimentations ainsi que le traitement chimiométrique seront présentés et discutés.

## **Addition de matériaux conducteurs à base de carbone et oligoéléments pour stabiliser la digestion anaérobie des biodéchets alimentaires**

G. CAPSON-TOJO<sup>1,2\*</sup>, D. RUIZ<sup>1</sup>, C. GIRARD<sup>2</sup>, M. ROUEZ<sup>2</sup>, M. CREST<sup>2</sup>, N. BERNET<sup>1</sup>, J.-P. STEYER<sup>1</sup>, J.-P. DELGENES<sup>1</sup>, R. ESCUDIE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LBE, INRA, 102 avenue des Etangs, 11100, Narbonne, France.

<sup>2</sup> Suez, CIRSEE, 38 rue du Président Wilson, 78230, Le Pecq, France.

De nouvelles réglementations internationales et une production croissante des biodéchets alimentaires (BA) ont comme conséquence un besoin de développer de nouvelles filières pour la valorisation de ce déchet. La digestion anaérobie (DA) est une option très prometteuse qui permet un traitement efficace permettant la production de méthane et de digestat. Cependant, les BA sont caractérisés par de forts taux de matière organique rapidement biodégradable, avec des concentrations élevées en protéines. Les protéines sont dégradées pendant la DA pour produire de l'ammoniaque, un inhibiteur de la méthanisation. Par ailleurs, la matière organique est transformée très rapidement en acides gras volatils (AGVs), qui sont également inhibiteurs à des concentrations élevées. En conséquence, l'accumulation d'AGVs est souvent rapportée dans des études sur la méthanisation des DA. Plusieurs options ont été développées pour atténuer ce phénomène. L'ajout d'oligoéléments (sous forme d'éléments traces métalliques) a été particulièrement étudié. Plus récemment, l'ajout de matériaux conducteurs à base de carbone (*i.e.* charbon actif ou biochar) est apparu comme une possibilité très prometteuse pour favoriser la cinétique de production de méthane.

Cette étude a deux objectifs principaux : (i) évaluer l'effet de l'ajout de matériaux conducteurs à base de carbone ainsi que d'ETMs sur le procédé de méthanisation des BA, (ii) développer un procédé stable de DA des BA potentiellement applicable au niveau industriel. Dans un premier temps, l'effet de l'addition de charbon actif (CA) et d'éléments trace métalliques purs (ETMs) sur les performances de production de biogaz a été évalué. Dans un second temps, ces réactifs ont été respectivement remplacés par du biochar et des ETMs (sous forme d'une solution de  $\text{FeCl}_3$  industrielle). Grâce au prix réduit de ces deux substances, leur application représente une option réaliste d'un point de vue économique et industriel.

L'ajout de CA (à  $10 \text{ g.l}^{-1}$ ) et d'ETMs a très significativement amélioré les performances de méthanisation de réacteurs batch consécutifs (alimentés à un ratio S/X de  $1 \text{ g MV.g MV}^{-1}$ ). Ces réactifs ont en particulier augmenté la vitesse maximale de production de méthane, en réduisant, d'un facteur 2 par rapport aux réacteurs témoins, le temps nécessaire pour la consommation totale des AGVs. Le méthane est produit avec un rendement de  $443\text{--}452 \text{ ml CH}_4\text{.g VS}^{-1}$  et avec des vitesses journalières de  $348 \text{ ml CH}_4\text{.l}^{-1}$ , ces performances étant 102 % plus élevées que celles obtenues dans les réacteurs témoins. Quand le CA et les ETMs ont été remplacés par du biochar et du  $\text{FeCl}_3$  industriel, l'amélioration du procédé a été moins marquée. Cependant, en augmentant la concentration de biochar ajouté, l'amélioration du procédé de méthanisation a été significative. Ainsi, en réacteurs batch, des concentrations de biochar ajouté de  $100 \text{ g.l}^{-1}$  ont permis d'atteindre des productions journalières de méthane de  $376 \text{ ml CH}_4\text{.l}^{-1}$  (soit un taux de 23 % plus élevé que dans les réacteurs avec  $10 \text{ g.l}^{-1}$ ). En réacteurs continus, des concentrations en biochar ajouté de  $50 \text{ g.l}^{-1}$  a eu comme conséquence une augmentation du rendement de méthane (jusqu'à 67 %) et de sa vitesse de production (jusqu'à 40 %), avec une réduction des concentrations d'AGVs dans les réacteurs.

Cette étude suggère que l'ajout combiné de matériaux conducteurs à base de carbone et d'oligoéléments représente une option performante et réaliste pour stabiliser la DA des BA au niveau industriel. L'optimisation du taux de biochar ajouté et des études complémentaires pour définir les propriétés optimales de ce matériel doivent être réalisées avant de tester l'application industrielle de cette stratégie.

## Méthanisation à température ambiante – Evaluation du procédé « Nénufar » à Guernévez

K. LAVENAN<sup>1</sup>, A. TOUDIC<sup>2</sup>, P. DABERT<sup>3</sup>, T. LENDORMI<sup>4</sup>, P. LEDEVEHAT<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Utilities Performance, Allée du Lac Bleu – BP 70102, 49243 AVRILLE CEDEX

<sup>2</sup> Chambre d'Agriculture de Bretagne, Rue Maurice Le Lannou, CS 74223, 35042 RENNES CEDEX

<sup>3</sup> Iristea, UR OPAALE, 17 Avenue de Cucillé, 35044 RENNES CEDEX

<sup>4</sup> Université de Bretagne Sud, FRE CNRS 3744, IRDL, Allée des Pommiers, 56300 PONTIVY

Le programme de recherche Prométhys, initié depuis plus de dix ans, évalue la faisabilité technique et économique de la méthanisation à température ambiante. En juin 2016, la station expérimentale porcine de Guernévez (Chambres d'Agriculture de Bretagne) a équipé une de ses fosses existantes d'une couverture flottante, capable de récupérer le méthane produit de façon « passive », au stockage du lisier. Le procédé testé, proposé par la société « Nénufar », nécessite peu d'équipements. Son intérêt repose sur des coûts d'investissement et de fonctionnement réduits. Le biogaz produit est brûlé par une chaudière biogaz de 40 kW. L'eau chaude produite permet de chauffer des bâtiments d'élevage porcins.

La fosse couverte a une capacité de 300 m<sup>3</sup> et fait 10 m de diamètre. Les gaz qui s'accumulent sous la couverture sont envoyés vers la chaudière grâce à un surpresseur. Sur son passage, le biogaz est quantifié via un compteur biogaz et qualifié par un analyseur biogaz Sewerin. Le biogaz est désulfuré par de l'injection d'air sous la couverture, puis par un filtre à charbon actif sur la ligne de biogaz. Les apports de lisiers dans la fosse ont volontairement été réalisés environ tous les quinze jours. Les lisiers introduits dans la fosse ont séjournés préalablement entre 1 et 4 mois en bâtiment.

Après plus d'un an et demi de recul et quelques adaptations par le fournisseur, le procédé de méthanisation psychrophile testé semble au point techniquement. Robuste et simple d'utilisation, il est peu gourmand en temps de travail. Comme attendu, la production de méthane est fortement dépendante de la température du lisier dans la fosse. La cinétique de production est en effet nettement plus rapide en été lorsqu'il fait 20°C dans la fosse, et nettement ralentie en hiver à 8°C. Toutefois, la température n'explique pas à elle seule la production de méthane. Celle-ci peut être maintenue en hiver grâce aux apports fréquents de lisiers dans la fosse, avec en moyenne 10 m<sup>3</sup> de méthane produits par jour. La baisse progressive des températures est en effet compensée par l'augmentation régulière du volume de lisier dans la fosse. Les injections de lisier permettent de booster la production de méthane. Sur une année, 6 120 m<sup>3</sup> de biogaz ont été produits avec un taux moyen de CH<sub>4</sub> de 63,1%, soit 3 690 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>, ou encore 0,18 à 1,2 L CH<sub>4</sub>/L lisier/semaine. 65% du potentiel méthanogène du lisier est exprimé en hiver et en été.

Ce procédé cible deux types de publics : les élevages ayant des forts besoins de chaleur, comme les ateliers de porcs ou de veaux de boucherie, et souhaitant réaliser des économies sur leur facture énergétique ; les unités de méthanisation disposant de fosse non couvertes en amont (lisier) ou en aval (digestat) du digesteur. Les résultats obtenus sur la fosse de 300 m<sup>3</sup> de Guernévez en conditions optimisées (climat tempéré, fosse semi-enterrée, apports réguliers de lisiers ayant séjournés moins de 4 mois en bâtiment) ont été transposés à une fosse de 1200 m<sup>3</sup>, conduites selon les mêmes conditions. La production d'énergie obtenue permettrait de couvrir 85% des besoins de chaleur d'un élevage de 210 truies naisseur-engraisseur. Pour un investissement de l'ordre de 85 000 €, c'est un temps de retour sur investissement de 8 ans avec des aides. Toutefois, la rentabilité proviendra des économies d'énergie réalisées sur l'élevage et elle est à définir au cas par cas (consommation et coût de l'énergie ? Equipements de chauffage eau chaude en place ?...).

## Etude de la cinétique de la méthanisation en vue du développement d'un modèle de dimensionnement de méthaniseur industriel

S. Guillaume, S. Hattou, F. Blanc, F. Giboulet, A. Guendouz

ARKOLIA ENERGIES, ZA du Bosc – 16 rue des Vergers, 34130 Mudaison

Correspondance : [aguendouz@arkolia-energies.fr](mailto:aguendouz@arkolia-energies.fr), +33 467 40 47 03, fax +33 467 40 00 72

### Contexte :

Le dimensionnement des unités de méthanisation en termes de choix de temps de séjour est un paramètre important pour optimiser les coûts de construction et de fonctionnement. Le dimensionnement se base sur des études pilotes réalisées au laboratoire. Ce type d'étude reste relativement rare par rapport au nombre d'installations construites. Ceci est dû principalement à deux raisons : le coût des études considéré comme élevé selon la taille de l'installation à construire, ainsi que le temps d'expérimentation assez important pouvant retarder l'avancée du projet. Actuellement le dimensionnement des installations est basé dans la plupart des cas sur une connaissance issue principalement du retour d'expérience des constructeurs.

Dans l'objectif de développer une méthode de dimensionnement du temps de séjour, plus rapide et à moindre coût des tests ont été réalisés et sont présentés ci-dessous

### Mode opératoire

Afin d'avoir des données à différentes échelles et de pouvoir valider notre modèle, nous avons choisi d'utiliser les digestats en tant qu'inoculum et les mêmes intrants que ceux de nos installations à la ferme en fonctionnements. Napagèse dans le Tarn (technologie Arkométha thermophile) et Ovimétha dans l'Aveyron (technologie infiniment mélangée mésophile). Ces intrants ont été méthanisés en mode batchs successifs, c'est-à-dire qu'à la fin de chaque batch, le digestat restant sert d'inoculum à l'alimentation suivante. Cela, dans l'objectif, d'adapter l'inoculum et de réduire le temps de latence. Au moins quatre ajouts ont été réalisés au total pour cette étude. ([Kouas M et al. 2017](#). Robust assessment of both biochemical methane potential and degradation kinetics of solid residues in successive batches. Waste Manag. 70, 59-70)

Le dernier ajout a été réalisé sur plusieurs répliques afin de pouvoir en sacrifier à différents temps. Ceci permettrait de suivre la cinétique de méthanisation et ses intermédiaires. De 21 à 24 fioles et donc autant de temps ont été analysés, pour chaque temps les MS, MO, AGV, pH, DCO soluble, gaz, DCO total ont été réalisés. Ces mêmes analyses ont été réalisées également sur l'intrant en plus des protéines, lipides et Van Soest. Parallèlement un grand nombre de données ont été rassemblées sur les paramètres de suivi des unités industrielles, ovimétha et Napagèse.

Un modèle de digestion anaérobie à deux étapes a été mis en œuvre pour modéliser puis analyser les résultats issus des expérimentations. Les Résultats d'analyses.

### Conclusion

Les batch successifs ont été réalisés et terminés, les dernières analyses sur les batchs sacrifiés à différents temps sont en cours, l'étape suivante est la modélisation des données, afin de mettre en place un modèle permettant de définir le temps de séjour nécessaire pour la méthanisation continu des produits testés. Ces résultats seront confrontés à la réalité du terrain grâce aux résultats de suivi des unités industrielles, ovimétha et Napagèse

Les résultats analytiques et issus de la modélisation seront présentés lors de présentation des JRI 2018 si ce résumé est sélectionné.

Laurent Lardon, Doris Hafenbradl, Mich Hein, Electrochaea

### **Biocat project, a rapid and efficient bio-methanation process**

The necessity of reducing the carbon footprint of energy consumption has set new challenges to production and distribution of both electrical and gas energies. The generalization of renewable but intermittent sources of energy (wind, solar) in the electrical mix put the transmission infrastructure under pressure to a point where solutions for massive and distributed energy storages are necessary. In parallel, the reduction of fossil gas in the gas grid implies mobilizing large amounts of biomass and developing quickly a park of biogas plants with upgrading facility.

Methanation, the reaction of CO<sub>2</sub> and Hydrogen to produce methane, addresses this nexus. Coupled to an electrolyser, it diverts from the electrical grid the excess production of renewable electricity and stores it as methane, a form of energy which is easy to store and distribute across Europe.

Electrochaea, drawing from academic research to select and study a strain of Archae, has developed an industrial solution of bio-methanation. In a first stage (1), electric power is converted into hydrogen via electrolysis. Afterwards, during the methanation stage (2), the hydrogen is combined to a source of renewable CO<sub>2</sub> to produce renewable methane:

- (1) Electrolysis:  $4 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{ H}_2 + 2 \text{ O}_2 + \text{Heat}$
- (2) Methanation:  $\text{CO}_2 + 4 \text{ H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O} + \text{Heat}$

Electrochaea's BioCat™ Power-to-Gas process uses a proprietary strain of methanogenic archaea and a process design allowing:

- The efficient reaction of CO<sub>2</sub> to CH<sub>4</sub>, with more than 99% conversion of the treated CO<sub>2</sub>,
- The conversion of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> into only one product, methane, ready for injection to the gas grid,
- The control of the biological reaction to guaranty a stable, robust and high-level of performance,
- Dynamic operation without sacrificing the product quality accepting instantaneous doubling of the loading-rate, and rapid start or shut-down of the plant, required to respond to request for balancing the electrical grid,
- The ability to use different sources of CO<sub>2</sub>, and the tolerance to contaminants such as H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, O<sub>2</sub>...
- The choice of operating as a pure methanation plant (from pure CO<sub>2</sub> to CH<sub>4</sub>) or as a biogas upgrading plant and a methanation plant (conversion of 1 Nm<sup>3</sup> of biogas to 1 Nm<sup>3</sup> of methane).

The process has been scaled up to 1 MW of electrolyser capacity, which corresponds to a production of 50 Nm<sup>3</sup>/h of CH<sub>4</sub> and a heat source of 320 kW. The 1 MW demonstrator, erected in 2016 on a wastewater treatment plant of Copenhagen (Denmark) has been operated more than 2 500 hours, on raw Biogas from a sewage sludge biogas plant or on the CO<sub>2</sub> released by the upgrading of this biogas.

## **Session**

# **POSTERS**

## MAPPED – Développement et tests d'outils dédiés au pilotage intelligent d'unités de méthanisation à l'échelle du territoire pour accélérer et optimiser la production de biogaz

*Elodie Le Cadre Loret, Charlotte Richard, Thierry Cadon, Jean-François Carpentier, Henry Le Goas (ENGIE), Jérémie Miroux, Cyrille Charnier, Julien Budin (BioEnTech), Fabrice Béline (IRSTEA), Eric Latrille, Jean-Philippe Steyer, Sabine Houot, Julie Jimenez, Michel Torrijos, Cyril Girardin et Bastien Zennaro (INRA), Guillaume Accarion (Akajoule)*

Le projet MAPPED ambitionne, sur une durée de 30 mois de 2017 à 2019, de lever les principaux verrous techniques de la filière méthanisation par l'intégration d'outils digitaux intelligents à l'échelle des unités et du territoire. Ces outils portant sur la biologie du système et la remontée d'information par le biais de capteurs innovants permettront de renforcer la rentabilité de la filière dans une démarche d'économie circulaire, en optimisant l'usage des ressources et le bilan environnemental du secteur. Un des objectifs est également de développer et tester une plateforme web territoriale pour déployer une nouvelle génération d'aide à l'exploitation et au développement territorial.

Le consortium à l'origine du projet regroupe 5 partenaires aux compétences complémentaires ENGIE, BioEnTech, Akajoule, INRA et IRSTEA, sur la filière méthanisation et les outils digitaux innovants.

Le projet MAPPED repose sur 4 piliers et un budget de 3,5 M€ soutenu par l'ADEME et la BPI France : ingénierie et déploiement sur des sites pilotes, essais sur sites, développement et test d'une plateforme territoriale et analyse environnementale des solutions développées. Plusieurs unités pilotes en France sont partenaires du projet MAPPED afin de valider et de confirmer l'optimisation du fonctionnement biologique des unités de méthanisation.

Nos travaux de recherche opérationnelle et les développements effectués à ce jour sur les unités et territoires pilotes ont une portée nationale et internationale à terme, afin d'accélérer et de sécuriser le développement de la filière méthanisation et la production de biogaz/biométhane.

De plus, nos travaux de recherche sont directement appliqués au terrain puisque nous testons les produits sur les unités de méthanisation au cours des 30 mois de projet.

Les outils de supervision, le système de prédiction de la qualité agronomique des digestats, les capteurs communicants et autonomes en énergie sont des produits transférables quel que soit le terrain local, national ou international.

L'équipe MAPPED présentera les premiers résultats du projet sur les gains de production associés à l'installation des outils de supervision (optimisation de la dégradation des intrants, stabilisation et/ou augmentation de la production de biogaz afin d'atteindre les objectifs...), sur la remontée efficace des données des capteurs pour le pilotage de l'unité par l'exploitant (réseaux IoT) et sur les analyses environnementales des unités avec ou sans outil de supervision innovant...

La présentation sera conclue par les travaux à réaliser dans la deuxième partie du projet MAPPED et sur les résultats attendus.



Figure 1 : MAPPED – déployer une nouvelle génération d'outil digitaux pour booster la production de biogaz sur le territoire

## Utilisation d'enzymes en vue de l'amélioration de la digestibilité des pulpes de betterave

Bougrier C., Da Costa A., Dognin D., Lazuka A., Quentin G. et Cacho Rivero J.A.  
*Veolia Recherche & Innovation, zone portuaire de Limay, 291 avenue D. Ducas, 78520 Limay*

La lignocellulose, constituant majeur de la matière organique végétale, est principalement composée de cellulose, hémicellulose et de lignine, toutes trois fortement imbriquées dans une structure semi-cristalline. Cette structure semi-cristalline rend la cellulose et l'hémicellulose difficilement accessible physiquement à la biodégradation anaérobie. L'utilisation de prétraitements chimiques ou physiques permet de libérer ces composés mais nécessite un apport énergétique important. L'hydrolyse enzymatique semble aujourd'hui une bonne option pour booster la dégradation des composés lignocellulosiques et ainsi améliorer les performances globales du procédé de digestion anaérobie.

Cinq configurations de réacteurs en deux phases ont été utilisées avec les mêmes conditions opératoires en termes de substrat (pulpe de betterave diluée à 11% MS), temps de séjour hydraulique (hydrolyse 5j, digestion 30j) et de température (35°C). La différence entre ces 5 procédés est la dose croissante du cocktail enzymatique (principalement des cellulases) ajoutée : H0+M0 < H1+M1 < H2+M2 < H3+M3 < H4+M4 (H0+M0 étant la configuration témoin sans ajout d'enzymes).

Les réacteurs ont été suivis sur une période de 6 mois afin d'obtenir une stabilité de l'étape de digestion. Le tableau 1 présente les performances du procédé global

Tableau 1 : Performance de digestion en fonction de la dose d'enzymes ajoutée

| Config. | Abt MV (%) | AGV (mg eq Ac.L <sup>-1</sup> ) | Y'CH <sub>4</sub> (NL CH <sub>4</sub> .kg <sup>-1</sup> MV) | Bilan DCO (%) |
|---------|------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------|
| H0+M0   | 71%        | 1 000                           | 315                                                         | 106%          |
| H1+M1   | 73%        | 2 160                           | 313                                                         | 107%          |
| H2+M2   | 75%        | 205                             | 377                                                         | 118%          |
| H3+M3   | 78%        | 75                              | 367                                                         | 111%          |
| H4+M4   | 77%        | 92                              | 372                                                         | 115%          |

Excepté pour la plus faible dose (H1+M1), l'utilisation d'enzymes permet une amélioration des performances tant au niveau de la dégradation de la matière, de la teneur en AGV dans le digestat que de la production de méthane. Le rendement méthane a été amélioré de 15% pour trois des configurations testées, quelle que soit la dose (configuration 2, 3 et 4).

## **Digestion anaérobie et spectroscopie proche infra-rouge. Application au suivi de procédé à travers l'utilisation et l'industrialisation de modèles en ligne pour 5 paramètres clés de la méthanisation**

Ronan TREGUER / SEDE

### Contexte

Disposer d'informations fiables et en temps réel est impératif pour le suivi et le contrôle d'installations de digestion anaérobie afin d'assurer leur bonne performance et la stabilité du procédé. Certains paramètres sont déjà suivis de manière instantanée et continue, ce qui permet de donner des éléments clés pour l'exploitation du procédé. D'autres paramètres importants, comme la concentration en acides gras volatils (AGV), l'alcalinité, les teneurs en matière sèche ou matière volatile, etc, nécessitent encore la prise d'échantillons et des analyses par méthodes de laboratoire, induisant un délai dans la réponse en fonction des techniques utilisées. La spectroscopie proche infra-rouge (SPIR) est une technologie éprouvée pour caractériser en ligne les propriétés de matière organique dans des domaines tels que les industries agro-alimentaires ou pharmaceutiques, où elle représente un outil important de contrôle de procédé. Son application pour la caractérisation de substrats organiques et le suivi et contrôle de la méthanisation de déchets est en forte croissance, avec plusieurs études mettant en avant la performance de cette technique pour déterminer le potentiel méthane de différents substrats ou pour le contrôle de procédé.

### Objectif et méthodes

L'étude en question présente le développement de modèles mathématiques sur base SPIR et leur intégration sur site à travers un équipement miniaturisé. Les paramètres d'intérêt pour ce développement sont les teneurs en matière sèche (MS) et matière volatile (MV), les acides gras volatils (AGV), l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) et l'alcalinité (Alc). Ce travail, réalisé en collaboration avec la société spécialisée GreenTropism, s'est appuyé sur une base de données existante, reprenant des échantillons provenant de plusieurs étapes du procédé et concernant des substrats variés. Les modèles ont été construits sur un spectrophotomètre de laboratoire, puis un appareillage de terrain miniature a été sélectionné par comparaison avec le spectrophotomètre de référence.

### Résultats

Aujourd'hui, ces modèles sont en cours de déploiement à travers l'intégration sur site d'un appareillage de terrain permettant la mesure en ligne, en continu des différents paramètres d'intérêt cités précédemment. Ce travail permettra aux opérateurs de disposer d'un outil pour le suivi en temps réel d'installations de méthanisation afin de maximiser la performance et sécuriser le procédé du point de vue biologique.

## **Digestion anaérobie et enzymes. Application au prétraitement de substrats difficiles, dans le but de fluidifier le mélange de gisements à incorporer**

Ronan TREGUER / SEDE

### Contexte

Un enjeu mondial majeur aujourd'hui consiste à adopter une utilisation efficace de l'énergie, ou à développer des moyens d'énergies renouvelables propres. Dans les faits, la grande partie des besoins énergétiques dans le monde est supportée par les ressources fossiles. Mais avec une demande toujours croissante et de plus en plus de questionnements sur la protection de l'environnement, la recherche d'alternatives pour la production d'énergie, comme la méthanisation, ne fait que se renforcer. Une grande partie des gisements mobilisables en méthanisation concerne les effluents d'élevage, dont les fumiers, ainsi que les cultures intermédiaires à vocation énergétique. Ces deux types de gisements ont une fraction en lignocellulose élevée et peuvent s'avérer difficiles en termes de préparation et d'incorporation dans le procédé de méthanisation. Cette biomasse est d'autant plus intéressante pour la production d'énergie qu'elle ne vient pas concurrencer les cultures à vocation alimentaire.

L'étape de prétraitement est essentielle pour la performance de conversion de gisements lignocellulosiques : cela est nécessaire pour rendre la cellulose plus accessible à la biodégradation. Plusieurs méthodes de prétraitement sont possibles, les plus répandus consistant en des approches mécaniques (broyage) ou thermiques. Le fait d'incorporer de tels gisements en méthanisation, amène à une augmentation significative de la viscosité du mix global, et engendre des contraintes mécaniques élevées sur les équipements, voire des risques de croûtage qui peuvent induire des pertes d'exploitation.

### Objectif et méthodes

L'étude en question présente l'application d'enzymes pour aider au procédé de méthanisation, et en particulier à la gestion de gisements plutôt secs tels que les cultures intermédiaires. Avec l'utilisation continue de telles enzymes, l'objectif a également été d'augmenter la teneur en matière sèche dans le procédé afin de produire plus de biogaz pour un volume de réaction identique. La stabilité biologique du procédé a été suivie de près, notamment par rapport à la charge organique qui était de fait également plus élevée.

### Résultats

Cette étude s'est appuyée sur des essais pilote en continu, avec une caractérisation de la performance du procédé. Les tests ont été menés à une teneur en matière croissante dans le réacteur pour atteindre un plateau de limite de stabilité biologique.

## Improvement of biomethane production from agricultural waste

Solène Fournel\* / Air Liquide, Centre de Recherche Paris-Saclay, France  
Aude Bertrandias / Air Liquide, Centre de Recherche Paris-Saclay, France

\* [solene.valentin@airliquide.com](mailto:solene.valentin@airliquide.com)

Biogas is formed by the anaerobic microbiological conversion of organic matter into a mixture of gases, principally methane (~55%) and CO<sub>2</sub> (~45%). We focus on agricultural waste as the fermentation substrate, since it will represent 90% of the available feedstock for anaerobic digestion in France in 2030, according to an ADEME report.<sup>1</sup>

Biogas is a renewable energy source, with multiple possible uses. One of these is use for mobility, once it has been upgraded into biomethane (heavy goods vehicles, maritime transportation). In 2014, the European Commission recommended to develop European-wide CNG and LNG filling station infrastructures by launching the "Clean Fuel Strategy". Improvement of the biomethane production process is thus key to deploy clean transportation through biobased CNG and LNG.<sup>2</sup>

In order to improve biomethane production, developments to increase biogas production and reduce operating costs are needed. Several technologies can be considered to do so. This presentation will be focused on ligno-cellulosic degradation through biologic pre-treatment and ozone pretreatment to reduce operating temperature. Indeed, a limit in using agricultural waste for anaerobic digestion is generally the high content of lignocellulosic material, which is difficult to digest by the bacteria consortia without adequate pre-treatment steps.<sup>3,4</sup>

Also, the upgrading step which converts biogas to biomethane must be optimized, to reduce costs and increase reliability. Again, several technologies can be considered. This presentation focuses on in-situ treatments to remove biogas impurities and the latest achievements in membrane permeation technology employed in upgrading.

<sup>1</sup> ADEME (2013), Report "Estimation des gisements potentiels de substrats utilisables en méthanisation", 117 p.

<sup>2</sup> EU directive 2014/94/EU on the deployment of alternative fuels infrastructure

<sup>3</sup> Sindhu et al. (2016), "Biological pretreatment of lignocellulosic biomass – An overview", Bioresource Techno. Vol. 199, pp. 76-82

<sup>4</sup> Schroyen et al. (2015), "Effect of enzymatic pretreatment of various lignocellulosic substrates on production of phenolic compounds and biomethane potential", Bioresource Techno. Vol. 192, pp. 696-702

\* Ramos et al. (2012), "The role of the headspace in hydrogen sulfide removal during microaerobic digestion of sludge", Water Sci. and Techno. Special Issue Vol. 66 (10), pp. 2258-2264

\* Shen et al. (2015), "Producing pipeline-quality biomethane via anaerobic digestion of sludge amended with corn stover biochar with in-situ CO<sub>2</sub> removal", Applied Energy Vol. 158, pp. 300-309

\* Park and Novak (2013), "The effect of direct addition of iron(III) on anaerobic digestion efficiency and odor causing compounds", Water Sci. and Techno Vol. 68 (11), pp. 2391-2396

## MCUBE

### Micro Méthanisation Modulaire intégrée dans le Cycle agronomique, Biologique et Economique de l'exploitation agricole

**Contexte et positionnement du projet :** La micro-méthanisation est une approche qui est cohérente avec le tissu des exploitations agricoles en France. Ces exploitations sont dispersées sur un territoire et majoritairement de petites tailles générant localement des flux de déchets (lisiers, fumiers, ...) limités, compris entre 1000 et 2500 tonnes par an. A cela, s'ajoutent des flux de matières végétales telles que des résidus de cultures (paille, canne de maïs, ...) ou des cultures intermédiaires dédiées à la méthanisation. Dans ce contexte, la micro-méthanisation autarcique (cycle fermé) se positionne sur des puissances inférieures à 75 KWé.

Cette micro-méthanisation est-elle viable pour le monde agricole ? Elle devrait car elle répond à un ensemble d'enjeux du secteur agricole et du territoire. Elle s'inscrit dans un modèle de bio-économie circulaire, de diversification créatrice de valeur ajoutée et doit aboutir à une nouvelle activité génératrice de revenus stables (vente d'électricité) pour l'agriculteur. Elle encourage l'agriculture dans des pratiques agro-écologiques (CIVE, retour au sol des digestats, réduction des odeurs et des fertilisants chimiques).

Pour y répondre, un consortium s'est constitué en Occitanie depuis 2013 autour d'un programme dénommé Mcube, associant toutes les compétences nécessaires. Ce consortium rassemble des établissements de recherche et développement (CRITT GPTE, LISBP/INSA, Ecole d'agronomie de Purpan, Ovalie Innovation), des coopératives agricoles (Vivadoir et Maïs adour) et des PME technologiques (ADG, SIREA, FAUCHE). Le programme **Mcube (Micro Méthanisation Modulaire intégrée dans le Cycle agronomique, Biologique et Economique de l'exploitation agricole)** bénéficie depuis 2015 d'un soutien de la région Occitanie (FEDER) et de l'ADEME.

**Modèle économique :** le modèle économique repose sur une complémentarité des parties prenantes du projet qui permet d'envisager la mise en place d'une filière industrielle intégrée et locale impliquant des acteurs du Sud-Ouest français. L'intérêt est que la création de valeur qui démarre sur l'exploitation agricole permette d'alimenter une chaîne complète d'intervenants en charge :

- de favoriser l'accès au marché des agriculteurs en tenant compte de tous les aspects socio-économiques qui régissent le fonctionnement d'une exploitation agricole
- de manufacturer des modules d'unités de méthanisation en condition industrielle standardisée sous haute exigence de qualité et de conformité
- d'installer ces unités « pré-fabriquée » par l'assemblage des modules sur des sites agricoles de type élevage bovins, porcins et palmipèdes
- de superviser la méthanisation et la cogénération pour assurer la maintenance des équipements pendant toute la durée de l'exploitation de l'unité
- de garantir ainsi à l'agriculteur un revenu stable issu de la méthanisation tout en évitant les difficultés liées à des complexités administratives ou techniques

Ce modèle économique et industriel innovant doit permettre par son organisation et sa robustesse de générer un marché consistant afin d'atteindre des effets d'échelle qui permettront de démultiplier la rentabilité de la méthanisation agricole.

**Démonstration : le choix technologique.** La solution se compose de trois compartiments :

1) **Methanbox :** c'est un compartiment de préparation de la matière dédiée au mélange entre lisiers et résidus solides (booster) : ce compartiment a été pensé pour incorporer au mieux le booster et limiter les risques d'accumulation ou de flottation au sein du digesteur. Ses fonctions possibles sont donc mélange, hydrolyse et hygiénisation.

2) *Covermetha* : la fosse à lisier est revampée en digesteur en intégrant des dispositifs de mélange, de régulation de température et de captage du biogaz produit lors de la méthanisation. C'est un procédé extensif fonctionnant en mode *fed-batch* dont le temps de séjour est fixé par la fréquence d'épandage (2 à 3 fois par an).

3) *Cogénérateur* : 4 moteurs sont à l'étude (18, 26, 35 et 60 KWe) qui consiste à déterminer les conditions optimales de fonctionnement (maximisation du rendement et minimisation de la maintenance) en relation avec le pilotage du digesteur (production, qualité biogaz).

Deux démonstrateurs sont actuellement suivis à l'échelle de deux exploitations correspondant aux scénari **palmipède et bovin**. Les conditions de fonctionnement (pied de cuve, température, ...) et les matières (lisiers, booster, CIVE) ont été au préalable étudiées en pilote de laboratoire. Ces démonstrateurs font l'objet de bilans matière et énergétique. Leurs performances sont comparées à celles obtenues dans les mêmes conditions en laboratoire (référence).



Aujourd'hui, les installations sont tributaires de la qualité du biogaz/biométhane issu de leurs digesteurs. Les constituants du gaz produits sont d'une manière générale analysés (en continu) en entrée de moteur ou en pré-injection afin d'en contrôler sa qualité avant valorisation.

WESSLING propose des services d'accompagnement à l'exploitation des installations de méthanisation notamment dans le contrôle analytique des intrants, du digesteur, des gaz (Biogaz/Biométhane) et du digestat. Fort de son expérience, nous avons développé des prestations spécifiques et adaptées pour nos clients, comme le contrôle sur site des caractéristiques d'un biométhane (Injection). En parallèle, nous interagissons chaque jour avec nos clients pour améliorer la qualité de nos prestations et développons ensemble des solutions adaptées au terrain.

Récemment, l'exploitation des analyses de contrôle ponctuel sur les postes d'injection ou en entrée de cogénération a révélé certains points importants :

- Certains composés néfastes pour le système de valorisation ne peuvent être mesurés que par des analyses ponctuelles (Bien que de moins en moins avec l'évolution des technologies).
- Une fraction du gaz peut se révéler inconnue ou mal maîtrisée : entrée d'air lors du chargement ou par effet Venturi, présence de contaminants en post-épuration, taux important de méthane à l'évent.
- Variation « importante » de la qualité du biogaz sur une courte période, à l'occasion d'une digestion mal contrôlée et/ou une ration ultra variée.

Pour répondre à ces problématiques nouvelles, WESSLING a mis en place un process de « Mapping » sur plusieurs installations. L'objectif de cette expertise est le diagnostic de performance « gaz » sur l'exploitation. Sur le plan pratique, cela se résume par une analyse sur site en temps réel des différents composés du biogaz et sur plusieurs points. Ce mapping est complété par un diagnostic « fuite » global sur l'installation induisant une possible perte d'exploitation ou une augmentation de la consommation d'intrant.

Par exemple, sur une problématique d'azote en pré-cogénération, une cartographie de l'exploitation a permis d'identifier une entrée d'air lors du chargement de l'intrant importante dégradant la pureté du biogaz en sortie. Pour cela, nous avons réalisé des prélèvements en pré-cogénération (post filtration), avant le système de filtration, en sortie de digesteur.

En conclusion, dans un souci de maîtrise de l'installation et des coûts associés, le mapping de WESSLING présente un intérêt sans équivoque pour accroître la productivité d'une part et d'autre part réduire et anticiper les pannes.

## DUALMETHA

### Procédé de méthanisation hybride lauréat des Programmes Investissements d'Avenir

**Contexte.** DualMetha a été créé dans le but de répondre à l'inadaptation des technologies actuelles pour valoriser des déchets solides. En effet, les procédés continus nécessitent des intrants fluides sans indésirables et/ou une chaîne d'admission complexe et onéreuse afin d'assurer une régularité d'alimentation et une stabilité biologique, et peuvent par ailleurs générer des volumes de digestat liquide importants. D'autre part les systèmes discontinus (garage ou silos) connaissent des problèmes de rendement de dégradation, de variations de qualité du biogaz et de maîtrise de la température, etc... DualMetha combine la polyvalence et la robustesse des procédés discontinus avec l'efficacité et la performance des procédés continus.

**Présentation du concept.** Le procédé DualMetha est un procédé hybride combinant un réacteur continu infiniment mélangé traitant des substrats liquides et six à dix réacteurs discontinus permettant de traiter des substrats solides en immersion. La matière solide est chargée dans ces réacteurs les cuves par un grappin suspendu à un pont roulant pivotant, puis est immergée par le liquide en fermentation dans le digesteur liquide chauffé à 55°C. Une fois la digestion démarrée, une circulation régulière de liquide entre le digesteur central et chaque digesteur solide est assurée afin de maintenir les digesteurs solides en température et d'évacuer du liquide en cas d'accumulation d'acides dans le réacteur solide. A la fin de la digestion, le digestat liquide, séparé du digestat solide par un caillebotis, est réintroduit dans le digesteur liquide et la matière solide résiduelle est évacuée par le grappin. Du fait du pouvoir absorbant de la matière solide, le procédé global est déficitaire en liquide nécessitant l'ajout d'intrants liquides dans le digesteur continu. Le biogaz produit dans l'ensemble du système est stocké au niveau du digesteur central, lequel est équipé d'un gazomètre.

**Travaux de validation du concept technologique avec l'INSA Toulouse.** La première étape de validation du procédé a consisté en une simulation dynamique du système complet à l'aide d'un modèle numérique, couplée à une détermination expérimentale des données nécessaires au paramétrage du modèle portant sur la composition biochimique des substrats et le comportement physique des substrats dans les réacteurs solides. Cette étude a démontré la robustesse du procédé DUAL METHA du fait de sa capacité d'inoculation (immersion) et de la circulation de liquide entre le digesteur liquide et les digesteurs solides permettant au système d'encaisser des surcharges organiques importantes et les éventuelles acidoses ponctuelles induites. L'influence de différents facteurs comme le nombre et le volume des cuves a été étudiée afin de guider le dimensionnement du système.

Des essais sur une cuve pilote de digestion solide à échelle 1 ont démarré au printemps 2018. Ils visent à valider les choix constructifs de la cuve et à confirmer les résultats laboratoires. En particulier, sont vérifiés l'étanchéité du système et le comportement mécanique et rhéologique du massif pailleux au cours du temps de digestion.

**Commercialisation innovante : la location.** Au-delà de l'aspect technologique, l'innovation de DualMetha passe également par son modèle économique de diffusion : la location. Grâce à ce modèle, l'investissement du porteur de projet se limite au terrassement, aux travaux de VRD, au raccordement au réseau et aux éventuels espaces de stockage, soit selon les projets 15 à 25% de l'investissement normalement nécessaire. Ainsi la méthanisation devient accessible à un plus grand nombre d'acteurs, parfois bloqués par des difficultés de financement. Par ailleurs, la location permet d'aligner les intérêts du constructeur et du porteur de projets sur le bon fonctionnement de l'unité et de lier les deux parties sur le long terme. Une part variable du loyer sera allouée à la surperformance par rapport à la production théorique de départ pour accroître cet intérêt commun.

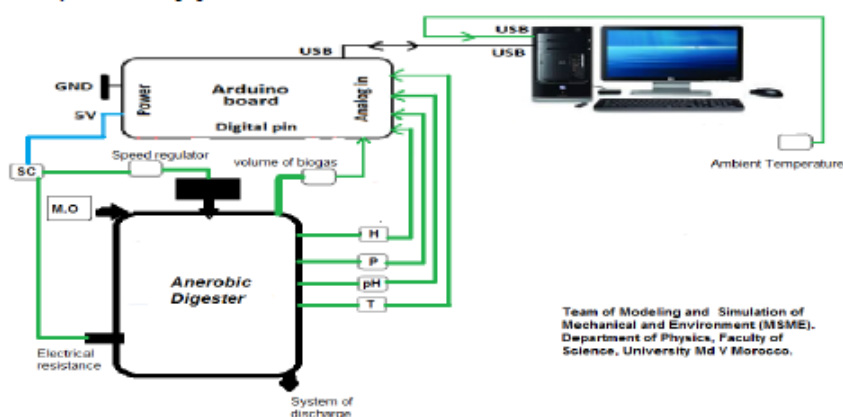
## Mathematical and numerical modeling of the valorization of household waste in Morocco

Abdeslam MOHCINE and Kamal GUERAOU

Team of modeling and Simulation of Mechanical and Environment (MSME). Department of Physics, Faculty of Sciences, University Mohammed V Morocco

E-mail: [abdeslamet@gmail.com](mailto:abdeslamet@gmail.com)

**Abstract:** We consider a bioreactor as a reactive porous medium, and we are interested in the couple's mass and energy transfers that develop there, in an attempt to explain the interactions between the physical, thermal and biochemical processes that govern waste biodegradation. A mathematical model based on the mass conservation equation, energy equation, Brooks empirical equation and the biological model based on the Monod model has been developed to describe the actual behavior of the bioreactor in the anaerobic methanogenic phase. The Monod model takes into account bacterial activity, biological behavior and considers different concentrations for the components. The main objective of this work is the modeling of diphasic flows without phase change. The degradation of solid waste is only considered in the biological model of degradation and methane production. We present the equation of conservation of matter and energy and thermodynamic functions. In this simulation, we have opted for the use of the finite volume method and the double scan method. The finite volume method is a discretization method well adapted to the numerical resolution of the conservation equation of extensive quantities [1].



Team of Modeling and Simulation of Mechanical and Environment (MSME).  
Department of Physics, Faculty of Science, University Md V Morocco.

Figure 1. Full scheme of the experimental characterization bench.

matter within the anaerobic digester through several physical quantities. The principle of building a control board capable of optimizing and controlling the digester, so that the mechanical agitator and the electrical resistance play the role of a catalyst, to accelerate the degradation of organic matter and produces biogas rapidly compared with conventional digesters [2].

## Production of biogas

The production of biogas depends of different parameters, such as the waste composition, the water content, temperature and density of the medium to be taken into account in the kinetic models biogas production. The production of biogas changes depending of degradable components waste and quantity. The production of biogas is defined by exponential law proposed by Halvadakis This law is malfunctioning for the first-year degradation of a young waste, but applies very well to anaerobic phase [3]:

$$\alpha_g = C_g \sum_{i=1}^3 \frac{A_i(t+dt) - A_i(t)}{dt}$$

Where  $A_i$  is the fraction of the waste,  $C_g$  the potential the production of biogas and  $\alpha_g$  the rate of biogas generation.

## Reference

In our work, we have examined the role of key parameters and processes of degradation of waste and methane production in the methanogenic anaerobic phase, such as temperature, waste density. The humidity (Moisture) is a determining factor of the kinetics of degradation and therefore in production of gas. The work showed that the temperature is one of the most important parameters for the anaerobic degradation and the waste stabilization. Despite the importance of temperature and its influence on various aspects mechanical, biological and hydraulic of waste and bioreactors, the work and analyzes concerning this parameter are very limited. Thus, we have emphasized in our work on the role of temperature and tried to explain the biological phenomena related to microbial activity, depending on the temperature, as well as saturation. We have developed a model of numerical simulation of the hydraulic phenomena and the diphasic flow of liquid and gas in bioreactors, in first stage (step). The hydraulic results of numerical simulation show, the model is able to correctly produce the hydraulic behavior of bioreactors during leachate reinjection [4].

## Reference

- [1] BROOKS R.J. & A.T.COREY. "Hydraulic properties of porous media". Hydrol. Pap. Colo. State Univ, Fort Collins, Vol. 3. 1964.
- [2] S.Men-la-Yakhaf, K.Gueraoui and M.DRIOUICH, New numerical and mathematical code reactive mass transfer and heat storage facilities of argan waste, Advance studies in Theoretical Physics, 8(10) (2014), 485-498
- [3] M. EL Fadel, A.N Findikakis Numerical modelling of generation and transport of gas and heat in landfills, Model formulation, Waste Management and research 14,483-504, 1996
- [4] F.El khaoudi, K.Gueraoui, M.Driouich and M.Sammouda, Numerical and Theoretical Modeling of natural convection of nanofluids in vertical rectangular cavity, International Review on Modeling and Simulations, 7(2)(2014).

## Méthanisation des noyaux de datte : effet de la composition chimique de six variétés et de différents prétraitements

Ikbel Souli<sup>1,3</sup>, Xiaojun Liu<sup>2</sup>, Thomas Lendormi<sup>2\*</sup>, Nizar Chaira<sup>3</sup>, Ali Ferchichi<sup>4</sup> and Jean-Louis Lanoisellé<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Tunis El Manar, Faculté des Sciences de Tunis, Département de Biologie, Campus Universitaire - 2092 El Manar II - Tunis, Tunisie

<sup>2</sup> Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56300 Pontivy, France

<sup>3</sup> Institut des Régions Arides, Aridlands and Oases Cropping Laboratory, Medenine, Tunisie

<sup>4</sup> Institut National Agronomique de Tunisie, 43 Charles Nicolle, 1082, Tunis, Tunisie

\*Auteur de correspondance: thomas.lendormi@univ-ubs.fr

### Résumé :

La méthanisation mésophile (37 °C) de six variétés tunisiennes des noyaux de dattes (*Phoenix Dactylifera L.*) a été étudiée lors d'une collaboration entre, d'une part, l'Institut des Régions Arides (Tunisie) qui s'intéresse à la valorisation des dattes et à la fertilisation des sols et, d'autre part, l'équipe génie des procédés de l'IRDL (France). Les caractéristiques biochimiques des substrats ont été analysées, notamment la demande chimique d'oxygène (DCO), le pH, les teneurs en matière sèche (MS), matière volatile, polyphénols, protéines, lipides, sucres totaux, lipides, phosphore total et azote total. Une différence statistiquement significative a été identifiée au niveau de la composition biochimique des six variétés ( $p < 0,05$ ). Après digestion anaérobie, les courbes de production de méthane ont été modélisées par le modèle de Gompertz modifié afin d'extraire les différents paramètres cinétiques. Les productions moyennes de méthane sont respectivement de 0,267, 0,298, 0,299, 0,304, 0,318 et 0,327 Nm<sup>3</sup> kg DCO<sup>-1</sup> pour les variétés Bejou, Ammari, Kentichi, Alig, Kenta et Deglet Nour. Pour le mélange des 6 variétés, la production obtenue est de 0,293 Nm<sup>3</sup> kg DCO<sup>-1</sup>. Cela correspond à une biodégradabilité anaérobie des noyaux de dattes comprise entre 76,4% et 93,3% suivant la variété. Aucune corrélation significative n'a été trouvée entre le potentiel méthanogène et la teneur en polyphénols. En outre, l'effet des divers prétraitements sur la méthanisation des noyaux de datte a été également étudié. L'impact du prétraitement thermique (à 70 °C et 100 °C), d'un traitement alcalin (6% et 10%, NaOH/MS), par acide (6% et 10%, HCl/MS) et d'un traitement par germination des noyaux dans l'eau ont été étudiés sur la méthanisation du mélange des 6 variétés de noyaux de datte. Le résultat montre que seul le prétraitement par germination a un léger effet significativement positif sur la production de méthane des noyaux de datte (+5,3% d'augmentation du potentiel méthanogène,  $p < 0,05$ ). Les autres prétraitements ont provoqué un effet significativement négatif ( $p < 0,05$ ). De plus, la méthanisation des noyaux de datte prétraités par voie chimique (10% NaOH et 10% HCl) a révélé des phénomènes d'inhibition avec des périodes de latence allant de 10 à 17 jours respectivement. L'ensemble des résultats et des analyses statistiques sera présenté afin de montrer les possibilités de transfert des savoirs faire et de méthodes d'analyses statistiques de données entre les deux équipes impliquées.

## Petite méthanisation à la ferme

François Gervais / Institut de l'Elevage

Les projets de petite méthanisation à la ferme (puissance installée inférieure à 80 kW) sont peu développés mais font l'objet d'un intérêt croissant de la part du monde agricole. Les attentes concernant la petite méthanisation sont énormes, avec beaucoup de demandes mais de rares propositions. En effet, la petite méthanisation est souvent considérée comme moins rentable du fait de l'absence d'économie d'échelle. En voie liquide, les systèmes sont fonctionnels mais pas assez rentables pour des petites unités aujourd'hui (coût de la cogénération notamment), d'où la nécessité de travailler avec les constructeurs pour rechercher des voies de simplification et ainsi diminuer les coûts d'investissement. En voie solide, un travail important est à envisager pour avancer et proposer des solutions techniques opérationnelles, avec la nécessité d'améliorer l'efficacité des technologies. Le renforcement du retour d'expérience sur les installations en fonctionnement en voie liquide et solide grâce à une procédure de validation des performances de procédés reste donc indispensable pour accompagner le développement de la méthanisation à la ferme. Il est nécessaire de s'orienter vers des technologies simples avec une facilité et une rapidité de mise en route, en limitant les contraintes de fonctionnement et à un coût raisonnable. C'est la facilité de mise en œuvre et de gestion d'un projet qui permettra, demain, à un maximum d'exploitants agricoles d'avoir accès à la petite méthanisation.

Pour ces raisons, l'Institut de l'Elevage et ses partenaires – les chambres d'agriculture (Bretagne, Pays de la Loire, Indre et Loire, Occitanie), l'Union Laitière de la Meuse, et trois constructeurs Français (CRD, Sud-ouest biogaz, Enerpro-biogaz) – souhaitent approfondir le sujet, afin de proposer des techniques pertinentes aux éleveurs. Le projet **METHABOV** a pour objectif d'accompagner des constructeurs pour améliorer leurs technologies de petite méthanisation en voie liquide et solide, d'optimiser leur fonctionnement et les rendre accessibles au plus grand nombre et ainsi permettre demain leur développement dans les élevages de bovins français. Ce projet, d'une durée de 3 ans avec un début programmé en juin 2018, s'articulera autour de 3 axes : La validation de procédés de petite méthanisation en voie liquide – Une réflexion sur les solutions de valorisation du biogaz pour le développement de la petite méthanisation dans les élevages bovins – L'acquisition de connaissance sur les technologies en voie sèche par le suivi et le développement d'unités.

La mise au point de procédés en voie liquide et solide permettra de démontrer la faisabilité et la rentabilité des projets d'unité de petite méthanisation dans les élevages bovins et donc d'apporter des éléments pertinents pour encourager son développement, en particulier dans un contexte environnemental lié au réchauffement climatique et le besoin de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Les relais techniques des travaux réalisés seront assurés auprès de plusieurs réseaux d'agents spécialisés au niveau national (conseillers énergie/méthanisation, conseillers bâtiments d'élevage,...) et des constructeurs. Ces différents niveaux intégreront les nouvelles connaissances et technologies de petite méthanisation en analysant objectivement leurs intérêts et limites et les proposeront aux éleveurs ayant des projets de mise en place d'une unité de petite méthanisation sur leur exploitation. Au niveau applicabilité et transférabilité sur le terrain, cette étude devrait permettre le déploiement des solutions techniques testées. Ce travail permettra d'envisager des travaux complémentaires pour affiner les connaissances sur la petite méthanisation en voie liquide et solide et développer de nouveaux concepts, aussi bien sur le fonctionnement général des installations que sur les alternatives pour la valorisation énergétique.

## **Comparaison de 3 technologies de digestion anaérobie pour produire des acides gras volatiles à partir de la vinasse de betterave à sucre.**

Vedrenne F., Baffaleuf N., Brack N. et Cacho Rivero J.A.

*Veolia Recherche & Innovation, zone portuaire de Limay, 291 avenue D. Ducas, 78520 Limay*

Les Acides Gras volatiles (AGV) sont des molécules « carrefour ». Produites par l'hydrolyse de déchets/ressources, leurs utilisations sont multiples : directe en adjuvant, production de plastiques biodégradables, production de bioénergie, élimination biologique des nutriments ... Le développement d'une filière de valorisation biologique de co-produits agro-industriels pour la production d'AGV nécessite des optimisations multiples : quel gisement ? quel procédé ?...

Ce travail compare, sur un même gisement de vinasse de betteraves (VB) à 80 gO<sub>2</sub>/L, trois technologies de digestion anaérobie pour la production d'AGV. Les performances du CSTR (réacteur infiniment mélangé), de l'AnMBR (réacteur CSTR couplé à un module membranaire d'ultrafiltration) et de l'UASB (réacteur granulaire à flux ascensionnel) sont confrontées.

Les 3 technologies ont permis de produire des AGV, jusqu'à des charges volumiques appliquées (CVA) respectives de 91, 102 et 100 kgO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/jour et avec un temps de séjour hydraulique (TSH) de 0,8 jour. Des productivités maximales de 34 kgAGV/m<sup>3</sup>/jour (seuil technico-économique de 10) et une concentration en AGV de 28 g/L (seuil technico-économique de 15) sont atteintes. Un TSH inférieur, jusqu'à 0,4 jour, a été testé sur le gisement de VB concentrée à 40 gO<sub>2</sub>/L : les productivités sont supérieures à la cible mais la concentration en AGV atteint difficilement les 15 g/L.

La composition en AGV du jus acidogène n'est pas influencée par la CVA ni par les technologies. Dans la plupart des cas, l'acétate (C2) représente jusqu'à 40% des AGV produits, la somme du propionate (C3), du butyrate (C4) et du valérate (C5) représente 50% et l'hexanoate (C6) dépasse rarement les 10%. Des inhibitions ont été rencontrées à chaque augmentation de la CVA ou de la concentration de l'alimentation et ont parfois conduit à un arrêt irréversible de la production d'AGV.

En conclusion, le réacteur « en mode » découplé (rétention de la biomasse), est le plus robuste car aucune inhibition n'a été observée pour l'UASB et une seule réversible pour l'AnMBR.

**Anne-Laure Duedal<sup>1</sup>, Romain Le Bal'h<sup>2</sup>, Romain Girault<sup>2</sup>, Roxane Bottari<sup>2</sup>, Pascal Peu<sup>2</sup>**

1. EVALOR, Rue Georges Guynemer, 22190 Plérin
2. IRSTEA, 17 Avenue de Cucillé 35044 Rennes Cedex

La réalisation de l'objectif affiché de 1500 unités de méthanisation à l'horizon 2030 en France nécessite une augmentation rapide de la construction de nouvelles installations sur le territoire national. En effet avec plus de 400 unités de méthanisation dans le secteur agricole et 200 installations dans les autres secteurs, la filière de méthanisation n'est encore aujourd'hui que dans sa phase de démarrage. Pour accélérer la mise en place de nouvelles installations, il est nécessaire de disposer de procédés à la fois performants, robustes et dont les coûts d'investissement sont maîtrisés.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de recherche, co-financé par l'Ademe (APR DOSTE 2016-2018) et réalisé conjointement entre EVALOR et IRSTEA. Afin d'améliorer les performances des digesteurs en place et de ceux qui seront installés à l'avenir, il est possible de découpler l'ensemble des réactions biologiques menant à la production de biogaz. Les populations bactériennes responsables des premières étapes biologiques du processus de méthanisation ayant des conditions de développement similaires et des temps de réaction plus rapides; sont cultivées dans un réacteur disjoint du digesteur classique.

Sur la base de ce découplage réactionnel, le procédé BOOST®, a été développé par la société EVALOR, et permet des gains de performance significatifs dans certaines configurations (de l'ordre de 20% d'augmentation de la production de biogaz en comparaison avec une configuration « standard »). Néanmoins, les règles de dimensionnement et de pilotage de ce procédé sont actuellement fondées sur des observations de terrain, qui méritent d'être approfondies et complétées par des connaissances scientifiques nouvelles, afin de pouvoir transposer cette technologie à une large gamme de substrats entrants.

Pour ce faire, le travail de recherche repose sur la combinaison de plusieurs étapes :

La première étape a été de mettre au point un protocole de mesure d'un potentiel d'hydrolyse/acidification et de caractériser des substrats, de façon expérimentale avec des tests batch en utilisant les boues d'un réacteur d'hydrolyse/acidogénèse en fonctionnement (BOOST®). Le potentiel d'hydrolyse/acidification de différents substrats potentiellement intégrables dans la filière de méthanisation agricole (plus de 30) ont été analysés et une classification a été entreprise en fonction de leur capacité à produire des AGV et à abaisser le pH du milieu.

La seconde étape se base sur des essais sur un pilote instrumenté d'hydrolyse/acidogénèseensemencé avec un inoculum d'hydrolysats provenant d'un site BOOST agricole. Différentes recettes de mélange de substrats ont été testées afin de d'étudier les réponses aux modifications des paramètres de fonctionnement tel que la charge, le temps de séjour et la recirculation de digestat.

La troisième étape de ce projet est de réaliser différents bilans (matières, énergétique, etc.) sur l'installation agricole en fonctionnement afin de confirmer l'amélioration des performances mesurée par EVALOR et aussi d'acquérir des données qui serviront au final à modéliser ce procédé original pour mieux ensuite le piloter.

## Digestion de sous-produits de mytiliculture en voie sèche de type batch à l'échelle pilote 60 L : Essais préliminaires & perspectives

Maël Mercier-Huat<sup>1</sup>, Laura André<sup>2</sup>, Jean-Marie Grosmaître<sup>1</sup>, André Pauss<sup>3</sup> & Thierry Ribeiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CultiMer France SAS, ZA Les Rolandières, BP52, 35120 Dol de Bretagne, France.

<sup>2</sup>UniLaSalle, UR 2018.C103 Transformations & AgroRessources, Rue Pierre Waguët, BP 30313, 60026 Beauvais Cedex, France

<sup>3</sup>Sorbonne Universités, EA 4297 TIMR UTC/ESCOM, UTC, CS 60319, 60203 Compiègne Cedex, France

Le développement durable et l'environnement sont les grands enjeux de l'agriculture française et européenne. La mytiliculture génère des volumes de sous-produits et de déchets conséquents qui peuvent être valorisés. La culture de moules en bouchots génère des animaux au calibre trop petit pour répondre aux critères de taille retenus pour la commercialisation (< 12 mm d'épaisseur). Lors de la séparation de la moule à sa corde de production et lors du conditionnement des moules avant commercialisation, des moules sont cassées et des sous-produits riches en matière organique sont engendrés. Ces sous-produits rentrent dans le cadre des déchets non admissibles en déchetterie. Aujourd'hui, ces sous-produits et coproduits sont rejetés en mer dans des zones de largage définies et contrôlées, mais qui sont à l'origine de nuisances (odeurs, qualité et aspect de l'eau) dans l'estran. Une évolution de la législation concernant ces rejets est à prévoir dans les prochaines années, il est donc indispensable pour la filière conchylicole d'anticiper de nouvelles solutions à ce problème. La digestion anaérobie en voie sèche est donc envisagée au travers du projet METHACOQUE. Peu de données sont disponibles dans la littérature à l'heure actuelle (Wollak, 2013; Nkemka et Murto, 2013).

Dans nos travaux, les essais ont été conduits sur des sous-produits de moules. L'*inoculum* utilisé est du lisier bovin. Les potentiels méthane ont été déterminés à partir de matière fraîche et de matière séchée et broyée (AMPTS II, BPC). Deux réacteurs batch de 60L ont été mis en œuvre, l'un mettant en œuvre une immersion totale des sous-produits de moules et l'autre incluant un support séparant les phases liquide et solide. Chacun de ces réacteurs a été inoculé avec la même quantité de lisier bovin. La phase liquide a été recirculée périodiquement à raison de 15 L.h<sup>-1</sup>. La digestion anaérobie a été conduite à 37°C pendant 60 jours. La quantité de biogaz, la composition de biogaz, les paramètres physico-chimiques ont été suivis.

Le procédé avec immersion présente une inhibition poussée avec une production de 1,89 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>.t<sub>MF</sub><sup>-1</sup>. La valeur de BMP obtenue en fiole de 500 mL et avec un ratio classique I/S de 3 est de 25,11 Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>.t<sub>MF</sub><sup>-1</sup>. Les inhibitions engendrées par ce substrat sont amplifiées en digestion anaérobie en voie sèche par la quantité à digérer.

Le procédé sans immersion a permis de produire 14,23 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>.t<sub>MF</sub><sup>-1</sup>. Le jus de moule ajouté est directement au contact du lisier. Ce jus de moule est un paramètre clé du procédé présentant une forte acidité. Une inhibition sur une quinzaine de jours a été observée.

Les bilans hydriques et massiques effectués sur ces deux procédés montrent que les sous-produits de moules se solubilisent très bien dans les deux procédés avec environ 65 % de dégradation. En revanche, le taux de dégradation des liquides est uniquement de 12% dans le procédé avec immersion et de 58 % avec le procédé sans immersion. Ces premiers essais permettent de montrer que les sous-produits de moules engendrent des inhibitions dues à l'accumulation d'acides gras volatils, à la dégradation des protéines, et à l'inhibition au sel (Lim et al., 2008). Ces premières données sont encourageantes et démontrent que la gestion et la mise en œuvre du procédé sont importantes pour optimiser la production de méthane et les inhibitions.

L'un des principaux objectifs du projet METHACOQUE est d'optimiser la digestion de sous-produits de moules en voie sèche *via* la recirculation et l'immersion de la matière, l'acclimatation de l'*inoculum* et la compréhension des inhibitions.

### Références

- Lim Y-G, Niwa C, Nagao N, Toda T. Solubilization and methanogenesis of blue mussels in saline mesophilic anaerobic biodegradation. *International Biodeterioration & Biodegradation*. avr 2008;61(3):251-60.
- Nkemka VN, Murto M. Two-stage anaerobic dry digestion of blue mussel and reed. *Renewable Energy*. févr 2013;50:359-64
- Wollak B, Welandar U. Determination of the methane potential of blue mussels. *Linneuniversitetet*. 2013;1-19

**Session**  
**BIOGAZ ET BIOMÉTHANE**

**Le projet méthycentre : premier projet de démonstration en France de couplage  
méthanisation - méthanation**

L. Bedel – CEA-Liten / Y. Bonin – STORENGY

La part croissante des énergies renouvelables dans le mix énergétique pourrait générer des surplus d'électricité dont 2,5 à 3 TWh pourraient être valorisés à l'horizon 2030 via le Power to Gas et de 20 à 70 TWh en 2050 ; soit l'équivalent de 100 installations de power-to-gas de 10 MW fonctionnant 3000h par an pour un marché de 25 TWh/an. Cet enjeu va nécessiter des solutions de services rendus au réseau électrique, notamment pour assurer sa flexibilité, tout en ayant un impact environnemental le plus faible possible.

Le projet Méthycentre est le premier projet de démonstration de Power to Gas en France couplé à une unité de méthanisation. Ce démonstrateur sera raccordé au réseau de gaz par un unique point d'injection du biométhane et du méthane de synthèse. Ce projet de couplage méthanisation-méthanation permet l'amélioration du rendement carbone du biogaz en méthane de près de 55% à plus de 95%. Le projet s'inscrit sur un territoire local de développement durable et participe au déploiement d'une économie circulaire dans la région Centre-Val de Loire.

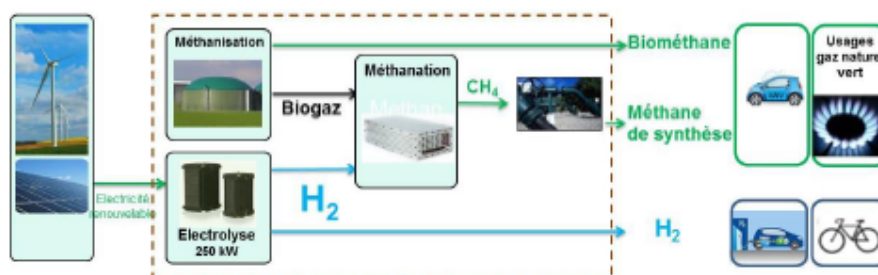


Figure: Schéma de principe du projet Méthycentre

Méthycentre vise à :

- Convertir les surplus d'électricité renouvelable intermittente en hydrogène.
- Valoriser le CO<sub>2</sub> issu d'un biogaz en méthane de synthèse par méthanation de ce dernier.
- Valoriser des déchets agricoles issus des fermes locales, de l'industrie agroalimentaire, etc,... en biogaz.
- Produire trois gaz décarbonés : hydrogène, biométhane et méthane de synthèse.
- Proposer une mobilité hydrogène et GNV locale et compétitive.

Ce projet vise à étudier la viabilité technico-économique du procédé sur différents marchés énergétiques (services réseaux, mobilité hydrogène et GNV, injection biométhane et méthane de synthèse dans le réseau de gaz naturel) et faire émerger les filières pérennes tant au niveau écologique qu'économique. Il permettra également d'évaluer l'acceptabilité sociale et sociétale de l'usage de l'hydrogène, d'identifier les verrous techniques, technologiques, économiques ou réglementaires ainsi que les différents leviers de réduction des coûts d'investissement et d'exploitation. Le déploiement important d'unités de Power to Gas sera source de création d'emplois, et permettra de développer une filière française sur ces technologies.

## Résultats du Projet HYCABIOME : Couplage Méthanisation / Méthanation biologique

S.BERGER-RUIZ<sup>1,\*</sup>, S. PALMADE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Solagro, 75 voie du TOEC, CS 27609, F-31076 Toulouse Cedex, France.

<sup>2</sup> Enosis, 12 rue Louis Courtois de Viçose, Portes Sud, Bât. 3, 31000 Toulouse, France.

\*Correspondance: sylvaine.berger@solagro.asso.fr, +33 5 676 969 08

Le projet HYCABIOME a été imaginé dans l'objectif de faire la preuve du concept du couplage méthanisation/méthanation biologique par des partenaires français d'une part, et de détecter les configurations les plus intéressantes pour ce procédé d'autre part.

Les travaux de R&D ont mis en évidence deux enjeux majeurs : le transfert de matière gaz-liquide, notamment pour l'hydrogène, et la sélection des micro-organismes et la maîtrise de leurs conditions de culture.

Outre la preuve de concept de la production de méthane en continue à une teneur supérieure à 97%, ces travaux ont permis d'identifier plusieurs facteurs-clés de succès dans la mise en œuvre d'un procédé de méthanation biologique:

- la résistance du pool de micro-organismes, de préférence avec une grande diversité microbienne (mélange de plusieurs inoculum), aux entrées d'oxygène parasites ainsi que sa résilience aux arrêts prolongés comme aux intermittences ;
- le rôle déterminant des nutriments pour la croissance du pool bactérien et l'équilibre entre les populations ainsi que le rôle du pH comme paramètre opératoire ont été démontré.

Ces facteurs clés d'optimisation et d'intensification de la réaction identifiés sur le pilote de laboratoire ont permis de dimensionner un pilote de recherche industriel, qui sera mis en œuvre en 2018.

Par ailleurs, des cas d'usage et typologies de projets industriels ont été définis à partir de travaux prospectifs pour la production de biogaz et d'hydrogène à l'horizon 2025.

Les deux types d'intégration possible de la méthanation identifiés sont :

- l'intégration de type « Valorisation des surplus », correspondant à l'acception usuelle du Power-to-Gas, dans laquelle la méthanation fonctionne en parallèle à l'épuration du biogaz
- l'intégration de type « Enrichissement & Flexibilité » dans laquelle la méthanation assure l'enrichissement du biogaz en méthane, en substitution à l'épuration du CO<sub>2</sub>, et l'électrolyse permet de développer des services de flexibilité pour le réseau électrique grâce à un stockage d'hydrogène.

Les typologies de projets étudiés dans ce programme, correspondant aux marchés adressables pour le déploiement du couplage méthanisation/méthanation biologique sont :

- Les stations d'épuration de boues urbaines dont les synergies du couplage sont très importantes (valorisation de la chaleur sur les digesteurs et valorisation de l'oxygène sur les bassins d'aération, utilisation potentielle des eaux traitées pour l'électrolyseur, implantation à proximité de réseaux de gaz à forte capacité). Les tailles étudiées varient de 30 à 150 Nm<sup>3</sup>/h de CO<sub>2</sub>, soit 80 à 400 Nm<sup>3</sup>/h de biogaz, correspondant à des stations de capacités de 100 000 à 900 000 équivalent-habitants
- Les unités de méthanisation territoriale offrent des synergies « standard » (valorisation de la chaleur fatale, substitution à l'épurateur) mais la taille peut être plus importante que celle des unités sur les stations d'épuration, permettant d'atteindre un effet d'échelle, les tailles étudiées varient de 100 à 500 Nm<sup>3</sup>/h de CO<sub>2</sub>, soit de 250 à 1500 Nm<sup>3</sup>/h de biogaz

Les résultats de l'analyse économique et environnementale des 80 cas étudiés (obtenus par croisement des cas d'usage, des typologies de projets et leur taille, du prix marginal de l'électricité et du nombre d'heures de fonctionnement de l'électrolyseur) montrent que, dans les conditions et l'état actuel des techniques, l'intégration de type « Enrichissement et Flexibilité » permettrait de produire du méthane à un coût de revient compétitif par rapport au tarif d'achat du biogaz actuel notamment sur des stations d'épuration de grande taille, et en maximisant la durée de fonctionnement de l'électrolyseur. A noter, que l'impact de la valorisation de chaleur sur la station (chauffage des digesteurs) est important sur la rentabilité.

L'analyse environnementale montre que l'utilisation du Power-to-Gas améliore nettement le bilan GES par rapport à une injection de biogaz seul sur le réseau de gaz naturel, notamment sur des stations d'épuration, en maximisant les synergies (chaleur). La consommation d'eau du procédé est peu impactante, notamment du fait que 75 % de l'eau consommée est restituée avec une charge minérale (issue du traitement en amont de l'électrolyse) et organique (eau issue de la réaction de méthanation) qui peut dans tous les cas être traitée facilement pour les deux typologies de projets.

Ainsi, à court terme, la mise en œuvre de ce modèle sur des pilotes industriels permettra d'acquérir les connaissances et le savoir-faire nécessaires au déploiement du Power-to-gas à l'horizon 2030. Ces premières installations permettront, à terme, avec l'évolution des coûts de l'électricité, de mettre en œuvre des intégrations propres à valoriser les surplus d'électricité renouvelable.

Néanmoins, des adaptations du cadre réglementaire sont nécessaires pour permettre le déploiement d'unité de méthanation, notamment une modification du TURPE, et des règles d'injection de méthane dans le réseau. Le cadre tarifaire devra également être affiné et les conditions d'utilisation de l'électricité clairement définies.

## Développement et optimisation d'un procédé de méthanation biologique ex-situ pour un couplage avec la méthanisation

Rafrafi Y.<sup>1</sup>, Dumas C.<sup>1</sup>, Lefebvre X.<sup>1</sup>, Mengelle E.<sup>1</sup>, Delagnes D.<sup>1</sup>, Spérandio M.<sup>1</sup>  
Contreras, V.<sup>2</sup>, Palmade, S.<sup>2</sup>, Guéré V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>. LISBP, Université de Toulouse, CNRS, INRA, INSA, Toulouse, France

<sup>2</sup>. ENOSIS, 12 Rue Louis Courtois de Viçose, Pépinière Bordelongue, Toulouse, France

Pour pouvoir être injecté dans le réseau de gaz naturel, le biogaz issu des unités de méthanisation nécessite un traitement afin d'atteindre les spécifications techniques de qualité (notamment un PCS équivalent à une teneur en méthane d'environ 97%). Cette étape dite de purification, peut être réalisée par méthanation. En effet, la méthanation consiste à convertir du dihydrogène ( $H_2$ ) et du  $CO_2$  en  $CH_4$ . Cette réaction a été développée historiquement par voie thermochimique catalytique. Néanmoins, la méthanation par voie biologique est très attractive grâce à ses nombreux atouts tels que la diminution des coûts d'investissement et d'exploitation. Couplée à la méthanisation, la méthanation biologique permettrait, outre le fait d'augmenter la production de  $CH_4$  via l'épuration du  $CO_2$  dans le biogaz, de créer des interconnexions entre les réseaux de gaz et d'électricité en développant des services de flexibilité et de stockage pour ce dernier (concept « Power to gas »). La station d'épuration pourrait ainsi devenir un futur nœud des réseaux intelligents de gaz et d'électricité (« Smart Grids »).

Deux stratégies de méthanation biologique sont possibles : une combinaison méthanation / méthanisation au sein d'un même réacteur (méthanation in-situ) ou une méthanation dans un réacteur dédié (méthanation ex-situ). Les résultats de la littérature sont en faveur d'une solution dédiée car elle offre, à priori, davantage de marge de manœuvre pour le pilotage et l'optimisation du procédé (absence de contraintes inhérentes à la digestion et à la méthanisation).

Néanmoins, même si l'application de la méthanation biologique à l'enrichissement du biogaz présente de fortes perspectives de développement industriel, il reste des verrous à lever avec notamment :

- la maîtrise de la culture des microorganismes impliqués dans cette voie de transformation, de leurs conditions de vie et de leur milieu ;
- l'optimisation des taux de transfert et de dissolution des gaz ( $H_2$  surtout, mais aussi  $CO_2$ ) dans le milieu liquide bactérien.

Dans le cadre des projets HyCaBiome et Hydromet, financés respectivement par l'ADEME et la région Occitanie, une technologie de méthanation biologique ex-situ à l'échelle laboratoire a été co-développée par l'INSA de Toulouse et la société ENOSIS. Au cours d'une année d'expérimentation continue, un consortium microbien a été sélectionné et les facteurs clés de succès dans la mise en œuvre d'un procédé de méthanation biologique ont été identifiés (biodiversité, pH, nutriments, ...). Une conversion efficace (> 99%) de l' $H_2$  a été atteinte grâce à l'optimisation du transfert de masse gaz/ liquide. A ce stade, les résultats obtenus dans notre laboratoire nous ont permis d'atteindre et de maintenir une teneur en biométhane de 97,7% de  $CH_4$ . D'autres expérimentations permettant d'augmenter la productivité du procédé tout en maintenant un rendement de méthane élevé sont en cours.

Au terme de ces projets, un prototype pré-industriel performant sera conçu et permettra de réaliser un programme de recherche en environnement opérationnel (unité de méthanisation).

## Impact des conditions d'agitation et d'hydrogénation sur les performances de méthanation biologique en digesteur pilote.

Aline Lebranchu<sup>1,2</sup>, Stéphane Pacaud<sup>3</sup>, Michel Fick<sup>1,2</sup>, Fabrice Blanchard<sup>1,2</sup>, Stéphane Delaunay<sup>1,2</sup>,  
Eric Olmos<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>CNRS, Laboratoire Réaction et Génie des Procédés UMR 7274, 2 avenue de la forêt de Haye, TSA 40602, Vandœuvre-lès-Nancy, F-54518, France

<sup>2</sup>Université de Lorraine, LRGP, UMR 7274, 2 avenue de la forêt de Haye, TSA 40602, Vandœuvre-lès-Nancy, F-54518, France.

<sup>3</sup>ENSAIA, Université de Lorraine, 2 avenue de la forêt de Haye, TSA 40602, Vandœuvre-lès-Nancy, F-54518, France.

Le procédé de méthanation biologique consiste à transformer l'hydrogène et le dioxyde de carbone en méthane par voie biologique. Un certain nombre de verrous scientifiques et technologiques sont rencontrés lors de la mise en œuvre de ce procédé à l'échelle pilote. Ainsi, les fortes viscosités du substrat et la complexité de la rhéologie du lisier bovin précédemment mises en évidence rendent difficiles l'obtention de bonnes capacités d'homogénéisation au sein des digesteurs et nécessitent donc la mise en œuvre d'un design adapté d'agitateur (Lebranchu et al., 2017). Par ailleurs, ces propriétés limitent également les phénomènes de transfert gaz-liquide de l'hydrogène. Enfin, la très faible solubilité de l'hydrogène en phase aqueuse (0,0014 g/L à 40°C) favorise l'apparition de saturations locales qui rendent peu intéressante l'injection d'hydrogène par voie gazeuse. Pour pallier les deux phénomènes précédents, un réacteur pilote de 100 L a été équipé d'un double ruban hélicoïdal et d'un module membranaire en silicone afin d'intensifier le transfert gaz-liquide d'H<sub>2</sub> et la méthanation biologique. Les gaz de sorties ont été analysés en ligne par microchromatographie en phase gazeuse. Afin de déterminer les étapes limitant potentiellement les performances de production de méthane, l'impact du débit d'injection d'H<sub>2</sub>, de l'ajout de CO<sub>2</sub> exogène et la fréquence d'agitation imposée ont été étudiés. Au cours de cette étude nos résultats ont entre autres montré que la méthanation biologique était significative dans le digesteur ainsi dimensionné avec une fraction de méthane augmenté d'environ 57 % à 70 % dans le biogaz produit. Par ailleurs, le design de l'injecteur d'hydrogène a permis une consommation totale de la quantité d'hydrogène injecté, comme en a témoigné l'absence d'hydrogène dans le biogaz. Il a été également suggéré que la consommation de l'hydrogène

était probablement réalisée par des microorganismes à proximité immédiate de la membrane, et qu'il existait une limitation au transfert de l'hydrogène de la membrane vers l'ensemble du réacteur, et du CO<sub>2</sub> de l'ensemble du réacteur vers la proximité de la membrane, limitation probablement due à la formation d'une croûte calcaire sur une partie du tube membranaire. Enfin, même si le changement des fréquences d'agitation du ruban de 10 à 20 rpm ne modifie pas le débit de biogaz mais la diminution de la fréquence à 5 rpm conduit à une légère augmentation de celui-ci.

## Comparaison d'adsorbants alternatifs pour le traitement de l'H<sub>2</sub>S dans le biogaz

Valentine GASQUET, Boram KIM, Hassen BENBELKACEM  
Univ Lyon, INSA Lyon, DEEP (Déchets Eaux Environnement Pollutions), EA 7429, 69621  
Villeurbanne cedex, France

Le traitement du biogaz est une étape essentielle avant sa valorisation, dans le but d'ôter les potentiels polluants présents et ainsi permettre de protéger les équipements situés en aval tout en limitant les émissions toxiques dans l'atmosphère. Dans l'objectif de traiter l'hydrogène sulfuré (H<sub>2</sub>S) présent dans le biogaz, l'adsorption sur charbon actif (le plus souvent imprégné) est une solution largement utilisée par les industriels [1]. Ce type de matériau possède une grande surface spécifique du fait d'une porosité fortement développée. Celle-ci permet une meilleure adsorption grâce au grand nombre de sites actifs présents à la surface du matériau. Par ailleurs, une adsorption chimique a également lieu lorsqu'un film aqueux se développe à la surface du charbon, permettant de transformer l'H<sub>2</sub>S en soufre natif [2].

Afin de s'inscrire dans l'économie circulaire et économiser des ressources naturelles, il a été pensé d'utiliser des matériaux alternatifs de nature proche des adsorbants traditionnels pour éliminer l'H<sub>2</sub>S du biogaz. En effet, de nombreuses études ont récemment montré, le plus souvent à l'échelle du laboratoire, l'intérêt de l'utilisation de mâchefers d'ISDND [3], de biochars [4] ou de boues d'épuration incinérées [5] pour le traitement du biogaz. Néanmoins, tous les matériaux alternatifs, potentiels adsorbants, n'ont pas encore été étudiés, qui plus est à l'échelle pilote/terrain avec un biogaz réel. L'utilisation de matériaux alternatifs pour le traitement du biogaz en plus d'avoir un impact positif sur l'environnement, réduira les coûts liés à l'utilisation comme énergie renouvelable et ainsi permettre son plus large développement. Le travail présenté a donc pour objectif d'évaluer l'efficacité d'adsorption d'H<sub>2</sub>S des différents matériaux de type résidus thermiques.

Dans le cas de cette étude, les essais seront effectués à partir d'un biogaz réel, directement sur une installation de stockage de déchets non dangereux (ISDND). La composition du biogaz sera suivie en temps réel grâce à un spectromètre laser infrarouge (analyseur ProCeas<sup>®</sup> d'ap2e). Des échantillons de 200 g de matériau environ seront utilisés, deux essais étant menés à chaque fois en parallèle afin d'avoir une valeur de référence pour chaque expérience. Quatre différents types de résidus thermiques seront étudiés.

Les matériaux seront caractérisés avant et après leur utilisation comme adsorbant afin de déterminer leurs surfaces spécifiques, leurs compositions élémentaires, pH, etc. La comparaison de plusieurs matériaux permettra de faire ressortir ceux étant les plus efficaces comme adsorbants ainsi que d'essayer de comprendre les mécanismes d'adsorption de l'H<sub>2</sub>S. Ces premiers résultats pourront mettre en évidence le potentiel de ces matériaux alternatifs pour le traitement du biogaz.

[1] T. J. Bandoz, « On the Adsorption/Oxidation of Hydrogen Sulfide on Activated Carbons at Ambient Temperatures », *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 246, n° 1, p. 1-20, févr. 2002.

[2] A. Bagreev et T. J. Bandoz, « H<sub>2</sub>S adsorption/oxidation on unmodified activated carbons: importance of prehumidification », *Carbon*, vol. 39, n° 15, p. 2303-2311, déc. 2001.

[3] M. Fontseré Obis, P. Germain, H. Bouzahzah, A. Richioud, et H. Benbelkacem, « The effect of the origin of MSWI bottom ash on the H<sub>2</sub>S elimination from landfill biogas », *Waste Manag.*, vol. 70, p. 158-169, déc. 2017.

[4] S. Sahota et al., « Characterization of leaf waste based biochar for cost effective hydrogen sulphide removal from biogas », *Bioresour. Technol.*

[5] S. Polruang, P. Banjerdikij, et S. Sirivittayapakorn, *Use of Drinking Water Sludge as Adsorbent for H<sub>2</sub>S Gas Removal from Biogas*, vol. 10. 2017.

## **AE-AMINE: Une technologie de lavage aux amines innovante à haute efficacité énergétique pour la production du biométhane**

Sander Reijerkerk<sup>1</sup>, David Bossan<sup>1</sup>, Sebastien Gonnard<sup>2</sup>, Vincent Carlier<sup>2</sup>, Abdelkader Lettat<sup>2</sup>, Marie Dehlinger<sup>2</sup> et Julien Grandjean<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Arol Energy, Savoie Technolac, 19, rue du Lac Saint-André, 73375 Le Bourget-du-Lac, France

<sup>2</sup> IFP Energies Nouvelles, Rond-point de l'échangeur de Solaize, BP 3, 69360 Solaize, France

La conversion du biogaz en biométhane nécessite des technologies qui actuellement sont d'une part consommatrices d'électricité et d'autre part génératrices de rejets de méthane à l'atmosphère. Cette consommation électrique représente environ les deux tiers de la consommation de l'ensemble du site de méthanisation.

Une comparaison de ces différentes technologies met en évidence la performance épuratoire supérieure de la technologie d'absorption chimique par rapport aux autres technologies, notamment grâce à ses très faibles pertes en méthane et sa faible consommation électrique. Par contre, la régénération de la solution de lavage nécessite l'apport de chaleur et comme cette chaleur doit en France légalement être apportée par le biogaz lui-même, cela réduit ainsi d'autant la quantité du biogaz valorisable. Ce besoin est donc considéré comme un désavantage de cette solution vu que cette chaleur est classiquement perdue.

Le besoin de chaleur pour régénérer le solvant (et donc la consommation du biogaz associée) est en revanche un frein au développement et au déploiement large de cette technologie sur le marché du biogaz. Ce verrou technique doit ainsi être résolu afin de rendre cette technologie intéressante et surtout compétitive vis-à-vis notamment de la technologie membranaire, très répandue actuellement.

Afin de lever le verrou identifié, Arol Energy et l'IFP Energies Nouvelles ont développé deux solutions très complémentaires l'une à l'autre.

- Une récupération in-situ de la chaleur sur l'étape de purification du biogaz afin de pouvoir réutiliser cette chaleur dans l'unité de méthanisation et notamment pour le chauffage des digesteurs, ce qui réduit ainsi l'autoconsommation.
- Une réduction à la source, donc une réduction de la chaleur requise pour la régénération du solvant, par l'utilisation d'un nouveau solvant plus performant.

Pour démontrer ces innovations technologiques, une unité de démonstration industrielle a été conçue et installée sur le site de méthanisation Terragr'eau près d'Evian-les-Bains en France. Le site produit jusqu'à 250 Nm<sup>3</sup>/h de biogaz brut à partir de déchets agricoles et des biodéchets.

L'unité est opérationnelle depuis début 2017 et a officiellement commencé l'injection dans le réseau en mars 2017. La communication présentera les résultats des tests de performance de la technologie AE-Amine et démontre notamment ses avantages par rapport à la technologie de référence en MDEA activée ainsi que les autres technologies alternatives. En particulier, elle souligne les avantages du nouveau solvant qui contribuera à une réduction des CAPEX et à maximiser la productivité des unités futures. En plus, l'intégration thermique avec les digesteurs et les avantages intrinsèques de la technologie entraînent une réduction significative des OPEX (de 20 à 70%), faisant de la technologie AE-Amine une technologie très intéressante et compétitive sur le marché de la purification du biogaz.

## Quantification des fuites de biogaz – nouvelles méthodes et perspectives

Bioteau T.<sup>1</sup>, Brissaud M.<sup>2</sup>, Loisel P.<sup>1</sup>, Peu P.<sup>1</sup>, Guibert A.<sup>1</sup>, Auvinet N.<sup>1</sup>, Barbu I.<sup>1</sup>, Aissani L.<sup>1</sup>, De Oliveira Fernandes M.<sup>1</sup>, Heitz D.<sup>1</sup>, Déchaux C.<sup>1</sup>, Nunes G.<sup>1</sup>, Buffet J.<sup>1</sup>, Blondel L.<sup>1</sup>, Georgeault P.<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>: Irstea, UR OPALE, Centre de Rennes, 17 avenue de Cucillé, CS 64427, 35044 RENNES

<sup>2</sup>: CH4Process, 22 rue de la clef des champs, Eco-quartier des Docks, 93400 SAINT-OUEN cedex

Les pouvoirs publics français incitent au développement d'installations de méthanisation, répondant ainsi à un double objectif de production d'énergie renouvelable et de valorisation des résidus organiques. Cet engagement de l'Etat s'est traduit en 2011 par une réévaluation du tarif de rachat d'électricité produite à partir de biogaz et par l'autorisation d'injection du biogaz dans le réseau de gaz naturel. Les avantages ciblés de la méthanisation sont multiples, tels que la réduction des émissions de méthane inhérentes à la gestion conventionnelle des effluents, la valorisation matière de résidus organiques, la contribution à la production d'énergie renouvelable, le moindre recours à l'azote minéral par substitution de celui-ci par le digestat. Le GIEC estime les fuites de biogaz entre 0 et 10% (IPCC06) au niveau du digesteur, et préconise une valeur par défaut de 5% en l'absence de données spécifiques. D'après Börjesson et Berglund (2007), ces fuites sont normalement inférieures à 2%, mais peuvent varier entre 0,2% et 13%. Face à ce constat sur l'enjeu environnemental des fuites de biogaz et le besoin de données compatibles avec les outils d'évaluation environnementale, l'identification et la quantification des fuites de biogaz se révèlent être un défi majeur pour conforter la pertinence environnementale mais aussi économique des unités de méthanisation actuellement installées et à venir en France. La bibliographie française sur le sujet ne permet pas d'établir de facteurs d'émissions caractéristiques du contexte national et la bibliographie internationale montre une forte amplitude de valeurs. Dans une première approche, le projet TrackyLeaks, financé par l'Ademe (APR CIDE 2014-2017), a permis de développer de nouvelles méthodes de quantification des fuites de biogaz sur les sites de méthanisation, afin de faciliter à terme l'amélioration des connaissances sur le niveau de ces émissions. Une des méthodes de TrackyLeaks repose sur l'utilisation d'une caméra de type « Optical Gas Imaging » complétée d'un modèle de quantification des panaches observés, notamment par analyse du flot optique des séquences vidéo infrarouge. Deux autres méthodes ont permis de comparer les résultats obtenus à des fins de validation : la méthode classique localisée de l'ensilage et la méthode des gaz traceur, qui permet d'obtenir un taux de fuite global de l'installation. Les nouvelles méthodes développées se révèlent très performantes sur des fuites maîtrisées en laboratoire et ont fait l'objet de démonstrations très encourageantes sur le terrain. Dans une seconde étape, avant de transférer ces nouvelles méthodes de quantification, des approfondissements scientifiques et technologiques sont envisagés dans le cadre d'un nouveau projet de recherche afin : (i) d'améliorer la rapidité et la robustesse des méthodes, (ii) d'obtenir une représentativité des résultats par le déploiement méthodologique sur une quinzaine de sites de méthanisation en France, en partenariat avec une PME spécialisée sur la détection des fuites, (iii) d'étudier l'opportunité d'alternative technico-économique concernant les soupapes de sécurité ; point de vigilance observé dans TrackyLeaks et (iv) de mener une analyse ACV avec un focus recherche sur le lien substrats/impacts environnementaux. Par ailleurs, le consortium réuni dans ce nouveau projet permettra de communiquer largement sur ces nouveaux moyens de détection/quantification auprès des acteurs de la méthanisation, en consacrant un lot technique à la communication, gage de future reconnaissance et de dissémination des innovations.