

# Conditions de pilotage de la production de méthane dans les procédés de digestion anaérobie



**CONDITIONS DE PILOTAGE DE LA PRODUCTION DE METHANE  
DANS LES PROCEDES DE DIGESTION ANAEROBIE**

**RAPPORT FINAL**

**décembre 2018**

**N. PAUTREMAT - SCANAE**  
**Y. MEMBREZ, N. MONTPART - EREP**  
**A. WELLINGER – Triple E&M**

Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

**Avertissement :**

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :

**RECORD**, Conditions de pilotage de la production de méthane dans les procédés de digestion anaérobie, 2018, 67 p, n°17-0160/1A

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)  
[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

**Comité de suivi de l'étude :**

Etienne BASSET – ENGIE, Guillaume BASTIDE – ADEME, Rémy BAYARD - INSA de LYON / RECORD, Mickael BERGERON - GROUPE TIRU, Bénédicte COUFFIGNAL – RECORD, Hélène GUY - OPALE ENVt- GROUPE SECHE, Jean-Pierre HARRY – SUEZ, Bruno PECHINE – EIFER, Frédéric PERIE – TOTAL, Zacaria REDDAD – ENGIE, Ronan TREGUER – SEDE, Isabelle VERON – TOTAL, Olivier VIDALIN – TOTAL

© RECORD, 2018

## **RESUME**

La complexité du processus de digestion anaérobie demande le suivi de plusieurs paramètres afin de garantir la stabilité et le bon fonctionnement de l'installation. L'état de l'art des stratégies de suivi des installations de digestion anaérobie (paramètres, outils et techniques de mesure) est présenté dans ce document ainsi que les stratégies de suivi en développement. Une campagne d'enquête auprès des acteurs de la filière (exploitants, constructeurs, experts, assureurs) aux niveaux français et européen a permis d'identifier les méthodologies de suivi effectivement utilisées. La campagne d'enquête a permis également d'avoir un retour d'expériences des exploitants d'installations de méthanisation sur les dysfonctionnements du processus. Sur la base de ces informations, les perspectives de recherche et d'innovation dans le domaine du suivi des installations de digestion anaérobie ont été proposées dans ce document, le but étant d'améliorer la performance des exploitations et de minimiser les risques de dysfonctionnement.

## **MOTS CLES**

Digestion anaérobie, biogaz, méthane, méthodologie d'analyses ou stratégie analytique, performance, enquête

---

## **SUMMARY**

The complexity of the anaerobic digestion process requires the monitoring of different parameters in anaerobic digestion plants in order to guarantee stability and good performance of the system. The state-of-the-art of monitoring strategies in anaerobic digestion systems (parameters, devices, methods, measurement techniques) are presented in this document together with strategies in a development stage. A survey amongst the actors in the field (plant operators, technology suppliers, experts, insurance makers) in France and Europe has allowed identifying those monitoring strategies that are indeed in use. The survey has also allowed gathering the feedback from plant operators regarding process failures. Based on these pieces of information, the research and development perspectives concerning the monitoring of anaerobic digestion processes have been proposed in this document, being the main aim the improvement of process performance and the risk minimization of process failures.

## **KEY WORDS**

Anaerobic digestion, biogas, methane, monitoring techniques, performance, survey

## **ABREVIATIONS**

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie  
AGV : acides gras volatils  
BMP : potentiel méthanogène (Biochemical Methane Potential)  
CaCO<sub>3</sub> : carbonate de calcium  
CH<sub>4</sub> : méthane  
COT : carbone organique total  
CO<sub>2</sub> : dioxyde de carbone  
DBFZ : Centre allemand de recherche sur la biomasse (*Deutsches Biomasseforschungszentrum*)  
FFOM ; fraction fermentescible des ordures ménagères  
FOS/TAC : rapport des acides gras volatils et l'alcalinité  
CG : chromatographie en phase gazeuse  
H<sub>2</sub> : hydrogène  
H<sub>2</sub>S : sulfure d'hydrogène  
HPLC : chromatographie liquide à haute performance  
IEA : International Energy Agency  
IM : infiniment mélangé  
ISDND : installation de stockage de déchets non dangereux  
kW<sub>e</sub> : kilowatt électrique  
MS: matière sèche  
MSV: matière sèche volatile  
MSVs : matière sèche volatile soluble  
NH<sub>3</sub> : ammoniac  
NIRS : spectroscopie proche infrarouge  
N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> : azote ammoniacale  
N<sub>org</sub> : azote organique  
Nt : azote total  
N,P,K : azote, phosphore, potassium  
PBM : Potentiel Bio-Méthanogène  
STEP : Station d'épuration des eaux usées  
UE : Union Européenne

## **GLOSSAIRE**

**Biomasse** : On entend par biomasse tous les matériaux organiques créés directement ou indirectement par photosynthèse, qui n'ont pas été transformés par des processus géologiques (par opposition à la biomasse fossile – pétrole, charbon, gaz naturel). Cette vaste définition inclut les cultures, les effluents d'élevage, déchets de l'industrie agroalimentaire, des sous-produits animaux ou des déchets organiques (ménagères, de la restauration, invendus de commerce, etc.)

**Biogaz** : Mélange gazeux de CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> (avec une teneur d'environ 55-60 et 40-45% volumique respectivement) produit par méthanisation.

**Digester** : Bioréacteur sous conditions d'anaérobiose (absence d'oxygène) où le processus de méthanisation (ou digestion anaérobie) a lieu. Un **digester continu** présente une alimentation et une extraction continues de la matière. Un **digester discontinu** travaille par charges.

**Digester (continu) infiniment mélangé** : Digester caractérisé pour avoir, dans l'idéal, une composition homogène dans tout son volume. Un système de brassage assure l'homogénéité du milieu. En la pratique, pour que ça soit possible la teneur en matière sèche du mélange à méthaniser est basse (MS < 15-17%) et le milieu de digestion est liquide. L'alimentation de substrats et la sortie du digestat est continue. Souvent indiqué comme *Digester/Technologie en voie liquide continue*.

**Digester en voie liquide continue** : (Voir Digester infiniment mélangé)

**Digester continu à flux piston** : Digester caractérisé pour avoir une composition différente en fonction de la position dans l'ensemble du volume. La matière en digestion avance dans le volume du digester comme s'il avançait sous l'effet d'un piston simultanément à l'augmentation de sa dégradation. Des teneurs en matière sèche du mélange entrant plus élevées (MS 20-35%) sont appropriées pour cette technologie, qui est aussi connue comme technologie en voie solide continue.

**Digester en voie solide continue** : (Voir digester continu à flux piston)

**Digester en voie solide discontinu** : Digester alimenté en substrats en discontinu (par charges), de façon à ce que le digester soit chargé en une seule opération ; le milieu de digestion y reste pendant plusieurs jours et finalement le digester est vidé pour commencer un nouveau cycle d'alimentation. Les caractéristiques du milieu de digestion sont fonction du temps de digestion. Des teneurs en matière sèche du mélange entrant élevées à très élevées (MS > 25-40%) sont appropriées pour cette technologie, qui est aussi connue par digestion en box/garages.

**Digester à haut rendement** : Digester caractérisé par une teneur microbienne élevée qui permet le traitement par méthanisation d'intrants très chargés en matière organique. Le digester type UASB (de l'anglais *upflow anaerobic sludge blanket*), où les microorganismes agrégés sous forme de granules sont mis en suspension par le flux ascendant et retenus dans le digester, appartient à cette catégorie de digesteurs.

**Suivi** : Mesure, analyse réalisée de façon régulière.

**Pilotage** : Gestion du processus en rapport avec son suivi.

**Contrôle** : Pilotage et maîtrise du système afin que le paramètre dit de contrôle se situe dans une valeur de consigne spécifiée.

**Gisement spot** : Gisement ponctuellement proposé à l'exploitant de l'installation de méthanisation.

**Lessivage de microorganismes** : Le risque de lessivage des microorganismes est lié à leur vitesse de croissance, qui est différente pour les différentes espèces. Si le débit d'entrée est excessif, et donc le temps de séjour est trop faible, les microorganismes risquent de ne pas avoir assez de temps pour croître et maintenir la population. Ainsi ils finissent par être lessivés hors du système, c'est-à-dire, ils ne sont plus présents dans le milieu de digestion.

## SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>Contexte et objectifs</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Démarche de l'étude</b>	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>Définition de l'état de l'art</b>	<b>7</b>
<b>2.2</b>	<b>Campagne d'enquête auprès des acteurs de la filière biogaz</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Etat de l'art</b>	<b>9</b>
<b>3.1</b>	<b>La filière de la méthanisation en Europe et en France</b>	<b>9</b>
<b>3.2</b>	<b>Paramètres de suivi de la méthanisation et techniques de mesure</b>	<b>12</b>
3.2.1	Paramètres de suivi du processus	16
3.2.2	Paramètres de suivi du fonctionnement	24
3.2.3	Paramètres de suivi de la performance	25
3.2.4	Tableau récapitulatif des paramètres et des méthodes de suivi	27
<b>4</b>	<b>Campagne d'enquête et retours d'expériences des acteurs de la filière</b>	<b>28</b>
<b>4.1</b>	<b>Retours et représentativité des enquêtes</b>	<b>28</b>
4.1.1	Aperçu et présentation des interlocuteurs français	28
4.1.2	Aperçu et présentation des interlocuteurs européens	30
<b>4.2</b>	<b>Analyse des réponses sur la méthodologie de suivi</b>	<b>33</b>
<b>4.3</b>	<b>Analyse des réponses sur l'innovation de suivi</b>	<b>43</b>
<b>4.4</b>	<b>Aperçu global de l'enquête</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>Perspectives de recherche et d'innovation</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>Conclusions</b>	<b>50</b>
	<b>Références</b>	<b>52</b>
	<b>Annexe A : Généralités sur le processus et les technologies de méthanisation</b>	<b>57</b>
	<b>Annexe B : Exemple du questionnaire en ligne</b>	<b>61</b>

## 1 Contexte et objectifs

Les contraintes politiques, sociales et environnementales actuelles poussent les législateurs à promouvoir et encourager le développement d'une économie indépendante des ressources fossiles. Le changement vers l'utilisation d'énergies d'origine renouvelable est donc encouragé. Les énergies renouvelables comprennent principalement l'énergie hydraulique, l'énergie solaire, l'énergie du vent, la géothermie et la biomasse. Les avantages de l'utilisation énergétique de la biomasse sont la flexibilité de production énergétique par rapport à d'autres sources ainsi que de permettre le passage de la biomasse du statut de déchets à celui de gisement énergétiquement valorisable.

Bien que certains pays permettent ou permettaient l'utilisation de biomasse normalement destinées à l'alimentation animale et/ou humaine, les politiques françaises et européennes encouragent vivement la valorisation des déchets organiques sous différentes formes : énergie, matières premières, fertilisants [1,2]. Ces orientations portent également sur le développement de filières de production d'énergie décarbonée à partir de résidus lignocellulosiques ou de microalgues [3].

La méthanisation est un processus anaérobie de transformation biologique des composants organiques en biogaz, mélange gazeux de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Ce processus répond parfaitement aux objectifs de valorisation de la biomasse.

La nature du processus de méthanisation (comme tous les processus biologiques) entraîne des situations de risque qui peuvent conduire au dysfonctionnement des installations. Des conditions inadéquates peuvent avoir de sévères répercussions sur la survie du consortium microbien jusqu'à nécessiter une vidange complète et un redémarrage des digesteurs avec toutes les conséquences économiques et environnementales que cela induit. Une connaissance fine du processus et de l'écosystème bactérien qu'il héberge posent ainsi les bases pour le développement des techniques de suivi et de contrôle ; ces travaux sont communément intégrés aux axes de recherche des institutions scientifiques du secteur biogaz en France et en Europe.

Notamment à échelle industrielle, pour que la filière soit économiquement viable, ce procédé biologique complexe doit pouvoir être maîtrisé pour piloter les installations de manière optimale et, en particulier, pour anticiper les problèmes d'inhibition à l'intérieur des digesteurs. Le développement des techniques de suivi en ligne répond au besoin de détecter des perturbations avec des effets rapides sur le processus. Cependant le choix des paramètres de suivi les plus appropriés doit permettre d'accroître l'information obtenue sur le processus, ceci en ajustant les efforts de maintenance des capteurs et les investissements financiers [4].

La présente étude vise à identifier les perspectives de recherche et d'innovation dans le domaine du suivi et du pilotage du processus de méthanisation. Ces éléments sont proposés sur la base de (i) l'état de l'art de ce domaine, qui décrit les paramètres et outils utilisables et en développement et (ii) sur la base d'une campagne d'enquête des acteurs de la filière biogaz (exploitants, constructeurs, experts, assureurs), qui présente les outils et méthodologies de suivi effectivement utilisés ainsi que les dysfonctionnements du processus de digestion survenus sur leurs exploitations.



*Pour les lecteurs moins familiarisés avec la filière Biogaz, les bases de la digestion anaérobie, de la méthanisation et des technologies de méthanisation sont présentées dans l'annexe A de ce rapport.*

## 2 Démarche de l'étude

### 2.1 Définition de l'état de l'art

L'état de l'art de cette étude a été établi à partir d'une recherche bibliographique, comprenant des journaux scientifiques (revues scientifiques indexées, journaux professionnels) et des actes des conférences et réunions professionnelles de la filière Biogaz. Des guides méthodologiques ont été également consultés. Ces guides sont publiés au niveau national par les pays les plus actifs de la filière Biogaz. Ces publications sont soutenues par différents organismes comprenant des associations professionnelles et/ou des organismes de l'état et instituts de recherche publique (p.ex. ADEME, Aile, DBFZ, Biogas Forum Bayern, International Energy Agency,....).

Le tableau 1 présente une liste des guides méthodologiques et documents de référence sur le suivi de la méthanisation. La pertinence de ces guides dans le cadre de cette étude est précisée dans le tableau sur la base de la présence de paramètres différenciants.

Deux niveaux de complexité sont présents dans ces documents : (i) des documents plutôt destinés aux exploitants des installations de méthanisation agricole et (ii) des documents plus exhaustifs en ce qui concerne les méthodologies de suivi. Ces méthodologies plus avancées sont adaptées à des structures ayant des outils analytiques plus conséquents, ou afin de répondre à une situation de risque biologique ou de s'assurer de la performance des sites de méthanisation par des structures externes (administrations, assureurs, etc.).

Tableau 1 : Liste des guides méthodologiques consultés pour l'élaboration de l'état de l'art

Document	Structure	Année de publication	Pertinence	Réf.
Paramètres clés pour le suivi du processus de digestion, Analyses de laboratoire (Schlüsselparameter zur Kontrolle des Gärprozesses Laboranalytik)	Biogas Forum Bayern	2012	✓	[5]
Motivation, besoins et méthodes pour le suivi du processus (Motivation, Voraussetzungen und Methoden für die Prozessüberwachung)	Biogas Forum Bayern	2016	✓✓	[6]
Recommandations pour l'équipement de suivi et mesure en installations de biogaz agricoles (Empfehlungen für die messtechnische Ausstattung landwirtschaftlicher Biogasanlagen)	Biogas Forum Bayern	2012	✓	[7]
Guide méthodologique pour le suivi et l'établissement des bilans de performances d'une installation de méthanisation	ADEME	2014	✓✓	[8]
La biologie des digesteurs, Guide pédagogique à destination des exploitants de méthanisation	ADEME Bourgogne	2014		[9]
Guide de suivi de la biologie sur une unité de méthanisation agricole	AILE	2011		[10]
Collection de méthodes de mesure sur le Biogaz : Méthodes pour la détermination de paramètres analytiques et de fonctionnement du processus de méthanisation (Messmethodensammlung Biogas : Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern in Biogasbereich)	DBFZ	2013	✓	[11]
La méthanisation à la ferme, Guide pratique pour projets d'une puissance électrique inférieure à 500 KWe	AILE-Solagro	2011		[12]
Fermentation of organic materials. Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests	Verein Deutscher Ingenieure	2016		[13]
Process monitoring in biogas plants	IEA Bioenergy	2013	✓✓	[14]
Best practice checklist: Operational performance	ADBA	2017	✓✓	[15]
Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung	Fachagentur Nachhaltende Rohstoffe e.V. (FNR)	2007	✓	[16]
Biogas- Messprogramm II: 61 Biogasanlagen im Vergleich	Fachagentur Nachhaltende Rohstoffe e.V. (FNR)	2009		[17]
QM Biogaz	Biomasse Suisse	2016	✓	[18]
Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel und Bodenverbessern	Bundesgütegemeinschaft Kompost	Mise à jour en continu		
Monitoring des Biomethanproduktionsprozesses « MONA »	Fraunhofer IWES	2017		[19]
Best available technologies for pig manure biogas plants in the Baltic Sea region	Baltic Sea 2020	2010		[20]
Microbiological handbook for biogas plants	Avfall Sverige/Svenkst Gastekniskt Center	2010		[21]

## 2.2 Campagne d'enquête auprès des acteurs de la filière biogaz

Les informations collectées à partir de l'état de l'art ont permis l'élaboration d'un questionnaire qui a été envoyé à des acteurs de la filière (exploitants, constructeurs de sites de méthanisation, assureurs et experts). Le questionnaire comporte des renseignements sur le type d'installation en exploitation, sur la méthodologie de suivi et sur les besoins en nouveaux systèmes de conduite du digesteur. Les constructeurs ont été invités à présenter leurs propositions pour le suivi des technologies de digestion qu'ils fournissent. Le regard d'experts a été inclus pour compléter le retour selon une approche plus détaillée.

La campagne d'enquête a été réalisée aux niveaux français et européen. Les enquêtés sont des représentants d'installations de différents types (installations centralisées, installations industrielles, installations agricoles, stations d'épuration des eaux usées...) et de différentes technologies de méthanisation (méthanisation en voie liquide ou solide, à alimentation continue ou discontinue). Des entretiens individualisés et la participation à l'enquête en ligne ont été réalisés.

Dans un 1<sup>er</sup> temps, l'enquête a débuté par des entretiens téléphoniques en France, reprenant le questionnaire. L'objectif était initialement de s'assurer de la qualité du questionnaire développé. Environ une demi-heure d'interview était nécessaire pour une réponse à l'enquête. En France, il a été ainsi préféré de privilégier des entretiens téléphoniques avec 60 professionnels, afin de disposer à la fois d'informations qualitatives et quantitatives.

L'analyse du retour d'expérience des exploitants d'installation(s) de méthanisation ainsi que les renseignements d'autres acteurs de la filière, obtenus au moyen de la campagne d'enquête, permettent de mettre en avant les outils et méthodologies de suivi qui sont effectivement utilisés pour la conduite de digesteurs. La campagne d'enquête vise également à obtenir un retour d'expérience sur des incidents ou dysfonctionnements spécifiques des systèmes de digestion.

Un exemplaire du questionnaire en ligne utilisé lors de la campagne d'enquête est présenté à l'Annexe B de ce document.

## 3 Etat de l'art

### 3.1 La filière de la méthanisation en Europe et en France

Fort de ses débouchés multiples et du contexte politique favorable, la méthanisation est un secteur d'activité en pleine expansion en France et dans quelques pays européens. Parmi les incitations politiques on peut citer l'objectif d'atteindre une part d'énergie renouvelable de 23% dans la consommation brute d'énergie d'ici 2020, la hausse de 20% du tarif de rachat de l'électricité produite par méthanisation et l'autorisation d'injecter le biogaz produit dans les réseaux publics de gaz naturel. En France, cet intérêt est également en partie lié à l'émergence de nouvelles ressources résultant de l'implémentation de contraintes législatives nouvelles sur les biodéchets des industries agro-alimentaires, de la grande distribution et de la restauration collective. En Allemagne, des aides publiques fortes, en faveur d'une production d'énergie renouvelable et un modèle de méthanisation à partir de cultures énergétiques, ont accéléré le développement de la méthanisation. Le contexte politique et géographique entraîne des différences parmi les pays européens dans la filière de la méthanisation. Pour citer quelques exemples : en Finlande, la méthanisation est privilégiée en tant que solution énergétique insulaire ; au Pays Bas et en Autriche, le prix des déchets organiques augmente suite à la concurrence ; au Danemark et en Autriche, l'encouragement de l'injection de biométhane dans les réseaux de gaz est en discussion ; et en Angleterre, l'injection est déjà encouragée par le *Renewable Heat Incentive*.

La filière méthanisation des déchets est d'ores et déjà bien implantée dans certains pays européens, en particulier, les pays du nord de l'Europe. En 2015, l'Allemagne comptait plus de 10000 unités de méthanisation, soit près de 52 % des méthaniseurs en Europe, et produisait 50% de l'énergie totale produite en Europe à partir du biogaz (Figure 1). Les incitations politiques, décrites précédemment, et les progrès de la recherche dans ce domaine ont rendu la méthanisation attractive en France et dans beaucoup d'autres pays européens. Une mise à jour du développement de la filière en Europe a été publiée en décembre 2017 par la European Biogas Association [22].

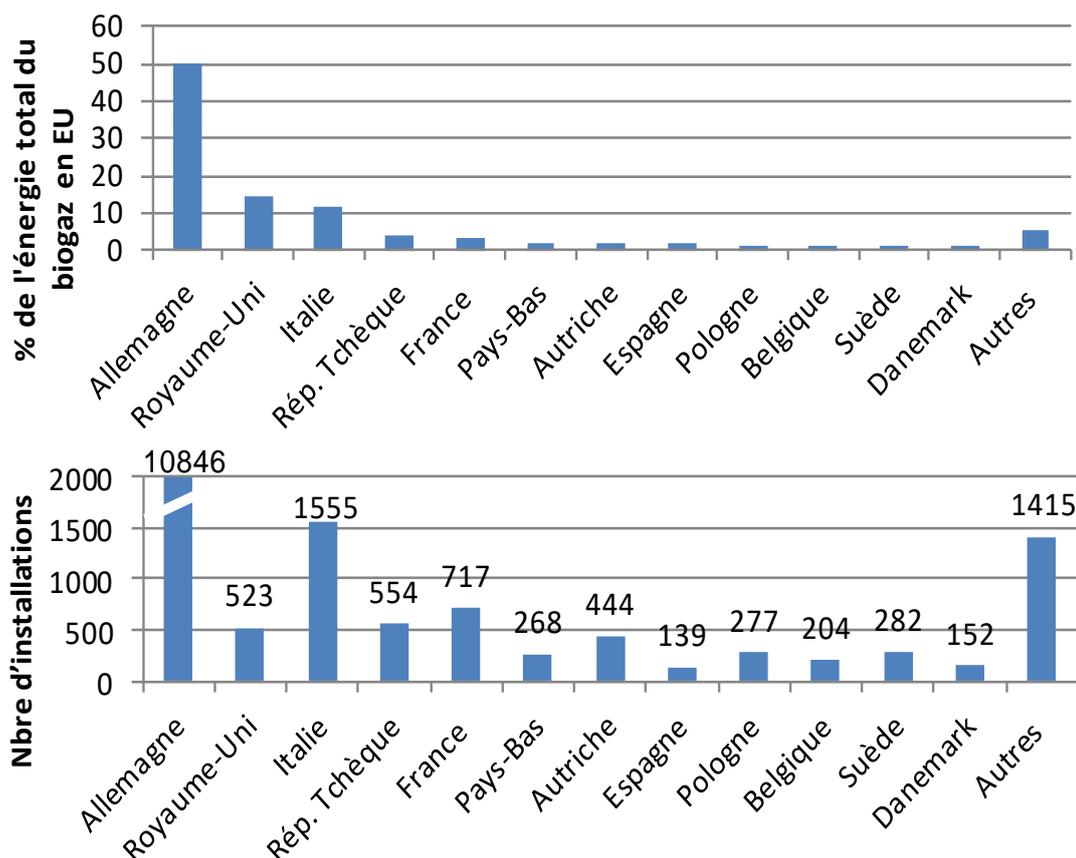


Figure 1 : Distribution de la production d'énergie de biogaz dans les pays de l'Union européenne et nombre d'installations par pays en 2015 [23].

La Figure 2 montre la quantité d'énergie issue du biogaz dans différents pays de l'UE ainsi que l'origine de ce biogaz (installations de décharge, stations d'épuration d'eaux usées ou autres). L'Allemagne, le Royaume Uni, l'Italie et la République Tchèque sont en tête de la production de biogaz dans l'UE. Le Royaume-Uni produit le biogaz majoritairement à partir d'installations de décharge, tandis que les méthanisations agricole, centralisée et industrielle sont les sources principales de biogaz en Allemagne, en Italie et en République Tchèque.

Le secteur de la méthanisation des boues d'épuration en Europe est important avec 22545 stations d'épuration de plus de 2000 équivalents habitants en activité et une distribution géographique plus homogène que celle des méthaniseurs industriels (3565 stations en France contre 4143 en Allemagne).



Des mécanismes de soutien tels que le Plan EMAA (Energie Méthanisation Autonomie Azote), en France, encouragent l'investissement dans la méthanisation agricole, avec un objectif de construction de 1000 méthaniseurs à la ferme en 2020 (291 installations à la ferme existent en 2017) [28]. L'étude benchmark méthanisation [29] analyse les perspectives futures de la filière du biogaz dans les pays de l'UE. Des rapports annuels sur l'état des lieux des différents pays européens sont également publiés par les membres de l'IEA Bioenergy task 37 [30].

En ce qui concerne la distribution des technologies en Europe, il existe une large prédominance de la digestion infiniment mélangée. Environ 150 installations de méthanisation en voie solide (à flux piston ou à alimentation discontinue) étaient recensées à fin 2014 en Europe. Les pays où ces technologies sont les plus développées sont la France, l'Allemagne et la Suisse (Figure 4).

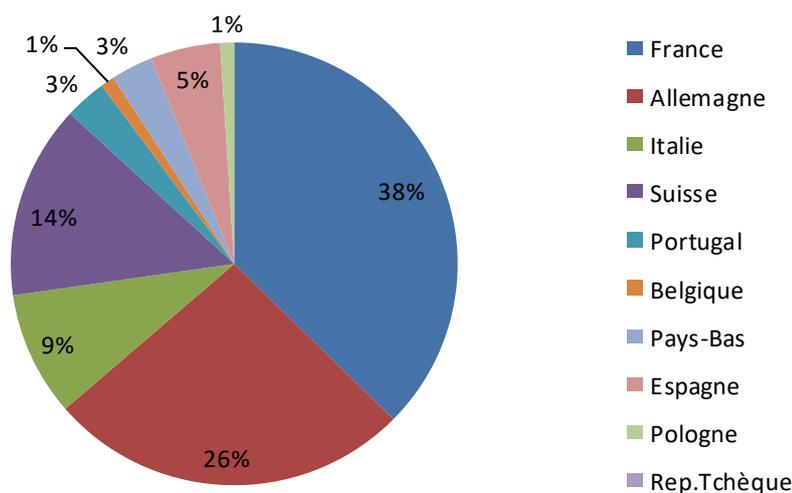


Figure 4 : Distribution en Europe d'installations de méthanisation avec technologie en voie solide (sur la base de De Baere & Mattheeuws [31] et base de données EREP).

En France les installations de méthanisation en voie solide représentaient, en fin 2016, 11% du total des installations. Des 57 unités recensées, 12 étaient de technologie à flux piston et 45 de technologie à alimentation discontinue en garages [32].

### 3.2 Paramètres de suivi de la méthanisation et techniques de mesure

Le suivi d'une exploitation de méthanisation permet de veiller au fonctionnement correct des ouvrages, ce qui assure une production de biogaz optimisée et une diminution des risques de dysfonctionnement. Les dysfonctionnements se situent principalement au niveau de l'alimentation du digesteur (hétérogénéité des gisements, difficulté d'alimentation, alimentation irrégulière, surcharge organique, présence d'inertes, toxicité...) et au sein de l'unité de digestion (moussage, des perturbations biologiques de légères à fortes...).

Le but étant d'améliorer l'exploitation des installations, et donc leur fonctionnement, en réduisant les risques des dysfonctionnements et d'accompagner le développement de la filière, des guides méthodologiques, au niveau national, sont publiés par les pays les plus actifs de la filière Biogaz (FNR, DBFZ, ADEME, RAEE, etc.).

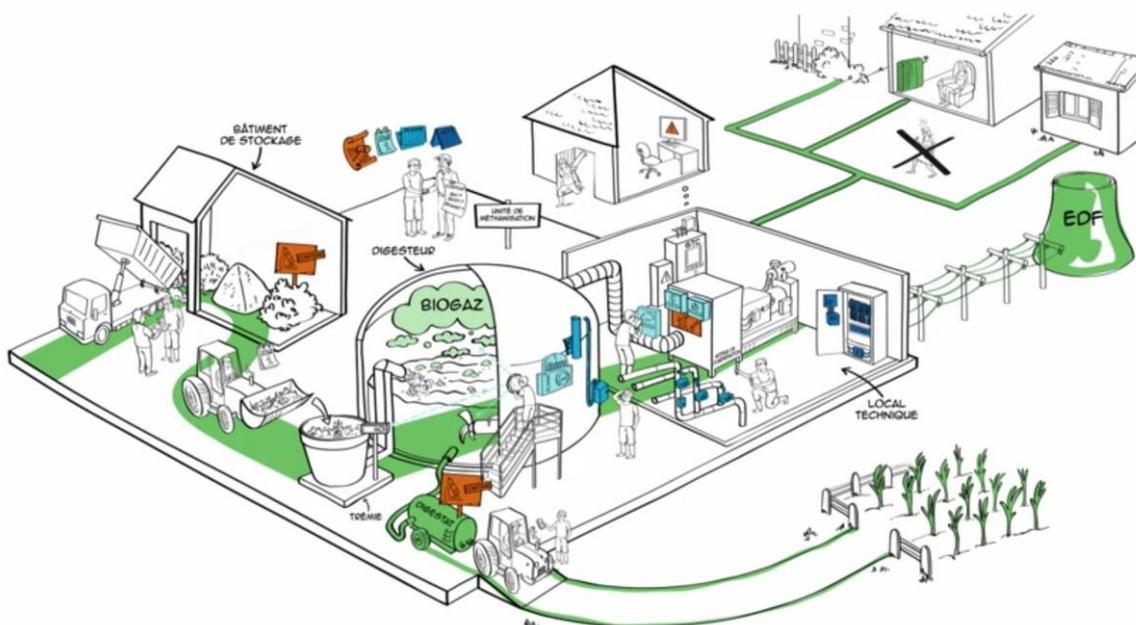


Figure 5 : Détail de la vidéo de vulgarisation éditée par RAEE concernant le suivi d'une installation de biogaz (en orange les aspects de suivi obligatoires, en bleu clair les analyses quotidiennes, en bleu moyen les analyses hebdomadaires, en bleu foncé les analyses mensuelles).

Les guides présentent les **outils et méthodologies de suivi** destinées aux exploitants des installations de méthanisation ou à des structures qui doivent surveiller les performances. Les **outils et méthodologies de suivi en développement** ont été aussi identifiés lors de la recherche bibliographique qui a été conduite.

Au regard de la recherche bibliographique, les points suivants peuvent être soulignés :

- Les résultats de cette recherche montrent un nombre très élevé de travaux concernant le suivi et l'optimisation des installations de méthanisation.
- Concernant le suivi d'installations de typologies spécifiques (agricoles, collectives, industrielles) les références sur les installations agricoles sont les plus nombreuses.
- Peu de résultats à l'échelle industrielle sont disponibles concernant les installations de méthanisation en voie solide.
- A ce jour, on peut identifier les sujets principaux de recherche suivants : (i) le développement de paramètres de suivi en ligne : méthodes multi-paramètre (p.ex. infrarouges, biosenseurs) (ii) la détermination du potentiel de biogaz (iii) l'analyse des AGV (iv) la modélisation mathématique et le contrôle de processus (Figure 6).

Pour un aperçu plus détaillé du développement scientifique de la filière, la lecture des revues scientifiques suivantes au sujet du suivi et du pilotage d'installations de méthanisation est proposée :

- **Siddique, M. N. I., & Wahid, Z. A. (2018). Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: A review. *Journal of Cleaner Production*, 194, 359-371.** [33]: Les facteurs qui influencent la co-digestion sont présentés, ainsi que les domaines de progrès et les obstacles à franchir.
- **Gaida, D., Wolf, C., & Bongards, M. (2017). Feed control of anaerobic digestion processes for renewable energy production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 869-875.** [34]: La revue évoque la faible implémentation de stratégies de contrôle de la ration alimentée en digestion pour des installations de méthanisation agricoles et industrielles. Les principaux défis sont soulignés.

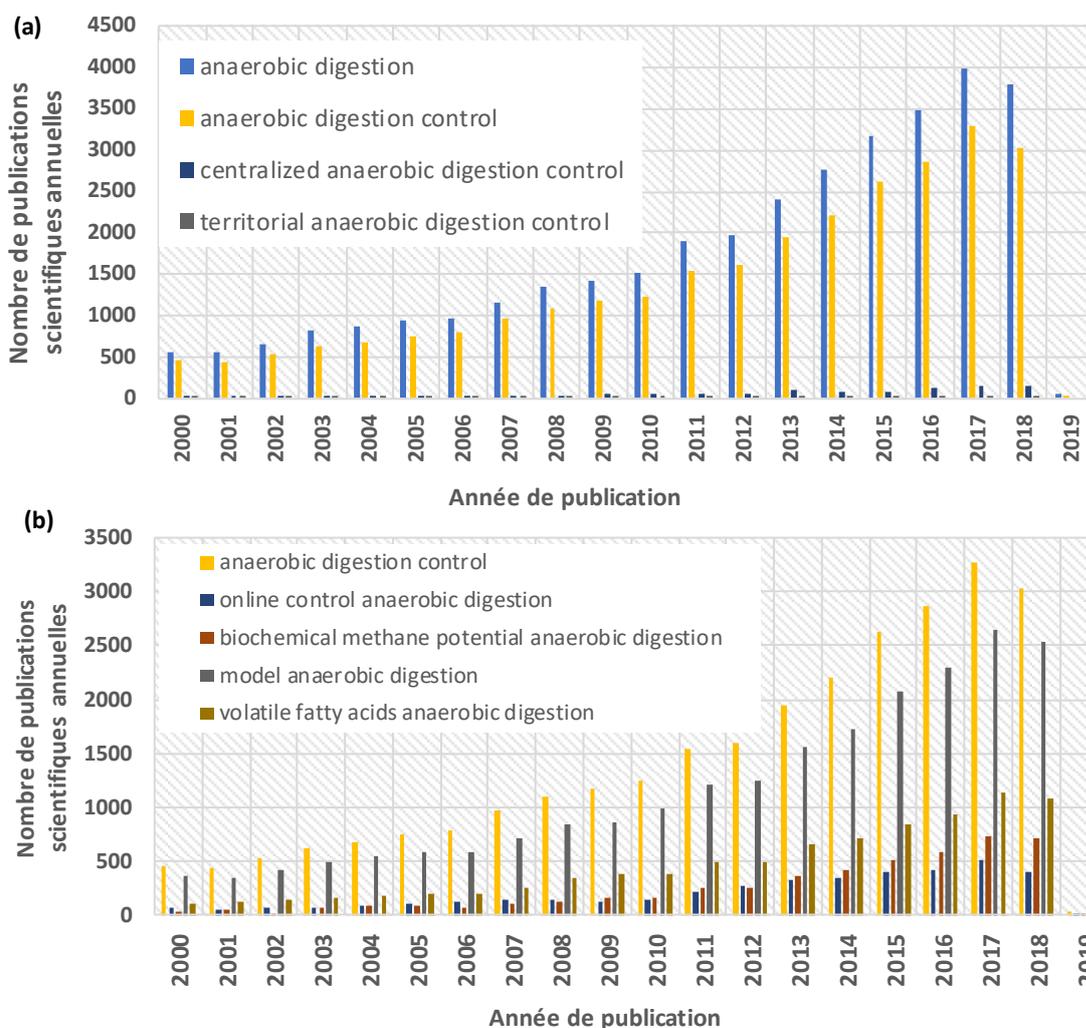


Figure 6. Historique de publications via des recherches par mots clés (a) au regard de la typologie et la technologie de méthanisation (b) selon des sujets de recherche.

- **Andre, L., Pauss, A., & Ribeiro, T. (2017). Solid anaerobic digestion: state-of-art, scientific and technological hurdles. *Bioresource technology*. [35]: Les obstacles à franchir au regard de l'optimisation de la digestion en voie solide sont indiqués.**
- **Li, L., Peng, X., Wang, X., & Wu, D. (2017). Anaerobic digestion of food waste: a review focusing on process stability. *Bioresource technology*, 248:20–8. [36]: Les auteurs analysent la recherche liée au suivi et contrôle du processus de digestion de biodéchets et à la gestion de l'écosystème microbien et leurs effets en l'amélioration de la performance de l'installation.**
- **Wang, P., Wang, H., Qiu, Y., Ren, L., & Jiang, B. (2017). Microbial characteristics in anaerobic digestion process of food waste for methane production–A review. *Bioresource technology*. [37]: La revue analyse les différences de l'écosystème microbien des différentes variantes technologiques de la méthanisation. La population microbienne est présentée en tant qu'indicateur de la stabilité du processus.**
- **Bockisch A, Kielhorn E, Neubauer P, Junne S. Process analytical technologies to monitor the liquid phase of anaerobic cultures. *Process Biochem* 2018. [38]: La revue présente les derniers efforts du développement des méthodes de suivi de la phase liquide de processus biologiques anaérobies.**

Les informations collectées auprès des différentes sources consultées sont présentées dans les chapitres suivants. Elles sont distribuées selon la typologie des paramètres de suivi (paramètres de suivi du processus ; du fonctionnement ; de la performance). Chaque paramètre est présenté sous forme synthétique en incluant au mieux :

- un rappel de l'importance et l'intérêt du suivi du paramètre, sous la rubrique « A ce propos »
- une notion de la fréquence d'utilisation de ce paramètre de suivi et l'endroit de réalisation de l'analyse (sur site, sur laboratoire externe)
- les méthodes d'analyse ou de suivi utilisées
- les méthodes d'analyse ou de suivi en voie de développement
- des spécificités sur le suivi du paramètre ou d'autres remarques, sous la rubrique « Observations »

La Figure 7 schématise la distribution, par typologie, les différents paramètres identifiés.

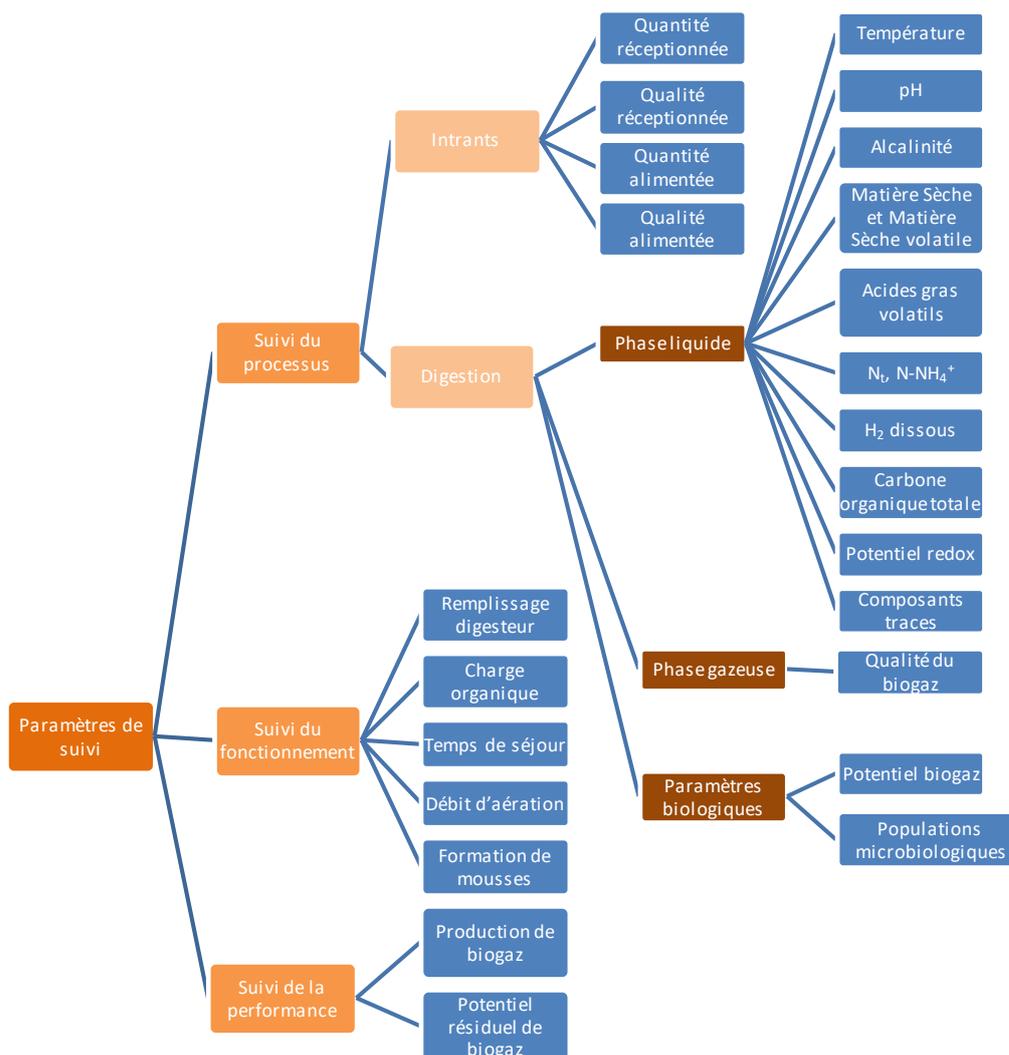


Figure 7. Distribution des paramètres de suivi de la méthanisation par typologie.



Le suivi du processus biologique de méthanisation entraîne fréquemment la prise d'échantillon. Le prélèvement d'une partie représentative d'un lot de substrat, de mélange ou de digestat est nécessaire. Dans la mesure du possible, l'échantillon doit être constitué à partir de prélèvements réalisés à différents endroits de stockage des matières ou à différents niveaux du digesteur [8]. Afin de réaliser un suivi historique des paramètres, il est important de privilégier une méthode de prélèvements réalisés à des endroits et des moments réguliers de la journée, ainsi que la réalisation du prélèvement par la même personne.

### 3.2.1 Paramètres de suivi du processus

#### 3.2.1.1 Paramètres de suivi du processus concernant les Intrants

##### ▪ Quantité des intrants réceptionnés

**A ce propos :** Le suivi de la quantité d'intrants réceptionnés est important pour la gestion administrative de l'installation et notamment lorsque des rapports d'activité doivent être soumis à des autorités régulièrement. La détermination des quantités délivrées permet également de vérifier qu'une surface suffisante de stockage est disponible (surfaces couvertes, cuves, préfosse) et d'ajuster l'alimentation du digesteur au regard des conditions effectives d'exploitation.

**Fréquence :** Mesure réalisée couramment, sur site.

**Méthodes :** Contrôle visuel de cuves ou de bennes réceptionnées, pont-basculé, pesons, débitmètre.

##### ▪ Qualité des intrants réceptionnés

**A ce propos :** Le suivi de la qualité des intrants réceptionnés est notamment important pour les installations où les intrants varient (p.ex. installations de traitement de biodéchets). Les paramètres à connaître sont : le pH, la teneur en matière sèche, la teneur en matière volatile ou la demande chimique en oxygène, la teneur en azote, la teneur en Soufre et le potentiel biométhanogène.

**Fréquence :** Mesure réalisée ponctuellement, en laboratoire, sur site ou dans un laboratoire externe.

**Méthodes :** L'analyse du pH se mesure avec une sonde. Sur site, une analyse classique en alternative à la Matière Sèche, est la mesure de l'humidité à l'aide d'un dessiccateur. Les méthodes d'analyse ou de suivi des paramètres à connaître sur la qualité des intrants sont détaillées dans le chapitre suivant : Suivi de l'unité fonctionnelle Digestion.

**Observations :** En ce qui concerne la qualité des intrants, la présence d'indésirables (plastiques, cailloux, etc.) est également à vérifier. Ces éléments augmentent l'usure des équipements mécaniques et impactent la qualité du digestat. Le développement de méthodes spectrales afin de détecter les inertes dans les intrants est une analyse pertinente afin de sécuriser le processus de réception des intrants. A ce jour, plusieurs sociétés privées travaillent sur le développement de ces techniques.

##### ▪ Quantité des intrants alimentés

**A ce propos :** Les changements de qualité et de quantité des intrants peuvent entraîner des instabilités du processus biologique de digestion. C'est la raison pour laquelle il est important de quantifier la ration d'alimentation du digesteur. Pour des substrats solides, des systèmes automatiques de pesage et de sauvegarde des données sont utilisés. Pour des installations moins sophistiquées, la ration d'alimentation est évaluée au suivi des godets pour alimenter le digesteur (connectés ou équipés ou non d'un peson).

Pour les substrats liquides, le suivi des quantités entrantes n'est pas très répandu pour les digesteurs à la ferme, bien que la plupart des installations sont de typologie liquide (digesteurs infiniment mélangés) et que les intrants liquides entraînent une diminution du temps de séjour et le risque d'une surcharge hydraulique (lessivage progressif des populations microbiennes du digesteur).

**Fréquence :** Mesures réalisées régulièrement pour les intrants solides et liquides, sur site.

**Méthodes :**

Pour les intrants solides : Balance avec registre de données.

Pour les intrants liquides : Débitmètre, suivi du niveau de remplissage des fosses de stockage, suivi du temps de pompage

##### ▪ Qualité des intrants alimentés

**A ce propos :** Lorsque les intrants réceptionnés sont nouveaux (et en grande quantité), la détermination de leur qualité permet d'éviter des risques d'instabilités du processus ; elle permet d'adapter le mélange d'alimentation du digesteur (le but étant d'avoir une charge organique régulière)

ainsi que de déterminer l'adéquation aux équipements d'insertion (le mélange est-il pompable ? pâteux pour trémie ?) ou les besoins techniques et prescriptions réglementaires de prétraitement(s) (faut-il broyer ? faut-il diluer ? faut-il hygiéniser ?).

**Méthodes** : La détermination de la composition des intrants peut comprendre la teneur en matière sèche, la teneur en matière sèche volatile, la teneur en carbone et la teneur en nutriments (N, P, K, Ca). Les méthodes d'analyse ou de suivi de ces paramètres sont détaillées au chapitre suivant.

**Méthodes en voie de développement** : Gaida et al [34] analysent l'état de l'art de l'automatisation du suivi des intrants. 80 % des publications analysées utilisent le taux de dilution ( $D = Q/V_{liq}$ ) en tant que variable d'exploitation pour atteindre leurs objectifs de stabilité et maximisation de la production de biogaz. Bien que des technologies de suivi existent, seules les installations de méthanisation de boues d'épuration les utilisent. Pour les installations agricoles et industrielles, les stratégies existantes de suivi du processus biologique sont trop chères et n'ont pas assez de retours d'expérience. La teneur en matières solides dans les technologies de digestion solide est présentée comme l'inconvénient principal pour le suivi en ligne. La teneur élevée en solides entraîne l'abrasion mécanique, ce qui rend la conception des outils de mesure plus chère. De plus, la présence des solides entraîne une mauvaise miscibilité dans le digesteur. Des systèmes robustes et avec faible entretien sont à développer. Des solutions prometteuses incluent la mesure spectroscopique (non-invasive) ou les installations en bypass.

**Observations** : Le prétraitement des intrants est facultatif et dépendant de la qualité des intrants réceptionnés (p.ex. broyage nécessaire), des réglementations (p.ex. concernant les sous-produits animaux) ou de la solution technologique de méthanisation envisagée (p.ex. système avec pré-hydrolyse). Les paramètres de suivi pour les différents équipements de prétraitement possibles (température, pH, etc.) sont également détaillés dans les chapitres suivants.

### 3.2.1.2 Paramètres de suivi du processus concernant le digesteur

#### Paramètres de suivi de la phase liquide

Les technologies de digestion en voie solide présentent une teneur en matière sèche du milieu de digestion qui oscille couramment entre 25 et 40%. Bien que la teneur en matière sèche soit plus élevée il faut rappeler que les réactions de dégradation de la matière organique par les microorganismes ont lieu dans la phase liquide. Pour les technologies en voie solide, le suivi s'effectue également à travers des analyses de la phase liquide du milieu de digestion. L'obstacle principal pour ces technologies devient la configuration de l'outil de mesure, qui doit être adapté aux caractéristiques pâteuses ou fibreuses du milieu de digestion. L'accessibilité à l'intérieur du digesteur est également un obstacle pour les systèmes de digestion à alimentation discontinue, dont l'étanchéité du digesteur est plus difficile d'assurer lors de l'échantillonnage.

Dans des configurations de méthanisation en voie liquide (système infiniment mélangé) la composition du milieu de digestion correspond également avec la composition du digestat brut.

Les détecteurs à développer pour la détermination de composants solubles dans le digesteur doivent pouvoir travailler à des températures jusqu'à 55°C et 2 bars de pression, être résistants à des éléments solides pouvant se trouver dans le digesteur, minimiser la croissance de biofilms sur la surface du détecteur ainsi qu'être résistants à la corrosion liée à la présence de H<sub>2</sub>S [39]. Les sondes doivent résister aux conditions mécaniques imposées par les procédés. Pour les analyseurs en ligne les perturbations liées au pompage et la conservation des réactifs pour les méthodologies de type chimique sont des problèmes récurrents.

Les référentiels inter et intra sites selon les typologies de méthanisation et les technologies sont en cours de constitution. Au niveau international, le groupe de travail sur la méthanisation de l'IEA (IEA Bioenergy Task 37), recense le développement de la filière des pays membres et publie régulièrement des cas d'étude d'installations de méthanisation. En France, par exemple l'Association Agriculteurs Méthaniseurs de France a notamment pour objectif de partager les expériences et mutualiser les données, de rassembler les compétences et ainsi d'accompagner et sécuriser les exploitants membres de l'AAMF.

## ▪ Température et homogénéité de la température

**A ce propos :** Il est essentiel de suivre la température dans le digesteur. Elle doit rester stable et dans les fourchettes de travail (selon le régime de travail mésophile ou thermophile) afin de garantir la dégradation stable et efficace de la matière organique par les populations microbiennes.

Mesurer la température sur plusieurs zones dans le digesteur permet de s'assurer de l'homogénéité de ce paramètre dans tout le volume de digestion disponible ainsi que d'identifier l'existence de zones de volume mort et donc volume pas utile.

**Fréquence :** Mesure réalisée couramment

**Méthodes :** En ligne avec des sondes de type thermocouple simples et bien testées.

**Observations :** Mise à part l'homogénéité de la température, la mesure de ce paramètre dans plusieurs endroits permet également de rejeter des mesures erronées.

## ▪ pH

**A ce propos :** Le pH est un paramètre global de suivi. Il est la résultante de la capacité tampon, des concentrations en  $\text{NH}_4^+$  et  $\text{NH}_3$  et des teneurs en acides dans la boue du digesteur. La présence de carbonate et de  $\text{CO}_2$  dissous agit en faveur de la stabilisation du pH. L'accumulation d'ammonium favorisera une augmentation du pH. L'accumulation d'acides organiques aboutit à terme à une diminution de pH. Un paramètre global tel que le pH n'est pas suffisamment sensible à lui seul pour anticiper une instabilité ou le début d'une inhibition et il est un très mauvais indicateur lorsque des substrats fortement tamponnés sont alimentés. La mesure du pH ne permet pas ainsi d'anticiper des dysfonctionnements, elle renseigne sur le processus.

Le pH du digesteur doit rester entre 7 et 8.5 afin que les microorganismes travaillent de façon optimale avec un rendement élevé de production de biogaz. Chaque digesteur présente un pH typique de travail en fonction des intrants, auquel les microorganismes dans le digesteur s'adaptent. La stabilité de ce paramètre est importante pour une activité stable des populations microbiennes.

En dehors de la plage optimale de pH, des valeurs entre 6.5 et 9 sont possibles. Cependant le pH a des effets sur l'équilibre de dissociation de  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  et AGV. Cela entraîne des limitations de la croissance des populations acétogènes et méthanogènes si le pH est inférieur à 6.8, et le risque de toxicité liée à la présence d'ammoniac si le pH dépasse de 8. Le digesteur en dehors de la plage de 7 et 8.5 est également un digesteur plus sensible aux chocs d'exploitation pouvant arriver tels qu'une surcharge organique ou l'apport d'un intrant azoté...

**Fréquence :** Mesure réalisée couramment, en laboratoire ou sur site.

**Méthodes :** pH-mètre de laboratoire. Mesure en ligne avec des sondes électrochimiques de pH.

**Méthodes en voie de développement :** La spectrométrie proche infrarouge est une technique en développement utilisée pour l'analyse multi-paramètres avec laquelle les paramètres tels que le pH, la teneur en matière sèche, en matière sèche volatile, en acides gras volatils, l'alcalinité, etc., peuvent être déterminées [14,40–42]. La nécessité de recalibration de cet outil ainsi que le coût d'investissement important sont les principaux inconvénients de cette technique.

**Observations :** L'inconvénient majeur de la mesure en ligne du pH est la croissance rapide d'un biofilm sur la surface du capteur, ce qui oblige à le nettoyer et à le calibrer plus fréquemment. Des écarts entre des valeurs mesurées en ligne et en laboratoire existent. Les effets du prélèvement, de la température de l'échantillon, ou la dégazéification (perte de  $\text{CO}_2$  de l'échantillon) de l'échantillon en sont les causes. Pour les mesures en laboratoire une procédure doit être définie et la mesure ainsi réalisée à l'identique afin d'avoir des résultats comparables. Lorsque la méthanisation a lieu en deux étapes successives (procédés en double étapes : hydrolyse – acidogénèse et méthanogénèse) séparées le pH optimal de chaque phase peut être différent. En effet les bactéries hydrolytiques et acidogènes travaillent de manière optimale à pH entre 4.3 et 6.5, tandis que pour les bactéries acétogènes et les archaea méthanogènes la plage optimale est entre 6.8 et 7.5.

- **Alcalinité**

<b>A ce propos</b> : L'alcalinité mesure la capacité tampon du milieu et donc sa capacité de réguler le pH. Elle est exprimée sous forme de teneur équivalente en CaCO <sub>3</sub> (mg CaCO <sub>3</sub> eq/L).
<b>Fréquence</b> : Mesure réalisée couramment, en laboratoire sur site.
<b>Méthodes</b> : Analyse par titrage (par exemple, norme allemande DIN 38409 H 7). La société Finsterwalder Umwelttechnik (D) propose un procédé de suivi en ligne de la teneur en bicarbonate du digesteur.
<b>Méthodes en voie de développement</b> : Mesure en ligne par techniques NIRS
<b>Observations</b> : La mesure de l'alcalinité est souvent réalisée simultanément à la détermination des acides gras volatils totaux (voir chapitre Acides gras volatils).

- **Matière sèche (MS) et matière sèche volatile (MSV)**

<b>A ce propos</b> : La teneur en Matière Sèche décrit la quantité totale de matière disponible, qui est composée de matière organique (équivalente à la MSV) et de matière inorganique ou minéral.  La teneur en MS des intrants justifie la conception de l'installation de méthanisation (mode d'alimentation, typologie de digestion) et la teneur en MS du digestat permet d'évaluer la perte de matière organique au cours de la biodégradation anaérobie.
<b>Fréquence</b> : Mesure réalisée couramment, en laboratoire ou sur site.
<b>Méthodes</b> : 1) Mesure de la masse Sèche : EN 12 879- Caractérisation des boues –Détermination de la perte par calcination de la MS ; 2) Mesure de la Matière Volatile : APHA 2540 E – Calcination de l'échantillon dans un étuve à 550°C pendant 24h. En effet, il est possible d'estimer la perte en effectuant ces deux mesures, sur intrant et digestats...
<b>Méthodes en voie de développement</b> : Mesure en ligne possible avec technique NIRS [43]
<b>Observations</b> : Alternativement, et pour un suivi plus régulier, la teneur en carbone organique peut être mesurée (voir COT). La teneur en matière organique peut également être mesurée au moyen d'analyses de demande chimique en oxygène (DCO), plus particulièrement pour les substrats liquides

- **Acides gras volatils (AGV)**

<b>A ce propos</b> : Les AGV sont des composants intermédiaires du processus et comprennent notamment les acides acétique (CH <sub>3</sub> COOH), propionique (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> COOH), butyrique (CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> COOH) et valérique (CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> COOH). La teneur totale en AGV est souvent exprimée sous forme d'équivalent acide acétique (mg CH <sub>3</sub> COOH eq/L).  Quand les étapes de fermentation de la matière organique (hydrolyse, acidogénèse et acétogénèse) et la méthanogénèse ne sont pas bien balancées une accumulation excessive d'AGV peut avoir lieu. L'alcalinité du milieu régule le pH suite à l'augmentation des AGV jusqu'au point où une soudaine et souvent irréversible diminution de pH arrive (situation d'acidose). Dans ces conditions, les archae qui produisent le méthane ne sont plus actifs et la production de biogaz s'arrête.  Le suivi des AGV et de l'alcalinité permet d'optimiser la production de biogaz du digesteur et de prévenir des situations de panne. Le rapport de ces deux paramètres, connu sous la dénomination de rapport FOS/TAC (de l'allemand Flüchtige Organische Säuren, AGV, et Totales Anorganisches Carbonat, alcalinité), a été identifié en tant qu'indicateur d'alerte précoce de dysfonctionnement liée à l'acidose [44]. Pour garantir la stabilité du bioréacteur, cet indice doit être compris entre 0.3 et 0.8 [45].  Le ratio de la teneur en propionate et la teneur en acétate est également estimé en tant qu'indicateur précoce de situations d'instabilité, quand le ratio est supérieur à 1 ou la teneur en acide propionique dépasse 1 g/L [46,47]. L'accumulation de l'acide butyrique et de l'acide valérique et leurs isomères ramifiées (teneurs supérieures à 50 mg/L respectivement) est normalement un signal d'instabilité sévère [14]. Une analyse ponctuelle est très peu représentative, c'est le suivi au cours du temps qui présente un intérêt pour réduire les risques de dysfonctionnement liés à l'acidose.
---

**Fréquence** : Mesure peu réalisée, sur site ou en laboratoire externe.

**Méthodes** : (i) détermination des AGV individuellement : CG (chromatographie de gaz avec détecteur de flamme ionisée ou détecteur de conductivité thermique), CL (*chromatographie liquide*) ou CI (chromatographie ionique) (ii) détermination de tous les AGV ensemble sous forme d'équivalents d'acide acétique : titrage, tests photométriques en cuvettes.

**Méthodes en voie de développement** :

- **NIRS**. Le projet européen Opti-VFA [48] a développé un outil de suivi en ligne des AGV basé sur la spectrométrie Fabry Perot. Le prototype a été testé à l'échelle laboratoire. La spectrométrie proche infrarouge est également présentée par Stockl et al [49] en tant que technique en ligne pour le suivi d'AGV, et notamment pour le suivi de la stabilité du processus.

- **Metal-oxide semiconductor sensors**. Ce type de détecteur est applicable pour le suivi dans plusieurs domaines de l'industrie agroalimentaire. Il est bon marché et peut fonctionner en ligne sans besoin de prétraitement de l'échantillon [50]. Ces types de détecteurs sont utilisés également dans les "nez électroniques" [14].

- **Biodétecteurs**. Le développement de biosenseurs pour le suivi en ligne des AGV est aussi en cours [51,52]. Cependant ce type de détecteur rencontre à ce jour des verrous techniques d'applications tels qu'une fourchette de mesure trop restreinte ou l'incapacité de détecter tout l'éventail d'AGV.

- Zosel [39] présente un système d'analyse des AGV, par stripping du gaz qui est analysé par chromatographie et détection colorimétrique.

**Observations** : Dans la pratique il n'existe pas toujours une bonne corrélation entre les deux méthodes globales et les techniques d'analyses conventionnelles de détermination des AGV (CI, GC, CL) [5,53].

▪ **N-N<sub>tot</sub>, N-NH<sub>3</sub> et N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>**

**A ce propos** : Les composés azotés proviennent de la dégradation de protéines et d'autres intrants riches en azote (tels que le lisier bovin ou porcin et fumier de volaille).

L'équilibre chimique entre l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) et l'ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) est principalement dépendant du pH et de la température. L'ammoniac est toxique pour les microorganismes car il pénètre la membrane cellulaire et en déstabilise le pH. L'ammonium se situe seulement dans la phase liquide, tandis que l'ammoniac peut être dans la phase liquide et dans la phase gazeuse. Les microorganismes peuvent s'acclimater à une accumulation progressive d'ammoniac (situation d'alcalose généralement liée à l'augmentation du pH). Une perte d'activité et donc de production de biogaz est souvent observée [9,54,55].

**Fréquence** : Mesure peu réalisée, en laboratoire sur site ou en laboratoire externe.

**Méthodes** : (i) En laboratoire : sur la base de US-American standard APHA 4500 – NH<sub>3</sub> –Nitrogen, norme allemande N-NH<sub>4</sub> DIN 38406-E5 ou ISO 11261. (ii) En ligne : détecteurs électrochimiques et détecteurs infrarouge. L'azote total peut être déterminé par des systèmes automatisés de préparation et analyse d'échantillons (analyses pas effectuées en temps réel mais permettant une détermination rapide).

Des outils ont été développés pour l'analyse de l'alcalinité de l'azote ammoniacal sur la base d'analyseurs existants pour les lisiers de porcs (systèmes Quantofix®, Agro-Lisier® et BiogasPro©) [10].

**Méthodes en voie de développement** : -

**Observations** : La détermination directe de NH<sub>3</sub> (aq) n'est pas possible. Une corrélation de la teneur en NH<sub>3</sub> en tant que fonction de celle de N-NH<sub>4</sub>, du pH et de la température est possible, nécessitant la mesure en ligne du pH [14].

▪ **Hydrogène dissous (H<sub>2</sub> (aq))**

**A ce propos** : L'hydrogène est un produit intermédiaire lors de la fermentation de la matière organique ainsi que de l'étape d'acétogénèse. Bien qu'étant un métabolite bactérien, l'hydrogène est

toxique pour les bactéries acétogènes (phénomène qu'on appelle inhibition par produit). Les bactéries acétogènes ont besoin de l'activité syntrophique d'autres espèces qui utilisent l'hydrogène afin que sa teneur reste faible. Une accumulation d'hydrogène engage successivement une accumulation d'AGV et par voie de conséquence la déstabilisation du processus biologique. C'est la raison pour laquelle la teneur en hydrogène dissous est considérée comme un indicateur d'alerte précoce de panne et donc un paramètre de contrôle du processus [44,56].

Cependant, si la mesure d'hydrogène dissous apparaît un paramètre clé d'anticipation des dysfonctionnements, aujourd'hui aucun capteur pour ce paramètre n'est disponible à l'échelle industrielle, des verrous techniques forts bloquant le développement de ce type de capteurs. Le principal inconvénient est la faible solubilité de ce composant en eau, qui fait que les méthodes de détection actuelles de l'hydrogène dissous se basent sur la mesure de l'hydrogène en phase gazeuse [57].

**Méthodes en voie de développement :** Krautkremer et Zosel [39] présentent un système d'analyse des composants dissous, dont l'hydrogène, L'échantillon subit un stripping du gaz qui est analysé par chromatographie et détection colorimétrique.

#### ▪ Carbone organique total (COT)

**A ce propos :** Le COT renseigne sur la qualité du substrat, la charge du digesteur, et de la teneur de solides dans le système [20]. Les principales applications de cette analyse s'effectuent sur des effluents. Néanmoins il est possible d'appliquer cette analyse à des échantillons solides à travers leur mise en solution.

**Fréquence :** Mesure peu réalisée, en laboratoire sur site ou en laboratoire externe.

**Méthode :** Le COT est déterminé par oxydation de l'échantillon. L'analyse s'effectue en deux étapes. la 1<sup>ère</sup> étape consiste à mesurer la concentration en Carbone inorganique par acidification. A la fin de cette étape un stripping du CO<sub>2</sub> permet de disposer du Carbone Organique constituant l'échantillon. La 2<sup>nde</sup> étape consiste en l'oxydation de l'échantillon restant, le CO<sub>2</sub> mesuré est alors d'origine organique.

**Méthodes en voie de développement :** -

**Observations :** La mesure en ligne est possible si des modifications mécaniques sont réalisées sur les analyseurs de COT développés pour les eaux usées.

#### ▪ Potentiel Redox

**A ce propos :** La mesure du potentiel redox permet de surveiller les conditions d'absence d'oxygène dans le processus. Ainsi le potentiel redox doit rester à des valeurs inférieures à -300 mV. Le potentiel redox est un indicateur sensible et direct des modifications d'oxygénation, associées par exemple à la qualité d'alimentation, à d'éventuelles fuites.

**Fréquence :** Mesure peu réalisée, bien que la mesure en ligne soit possible.

**Méthode :** Electrodes redox

**Observations :** L'entretien (nettoyage) de l'électrode est le principal frein de son utilisation.

#### ▪ Composants traces (Ni, Co, Mo, Se, Fe, Cu, Mn, Cr, Zn)

**A ce propos :** Les composants traces qui peuvent notamment devenir limitants pour la croissance des microorganismes dans le digesteur sont le nickel (Ni), le cobalt (Co), le molybdène (Mo) et le sélénium (Se) [14]. Les installations de méthanisation en mono-digestion ainsi que les installations industrielles sont plus sensibles à expérimenter des limitations en la teneur des composants traces.

**Fréquence :** Mesure peu réalisée, en laboratoire externe.

**Méthode :** Minéralisation de l'échantillon et analyse par plasma à couplage inductif.

## Paramètres de suivi de la phase gazeuse

### ▪ Composition du biogaz (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>)

**A ce propos :** La mesure du volume de biogaz et sa teneur en CH<sub>4</sub> permet d'évaluer la quantité d'énergie produite et le rendement de l'installation. Le rapport CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> est dépendant des intrants, de la charge et du temps de séjour du digesteur.

La mesure des composants gazeux, et leur suivi, permettra de détecter le début d'une panne du digesteur : une chute de la teneur en CH<sub>4</sub> peut indiquer une surcharge du digesteur (si les intrants n'ont pas changé) et une augmentation de H<sub>2</sub>S peut entraîner des instabilités du processus. Le H<sub>2</sub>S étant très corrosif en présence du condensat saturant le biogaz son suivi et son éventuelle élimination sont importants pour garantir la durée de vie des équipements en aval de la digestion.

**Fréquence :** Mesure réalisée souvent, sur site avec des détecteurs en ligne ou détecteurs hors ligne. Des dispositifs portables qui peuvent être utilisés également en ligne sont aussi utilisés.

**Méthodes :** Combinaison de détecteurs électrochimiques (H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>S) et détecteurs infrarouges ou de conductivité thermique (CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub>). Autres systèmes basés sur la photoacoustique ou la chromatographie gazeuse existent [20,58,59]. Au niveau industriel on trouve des détecteurs catalytiques ou détecteurs IR utilisant différentes longueurs d'onde. Les détecteurs catalytiques ont l'inconvénient d'être sensibles à la présence d'H<sub>2</sub>S, qui contamine le catalyseur [60].

**Méthodes en voie de développement :** Les systèmes en développement se focalisent plus sur la qualité du biogaz et l'identification d'impuretés.

**Observations :** Les besoins des outils de mesure des composants gazeux du biogaz sont dépendants de la technologie de valorisation utilisée. Ainsi, la teneur en méthane doit respecter des fourchettes spécifiques et des vitesses de variation limitées pour l'utilisation dans des moteurs de cogénération. La mesure de performance, telle que la qualité du biogaz le suivi de la qualité du biogaz est impératif lors de la production de biométhane.

### ▪ Température du biogaz

**A ce propos :** Le suivi de la température du biogaz permet la quantification du volume normal de biogaz, ou la quantification massique du biogaz produit, et donc l'évaluation de l'énergie qui peut être produite.

**Fréquence :** Mesure réalisée couramment

**Méthodes :** Au moyen d'un détecteur intégré à l'outil de suivi de la production de biogaz. Autrement une sonde de type thermocouple peut être mise en place sur la conduite de collecte du biogaz.

## Paramètres biologiques de suivi

### ▪ Potentiel biogaz des intrants

**A ce propos :** La réalisation du test de potentiel de biométhanogène (test PBM) permet de quantifier le biogaz qu'on peut produire à partir d'un intrant spécifique et donne information sur sa vitesse de dégradation.

L'analyse du test traditionnel PBM est longue et coûteuse. De plus, sa mise en œuvre s'effectue dans des laboratoires spécialisés, l'uniformisation entre laboratoires des conditions opératoires de réalisation des essais PBM reste un point délicat. Les tests réalisés par Hack et al [61] permettent de conclure qu'il est cohérent d'estimer la production de méthane sur une installation industrielle à partir de mesures de PBM en laboratoire.

**Fréquence :** Mesure réalisée souvent, en laboratoire sur site ou en laboratoire externe.

**Méthodes :** sur la base des normes EN 11734, DIN 38414 ou VDI 4630. Sur le marché, plusieurs sociétés proposent des systèmes d'analyse du potentiel biogaz (par exemple le procédé AMPTS de

Bioprocess Control (SE), ou le procédé MethanTube de la société Biological Care (IT)). La standardisation de la méthode de réalisation a été proposée par Holliger et al [62]. Le test PBM Hohenheim est une méthode efficace (mais moins précise) pour la détermination PBM à petite échelle [63].

En alternative à l'analyse classique, des méthodes d'analyses rapides ont été développés. Nous présentons ici les principales méthodes à ce jour commercialement proposées. La confiance octroyée en ces méthodes est croissante, et plus particulièrement dans des cas où la réactivité est indispensable : prospection de gisements, contrôle d'un échantillon spot et dans le cadre de la constitution d'une base de données. Certaines technologies complètent l'information PBM, puisque la méthode renseigne également sur la toxicité bactérienne du gisement ou des métabolites testés (technologie BioDScreen®), sur l'accessibilité de la matière organique illustré par exemple par les travaux Liu et al (2015) [64].

#### **Méthodes alternatives :**

- La respirométrie est une technique de mesure de l'activité biologique, bien que de type aérobie elle a été étudiée comme méthode alternative à l'évaluation PBM. Cette méthode indique le niveau de biodégradabilité de la matière organique, L'utilisation de ce type de technique de suivi est acceptée parmi la communauté scientifique ainsi que par les réglementations européennes [65,66].

- Doublet et al [67] utilisent la spectrométrie proche infrarouge pour la détermination du PBM, mais soulignent la difficulté de l'intégration de toute la diversité de substrats. La société APESA (FR) a mis sur le marché son outil de mesure NIRS pour le test PBM [32].

- Les sociétés Ondalys et Veolia (FR) ont développé le procédé Flash BMP®, qui constitue une méthode de mesure significativement plus rapide et meilleur marché basée également sur la spectrométrie proche infrarouge. Un test à échelle industrielle est en cours [68]. Sur la même base d'analyse Ondalys et Metrohm offrent l'outil NIRS DS2500, qui permet la mesure du PBM très rapide.

- Les travaux de Bellaton et al [69] présentent la validation d'une méthode de détermination du PBM par fluorescence en comparaison à des analyses AMPTS sur une campagne d'échantillons de boues urbaines. Depuis 2015, la société Scanae (FR) offre ses services d'analyse du PBM FluoMethane®, valorisant une technologie issue de 10 ans de R&D et 5 d'applications industrielles ; l'analyse s'effectue sur 96h, incubation au cours de laquelle la fluorescence d'un composant réactif ajouté est relevée automatiquement et corrélée avec l'activité biologique de l'échantillon sous conditions de digestion.

- Finalement, les méthodes alternatives peuvent proposer une méthode alternative basée sur le fractionnement biochimique soit de type catégorie de composés : Glucides, Protéines et lipides, soit à travers un fractionnement de type Van Soest, tel que le présentent les travaux de Liu et al [64].

#### ▪ **Analyse quantitative et qualitative des populations microbiologiques**

**A ce propos :** La détermination de la quantité et qualité des populations microbiennes existantes dans le système en en interrelation avec l'historique d'exploitation d'un digesteur permet un suivi biologique du fonctionnement du digesteur aboutissant à l'identification de voies d'optimisation. Celles-ci sont liées aux conditions de fonctionnement pour différents états de la méthanisation (méthanisation mésophile ou thermophile ; en voie solide ou liquide ; avec des prétraitements de la biomasse ; à échelle laboratoire ou industrielle), étant des indicateurs de la stabilité du processus [6,37].

**Fréquence :** Ces analyses sont peu réalisées. Elles s'effectuent en laboratoire externe.

**Méthodes :** Plusieurs techniques moléculaires de détection biologique ont été utilisées en digestion anaérobie : *polymerase chain reaction* (PCR), *denaturing gradient gel electrophoresis* (DGGE), *restriction fragment length polymorphism* (RFLP) et *fluorescence in situ hybridation* (FISH) [37].

La méthode d'analyse par mesure de fluorescence au format microplaque FluoMethane®, précédemment citée, est une technologie flexible répondant aux applications de mesure d'activité microbienne, de toxicité ainsi que l'obtention de profil métabolique d'inoculum ; un article scientifique est en cours de rédaction par le SIAAP et Scanae sur ces applications.

**Méthodes en voie de développement :** L'analyse en ligne de la vitalité des microorganismes dans le digesteur moyennant la mesure de la polarisabilité dans un champ électrique, ce qui est dépendant de l'intégrité de la membrane cellulaire [70].

### 3.2.2 Paramètres de suivi du fonctionnement

#### ▪ Niveau de remplissage digesteur

**A ce propos** : Le niveau de remplissage du digesteur permet d'évaluer le volume utile du digesteur, soit le volume où la biomasse et les microorganismes peuvent être en contact et la méthanisation peut avoir lieu. Le volume total du digesteur est composé par le volume utile et le volume du ciel gazeux.

**Fréquence** : Mesure réalisée couramment. Des dispositifs en ligne sont utilisés.

**Méthodes** : Détecteur par pression différentielle, détecteurs laser, détecteur par ultrasons ou détecteur par radar.

**Observations** : Le volume de remplissage du digesteur ne correspond pas au volume utile quand des volumes morts sont présents. Ceux-ci sont notamment le résultat d'une agitation inefficace qui ne permet pas l'homogénéité requise. La formation de mousses en surface peut fausser la mesure du niveau de remplissage de liquide dans le digesteur.

#### ▪ Charge organique volumique

**A ce propos** : La charge organique volumique est une mesure de la quantité de matière organique qui est introduite dans le digesteur par unité de temps et par unité de volume du digesteur (souvent exprimée comme  $\text{kg MSV m}^{-3}\text{ digesteur j}^{-1}$ ). Cette valeur est souvent utilisée en tant que paramètre de dimensionnement du digesteur. Pour des technologies en voie liquide continue, une valeur de  $3 \text{ kg MSV m}^{-3}\text{ digesteur j}^{-1}$  est souvent utilisée [14,17,71]. Des valeurs plus élevées sont souvent utilisées pour des installations en voie solide continue. Le risque d'inhibition augmente progressivement avec l'augmentation de la charge organique. Dans la pratique, la charge organique volumique change si les intrants alimentés subissent des modifications ou si des instabilités du processus demandent une diminution de l'alimentation.

Sa détermination est dépendante de la mesure de la quantité et qualité des intrants alimentés, ainsi que du volume utile du digesteur (voir volume de remplissage du digesteur).

#### ▪ Temps de séjour

**A ce propos** : Le temps de séjour, ou temps de séjour hydraulique, indique le temps moyen pendant lequel les substrats restent dans le digesteur. Il est fonction du volume du digesteur et du débit alimenté. Cette mesure indirecte est souvent utilisée en tant que paramètre de dimensionnement du digesteur. Quand le débit d'alimentation surpasse le débit de dimensionnement, le temps de séjour diminue et inversement. Un temps de séjour trop faible peut entraîner la surcharge hydraulique (pouvant aboutir au lessivage des microorganismes du digesteur) et un temps de séjour trop long diminue la productivité de l'installation (quantité de biogaz produite par unité de volume du digesteur).

Lors de la méthanisation le temps de séjour minimal est dépendant des technologies et des substrats alimentés. Pour des déchets de l'industrie agroalimentaire un temps de séjour minimal de 20 jours est accepté ; 40 jours sont à prévoir pour la méthanisation de cultures à vocation énergétique et 50 jours sont couramment envisagés pour la méthanisation d'effluents d'élevage. Sous conditions de digestion thermophiles ces valeurs sont souvent diminuées. En technologie en voie liquide continue, il ne doit pas être inférieur à 10 jours afin d'éviter le lessivage des microorganismes [71]. Le plus biodégradable est un substrat, le moins de temps de séjour sera nécessaire.

Le temps de séjour est une grandeur pouvant également caractériser les autres ouvrages d'un site d'exploitation (fosse, trémie d'alimentation, post-digesteur, unités de stockage, etc) ainsi que l'ensemble du temps de séjour de l'introduction à sa sortie sous forme de digestat.

**Méthode** : La détermination du temps de séjour est dépendante de la mesure du débit alimenté ainsi que du volume utile du digesteur. Il est couramment indiqué par le système d'automatisation et de suivi de l'installation.

**Observations** : Le temps de séjour des microorganismes (aussi connu sous le nom de temps de rétention des solides) est souvent correspondant avec le temps de séjour, sauf si des systèmes de rétention ou de recirculation sont inclus dans la conception du digesteur (p.ex. des membranes, cloches de rétention, ...). C'est le cas des réacteurs UASB ainsi que d'autres systèmes à biomasse fixée.

#### ▪ Débit d'aération du ciel gazeux dans le cas d'une désulfuration biologique

**A ce propos** : Une élimination grossière de l'H<sub>2</sub>S contenu dans le biogaz peut se réaliser biologiquement. Ainsi, de l'air est introduit dans le ciel gazeux du digesteur où des bactéries oxydantes du soufre, qui sont micro-aérophiles, pourront transformer le H<sub>2</sub>S en soufre élémentaire ou en sulfates solubles [72].

**Fréquence** : Mesure réalisée souvent en installations de méthanisation agricoles pour des raisons de sécurité.

**Méthodes** : Sonde d'oxygène avec détecteur électrochimique.

**Méthodes en voie de développement** : La mesure du potentiel d'oxydo-réduction est également proposée afin d'évaluer et maîtriser la quantité d'oxygène introduite [73].

#### ▪ Détecteur de mousse

**A ce propos** : La formation de mousse dans le digesteur peut survenir pour différentes raisons : (i) l'introduction de substrats inappropriés qui changent la tension superficielle du milieu de digestion et retiennent les bulles de biogaz (ii) la surcharge organique du digesteur (iii) le chauffage du digesteur mal dimensionné (iv) le brassage inapproprié (v) la présence de bactéries filamenteuses. La présence de mousse dans le digesteur peut entraîner la formation de croûtes, le blocage des conduites de gaz, des problèmes avec les outils de mesure ou même la diminution du volume utile [74,75].

**Méthodes** : Détecteurs capacitifs ou potentiométriques, placés juste sur la conduite de sortie du biogaz.

### 3.2.3 Paramètres de suivi de la performance

#### ▪ Production de biogaz

**A ce propos** : Le suivi de la production et de la composition du biogaz est d'importance pour quantifier la performance de l'installation ainsi que pour identifier des instabilités du processus.

**Fréquence** : Mesure réalisée très souvent.

**Méthodes** : Plusieurs types d'outils permettent le suivi de la production du biogaz, mais tous présentent un inconvénient ou autre. Les différentes possibilités comprennent les détecteurs de débit ultrasoniques, les fluidistors oscillateurs, les turbines de détection de débit, les détecteurs de débit en vortex, les sondes de pression dynamique, les détecteurs de débit thermiques, les mesureurs de gaz en diaphragme (liste d'avantages et inconvénients dans Drosig 2013 [14]).

**Observations** : Dans certains cas la mesure de la production se fait indirectement moyennant les données de l'unité de valorisation du biogaz, notamment à partir la production d'électricité par le moteur de cogénération.

- **Potentiel résiduel de biogaz**

**A ce propos :** Le digestat issu du digesteur peut contenir encore de la matière organique méthanisable, ceci étant le résultat d'une durée de digestion insuffisante par rapport à la biodégradabilité de certains intrants. Le potentiel de biogaz du digestat, ou potentiel résiduel du biogaz, peut donc être évalué. Le potentiel résiduel de biogaz indique la stabilité du digestat et la performance du processus de méthanisation.

**Méthodes en voie de développement :** Une méthode adaptée à la détermination du potentiel de biogaz à partir du digestat (potentiel résiduel de biogaz) est proposé par Walker et al 2010 [76]

### 3.2.4 Tableau récapitulatif des paramètres et des méthodes de suivi

Tableau 2 Récapitulatif des paramètres et des méthodes de suivi

Typologie de paramètre	Paramètre de suivi	Niveau Exigence	Périodicité	Technique de mesure et suivi	Valeurs optimales (Drosg, 2013 [14])	
Suivi du PROCESSUS	Quantité des intrants alimentés	Elevé	2 x/an, ou à chaque changement Intrant	Pesage, débitmètre ou autre protocole adapté		
	Qualité des intrants alimentés	Elevé	2 x/an, ou à chaque changement Intrant	Echantillon et analyse laboratoire		
	<b>Paramètres de suivi de la phase liquide</b>					
	Température et homogénéité de la température	Elevé	min. 1x/j	Sonde de type thermocouple	max. 1-2°C d'écart de la température de travail	
	pH	Elevé	1-5x/sem.	pHmètre	7-8	
	Alcalinité	Moyen	Si problème fonctionnement ou suivi expérimental : 1-3x/sem.	Echantillon et analyse laboratoire	Sur la base des acides gras volatils : entre 1.25 et 3.3 fois la teneur en AGV	
	Matière sèche et matière sèche volatile	Moyen	1-2x/an ou à chaque changement de mélange	Echantillon et analyse laboratoire	MS <10 % (tech. voie liquide continue) MVS = 70 – 80%	
	Acides gras volatils	Moyen	Si problème fonctionnement ou suivi expérimental : 1-3x/sem.	Echantillon et analyse laboratoire	1-4 g/L	
	N <sub>total</sub> , N- NH <sub>3</sub> et N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Moyen	1-2x/mois	Echantillon et analyse laboratoire	< 5g/L N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	
	Hydrogène dissous		En continu	Non standardisé	< 100 ppm	
	Carbone organique dissous	Moyen	En continu	Echantillon et analyse laboratoire		
	Potentiel rédox	Moyen	En continu	Electrode redox	< -300 mV	
	Composants traces	Bas	Si autres causes du problème de fonctionnement ne sont pas identifiées		Sur la base des besoins en chaque élément spécifique	
	<b>Paramètres de suivi microbiologique</b>					
	Potentiel de biogaz des intrants	Bas	S'il y a un changement du mélange important	Echantillon et analyse laboratoire		
	Analyse quantitative et qualitative des populations microbiologiques	-	Si suivi expérimental	Echantillon et analyse laboratoire		
<b>Paramètres de suivi de la phase gazeuse</b>						
Qualité du biogaz (CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> )	Elevé	Quotidien	Détecteurs électrochimiques, infrarouges et/ou de conductivité thermique			
Suivi du FONCTION - NEMENT	Niveau de remplissage du digesteur	Elevé	Quotidien	Détecteur pression différentielle, laser, ultrasons ou radar		
	Charge organique volumique	Elevé	Quotidien	Sur la base de la qualité et quantité des intrants	3 kg MSV m <sup>-3</sup> digesteur j <sup>-1</sup> (tech. voie liquide continue)	
	Temps de séjour	Elevé	Quotidien	Sur la base de la quantité d'intrants et de niveau de remplissage du digesteur		
	Formation de mousse	Moyen	1-2x/mois, en fonction des intrants	Détecteurs capacitifs ou potentiométriques		
Suivi de la PERFORMANCE	Production de biogaz	Elevé	En continu	Détecteurs de débit ultrasoniques, fluidistors oscillateurs, turbines de détections, détecteurs vortex, sondes de pression dynamique, etc.		
	Potentiel résiduel de biogaz	Moyen	Si problème fonctionnement, si changement du mélange important ou suivi expérimental	Echantillon et analyse laboratoire		

## 4 Campagne d'enquête et retours d'expériences des acteurs de la filière

Suite au recensement des méthodes et outils utilisables et en développement, un sondage permettant d'identifier les stratégies de pilotage et les paramètres de suivi des digesteurs effectivement utilisés a été réalisé. La campagne visait également à obtenir un retour d'expérience sur des incidents ou dysfonctionnements spécifiques des systèmes de digestion.

La campagne d'enquête rassemble des entretiens avec les différents acteurs de la filière : exploitants, constructeurs, experts. Des représentants d'installations de différents types font partie des interlocuteurs interviewés (installations industrielles, installations agricoles, stations d'épuration des eaux usées, technologies de méthanisation en voie liquide et solide).

Le principe d'enquête consistait à ce qu'une enquête corresponde à un site de méthanisation. Par conséquent un enquêté (constructeurs, experts) pouvait décrire jusqu'à 3 typologies de méthanisation, différenciées par type de procédés de méthanisation ou par taille de site au regard de la capacité de valorisation exprimée en Tonnes/an de substrats traités.

Les experts Biogaz représentent les chargés de mission des organismes de développement de la filière biogaz, les scientifiques et chercheurs du secteur, ainsi que les professionnels du suivi du processus biologique sur digesteur, intervenant en support des exploitations. Les experts ont été sélectionnés au regard de leur implication sur des sites de méthanisation.

Le retour de la campagne d'enquête est présenté par la suite pour le territoire français et pour le reste du territoire européen. Un bref aperçu de l'ensemble des interlocuteurs enquêtés est inclus, ce qui permet dans certains cas de corréliser les réponses et le type d'installation de méthanisation en exploitation. Pour chacun des aspects questionnés dans l'enquête, les réponses des différents acteurs de la filière biogaz ont été résumées. Afin de mieux distinguer les retours d'expériences des exploitants, les préconisations des constructeurs de technologies de méthanisation et les conseils des experts un code visuel a été utilisé pour chacun de ces trois types d'interlocuteurs (Figure 8).



Figure 8. Code visuel de réponses (a) des exploitants (b) des constructeurs/développeurs et (c) des experts de la filière biogaz.

Des encadrés sont présentés le long du chapitre afin de mettre en évidence les points à retenir.

### 4.1 Retours et représentativité des enquêtes

#### **Ce qu'il faut retenir :**

Cette enquête a réuni la participation d'acteurs très divers de la filière biogaz au niveau européen et français en ce qui concerne la nationalité, le type d'acteur, le type d'installation et les types d'intrants. Elle apparaît ainsi comme représentative de la branche pour la France et les pays européens.

#### 4.1.1 Aperçu et présentation des interlocuteurs français

L'enquête a permis de rassembler 60 retours d'enquêtes, de professionnels du secteur du biogaz en France. Les interlocuteurs étaient donc :

- des exploitants, à qui s'adressait préférentiellement l'enquête,
- des constructeurs/ développeurs, qui sont de manière croissante investis sur la conduite de digesteurs, plus particulièrement au démarrage et au cours des deux premières années d'exploitation,

- des experts, sélectionnés préférentiellement au regard de leur investissement à l'échelle industrielle, au suivi du processus biologique de digesteurs.

La Figure 9 indique la répa

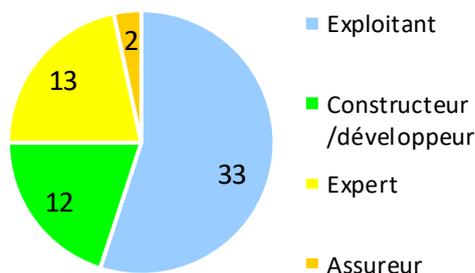


Figure 9. France – Répartition des enquêtés au regard de leurs métiers.

Cette enquête s'inscrit dans une 2<sup>nde</sup> phase d'étude portant l'objectif de confronter les méthodologies à la réalité de la pratique en exploitation. Comme indiqué dans le précédent schéma, les exploitants représentent 55% des enquêtés, et sont suivis par les experts et constructeurs représentant respectivement 20% et 21% des personnes enquêtées. Deux assureurs des sites de méthanisation ont également été contactés dans le cadre de cette enquête.

L'enquête s'est attachée également à être représentative des procédés, des capacités de traitement, et des typologies d'intrants (Figure 10).

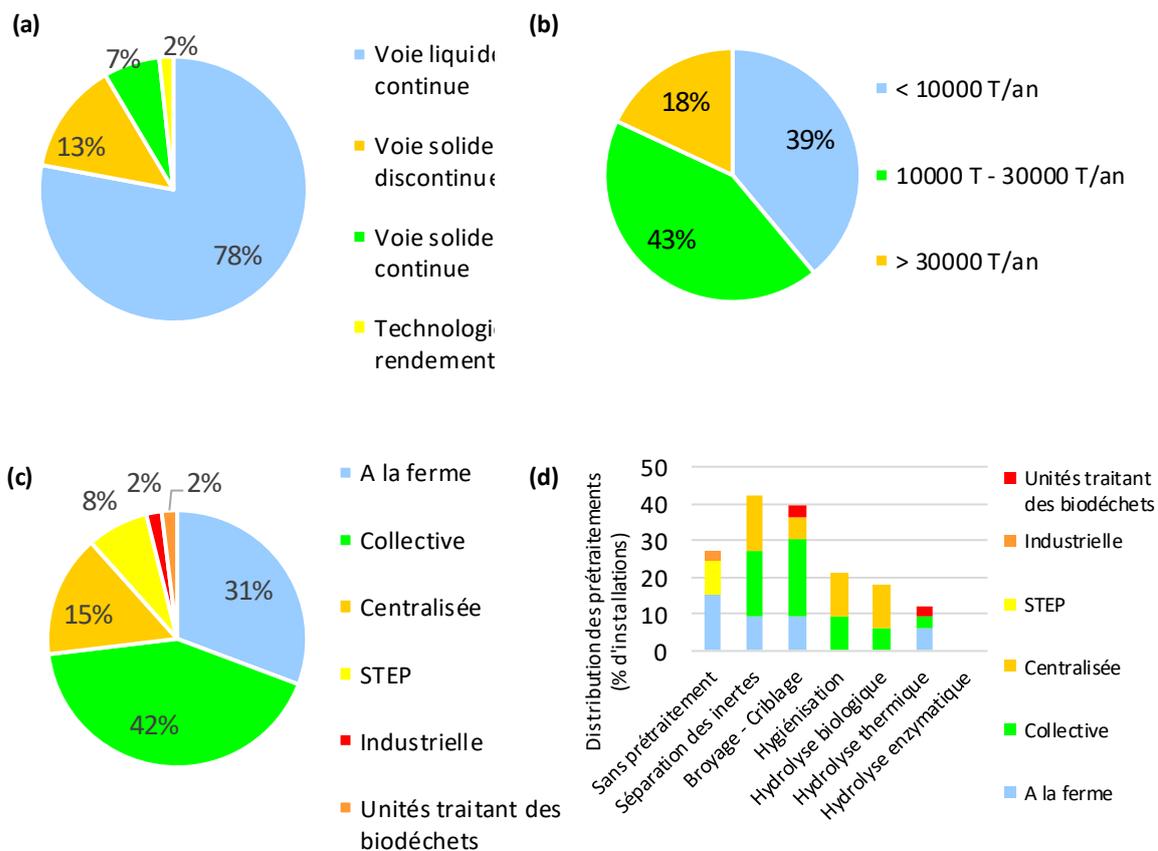


Figure 10. France – Aperçu des interlocuteurs de l'enquête au regard (a) de la technologie de méthanisation (b) de la capacité de traitement du procédé (c) de la typologie de méthanisation et (d) des typologies de traitements sous procédés en alimentation continue.

Les procédés représentés sont à 78% des procédés en voie liquide continue. 21% des enquêtes correspondent aux procédés solides, majoritairement des procédés en alimentation discontinue, de type garages (Figure 10a). 82 % des exploitations présentent une capacité de traitement inférieure à 30000 T/an, environ la moitié ayant une capacité inférieure à 10000 T/an (Figure 10b).

Les installations de méthanisation à la ferme (31%) et la méthanisation collective (42%) sont majoritairement représentées dans le cadre de cette enquête (Figure 10c). La méthanisation centralisée représente 15% des sites enquêtés. L'enquête rassemble également des retours d'expérience de digesteurs de STEP urbaines, de méthanisations industrielles et de biodéchets (biodéchets issus de la collecte séparée, tels que biodéchets ménagers). Parmi les substrats qui sont traités dans les installations concernées 73% sont des effluents d'élevages, ainsi que des résidus agricoles. 59% des installations traitent des déchets organiques, dont 2% se focalisent sur les FFOM. Le reste des sites participants sont des installations sur stations d'épuration et un site de méthanisation industriel.

La production de biogaz est à la fois dépendante du respect des conditions optimales d'activité bactérienne mais également de l'accessibilité de la matière. Le prétraitement de la matière va ainsi être choisi au regard des intrants et de la stratégie d'exploitation, afin d'optimiser le taux de biodégradabilité de la ration alimentée. Les prétraitements sont de différents types : 1) physiques, par exemple par broyage, séparation, effet de température, passage en ultra-sons ; 2) chimiques via des oxydations, acidification, alcalinisation ; 3) biochimiques, tels que des traitements bactériens, enzymatiques et fongiques. L'hygiénisation est une obligation légale de traitement, cependant en amont de l'unité de digestion elle peut être considérée comme un prétraitement thermique, pouvant par exemple favoriser l'hydrolyse des composés organiques, l'homogénéisation et l'accessibilité des matières à introduire. La Figure 10d représente la distribution des sites selon le(s) prétraitement(s). Ainsi 72% des installations enquêtés comportaient un ouvrage de prétraitement ou plusieurs. Les installations ne comportant pas d'ouvrages de prétraitement sont majoritairement des installations à la ferme, puis des sites STEP et industriels.

#### **4.1.2 Aperçu et présentation des interlocuteurs européens**

A l'exception de la France, les principaux pays européens actifs sur le domaine de la méthanisation ont fait l'objet de l'enquête (Allemagne, Royaume-Uni, Danemark, Pays-Bas, Belgique, Italie, Suède, Autriche, Suisse). Au total 33 interlocuteurs ont accepté de participer au sondage, correspondant à un taux de retour d'environ 30%.

Les interlocuteurs européens proviennent notamment d'Allemagne et de Suisse. L'Allemagne est le leader de la filière, et la proximité des interlocuteurs suisses a facilité les retours de ce pays. Cependant d'autres pays sont également représentés dans cette campagne. 7 pays sur 9 ont pris part à l'enquête. Aucun retour du Danemark ni des Pays Bas n'a été possible, en dépit de nos efforts (Figure 11 gauche).

En ce qui concerne le type d'interlocuteur, deux tiers des participants à cette campagne d'enquête sont des exploitants d'installations de méthanisation (Figure 11 droite). Ceci favorise le retour d'expériences et permet un meilleur aperçu des méthodes et outils effectivement utilisés. Le regard expert, indépendant des constructeurs et des exploitants, a été également représenté. Aucun retour du secteur des assurances n'a été reçu.

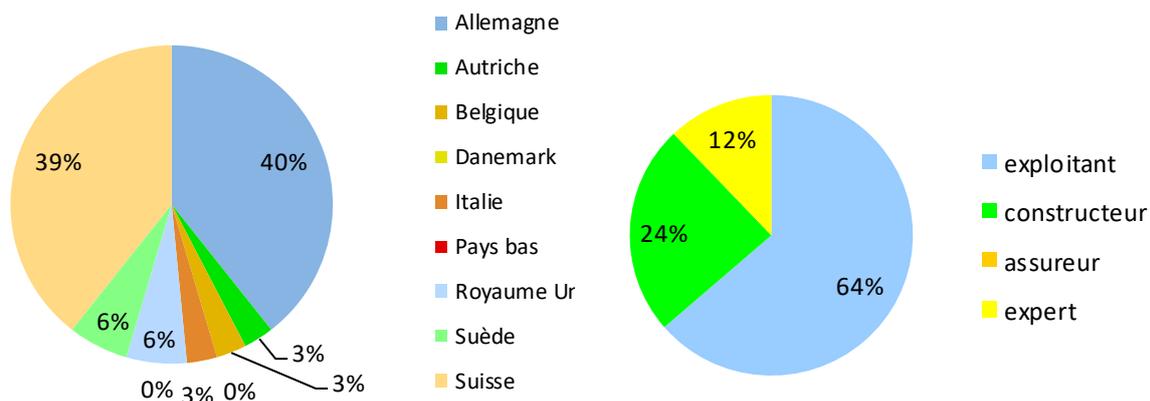


Figure 11. Europe – (gauche) Provenance des interlocuteurs de cette enquête et (droite) répartition au regard de leurs métiers.

Par rapport aux exploitants la plupart d'entre eux gèrent le fonctionnement d'une installation de méthanisation de type voie liquide continue (Figure 12a). Les retours d'expériences d'exploitants d'installations en voie solide à alimentation discontinue ou d'installations à haut rendement n'a pas été possible.

Les installations enquêtées sur le territoire européen sont en majorité de taille moyenne (entre 10000 et 30000 t/an de substrats traités), mais les installations de petite taille (< 10000 t/an de substrats traités) et de grande taille (> 30000 t/an de substrats traités) sont également représentées parmi les interlocuteurs (Figure 12b).

Parmi les substrats qui sont traités dans les installations concernées environ un tiers des installations traitent des effluents d'élevage avec des cultures énergétiques, environ un tiers co-digèrent des effluents d'élevage avec d'autres co-substrats (Figure 12c). 15% des installations traitent exclusivement des biodéchets (biodéchets de restauration, biodéchets ménagers, invendus). Le reste des installations traitent notamment des boues d'épuration (avec ou sans co-substrats).

Les prétraitements réalisés dans les installations majoritairement représentées concernent notamment la séparation des inertes et le broyage (Figure 12d). L'hygiénisation, l'hydrolyse biologique et l'hydrolyse thermique sont des techniques également représentées dans le retour des installations enquêtées.

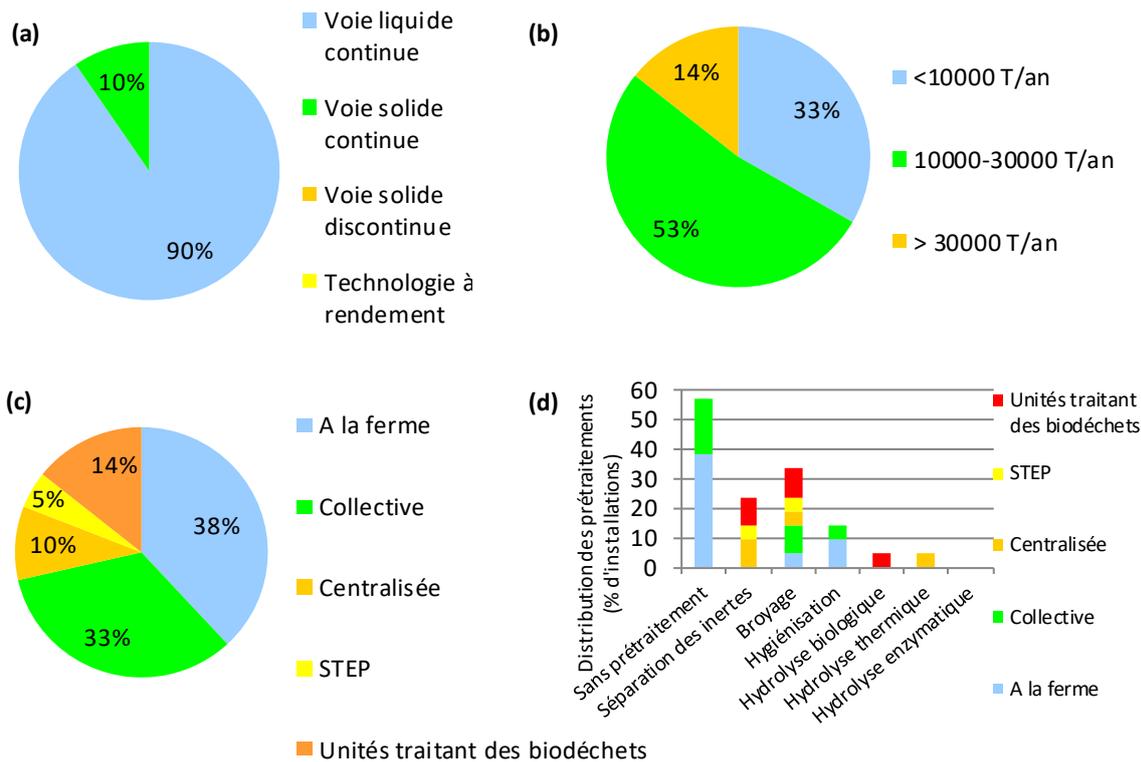


Figure 12. Europe - Aperçu des interlocuteurs de l'enquête au regard (a) de la technologie de méthanisation (b) de la capacité de traitement du procédé (c) de la typologie de méthanisation et (d) des typologies de traitements.

Par rapport aux constructeurs, les différentes technologies de méthanisation sont indiquées dans leurs retours (Figure 13). La moitié des constructeurs proposent des technologies en voie liquide dans des digesteurs infiniment mélangé. L'autre moitié propose des technologies en voie solide, à alimentation continue et discontinue. C'est notamment pour ces dernières que les outils et méthodologies de suivi de la méthanisation sont moins connus, étant donné que la plus grande part du marché concerne la digestion en voie liquide.

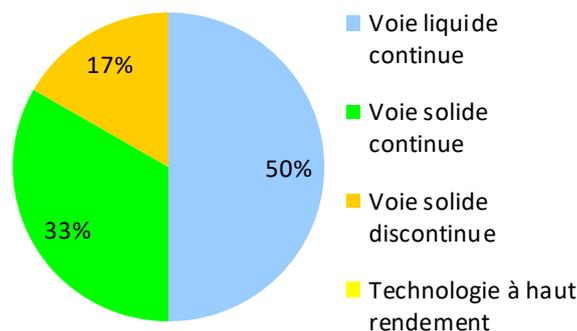


Figure 13. Europe – Technologies de méthanisation proposées par les constructeurs enquêtés

## 4.2 Analyse des réponses sur la méthodologie de suivi

Les réponses collectées lors de l'enquête sur la France et le reste de l'Europe sont analysées dans ce chapitre. Elles ont été fusionnées suite à un retour suffisamment homogène sur les deux territoires. Les regards de l'exploitant, du constructeur et de l'expert sont présentés à propos des différentes questions soumises au sujet du suivi et de la conduite d'une unité de méthanisation.

### **Ce qu'il faut retenir :**

*En France comme dans le reste de l'Europe, les problèmes de performances des installations de méthanisation sont principalement dus à des problèmes d'alimentation de ration, ainsi que des dysfonctionnements biologiques en digestion.*

*La méthodologie de caractérisation de la ration apparaît commune à tous les sites sans différenciation forte. La fréquence est adaptée au nombre d'intrants. Une méthodologie de suivi de site est fréquemment préétablie par le constructeur, l'exploitant et des experts en support des installations. Néanmoins des ressources humaines restreintes peuvent limiter l'application systématique et dans le temps de cette méthodologie, plus particulièrement pour les petits sites de méthanisation*

### **Question 1 : Les exploitants rencontrent des problèmes de performance ou de conduite du site de méthanisation ?**

Dans le cadre de cette étude, seuls les dysfonctionnements biologiques ou de conduite seront détaillés. En effet, les dysfonctionnements associés à un défaut sur les procédés ou les ouvrages ne seront pas retenus. Nous rappelons que les problèmes de procédés doivent être en premier résolus avant d'engager une optimisation biologique.



Les exploitants indiquent comme premier facteur de dysfonctionnements la variation en disponibilité et qualité des gisements. Ce point intervient sur l'ensemble des tailles des sites de méthanisation. Les petites installations nécessitant des gisements externes sont extrêmement sensibles aux variations d'alimentation. Pour les sites de taille supérieure, la difficulté rencontrée est associée au plus grand nombre de gisements externes à considérer et à la variation de la recette associée. A cette dépendance externe sont également associées des problématiques contractuelles liées aux gisements.

Il a été mentionné les difficultés rencontrées à alimenter en substrats les digesteurs avec des intrants par nature peu homogènes (biodéchets ménagers, déchets verts, etc.) et des substrats secs, tels que des fumiers ou des résidus agricoles.

Hors France, les exploitants indiquent parmi les principaux problèmes la sédimentation des substrats dans le digesteur. Cette hétérogénéité de la concentration de solides dans le digesteur peut entraîner des problèmes de couches sédimentées qui doivent être évacuées régulièrement, des problèmes de formation de croûtes, la réduction du volume utile de digestion et le dysfonctionnement d'équipements de brassage et/ou des outils de mesure.

Concernant les intrants, les inertes (cailloux, pierres, ficelles, ...) posent également des problèmes pour les exploitants, car ceux-ci endommagent les équipements mécaniques de l'installation (broyeurs, brasseurs, pompes).

Les problématiques d'H<sub>2</sub>S sont également un problème relevé au cours de l'enquête par les exploitants.

L'accumulation de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et les situations d'alcalose sont des points de vigilance, que ce soit pour des procédés infiniment mélangé ou en voie solide à alimentation discontinue. Les installations en voie liquide les plus concernées sont tout autant des installations collectives, centralisées ainsi que les unités traitant des biodéchets.

Le risque d'acidose a plus particulièrement été relevé par les petites installations de méthanisation, principalement associé à une variabilité des gisements ou à une alimentation en charge organique alimentée trop importante.

Des problématiques de moussage dans les cuves de réception ont été plus ponctuellement citées. Les petits sites sont également plus sensibles à des risques d'acidose associée à une surcharge organique.

En ce qui concerne la voie solide à alimentation discontinue, les principaux dysfonctionnements cités se focalisent sur les réglages de recirculation du percolât : problème de percolation, ajustements des flux, débits d'arrosage...

Finalement et plus particulièrement sur les petits sites, il est mentionné un manque de ressources humaines pour le suivi biologique et d'exploitation des sites.

Le Tableau 3 présente la représentativité des réponses donnés par les enquêtés sur les dysfonctionnements rencontrés sur leur site de méthanisation.

*Tableau 3. Représentativité des facteurs de dysfonctionnements dans le cadre de cette enquête*

Facteurs de dysfonctionnements	Représentativité (%)	
	France	Europe
La variation en disponibilité et en qualité des gisements	40%	16%
L'alimentation difficile pour des gisements non homogènes et/ou des gisements secs tels que les fumiers et résidus agricole	27%	0%
La présence d'inertes engendrant des casses et une érosion prématurée de l'équipement	20%	33%
Des dysfonctionnements biologiques : H <sub>2</sub> S, des cas d'acidose, des cas d'alcalose	35%	50%
Les réglages de recirculation de percolât, en voie solide à alimentation discontinue	25%	0%
Le manque de ressource humaine pour le suivi du processus biologique et l'exploitation des sites.	35%	0%

## **Question 2 : Les exploitants définissent une méthodologie de pilotage du site ?**



L'enquête révèle que l'ensemble des sites disposent d'une méthodologie plus ou moins définie dans le cadre de l'exploitation de leurs sites de méthanisation. Elle est par contre d'autant plus précise et appliquée pour les grandes installations. La méthodologie n'est pas en effet toujours appliquée sur les petits sites par manque d'investissements et de rigueur dans la conduite de l'installation. Il est à préciser que les petites unités de méthanisation sont celles qui rencontrent le plus de difficultés dans le maintien de leur méthodologie. Cette méthodologie est souvent à l'initiative des constructeurs, qui fréquemment accompagnent les exploitants à travers un contrat de conduite biologique et maintenance au démarrage de l'installation. Cette méthodologie peut être complétée par des formations pour les exploitants, l'offre de formation s'étant développée sur le territoire français, comme en Allemagne ou en Suisse, au cours de ces dernières années.



Les constructeurs définissent systématiquement une méthodologie de pilotage du site lors de la mise en service de l'installation. La formation de l'exploitant et son accompagnement dans les bonnes pratiques de conduite de digesteur est de la responsabilité des constructeurs. L'accompagnement en formation est généralement de 6 mois. Les contrats de suivi biologique sont souvent appliqués sur les deux premières années.



Les experts de technologies de méthanisation conseillent une méthodologie de pilotage du site lorsqu'ils sont consultés, souvent inspirés des guides méthodologiques et de retour d'expériences.

L'enquête révèle que pour les installations en voie solide à alimentation discontinue, la méthodologie de suivi reste en cours de développement. Les experts scientifiques, ainsi que les bureaux d'études ne disposent pas d'un retour d'expériences suffisant pour ce procédé. De plus ce système nécessite le développement de référentiel spécifique.

### **Questions 3 : Quels sont les paramètres de suivi de la qualité de la ration alimentée ?**

Le retour d'enquête présente une approche quasi-uniforme pour l'ensemble des sites indépendamment de leurs caractéristiques. Cette approche distingue le suivi de la ration d'alimentation, et des gisements qui la constituent. Le Tableau 4 synthétise ce retour.



Pour les exploitants et constructeurs, l'analyse s'effectue uniformément sur les gisements d'alimentation. Au cours de la prospection ou de l'étude de faisabilité, les gisements du site de méthanisation projeté sont analysés. Il est classiquement appliqué l'analyse de la Matière Sèche, Matière Sèche Volatile, PBM, et visuellement la présence ou non d'inertes.

Plus spécifiquement les installations de moyenne et de grande capacité effectuent généralement les analyses  $N_{total}$ ,  $N-NH_4^+$ , et S dans une stratégie d'équilibre de ration et d'anticipation des principaux dysfonctionnements d'exploitation.

La caractérisation est ensuite renouvelée en cas d'évolution des gisements ou de l'accueil de matières dites « Spot », correspondant à un gisement ponctuellement proposé à l'exploitant.



Les experts complètent en précisant par une caractérisation 2 à 3x fois par an des gisements plus particulièrement en méthanisation centralisée et méthanisation collective agricole. Les gisements « Spot » font l'objet d'une attention toute particulière.

Généralement catégoriques, les experts conseillent de ne pas alimenter le digesteur avec une matière « Spot » sans caractérisation du gisement au préalable. Le contrôle visuel et/ou complété d'une analyse de Matière Sèche au dessiccateur est conseillé afin de pouvoir refuser la livraison si la qualité n'est pas rencontrée.

Tableau 4. Synthèse du retour des interlocuteurs sur les paramètres sur la qualité de la ration alimentée

Question 3 : Quels sont les paramètres de la qualité de la ration alimentée ?			
Paramètre de suivi	Utilisé par les exploitants ? 	Proposé par les constructeurs ? 	Conseillé par les experts ? 
<b>Quantité de substrat journalier</b>	✓ Pesage ; débitmètres pour substrats liquides ; estimations indirectes (suivi nombre de bennes ou heures de fonctionnement de pompes)	✓ Pesage ; débitmètres pour substrats liquides ; estimation indirecte par mesure de niveau de liquide de cuve de stockage	✓
<b>Teneur en matière sèche</b>	✓ Dessiccation ; suivi visuel de la structuration du matériel pour technologies en voie solide		✓ Dessiccation
<b>Teneur en matière sèche volatile</b>		✓ Calcination	✓ Calcination
<b>Teneur en N-total</b>		✓ Pour de nouveaux substrats	✓ Colorimétrie Pour des substrats peu connus
<b>Teneur en N-NH4</b>		✓ Pour de nouveaux substrats	✓ Agrolisier® ou Quantofix®, Colorimétrie
<b>Teneur en oligoéléments</b>		✓ A mesurer si dysfonctionnements de digestion détectés	✓ A mesurer si dysfonctionnements de digestion détectés et suivi régulier
<b>Teneur en N, P, K</b>		✓ Pour de nouveaux substrats, non systématique	
<b>Potentiel biométhanogène</b>	✓ Tests PBM ou méthodes alternatives Avant contrat pour traitement d'un nouveau substrat	✓ Tests PBM ou méthodes alternatives Pour des substrats peu connus et avant mise en service pour établir garanties de performance	✓ Tests PBM ou méthodes alternatives Avant méthanisation de substrats nouveaux
<b>Inertes et d'impuretés</b>	✓ Suivi visuel Pour installations traitant des biodéchets et résidus agricoles de type fumiers, pailles ou tout autres gisements  <i>Principaux inertes : ficelles, composés métalliques, plastiques divers, morceaux de verre pour les soupes de déconditionnement...</i>	✓ Criblage	✓ Tri mécanique

Tableau 4. (suite) Synthèse du retour des interlocuteurs sur les paramètres sur la qualité de la ration alimentée

(suite) Question 3 : Quels sont les paramètres de la qualité de la ration alimentée ?			
Paramètre de suivi	 Utilisé par les exploitants ?	 Proposé par les constructeurs ?	 Conseillé par les experts ?
<b>Autres paramètres</b>	Dans le cadre du traitement des boues de STEP urbaines, l'analyse des ETM et des composés traces organiques (CTO) est pratiqué par les sites traitant des boues à une part de ration importante de plus de 40	Teneur en métaux lourds Teneur en chlorure Teneur en carbone organique total Conductivité	Fraction organique fermentescible pour intrants riches en composants organiques volatils) Conductivité  Proposition d'analyses complémentaires par méthode spectrale de type IR pour la caractérisation biochimique des intrants. Seul un exploitant développeur en propre de la technologie a spécifié utiliser cette technologie.

✓ : Paramètre indiqué par la plupart des interlocuteurs

#### **Question 4 : Quels sont les paramètres de suivi du prétraitement des intrants ?**



Les paramètres de suivi des intrants lors du prétraitement sont spécifiques du/des type/s de prétraitement/s réalisé/s. Comme présenté dans le chapitre précédent, les exploitations enquêtées réalisent le plus couramment des prétraitements de séparation des inertes et de broyage des intrants. De ce fait peu de paramètres de suivi lors du prétraitement des intrants sont indiqués par les interlocuteurs dans cette enquête.

Un suivi des conditions de prétraitement a été spécifié par les sites de méthanisation centralisée appliquant d'un traitement d'hygiénisation et/ou comportant une cuve d'hydrolyse biologique. Les cuves d'hygiénisation et les cuves d'hydrolyse disposent de capteurs en ligne pour la température et le pH. Sur la cuve d'hydrolyse, il est vérifié plusieurs fois par semaine la matière sèche et les AGV. Ces deux analyses sont généralement effectuées sur site à l'aide d'un dessiccateur pour la teneur en MS et par titrimétrie pour l'analyse des AGV. Un site complète ces analyses avec l'analyse de la teneur en MSV avec la même fréquence.

Au contraire des cuves d'hydrolyse, l'enquête fait ressortir que les cuves de prémélange et/ou d'hydrolyse thermique sont rarement équipées de capteurs en ligne.



Les constructeurs proposent le suivi de la teneur en matière sèche, en matière sèche volatile, de la température, du pH et de la teneur en AGV en fonction des prétraitements proposés par leurs services :

- La matière sèche : Les constructeurs évoquent l'intérêt du suivi de ce paramètre en ce qui concerne la viscosité du mélange, important lors des procédés de transfert de chaleur (rendement du transfert).
- La température : le maintien de celle-ci est important lors de processus d'hygiénisation des intrants
- Le pH : pour éviter des mélanges d'intrants peu convenables (formation de mousses, etc.)
- Les acides gras volatils : dont l'accumulation n'est pas acceptable pour le processus de digestion en aval.



Les experts valident le fait que la pertinence du suivi est fonction de chaque type de prétraitement et des conditions et dysfonctionnements rencontrés sur le site ou de leur intérêt de caractérisation et d'optimisation des ouvrages.

Il a été souligné que les ouvrages de prétraitement sont un levier fort d'augmentation des performances des sites trop fréquemment sous-optimisés, non suffisamment instrumentés et sans historisation des données.

#### **Questions 5 : Quels sont les paramètres de suivi du digesteur ?**

Les réponses des différents interlocuteurs ont été résumées dans Tableau 5 afin d'en faciliter la lecture.

Tel que le montre l'enquête, les constructeurs proposent un éventail complet de paramètres de suivi de la digestion ; La fréquence de ce suivi sera liée à l'importance de ce paramètre et liée aux perturbations du processus. Cependant, de façon générale les exploitants mettent en place le suivi d'un nombre assez réduit de paramètres. C'est notamment le cas d'installations de petite taille. Celles-ci optent souvent pour le suivi régulier d'un paramètre spécifique lorsque des dysfonctionnements qui y sont liés ont survenu sur l'installation dans le passé.

Tableau 5. Synthèse du retour des interlocuteurs sur les paramètres de suivi du digesteur

Question 5 : Quels sont les paramètres de suivi du digesteur?				
Paramètre de suivi	 Utilisé par les exploitants ?	 Proposé par les constructeurs?	 Conseillé par les experts?	Observations/ spécificités /dysfonctionnements liés à ce paramètre ?
<b>Quantité de ration alimentée</b>	✓ Pesage ; débitmètres pour substrats liquides ; estimations indirectes (suivi nombre de bennes ou heures de fonctionnement de pompes)			
<b>Recirculation de la phase liquide</b>	✓ Débitmètres ; estimations indirectes (suivi heures de fonctionnement des pompes)	✓ Débitmètres		Exploitants de <b>voie solide continue</b> l'utilisent pour réguler le taux d'humidité des intrants  Constructeurs de <b>voie solide continue</b> le proposent pour réguler la capacité d'inoculation du système
<b>Teneur en matière sèche</b>	✓ Dessiccation ; estimations indirectes (corrélation avec force exercée par l'axe du brasseur)	✓ Dessiccation	✓ Dessiccation	<b>Voie solide continue</b> : prélèvement sur deux points du digesteur
<b>Teneur en matière sèche volatile</b>		✓ Calcination		<b>Voie solide continue</b> : prélèvement sur deux points du digesteur
<b>Conductivité</b>		✓		Afin d'identifier des concentrations en sels inhibitrices pour la digestion
<b>Température</b>	✓ Sonde thermocouple	✓ Sonde thermocouple	✓ Sonde thermocouple, sur deux points pour garantir homogénéité du mélange	Dysfonctionnements observés en exploitation (instabilité du paramètre)  <b>Voie solide discontinue</b> : température du circuit de chauffage, du biogaz et du percolât
<b>pH</b>	✓ pH-mètre Suivi régulier + lors de dysfonctionnements observés	✓	✓ Suivi plus fréquent lors de dysfonctionnements observés	Dysfonctionnements observés en exploitation (instabilité du paramètre ; chute du pH ; entretien régulier nécessaire des capteurs en ligne)  <b>Voie solide</b> : mesure sur plusieurs points
<b>Potentiel redox</b>			Spécifié par quelques experts	
<b>Teneur en acides gras volatils</b>	✓ Titration ; FOS/TAC ; chromatographie de gaz Suivi régulier ou lors de dysfonctionnements observés	✓ Titration	✓ Titration, FOS/TAC ; chromatographie de gaz	Dysfonctionnements observés en exploitation (accumulation du paramètre, acidose)  <b>Voie solide discontinue</b> : mesure sur le percolât

Tableau 5 (suite). Synthèse du retour des interlocuteurs sur les paramètres de suivi du digesteur

(suite) Question 5 : Quels sont les paramètres de suivi du digesteur?				
Paramètre de suivi	 Utilisé par les exploitants?	 Proposé par les constructeurs?	 Conseillé par les experts?	Observations/ spécificités /dysfonctionnements liés à ce paramètre ?
<b>Teneur en N-NH4</b>	✓	✓ En fonction des intrants	✓ Suivi plus fréquent lors de dysfonctionnements observés	<b>Voie solide discontinue:</b> mesure sur le percolât régulière les 3 premiers mois d'exploitation
<b>Oligoéléments</b>		✓ Suivi régulier + lors de dysfonctionnements observés	✓ Pour mono-digestion	
<b>Débit de biogaz</b>	✓ Débitmètres; estimations indirectes (suivi fonctionnement du moteur de cogénération)	✓ Débitmètres	✓ Débitmètres	<b>Voie solide discontinue :</b> mesure sur plusieurs points du ciel gazeux et sur système de collecte du biogaz
<b>Teneur en CH<sub>4</sub> et en CO<sub>2</sub> du biogaz</b>	✓ Analyseurs de gaz en ligne; analyseurs portatifs ; chromatographie de gaz	✓ Analyseurs de gaz en ligne; analyseurs portatifs ; chromatographie de gaz	✓ Analyseurs de gaz en ligne; analyseurs de gaz portatifs	Dysfonctionnements observés en exploitation (chute teneur en méthane) <b>Voie solide discontinue :</b> mesure sur plusieurs points du ciel gazeux et sur système de collecte du biogaz
<b>Teneur en H<sub>2</sub>S du biogaz</b>	✓ Analyseurs de gaz en ligne; analyseurs portatifs ; tubes réactifs	✓ Analyseurs de gaz en ligne; analyseurs de gaz portatifs	✓ Analyseurs de gaz en ligne; analyseurs de gaz portatifs	Dysfonctionnements observés en exploitation (panne équipements de valorisation du biogaz, corrosion)
<b>Autres paramètres</b>	✓ (Teneur en O <sub>2</sub> du ciel gazeux ; alcalinité ; rapport FOS/TAC ; valeur énergétique indicative ; paramètres de fonctionnement de l'installation : consommation électrique, temps de séjour)	✓ (Rapport FOS/TAC ; rapport C/N ; DCO ; COT ; aspect visuel et odeur du digestat ; niveau de remplissage ; temps de séjour ; pression du biogaz ; consommation énergétique)	✓ (Teneur en O <sub>2</sub> et N <sub>2</sub> du ciel gazeux lors d'enrichissement en biométhane ; niveaux de remplissage du digesteur et des cuves de stockage)	

✓ : Paramètre indiqué par la plupart des interlocuteurs

## Autres questions :

### Questions 6 : Comment la ration alimentée est-elle définie ?



Les exploitants définissent la ration alimentée en fonction de différentes logiques :

1) le critère le plus immédiat est de produire du biogaz à un rendement correspondant à la capacité du site, par conséquent sont considérés prioritairement la charge organique volumique et le potentiel énergétique des intrants, évalués à partir des paramètres de suivi ou à partir de données théoriques.

2) A ce premier critère, s'ajoute celui de l'approche de l'équilibre nutritionnel. Elle s'applique à toutes les typologies de méthanisation, puisque cette méthodologie optimise la production de biogaz en sécurisant des activités bactériennes. Le rapport C/N/P et la composition en S sont très rigoureusement regardés par certains exploitants, ainsi que le taux de graisses. Les critères de recettage peuvent légèrement varier d'un site à un autre, à travers des plages d'application légèrement différentes.

3) Un autre critère souvent complémentaire est une alimentation sans à-coups qui se traduit de différentes façons, sécuriser la livraison et la qualité de gisements externes, pour un site centralisé à flux tendus ; anticiper les réceptions afin de lisser la constitution de la ration ; pour un petit site disposer d'une cuve de réception et d'homogénéisation, pour incorporer progressivement des intrants externes par exemple.

En cas d'apports saisonniers, la ration est définie selon la disponibilité du substrat en termes de qualité et de quantité. Un substrat alternatif est ainsi recherché pour remplacer le substrat manquant que ce soit en qualité et en quantité.

4) Pour les installations de méthanisation en voie solide continue un mélange bien structuré et relativement riche est recherché.

### Question 7 : Un laboratoire sur site est disponible ?



Les installations qui traitent des boues d'épuration ou des ordures ménagères disposent généralement de laboratoires bien équipés : matière sèche, matière sèche volatile, DCO, pH, et occasionnellement d'équipements leur permettant d'effectuer des tests de potentiel biométhanogène.

Les installations de méthanisation centralisée et de codigestion agricole disposent facilement d'équipements pour l'analyse MS par dessiccateur, du pH, de la température, et du rapport AGV/TAC, soit par un équipement commercial soit par titrimétrie, et plus occasionnellement un système de mesure de l'Ammonium.

Les AGV détaillés, effectués pour un suivi mensuel ou en cas de dysfonctionnement biologique, sont externalisés vers des laboratoires

Les sites en voie solide à alimentation discontinue sont plus rarement équipés, à l'exception de détecteurs de gaz pour chacun des garages. En effet, des freins à la présence d'outils analytiques existent : 1) le procédé lui-même limite l'intervention possible en garage, à l'exception du percolât, 2) la constitution de base de données propre au procédé de l'installation, par exemple des teneurs  $\text{NH}_4^+$  et AGV mesurées sur le percolât, sont à développer, 3) la représentativité de l'analyse du percolât par rapport au contenu solide du garage.

Pour les petits sites de méthanisation, compte tenu de la faible récurrence d'analyses, le suivi analytique est souvent externalisé les contrôles pouvant s'appliquer mensuellement ou tous les deux mois. Dans le cas de sites inférieurs à une puissance électrique de 250 kW<sub>e</sub> et dont la ration alimentée n'évolue pas, une analyse trimestrielle est tout à fait envisageable selon l'un des experts consultés. Par contre s'affranchir d'un suivi analytique est une prise de risque économique, pouvant aboutir à l'arrêt de l'installation.

De nombreux constructeurs proposent aux exploitants un contrat de suivi biologique et de maintenance. Or en fin de contrat, l'exploitant ne mobilise parfois pas le budget pour un suivi biologique en interne ou en externe. Les sites sont alors exposés à des risques de dysfonctionnements pouvant pénaliser l'équilibre financier du site de méthanisation.

#### **Question 8 : Le pilotage de l'exploitation est adapté aux résultats de suivi de paramètres ?**



De façon générale tous les exploitants consultés affirment que les résultats de suivi des paramètres sont utilisés pour adapter le pilotage de l'installation. Les résultats ne sont pas simplement stockés pour l'historique du fonctionnement de l'installation mais ils sont aussi utilisés pour agir sur l'installation et ainsi corriger et/ou améliorer son fonctionnement.

#### **Question 9 : Des actions ont été définies lorsque les paramètres de suivi sont hors de la plage de bon fonctionnement ?**



Lorsque les paramètres de suivi sont hors de la plage de bon fonctionnement les exploitants agissent notamment en ce qui concerne l'alimentation (quantité et qualité alimentée). Les perturbations de teneur en sulfure d'hydrogène du biogaz entraînent des actions sur l'injection de l'air dans le ciel gazeux du digesteur ou l'ajout des composants précipitants du soufre. L'analyse détaillée de la teneur en acides gras volatils est aussi réalisée par certains exploitants lorsque des dysfonctionnements sont détectés.

#### **Question 10 : Des commandes de conduite du digesteur ont été automatisées ?**



La commande automatisée de conduite du digesteur (qui entraîne des actions sur le système afin de maintenir des valeurs de consigne des paramètres du processus) n'est pas systématiquement réalisée. Les exploitants qui affirment avoir ces outils appartiennent à toutes les catégories d'installations : de grandes à petites, d'installation à la ferme à installations centralisées et traitant des biodéchets de collecte séparée.

#### **Question 11 : Comment la performance du digesteur est contrôlée ?**



Plusieurs stratégies sont adoptées par les exploitants pour contrôler la performance du digesteur. Certains exploitants réalisent un bilan entre les produits intrants et la production de biogaz. D'autres exploitants basent le contrôle de la performance seulement sur la production de biogaz, évaluée indirectement grâce aux équipements de valorisation de celui-ci (contrôle de la production d'électricité ou du biométhane injecté). La comparaison avec des données théoriques et historiques

permet d'évaluer la performance du digesteur pour une installation à la ferme. Le suivi visuel de la production de gaz (gonflement de membranes souples, formation de bulles) a été évoqué comme première indication pour le contrôle de la performance du digesteur.

En milieu agricole et plus particulièrement en phase de démarrage de site, le fonctionnement de la torchère est souvent un indicateur qui rassure l'exploitant. Par la suite l'objectif, est bien d'améliorer l'alimentation du digesteur afin que l'installation ne soit pas en sur-production de biogaz.

#### 4.3 Analyse des réponses sur l'innovation de suivi

##### **Ce qu'il faut retenir :**

Il apparaît que les exploitants disposent d'un panel d'outils de suivi répondant au suivi biologique. Les attentes d'innovation se posent donc sur une accessibilité plus immédiate de la mesure et l'historisation et la valorisation de la donnée. Un suivi ou plutôt une valorisation immédiate des mesures pourrait augmenter la production de gaz aussi dans les petites installations.

##### **Question 12 : Quelles analyses complémentaires sur les intrants pourraient être pertinentes ?**



10% des exploitants enquêtés dans le cadre de cette enquête, identifient des paramètres complémentaires afin de caractériser la qualité des intrants.

Il a été proposé les analyses suivantes :

- le développement d'équipements d'exploitation, de type « pistolet » ou « sonde », permettant une caractérisation rapide de la qualité des gisements à réception d'exploitation, les paramètres mentionnés sont la matière sèche, la conductivité, mais également des analyses sur le potentiel biométhanogène des gisements.

Une contrainte précisée est que l'analyse devrait pouvoir s'effectuer sur site sur la matière brute et idéalement dans les fosses ou les bennes de transport.

- La quantification rapide de la teneur soufre dans les intrants, afin d'anticiper des dysfonctionnements associés à la production de H<sub>2</sub>S

- Il a également été indiqué qu'il serait pertinent de pouvoir relier la qualité des intrants à la qualité du biogaz et du digestat. Pour ce faire un enquêté proposait une méthodologie visant une caractérisation très fine des intrants, sur des paramètres relatifs à la qualité biogaz et du digestat. Cette méthodologie viserait à caractériser très finement les intrants pour ensuite sélectionner les molécules indicatrices de qualité.

Il apparaît important de préciser que ces propositions ne représentent que 10% des exploitants et que ces enquêtés ont des profils à la fois analytiques en support à l'exploitation d'installations de grande taille.



Certains exploitants et experts mentionnent l'analyse des inertes (p.ex. les plastiques) dans les intrants comme étant pertinente. Des méthodes spectrales à l'instar des applications du tri des emballages pourraient être envisagées.

##### **Question 13 : Quels nouveaux paramètres à suivre sont identifiés pour la conduite du digesteur ?**



A nouveau un pourcentage faible d'enquêtés se sont prononcés sur l'identification de nouveaux paramètres de suivis. Les paramètres cités sont les suivants :

- l'analyse en ligne de  $\text{NH}_4^+$ , sonde  $\text{NH}_4^+$  et  $\text{N}_{\text{Org}}$

- l'analyse en ligne AGV/TAC et AGV en ligne

- Des capteurs pour l'identification des flux de matière et des dépôts de matières dans les ouvrages. Ces capteurs pourraient également intégrer la température, le pH à l'intérieur de procédés. Des capteurs immergés et connectés pourraient également être utilisés afin de vérifier la température à différents niveaux dans des garages en voie solide discontinue afin de mieux étudier les variations de température et de pH.
- L'utilisation de drones au secteur du biogaz a été mentionnée au cours de l'enquête, des drones d'audit  $\text{CH}_4$  par exemple, mais également de mesure de la qualité du ciel gazeux du digesteur, pouvant aussi balayer la surface du digestat en voie solide discontinue afin d'en analyser la qualité de percolation et l'homogénéité de dégradation.



Les constructeurs ne proposent aucun nouveau paramètre de suivi. Ils évoquent des barrières techniques ne permettant pas d'utiliser des nouveaux outils ou méthodes de suivi, tels que la fragilité des capteurs.



Les experts proposent le suivi de la pression partielle d'hydrogène dans le digesteur et le suivi de l'efficacité du processus biologique. Ce dernier est décrit comme une comparaison entre le rendement en biogaz réel et le rendement prévu.

#### **Question 14 : Des analyses de support à la conduite ont été développées ou sont en développement ?**



Les exploitants s'étant prononcés sur cette question indiquent qu'ils n'ont pas développé et ne développent pas d'analyses de support à la conduite. Certains d'entre eux affirment que les méthodes de suivi sont bien implantées, mais que les barrières techniques, le manque de références et/ou les obstacles liés au coût de l'analyse ne leur permettent pas d'en profiter. Un exploitant d'une unité de traitement de biodéchets indique l'importance de ne pas attendre au signal d'alarme d'un paramètre de suivi de l'installation, la compréhension du processus biologique étant beaucoup plus importante pour éviter aux mieux d'atteindre les limites de dysfonctionnement.



Un constructeur propose des rapports de suivi de la conduite du digesteur, qui permettent aux exploitants d'avoir des indicateurs de performance et de rendement de l'installation au fur et à mesure qu'ils introduisent les données de suivi. Par ailleurs les barrières techniques sont évoquées en tant que freins pour l'utilisation de nouvelles techniques développées.



Les experts mentionnent le développement de modèles (mathématiques) pour l'observation en continu de l'efficacité du processus biologique. Cependant le manque de références n'en permet pas encore l'utilisation. Autrement les experts évoquent que les paramètres de suivi d'une installation de méthanisation sont bien connus et sont praticables. Ils mentionnent comme problème principal le fait que les exploitants ne les utilisent pas ou les utilisent seulement quand il y a des dysfonctionnements du processus de méthanisation.

**Question 15 : Un programme de supervision pourrait être adapté au fonctionnement des exploitations ?**



Certains exploitants indiquent qu'effectivement l'implantation d'un programme de supervision pourrait être adapté, cependant ils évoquent les coûts d'une telle solution comme principal frein. La majorité des exploitants préfèrent faire confiance à l'expérience humaine pour la conduite de leur propre installation.

Au-delà d'un outil de supervision, cette question et la précédente mettent en exergue l'utilisation des données ou plutôt l'historisation de la donnée et sa valorisation. L'ensemble des exploitants s'accordent sur l'importance du suivi dans le temps sur les paramètres actuellement mesurés sur leur site. Il convient de constater que même si une procédure est bien définie en cas de mesures hors gamme, l'historisation de la donnée en vue de la valoriser n'est à ce jour que très peu appliquée sur les sites.

Aujourd'hui le secteur Biogaz dispose de différentes solutions afin de centraliser les informations, via l'enregistrement des intrants, la connexion des capteurs des ouvrages de l'installation et l'enregistrement des analyses effectuées en externes. La plupart de ces solutions permettent l'émission des rapports administratifs associés à l'exploitation du digesteur.

La valorisation de la donnée apparaît d'autant plus pertinente dans le cadre des procédés voie solide discontinue. Les procédés de voie solide à alimentation discontinue nécessitent une meilleure compréhension des phénomènes physicochimiques et biologiques agissant sur la matière lors de la digestion. L'étude des paramètres d'exploitation est indispensable pour optimiser la production de biogaz. La valorisation de la donnée apparaît d'autant plus pertinente dans le cadre de ce procédé. L'objectif est ainsi d'optimiser et fiabiliser le procédé en vue de faciliter sa duplication.

#### **4.4 Aperçu global de l'enquête**

Les points suivants peuvent être soulignés au sujet des résultats de l'enquête :

- Les exploitants indiquent quels paramètres sont suivis sur leurs exploitations et avec quelle fréquence, mais les outils et les méthodologies de mesure sont moins bien connus.
- Les principaux paramètres de suivi utilisés sur les exploitations comprennent : la quantité d'intrants réceptionnés et alimentés, la température du digesteur, le pH, le rapport FOS/TAC, l'azote ammoniacale, le débit de biogaz et sa teneur en méthane, dioxyde de carbone et sulfure d'hydrogène. Concernant d'autres paramètres de fonctionnement les niveaux de remplissage, le temps de séjour et la consommation énergétique sont généralement suivis.
- Les méthodologies de mesure sont simples pour tous les types d'installations (de petite à grande taille, agricoles ou industrielles). Souvent des méthodologies de suivi consistent en des estimations ou des mesures indirectes des paramètres de suivi (quantification par volume de bennes, temps de marche des pompes ou force exercée par éléments mobiles, par exemple).
- Les paramètres et méthodologies de suivi du processus biologique diffèrent en fonction des technologies de digestion en place (points de prélèvement, utilisation de la donnée pour agir sur l'installation)
- Les paramètres et méthodologies de suivi du processus biologique diffèrent également en fonction des intrants en digestion. La pertinence de l'analyse de certains paramètres n'est effectivement pas identique pour tous les intrants.
- Le suivi en ligne de paramètres est très peu répandu, et il est seulement utilisé pour des paramètres tels que la température, le débit de fluides (intrants liquides, biogaz) et la

composition du biogaz. D'autres paramètres sont suivis en ligne grâce à l'automatisation d'équipements individuels (p.ex. CCF, circuit de chauffage, etc.).

- Les coûts d'installation et d'entretien, le temps de travail, et/ou le manque de connaissances de l'importance de la donnée expliquent l'écart entre les paramètres de suivi utilisables et utilisés dans les exploitations.

En ce qui concerne les dysfonctionnements des installations de méthanisation, l'enquête révèle que :

- Moins d'effort est consacré à anticiper les dysfonctionnements qu'à les corriger une fois détectés. Ainsi le suivi de certains paramètres est plutôt réalisé après la détection du dysfonctionnement du processus de digestion (par ex. réduction de la performance observée).
- Les accidents/dysfonctionnements concernant la qualité des intrants entraînent l'alimentation d'une ration trop chargée en matière organique, l'alimentation d'une ration avec une teneur en Matière Sèche pas adaptée à la technologie de digestion disponible, ou la surévaluation du potentiel de production de méthane.
- Les dysfonctionnements concernant l'homogénéité du mélange entraînent l'instabilité de la température du milieu de digestion, la formation de couches flottantes, de croutes et la constitution de volumes morts dans le digesteur.
- L'accumulation des acides gras volatils et l'éventuelle diminution du pH est également un événement qui perturbe le fonctionnement du processus de méthanisation. Cette accumulation a notamment son origine en une surcharge en l'alimentation de matière organique. L'accumulation d'ammoniac n'est pas mentionnée, ce qui montre qu'une alimentation adéquate au niveau de la teneur en azote est introduite et/ou qu'une acclimatation de l'activité biologique à ces conditions existe.
- La formation de sulfure d'hydrogène entraîne des dysfonctionnements des outils de suivi de la ligne de biogaz (débitmètre, détecteurs de composition catalysés).

## 5 Perspectives de recherche et d'innovation

L'analyse des résultats de la campagne d'enquête, en combinaison avec l'état de l'art du suivi des unités de digestion, permettent de proposer des perspectives de recherche et d'innovation dans ce domaine.

En amont, il apparaît important de rappeler la méthodologie associée à cette étude qui s'appuie sur une campagne d'enquêtes. Cette enquête s'inscrit dans une approche ascendante, dite aussi bottom-up; par conséquent les conclusions et perspectives sont limitées aux connaissances et à l'expérience des enquêtés. Cette approche ascendante renseigne de manière opérationnelle l'attente des acteurs de la filière et de la maturité de la filière ; elle peut par contre apparaître non exhaustive en termes d'évolutions d'outils analytiques ou d'évolution de l'exploitation de site de méthanisation.

L'enquête révèle un intérêt restreint des différents acteurs de la filière biogaz pour le développement de nouveaux outils de suivi du processus biologique. Pour les acteurs ayant répondu favorablement à de nouveaux développements, les perspectives de recherche et d'innovation possibles révélés pertinents concernent les aspects suivants :

- ◆ Le développement de méthodes d'analyses pour la caractérisation rapide de la qualité des intrants. La caractérisation rapide de substrat permet ainsi l'optimisation de la gestion des intrants, de la stratégie d'alimentation du digesteur, et finalement de la production de biogaz. A la rapidité d'analyse, s'ajoute l'intérêt croissant de disposer d'outils de caractérisation sur site et sans prélèvement ; idéalement l'exploitant disposerait ainsi d'une analyse immédiate de suivi de la qualité des intrants, par l'utilisation d'une sonde ou d'un capteur non destructif. Le tableau 6 présente les méthodes innovantes de caractérisation rapide des intrants, en définissant leur degré d'application sur site.

Tableau 6. Méthodes d'analyses pour la caractérisation rapide d'intrants

Paramètre(s)	Système de détection	Conditions d'analyse	Maturité Techno.	Réf.	Observations
Matière Sèche	Dessiccateur	Sur site Prélèvement d'échantillon	☑☑☑☑☑		Détermination de la Matière Sèche sur site la plus répandue
Matière Sèche	Capteur transmetteur Sonde	Sur site Sans prélèvement d'échantillon	☐☐☐☐☐		A notre connaissance, aucune publication illustrant ce point dans le secteur Biogaz
Matière Sèche	NIRS	Sur site Sans prélèvement d'échantillon	☑☑☐☐☐	[14,40-43]	
Sucres, Protéines, Lipides, Azote, DCO	NIRS	En laboratoire Prélèvement, Lyophilisation	☑☑☑☑☐	[43,77]	[43] : NIRS Validation laboratoire sur 341 échantillons de type biodéchets – Lyophilisation préalable.
PBM Echantillons lyophilisés	NIRS	En laboratoire Prélèvement, Lyophilisation	☑☑☑☑☐	[66,78,79]	[79] Incertitudes en cas de mélange complexe, développement de base de données
PBM Echantillons bruts	NIRS	Prélèvement Analyse de la matière brute	☑☑☐☐☐	[80,81]	[80] : NIRS non validé sur échantillon brut d'ensilage
Biodégradabilité PBM	Fluorescence - Bioanalyse	En laboratoire Prélèvement, Analyse de la matière brute	☑☑☑☑☐	[69]	
Tests de toxicité	Fluorescence	En laboratoire Prélèvement, Analyse de la matière brute	☑☑☑☑☐	[82]	Publication en cours SIAAP, dans le cadre du programme MOCOPEE
Contrôle des inertes	Méthodes spectrales (Rayon X, Spectre MIR, TeraHertz...)		☐☐☐☐☐	[83]	A ce jour, pas d'application en secteur Biogaz. Verrous principaux : Teneur en eau et hétérogénéité des matières

Les technologies de caractérisation NIRS et par fluorescence présentent un développement méthodologique avancé. La réserve quant à une maturité totale est associée à la diversité des gisements pour laquelle ces méthodes doivent être appliquées et à la précision de ces méthodes en fonction de la nature des gisements. Néanmoins ces méthodes sont à ce jour validées dans le cadre d'une analyse externalisée en laboratoire. Comme illustrée par Mayer et al, 2013, la méthodologie NIRS présente cependant des verrous pour l'analyse des échantillons bruts. Ces obstacles d'analyse du brut sont principalement associés : à l'interférence de l'eau, l'hétérogénéité et/ou la variabilité du type et de la qualité des matières, la complexité associée au mélange d'intrants, la puissance du signal nécessaire. Finalement le contrôle d'inertes est ce jour pratiqué par contrôle visuel ou en laboratoire par criblage sur tamis. Si des méthodes spectrales ont été développées ou sont en développement dans le domaine du tri des déchets recyclables, leur application aux déchets organiques est principalement freinée par l'interférence associée aux teneurs en eau.

- ◆ Le développement de techniques d'analyse en ligne du paramètre FOS/TAC. L'utilisation de ce paramètre de suivi est bien perçue par les exploitants, ce qui rendrait ce nouvel outil de mesure potentiellement utilisable. De plus, son suivi est plus pertinent que le suivi en ligne du pH. Les travaux d'Andree et al [40], Spanjers et al [41]; Stockl et al [42], VTT [48], Ponzoni et al [50], Kretzschmar et al [51] sont à considérer en tant que base.

Tableau 7. Tableau récapitulatif d'analyseurs en ligne développés pour le secteur Biogaz.

Paramètre(s)	Système de détection	Références
MS, MV, COD, AGVs totaux, Acide acétique, Acide propionique, pH, Alcalinité	NIRS	[13, 38, 39, 40, 46, 47]
Alcools, AGV, Méthanol, 1-butanol, Acide acétique, acide propionique, acide butyrique, iso-caproïque, AGV totaux	Analyseur par titration	[84]
AGV, HCO <sub>3</sub> , TAC	Analyseur par titration Nom commercial : Anasense Commercialisé par Applitek®	[85]
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> Multi-paramètres	Analyseur par titration Nom commercial : EnviroLyzer Commercialisé par Applitek®	[85]
Azote ammoniacal, AGV, Bicarbonate, alcalinité, pH, Température	Analyseur par titration combinée à l'analyse de conductivité et pH Nom commercial : SNAC Commercialisé par BioEntech	[86]
AGV, HCO <sub>3</sub> Détail AGV : acétate, propionate et butyrate	Analyseur par électrophorèse capillaire Commercialisé par Capilix	[87]
Acétate, AGV	Capteur électrochimique microbien	[51,88–90]

Bien que commercialement disponibles, les analyseurs en ligne sont peu répandus en exploitation de méthanisation. Trois grandes catégories sont précédemment présentées : 1) les analyseurs NIRS, 2) les analyseurs par titration, plus largement répandus plus particulièrement sur site de méthanisation sur station d'épuration, 3) des analyseurs par chromatographie en phase gazeuse ou électrophorèse. Finalement la faisabilité de biocapteurs électrochimiques au suivi en ligne sous conditions d'exploitation n'a pas été validée.

Les caractéristiques principales de ces analyseurs sont d'être en ligne, multiparamètres, sous une analyse rapide. Les points de développement prioritaires à leur utilisation sur site de méthanisation sont :

1. Les conditions de prélèvement de boues, si un prélèvement est nécessaire, et les spécificités du système de prélèvement pour limiter l'obstruction des voies et l'effet de pompage sur la qualité de l'analyse. Ces points sont d'autant plus importants que le digesteur fonctionne à une teneur en matière sèche élevée et que les substrats sont hétérogènes et de taille grossière ;
  2. Le coût de l'analyseur, en intégrant les réactifs/consommables nécessaires à son fonctionnement
  3. le temps associé à la calibration, dans le cadre du NIRS, la constitution d'une base de données souvent développée en laboratoire, puis améliorée en interne de l'exploitation.
  4. le temps associé à la recalibration indispensable régulièrement et dans le cas d'évolution de l'alimentation par exemple
  5. l'exactitude de l'analyse pour chacun des paramètres
  6. la maintenance des analyseurs et leur robustesse, la conservation des réactifs sous conditions d'exploitations de méthanisation
- ◆ Les stratégies de suivi et mesure qui permettent, au travers d'une boucle de contrôle, d'assurer l'homogénéité du mélange pour les technologies infiniment mélangées et d'éviter ainsi la formation de couches et de croûtes, la perte de volume utile dans le digesteur. Les travaux de Gaida et al [34] sont à considérer en tant que base.
  - ◆ Le suivi de la teneur en composés soufrés des intrants pour prévoir la production de H<sub>2</sub>S et réduire les problèmes de corrosion des brasseurs ou autres équipements en aval et éviter les périodes d'arrêt du digesteur et de l'installation. Cette analyse est aujourd'hui approchée via la teneur en Soufre total des intrants [91].
  - ◆ L'implantation de modèles mathématiques qui en fonction des intrants permettent d'anticiper aux dysfonctionnements du processus de digestion, solution bien adaptée lorsque la qualité des intrants est bien définie. Les travaux de Gaida et al [34] sont à considérer en tant que base.
  - ◆ La pertinence des outils et/ou méthodologies de mesure aux différentes technologies de digestion.
  - ◆ L'adaptation des outils de mesure en ligne aux différentes technologies de digestion, étant donné que les outils utilisés couramment pour des systèmes en voie liquide ne sont pas forcément adaptés aux technologies en voie solide.
  - ◆ Méthodes de détection de la qualité des intrants en ce qui concerne les impuretés et les inertes, afin de d'éviter l'endommagement des équipements mécaniques et de réduire les particules indésirables tels que les plastiques dans le digestat.

## 6 Conclusions

La présente étude visait à identifier les perspectives de recherche et d'innovation dans le domaine du suivi et du pilotage du processus de méthanisation. Ces éléments ont été analysés sur la base de (i) l'état de l'art dans ce domaine, qui décrit les paramètres et outils utilisables et en développement et (ii) sur la base d'une campagne d'enquête auprès des acteurs de la filière biogaz sur le territoire européen et spécifiquement en France. L'enquête présente les outils et méthodologies de suivi effectivement utilisés ainsi que les dysfonctionnements du processus de digestion survenus et observés sur les exploitations enquêtées. Cette étude se base sur une approche ascendante de l'analyse de l'exploitation et dans la définition de perspective ; l'approche bottom-up souligne la maturité opérationnelle de la filière et l'identification de ses besoins courts et moyens termes en outils d'analyse du suivi de processus biologique. Cette approche peut être non exhaustive en termes de proposition de perspectives de recherche, du fait qu'elle est basée sur l'expérience opérationnelle.

L'état de l'art présente un large éventail de paramètres de suivi du processus de méthanisation validés/commercialisés et en développement. Pour la plupart de ceux-ci, les méthodes d'analyse ou de suivi sont bien connues et mises en application et les efforts de développement visent à les simplifier (réduction du temps de l'analyse, diminution du coût, ...) ou à permettre leur suivi en ligne. Ainsi les sujets de recherche en cours d'évolution concernent notamment le développement d'outils de suivi en ligne, tels que les méthodes multi-paramètres (p.ex. infrarouges) ou les biocapteurs; la détermination du potentiel biométhanogène; l'analyse des AGV et la modélisation mathématique ainsi que le contrôle du processus.

La campagne d'enquête auprès des acteurs de la filière (des exploitants, des constructeurs, des experts et des assureurs) a mis en évidence un écart entre les paramètres de suivi effectivement utilisés sur les installations de méthanisation et ceux qui sont disponibles et proposés par les constructeurs. En France, comme dans le reste de l'Europe, les défauts de performances des installations de méthanisation sont principalement dus à des problèmes d'alimentation de la ration à digérer, ainsi que des dysfonctionnements biologiques en digestion. Ainsi le suivi de la qualité de la ration alimentée apparaît comme un point commun à tous les sites sans différenciation forte entre les catégories, les technologies et les capacités des installations. Une méthodologie de suivi de site est fréquemment préconisée par le constructeur, l'exploitant et des experts intervenant en support sur les installations. Néanmoins les coûts d'exploitation importants et des ressources humaines restreintes peuvent limiter l'application systématique et régulière de cette méthodologie, plus particulièrement pour les petits sites de méthanisation.

La campagne d'enquête a aussi mis en évidence le fait que les exploitants d'installations de méthanisation associent la réalisation d'un suivi adéquat pour l'installation avec la prévention de dysfonctionnements et l'amélioration de la performance de l'installation. Cependant l'historisation de la donnée de suivi en vue de la valoriser n'est à ce jour que très peu appliquée sur les sites. La valorisation de la donnée de suivi apparaît d'autant plus pertinente dans le cadre des procédés en voie solide à alimentation discontinue. En effet, ces derniers procédés nécessitent une meilleure compréhension des phénomènes physicochimiques et biologiques agissant sur la matière lors de la digestion.

Il apparaît que les exploitants disposent d'un panel de méthodes et d'équipements répondant au suivi biologique. Les attentes des acteurs en matière d'innovation se concentrent donc sur une accessibilité plus immédiate de la mesure, de l'historisation et de la valorisation de la donnée de suivi. Un suivi ou plutôt une valorisation immédiate des mesures pourrait également contribuer à augmenter la production de gaz dans les petites installations. Cependant, en lien avec les dysfonctionnements identifiés sur les exploitations enquêtées, et afin d'améliorer la performance du processus de digestion, plusieurs aspects pourraient faire objet d'un projet de recherche et de développement : les systèmes de contrôle de l'homogénéité du mélange ; l'analyse en ligne du rapport FOS/TAC ; le suivi

de la teneur en composés soufrés ; l'adaptation des outils et des méthodes de mesure applicables à l'ensemble des technologies de méthanisation ; la détection des inertes altérant notamment la qualité des digestats.

Il faut également signaler l'intérêt pour le développement de programmes de formation professionnelle. En effet une formation initiale donnée par le constructeur de l'installation, et/ou la participation des exploitants à des programmes de perfectionnement est la clé pour une bonne conduite de l'unité de méthanisation, pour optimiser la performance de l'installation et pour anticiper d'éventuels dysfonctionnements et risques liés à l'exploitation.

## Références

- [1] Directive décharge - 1999/31/CE. 1999.
- [2] Directive déchets 2008/98/EC. 2008.
- [3] Directive énergie renouvelable - 2009/28/CE n.d.
- [4] Steyer JP. Quels indicateurs pour piloter mon unité de méthanisation? Moyens actuels et perspectives. JRI biogaz méthanisation, 2018.
- [5] Meyer K, Gronauer A, Effenberger M, Heuwinkel H, Lebuhn M. Schlüsselparameter zur Kontrolle des Gärprozesses Laboranalytik. 2010.
- [6] Götz J, Auer M, Lebuhn M, Pesta G. Motivation , Voraussetzungen und Methoden für die Prozessüberwachung. In: Biogas Forum Bayern Nr. III - . n.d.
- [7] Effenberger M, Aschmann V, Herb C, Helm M, Müller JS. Empfehlungen für die messtechnische Ausstattung landwirtschaftlicher Biogasanlagen. 2012.
- [8] Bastide G. Guide méthodologique pour Le suivi et l'établissement des bilans de performance d'une installation de méthanisation 2014:79.
- [9] ADEME Bourgogne. La biologie des digesteurs à destination des exploitants d'unités de méthanisation 2014.
- [10] AILE. Guide de suivi de la biologie sur une unite de methanisation agricole 2011.
- [11] Liebetrau J, Pfeiffer D, Thrän D. Messmethodensammlung Biogas. Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich. 2013.
- [12] ADEME. La méthanisation à la ferme: Guide pratique 2011.
- [13] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 4630: Fermentation of organic materials. Characterisation of the substrate sampling, collection of material data, fermentation tests 2016.
- [14] Drosig B. Process monitoring in biogas plants. 2013. doi:retrieved on 15th~March 2017.
- [15] ADBA. Best Practice checklist Operational Performance. [Http://adbioresources.org/our-Work/best-Practice-Scheme/best-Practice-Checklists](http://adbioresources.org/our-Work/best-Practice-Scheme/best-Practice-Checklists) 2016.
- [16] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung. 2007.
- [17] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Biogas-Messprogramm II: 61 Biogasanlagen im Vergleich. 2009.
- [18] Biomasse Suisse. Manuel Qualité Biogaz : Gestion de la qualité des installations de biogaz 2016.
- [19] Beil M. Monitoring des Biomethanproduktionprozesses "MONA." 2015.
- [20] Frandsen TQ, Rodhe L, Baky A, Edström M, Sipilä, I. K, Petersen SL, et al. Best Available Technologies for Pig Manure Biogas Plants in the Baltic Sea Region. 2011.
- [21] Schürer A, Jarvis A. Microbiological Handbook for Biogas Plants. 2010.
- [22] Deremince B, Königsberger S. Statistical Report of the European Biogas Association 2017. Brussels, Belgium: n.d.
- [23] EurObserv'ER. The state of renewable energies in Europe. 2016.
- [24] EurObserv'ER. Biogas barometer. 2014.
- [25] <http://atee.fr/biogaz/observatoire-du-biogaz-en-france> 2017.
- [26] Association EB. Statistical Report of the European Biogas Association. 2016.
- [27] <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publicationweb/20> n.d.
- [28] ATEE- Le Club Biogaz. Livre blanc du biogaz. 2014.
- [29] ADEME, AILE, EREP, Triple E&M. Benchmark des stratégies européennes des filières de production et de valorisation de biogaz et perspectives pour la filière

- française de méthanisation. 2015.
- [30] <http://task37.ieabioenergy.com/country-reports.html> 2017.
- [31] De Baere L, Mattheeuws B. Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste in Europe - Status, Experience and Prospects, 2014, p. 517–26.
- [32] Pauss A, André L, Ribeiro T. Méthanisation en voie solide - Etat des lieux. JRI biogaz méthanisation, 2017.
- [33] Siddique MNI, Ab. Wahid Z. Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: A review. *J Clean Prod* 2018;194.
- [34] Gaida D, Wolf C, Bongards M. Feed control of anaerobic digestion processes for renewable energy production: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;68:869–75. doi:10.1016/j.rser.2016.06.096.
- [35] André L, Pauss A, Ribeiro T. Solid anaerobic digestion: State-of-art, scientific and technological hurdles. *Bioresour Technol* 2018;247:1027–37.
- [36] Li L, Peng X, Wang X, Wu D. Anaerobic digestion of food waste: A review focusing on process stability. *Bioresour Technol* 2018;248:20–8. doi:10.1016/j.biortech.2017.07.012.
- [37] Wang P, Wang H, Qiu Y, Ren L, Jiang B. Microbial characteristics in anaerobic digestion process of food waste for methane production-A review. *Bioresour Technol* 2017. doi:10.1016/j.biortech.2017.06.152.
- [38] Bockisch A, Kielhorn E, Neubauer P, Junne S. Process analytical technologies to monitor the liquid phase of anaerobic cultures. *Process Biochem* 2018. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.10.005>.
- [39] Krautkremer B, Zosel J. Sensoren & Messtechniken im FuE- und Herstellungsprozess und für eine effiziente Energiespeichertechnologie (Monitoring) in der Praxis. AMA - FVE - Work. 2013, 2013, p. 56–61.
- [40] Andree H, Jacobi F, Hartung E. Online-NIRS-Messung an Biogasanlagen. *Gülzower Fachgespräche, Band 27, Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung*, 2008, p. 84–99.
- [41] Spanjers H, Bouvier JC, Steenweg P, Bisschops I, van Gils W, Versprille B. Implementation of in-line infrared monitor in full-scale anaerobic digestion process. *Water Sci Technol* 2006;53:55–61.
- [42] Stockl A, Lichti F. Near-infrared spectroscopy (NIRS) for a real time monitoring of the biogas process. *Bioresour Technol* 2017. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.173>.
- [43] Charnier C, Latrille E, Jimenez J, Lemoine M, Boulet JC, Miroux J, et al. Fast characterization of solid organic waste content with near infrared spectroscopy in anaerobic digestion. *Waste Manag* 2017;59:140–8. doi:10.1016/j.wasman.2016.10.029.
- [44] Kleyböcker A, Liebrich M, Verstraete W, Kraume M, Würdemann H. Early warning indicators for process failure due to organic overloading by rapeseed oil in one-stage continuously stirred tank reactor, sewage sludge and waste digesters. *Bioresour Technol* 2012;123:534–41. doi:10.1016/j.biortech.2012.07.089.
- [45] Drog B. Process monitoring in biogas plants. 2013.
- [46] Weiland P, Heinrich J. Wichtige Messdaten für den Prozessablauf und Stand der Technik in der Praxis. *Gülzower Fachgespräche, Band 27, Messen, Steuern, Regeln bei der Biogaserzeugung*, 2008, p. 17–31.
- [47] Li D, Chen L, Liu X, Mei Z, Ren H, Cao Q, et al. Instability mechanisms and early warning indicators for mesophilic anaerobic digestion of vegetable waste. *Bioresour Technol* 2017. doi:10.1016/j.biortech.2017.07.098.
- [48] VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. OPTI-VFA: Novel monitoring and process control system for efficient production of VFA and biogas in anaerobic digestion plant. 2015.

- [49] Stockl A, Oechsner H. Near-infrared spectroscopic online monitoring of process stability in biogas plants. *Eng Life Sci* 2012;12.
- [50] Ponzoni A, Comini E, Concina I, Ferroni M, Falasconi M, Gobbi E, et al. Nanostructured Metal Oxide Gas Sensors, a Survey of Applications Carried out at SENSOR Lab, Brescia (Italy) in the Security and Food Quality Fields. *Sensors (Basel)* 2012;12:17023–45. doi:10.3390/s121217023.
- [51] Kretzschmar J, Rosa LFM, Zosel J, Mertig M, Liebetrau J, Harnisch F. A Microbial Biosensor Platform for Inline Quantification of Acetate in Anaerobic Digestion: Potential and Challenges. *Chem Eng Technol* 2016;39:637–42. doi:10.1002/ceat.201500406.
- [52] Zhou T, Han H, Liu P, Xiong J, Tian F, Li X. Microbial Fuels Cell-Based Biosensor for Toxicity Detection: A Review. *Sensors* 2017;17:2230. doi:10.3390/s17102230.
- [53] Sun H, Guo J, Wu S, Liu F, Dong R. Development and validation of a simplified titration method for monitoring volatile fatty acids in anaerobic digestion. *Waste Manag* 2017;67:43–50. doi:10.1016/j.wasman.2017.05.015.
- [54] Rajagopal R, Massé DI, Singh G. A critical review on inhibition of anaerobic digestion process by excess ammonia. *Bioresour Technol* 2013;143:632–41. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.030.
- [55] Fuchs W, Wang X, Gabauer W, Ortner M, Li Z. Tackling ammonia inhibition for efficient biogas production from chicken manure: Status and technical trends in Europe and China. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;97:186–99. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.038.
- [56] Cord-Ruwisch R, Merz TI, Hoh CY, Strong GE. Dissolved hydrogen concentration as an on-line control parameter for the automated operation and optimization of anaerobic digesters. *Biotechnol Bioeng* 1997;56:626–34. doi:10.1002/(SICI)1097-0290(19971220)56:6<626::AID-BIT5>3.0.CO;2-P.
- [57] Spanjers H, van Lier JB. Instrumentation in anaerobic treatment--research and practice. *Water Sci Technol* 2006;53:63–76.
- [58] Scholz L, Perez AO, Knobelspies S, Willenstein J, Palzer S. MID-IR led-based, photoacoustic CO<sub>2</sub> sensor. *Procedia Eng* 2015;120:1233–6. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.837.
- [59] Scholz L, Palzer S. Photoacoustic-based detector for infrared laser spectroscopy. *Appl Phys Lett* 2016;109:41102. doi:10.1063/1.4959886.
- [60] Eccleston R, Bongards M. Measuring biogas composition with a compact MEMS based spectrometer. III. *Conf. Monit. Process Control Anaerob. Dig. Plants, Leipzig: 2017*, p. 58–9.
- [61] Hack G, Fruteau de Lacroix H, Holliger C. Détermination de la production de méthane d'installations de digestion industrielles à partir de tests BMP en laboratoire. 2015.
- [62] Holliger C, Alves M, Andrade D, Angelidaki I, Astals S, Baier U, et al. Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Sci Technol* 2016;74:8. 2515-2522.
- [63] Helffrich D, Oechsner H. Test BMP Hohenheim (Hohenheimer Biogasertragstest: Vergleich verschiedener Laborverfahren zur Vergärung von Biomasse). *Landtechnik* 2002;2:148–9.
- [64] Liu X, Bayard R, Benbelkacem H, Buffière P, Gourdon R. Évaluation du potentiel biométhanogène de biomasses lignocellulosiques. *Déchets, Sci Tech* 2015.
- [65] Colon J, Ponsa S, Alvarez C, Vinot M, Lafuente FJ, Gabriel D, et al. Analysis of MSW full-scale facilities based on anaerobic digestion and/or composting using respiration indices as performance indicators. *Bioresour Technol* 2017;236:87–96. doi:10.1016/j.biortech.2017.03.172.
- [66] Lesteur M, Bellon-maurel V, Gonzalez C, Latrille E, Roger JM, Junqua G, et al.

- Alternative methods for determining anaerobic biodegradability : A review. *Process Biochem* 2010;45:431–40. doi:10.1016/j.procbio.2009.11.018.
- [67] Doublet J, Boulanger A, Ponthieux A, Laroche C, Poitrenaud M, Cacho Rivero JA. Predicting the biochemical methane potential of wide range of organic substrates by near infrared spectroscopy. *Bioresour Technol* 2013;128:252–8. doi:10.1016/j.biortech.2012.10.044.
- [68] Mounissamy A. Le Flash BMP va-t-il révolutionner la production de biogaz ? *Energ Plus* 2015;548.
- [69] Bellaton S, Guérin S, Pautremat N, Bernier J, Muller M, Motellet S, et al. Early assessment of a rapid alternative method for the estimation of the biomethane potential of sewage sludge. *Bioresour Technol* 2016;206:279–84. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.01.139.
- [70] Bockisch A, Beheim-Schwarzbach J, Kielhorn E, Kress P, Nägele H, Oechsner H, et al. Sensor technology for improved characterization of the liquid phase in anaerobic digestion. III. Conf. Monit. Process Control Anaerob. Dig. Plants, Leipzig: 2017.
- [71] Eder B, Schulz H, Krieg A. *Biogas-Praxis : Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit. 3., überar. Staufen Bei Freiburg: Ökobuch; 2006.*
- [72] Krayzelova L, Bartacek J, Díaz I, Jeison D, Volcke EIP, Jenicek P. Microaeration for hydrogen sulfide removal during anaerobic treatment: a review. *Rev Environ Sci Bio/Technology* 2015;14:703–25. doi:10.1007/s11157-015-9386-2.
- [73] Nghiem LD, Manassa P, Dawson M, Fitzgerald SK. Oxidation reduction potential as a parameter to regulate micro-oxygen injection into anaerobic digester for reducing hydrogen sulphide concentration in biogas. *Bioresour Technol* 2014;173:443–7. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.052.
- [74] Moeller L, Herbes C, Müller R, Zehnsdorf A. Schaumbildung und -bekämpfung im Prozess der anaeroben Gärung. *Landtechnik* 2010;3.2010:204–7.
- [75] Moeller L, Görsch K, Müller R, Zehnsdorf A. Bildung von Schaum in Biogasanlagen und seine Bekämpfung - Erfahrungen aus der Praxis. *Landtechnik* 2012;2.2012:110–3.
- [76] Walker M, Banks C, Heaven S, Frederickson J. Development and evaluation of a method for testing the residual biogas potential of digestates/OFW004-005. *Waste and Resources Action Programme. 2010.*
- [77] Triolo JM, Ward AJ, Pedersen L, Løkke MM, Qu H, Sommer SG. Near Infrared Reflectance Spectroscopy ( NIRS ) for rapid determination of biochemical methane potential of plant biomass. *Appl Energy* 2014;116:52–7. doi:10.1016/j.apenergy.2013.11.006.
- [78] Lesteur M, Latrille E, Maurel VB, Roger JM, Gonzalez C, Junqua G, et al. First step towards a fast analytical method for the determination of Biochemical Methane Potential of solid wastes by near infrared spectroscopy. *Bioresour Technol* 2011;102:2280–8. doi:10.1016/j.biortech.2010.10.044.
- [79] Fitamo T, Triolo JM, Boldrin A, Scheutz C. Rapid biochemical methane potential prediction of urban organic waste with near-infrared reflectance spectroscopy. *Water Res* 2017;119:242–51. doi:10.1016/j.watres.2017.04.051.
- [80] Jacobi HF, Moschner CR, Hartung E. Bioresource Technology Use of near infrared spectroscopy in online-monitoring of feeding substrate quality in anaerobic digestion. *Bioresour Technol* 2011;102:4688–96. doi:10.1016/j.biortech.2011.01.035.
- [81] Mayer F, Noo A, Sinnaeve G, Dardenne P, Gerin PA, Delfosse P. Prediction of the biochemical methane potential (BMP) of maize silages reduced to a powder using NIR spectra from wet and dried samples. *NIR 2013 - 16th Int. Conf. Near Infrared Spectrosc., 2013.*
- [82] Chen JL, Ortiz R, Xiao Y, Steele TWJ, Stuckey DC. Rapid fluorescence-based measurement of toxicity in anaerobic digestion. *Water Res* 2015;75:123–30.

- doi:10.1016/j.watres.2015.02.035.
- [83] ADEME, Delavelle C. Etat de l'art des technologies d'identification et de tri des déchets. 2010.
- [84] Nespeca MG, Rodrigues CV, Santana KO, Maintinguer SI, de Oliveira JE. Determination of alcohols and volatile organic acids in anaerobic bioreactors for H<sub>2</sub> production by near infrared spectroscopy. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42:20480–93. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.044>.
- [85] <https://www.applitek.com/products/anasense> n.d.
- [86] Charnier C, Latrille E, Miroux J, Steyer JP. SNAC: Système de titration pour l'ammoNiac, les Acides gras volatils et le Carbone inorganique. JRI biogaz méthanisation, 2016.
- [87] <http://wiki.wateralliance.nl/Capilix> n.d.
- [88] Liu Z, Liu J, Zhang S, Xing X, Su Z. Microbial fuel cell based biosensor for in situ monitoring of anaerobic digestion process. *Bioresour Technol* 2011;102:10221–9. doi:10.1016/j.biortech.2011.08.053.
- [89] Kaur A, Rae J, Michie I, Dinsdale RM, Guwy AJ, Premier GC, et al. Microbial fuel cell type biosensor for specific volatile fatty acids using acclimated bacterial communities. *Biosens Bioelectron* 2013;47:50–5. doi:10.1016/j.bios.2013.02.033.
- [90] Jia H, Yang G, Wang J, Hao H, Guo W, Zhang H, et al. Performance of a microbial fuel cell-based biosensor for online monitoring in an integrated system combining microbial fuel cell and upflow anaerobic sludge bed reactor. *Bioresour Technol* 2016;218:286–93. doi:10.1016/j.biortech.2016.06.064.
- [91] Jimenez J, Peu P. Etat des lieux des connaissances sur les facteurs de contrôle du potentiel méthanogène d'un substrat et de la composition de son biogaz. JRI biogaz méthanisation, 2018.

## Annexe A : Généralités sur le processus et les technologies de méthanisation

### A1. La méthanisation

La digestion anaérobie, ou méthanisation, permet de valoriser la matière organique sous forme de méthane.

La production de méthane ( $\text{CH}_4$ ) est réalisée grâce à l'action à la fois séquentielle et simultanée d'un consortium de microorganismes, qui dégradent les composants organiques sous conditions anaérobies. La dégradation de la matière a lieu par étapes. Une première phase d'hydrolyse (FigureA1 (1)), réalisée par des bactéries hydrolytiques et fermentaires, permet de dégrader la matière organique complexe (protéines, polysaccharides, graisses) en composants de plus petite taille (monomères tels que des acides aminés, sucres, acides gras de chaîne longue, alcools). Pendant la phase d'acidogénèse (FigureA1 (2)) les bactéries acidogènes consomment ces monomères en produisant des acides organiques de chaîne courte (acides gras volatils, AGV). Les AGV ( $\text{C}_4$  à  $\text{C}_7$ ) sont par la suite métabolisés par des bactéries acétogènes pour produire de l'acétate, de l'hydrogène ( $\text{H}_2$ ) et du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) dans la phase d'acétogénèse (FigureA1 (3)). Dans la dernière phase, la méthanogénèse (FigureA1 (4)), ces composants sont utilisés par des archaea méthanogènes pour produire du  $\text{CH}_4$  et du  $\text{CO}_2$ .

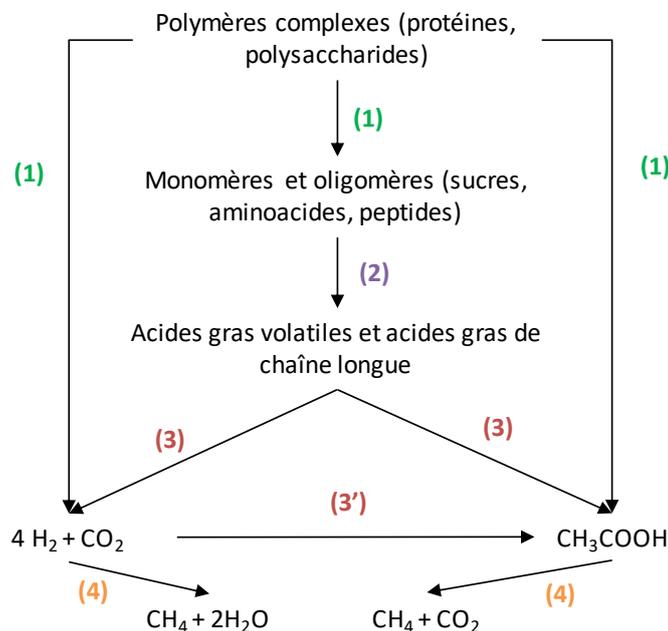


Figure A1 : Phases de la méthanisation (1) Hydrolyse et fermentation, (2) Acidogénèse, (3) Acétogénèse (3') Homo-acétogénèse et (4) Méthanogénèse.

Le consortium microbiologique qui se développe lors de la méthanisation de la matière organique est sensible. En effet, chaque communauté bactérienne est interdépendante des produits métabolisés par les autres pools bactériens. L'accumulation de métabolites au-delà de seuil, tels que les Acides Gras Volatils ou l'Ammonium peuvent aboutir à une inhibition, ou même la toxicité, d'un groupe de microorganismes ou d'un autre. De plus, des changements d'alimentation intrante (composition, surcharge) ou des perturbations des conditions de travail (température, pH) entraînent des instabilités de la digestion biologique qui ne sont pas toujours réversibles.

La méthanisation peut avoir lieu à trois plages de température : sous conditions thermophiles (à environ  $55^\circ\text{C}$ ), mésophiles (à température d'environ  $35\text{-}40^\circ\text{C}$ ) et psychrophiles (à température  $<25^\circ\text{C}$ ). La température de digestion conduit au développement de bactéries adaptées et spécifiques. Les communautés acétoclastes et méthanogènes sont les plus sensibles à la variation de température. De plus, leur faible vitesse de croissance impose que le procédé anaérobie soit le plus stable possible.

Le mélange produit de  $\text{CH}_4$  et  $\text{CO}_2$  (avec une teneur d'environ 55-60 et 40-45% volumique respectivement) est appelé biogaz. Différentes voies de valorisation énergétique du biogaz peuvent être mises en œuvre : la valorisation thermique, la valorisation électrique et thermique, la valorisation

par injection de biométhane. D'autres composants traces peuvent être présents dans le biogaz (azote, oxygène, sulfure d'hydrogène, ammoniac, siloxanes), qui est aussi saturé en vapeur d'eau.

Lors de la méthanisation, dans l'étape d'hydrolyse initiale, l'azote organique est solubilisé sous forme d'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Selon les teneurs en ammonium et conditions de pression et température, l'azote minéralisé se distribuera sous  $\text{NH}_3$  dans le biogaz ou  $\text{NH}_4^+$  dans le digestat, second co-produit du processus de digestion anaérobie. Le digestat est épandu sur les sols sous forme brute, ou subit des transformations de séparation des phases liquide et solide, par presse à vis ou centrifugation par exemple et/ou compostage avant épandage. D'autres procédés de traitement du digestat permettent de transformer le  $\text{NH}_4^+$  sous forme d'engrais ammoniacal (sulfate d'ammonium) ou phospho-ammoniac-magnésien (struvite).

Plusieurs sources de biomasse ou matière organique sont couramment méthanisées. Les différents types d'intrants définissent les types d'installations de méthanisation : méthanisation agricole (effluents d'élevage, déchets de culture), méthanisation industrielle la méthanisation territoriale (déchets ménagers, déchets verts, FFOM, déchets industriels, etc.), méthanisation des boues d'épuration de STEP, récupération et valorisation de biogaz d'installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND).

## A2. Les ouvrages des installations de méthanisation

Les différentes sources de biomasse qui sont méthanisées dans une installation de méthanisation définissent également la typologie des ouvrages nécessaires pour ces installations, dès la réception des intrants jusqu'à la valorisation du biogaz et du digestat. Les ouvrages compris dans une installation de méthanisation seront par la suite distribués par unités fonctionnelles, celles-ci regroupant des équipements qui ont une fonction similaire. Quatre grandes unités fonctionnelles sont présentées (Figure A2) :

- Unité fonctionnelle Stockage et préparation des intrants
- Unité fonctionnelle Digestion
- Unité fonctionnelle Stockage et valorisation du biogaz
- Unité fonctionnelle Stockage et valorisation du digestat

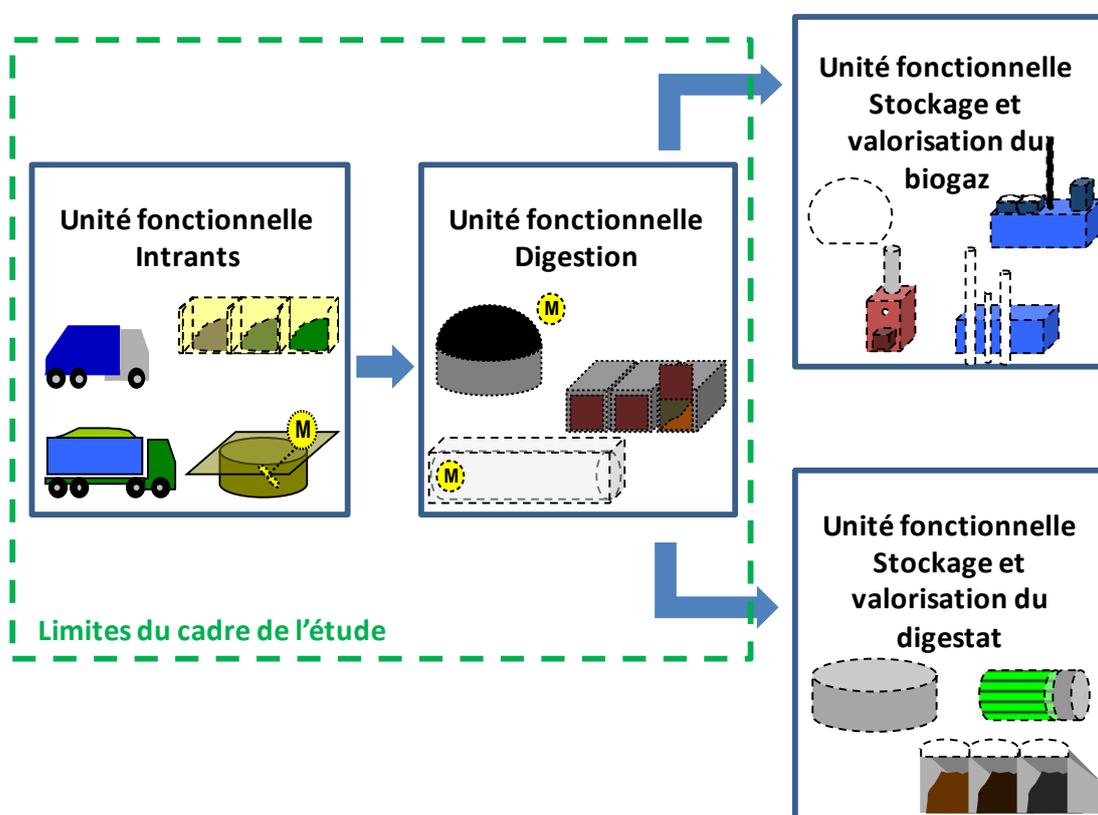


Figure A2 : Description des unités fonctionnelles d'une installation de méthanisation

Les paramètres de pilotage des unités fonctionnelles Intrants et Digestion sont ceux ayant un impact dans la production du méthane dans une installation de méthanisation. Ces deux unités établissent ainsi les limites du cadre de l'étude.

### Unité fonctionnelle Intrants

A leur arrivée dans une installation de méthanisation, les intrants devront être temporairement stockés (longues périodes de stockage entraînent la perte du potentiel biométhanogène du substrat) et prétraités en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques et obligation réglementaire de prétraitements. Sont les intrants liquides ? Doivent-ils être broyés ? Sont-ils pompables ? Quelle est leur pérennité ? Faut-il les hygiéniser ? Des cuves pour les intrants liquides, des cuves chauffées pour les déchets gras, des aires de stockage, des trémies d'insertion, des unités de broyage ou d'autres prétraitements, etc. font partie des ouvrages et éléments principaux de cette unité fonctionnelle.

### Unité fonctionnelle Digestion

L'ouvrage principal de l'unité fonctionnelle Digestion est le réacteur, couramment appelé digesteur ou méthaniseur. Les technologies de digestion se différencient notamment en fonction de la teneur en matière sèche du mélange à méthaniser. Elles distinguent la siccité du mélange (en voie liquide ou solide), ainsi que le mode d'alimentation (en continu ou en discontinu). Les trois modèles typiques de digesteur sont le digesteur infiniment mélangé, le digesteur à flux piston et le digesteur à alimentation discontinue (aussi appelé digesteur box/garage) :

- **Digesteur infiniment mélangé** : La teneur en matière sèche du mélange à méthaniser est basse (MS (matière sèche) < 15-17%) et le milieu de digestion est liquide. Un système de brassage assure l'homogénéité du milieu. L'alimentation de substrats et la sortie du digestat est continue. Le digesteur travaille sous conditions de sortie (c.-à-d. la composition du courant de sortie est identique à celle de l'intérieur du digesteur).
- **Digesteur à flux piston** : Avec des teneurs en matière sèche plus élevées (MS 20-35%), la digestion en voie solide est nécessaire. Quand cela a lieu avec une alimentation de substrats et une sortie de digestat continues, le milieu de digestion avance dans la longueur du digesteur comme s'il avançait sous l'effet d'un piston. La dégradation des substrats augmente au long du digesteur.
- **Digesteur box/garage** : Avec des teneurs en matière sèche élevées à très élevées (MS > 25-40%), l'alimentation continue avec des équipements de pompage et transfert des solides est plus compliquée. Les digesteurs sont donc alimentés en substrats en discontinu (par charges), de façon à ce que le digesteur soit chargé en une seule opération ; le milieu de digestion y reste pendant plusieurs jours et finalement le digesteur est vidé pour commencer un nouveau cycle d'alimentation.

Le système de digestion peut être conçu pour avoir lieu (i) en une seule étape (dans un seul réacteur) où les 4 phases de la méthanisation ont lieu ou (ii) en deux étapes (deux réacteurs placés en série), où les étapes d'hydrolyse jusqu'à l'acidogénèse s'effectuent dans un premier réacteur et les étapes d'acétogène et méthanogénèse se déroulent dans un second réacteur. Les procédés en deux étapes permettent ainsi d'optimiser les conditions biologiques (notamment température et pH) pour chaque réacteur. Cependant cette solution technique n'est en pratique adaptée que pour la méthanisation de substrats très solubles et facilement biodégradables.

Des différences par rapport aux systèmes typiques présentés avant sont possibles en fonction du constructeur et de la conception de l'installation. D'autres technologies de digestion sont donc conçues, par exemple les systèmes fluidisés avec rétention des solides UASB (de l'anglais Upflow Anaerobic Sludge Blanket) qui sont bien utilisés pour le traitement des eaux usées industrielles. Des variantes de la technologie infiniment mélangé ou à flux piston comprennent également des systèmes de brassage différents, tels que le brassage mécanique (avec des brasseurs), le brassage pneumatique (par introduction de biogaz à pression) ou encore le brassage par recirculation. Les

technologies de digestion sont également différentes selon le système de chauffage (*in situ*, chauffage extérieur), qui permet de maintenir la température du digesteur stable.

Un post-digesteur est également envisageable dans cette unité fonctionnelle. Celui-ci est installé en aval du digesteur et permet de produire du biogaz avec les matières qui sont plus difficilement biodégradables ainsi que de stocker éventuellement le biogaz ou le digestat. Souvent le post-digesteur n'est pas chauffé, mais ses parois sont isolées.

Un dernier élément de l'unité fonctionnelle digestion est le système de contrôle-commande permettant de suivre et agir sur les paramètres clés du processus de digestion (température, fonctionnement du brasseur, niveau de remplissage, etc.).

Lorsqu'aucune valorisation thermique du biogaz ne se réalise à l'installation de biogaz, une chaudière fait partie de l'unité fonctionnelle de digestion, assurant le maintien de la température de travail du digesteur.

### **Unité fonctionnelle Stockage et valorisation du biogaz**

Le biogaz issu du digesteur est stocké quelques heures avant d'être conduit aux unités de traitement et valorisation de celui-ci. Des éléments de stockage de biogaz habituels comprennent les membranes souples, intégrées sur le digesteur ou le post-digesteur, ou les réservoirs indépendants. Les ouvrages de traitement du biogaz permettent d'éliminer des composants qui peuvent endommager les équipements en aval, tels que le sulfure d'hydrogène ( $H_2S$ ) ou l'eau. Une étape d'épuration par refroidissement, compression et adsorption sur charbon actif est couramment rencontrée. Le degré d'épuration nécessaire est dépendant de l'ouvrage de valorisation du biogaz.

La génération de chaleur dans une chaudière, la cogénération de chaleur et d'électricité dans un moteur de cogénération et l'épuration (séparation du  $CO_2$ ) pour la production de biométhane sont les voies de valorisation les plus courantes. Lorsque la chaleur est produite dans les ouvrages de valorisation du biogaz, un échangeur de chaleur est installé afin de valoriser également cette énergie produite.

### **Unité fonctionnelle Stockage et valorisation du digestat**

Les ouvrages de l'unité fonctionnelle du digestat sont dépendants des pistes de valorisation de celui-ci. Dans certains cas le digestat doit être acheminé ailleurs pour sa gestion en aval (incinération). Dans les cas où une valorisation agronomique par épandage sur des surfaces agricoles est possible, des cuves de digestat permettant de le stocker jusqu'aux périodes de l'année où l'épandage est permis sont nécessaires. Les séparateurs de phases (filtres à bandes, presses à vis, centrifugeuses) permettent de réduire le volume de stockage du digestat liquide ou le volume de transport. Le traitement du digestat avec des évaporateurs le permet également.

Le compostage du digestat avec des matières qui ne sont pas biodégradables sous conditions anaérobies (p.ex. les déchets verts ligneux) est une piste de valorisation courante. Des ouvrages tels que les tunnels de compostage, les compodômes ou les couloirs avec aération forcée sont rencontrés à cette fin. D'autres pistes de valorisation envisagent la récupération de l'azote et du phosphore sous forme d'engrais minéraux comme le sulfate d'ammonium,  $(NH_4)_2SO_4$  (notamment lorsque le digestat est séché ou évaporé) ou la struvite,  $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$  (tours de lavage acide, réaction avec des sels de magnésium).

## Annexe B : Exemple de questionnaire en ligne

# PILOTAGE DES PROCEDES DE DIGESTION ANAEROBIE - Exploitant

## ETUDE RECORD N° 17-0160/1A: CONDITIONS DE PILOTAGE DE LA PRODUCTION DE METHANE DANS LES PROCEDES DE DIGESTION ANAEROBIE

Chère Madame, Cher Monsieur

Merci de prendre le temps de compléter ce questionnaire, qui fait partie du travail développé par RECORD, le réseau français de recherche coopérative sur les déchets et l'environnement.

Les résultats de cette enquête permettront d'identifier les paramètres de suivi clés qui garantissent le bon fonctionnement de la méthanisation et donc en minimisent les risques de dysfonctionnement.

Vos données seront traitées avec confidentialité.

A la fin de l'étude, et afin de vous remercier pour votre précieuse collaboration, nous vous transmettrons par courriel une synthèse des résultats de ces investigations. Le progrès est pour tout le monde!



### RENSEIGNEMENTS DU SITE

Nom du site de méthanisation \*

Contact

E-mail

Année de construction

Constructeur

Puissance du site (kWel ou Nm3/h)

Matières traitées sur le site (t/an)

Typologie d'intrants : Veuillez choisir les substrats utilisés sur votre site

- Effluents d'élevages
- Fumiers
- Résidus de céréales
- Cultures énergétiques
- Autres résidus agricoles
- Déchets Abattoir/sang
- Déchets industries agroalimentaires
- Biodéchets de restauration
- Biodéchets GMS
- Graisses
- Biodéchets ménagers
- Boues de STEP industrielles
- Boues STEP urbaines
- Déchets verts
- Autres

Veuillez choisir le type de digesteur

- Infiniment mélangé
- Voie solide discontinue (Box,garages,...)
- Voie solide continue (Flux piston)



### VOTRE METHODOLOGIE DE SUIVI

Rencontrez-vous ou avez-vous rencontré des problèmes de performances ou de conduite de site de méthanisation?

- Oui
- Non

Avez-vous défini une méthodologie de pilotage du site?

- Oui
- Non

### Qualité de la ration alimentée

Etude RECORD n°17-0160/1A

Veillez indiquer les paramètres que vous suivez qui concernent la qualité de la ration alimentée :

- Quantité de substrat journalier (kg Matière brute/j)
- Matière sèche (% de Matière brute)
- Matière sèche volatile (% de Matière sèche)
- N-total (% de Matière sèche ou mg/L)
- N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (% N-total ou mg/L)
- Oligoéléments (mg/L)
- Caractérisation N,P,K
- Potentiel Méthane (Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/t matière brute)
- Inertes et impuretés
- Autres paramètres

### Prétraitement des intrants

Quel type de prétraitement utilisez-vous ?

- Stockage
- Séparation des inertes
- Broyage
- Hygiénisation
- Hydrolyse biologique
- Hydrolyse thermique
- Hydrolyse enzymatique

Veillez indiquer les paramètres que vous suivez qui concernent le prétraitement des intrants :

- Matière sèche (% de Matière brute)
- Matière sèche volatile (% de Matière sèche)
- Température (°C)
- pH

- Acides gras volatils (g/L)
- Autres paramètres

### Digesteur

Veillez indiquer les paramètres que vous suivez qui concernent le digesteur :

- Quantité de ration alimentée (t/j)
- Recirculation phase liquide (p.e.dilution des Intrants/recirculation...)
- Matière sèche (% de Matière brute)
- Matière sèche volatile (% de Matière sèche)
- Conductivité (mS/cm)
- Température (°C)
- pH
- RedOx potential (V)
- Acides gras volatils (g/L)
- N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg/L)
- Oligoéléments (mg/L)
- Débit de biogaz (Nm<sup>3</sup>/d)
- Teneur en CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> (%vol)
- Teneur en H<sub>2</sub>S (ppm)

Quels autres paramètres suivez-vous ?

Comment définissez-vous votre ration alimentée ?

Disposez-vous d'un laboratoire sur site? De quels équipements disposez-vous ?

Adaptez-vous votre pilotage d'exploitation aux résultats de suivi de paramètres ?

- Oui
- Non

Avez-vous défini des actions quand les paramètres sont hors de la plage de bon fonctionnement ?

- Oui
- Non

Avez-vous automatisé des commandes de conduite de votre digesteur ?

- Oui
- Non

Comment contrôlez-vous la performance de votre digesteur ?



## INNOVATION DE SUIVI

Identifiez-vous des nouveaux paramètres à suivre pour la conduite de votre digesteur ?

Avez-vous développé ou développez-vous des analyses en support à la conduite ?

Des analyses complémentaires de caractérisation des intrants seraient-elles pertinentes ?

Pensez-vous qu'un programme de supervision soit adapté au fonctionnement de votre site ? Quels seraient les freins à sa mise en place ?

**VALIDER**

*Attention au vol de données : ne saisissez jamais de mots de passe dans un questionnaire.*