

ANALYSES ET RECOMMANDATIONS DE SURVEILLANCE POUR L'OPTIMISATION DES UNITES DE METHANISATION ET DE BIOMETHANE

SYNTHESE (EN FRANÇAIS)



Auteurs :

Sandra ESTEVES, Sustainable Environment Research Centre (Centre de recherche environnementale durable), Université de Glamorgan (Pays de Galles, Royaume-Uni)

Martin MILTNER, Université de Technologie de Vienne (Autriche)

Sascha FLETCH, Landesenergieverein (LEV) Steiermark (Agence régionale de l'énergie de Styrie) (Autriche)



THE WALES
CENTRE OF EXCELLENCE
FOR ANAEROBIC DIGESTION

UNIVERSITY OF PRIFYSGOL
Glamorgan
Morgannwg
CARDIFF • PONTYPRIDD • CAERDYDD



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY



Dans le cadre du livrable pour le projet :



Promotion du biométhane et de son développement de marché grâce à des partenariats locaux et régionaux

Projet réalisé dans le cadre du programme Energie Intelligente Europe

Numéro de contrat : IEE/10/130 ; Référence du livrable : Tâche 5.2 ;

Date du livrable (version originale en anglais) : octobre 2012 ; Version française : décembre 2012

Données économiques ajoutées en juillet 2013



Ce document a été traduit par les partenaires francophones du projet Bio-Methane Regions,



Avec la contribution de Alias Traduction pour certaines parties du document.

Sommaire

1. PORTEE DU RAPPORT	4
2. NECESSITE DU CONTROLE DES CARACTERISTIQUES DE LA PERFORMANCE DU PROCESSUS DE METHANISATION, DES SUBSTRATS ET DES MATIERES PRODUITES	5
3. RECOMMANDATIONS POUR LES PARAMETRES ET PROGRAMMES DE SURVEILLANCE	10
4. PARAMÈTRES GÉNÉRAUX (LA CONCEPTION, LE FONCTIONNEMENT ET LES PERFORMANCES)	22
5. PRINCIPALES MESURES ET TECHNIQUES UTILISÉES POUR LA SURVEILLANCE DES UNITÉS DE BIOGAZ ET BIOMÉTHANE.....	23
6. CONCLUSIONS.....	26
7. REFERENCES.....	30

Avertissement :

Le contenu de ce rapport engage seulement la responsabilité de ses auteurs et ne reflète pas nécessairement l'opinion de l'Union européenne. L'EACI et la Commission européenne déclinent toute responsabilité quant à l'utilisation des informations contenues dans ce document.

Celles-ci sont diffusées de bonne foi auprès d'un large public ; en raison de la nature du sujet et de la variété des technologies, substrats, types d'opérations et de marchés pour les matières premières, de nombreux aspects ont dû être généralisés. Les auteurs ne sont pas légalement responsables des dépenses ou pertes, y compris des pertes et dommages spécifiques, indirects, collatéraux ou similaires, qui résultent, directement ou indirectement, de l'utilisation du présent rapport ou des informations qu'il contient. La mention de techniques ou produits commerciaux, de leurs sources ou de leurs utilisations, en lien avec le sujet du présent document, ne doit pas être interprétée comme une approbation réelle ou implicite, desdits produits, technologies ou services.

Droits d'auteur :

Aucune copie de tout ou partie du présent rapport n'est autorisée sans le consentement écrit de ses auteurs. La présente synthèse (livrable 5.2) a été traduite dans huit autres langues européennes.

© University of Glamorgan, 2012 pour l'ensemble des photos contenues dans le présent rapport.

1. Portée du rapport

Ce rapport explique l'importance et l'impact de la mise en œuvre d'une surveillance appropriée des unités de méthanisation et de biométhane. Il offre une analyse de nombreux paramètres, ainsi que des techniques d'échantillonnage et des programmes de contrôle pour le processus de méthanisation lui-même, les substrats à digérer ainsi que pour les digestats en résultant et le biogaz produit. Ce document donne également des informations relatives à la surveillance de l'épuration du biogaz et de la valorisation technologique du processus. Il ne couvre pas l'analyse des mesures, systèmes ou programmes de contrôle pouvant être utilisés dans les unités de méthanisation et de biométhane.

Cette analyse et ces recommandations fournissent des renseignements généraux sur les paramètres clés à surveiller, de façon à rendre possible le contrôle d'une unité de méthanisation pour :

- a) permettre une flexibilité de la charge organique ou hydraulique variable des substrats,
- b) assurer une diversification des types de substrats (déchets et effluents),
- c) traiter les déchets à un niveau élevé (quand les substrats sont classés comme des déchets),
- d) optimiser au maximum le rendement de conversion organique du biogaz/biométhane,
- e) obtenir des digestats et du biométhane de bonne qualité,
- f) accéder à des marchés de digestats plus spécifiques et exigeants,
- g) introduire le biométhane sur d'autres marchés (par exemple, le marché des biocarburants et le réseau de distribution de gaz),
- h) réduire les temps d'arrêt de l'unité/du processus,
- i) diminuer la taille de l'unité ainsi que les coûts de fonctionnement (par exemple, le dosage de produits chimiques et les charges thermiques),
- j) améliorer les bénéfices environnementaux de l'unité et réduire ses impacts.

Finalement, ces bénéfices auront des impacts positifs sur les aspects économiques des unités de méthanisation et de biométhane, et ils continueront à améliorer les références des technologies en :

- a) assurant techniquement la livraison sur le long terme,
- b) permettant une flexibilité opérationnelle,
- c) donnant à ces unités la possibilité d'être considérées comme de bons voisins,
- d) présentant des avantages environnementaux et économiques,
- e) assurant les livraisons sur la base des promesses faites au gouvernement et au public.

Ce document participera également à une meilleure acceptation, par le public et les responsables de la planification, de nouveaux projets de méthanisation et de biométhane. Il aidera aussi à obtenir ultérieurement ou à maintenir un soutien des politiques gouvernementales ainsi que des incitations financières.

2. Nécessité du contrôle des caractéristiques de la performance du processus de méthanisation, des substrats et des matières produites

La méthanisation est un processus biochimique se déroulant dans des récipients hermétiquement clos, dans lesquels la matière organique est minéralisée principalement en méthane et en dioxyde de carbone par une série de réactions provoquées par plusieurs groupes de microorganismes (Figure 1). Les différentes étapes du processus peuvent toutes être réalisées dans un seul contenant, le digesteur (parfois appelé réacteur), ou dans des récipients séparés. Le résultat du processus de méthanisation est, d'une part, le méthane, qui peut être utilisé pour produire de l'électricité renouvelable, de la chaleur ou servir de carburant pour véhicule, et d'autre part, le digestat, dont la concentration en matières organiques facilement fermentescibles doit être généralement faible et qui peut contenir de précieux nutriments. Concernant le traitement de déchets organiques et la production de biogaz, la méthanisation est une technologie intéressante du point de vue de la protection de l'environnement. Ses bénéfices environnementaux comprennent : le traitement des déchets, la réduction de la pollution, la génération d'énergie renouvelable et l'amélioration des pratiques agricoles par le recyclage des nutriments végétaux. L'accroissement de l'utilisation de ces digestats et nutriments ainsi que l'augmentation des bénéfices en résultant font actuellement l'objet d'une R&D plus approfondie. Plus de 8 000 unités de méthanisation existent à l'heure actuelle dans le monde (sans compter les installations de petite échelle). L'Europe dispose aujourd'hui de la plus grande capacité installée, et le déploiement continue de s'étendre dans certaines régions en mettant l'accent sur la prestation de services de traitement des déchets et, dans de nombreux cas, sur la production de bioénergie. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), plus de 170 unités de biométhane sont implantées dans le monde et traitent toute une variété de substrats pour produire du biogaz utilisé comme biocarburant ou injecté dans le réseau de distribution de gaz.

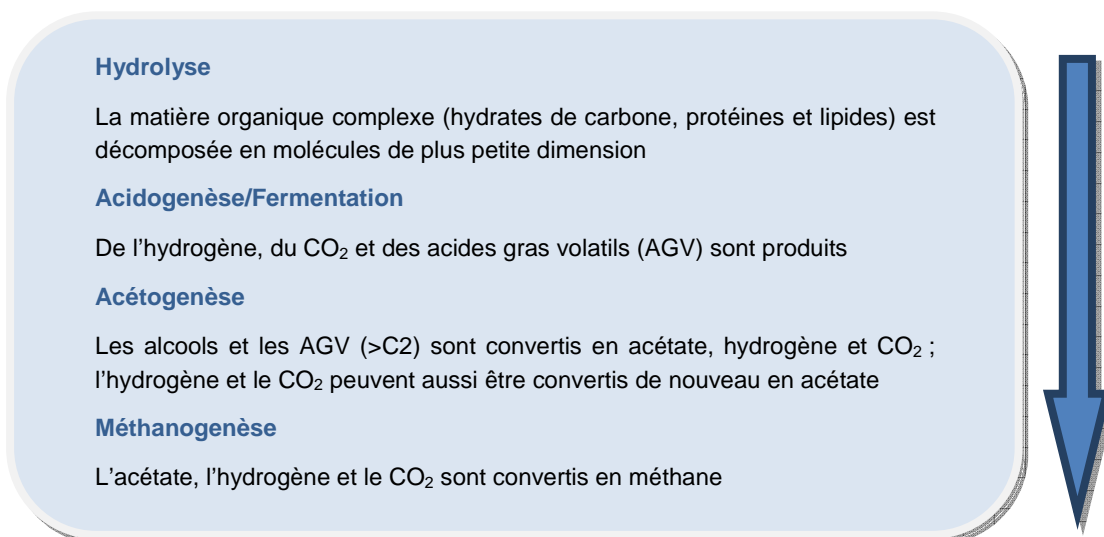


Figure 1 – Schéma simplifié des différentes étapes du processus de méthanisation.

La méthanisation est un processus polyvalent capable de dégrader une multitude de substrats organiques (toutes sortes de résidus et déchets municipaux, industriels et agricoles ou même des cultures énergétiques). Cette polyvalence présente toutefois quelques obstacles. Dans de nombreux cas, le

processus doit être capable de supporter des substrats présentant un large éventail de compositions chimiques et physiques, susceptibles de varier grandement d'un jour ou d'une semaine à l'autre et d'introduire des facteurs d'inhibition.

En plus de la grande multiplicité des substrats utilisables (aussi appelés matières premières), le processus de méthanisation est réalisé par des systèmes complexes et dynamiques dans lesquels les aspects mécaniques, microbiologiques et physicochimiques, intimement liés, influencent sa performance finale. La recherche, menée principalement ces quatre dernières décennies, a nécessité l'expertise de microbiologistes, de chimistes, d'ingénieurs et de mathématiciens du monde entier. Elle a permis une amélioration continue des principes fondamentaux du processus ainsi qu'une meilleure appréciation de sa complexité et de sa diversité, du fait de la culture mélangée de bactéries et d'archées de nature antagoniste. Cela étant, les aspects complexes et les modèles d'action/réaction liés aux activités microbiennes et aux performances d'ensemble ne sont pas tous pleinement compris. La stabilité du processus dépend de l'équilibre critique entre les taux de croissance symbiotique des principaux groupes métaboliques des bactéries et archées (bactéries acidogènes, acétogènes et méthanogènes).

Même si le processus de méthanisation est naturellement stable, différentes perturbations peuvent provoquer son instabilité, telles que :

- a) une surcharge des concentrations organiques ou hydrauliques,
- b) une présence de composés toxiques ou inhibiteurs, qui peuvent entraver la digestion par détérioration des microorganismes actifs ou par réduction de l'efficacité (activité) des enzymes,
- c) une carence en nutriments ou oligoéléments essentiels au maintien et à la croissance des microbes,
- d) un écart par rapport aux températures optimales de fonctionnement.

Il est important de comprendre que chaque étape présente ses propres caractéristiques, l'hydrolyse et la méthanogénèse étant généralement les plus délicates. L'hydrolyse s'est avérée être une étape cinétiquement limitante dans la digestion de substrats particuliers et de certaines graisses. Le taux d'hydrolyse global dépend de la taille et de la forme du substrat, de la dimension de sa surface, de la concentration microbienne ainsi que de la production et adsorption d'enzymes. La méthanogénèse est, quant à elle, essentiellement une phase cinétiquement limitante pour les substrats plus facilement dégradables. En effet, leurs temps de séjour courts entraînent potentiellement une perte nette de microbes dans le digesteur dans la mesure où les méthanogènes se développent lentement. Un digesteur peut ne pas pâtir seulement des contraintes posées par un ensemble de microbes. En effet, dans de nombreux systèmes, ces limitations peuvent surgir de différents groupes de microbes, et par conséquent à plusieurs étapes de la digestion.

Spanjers et van Lier (2006) ont étudié environ 400 unités de méthanisation de grande envergure opérant principalement un traitement des eaux usées. Ils ont constaté que, dans 95 % des installations, l'instrumentation mise en œuvre *in situ* pour les mesures en continu se limitait au pH, à la température, au débit d'eau ainsi qu'au débit, au niveau et à la pression du biogaz. Madsen *et al.* (2011) ont également rapporté que de nombreuses installations procèdent à des analyses *ex situ*, et que seuls des capteurs, notamment pour les valeurs du pH, du potentiel d'oxydoréduction (ou potentiel redox) et de la génération de

gaz, sont employés *in situ* ou en continu. Dans l'état actuel des choses, les auteurs du présent rapport partagent ce point de vue. Néanmoins, l'industrie montre une plus grande motivation pour améliorer sa compréhension du processus et instaurer une surveillance plus approfondie, en mettant même en place des techniques de contrôle à distance.

Dans de nombreux cas, l'instabilité du processus de méthanisation est évitée par une exploitation bien en-deçà de sa capacité maximale avec des flux réduits de substrats. Ceci signifie toutefois que des unités plus grandes que nécessaire sont construites et exploitées, ce qui entraîne un surinvestissement et des surcoûts de fonctionnements élevés ainsi que des pertes d'efficacité afférentes. Il faut plutôt garder à l'esprit que, dans la mesure où un processus à médiation microbienne requiert un apport en substrats organiques, ces microbes se développent uniquement si les conditions sont adéquates. Par conséquent, la sous-alimentation des digesteurs et leur fonctionnement avec de longs temps de séjour n'entraînent pas nécessairement une amélioration du traitement des déchets et des conversions en biogaz plus élevées, car la croissance de la culture microbienne se voit également limitée par une carence en matière première. La complexité de la microbiologie au cours du processus de méthanisation ne se limite pas à l'alimentation du digesteur, et il faut aussi tenir compte du ratio des microorganismes : les microbes à taux de conversion plus élevé se développent uniquement si la charge du système est relativement importante ou lorsque le digesteur présente des dysfonctionnements, ce qui entraîne, notamment, un surdéveloppement des méthanogènes du genre *Methanosarcina* (par exemple, De Vrieze *et al.*, 2012). En dépit de taux de conversion élevés, lorsque les digesteurs sont dominés uniquement par ces espèces microbiennes, ils sont susceptibles de produire un digestat de moindre qualité, présentant une charge organique plutôt élevée et des odeurs relativement fortes, liées à une importante teneur en acides gras volatils (AGV), qui peuvent ensuite causer une phytotoxicité végétale lors de son épandage. Il peut alors être nécessaire de procéder à une étape de polissage (en anaérobie ou autre) du digestat.

D'importantes différences proviennent également des prétraitements des substrats (conditions de stockage ou prétraitements plus complexes), réalisés pour augmenter activement leur hydrolyse et pouvant avoir une influence directe, notamment, sur la valeur du pH ou les concentrations en ammonium et en AGV à l'entrée des substrats dans le digesteur. En outre, un certain nombre d'autres facteurs participent aux décisions relatives à l'exploitation des digesteurs, le type de processus de digestion étant sans nul doute un point capital. Par exemple, des digesteurs à taux élevé, tels que les réacteurs UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Banket*, ou digesteur anaérobie à lit de boue à courant ascendant), en principe conçus pour fonctionner avec une faible teneur en matières solides et en graisses en suspension, sont normalement capables de s'adapter à une concentration plus élevée en charge organique et à des temps de séjour hydrauliques (TSH) réduits, par rapport aux digesteurs « infiniment mélangés », ou CSTR (*Continuously Stirred Tank Reactors*), plus classiques. Ceci s'explique par leur capacité à maintenir les microbes dans le digesteur, les granules réduisant significativement le potentiel de dilution microbienne. De plus, la structure granulaire permet une protection des méthanogènes sensibles, généralement situés au cœur du granule.

La littérature contient de nombreuses références à des conditions inhibitrices connues des systèmes de méthanisation, ainsi que de multiples moyens pour optimiser la performance systémique (Chen *et al.*, 2008 ; Fricke *et al.*, 2006). Cela étant, outre les variations dans les substrats et la grande complexité du processus, plusieurs interactions biochimiques peuvent présenter autant d'effets antagonistes que de

synergies. Dans certains cas, tous ces facteurs rendent la performance du processus difficile à prévoir. Certains de ces effets complexes apparaissent, entre autres, lorsque la digestion s'opère en présence de différents métaux et d'ammonium, qui rendent alors difficile l'identification d'une valeur précise de l'élément requis ou en excès. L'analyse peut mettre en exergue d'autres éléments importants, tels que la biodisponibilité et la bio-accessibilité de certains composés, comme des métaux traces essentiels. Néanmoins, il est plus ardu de définir leur disponibilité/accessibilité dans la culture microbienne, et certains composés (ajoutés en tant que partie du substrat ou par le biais d'un dosage chimique, comme le contrôle de l'alcalinité ou du sulfure d'hydrogène) peuvent même altérer la disponibilité d'éléments indispensables et induire, notamment, la formation de précipités.

Au regard de toutes ces différences et complications potentielles, au lieu de concevoir et d'exploiter des processus de digestion surdimensionnés pour tenter d'atténuer les éventuels problèmes, il serait plus judicieux d'utiliser d'autres méthodes pour augmenter le rendement d'une unité de méthanisation. Cet objectif peut être atteint en surveillant activement et régulièrement les substrats ainsi que la matrice du processus de méthanisation et des matières produites. La compréhension du rendement, des capacités et des tendances du processus de méthanisation est fondamentale pour permettre aux exploitants de prendre les bonnes décisions en matière de contrôle. Celles-ci peuvent être liées, entre autres, au changement des substrats, à l'ajout d'une solution tampon de pH, de nutriments ou d'oligoéléments, à la modification des taux de charge organique et hydraulique, à l'introduction de prétraitements du substrat ou de post-traitements du digestat, ou encore à l'exploitation (occasionnelle) d'un processus auxiliaire d'élimination de l'ammonium.

La poursuite de la recherche est essentielle à la compréhension plus approfondie du processus ainsi qu'à l'optimisation des techniques de surveillance et de contrôle des installations de méthanisation, assortie d'une réduction des coûts. Cet apprentissage ne doit en outre pas uniquement se faire dans des conditions de laboratoire, mais également par le biais d'expériences industrielles à grande échelle, dans lesquelles les conditions de fonctionnement sont en général plus variables et où les programmes de surveillance et de contrôle sont largement déployés et peuvent par conséquent être évalués de façon plus complète.

Il existe évidemment des limites à ce que les programmes de surveillance et de contrôle permettent d'obtenir. Il est crucial de comprendre qu'il n'est pas toujours possible d'exploiter des substrats significativement distincts, ou d'exploiter différemment des caractéristiques générales de l'unité, à moins d'effectuer des changements considérables en termes de conception. Mais leur mise en place peut prendre du temps, perturber le fonctionnement normal du processus et même nécessiter d'importants investissements.

En outre, afin de procéder à des activités de contrôle et de surveillance dans le but de rendre le digesteur plus performant et plus efficace, il peut aussi s'avérer utile de vérifier la qualité du digestat, par exemple, pour respecter les exigences des critères relatifs aux conditions de rejet des effluents ou aux critères de fin du statut de déchet.

De façon identique, la qualité du biogaz et du biométhane doit être continuellement, ou au moins régulièrement, vérifiée. En clair, la qualité du biométhane produit doit être garantie à tout moment. Il est

donc obligatoire de surveiller et enregistrer les données qualitatives et quantitatives pertinentes selon l'utilisation finale du biométhane. Evidemment, les exigences les plus contraignantes doivent être respectées lorsque le biométhane est injecté dans le réseau de distribution de gaz naturel. De plus, si le biométhane est fourni en tant que biocarburant et stocké dans des conditions de haute pression, un certain niveau de surveillance est requis. Outre les obligations légales, un ensemble de paramètres spécifiques relatifs à la mise à niveau des installations doit être surveillé et enregistré pour vérification et interprétation ultérieures, les données requises dépendant de la technologie choisie. La surveillance n'est pas seulement nécessaire pendant la mise en service de l'unité, mais également durant son exploitation. Les données de surveillance sont utiles et peuvent indiquer, lorsqu'elles sont analysées sur la durée de vie en service de l'installation, toute détérioration de sa performance. Elles offrent aussi la possibilité d'augmenter l'efficacité, d'améliorer le rendement et de s'adapter à la demande du réseau (réduction, désengorgement). Enfin, le stockage correct de données sur les paramètres typiques de l'unité prévient les besoins de maintenance, favorise la planification appropriée de celle-ci (entretien des machines, remplacement des consommables, réapprovisionnement en substances chimiques), et optimise ainsi au maximum la disponibilité d'ensemble de l'installation.

3. Recommandations pour les paramètres et programmes de surveillance

De nombreux paramètres peuvent être surveillés au sein de chaque matrice/étape d'une unité de méthanisation et de biométhane (Figure 2). Les paramètres identifiés ont été choisis par les auteurs du présent rapport, d'une part, sur la base des informations disponibles dans la littérature, et d'autre part, sur des années d'expérience pratique s'appuyant sur la recherche liée aux processus de valorisation de la méthanisation et du biogaz, ainsi que sur un travail dans des installations à grande échelle dans l'ensemble de l'Europe.

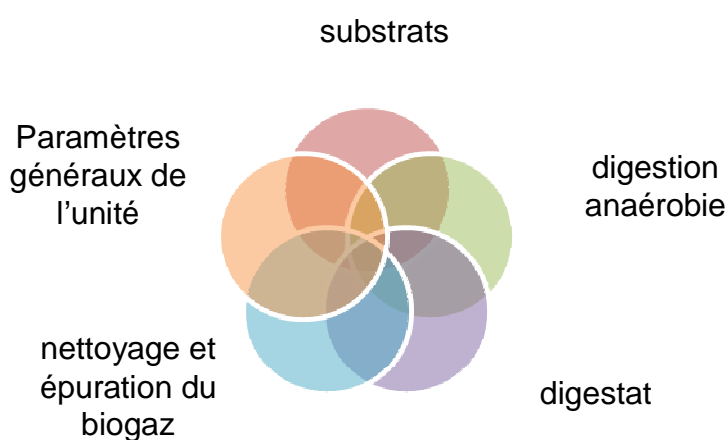


Figure 2 – Interaction des différentes étapes au sein d'une unité de méthanisation et de biométhane.

Les paramètres ont été différenciés selon l'étape/la matrice de l'installation de méthanisation et de biométhane lors de laquelle ils peuvent être mesurés (Figure 3). Le rapport complet associé à la livraison de la Tâche 5.2 comprend une explication plus approfondie de chacun d'eux. L'association de plusieurs paramètres offre une bonne compréhension du fonctionnement des unités et permet d'exploiter un certain nombre d'avantages, parmi lesquels l'optimisation de la production de biogaz et de biométhane. Il n'est pas forcément utile d'examiner tous les paramètres dans toutes les installations. Mais en fonction des cas et des circonstances particulières, il peut s'avérer nécessaire de mesurer des paramètres supplémentaires.

Pour les unités de méthanisation, les substrats et les digestats en particulier, aucun programme de contrôle standard n'a encore été instauré par la communauté des chercheurs ou par les exploitants ; dans les faits, aucun accord n'a été obtenu quant à la meilleure sélection de paramètres à surveiller – des niveaux et des concentrations optimaux ayant été établis pour quelques-uns seulement. Il n'a pas non plus été défini de fréquences optimales ou minimales, étant entendu qu'il serait profitable qu'elles soient plus élevées (mais elles entraînent des coûts supplémentaires : frais de laboratoire externe, investissement dans des capteurs et analyseurs installés dans l'unité, coûts en main d'œuvre pour la réalisation d'analyses *ex situ* ou du calibrage et de l'entretien de ces capteurs). Une fois le programme de contrôle mis en œuvre, les

exploitants doivent également être capables d'interpréter les données des capteurs ou des résultats des analyses biochimiques, puis de les corrélérer et d'identifier toutes les interférences possibles. Ils pourront alors tirer des conclusions sur l'état de l'unité pour mettre en place de nouveaux contrôles ainsi que des actions correctives. Défi supplémentaire : tout doit être réalisé rapidement sous peine de détériorer la fonctionnalité du processus.

Des protocoles de surveillance relatifs à la production de biométhane ont été partiellement établis et ils sont à présent opérationnels, mais la situation varie grandement d'un pays à un autre. Dans l'ensemble, la vérification de la qualité du biométhane est bien définie et des limites ont été fixées pour certains composants, notamment indésirables (dioxyde de carbone, sulfure d'hydrogène, soufre total, ammonium, oxygène et eau). Le méthane n'est en réalité pas directement mentionné dans la plupart des cas, et ses propriétés gazeuses ainsi que sa qualité sont précisées sous la forme d'exigences en termes de valeur thermique, d'indice de Wobbe, de densité ou de densité relative. La fréquence de contrôle et les exigences relatives aux enregistrements de données peuvent varier, et les paramètres ne doivent pas nécessairement être surveillés en continu (des intervalles de mesure de 15 minutes sont souvent suffisants). Néanmoins, une approche et des protocoles de vérification précis sont généralement prévus par la loi ou par l'exploitant du réseau de distribution de gaz naturel.

L'état et la performance du processus de méthanisation peuvent être suivis en mesurant :

- le taux de conversion du substrat (demande chimique en oxygène (DCO), matières solides totales (MST) ou sèches, élimination des substances sèches organiques ou des matières organiques digestibles (MOD)),
- l'accumulation des produits intermédiaires (acides gras volatils (AGV), pH, alcalinité, dihydrogène, monoxyde de carbone),
- la formation de produits (rendement de production de gaz, méthane, dioxyde de carbone).

En résumé, il est généralement convenu que le taux de concentration spécifique des AGV constitue un paramètre critique de surveillance pour les unités de méthanisation. Il s'est avéré que le pH présentait un temps de réponse trop long, et que l'extrême variabilité des pressions partielles du dihydrogène pose des difficultés d'interprétation dans de nombreux cas. Des paramètres complémentaires peuvent également être mesurés ; ceux-ci ont trait aux communautés microbiennes (abondance et diversité des populations) ainsi qu'à leurs activités. Ces analyses microbiennes font, dernièrement, l'objet d'un grand intérêt. La Figure 4 illustre les éventuels éléments de contrôle utilisables pour évaluer la performance des digesteurs. Nombre de ces paramètres sont décrits de façon plus détaillée dans le rapport complet associé à la Tâche 5.2.



Figure 3 – Paramètres de contrôle pour chaque étape/matrice pertinente de l'exploitation d'une unité de méthanisation.

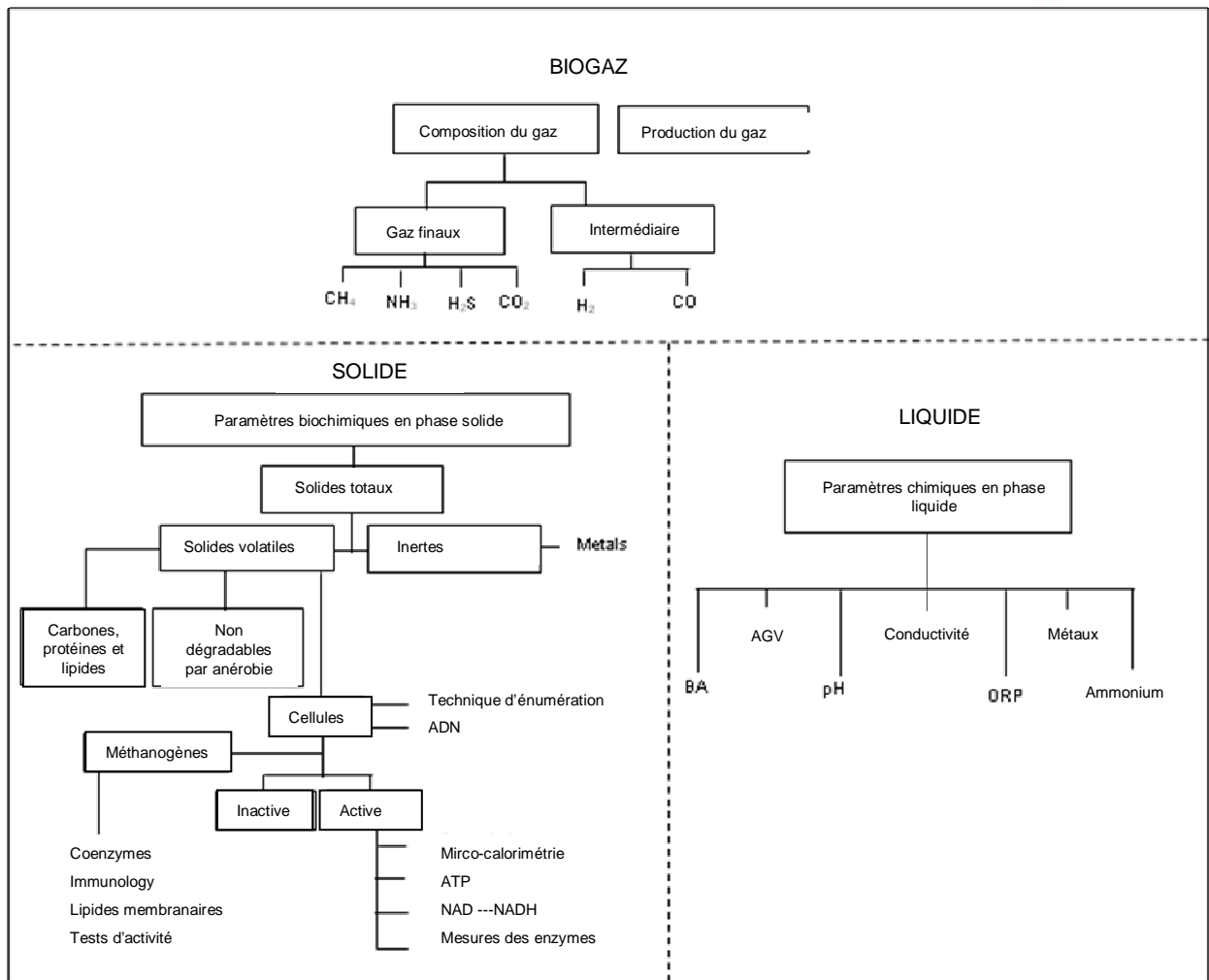


Figure 4 – Tests de caractérisation pour les digesteurs anaérobies à 3 phases.

La Figure 5 introduit la terminologie couramment utilisée pour définir comment la surveillance et l'acquisition de données peuvent être réalisées, illustrées ici dans l'exemple du contrôle de la matrice dans un digesteur.

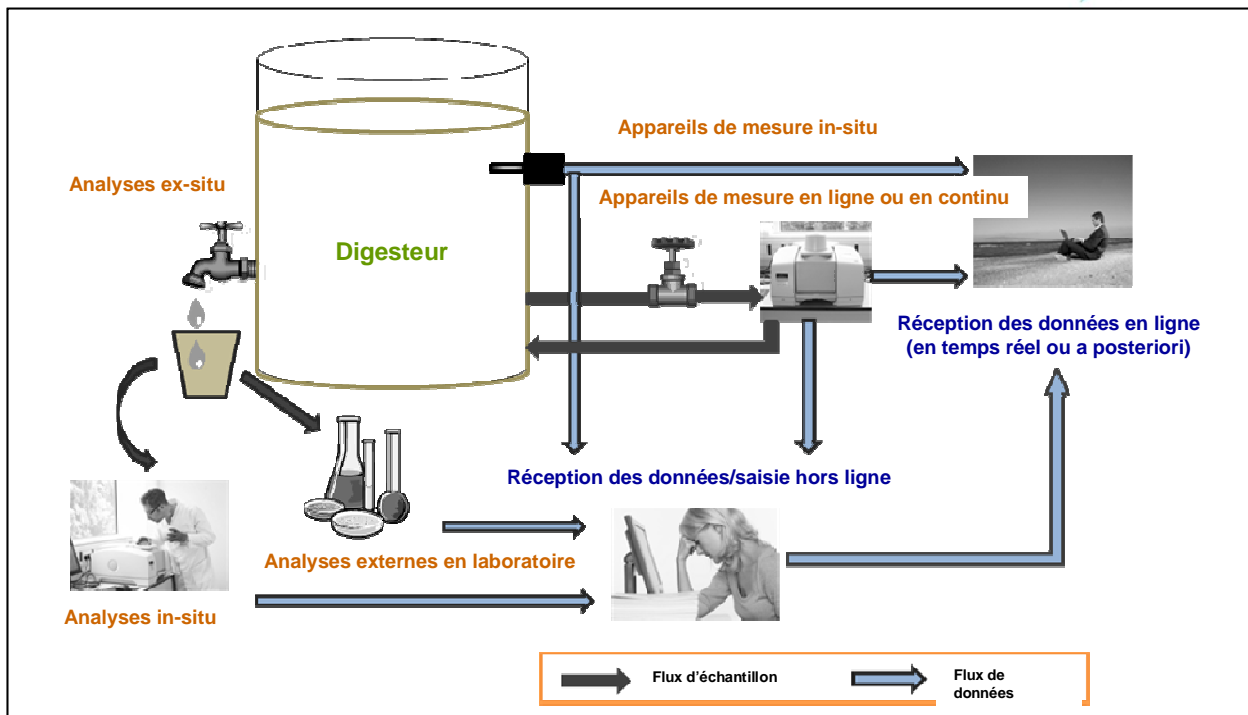


Figure 5 – Concepts/Terminologie utilisés pour définir des programmes de surveillance d'échantillons et de collecte des données.

La réussite d'un système de surveillance est également déterminée par le positionnement approprié de capteurs et par la mise en œuvre de programmes ou protocoles adéquats d'échantillonnage. Ces points sont applicables à n'importe quelle matrice ou étape d'une unité de méthanisation, avec de meilleurs résultats si les matrices sont significativement hétérogènes et pour des échantillons dont les propriétés peuvent être influencées par l'heure de prélèvement et les conditions de stockage, ce qui est en général le cas dans les systèmes de méthanisation. Dans le cas d'une surveillance *in situ*, malgré un moindre risque de difficultés liées à la qualité d'échantillonnage et à la non-représentativité des échantillons (lorsque le digesteur est bien mélangé), les capteurs présentent souvent des problèmes d'encrassement, en particulier ceux qui sont en contact avec les milieux solides/liquides. L'emplacement du capteur/de la sonde ou du point d'échantillonnage est également un élément décisionnel important. Les capteurs *in situ* pour les mesures en ligne au contact des milieux solides et liquides ont tendance à s'encrasser ; ils doivent donc être fréquemment nettoyés et entretenus, sauf s'ils sont équipés d'un dispositif d'auto-nettoyage. Ils peuvent aussi être placés à des endroits où le mélange du contenu du digesteur est faible, où des dépôts de matière inorganique sont susceptibles de se produire, ou encore dans la partie haute des digesteurs, là où la formation de mousse et de croûte peut interférer avec les relevés, sauf si le rôle du capteur est de mesurer ces conditions spécifiques. Pour toutes ces raisons, le positionnement des points d'échantillonnage et des capteurs doit être soigneusement réfléchi, et une certaine flexibilité dans celui-ci doit être prévue au moment de la conception de l'unité. Au regard de tous ces éléments, le choix d'orifices d'échantillonnage différents, l'utilisation de plusieurs paramètres et la mise en place d'une surveillance fréquente constituent une bonne stratégie, car elle permet de compenser l'hétérogénéité des échantillons, l'encrassement des capteurs ainsi que d'autres interférences.

Dans l'idéal, les méthodes de surveillance devraient être mises en œuvre *in situ* ou en ligne, automatisées et réalisées en continu, et offrir des données en temps réel. Il serait ainsi possible de minimiser les interférences et d'obtenir rapidement des indications en cas de déséquilibre ou de modifications importantes dans l'état microbien, ainsi que des renseignements sur la performance systémique. Ceci permettrait également d'effectuer immédiatement des contrôles supplémentaires, même à distance. Toutefois, actuellement, tous les paramètres importants ne peuvent pas être mesurés automatiquement *in situ* ou en ligne sur une base permanente et en temps réel avec des données acquises en ligne. Des difficultés techniques et financières peuvent rendre ces mesures irréalisables ; dans certains cas, l'achat et le fonctionnement de capteurs, sondes ou analyseurs s'avère relativement coûteux, ou encore, le prétraitement de l'échantillon peut être nécessaire pour éviter, par exemple, un encrassement, en particulier lors de l'analyse d'échantillons contenant des particules en suspension.

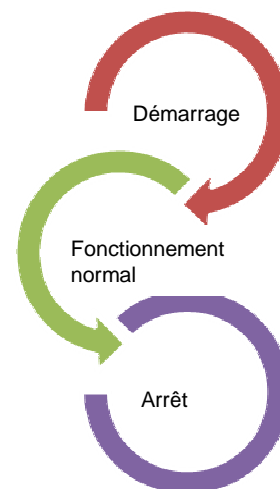
Lors du choix d'une méthode, la précision de mesure requise et la qualité de l'instrumentation doivent être prises en compte. Les outils utilisables dans ce domaine peuvent demander un entretien et des calibrages réguliers. Il faut donc faire très attention aux règles de mesure ainsi qu'aux éventuelles interférences, et les instruments/capteurs doivent uniquement fonctionner dans l'environnement pour lequel ils ont été conçus.

Les méthodologies d'échantillonnage concernent autant l'analyse *ex situ* que la surveillance en ligne (la plupart du temps en cas de fonctionnement intermittent), dans la mesure où la représentativité et la fraîcheur/conservation de l'échantillon sont parfois difficiles à garantir. En outre, si l'apport en substrats est discontinu sur la journée ou la semaine, diverses différences apparaîtront lors du contrôle du contenu du digesteur et du biogaz pendant cette période. Par exemple, si un digesteur n'est pas alimenté les week-ends, ou si son alimentation est significativement réduite, alors les profils du contenu et du biogaz seront différents le lundi par rapport au jeudi, après une alimentation plus intensive du digesteur les jours précédents.

Des programmes de mélange interrompus ou inefficaces peuvent aussi provoquer la présence de contenus irréguliers dans le digesteur, ce qui peut influencer l'homogénéité de l'échantillon collecté. D'autre part, les échantillons prélevés libérant des gaz dissous tels que du CO₂, certaines valeurs, telles que le pH et l'alcalinité, s'en trouvent affectées. D'autres aspects doivent aussi être considérés, comme les récipients en plastiques utilisés pour le prélèvement, qui peuvent absorber une petite partie des AGV et d'autres composés.

En résumé, le choix de programmes de surveillance non standard en termes de sélection des paramètres et de fréquence d'analyse est principalement justifié par la complexité du processus de méthanisation et la grande variation dans les substrats utilisés, les types de digesteurs, les conditions de fonctionnement et la finalité de l'unité. Différents programmes de contrôle d'une installation de méthanisation peuvent être appliqués en fonction des trois étapes de fonctionnement de l'unité :

- 1) le démarrage,
- 2) le fonctionnement normal, incluant un « état presque ou quasi stable » ainsi que des conditions de fonctionnement plus transitoires,
- 3) l'arrêt.



Chacune de ces étapes présente des exigences spécifiques en matière de surveillance. La fréquence de contrôle peut être assouplie en fonctionnement normal dans des « conditions presque stables » ; c'est le cas, par exemple, pour un grand nombre d'unités traitant régulièrement des cultures énergétiques spécifiques. En revanche, les programmes de contrôle doivent s'appuyer sur des mesures plus fréquentes et prendre en compte plus de paramètres lors du démarrage (en particulier lorsque l'inoculum introduit (boues) provient de digesteur(s) traitant des substrats différents) et durant des conditions de fonctionnement transitoires ; c'est par exemple la situation des installations de méthanisation utilisant des biodéchets pour lesquels des modifications fréquentes dans l'apport en substrats sont usuelles.

Il est également important de comprendre que certaines modifications induites par l'alimentation en substrat ou que des changements dans les conditions de fonctionnement peuvent prendre du temps pour altérer significativement la performance de l'unité de méthanisation. Il peut alors être utile de mettre en place une surveillance sur des périodes allant jusqu'à trois temps de séjour hydrauliques (TSH), ce qui peut représenter, pour certaines installations de méthanisation, plusieurs mois. Pendant celles-ci et dans de tels cas, le contrôle doit être effectué plus fréquemment (un certain nombre de paramètres doivent être vérifiés au moins deux fois par semaine). Dans de telles situations, la surveillance des évolutions des paramètres devient plus importante que le seul fait d'éviter certains taux/limites. La manifestation tardive d'une performance sous-optimale peut être liée au temps requis pour obtenir certaines concentrations d'un composé dans le digesteur, par exemple celles des ions métalliques légers de sodium, calcium et potassium ou ammonium, qui peuvent uniquement atteindre des taux excessifs capables de créer d'importantes inhibitions au bout de quelques temps. Une tendance à la hausse des concentrations indiquerait toutefois la probable apparition de problèmes à un moment donné. Cela étant, la performance ne se détériore pas forcément. En effet, même si certains substrats et certaines conditions de fonctionnement ne sont pas tolérés au départ, le digesteur peut être à même de s'y adapter, après un régime d'alimentation modéré permettant l'acclimatation et la modification de la population microbienne.

En raison de l'influence des facteurs exposés ci-avant, il est difficile d'établir des généralités quant à des paramètres et des fréquences appropriées de surveillance requis applicables à l'ensemble des unités de méthanisation. Les exploitants doivent régulièrement se pencher sur un grand nombre d'interrogations relatives au fonctionnement technique. La Figure 6 présente les questions que les exploitants doivent

systématiquement se poser. Plus un exploitant obtient de réponses affirmatives (« OUI »), plus le programme de contrôle de l'unité de méthanisation doit être exhaustif.

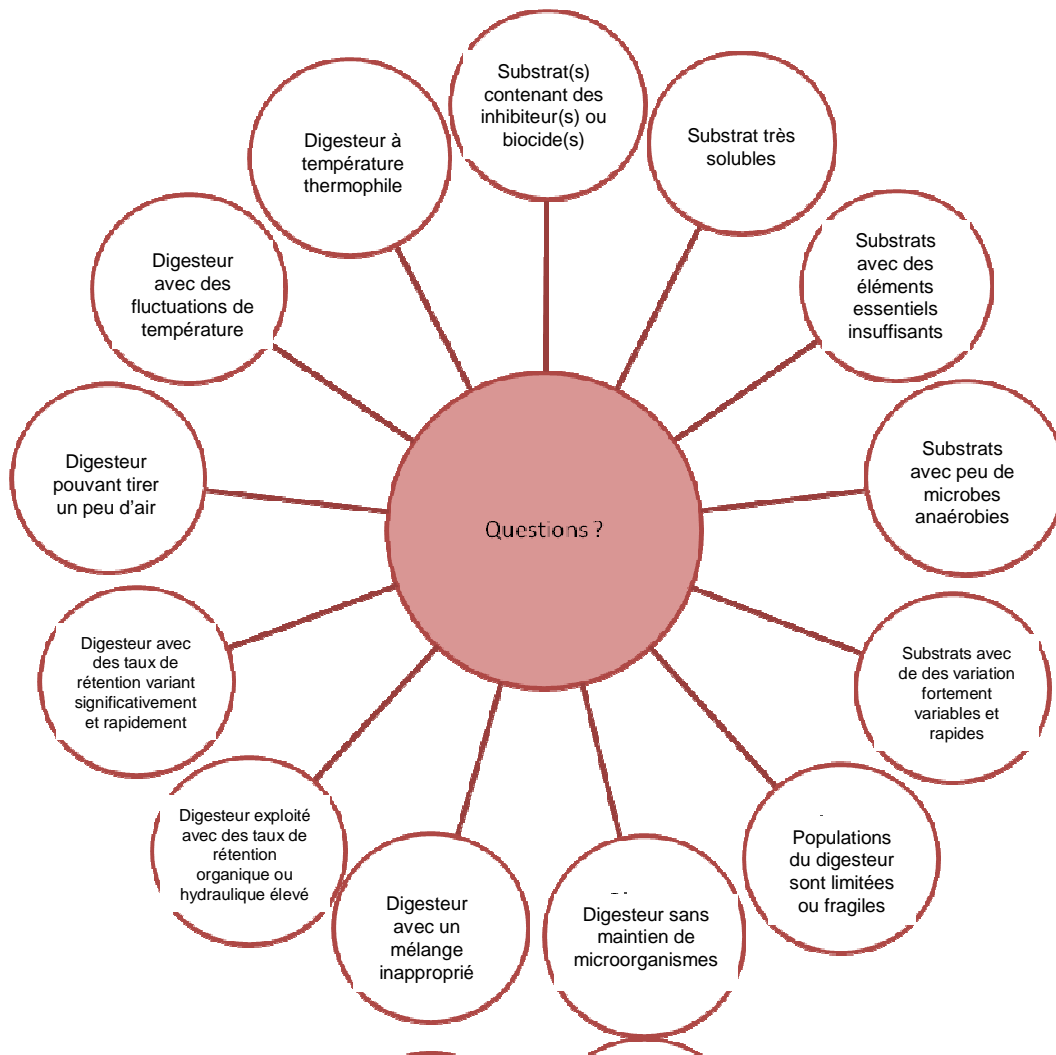


Figure 6 – Questions auxquelles les exploitants doivent régulièrement répondre.

Un effort a en outre été fait dans le présent rapport pour dégager trois grandes classes de fonctionnement d'un digesteur ; celles-ci indiquent un niveau de risque ainsi que des suggestions de programme de contrôle pour chacune. Dans tous les cas, la température doit être surveillée et maintenue dans la fourchette optimale (mésophile ou thermophile) et aucune entrée d'air ne doit se produire dans le digesteur. L'inoculation d'un digesteur doit être réalisée à partir de sources provenant d'un/de digesteur(s) fonctionnant correctement, dans l'idéal avec des substrats similaires afin d'apporter une culture adaptée et une bonne diversité. Plusieurs types d'inocula peuvent être mélangés pour assurer la présence d'une grande variété de microbes. Les matériaux inertes doivent être éliminés autant que possible avant l'entrée

dans le digesteur ou faire l'objet d'un programme d'élimination approprié. Sinon, au fil du temps, les digesteurs se remplissent de sables et précipités, ce qui diminue leur volume de travail et altère le rendement du processus de mélange.

Classe A – Unité de méthanisation optimisée fonctionnant dans des conditions stables – Risque faible

Dans cette catégorie, les programmes de surveillance peuvent être plus souples en ce qui concerne la diversité des paramètres. La fréquence de contrôle peut aussi être moindre lorsque les unités de méthanisation :

- sont exploitées de façon optimale et ne sont pas poussées au maximum ou au-delà des taux de charge organique ou hydraulique selon le type de digesteur et de substrats utilisés,
- fonctionnent dans des conditions plutôt stables sur de longues périodes (c'est-à-dire utilisant les mêmes types et taux de charge de substrat(s)),
- fonctionnent sans conditions inhibitrices (nutriments et métaux suffisants et sans excès, aucun biocide introduit, capacité tampon adéquate).

Dans ces conditions, les contrôles du débit et de la composition du biogaz peuvent être effectués de façon continue ou très régulière, et s'appuient sur des mesures hebdomadaires du pH (consulter toutefois l'explication de ses inconvénients en tant que paramètre de contrôle dans le rapport complet), ainsi que de l'alcalinité du bicarbonate et de la concentration totale (au moins) des AGV. Ceci permet d'obtenir une évaluation raisonnable de la performance du/des digesteur(s). La caractérisation des substrats peut aussi se faire hebdomadairement et inclure pour le moins du contenu solide (MST ou MOD) afin de vérifier les taux de charge dans le digesteur. D'autres paramètres peuvent être examinés occasionnellement pour vérifier la performance d'ensemble ou pour respecter des exigences réglementaires nationales, comme par exemple, la preuve de la qualité du digestat. Un suivi plus approfondi est requis en cas d'évolution de la performance, indiquée par les niveaux totaux d'acides et d'alcalinité, les mesures du biogaz et les changements dans les propriétés des substrats ou digestats. Ce programme de contrôle pour de tels types d'unités permettra probablement d'éviter d'importantes défaillances.

Classe B – Unité de méthanisation fonctionnant dans des conditions transitoires – Risque modéré

Le programme de contrôle ci-après conviendra aux unités de méthanisation qui ne sont pas poussées au maximum ou au-delà des taux de charge organique ou hydraulique pour le type de digesteur et de substrats utilisés, mais qui fonctionnent à certaines périodes dans des conditions transitoires avec, par exemple, des variations dans le type de substrats et les taux de charge organique et hydraulique. Pour optimiser le fonctionnement (taux de charge et toute inhibition éventuelle), les substrats doivent être analysés au moins une fois par semaine pour un contenu solide et plus fréquemment en cas de

changement significatif de substrat. Dans ce dernier cas, les caractérisations suivantes doivent également être réalisées :

- ratio C:N:S:P (carbone : azote : soufre : phosphore),
- métaux (calcium, sodium et potassium selon les types de substrats).

L'examen du débit de biogaz et des concentrations gazeuses doit être continu, et le contenu du digesteur doit être vérifié environ trois fois par semaine pour des paramètres tels que l'alcalinité, le pH et le taux de concentration spécifique des AGV (acides acétiques, propioniques, butyriques, iso-butyriques, valériques et iso-valériques). D'autres éléments doivent également être régulièrement évalués, tels que les oligo-éléments, l'ammonium et certains métaux alcalins (alcalino-terreux), en fonction des substrats utilisés. Si la performance n'est pas optimale, il peut être nécessaire de prendre en compte plus de paramètres et d'instaurer une surveillance plus fréquente de façon à exécuter des contrôles plus efficaces.

Classe C – Unité de méthanisation fonctionnant à des taux de charge maximums (y compris les systèmes de digestion à taux élevé avec des TSH courts) dans des conditions significativement transitoires – Risque élevé

D'autres unités de méthanisation peuvent nécessiter des programmes de contrôle plus rigoureux. Par exemple, lorsqu'un digesteur combine certains des scénarios de fonctionnement suivants :

- fonctionnement très proche du taux de charge organique maximum ou du temps de séjour le plus court prévus dans les caractéristiques de conception,
- présence de conditions pouvant entraîner, dans certains cas, une carence en nutriments et en oligo-éléments,
- alimentation ou génération potentielles à des concentrations élevées de composés inhibiteurs, tels que des métaux alcalins (alcalino-terreux), des acides gras à longue chaîne ou certains biocides (agents de nettoyage),
- apparition très rapide de modifications significatives dans la composition du substrat.

Dans de tels cas, le suivi d'un ensemble de paramètres liés au biogaz, au(x) substrat(s) et au digestat est essentiel, et il pourra être profitable de les mesurer de façon continue, ou semi-continue sur une base très fréquente, *in situ* ou en ligne avec des données reçues en temps quasi-réel. Si des analyses *ex situ* ou biochimiques manuelles sont nécessaires, elles doivent être réalisées de façon à obtenir très rapidement les résultats, pour que, le cas échéant, des contrôles puissent être promptement exécutés. Outre la surveillance en ligne du débit de biogaz ainsi que de la teneur en méthane et en sulfure d'hydrogène (selon le type de substrats), il peut être nécessaire de procéder au moins quotidiennement à une vérification de paramètres tels que le rendement d'élimination organique, l'alcalinité, le taux de concentration spécifique des AGV, l'ammonium et certains métaux alcalins (alcalino-terreux) (selon le type de substrats). Des inspections fréquentes des oligo-éléments doivent également être effectuées. L'examen de l'activité enzymatique bactérienne et le profilage microbien peuvent aussi s'avérer utiles, en particulier lorsque le diagnostic de la cause d'une baisse de performance du digesteur ne peut être posé à partir d'autres

valeurs. De nombreux digesteurs à taux élevé fonctionnant avec des TSH courts (inférieurs à quatre jours) pour des substrats à faible teneur en matières solides en suspension dotés d'un consortium microbien immobilisé, nécessiteront généralement ce type de programme de contrôle, dans la mesure où, ne serait-ce que sur une semaine, l'impact sur la biochimie du digesteur peut être important. D'autres modes plus souples de surveillance s'avèreront plus limités dans leur aptitude à optimiser une unité dont les conditions de fonctionnement diffèrent et changent rapidement, et ils réduiront la possibilité d'identifier avec certitude la cause d'une moindre performance ou d'une défaillance.

Dans tous les cas, il est important de garder à l'esprit que, plus le nombre de paramètres surveillés est grand, plus les conditions du processus pourront être modifiables et plus le suivi sera flexible. On ne dispose jamais de trop d'informations, et plus elles sont obtenues rapidement, plus le contrôle pourra être mis en œuvre promptement.

Pour les systèmes dans lesquels des micro-organismes effectuent les tâches cruciales, le temps est essentiel. L'analyse et la compréhension des données sont également fondamentales, et, par conséquent, la connaissance et l'expérience de l'exploitant ne doivent pas être négligées. Un contrôle correct donne à l'exploitant un aperçu du déroulement du processus de méthanisation ainsi que des propriétés du digestat produit. La surveillance de paramètres spécifiques à intervalles réguliers permet la déduction de tendances et offre à l'exploitant la possibilité d'identifier à l'avance toute situation critique, lui laissant du temps pour adopter des actions préventives ; c'est l'élément clé pour la réussite à long terme des opérations. Si les unités de méthanisation ne font pas l'objet au moins d'un contrôle de leurs paramètres clés, il est alors très difficile de profiter pleinement du système. C'est comme si l'exploitant « conduisait une voiture sans pare-brise ou volant ». Il devient alors ardu d'établir une référence de fonctionnement et d'optimiser la production de l'unité. Il est alors également difficile d'appréhender les principaux facteurs contributifs en cas de panne, ce qui limite en conséquence la capacité à mettre en place rapidement des actions correctives (et rentables le cas échéant).

Quand les unités ne sont pas surveillées et contrôlées efficacement, la performance du digesteur est susceptible de ne pas être optimale, et, dans le pire des scénarios, une défaillance sur le plan biochimique peut survenir dans celui-ci. La nécessité d'inoculer et de démarrer de nouveau le digesteur peut provoquer un retard d'exploitation de plusieurs mois. Par exemple, si un taux de conversion acceptable des matières organiques en biogaz n'est pas atteint, alors, la baisse de la production d'énergie s'accompagnera d'une augmentation des pertes d'émission potentielles dans l'environnement, à éviter. Une bonne compréhension de l'état du processus au niveau opérationnel est donc impérative.

Outre l'importance que présente une surveillance fréquente basée sur des critères multiples, la tenue d'enregistrements corrects et le stockage de données sur de longues périodes sont également profitables. Ces informations doivent être conservées dans un format facilement récupérable et pouvoir être comprises

par un exploitant différent. Il est courant de ne pas enregistrer les changements apportés au type de substrat et aux charges ainsi que les modes de fonctionnement, ce qui rend difficile l'interprétation des évolutions dans la réponse du processus et dans les données de performance. Pour les unités de méthanisation non soumises à un important programme de surveillance, afin de pouvoir analyser l'apparition de certains changements, de petits échantillons peuvent être stockés dans un congélateur dédié pendant quelques mois, de façon à pouvoir être analysés le cas échéant.

Un grand nombre de chercheurs ont examiné les paramètres et programmes de surveillance pour la méthanisation (Madsen *et al.*, 2011 ; Boe *et al.*, 2010 ; Monson *et al.*, 2007). Des recherches plus approfondies dans ce domaine se poursuivent ; elles portent, d'une part, sur la compréhension de la biochimie du processus et les réponses des paramètres, et, d'autre part, sur le développement de nouvelles techniques de contrôle, l'amélioration de leur fiabilité et la réduction de leurs coûts. Il est par conséquent utile, non seulement de continuer à étudier la littérature universitaire et les documents commerciaux, mais aussi de rester à l'affût de la mise sur le marché à l'avenir de nouveaux dispositifs de surveillance/capteurs/analyseurs moins enclins aux interférences et à l'encrassement, automatisables et fournissant des données en temps réel.

4. Paramètres généraux (la conception, le fonctionnement et les performances)

Les unités de méthanisation sont normalement décrites par une série de paramètres qui sont énumérés ci-dessous. Ceux-ci décrivent les paramètres de conception, de fonctionnement, de performances et comprennent la production annuelle et de l'utilisation de l'énergie. Cette information est généralement utilisée pour résumer le profil de l'unité de méthanisation et permet l'analyse comparative entre les processus et les unités ainsi que pour cartographier le potentiel des régions. Ces données sont compilées au stade de la conception et basées sur les performances attendues mais elles peuvent être révisées si les substrats, la performance ou le process change. Ces révisions peuvent être élaborées à partir de la documentation de l'opérateur. L'information fournit un aperçu général du type et de la performance de l'usine de biogaz et de biométhane. Cette information devrait inclure:

Identification des types de substrats utilisés

Technologie de digestion (phase humide ou sèche, mésophile ou thermophile, en batch ou en continu, écoulement à piston ou infiniment mélangé, un ou plusieurs étages, système lit de boues anaérobies (UASB) ou lit fixé)

Degré de dégradation lors de la digestion (% MOD détruites)

Quantité de digestat (tonnes par an)

Spécification du marché du digestat (avec ou sans séparation de phase (liquide et solide))

Débit de chargement journalier ou annuel (par ex. tonnes par jour/an)

Taux de charge organique

Quantité de matière sèche organique ou de matière solide volatile qui est chargée par volume de digesteur et par jour (kg MOD or DCO/m³.j)

Taux de charge volumique

Quantité de matière (humide) chargée par volume de digesteur et par jour (kg de matière (humide)/m³.j)

Temps de rétention hydraulique (TRH)

Temps de séjour moyen des substrats dans le digesteur
(volume digesteur m³ / taux journalier d'alimentation en substrat m³/j)

Production annuelle/journalière de biogaz/biométhane (Nm³ CH₄/an)

Pouvoir méthanogène

CH₄ produit par tonne de substrat (poids humide ou MOD ou DCO) ajouté ou détruit (Nm³ CH₄ / tonne MOD ajoutées ou détruites)

Quantité de méthane ou de biogaz produit par volume du digesteur et par jour (Nm³ CH₄ / m³ digesteur/j.)

Condition standard de température et de pression (N) généralement 273 K, 1013 hPa

Valorisations énergétiques : par l'unité, sur le site et vers des tiers

Valorisation du biogaz: cogénération (chaleur et électricité) ou épuration du biogaz en biométhane (pour injection dans le réseau de gaz naturel ou carburant)

Puissance du moteur ou turbine (MW_e)

Capacité d'épuration (Nm^3 biogaz/h) et de production (Nm^3 biométhane/h)

Production de chaleur ou électricité annuelle ou journalière (ex. MWh_e ou MWh_{th}/an)

Utilisation annuelle ou journalière d'électricité et de chaleur par l'unité de méthanisation et celle de biométhane (ex. kWh_e ou kWh_{th}/an)

Besoin supplémentaire en énergie - gaz naturel, fioul ou électricité (kWh_e ou kWh_{th}/an)

La compilation et l'enregistrement de ces informations fait partie des bonnes pratiques générales et dans de nombreux cas cela est requis par des réglementations environnementales nationales ainsi que pour les déclarations sur les énergies renouvelables qui a été promues par les programmes gouvernementaux.

5. Principales mesures et techniques utilisées pour la surveillance des unités de biogaz et biométhane

La surveillance d'unités de méthanisation et de transformation de biogaz repose sur un certain nombre de méthodes analytiques et techniques qui ont été développées et sont appliquées dans de nombreux procédés de la biotechnologie, de la chimie et de l'ingénierie. Toutefois, dans certains cas, une méthodologie spécifique a été conçue de telle sorte que ses principes de mesures largement appliquées dans de nombreux domaines peuvent l'être aussi spécifiquement pour les systèmes biogaz. Dans de nombreux cas, par exemple, la préparation des échantillons a été nécessaire à cause de l'encrassement biologique et à la haute teneur en matières solides en suspension dans ces derniers.

Principes de mesure reposent sur un nombre limité de caractéristiques physiques, chimiques ou biologiques, ou des combinaisons de celles-ci. Certains principes de mesure peuvent être utilisés pour évaluer plus d'un paramètre alors que certains paramètres peuvent être mesurés en utilisant des principes différents. Le choix du principe à utiliser pour la surveillance peut être fait en fonction des coûts, la précision, le temps nécessaire à l'analyse, les interférences potentielles et les exigences pour la préparation des échantillons. Certaines des méthodes de mesure les plus importantes qui ont été appliquées aux systèmes de digestion anaérobie comprennent les paramètres suivants :

1. Gravimétrie
 - Méthode simple pour quantifier des composés basé sur la masse (ceci est parfois combiné à un/des prétraitement(s) par exemple ; chauffer pour évacuer l'humidité pour la caractérisation MST.
2. Chromatographie
 - méthode physique de séparation fondée sur les différences d'affinités des substances à analyser à l'égard de deux phases, l'une stationnaire, l'autre mobile (basé sur la solubilité relative, l'adsorption, la taille ou la charge)
 - peut être utilisée avec des liquides ou des gaz et peut être utilisée pour mesurer les AGV individuel et la composition d'un gaz.
 - Cette technique présente plusieurs types : chromatographie en phase gazeuse (GC), chromatographie en phase gazeuse avec espace de tête (HS-GC) et chromatographie en phase liquide à haute performance (HPLC)

3. Electrochimie
 - Basée sur la mesure de potentiel électrique, actuel ou résistant grâce à des électrodes
 - Peut être utilisée sur des échantillons liquides pour mesurer le pH, redox, la conductivité et le nombre d'ions comme l'ammonium, le calcium, différents métaux lourds, carbonate et sulfure. Il a également été utilisé pour mesurer l'hydrogène dissous
4. Titrimétrie
 - mesure de la quantité de réactif qui réagit avec le composant à évaluer
 - peut être utilisée pour mesurer l'alcalinité et être utilisée comme une méthode de substitution pour mesurer AGV totaux
5. Biocapteurs
 - Combine la sélectivité des substances biologiques avec la microélectronique et l'optoélectronique
 - Peut être utilisée pour mesurer la DBO, et plus récemment, de l'ammoniac et AGV totaux
6. Nez électronique pour mesure gazeuse
 - L'utilisation de réseaux de capteurs de gaz électroniques, dits «nez électroniques» ou traceur de composés volatils ont été utilisés pour mesurer l'activité métabolique, indirectement
 - Ce type de capteur peut avoir un potentiel prometteur dans la filière méthanisation car ils sont non-invasifs. Cependant, l'équilibre de phase liquide-gaz est limité dans les systèmes anaérobies et d'autres recherches doivent encore être effectuées si les nez électroniques doivent être utilisés dans le domaine.
7. Microbiologie et outils moléculaires
 - Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour le dénombrement des micro-organismes ou d'analyse de l'ADN / ARN. Il s'agit notamment de microscopie, fluorescence in situ hybridation (FISH), électrophorèse sur gel dénaturant gradient (DGGE), la réaction en chaîne par polymérase en temps réel (PCR quantitative) et l'ADN séquenceurs
 - Ces techniques ont fait des progrès considérables au cours des dernières années et leur application est susceptible de devenir plus répandue dans les systèmes de digestion anaérobie dans le futur
8. Spectrométrie
 - mesure l'absorbance, la transmission, la diffusion ou la fluorescence de rayonnement dans l'ultraviolet (UV), le visible (VIS) et l'infrarouge (IR)
 - la spectroscopie moléculaire mesure les liquides, tandis que la spectroscopie atomique mesure les composés en phase gazeuse
 - En fonction de la performance de l'analyse photométrique, les mesures de concentration comme par exemple DCO, NH₄-N et AGV, peuvent souffrir d'interférences à partir de matières particulaires et de coloration intrinsèque de l'échantillon
 - Les applications importantes de ces techniques pour la méthanisation ont été étudiées dans la dernière décennie



Certains principes de mesure présentés ci-dessus ont, ou peuvent être appliqués en théorie, pour construire des instruments pour mesurer les paramètres en ligne dans les systèmes de digestion anaérobie. Un certain nombre d'entre eux ont été construits et exploités dans les laboratoires, mais dans certains cas, ils n'ont pas encore été pleinement développés comme des instruments commerciaux (par

exemple, online HS-GC capteur de base pour les mesures des AGV (Boe et coll., 2007) et l'analyseur d'alcalinité bicarbonatée intermittente rapportée par Esteves et al., (2000)). Aussi les tendances récentes en matière de surveillance utilisent la spectroscopie infrarouge (IR) et des techniques d'analyse multivariée pour estimer un certain nombre de paramètres liés à la méthanisation. La spectroscopie IR a été utilisée par exemple lors de la surveillance des AGV, de l'alcalinité (partielle ou totale), de la DCO, du carbone organique total (COT), MST et MOD, pour l'identification des boues d'épuration primaire par rapport aux boues secondaires, ainsi que le potentiel en biométhane dans certains cas pour différents substrats et du fonctionnement du digesteur par des chercheurs dont Steyer et al. (2002), Lomborg et al. (2009), Jacobi et al. (2009), Reed et al. (2011) et Lesteur et al. (2011). Un analyseur qui nécessite peu d'entretien a été en mesure de délivrer plusieurs paramètres et les résultats ont été assez fiables. Toutefois, dans certains cas, la préparation de l'échantillon par filtration ou séchage a été effectué, ce qui signifie que la technique ne peut pas être utilisée in situ ou avec un enregistrement continu, pour l'acquisition de données. Toutefois, ces exigences de prétraitement n'ont pas été universelles. Les modèles de données doivent cependant être construits et calibrés pour les corrélations voulues, ce qui dans de nombreux cas signifie un temps considérable d'investissement. Et, comme un modèle ne peut pas nécessairement convenir à la corrélation(s) pour différents types de substrats, cela peut reporter l'utilisation de ces techniques par l'industrie. Mais quand le(s) modèle(s) ont été étalonnés le temps de mesure d'un cycle est de l'ordre de quelques minutes. D'importante R&D liés à cela continue d'être effectuées et certains modèles ont déjà été commercialisés. Plusieurs modèles ont été produits par un certain nombre d'institution académique et d'entreprises. La spectrométrie Raman a déjà commencé à être utilisée. La chimométrie acoustiques sont à l'étude et pourrait avoir un certain potentiel pour une utilisation dans les systèmes de digestion anaérobie (par exemple, Lomborg et al., 2009 et Lhunegbo et al., 2012).

6. Les coûts et les profits de la surveillance des unités de digestion anaérobie et de biométhane.

Pour le contrôle du processus de la méthanisation, des outils de mesure en temps réel des paramètres biochimiques sont complémentaires des mesures de débit d'écoulement et de composition du biogaz. Cependant ces outils ne sont pas toujours utilisés pour raison de non-disponibilité ou à cause des coûts. Les données sur les coûts concernant ces détecteurs de contrôle et des analyseurs, ainsi que des analyses de laboratoire ou/et de contrat de surveillance d'unité de méthanisation sont difficiles à obtenir. Ceci est lié à différentes situations d'installation et aux spécificités régionales. Une sélection d'informations sur les coûts a pu être réalisée malgré tout provenant de quelques pays européens et ont pu être synthétisées dans le document ci-dessous.

Coût général du matériel d'analyse, analyse de laboratoire et des contrats de surveillance d'unités de méthanisation.

Les analyseurs en temps réel mesurent en général le débit d'écoulement et la composition du biogaz et du biométhane. Les coûts pour des analyseurs multi-composants, qui mesurent la concentration du CH₄, CO₂, O₂ et H₂S varient de 20k à 80k euros selon le principe de mesure, le niveau de précision, si la mesure est faite en continue ou non, s'il y a la fonction de calibration automatique et séchage de gaz. Des mesures du débit d'écoulement du biogaz et du biométhane, corrigées de la pression et de la température peuvent être réalisées avec des analyseurs qui coûtent entre 5k et 12k euros selon le débit d'écoulement. La mesure du pH peut être réalisée en temps réel ou ex-situ. Le coût d'un échantillon de pH est autour de 300 euros et la boîte de transmission du signal demande 700 à 900 euros de plus.

Des analyses ex-situ peuvent être faites pour les paramètres de biochimie des matières premières et pour les caractéristiques du digestat. Ces analyses peuvent être faites par du matériel d'analyse sur place ou ils peuvent être envoyés à des laboratoires extérieurs. Par exemple le coût pour un analyseur des acides gras volatiles (AGV), qui donne la concentration pour l'acide acétique, l'acide butyrique et l'acide propénoïque est de 35k euros, alors que le coût pour un appareil de titrage est autour de 1,7k à 3,8k euros. Des coûts supplémentaires sont à prendre en compte pour les consommables, la maintenance et le temps d'utilisation.

Le tableau numéro 4 fait une synthèse des coûts de laboratoire collectés en Europe. Il apparaît, que les coûts varient selon la méthodologie et le niveau de revenu de la région/ du pays. Il n'est pas courant que ces données d'analyse soient accessibles. Pour certains paramètres comme pour la population microbienne, l'analyse des AGV et le potentiel de biogaz ou de biométhane, les analyses sont faites en majorité par les laboratoires des universités ou d'autres instituts de recherche. Très peu de laboratoires commerciaux peuvent réaliser ces mesures jusqu'à aujourd'hui. Des contrats de surveillance pour des unités de méthanisation se différencient par le contenu et les coûts, mais couvrent en général des informations de base pour éviter des problèmes du digesteur et pour garantir la conformité avec la réglementation et coûtent de 5k à 40k EUROS. Bien sûr un contrat plus cher ne garantit pas que le bon

fonctionnement du digesteur, mais aussi une optimisation continue de l'installation par des conseils techniques et des analyses de laboratoire. Les valeurs sont à titre indicatif, car toutes les unités de méthanisation ne fonctionnent pas pareil et la fréquence d'analyse et le conseil qu'en résulte diffère de façon significative.

Le rapport (aussi dans les projets de BMR) avec le titre 'ANALYSES ET RECOMMANDATIONS DE SURVEILLANCE POUR L'OPTIMISATION DES UNITES DE METHANISATION ET DE BIOMETHANE' contient quelques références pour le contrôle et les coûts de plusieurs unités de méthanisation en Europe.

Tableau 4 – Coûts d'analyse des quelques paramètres importants de laboratoires externes (si pas de spécification les coûts sont indiqués par échantillon)

Paramètre	Coûts de laboratoire
Potentiel de biogaz ou de biométhane pour le substrat et le digestat (test en discontinue et en général autour de 30 jours ; la méthodologie peut varier, les résultats peuvent comprendre des matières solides ainsi la composition du biogaz ; le pH et les AGVs peuvent être présentés à la fin du test et un contrôle peut être mis en route en parallèle).	€ 520 – 800
Composition de biogaz (CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S, O ₂)	€ 20 -30/ gaz
pH	€ 5 - 10
MST Matière sèche totale	€ 6 - 40
MSo Matière sèche organique	€ 9 - 40
DCO	€ 30 - 60
Eléments (N, P, K)	€ 35 - 85
Analyse élémentaire (Carbone, hydrogène, nitrogène, soufre et oxygène)	€ 210
TNK	€ 14 - 45
NH ₄ concentration	€ 15 - 40
AGVs	€ 50 – 100 (Total) Séparée en 6 AGVs €120 Par analyse supplémentaire €30
Métaux lourds (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn)	€ 65 - 129
Cations et Anions (sodium, potasse, ammonium, phosphore, chlore, nitrate, nitrite)	€ 80 - 125
Oligoéléments (cobalt, nickel, sélénium, molybdène, fer, tungstène)	€ 50 - 135
Paramètres d'hygiène (salmonella, E coli, Enterococci)	€ 150 - 210
Population microbienne identification par la PCR quantitative (Eubac et autres bactéries méthanogènes)	€ 470
16 S pyroséquençage (selon la longueur et la taille des données)	€ 720 - 1650
Analyse génétique du milieu bactériologique (données de 1 Mo)	€ 1200
Activité méthanogène spécifique (selon la méthodologie et le nombre de substances testées)	€ 75 – 280

Remarque: Les analyses sont faites avec trois répétitions et les coûts sont hors taxes. Une remise de 10-20% est faite pour des contrats de surveillance de longue durée ou pour des échantillons multiples. Quelques laboratoires ont des charges minimums.

6.2 Exemples où la surveillance augmente la performance de l'unité.

Deux exemples simples sont présentés dans le rapport pour montrer l'avantage économique de la surveillance, qui entraîne une augmentation de la production de biogaz.

Unité basée sur des intrants agricoles (en fonctionnement en Autriche)

puissance de l'installation (initiale)	500 kWe
Substrat (par an)	Lisier de porc (1 600 tonnes), trèfle (175 tonnes) et cultures énergétique (ensilage de maïs, toute la plante, 8 500 tonnes)
Tarif de rachat d'électricité	170,2 € / MWh
Energie électrique achetée (initial)	4,077 MWh
Rendement de biogaz de l'ensilage par tonne MSo	600 m ³ / t MSo
Tarif de vente de chaleur produite	22,5 € / MWh
Chaleur produite (initial)	1,937 MWh
Coûts ensilage	62,5 €/ t MS
Coûts d'investissement	2 041 000 €

Sans prendre en compte la taxation du revenu annuelle ou autres investissements majeurs nécessaires à l'amélioration de l'installation, une meilleure conduite de la production de biogaz liée à la surveillance peut augmenter le rendement de biogaz de l'ordre de 10% ce qui entraîne 72 000 € de revenu supplémentaire par an ou de 150 000 € si le rendement de biogaz augmente de 20%.

Unité de méthanisation traitant principalement des déchets IAA (en fonctionnement au Royaume Uni)

puissance de l'installation (initiale)	1 MWe
Substrat (par an)	30 000 tonnes de déchets alimentaires triées au lieu de production
Tarif de base d'énergie produite	9,24 p/kWh
Tarif d'export pour l'électricité et chaleur	4,64p/kWh and 2p/kWh

A titre d'exemple une hausse de 20% de production de biogaz avec cette unité de méthanisation entraînera une augmentation de son chiffre d'affaire de 200 000 £ (livre sterling) par an pour la vente d'électricité et de chaleur avec ce tarif de base. Le revenu augmentera aussi, si la production de chaleur est aussi éligible à la prime de chaleur. Une autre possibilité sera, qu'à travers la hausse de production de biogaz, le traitement de déchets IAA augmente et parallèlement la redevance déchets également.

Une augmentation de production de méthane de plus de 10% a été simulée dans le projet pour une sélection d'unités et les rapports produits vont être mis à disposition sur le site web du projet Biomethane Regions.

6.3 Consigne pour la surveillance d'une unité en augmentation de production

Tout d'abord, les paramètres de qualité et de quantité du biométhane observés pendant la surveillance du site dépendent toujours de l'utilisation finale du biométhane. Les exigences les plus stricts sont pour l'injection directe dans le réseau de gaz naturel. De plus, l'acquisition et l'enregistrement de données observées sur site sont source d'information précieuse pour l'efficacité de l'unité de méthanisation. En premier, les données vont mettre en évidence les détériorations de performance qui interviennent tout au long de la durée de vie de l'unité et elles vont indiquer la maintenance à faire sur l'installation. Deuxièmement, pendant la mise en service et aussi pendant toute la durée de vie de l'installation les

données fournies vont permettre d'observer la performance de l'unité (vérification de la conformité), l'amélioration de l'efficacité ou au contraire la dégradation.

7. Conclusions

Les paramètres mesurables pour les unités de méthanisation et les technologies de traitement du biogaz sont nombreux. Il y a cependant encore un certain nombre de paramètres qui ne sont pas mesurés in situ et en temps réel. Dans certains cas, ceci se rapporte à des difficultés analytiques, dans d'autres, c'est en raison de l'entretien importants et de coûts. Dans ce guide de surveillance, plusieurs paramètres ont été choisis et définis, ce qui permettrait une approche efficace pour la surveillance. Ces paramètres de contrôle clés ont été choisis par des experts sur base de R&D et d'expériences pratiques en digestion anaérobie et d'unités de méthanisation dans toute l'Europe. Différents paramètres de surveillance peuvent s'appliquer selon l'objectif de l'unité de méthanisation et de traitement du biogaz, si le contrôle doit être effectué, le type et les caractéristiques des substrats utilisés, le type de technologies de conversion et les marchés du digestat et le biométhane produit.

Les types et les caractéristiques des substrats, leur préparation et leur stockage ainsi que la conception du digesteur aura un impact significatif sur la performance de l'unité de méthanisation. En outre, chaque consortium multi-bactérien peut être unique (dans la diversité et la quantité) et les réactions chimiques sont également complexes. Par conséquent, et même s'il y a des similitudes dans les performances, les digesteurs ne sont pas les mêmes et ne répondent pas toujours de la même manière. Bien qu'il existe des lignes directrices générales pour gérer le fonctionnement des digesteurs, les niveaux optimaux exacts des différents composants biochimiques ne peuvent être parfaitement défini. En général, la caractérisation fréquente des substrats (matières organiques et humidité, biodégradabilité, éléments nutritifs et oligo-élément et éventuellement de composés inhibiteurs) qui conduisent à une conception et un fonctionnement de digestion appropriée avec la réponse des contrôles des performances du digesteur, par exemple en terme de débits du méthane, ainsi que les AGV résiduelles individuelles et l'alcalinité, seraient des paramètres de surveillance idéaux. Ces paramètres sont de concert, capables, dans la plupart des cas, d'être en mesure de dicter des mesures de contrôle appropriées et assez rapides, nécessaires pour optimiser la performance du digesteur. Parfois, cependant, afin de bien comprendre les raisons de moins bons résultats, un paramétrage approfondi doit être effectué, incluant les évaluations de l'activité, la diversité et la quantité des différentes populations microbiennes. En plus d'effectuer des activités de surveillance et de contrôle au profit de l'amélioration du fonctionnement et de l'efficacité du digesteur, il peut y avoir d'autres raisons pour surveiller la qualité du digestat soit par exemple pour répondre aux conditions de rejet d'effluents ou aux exigences des critères de fin de vie des déchets.

De même, il a été montré que la surveillance de la qualité et de la quantité de biométhane ainsi que de plusieurs paramètres d'unité de production de biométhane apporter une contribution significative au bon fonctionnement, efficace, sûr et fiable, d'une unité de traitement de biogaz. Le suivi et le stockage de données à partir d'un certain nombre de paramètres de la qualité du biométhane est une obligation pour l'injection de ce dernier dans le réseau de gaz naturel ou pour l'approvisionnement en carburant des véhicules, mais les critères exacts diffèrent dans chaque pays. Néanmoins, une documentation complète et vérifiable du biométhane produit est obligatoire et doit également être considéré comme un atout lors de l'exploitation des installations. Selon la technologie de traitement du biogaz appliquée, la surveillance et le stockage de certains paramètres de fonctionnement des unités permettre l'identification de la détérioration de la performance des sites ou des possibilités d'amélioration d'efficacité. En outre, la maintenance préventive et l'entretien de l'unité et de ses composants sont pris en charge par un régime global de surveillance, conduisant à maximiser la validité de l'unité de méthanisation.

8. Références

- Boe K., Batstone D.J., Steyer J.-P. and Angelidaki I. (2010) State indicators for monitoring the anaerobic digestion process. *Water Research* 44: 5973-5980.
- Boe, K., Batstone, D.J., Angelidaki, I. (2007) An innovative online VFA monitoring system for the anaerobic process, based on headspace gas chromatography. *Biotechnology and Bioengineering*, 96 (4): 712-721.
- Chen Y., Cheng J.J., Creamer K.S. (2008) Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology* 99(10): 4044–4064
- De Vrieze J, Hennebel T., Boon N., and Verstraete W. (2012) *Methanosarcina*: The rediscovered methanogen for heavy duty biomethanation. *Bioresource Technology* 112: 1-9.
- Esteves, S.R.R., Wilcox, S.J, O'Neill, C., Hawkes, F.R. and Hawkes, D.L. (2000) On-line Monitoring of Anaerobic-Aerobic Biotreatment of a Simulated Textile Effluent for Selection of Control Parameters. *Environmental Technology* 21(8): 927-936.
- Fricke K., Santen H., Wallmann R., Huttner A. and Dichtl N. (2006) Operating problems in anaerobic digestion plants resulting from nitrogen in MSW. *Waste Management* 27: 30–43.
- Jacobi, H.F., Moschner, C.R, and Hartung, E. (2009) Use of near infrared spectroscopy in monitoring of volatile fatty acids in anaerobic digestion. *Water Science and Technology* 60(2), 339 – 346.
- Lesteur, M., Latrille, E., Bellon-Maurel, V., Roger, J.M., Gonzalez, C., Junqua, G. and Steyer, J.P. (2010) First step towards a fast analytical method for the determination of biochemical methane potential of solid wastes by near infrared spectroscopy. *Bioresource Technology*. 102(3): 2280-2288.
- Lhunegbo F.N., Madsen M., Esbensen K.H., Holm-Nielsen J.B. and Halstensen M. (2012) Acoustic chemometric prediction of total solids in bioslurry: A full-scale feasibility study for on-line biogas process monitoring. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 110 (1): 135–143
- Lomborg C.J, Holm-Nielsen J. B., Oleskowicz-Popiel P, Esbensen K.H. (2009) Near infrared and acoustic chemometrics monitoring of volatile fatty acids and dry matter during co-digestion of manure and maize silage. *Bioresource Technology* 100 (5): 1711–1719
- Madsen M., Holm-Nielsen J.B. and Esbensen K.H. (2011) Monitoring of anaerobic digestion processes: A review perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 3141 – 3155
- Monson K.D., Esteves S.R., Guwy A.J. and Dinsdale R.M. (2007) *Anaerobic Digestion of Biodegradable Municipal Wastes – A Review*, University of Glamorgan ISBN 978-1-84054-156-5.
- Reed, J.P., Devlin, D., Esteves, S.R.R., Dinsdale, R., Guwy, A.J. (2011) Performance parameter prediction for sewage sludge digesters using reflectance FT-NIR spectroscopy. *Water Research*, 45(8): 2463 – 2472.
- Spanjers, H. and van Lier, J.B. (2006) Instrumentation in anaerobic treatment – research and practice. *Water Science and Technology*, 53(4-5): 63-76.
- Steyer J.P., Bouvier J.C., Conte T., Gras P., Sousbie P. (2002) Evaluation of a four year experience with a fully instrumented anaerobic digestion process. *Water Science and Technology*, 45(4-5): 495 – 502.